

А.Е.ЗОРОХОВИЧ, С.С.КРЫЛОВ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРО- ТЕХНИКИ ДЛЯ ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Утверждено
Главным управлением
учебными заведениями МПС
в качестве учебника
для технических школ



МОСКВА «ТРАНСПОРТ» 1987

ББК 39.22-08

З 86

УДК 629.42.064.5(075) + 621.3(075)

Книгу написали: введение и главы первую — седьмую — профессор, д-р техн. наук *Зорохович А. Е.*, главы восьмую — десятую — канд. техн. наук *Крылов С. С.*

Рецензент Н. А Спирова

Заведующий редакцией Н. В. Зенькович

Редактор Н. А. Голованова

Зорохович А. Е., Крылов С. С.

386 Основы электротехники для локомотивных бригад: Учебник для техн. школ. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1987. — 414 с.: ил., табл.

В книге изложены физические основы электротехники, теория электрических цепей постоянного и переменного тока, устройство машин постоянного и переменного тока, трансформаторов, магнитных усилителей, принцип действия и устройство электроизмерительных приборов и электрических аппаратов, методы электрических измерений. Даны общие сведения об электротехнических материалах.

Настоящее издание по сравнению с 1-м изданием, выпущенным в 1981 г., дополнено описанием новых машин переменного тока.

Книга предназначена учащимся технических школ и может быть полезной широкому кругу работников, связанных с эксплуатацией и ремонтом электрического подвижного состава и тепловозов.

З 3602030000-237 131-87
049(01)-87

ББК 39.22-08

© Издательство «Транспорт». 1987

Электротехника есть наука о техническом использовании электрических и электромагнитных явлений. Широкое распространение электротехники в современной промышленности и на транспорте объясняется относительной простотой получения электрической энергии, передачи ее на дальние расстояния, распределения между потребителями и преобразования в другие виды энергии.

Применение электричества в народном хозяйстве еще К. Марксом и Ф. Энгельсом рассматривалось как высшая техническая основа экономики будущего общества. Отмечая новейшее открытие — передачу тока высокого напряжения на расстояние, Ф. Энгельс указывал, что оно «... окончательно освобождает промышленность почти от всяких границ, налагаемых местными условиями, делает возможным использование также и самой отдаленной водяной энергии, и если вначале оно будет полезно только для городов, то в конце концов оно станет самым мощным рычагом для устранения противоположности между городом и деревней»¹.

В. И. Ленин задолго до Великой Октябрьской социалистической революции в своих работах неоднократно писал о перспективах электрификации народного хозяйства при социализме. В. И. Ленин считал электрификацию — строительство электростанций и линий электропередачи, широкое использование электрической энергии в промышленности и быту — одной из важнейших народнохозяйственных задач. Он выдвинул широкоизвестную формулу «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны»². В. И. Ленин подчеркнул, что высшая форма общественного развития — коммунизм — может быть достигнута только на базе современной техники, основанной на электрификации.

В декабре 1920 г. на VIII Всероссийском съезде Советов по инициативе В. И. Ленина обсужден и через год принят план Государственной электрификации России (план ГОЭЛРО). По плану ГОЭЛРО было намечено в течение 10—15 лет ввести в действие 30 новых районных электростанций общей мощностью 1,5 млн. кВт и расширить действующие электростанции, увеличив их мощность на 250 тыс. кВт. Планом ГОЭЛРО предусматривалось также строительство линий электропередачи высокого напряжения, широкое использование электрической энергии в промышленности и электрификация железнодорожного транспорта. В 1931 г. план ГОЭЛРО был выполнен по всем показателям.

Последующие планы развития народного хозяйства Советского Союза основывались на ленинских принципах электрификации

¹ Маркс К., Энгельс Ф. Соч. Изд. 2-е, т. 35, с. 374.

² Ленин В. И. Полн. собр. соч. Изд. 5-е, т. 42, с. 159.

страны. Опережающими темпами развивались электроэнергетика и электротехническая промышленность. Было обеспечено централизованное электроснабжение всего народного хозяйства, резко повысилась электровооруженность труда, была проведена реконструкция железнодорожного транспорта на основе его электрификации.

Электрификация является стержнем строительства экономики социалистического общества. Она играет ведущую роль в развитии всех отраслей народного хозяйства, в осуществлении современного технического прогресса.

Развитие экономики Советского Союза всегда основывалось на широком применении электрической энергии, которая обеспечивает ускорение технического прогресса, рост производительности труда и быстрее построение материально-технической базы коммунизма. В целях дальнейшего развития экономики разработана Энергетическая программа, которая предусматривает повышение уровня электрификации производства и эффективности использования энергии; развитие ускоренными темпами электроэнергетической и электротехнической промышленности; увеличение производства электроэнергии; строительство все более мощных тепловых, гидравлических и атомных электростанций; формирование Единой энергетической системы страны путем сооружения магистральных линий электропередачи напряжением 500, 750, 1150, 1500 кВ; развитие электрификации железных дорог; применение в промышленности, сельском хозяйстве и на транспорте автоматики, электроники и вычислительной техники.

Основные направления экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года, принятые XXVII съездом КПСС, предусматривают в 12-й пятилетке повышение уровня электрификации производства и эффективности использования электроэнергии; развитие ускоренными темпами электроэнергетики и электротехнической промышленности; увеличение производства электроэнергии в 1990 г. до 1840—1880 млрд. кВт·ч, в том числе на атомных электростанциях до 390 млрд. кВт·ч.

Железнодорожный транспорт Советского Союза практически полностью переведен на электрическую и тепловозную тягу, при которых перевозки осуществляются локомотивами, оборудованными электрическими двигателями. По общей протяженности железных дорог, переведенных на электрическую тягу, и по темпам ее развития Советский Союз далеко опередил главные капиталистические страны и прочно занимает первое место в мире. По протяженности железных дорог, переведенных на тепловозную тягу, Советский Союз занимает второе место в мире.

В 12-й пятилетке предстоит электрифицировать 8000 км железнодорожных линий, обновить и пополнить парк локомотивов и вагонов путем оснащения его более надежными и экономичными локомотивами новых серий, электро- и дизель-поездами, грузовыми вагонами повышенной грузоподъемностью и вместимостью, пас-

сажирскими вагонами и комфортабельными вагонами метрополитена.

Электрические и электромагнитные явления были открыты в конце XVIII — начале XIX столетий. В это же время были созданы первые химические источники тока (гальванические элементы). В первой половине XIX столетия были в основном изучены химические, тепловые, световые и магнитные действия электрического тока и открыты важнейшие законы электротехники. Важная роль в открытии этих законов принадлежит известному ученому-физикам, имена которых носят основные законы электротехники и единицы измерения главных электрических величин: А. Амперу, А. Вольту, Г. Герцу, Д. Джоулю, Г. Кирхгофу, Ш. Кулону, Д. Максвеллу, Н. Ому, Н. Тесла, М. Фарадею, Г. Эрстеду и др., а также русским ученым М. В. Ломоносову, Э. Х. Ленцу, П. Н. Лебедеву, В. В. Петрову, А. Г. Столетову и др.

Во второй половине XIX столетия ученые и изобретатели создают различные электрические машины, приборы и устройства, позволяющие применять электрическую энергию для практических целей. Первые электрические машины и устройства использовали энергию постоянного тока. Однако значительные преимущества переменного тока при передаче, распределении электрической энергии и преобразовании ее в механическую работу обусловили быстрое развитие электрификации на переменном токе. В развитии техники переменного тока ведущая роль принадлежит русским ученым и изобретателям: П. Н. Яблочкову, создавшему конструкции генераторов переменного тока и трансформатора с разомкнутым магнитопроводом; Д. А. Лачинову, разработавшему теорию передачи электрической энергии на дальние расстояния; М. О. Доливо-Добровольскому, разработавшему систему трехфазного переменного тока и создавшему трехфазный трансформатор, трехфазные асинхронные электродвигатели и др.

На основе применения электрической энергии были разработаны совершенно новые направления техники, такие, как радиотехника (А. С. Попов), электрическая тяга (Ф. А. Пироцкий, А. Б. Лебедев, В. А. Шевалин), электропривод (В. Н. Чиколев, Б. С. Якоби), электрическая сварка (Н. Г. Славянов и Н. Н. Бернадос), электрическое освещение (А. Н. Ладыгин и П. Н. Яблочков) и др.

В развитии электротехники и практическом применении ее достижений в народном хозяйстве большая роль принадлежит советским ученым: А. Е. Алексееву, С. И. Вавилову, А. Ф. Иоффе, Г. М. Кржижановскому, М. П. Костенко, К. А. Кругу, В. С. Кулебакину, И. В. Курчатову, М. А. Шателену, К. И. Шенферу и другим.

Громадное количество дешевой электрической энергии, которое в ближайшее время получит народное хозяйство СССР, создает необходимые предпосылки для дальнейшего развития электрификации промышленности, транспорта, сельского хозяйства и быта советских людей с целью более полного удовлетворения их материальных и духовных потребностей.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ

§ 1. Основные сведения о строении вещества и физической природе электричества

Строение вещества. Наукой установлено, что все тела состоят из отдельных очень малых частиц — *атомов* и *молекул*. В природе имеется свыше 100 видов атомов, которые различаются массой и химическими свойствами. Каждый химический элемент — водород, гелий, кислород, углерод, железо, медь, алюминий, золото, радий, уран и пр. — состоит из атомов определенного вида. Молекулы образованы из нескольких атомов одного или различных химических элементов. Например, молекулы воды содержат атомы водорода и атомы кислорода, молекулы поваренной соли — атомы хлора и атомы натрия и т. д.

Строение атома весьма сложно. Упрощенно атом можно представить в виде ядра, окруженного оболочкой. Оболочка образована из постоянно движущихся с чрезвычайно большой скоростью мельчайших частиц — *электронов*, ядро — из *протонов* и *нейтронов*. Атомы настолько малы, что их нельзя увидеть даже в самый сильный микроскоп. В атомах разных химических элементов содержится различное количество протонов, нейтронов и электронов.

Электроны располагаются вокруг ядра $Я$ (рис. 1) несколькими слоями (оболочками) на очень большом по сравнению со своими размерами расстоянии. Оболочки обозначаются латинскими буквами K, L, M, N, O, P и Q (в порядке удаления их от ядра). Самым простым атомом является атом водорода: он имеет только один электрон, расположенный на оболочке K . Атом гелия (рис. 2, a) имеет два электрона, расположенных на оболочке K ; атом кислорода (рис. 2, b) — восемь электронов, расположенных на оболочках K и L . В атоме алюминия (см. рис. 1, a) электроны располагаются на трех электронных оболочках, в атоме меди (см. рис. 1, b) — на четырех оболочках. В наиболее сложных атомах радия и урана электроны располагаются на всех семи возможных оболочках. В пределах каждой оболочки электроны могут двигаться вокруг ядра только по строго определенным или, как их принято называть, разрешенным орбитам (см. рис. 2).

Согласно современным представлениям каждый из имеющихся в атоме электронов стремится занять одну из ближайших к ядру разрешенных орбит, остальные возможные орбиты пустуют. Электрон, вращающийся на самой близкой к ядру орбите, обладает минимальным количеством энергии, а вращающийся на самой уда-

ленной — максимальной энергией (точно так же, как маховик малого диаметра может запасти значительно меньше энергии, чем маховик большого диаметра). Переход электрона с одной орбиты на другую связан с изменением его энергетического уровня.

Электроны, расположенные на внешней, самой удаленной от ядра оболочке, называются *валентными*. Ими определяется способность атомов данного элемента вступать в химические связи друг с другом и с атомами других элементов, а также электропроводность различных материалов.

Ядро и электроны обладают *электрическими зарядами*. Протоны имеют положительный заряд, электроны — отрицательный. Заряды протона и электрона равны. Нейтроны не имеют электрического заряда, т. е. являются нейтральными частицами. Между отрицательно заряженными электронами и положительно заряженным ядром возникают электрические силы, которые удерживают электроны в атоме и заставляют их двигаться вокруг ядра. Эти электрические силы определяют и размеры атомов. При очень тесном сближении двух атомов возникают огромные силы отталкивания между их электронами. Они препятствуют дальнейшему сближению и определяют объем, занимаемый атомом; внутри этого объема не может проникнуть другой атом.

Ядра атомов являются значительно более устойчивыми системами, чем их электронные оболочки. Объясняется это тем, что между протонами и нейтронами действуют огромные силы взаимного притяжения, называемые *ядерными силами*. Эти силы значительно больше сил взаимного отталкивания между одноименными

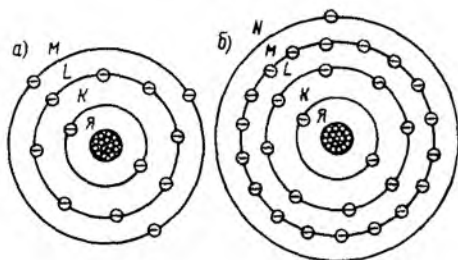


Рис. 1. Схематическое изображение атомов алюминия (а) и меди (б)

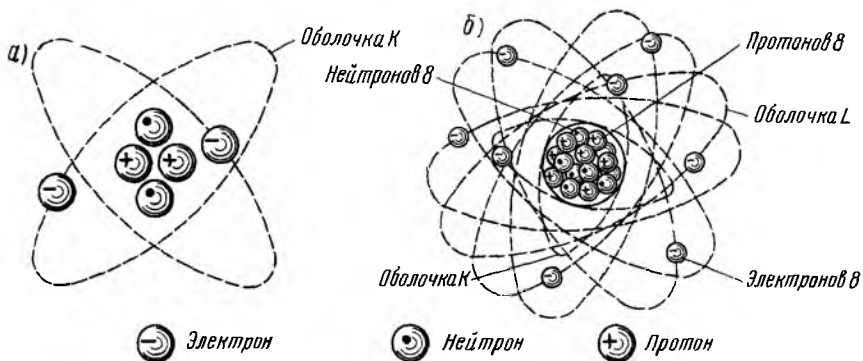


Рис. 2. Атомы гелия (а) и кислорода (б)

электрическими зарядами протонов, поэтому ядра атомов большинства химических элементов разделить на части очень трудно. Существуют, однако, и такие вещества (радий, уран, плутоний и др.), ядра атомов которых постепенно и самопроизвольно распадаются с выделением энергии. Эта энергия уносится в пространство в виде излучений. Такие вещества называются *радиоактивными*. Энергию, выделяющуюся при самопроизвольных, а также вызванных искусственным путем превращениях ядер атомов, называют *атомной*, или *ядерной*, *энергией*.

Несмотря на то, что все атомы состоят из электрически заряженных частиц, мы не наблюдаем электрических сил притяжения и отталкивания между окружающими нас телами. Это происходит потому, что общий отрицательный заряд всех электронов в атоме равен положительному заряду ядра, а атом в целом электрически нейтрален. Поэтому и тело, состоящее из атомов, не обладает электрическим зарядом и не проявляет электрических свойств.

Атомы различных элементов отличаются друг от друга не только числом электронов, но и строением ядер. Чем больше электронов в оболочке атома, тем больше должно быть протонов в его ядре. Заряд ядра зависит от числа положительных частиц — протонов. Масса ядра атома зависит от числа протонов и нейтронов.

В природе существует несколько видов атомов, имеющих одинаковый заряд ядра, но разную массу. Это означает, что атомы таких элементов содержат одинаковое число протонов, но различное число нейтронов. Такие атомы получили название *изотопов*. Радиоактивные изотопы, которые нашли сейчас широкое применение в науке и технике, можно получать искусственным путем в так называемых реакторах.

Физическая природа электричества. Многие электрические явления и электрические свойства тел можно весьма просто и наглядно объяснить на основе электронной теории. Согласно этой теории атомы при определенных условиях могут терять электроны или приобретать их от соседних атомов. В этом случае они перестают быть нейтральными, так как равновесие их электрических зарядов нарушается. Атомы, потерявшие часть своих электронов, становятся положительно заряженными и называются *положительными ионами*. Атомы, получившие избыточные электроны, становятся отрицательно заряженными и называются *отрицательными ионами*.

Процесс превращения нейтральных атомов в электрически заряженные частицы — ионы — называют *ионизацией*. Ионизация может возникнуть только при сообщении атому определенного количества энергии: в виде тепла, путем бомбардировки его какими-либо частицами, при воздействии внешнего электрического поля и т. д. Наибольшая энергия требуется для освобождения валентных электронов. При сообщении атому сравнительно небольшой энергии валентные электроны кратковременно переходят на более удаленную орбиту, а затем перескакивают на прежнюю, более близкую к ядру. Однако при достаточно большой энергии (*энергии иони-*

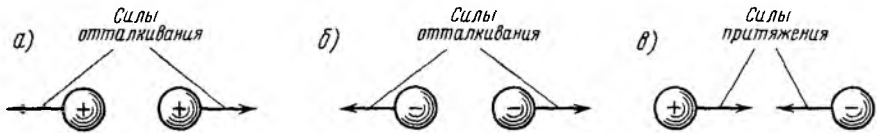


Рис. 3. Схемы взаимодействия электрических зарядов одноименных (а и б) и разноименных (в)

зации) эти электроны могут совершенно оторваться от ядра и стать свободными.

Если в каком-либо теле накопятся электроны или ионы, то говорят, что в теле накопилось электричество. Такое тело становится электрически заряженным и приобретает электрические свойства. Эти свойства есть по сути дела проявление электрических сил, действующих между электронами и ядрами атомов. Тело, приобретающее электроны, тем самым получает отрицательный заряд. При потере электронов тело приобретает положительный заряд.

Электрические заряды. Количество электричества, содержащееся в заряженном теле, называется *электрическим зарядом*. Заряды бывают двух знаков: положительные (обозначаются знаком «+») и отрицательные (обозначаются знаком «-»).

Единицей электрического заряда в физике принято считать заряд электрона. В этих единицах измеряют количество электричества, запасенное в атомах разных веществ. Однако заряд электрона очень мал, поэтому им практически неудобно измерять количество электричества, проходящее по проводам или поступающее в различные электрические устройства. В практической электротехнике для измерения электрических и магнитных величин принята *Международная система единиц (СИ — система интернациональная)*. В этой системе электрические заряды, т. е. количество электричества, измеряют в кулонах (Кл); 1 Кл больше заряда электрона в $6,29 \cdot 10^{18}$ раз. Если по проводу прошло $6,29 \cdot 10^{18}$ электронов, то говорят, что по проводу прошло количество электричества, равное 1 Кл.

При взаимодействии электрических зарядов (электрически заряженных тел) между ними возникают электрические силы притяжения или отталкивания. Одноименные заряды создают силы отталкивания, разноименные — силы притяжения (рис. 3.).

§ 2. Электрическое поле. Напряженность поля, электрический потенциал и напряжение

Физическая природа электрического поля и его графическое изображение. В пространстве вокруг электрически заряженного тела существует *электрическое поле*, представляющее собой один из видов материи. Электрическое поле обладает запасом электрической энергии, которая проявляется в виде электрических сил, действующих на находящиеся в поле заряженные тела.

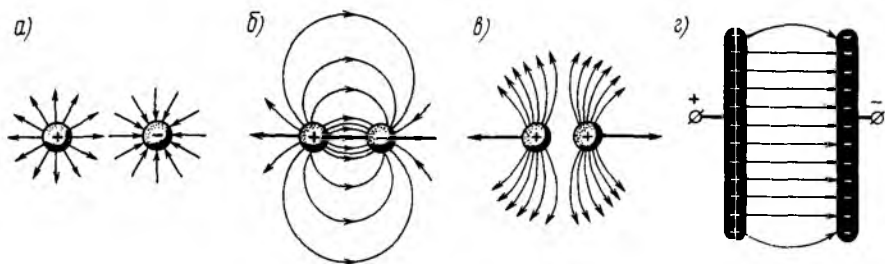


Рис. 4. Простейшие электрические поля:

a — одиночных положительного и отрицательного зарядов; *б* — двух разноименных зарядов; *в* — двух одноименных зарядов; *г* — двух параллельных и разноименно заряженных пластин (однородное поле)

Электрическое поле условно изображают в виде электрических силовых линий, которые показывают направления действия электрических сил, создаваемых полем. Принято направлять силовые линии в ту сторону, в которую двигалась бы в электрическом поле положительно заряженная частица. Как показано на рис. 4, электрические силовые линии расходятся в разные стороны от положительно заряженных тел и сходятся у тел, обладающих отрицательным зарядом. Поле, созданное двумя плоскими разноименно заряженными параллельными пластинами (рис. 4, *г*), называется *однородным*.

Электрическое поле можно сделать видимым, если поместить в него взвешенные в жидком масле частички гипса: они поворачиваются вдоль поля, располагаясь по его силовым линиям (рис. 5).

Напряженность поля. Электрическое поле действует на внесенный в него заряд q (рис. 6) с некоторой силой F . Следовательно, об интенсивности электрического поля можно судить по значению силы, с которой притягивается или отталкивается некоторый электрический заряд, принятый за единицу. В электротехнике интенсивность поля характеризуют *напряженностью электрического поля E* . Под напряженностью понимают отношение силы F , действующей на заряженное тело в данной точке поля, к заряду q этого тела:

$$E = F/q. \quad (1)$$

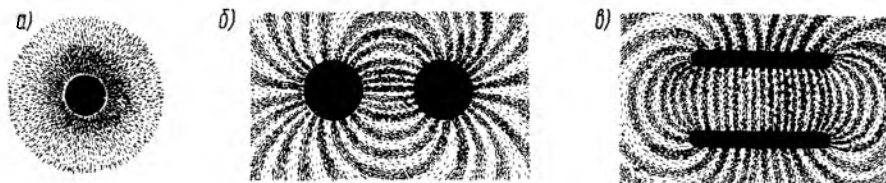


Рис. 5. Картина распределения силовых линий электрического поля:

a — заряженный шар; *б* — разноименно заряженные шары; *в* — разноименно заряженные параллельные пластины

Поле с большой напряженностью E изображается графически силовыми линиями большой густоты; поле с малой напряженностью — редко расположенными силовыми линиями. По мере удаления от заряженного тела силовые линии электрического поля располагаются реже, т. е. напряженность поля уменьшается (см. рис. 4, а, б и в). Только в однородном электрическом поле (см. рис. 4, г) напряженность одинакова во всех его точках.

Электрический потенциал. Электрическое поле обладает определенным запасом энергии, т. е. способностью совершать работу. Как известно, энергию можно также накопить в пружине, для чего ее нужно сжать или растянуть. За счет этой энергии можно получить определенную работу. Если освободить один из концов пружины, то он сможет переместить на некоторое расстояние связанное с этим концом тело. Точно так же энергия электрического поля может быть реализована, если внести в него какой-либо заряд. Под действием сил поля этот заряд будет перемещаться по направлению силовых линий, совершая определенную работу.

Для характеристики энергии, запасенной в каждой точке электрического поля, введено специальное понятие — *электрический потенциал*. Электрический потенциал ϕ поля в данной точке равен работе, которую могут совершить силы этого поля при перемещении единицы положительного заряда из этой точки за пределы поля.

Понятие электрического потенциала аналогично понятию уровня для различных точек земной поверхности. Очевидно, что для подъема локомотива в точку B (рис. 7) нужно затратить большую работу, чем для подъема его в точку A . Поэтому локомотив, поднятый на уровень H_2 , при спуске сможет совершить большую работу, чем локомотив, поднятый на уровень H_1 . За нулевой уровень, от которого производится отсчет высоты, принимают обычно уровень моря.

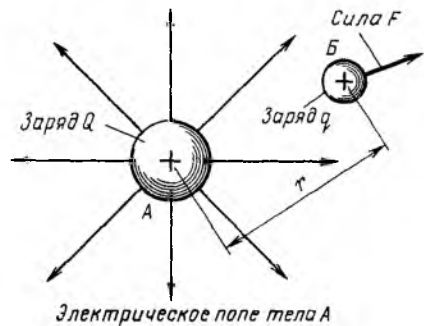


Рис. 6. Схема действия электрического поля на внесенный в него электрический заряд q

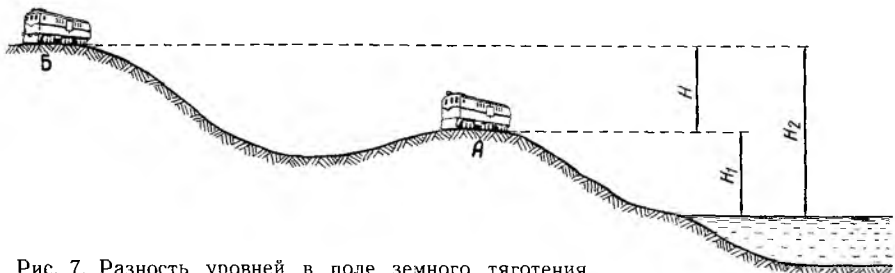


Рис. 7. Разность уровней в поле земного тяготения

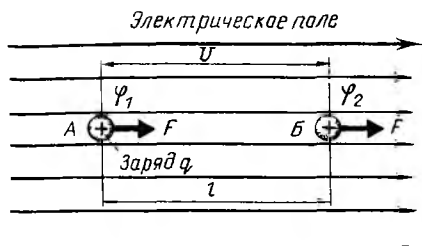


Рис. 8. Разность потенциалов U между точками A и B электрического поля определяет работу, которая затрачивается на перемещение заряда q между этими точками

Точно так же за нулевой потенциал условно принимают потенциал, который имеет поверхность земли.

Электрическое напряжение. Различные точки электрического поля обладают разными потенциалами. Обычно нас мало интересует абсолютная величина потенциалов отдельных точек электрического поля, но нам весьма важно знать *разность потенциалов* $\varphi_1 - \varphi_2$ между двумя точками поля A и B (рис. 8). Разность потенциалов φ_1 и φ_2 двух точек поля характеризует собой работу, затрачиваемую силами поля на перемещение единичного заряда из одной точки поля с большим потенциалом в другую точку с меньшим потенциалом. Точно так же нас на практике мало интересуют абсолютные высоты H_1 и H_2 точек A и B над уровнем моря (см. рис. 7), но для нас важно знать разность уровней H между этими точками, так как на подъем локомотива из точки A в точку B надо затратить работу, зависящую от величины H . Разность потенциалов между двумя точками поля носит название *электрического напряжения*. Электрическое напряжение обозначают буквой $U(u)$. Оно численно равно отношению работы W , которую нужно затратить на перемещение положительного заряда q из одной точки поля в другую, к этому заряду, т. е.

$$U = W/q. \quad (2)$$

Следовательно, напряжение U , действующее между различными точками электрического поля, характеризует запасенную в этом поле энергию, которая может быть отдана путем перемещения между этими точками электрических зарядов.

Электрическое напряжение — важнейшая электрическая величина, позволяющая вычислять работу и мощность, развиваемую при перемещении зарядов в электрическом поле. Единицей электрического напряжения служит вольт (В). В технике напряжение иногда измеряют в тысячных долях вольта — милливольт (мВ) и миллионных долях вольта — микровольтах (мкВ). Для измерения высоких напряжений пользуются более крупными единицами — киловольтами (кВ) — тысячами вольт.

Напряженность электрического поля при однородном поле представляет собой отношение электрического напряжения, дейст-

вующего между двумя точками поля, к расстоянию l между этими точками:

$$E = U/l. \quad (3)$$

Напряженность электрического поля измеряют в вольтах на метр (В/м). При напряженности поля в 1 В/м на заряд в 1 Кл действует сила, равная 1 ньютону (1 Н). В некоторых случаях применяют более крупные единицы измерения напряженности поля В/см (100 В/м) и В/мм (1000 В/м).

§ 3. Электрический ток и электропроводность вещества

Электрический ток. В веществе, помещенном в электрическое поле, под действием сил поля возникает процесс движения элементарных носителей электричества — электронов или ионов. Движение этих электрически заряженных частиц материи называют *электрическим током*.

За единицу силы тока принят ампер (А). Это такой ток, при котором через поперечное сечение проводника каждую секунду проходит количество электричества, равное 1 Кл. Силу тока иногда измеряют тысячными долями ампера — миллиамперами (мА) или миллионными долями ампера — микроамперами (мкА), а при больших значениях — тысячами ампер — килоамперами (кА), в формулах ток обозначают буквой I (i).

В электротехнике широко применяют как постоянный, так и переменный ток. *Постоянным* называют ток, значение и направление которого в любой момент времени остаются неизменными (рис. 9, а). Токи, значение и направление которых не остаются постоянными, называют *изменяющимися*, или *переменными*. Чаще всего в электротехнических устройствах используют ток, изменяющийся по синусоидальному закону, который получают от генераторов переменного тока и трансформаторов (рис. 9, б). От выпрямителей получают пульсирующий ток (рис. 9, в), неизменный по направлению, но меняющийся по величине.

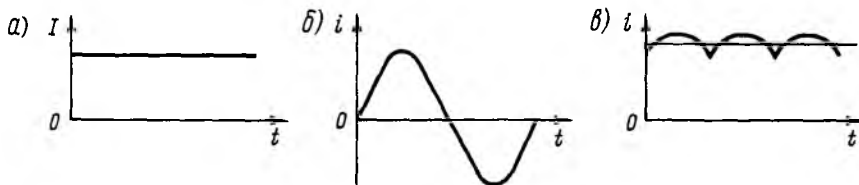


Рис. 9. Зависимости тока от времени:

а — постоянный ток; б — переменный синусоидальный ток; в — пульсирующий ток

Электропроводность. Свойство вещества проводить электрический ток под действием электрического поля называют электропроводностью. Электропроводность различных веществ зависит от концентрации свободных (т. е. не связанных с атомами, молекулами или кристаллической структурой) электрически заряженных частиц. Чем больше концентрация этих частиц, тем больше электропроводность данного вещества. Все вещества в зависимости от электропроводности делят на три группы: проводники, диэлектрики (изолирующие материалы) и полупроводники.

Проводники обладают очень высокой электропроводностью. Существуют два рода проводников, которые различаются физической природой протекания электрического тока. К проводникам первого рода относятся металлы. Прохождение по ним тока обусловлено движением свободных электронов, вследствие чего их называют проводниками с электронной проводимостью. Проводниками второго рода являются растворы кислот, щелочей и солей (в основном водные), называемые *электролитами*. Прохождение тока через электролиты связано с движением электрически заряженных частей молекул — положительных и отрицательных ионов, т. е. электролиты являются проводниками с ионной проводимостью.

Имеются также вещества со смешанной проводимостью, в которых ток переносится электронами и ионами. К ним относятся, например, газы и пары в ионизированном состоянии.

Физическая природа электропроводности металлов. Высокая электропроводность металлов хорошо объясняется на основе электронной теории. Согласно этой теории валентные электроны сравнительно слабо связаны с их ядрами. Поэтому они свободно перемещаются между атомами, переходя из сферы действия одного атома в сферу действия другого и заполняя пространство между ними наподобие газа. Эти электроны принято называть *свободными*.

Свободные электроны *1* находятся в состоянии беспорядочного движения (рис. 10, *а*). Однако если внести металлический проводник в электрическое поле, то свободные электроны под действием сил поля начнут перемещаться в сторону положительного полюса (рис. 10, *б*), создавая электрический ток. Таким образом, электрическим током в металлических проводниках называется упорядоченное (направленное) движение свободных электронов.

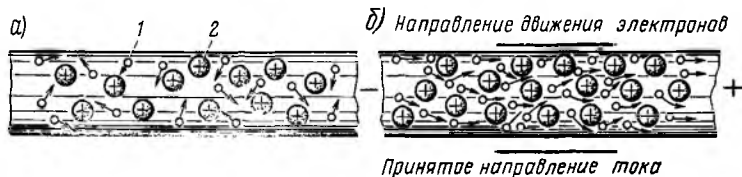


Рис. 10. Схема возникновения электрического тока в металлических проводниках: *а* — беспорядочное движение электронов; *б* — упорядоченное движение электронов

Металлоиды имеют на внешней оболочке большое количество электронов и они прочно удерживаются около своих ядер. Поэтому металлоиды, как правило, являются диэлектриками.

Скорость прохождения тока. Электрическое поле распространяется в пространстве с огромной скоростью — 300 000 км/с, т. е. со скоростью света. С такой же скоростью проходит и электрический ток в проводнике. Однако каждый отдельный электрон движется в среднем по проводнику со скоростью несколько миллиметров или сантиметров в секунду (эта скорость зависит от напряженности электрического поля).

Чем же объяснить такую скорость распространения электрического тока? Причина в том, что каждый электрон находится в общем электронном потоке, заполняющем проводник, и при прохождении электрического тока испытывает непрерывное воздействие со стороны соседних электронов. Поэтому, хотя сам электрон движется медленно, скорость передачи движения от одного электрона к другому (скорость распространения электрической энергии) будет огромна. Например, при включении рубильника на электростанции практически мгновенно появляется ток в каждом участке электрической цепи целого города, несмотря на незначительную скорость движения электронов.

§ 4. Электрическое сопротивление и проводимость

Физическая природа электрического сопротивления. При движении свободных электронов в проводнике они сталкиваются на своем пути с положительными ионами 2 (см. рис. 10, а), атомами и молекулами вещества, из которого выполнен проводник, и передают им часть своей энергии. При этом энергия движущихся электронов в результате столкновения их с атомами и молекулами частично выделяется и рассеивается в виде тепла, нагревающего проводник. Ввиду того что электроны, сталкиваясь с частицами проводника, преодолевают некоторое сопротивление движению, принято говорить, что проводники обладают электрическим сопротивлением. Если сопротивление проводника мало, он сравнительно слабо нагревается током; если сопротивление велико, проводник может раскалиться. Провода, подводящие электрический ток к электрической плитке, почти не нагреваются, так как их сопротивление мало, а спираль плитки, обладающая большим сопротивлением, раскаляется докрасна. Еще сильнее нагревается нить электрической лампы.

За единицу сопротивления принят ом. Сопротивлением 1 Ом обладает проводник, по которому проходит ток 1 А при разности потенциалов на его концах (напряжении), равной 1 В. Эталоном сопротивления 1 Ом служит столбик ртути длиной 106,3 см и площадью поперечного сечения 1 мм² при температуре 0 °С. На практике часто сопротивления измеряют тысячами ом — килоомами

(кОм) или миллионами ом — мегаомами (МОм). Сопротивление обозначают буквой $R(r)$.

Проводимость. Всякий проводник можно характеризовать не только его сопротивлением, но и так называемой проводимостью — способностью проводить электрический ток. Проводимость есть величина, обратная сопротивлению. Единица проводимости называется сименсом (См). 1 См равен 1/1 Ом. Проводимость обозначают буквой $G(g)$. Следовательно,

$$G = 1/R. \quad (4)$$

Удельное электрическое сопротивление и проводимость. Атомы разных веществ оказывают прохождению электрического тока неодинаковое сопротивление. О способности отдельных веществ проводить электрический ток можно судить по их *удельному электрическому сопротивлению* ρ . За величину, характеризующую удельное сопротивление, обычно принимают сопротивление куба с ребром 1 м. Удельное электрическое сопротивление измеряют в Ом·м. Для суждения об электропроводности материалов пользуются также понятием *удельная электрическая проводимость* $\sigma = 1/\rho$. Удельная электрическая проводимость измеряется в сименсах на метр (См/м) (проводимость куба с ребром 1 м). Часто удельное электрическое сопротивление выражают в ом-сантиметрах (Ом·см), а удельную электрическую проводимость — в сименсах на сантиметр (См/см). При этом 1 Ом·см = 10^{-2} Ом·м, а 1 См/см = 10^2 См/м.

Проводниковые материалы применяют, главным образом, в виде проводов, шин или лент, площадь поперечного сечения которых принято выражать в квадратных миллиметрах, а длину — в метрах. Поэтому для удельного электрического сопротивления подобных материалов и удельной электрической проводимости введены и другие единицы измерения: ρ измеряют в Ом·мм²/м (сопротивление проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 мм²), а σ — в См·м/мм² (проводимость проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 мм²).

Из металлов наиболее высокой электропроводностью обладают серебро и медь, так как структура их атомов позволяет легко передвигаться свободным электронам, затем следует золото, хром, алюминий, марганец, вольфрам и т. д. Хуже проводят ток железо и сталь.

Чистые металлы всегда проводят электрический ток лучше, чем их сплавы. Поэтому в электротехнике используют преимущественно очень чистую медь, содержащую только 0,05 % примесей. И наоборот, в тех случаях, когда необходим материал с высоким сопротивлением (для различных нагревательных приборов, реостатов и пр.), применяют специальные сплавы: константан, манганин, нихром, фехраль. В табл. 1 приведены значения удельного сопротивления некоторых проводниковых материалов, применяемых в электрическом оборудовании локомотивов.

Таблица 1

Наименование материала	Удельное сопротивление ρ при 20 °С, Ом·мм ² /м	Температурный коэффициент сопротивления α , 1/°С
Серебро	0,016	0,0035
Медь техническая	0,0172—0,0182	0,0041
Алюминий	0,0295	0,0040
Сталь	0,125—0,146	0,0057
Манганин	0,40—0,52	0,00003
Константан	0,44	0,00005
Нихром	1,02—1,12	0,0001
Фехраль	1,18—1,47	0,0008

Следует отметить, что в технике, кроме металлических проводников, используют и неметаллические. К таким проводникам относятся, например, уголь, из которого изготовляют щетки электрических машин, электроды для прожекторов и пр. Проводниками электрического тока являются толща земли, живые ткани растений, животных и человека. Проводят электрический ток сырое дерево и многие другие изоляционные материалы во влажном состоянии.

Электрическое сопротивление проводника зависит не только от материала проводника, но и его длины l и площади поперечного сечения s . (Электрическое сопротивление подобно сопротивлению, оказываемому движению воды в трубе, которое зависит от площади сечения трубы и ее длины.)

Сопротивление прямолинейного проводника

$$R = \rho l / s. \quad (5)$$

Если удельное сопротивление ρ выражено в Ом·мм²/м, то для того, чтобы получить сопротивление проводника в омах, длину его надо подставлять в формулу (5) в метрах, а площадь поперечного сечения — в квадратных миллиметрах.

Пример 1. Определить сопротивление медного провода длиной 100 м и площадью поперечного сечения 2 мм²; удельное сопротивление меди 0,0175 Ом·мм²/м
Решение. По формуле (5) получаем:

$$R = 0,0175 \cdot 100 / 2 = 0,875 \text{ Ом.}$$

Зависимость сопротивления от температуры. Электропроводность всех материалов зависит от их температуры. В металлических проводниках при нагревании размах и скорость колебаний атомов в кристаллической решетке металла увеличиваются, вследствие чего возрастает и сопротивление, которое они оказывают потоку электронов. При охлаждении происходит обратное явление: беспорядочное колебательное движение атомов в узлах кристаллической решетки уменьшается, сопротивление их потоку электронов понижается и электропроводность проводника возрастает.

В природе, однако, имеются некоторые сплавы: фехраль, константан, манганин и др., у которых в определенном интервале температур электрическое сопротивление меняется сравнительно мало. Подобные сплавы применяют в технике для изготовления различных резисторов, используемых в электроизмерительных приборах и некоторых аппаратах для компенсации влияния температуры на их работу.

О степени изменения сопротивления проводников при изменении температуры судят по так называемому *температурному коэффициенту сопротивления* α . Этот коэффициент представляет собой относительное приращение сопротивления проводника при увеличении его температуры на 1°C . В табл. 1 приведены значения температурного коэффициента сопротивления для наиболее применяемых проводниковых материалов.

Сопротивление металлического проводника R_t при любой температуре t

$$R_t = R_0[1 + \alpha(t - t_0)], \quad (6)$$

где R_0 — сопротивление проводника при некоторой начальной температуре t_0 (обычно при $+20^\circ\text{C}$), которое может быть подсчитано по формуле (5);

$t - t_0$ — изменение температуры.

Пример 2. Определить сопротивление медного контактного провода длиной 10 км и площадью сечения 100 мм^2 при 50°C .

Решение. По формуле (5) при 20°C

$$R_0 = \rho l / s = 0,0175 \cdot 10\,000 / 100 = 1,75 \text{ Ом.}$$

По формуле (6) при 50°C

$$R_t = R_0 [1 + \alpha(t - t_0)] = 1,75 [1 + 0,004(50 - 20)] = 1,96 \text{ Ом.}$$

Свойство металлических проводников увеличивать свое сопротивление при нагревании часто используют в современной технике для измерения температуры. Например, при испытаниях тяговых двигателей после ремонта температуру нагрева их обмоток определяют измерением их сопротивления в холодном состоянии и после работы под нагрузкой в течение установленного периода (обычно в течение 1 ч).

Исследуя свойства металлов при глубоком (очень сильном) охлаждении, ученые обнаружили замечательное явление: вблизи абсолютного нуля ($-273,16^\circ\text{C}$) некоторые металлы почти полностью утрачивают электрическое сопротивление. Они становятся идеальными проводниками, способными длительное время пропускать ток по замкнутой цепи без всякого воздействия источника электрической энергии. Это явление названо *сверхпроводимостью*. В настоящее время созданы опытные образцы линий электропередачи и электрических машин, в которых используется явление

сверхпроводимости. Такие машины имеют значительно меньшие массу и габаритные размеры по сравнению с машинами общего назначения и работают с очень высоким коэффициентом полезного действия. Линии электропередачи в этом случае можно выполнить из проводов с очень малой площадью поперечного сечения. В перспективе в электротехнике будет все больше и больше использоваться это явление.

§ 5. Электродвижущая сила и напряжение источника электрической энергии

При соединении проводником двух разноименно заряженных тел *a* и *б* (рис. 11, *a*), т. е. таких тел, между которыми действует некоторая разность потенциалов, свободные электроны в этих телах и в соединительном проводнике придут в движение и возникнет электрический ток. Этот ток будет протекать по проводнику до тех пор, пока потенциалы обоих тел не станут равными.

Можно, однако, обеспечить и непрерывное движение электронов по проводнику, соединяющему два разноименно заряженных тела, т. е. непрерывное прохождение электрического тока. Для этого надо каким-то образом возвращать электроны обратно на отрицательно заряженное тело, другими словами, поддерживать постоянными заряды этих тел. Это означает, что для прохождения постоянного тока по металлическому проводнику необходимо все время обеспечивать на его концах разность потенциалов, или напряжение. Для этого проводник надо подключить к источнику электрической энергии и создать замкнутую электрическую цепь (рис. 11, *б*). В проводнике положительные заряды движутся от точек с более высоким потенциалом к точкам с более низким потенциалом, т. е. от положительного зажима источника электрической энергии к отрицательному. Но внутри источника эти заряды должны перемещаться от отрицательного зажима к положительному, т. е. от точки с низшим потенциалом к точке с высшим потенциалом. Такое перемещение зарядов внутри источника совершается благо-

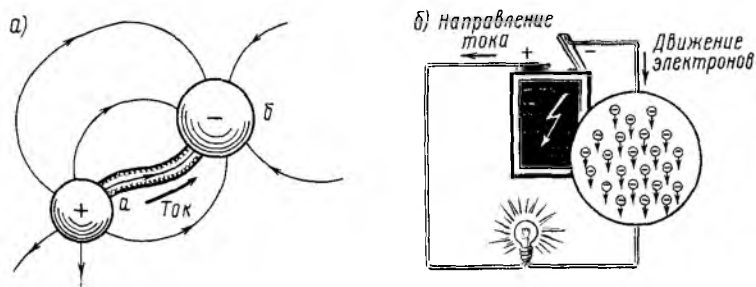


Рис. 11. Схемы прохождения электрического тока между двумя заряженными телами (*a*) и по замкнутой электрической цепи (*б*)

даря *электродвижущей силе* (э. д. с.), которая возбуждается в источнике. Э. д. с. поддерживает разность потенциалов на зажимах источника электрической энергии, обеспечивая прохождение тока по электрической цепи. Эта разность потенциалов определяет собой *напряжение источника электрической энергии*. Э. д. с. обозначается буквой E (e) и численно равна работе, которую нужно затратить на перемещение единицы положительного заряда от одного зажима источника к другому. Э. д. с. и напряжение источника тесно связаны друг с другом. Если в источнике не возбуждается э. д. с., то будет отсутствовать и напряжение на его зажимах.

Следует отметить, что э. д. с. и напряжение источника могут существовать независимо от наличия тока в цепи. Если электрическая цепь постоянного тока разомкнута, то ток по цепи не проходит, но при работающем генераторе или аккумуляторе в них возбуждается э. д. с. и между их зажимами действует напряжение.

За единицу э. д. с., также как и напряжения, принят вольт. В разных источниках электрической энергии э. д. с. возникает по различным физическим причинам. Например, в электрических генераторах э. д. с. получается в результате электромагнитной индукции, в химических источниках тока (аккумуляторах, гальванических элементах) — вследствие электрохимических реакций.

Количественная разница между э. д. с. и напряжением источника будет рассмотрена в § 9.

§ 6. Электрическая цепь и ее элементы

Составные элементы электрической цепи. Электрическую цепь (рис. 12, *a*) образуют источники ¹ электрической энергии I , ее приемники $З$ (потребители) и соединительные провода. В электрическую цепь обычно включают также вспомогательное оборудование: аппараты 4 , служащие для включения и выключения электрических установок (рубильники, переключатели и др.), электроизмерительные приборы 2 (амперметры, вольтметры, ваттметры), защитные устройства (предохранители, автоматические выключатели).

В качестве источников электрической энергии применяют главным образом, электрические генераторы и гальванические элементы или аккумуляторы. Источники электрической энергии часто называют источниками питания.

В приемниках электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии. К приемникам относятся электродвигатели, различные электронагревательные приборы, лампы накаливания, электролитические ванны и др.

Электрическая цепь может быть разделена на два участка: внешний и внутренний. Внешний участок, или, как говорят, *внешняя цепь*, состоит из одного или нескольких приемников электри-

¹ В дальнейшем будем употреблять сокращенные термины «источник» и «приемник».

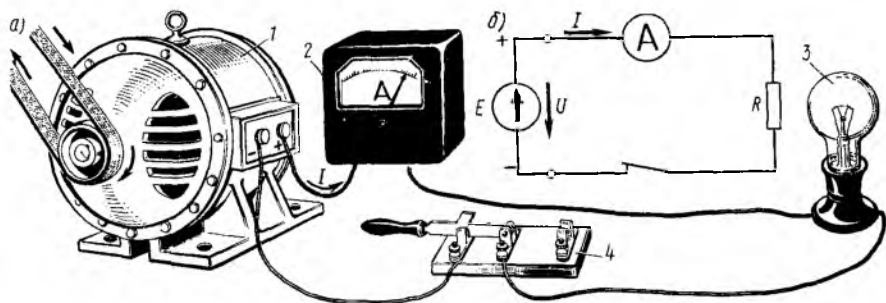


Рис. 12. Простейшая электрическая цепь постоянного тока (а) и ее принципиальная схема (б)

ческой энергии, соединительных проводов и различных вспомогательных устройств, включенных в эту цепь. Внутренний участок, или *внутренняя цепь*, — это сам источник.

Изображение электрических цепей и их элементов. В схемах реальных электрических устройств (электровозов, тепловозов и др.) отдельные элементы имеют свои условные обозначения в соответствии с государственными стандартами. Некоторые из этих обозначений приведены в табл. 2.















При составлении расчетных схем элементы электрической цепи, имеющие некоторое сопротивление, например электрические лампы, электронагревательные приборы (в том числе и соединительные провода, если их необходимо учитывать при расчете), изображают в виде сосредоточенных в соответствующем месте схемы резисторов с сопротивлением R (рис. 12, б). То же относится к элементам, имеющим индуктивность (обмотки генераторов, электродвигателей и трансформаторов) и емкость (конденсаторы). На расчетных схемах их изображают в виде сосредоточенных в соответствующем месте катушек индуктивности и конденсаторов. Источники электрической энергии в схеме электрической цепи часто могут быть представлены в виде идеализированных источников, у которых внутреннее сопротивление $R_0 = 0$.

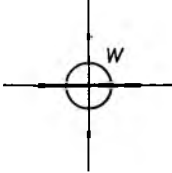

Для того чтобы учесть внутреннее сопротивление реального источника, в схему вводят изображение резистора с сопротивлением R_0 или ставят букву R_0 возле условного обозначения источника.

Вспомогательные элементы электрических цепей (аппараты для включения и выключения, защитные устройства, некоторые электроизмерительные приборы) в большинстве случаев имеют малые сопротивления и практически не оказывают влияние на значения токов и напряжений, поэтому при расчете электрических цепей их не принимают во внимание и не указывают на схемах.

Направления тока, напряжения и э. д. с. в электрической цепи. В схемах электрических цепей направления тока, напряжения и э. д. с. изображают стрелками. За положительное направление тока принято направление движения положительных зарядов, т. е. ток во внешней цепи изображают стрелкой I , направленной от

Таблица 2

Наименование элемента	Условное графическое обозначение
<p>Выключатель однополюсный</p> <p>Выключатель двухполюсный</p>	 
Предохранитель плавкий	
Элемент гальванический или аккумулятор	
Батарея из гальванических элементов или аккумуляторов	
Резистор нерегулируемый	
Резистор регулируемый (реостат)	 
Резистор нелинейный	
<p>Конденсаторы:</p> <p>нерегулируемый</p> <p>регулируемый</p> <p>электролитический</p>	  
Катушка индуктивности (реактор) без сердечника	
Катушка индуктивности (реактор) с ферромагнитным сердечником	

Наименование элемента	Условное графическое обозначение
Амперметр	
Вольтметр	
Ваттметр	
Лампы накаливания осветительные и сигнальные	
Два пересекающихся, не соединенных проводника	
Два соединенных проводника	

положительного зажима источника электрической энергии к отрицательному его зажиму (см. рис. 12, б), во внутренней цепи ток направлен от отрицательного зажима к положительному. Положительное направление напряжения совпадает с положительным направлением тока. Стрелка U направлена от положительного зажима источника или приемника к отрицательному зажиму. Положительное направление э. д. с. совпадает с положительным направлением тока внутри источника (стрелка E направлена от отрицательного зажима источника к положительному).

В сложных электрических цепях бывает затруднительно показать действительные направления тока и напряжения на отдельных участках цепи. В таких случаях принимают произвольно какие-либо их направления, которые считают условно положительными, и для этих направлений выполняют расчет электрической цепи. Если в результате расчета выясняется, что какие-то токи и напряжения имеют положительный знак, то это означает, что выбранные для них направления соответствуют действительности. Если же какие-то токи и напряжения получаются отрицательными, то в действительности они имеют направление, противоположное выбранному.

§ 7. Закон Ома

Закон Ома для электрической цепи. Согласно этому закону сила тока I в электрической цепи равна э. д. с. E источника, поделенной на сопротивление цепи $R_{\text{ц}}$, т. е.

$$I = E/R_{\text{ц}}. \quad (7)$$

Полное сопротивление замкнутой электрической цепи (рис. 13) можно представить в виде суммы сопротивления внешней цепи R (например, какого-либо приемника электрической энергии) и внутреннего сопротивления R_0 источника. Поэтому сила тока

$$I = E/(R + R_0). \quad (8)$$

Чем больше э. д. с. E источника и чем меньше сопротивление электрической цепи, тем больший ток проходит по этой цепи.

Пример 3. Э. д. с. генератора тепловоза равна 820 В. Определить силу тока при сопротивлении цепи 0,5 Ом.

Решение. По формуле (7)

$$I = 820/0,5 = 1640 \text{ А.}$$

Из формулы (7) следует, что э. д. с. источника электрической энергии равна произведению силы тока на полное сопротивление электрической цепи:

$$E = IR_{\text{ц}}. \quad (7')$$

Пример 4. Определить э. д. с., которую должен создать генератор для того, чтобы через электрическую цепь сопротивлением 10 Ом проходил ток 100 А.

Решение. Согласно формуле (7')

$$E = 100 \cdot 10 = 1000 \text{ В.}$$

Закон Ома для участка электрической цепи. Закон Ома может быть применен не только ко всей цепи, но и к любому ее участку, например между точками a и b (см. рис. 13). В этом случае э. д. с. E источника в формуле (7) должна быть заменена разностью потенциалов между началом и концом рассматриваемого участка, т. е. напряжением U , а вместо сопротивления всей цепи в формулу должно быть подставлено сопротивление R данного участка. В этом случае закон Ома формулируется следующим образом. Сила тока I на данном участке электрической цепи равна напряжению U , приложенному к участку, поделенному на сопротивление R этого участка:

$$I = U/R. \quad (9)$$

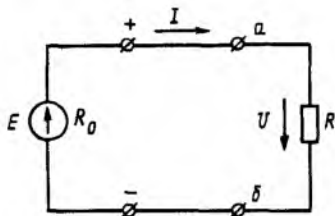


Рис. 13. Схема простейшей электрической цепи

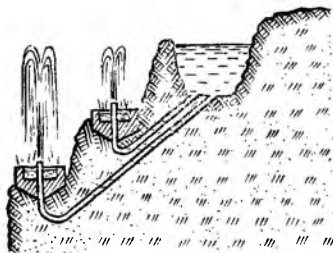
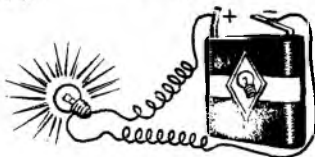


Рис. 14. Прохождение электрического тока по проводникам аналогично прохождению воды по трубам



Прохождение электрического тока по проводникам полностью аналогично прохождению воды по трубам (рис. 14). Чем больше разность уровней воды при входе и выходе из трубы (напор) и чем больше поперечное сечение трубы, тем больше воды протекает сквозь трубу в единицу времени. Точно так же, чем больше разность электрических потенциалов (напряжение) на зажимах источника или приемника электрической энергии и чем меньше его сопротивление (т. е. чем больше площадь поперечного сечения проводника), тем больший ток проходит по нему.

Пример 5. Определить ток, который будет проходить через электрическую лампу, включенную под напряжением 220 В, если сопротивление ее равно 440 Ом.
Решение. Согласно формуле (9)

$$I = 220/440 = 0,5 \text{ А.}$$

Из формулы (9) следует, что *напряжение U , действующее на некотором участке цепи, равно произведению силы тока I на сопротивление R этого участка:*

$$U = IR. \quad (10)$$

Так как потенциал электрического поля в начале участка электрической цепи больше, чем в конце, разность потенциалов, или напряжение U , приложенное к участку электрической цепи, часто называют *падением напряжения на данном участке.*

Сопротивление R участка цепи равно напряжению, приложенному к данному участку, поделенному на силу тока на этом участке, т. е.

$$R = U/I. \quad (11)$$

Пример 6. Определить, к какому напряжению нужно подключать электрическую лампу, имеющую сопротивление 60 Ом, чтобы через нее проходил ток 2 А.
Решение. Согласно формуле (10)

$$U = 2 \cdot 60 = 120 \text{ В}$$

Пример 7. По спирали электрической плитки, включенной под напряжение 220 В, проходит ток 5 А. Определить сопротивление спирали плитки.

Решение. По формуле (11)

$$R = 220/5 = 44 \text{ Ом.}$$

Если сопротивление R не зависит от проходящего по нему тока и приложенного к нему напряжения, то его вольт-амперная характеристика, т. е. зависимость силы тока I от напряжения U , представляет собой прямую линию 1 (рис. 15). Такие сопротивления называют *линейными*, а электрические цепи, в которых включены подобные сопротивления, — *линейными цепями*.

Однако в электротехнике широко применяют и такие устройства, сопротивление которых резко изменяется в зависимости от силы или направления проходящего через них тока либо приложенного напряжения. Подобные сопротивления имеют вольт-амперную характеристику, отличающуюся от прямой (кривая 2 на рис. 15), и называются поэтому *нелинейными сопротивлениями*. Простейшим нелинейным сопротивлением является электрическая лампа накаливания. При протекании тока по металлической нити лампа нагревается и сопротивление ее возрастает. Следовательно, при увеличении приложенного к лампе напряжения сила тока будет возрастать не прямо пропорционально напряжению, а в несколько меньшей степени.

В принципе большинство электрических устройств может быть представлено в виде нелинейного сопротивления, так как при изменении силы тока меняется температура данного устройства, а следовательно, и его сопротивление. Однако у многих из них вольт-амперные характеристики в рабочем диапазоне изменений напряжения и тока мало отличаются от прямой, поэтому приближенно можно их считать линейными сопротивлениями.

К сопротивлениям с нелинейной вольт-амперной характеристикой относятся электрические лампы накаливания, термисторы (полупроводниковые резисторы, сопротивление которых сильно изменяется при изменении температуры), полупроводниковые диоды, тиристоры и транзисторы, электронные лампы и пр. Нелинейные сопротивления широко используют в электротехнике для автоматического регулирования силы тока и напряжения в электрических цепях, электрических измерений, выпрямления тока и пр.

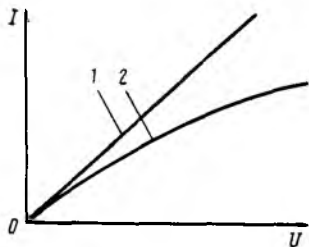


Рис. 15. Вольт-амперные характеристики линейных и нелинейных сопротивлений

§ 8. Использование резисторов для регулирования тока в электрической цепи

Резисторы. Закон Ома наглядно показывает, что силу тока в электрической цепи можно изменять, включая в нее различные сопротивления. Этим свойством широко пользуются на практике для регулирования и ограничения тока в обмотках двигателей, генераторов и других электрических потребителях. Электрический аппарат, предназначенный для включения в электрическую цепь с целью регулирования или ограничения проходящего по ней тока, называют *резистором*. Резисторы бывают с постоянным или регулируемым сопротивлением. Последние иногда называют *реостатами*.

Резисторы обычно изготовляют из проволоки или ленты, материалом для которых служат сплавы металлов, обладающие высоким удельным сопротивлением (константан, никелин, манганин, фехраль). Это дает возможность для изготовления резисторов применять проволоку наименьшей длины. В электрических цепях, по которым проходят сравнительно небольшие токи (например, в цепях управления, в устройствах электроники и радиотехники), часто применяют непроволочные резисторы, выполненные из графита и других материалов.

Устройство реостатов. Реостаты могут выполняться с плавным или ступенчатым изменением сопротивления. В лабораториях для управления электрическими машинами и испытательными устройствами часто используют ползунковый реостат с плавным изменением сопротивления (рис. 16, а). Такой реостат состоит из изоляционной трубки 4, на которую намотана проволочная спираль 5. К виткам этой спирали прикасается подвижной контакт 2. Зажим 1 реостата соединяется с подвижным контактом, другой зажим 3 — с одним из концов спирали. Перемещая подвижной контакт, можно изменять длину проволоки, расположенной между зажимами реостата, и тем самым изменять его сопротивление.

Для пуска и регулирования электрических двигателей станков, грузоподъемных механизмов и пр. применяют ползунковый реостат со ступенчатым изменением сопротивления (рис. 16, б). Реостат состоит из ряда одинаковых сопротивлений 9 (секций), присоединенных к контактам 8. Для включения в цепь того или иного числа секций служит ползунок 7 со штурвалом 6.

Для регулирования тока при пуске тяговых двигателей электрических локомотивов постоянного тока применяют реостаты со ступенчатым изменением сопротивления (пусковые реостаты). Отдельные секции реостата в процессе пуска замыкаются накоротко дистанционно управляемыми выключателями, называемыми *контактами*.

На некоторых электровозах (например, электровозах ЧС) пусковые реостаты выполнены из чугунных литых пластин 10 особой формы, напоминающей зигзагообразно уложенную ленту. Отдельные пластины собирают на изолированных шпильках и прикрепляют к основанию 11 (рис. 16, в).

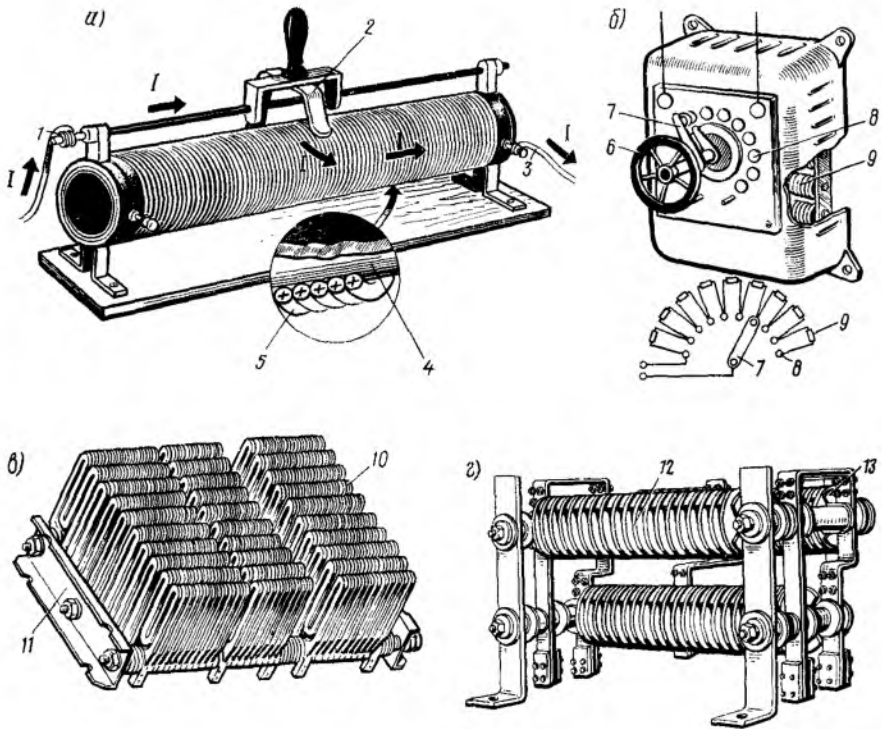


Рис. 16. Устройство реостатов:

а — с плавным изменением сопротивления; б — со ступенчатым изменением сопротивления; в — из чугунных пластин; г — из фехральной ленты

В последнее время пусковые реостаты электровозов и моторных вагонов выполняют из фехральной ленты 12, намотанной на фарфоровые изоляторы 13 (рис. 16. г). Так же устроены и реостаты, служащие для регулирования тока возбуждения тяговых двигателей на электровозах и тепловозах. Реостаты из фехральной ленты более

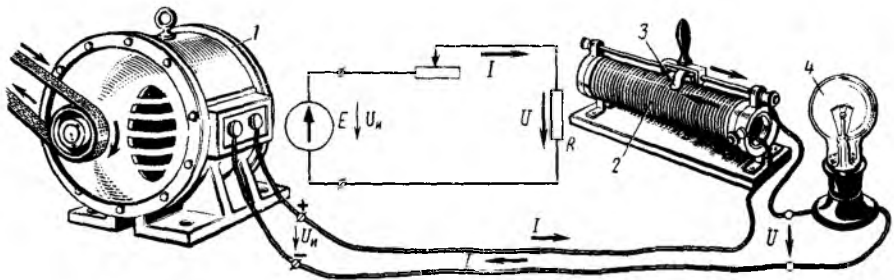


Рис. 17. Схема последовательного включения реостата в цепь приемника электрической энергии

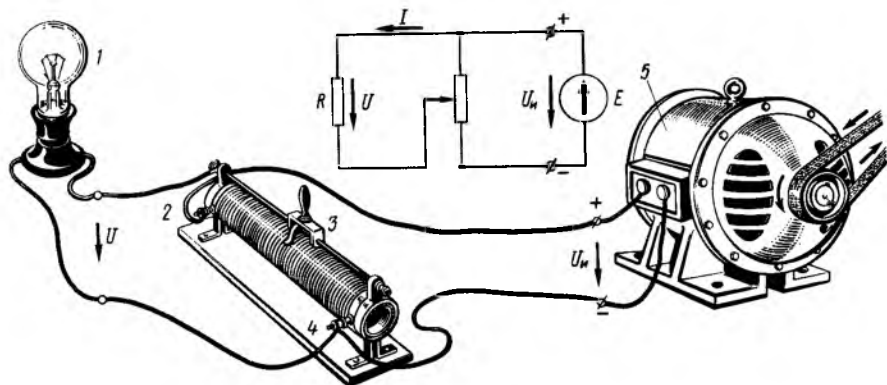


Рис. 18. Схема включения реостата в качестве делителя напряжения

прочны, более устойчивы против тряски и вибраций и имеют меньшую массу, чем реостаты, выполненные из чугуновых пластин.

Схемы включения реостатов. Реостат 2 (рис. 17) может быть включен последовательно в цепь между источником 1 и приемником 4 электрической энергии. В этом случае при изменении сопротивления реостата, т. е. при перемещении подвижного контакта 3, изменяется сила тока в приемнике. Этот ток проходит только по части сопротивления реостата.

Однако реостат можно включать в цепь таким образом, чтобы ток проходил по всему его сопротивлению, а к приемнику отвечала только часть тока источника. В этом случае два крайних зажима 2 и 4 реостата (рис. 18) подключают к источнику 5, а один из этих зажимов, например 4, и подвижной контакт 3 реостата — к приемнику 1. Очевидно, что при таком включении к приемнику будет подаваться напряжение U , равное падению напряжения между зажимом 4 и подвижным контактом 3 реостата. Следовательно, передвигая подвижной контакт реостата, можно изменять напряжение U , подводимое к приемнику, и силу тока в нем. Напряжение U представляет собой только часть напряжения U_n на зажимах источника.

Реостат, включенный по схеме рис. 18, называется *делителем напряжения*, или *потенциометром*.

§ 9. Режимы работы электрической цепи

Для электрической цепи наиболее характерными являются режимы нагрузочный, холостого хода и короткого замыкания.

Нагрузочный режим (рис. 19, а). Рассмотрим работу электрической цепи при подключении к источнику какого-либо приемника с сопротивлением R (резистора, электрической лампы и т. п.).

На основании закона Ома э. д. с. источника равна сумме напря-

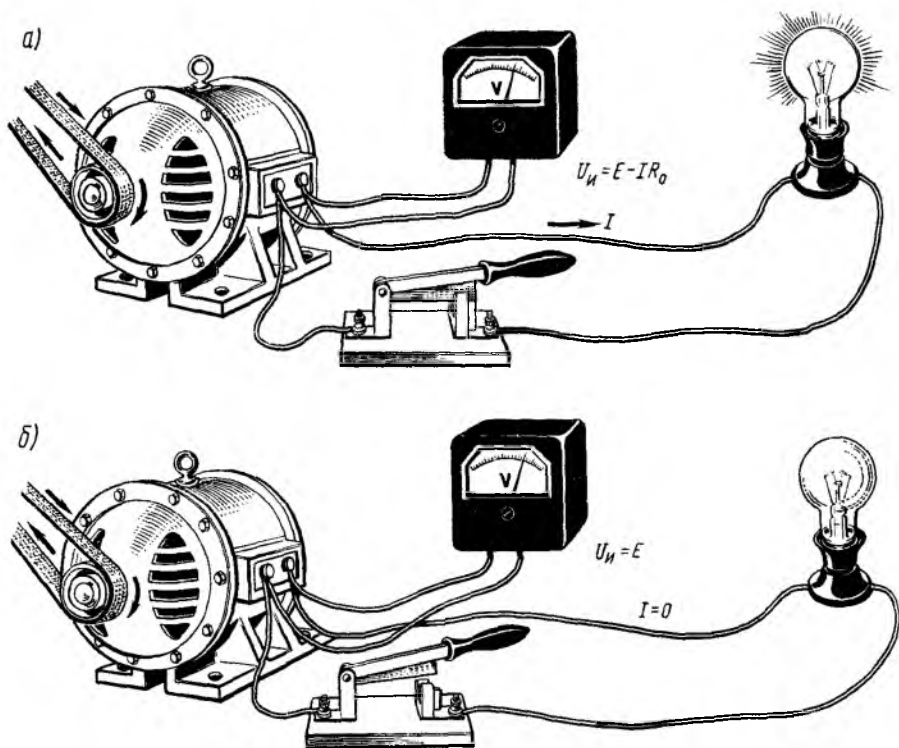


Рис. 19. Схемы, поясняющие нагрузочный режим (а) и режим холостого хода (б)

жений IR на внешнем участке цепи и IR_0 на внутреннем сопротивлении источника:

$$E = IR + IR_0. \quad (12)$$

Учитывая, что напряжение U_n на зажимах источника равно падению напряжения IR во внешней цепи, получим:

$$E = U_n + IR_0. \quad (13)$$

Эта формула показывает, что э. д. с. источника больше напряжения на его зажимах на значение падения напряжения внутри источника. Падение напряжения IR_0 внутри источника зависит от тока в цепи I (тока нагрузки), который определяется сопротивлением R приемника. Чем больше будет ток нагрузки, тем меньше напряжение на зажимах источника:

$$U_n = E - IR_0. \quad (13')$$

Падение напряжения в источнике зависит также и от внутреннего сопротивления R_0 . Согласно уравнению (13') зависимость напряжения U_n от тока I изображается прямой линией (рис. 20). Эту зависимость называют внешней характеристикой источника.

Пример 8. Определить напряжение на зажимах генератора при токе нагрузки 1200 А, если его э. д. с. равна 640 В, а внутреннее сопротивление 0,1 Ом.

Решение. Падение напряжения во внутреннем сопротивлении генератора $IR_0 = 1200 \cdot 0,1 = 120$ В.

Напряжение на зажимах генератора согласно формуле (13')

$$U_n = 640 \text{ В} - 120 \text{ В} = 520 \text{ В}.$$

Из всех возможных нагрузочных режимов наиболее важным является номинальный. *Номинальным* называется режим работы, установленный заводом-изготовителем для данного электротехнического устройства в соответствии с предъявляемыми к нему техническими требованиями. Он характеризуется номинальными напряжением, током (точка H на рис. 20) и мощностью. Эти величины обычно указывают в паспорте данного устройства. От номинального напряжения зависит качество электрической изоляции электротехнических установок, а от номинального тока — температура их нагрева, которая определяет площадь поперечного сечения проводников, теплостойкость применяемой изоляции и интенсивность охлаждения установки. Превышение номинального тока в течение длительного времени может привести к выходу из строя установки.

Режим холостого хода (рис. 19, б). При этом режиме присоединенная к источнику электрическая цепь разомкнута, т. е. тока в цепи нет. В этом случае внутреннее падение напряжения IR_0 будет равно нулю и формула (13) примет вид

$$E = U_n. \quad (14)$$

Таким образом, в режиме холостого хода напряжение на зажимах источника электрической энергии равно его э. д. с. (точка X на рис. 20). Это обстоятельство можно использовать для измерения э. д. с. источников электроэнергии.

Режим короткого замыкания (рис. 21). Коротким замыканием (к. з.) называют такой режим работы источника, когда его зажимы замкнуты проводником, сопротивление которого можно считать равным нулю. Практически к. з. возникает при соединении друг с другом проводов, связывающих источник с приемником, так как эти провода имеют обычно незна-

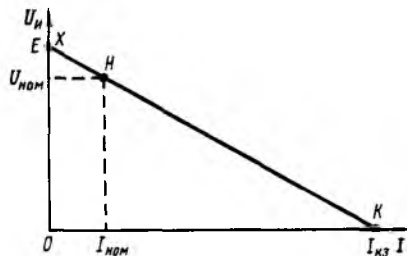


Рис. 20. Внешняя характеристика источника

чительное сопротивление и его можно принять равным нулю. К. з. может происходить в результате неправильных действий персонала, обслуживающего электротехнические установки (рис. 22, а), или при повреждении изоляции проводов (рис. 22, б, в); в последнем случае эти провода могут соединяться через землю, имеющую весьма малое сопротивление, или через окружающие металлические детали (корпуса электрических машин и аппаратов, элементы кузова локомотива и пр.).

При коротком замыкании ток

$$I_{к.з.} = E/R_0. \quad (15)$$

Ввиду того что внутреннее сопротивление источника R_0 обычно очень мало, проходящий через него ток возрастает до весьма больших значений. Напряжение же в месте к. з. становится равным нулю (точка K на рис. 20), т. е. электрическая энергия на участок электрической цепи, расположенный за местом к. з., поступать не будет.

Пример 9. Определить ток короткого замыкания генератора, если его э. д. с. равна 640 В и внутреннее сопротивление 0,1 Ом.

Решение. По формуле (15)

$$I_{к.з.} = 640/0,1 = 6400 \text{ А.}$$

Короткое замыкание является аварийным режимом, так как возникающий при этом большой ток может привести в негодность как сам источник, так и включенные в цепь приборы, аппараты и провода. Лишь для некоторых специальных генераторов, например сварочных, короткое замыкание не представляет опасности и является рабочим режимом.

В электрической цепи ток проходит всегда от точек цепи, находящихся под большим потенциалом, к точкам, находящимся под меньшим потенциалом. Если какая-либо точка цепи соединена с землей [для цепей электроподвижного состава (э. п. с.) — с рельсами], то потенциал ее принимается равным нулю; в этом случае потен-

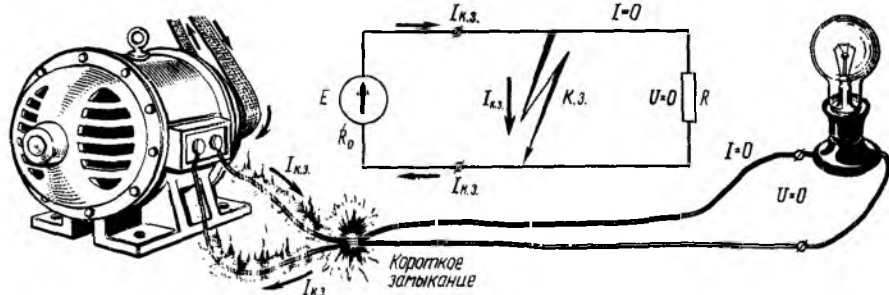


Рис. 21. Схема короткого замыкания в цепи источника электрической энергии

циалы всех других точек цепи будут равны напряжениям, действующим между этими точками и землей.

По мере приближения к заземленной точке уменьшаются потенциалы различных точек цепи, т. е. напряжения, действующие между этими точками и землей. По этой причине обмотки возбуждения тяговых двигателей и вспомогательных машин, в которых при резких изменениях тока могут возникать большие пере-напряжения, стараются включать в силовую цепь ближе к «земле» (за обмоткой якоря). В этом случае на изоляцию этих обмоток будет действовать меньшее напряжение, чем если бы они были включены ближе к контактной сети

на электровозах постоянного тока или к незаземленному полюсу выпрямительной установки на электровозах переменного тока (т. е. находились бы под более высоким потенциалом). Точно также точки электрической цепи, находящиеся под более высоким потенциалом, являются более опасными для человека, соприкасающегося с токоведущими частями электрических установок. При этом он попадает под более высокое напряжение по отношению к земле.

Следует отметить, что при заземлении одной точки электрической цепи распределение токов в ней не изменяется, так как при этом не образуется никаких новых ветвей, по которым могли бы протекать токи. Если заземлить две (или больше) точки цепи, имеющие разные потенциалы, то через землю образуются дополнительная токопроводящая ветвь (или ветви) и распределение тока в цепи меняется. Следовательно, нарушение или пробой изоляции электрической установки, одна из точек которой заземлена, создает контур, по которому проходит ток, представляющий собой, по сути дела, ток короткого замыкания. То же происходит в незаземленной электрической установке при замыкании на землю двух ее точек. При разрыве электрической цепи все ее точки до места разрыва оказываются под одним и тем же потенциалом.

§ 10. Законы Кирхгофа

Закон Ома устанавливает зависимость между силой тока, напряжением и сопротивлением для простейшей электрической цепи, представляющей собой один замкнутый контур. В практике встречаются более сложные (разветвленные) электрические цепи, в ко-

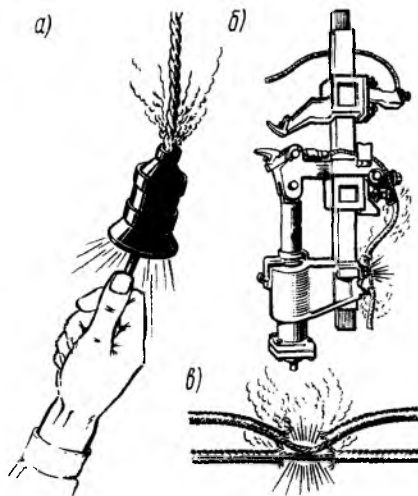


Рис. 22. Возможные причины короткого замыкания в электрических установках

торых имеются несколько замкнутых контуров и несколько узлов, к которым сходятся токи, проходящие по отдельным ветвям. Значения токов и напряжений для таких цепей можно находить при помощи законов Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа устанавливает зависимость между токами для узлов электрической цепи, к которым подходит несколько ветвей. Согласно этому закону *алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в узле электрической цепи, равна нулю:*

$$\boxed{\Sigma I = 0.} \quad (16)$$

При этом токи, направленные к узлу, берут с одним знаком (например, положительным), а токи, направленные от узла, — с противоположным знаком (отрицательным). Например, для узла *A* (рис. 23, *a*)

$$\boxed{I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0.} \quad (17)$$

Преобразуя это уравнение, получим, что *сумма токов, направленных к узлу электрической цепи, равна сумме токов, направленных от этого узла:*

$$\boxed{I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5.} \quad (17')$$

В данном случае имеет место полная аналогия с распределением потоков воды в соединенных друг с другом трубопроводах (рис. 23, *b*).

Второй закон Кирхгофа устанавливает зависимость между э. д. с. и напряжением в замкнутой электрической цепи. Согласно этому закону *во всяком замкнутом контуре алгебраическая сумма э. д. с. равна алгебраической сумме падений напряжения на сопротивлениях, входящих в этот контур:*

$$\boxed{\Sigma E = \Sigma IR.} \quad (18)$$

При составлении формул, характеризующих второй закон Кирхгофа, значения э. д. с. *E* и падений напряжений *IR* считают положительными, если направления э. д. с. и токов на соответствующих участках контура совпадают с произвольно выбранным направлением обхода контура. Если же направления э. д. с. и токов на соответствующих участках контура противоположны выбранному направлению обхода, то такие э. д. с. и падения напряжения считают отрицательными.

Рассмотрим в качестве примера электрическую цепь, в которой имеются два источника с электродвижущими силами *E*₁ и *E*₂

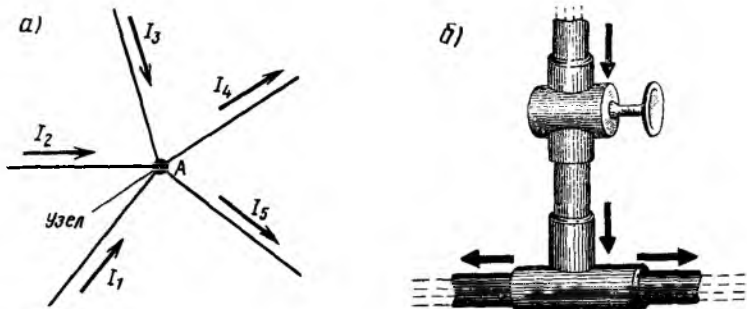


Рис. 23. Распределение токов в узле электрической цепи (а) аналогично распределению потоков воды в месте соединения трубопроводов (б)

(рис. 24, а), внутренними сопротивлениями R_{01} , R_{02} и два приемника с сопротивлениями R_1 и R_2 . Применяя второй закон Кирхгофа для этой цепи и выбирая направление ее обхода по часовой стрелке, получим:

$$E_1 - E_2 = IR_{01} + IR_{02} + IR_1 + IR_2.$$

При этом э. д. с. E_1 и ток I совпадают с выбранным направлением обхода контура и считаются положительными, а э. д. с. E_2 , противоположная этому направлению, считается отрицательной.

Если в электрической цепи э. д. с. источников электрической энергии при обходе соответствующего контура направлены навстречу друг другу (см. рис. 24, а), то такое включение называют встречным. В этом случае на основании второго закона Кирхгофа ток $I = (E_1 - E_2) / (R_1 + R_2 + R_{01} + R_{02})$.

Встречное направление э. д. с. имеет место, например, на э. п. с. при включении электродвигателей постоянного тока (их можно рассматривать как некоторые источники э. д. с.) в две параллельные группы (см. § 36), а также при параллельном включении аккумуляторов в батарее (см. § 45).

Если же э. д. с. источников электрической энергии имеют по контуру одинаковое направление (рис. 24, б), то такое включение называют согласным и ток $I = (E_1 + E_2) / (R_1 + R_2 + R_{01} + R_{02})$. В неко-

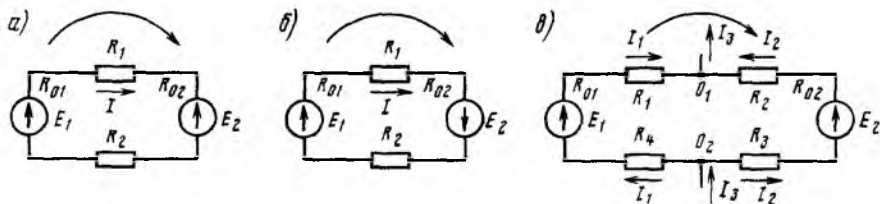


Рис. 24. Схемы электрических цепей с несколькими источниками и приемниками электрической энергии:

а и б — неразветвленных, в — разветвленной

торых случаях такое включение недопустимо, так как ток в цепи резко возрастает.

Если в электрической цепи имеются ответвления (рис. 24, в), то по отдельным ее участкам проходят различные токи I_1 и I_2 . Согласно второму закону Кирхгофа

$$E_1 - E_2 = I_1 R_{01} + I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_2 R_{02} - I_2 R_3 + I_1 R_4.$$

При составлении этого уравнения э. д. с. E_1 и ток I_1 считаются положительными, так как совпадают с принятым направлением обхода контура, э. д. с. E_2 и ток I_2 — отрицательными.

Пример 10. Сила тока I в электрической цепи (см. рис. 24, а) равна 2 А, а э. д. с. $E_1 = 100$ В. Внутренние сопротивления источников $R_{01} = R_{02} = 1$ Ом, а сопротивления приемников $R_1 = 20$ Ом; $R_2 = 10$ Ом. Определить значение и направление э. д. с. E_2 .

Решение. Принимая предварительно, что э. д. с. E_2 направлена, как показано на рис. 24, а, составляем согласно второму закону Кирхгофа уравнение: $100 - E_2 = 2 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 20 + 2 \cdot 10$, откуда $E_2 = 100 - 2 - 2 - 40 - 20 = 36$ В.

Положительное значение э. д. с. E_2 указывает, что предварительно выбранное направление ее было правильным. Если бы э. д. с. E_2 получилась отрицательной, то это указывало бы, что в действительности она направлена противоположно.

§ 11. Последовательное, параллельное и смешанное соединения резисторов (приемников электрической энергии)

Значительное число приемников, включенных в электрическую цепь (электрические лампы, электронагревательные приборы и др.), можно рассматривать как некоторые элементы, имеющие определенное сопротивление. Это обстоятельство дает нам возможность при составлении и изучении электрических схем заменять конкретные приемники резисторами с определенными сопротивлениями. Различают следующие способы соединения резисторов (приемников электрической энергии): последовательное, параллельное и смешанное.

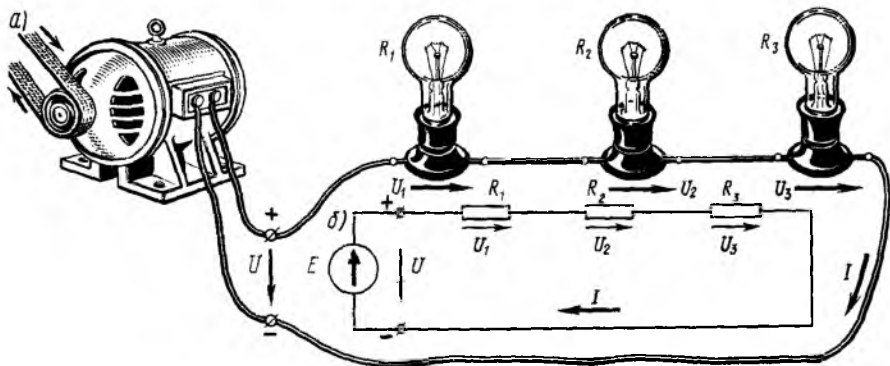


Рис. 25. Схемы последовательного соединения приемников

Последовательное соединение. При последовательном соединении нескольких резисторов конец первого резистора соединяют с началом второго, конец второго — с началом третьего и т. д. При таком соединении по всем элементам последовательной цепи проходит один и тот же ток I .

Последовательное соединение приемников поясняет рис. 25, а. Заменяя лампы резисторами с сопротивлениями R_1 , R_2 и R_3 , получим схему, показанную на рис. 25, б.

Если принять, что в источнике $R_0=0$, то для трех последовательно соединенных резисторов согласно второму закону Кирхгофа можно написать:

$$E = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3) = IR_{\text{эк}}, \quad (19)$$

где $R_{\text{эк}} = R_1 + R_2 + R_3$.

Следовательно, эквивалентное сопротивление последовательной цепи равно сумме сопротивлений всех последовательно соединенных резисторов.

Так как напряжения на отдельных участках цепи согласно закону Ома: $U_1 = IR_1$; $U_2 = IR_2$; $U_3 = IR_3$ и в данном случае $E = U$, то для рассматриваемой цепи

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (20)$$

Следовательно, напряжение U на зажимах источника равно сумме напряжений на каждом из последовательно включенных резисторов.

Из указанных формул следует также, что напряжения распределяются между последовательно соединенными резисторами пропорционально их сопротивлениям:

$$U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3, \quad (21)$$

т. е. чем больше сопротивление какого-либо приемника в последовательной цепи, тем больше приложенное к нему напряжение.

В случае если последовательно соединяются несколько, например n , резисторов с одинаковым сопротивлением R_1 , эквивалентное сопротивление цепи $R_{\text{эк}}$ будет в n раз больше сопротивления R_1 , т. е. $R_{\text{эк}} = nR_1$. Напряжение U_1 на каждом резисторе в этом случае в n раз меньше общего напряжения U :

$$U_1 = U/n. \quad (22)$$

Пример 11. Обмотка возбуждения генератора питается от источника напряжения 75 В. В цепь обмотки возбуждения сопротивлением $R_0 = 1$ Ом включается резистор сопротивлением $R_{106} = 14$ Ом.

Во сколько раз уменьшается ток в обмотке возбуждения и как распределится напряжение между обмоткой возбуждения и добавочным резистором?

Решение. Сила тока в обмотке возбуждения при отсутствии добавочного резистора $I_1 = U/R_b = 75/1 = 75 \text{ A}$.

Эквивалентное сопротивление цепи обмотки возбуждения при включении добавочного резистора

$$R_{\text{эк}} = R_b + R_{\text{доб}} = 1 + 14 = 15 \text{ Ом.}$$

Ток при включении добавочного резистора

$$I_2 = U/R_{\text{эк}} = 75/15 = 5 \text{ A.}$$

Следовательно, при включении добавочного резистора ток уменьшается в 15 раз.

Напряжение на обмотке возбуждения при включении добавочного резистора $U_b = I_2 R_b = 5 \cdot 1 = 5 \text{ В}$.

Напряжение на добавочном резисторе

$$U_{\text{доб}} = I_2 R_{\text{доб}} = 5 \cdot 14 = 70 \text{ В.}$$

Пример 12. В электрическую цепь напряжением $U = 220 \text{ В}$ включено последовательно пять электрических ламп сопротивлением $R_n = 110 \text{ Ом}$ каждая.

Определить эквивалентное сопротивление ламп, силу тока, проходящего по цепи, и напряжение на каждой лампе.

Решение. Эквивалентное сопротивление цепи

$$R_{\text{эк}} = n R_n = 5 \cdot 110 = 550 \text{ Ом.}$$

Сила тока в цепи

$$I = U/R_{\text{эк}} = 220/550 = 0,4 \text{ A.}$$

Напряжение на каждой лампе

$$U_n = U/n = 220/5 = 44 \text{ В.}$$

Соединять последовательно целесообразно только приемники с одинаковыми сопротивлениями. В противном случае приложенное напряжение источника электрической энергии распределяется между ними неравномерно и отдельные приемники могут оказаться под недопустимо высоким для них напряжением.

Пример 13. Две электрические лампы номинальным напряжением 110 В, сопротивлением $R_{л1} = 242 \text{ Ом}$ и $R_{л2} = 121 \text{ Ом}$ включены последовательно под напряжение 220 В.

Определить распределение напряжения между лампами.

Решение. Сила тока в цепи

$$I = U/(R_{л1} + R_{л2}) = 220/(121 + 242) = 0,606 \text{ A.}$$

Напряжение на первой лампе

$$U_{л1} = I R_{л1} = 0,606 \cdot 242 = 147 \text{ В.}$$

Напряжение на второй лампе

$$U_{л2} = I R_{л2} = 0,606 \cdot 121 = 73 \text{ В.}$$

Следовательно, первая лампа оказывается под недопустимо большим напряжением (т. е. скоро перегорит), а вторая будет гореть вполнакала.

Последовательно могут соединяться любые приемники, в частности электрические двигатели. На электровозах постоянного тока в начальный период разгона поезда тяговые двигатели включены последовательно. Этим достигается уменьшение напряжения, проходящего на каждый двигатель.

Пример 14. Определить, под каким напряжением находятся тяговые двигатели электровоза постоянного тока при последовательном соединении шести, трех и двух двигателей и напряжении на токоприемнике $U_c = 3000$ В.

Решение. При шести последовательно включенных двигателях на каждый двигатель будет приходиться напряжение

$$U_{дв} = U_c / 6 = 3000 \text{ В} / 6 = 500 \text{ В};$$

при трех последовательно соединенных двигателях

$$U_{дв} = U_c / 3 = 3000 \text{ В} / 3 = 1000 \text{ В};$$

при двух последовательно соединенных двигателях

$$U_{дв} = U_c / 2 = 3000 \text{ В} / 2 = 1500 \text{ В}.$$

При последовательном соединении приемников изменение сопротивления одного из них тотчас же влечет за собой изменение напряжения на других связанных с ним приемниках. При выключении или обрыве электрической цепи в одном из приемников и в остальных приемниках прекращается ток. Поэтому последовательное соединение приемников применяют редко — только в том случае, когда напряжение источника электрической энергии больше номинального напряжения, на которое рассчитан потребитель. Например, напряжение в электрической сети, от которой питаются вагоны метрополитена, составляет 825 В, номинальное же напряжение электрических ламп, применяемых в этих вагонах, 55 В. Поэтому в вагонах метрополитена электрические лампы включают последовательно по 15 ламп в каждой цепи.

Параллельное соединение. При параллельном соединении нескольких приемников они включаются между двумя точками электрической цепи, образуя параллельные ветви (рис. 26, а). Заменяя

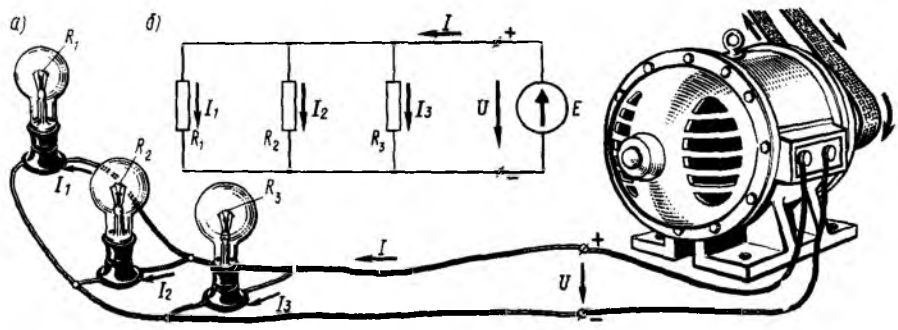


Рис. 26. Схемы параллельного соединения приемников

лампы резисторами с сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 , получим схему, показанную на рис. 26, б.

При параллельном соединении ко всем резисторам приложено одинаковое напряжение U . Поэтому согласно закону Ома:

$$I_1 = U/R_1; \quad I_2 = U/R_2; \quad I_3 = U/R_3.$$

Ток в неразветвленной части цепи согласно первому закону Кирхгофа $I = I_1 + I_2 + I_3$, или

$$I = U/R_1 + U/R_2 + U/R_3 = U(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3) = U/R_{\text{эк}}. \quad (23)$$

Следовательно, эквивалентное сопротивление рассматриваемой цепи при параллельном соединении трех резисторов определяется формулой

$$1/R_{\text{эк}} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3. \quad (24)$$

Вводя в формулу (24) вместо значений $1/R_{\text{эк}}$, $1/R_1$, $1/R_2$ и $1/R_3$ соответствующие проводимости $G_{\text{эк}}$, G_1 , G_2 и G_3 , получим: *эквивалентная проводимость параллельной цепи равна сумме проводимостей параллельно соединенных резисторов:*

$$G_{\text{эк}} = G_1 + G_2 + G_3. \quad (25)$$

Таким образом, при увеличении числа параллельно включаемых резисторов результирующая проводимость электрической цепи увеличивается, а результирующее сопротивление уменьшается.

Из приведенных формул следует, что *токи распределяются между параллельными ветвями обратно пропорционально их электрическим сопротивлениям или прямо пропорционально их проводимостям.* Например, при трех ветвях

$$I_1 : I_2 : I_3 = 1/R_1 : 1/R_2 : 1/R_3 = G_1 : G_2 : G_3. \quad (26)$$

В этом отношении имеет место полная аналогия между распределением токов по отдельным ветвям и распределением потоков воды по трубам.

Приведенные формулы дают возможность определить эквивалентное сопротивление цепи для различных конкретных случаев. Например, при двух параллельно включенных резисторах результирующее сопротивление цепи

$$R_{\text{эк}} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2);$$

при трех параллельно включенных резисторах

$$R_{\text{эк}} = R_1 R_2 R_3 / (R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3).$$

При параллельном соединении нескольких, например n , резисторов с одинаковым сопротивлением R_1 результирующее сопротивление цепи $R_{эк}$ будет в n раз меньше сопротивления R_1 , т. е.

$$R_{эк} = R_1/n. \quad (27)$$

Проходящий по каждой ветви ток I_1 в этом случае будет в n раз меньше общего тока I :

$$I_1 = I/n. \quad (28)$$

Пример 15. Определить эквивалентное сопротивление двух секций пускового реостата $R_1 = 4$ Ом и $R_2 = 10$ Ом, соединенных параллельно, и силу тока, протекающего по этим секциям, если общая сила тока, подходящего к реостату, равна 250 А.

Решение. Эквивалентное сопротивление двух секций реостата

$$R_{эк} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 4 \cdot 10 / (4 + 10) = 2,86 \text{ Ом.}$$

Распределение токов между секциями реостата

$$I_1/I_2 = R_2/R_1 = 10/4 = 2,5.$$

Общая сила тока

$$I = I_1 + I_2 = 2,5 I_2 + I_2 = 3,5 I_2$$

или

$$I_2 = I/3,5 = 250 \text{ А} / 3,5 = 71,5 \text{ А.}$$

Сила тока

$$I_1 = I - I_2 = 250 \text{ А} - 71,5 \text{ А} = 178,5 \text{ А.}$$

Пример 16. К сети напряжением 220 В подключены параллельно 10 ламп сопротивлением $R_n = 100$ Ом каждая. Определить эквивалентное сопротивление цепи, силу тока в каждой лампе и общую силу тока, потребляемого всеми лампами.

Решение. Эквивалентное сопротивление всех ламп

$$R_{эк} = R_n/10 = 100 \text{ Ом} / 10 = 10 \text{ Ом.}$$

Сила тока в каждой лампе

$$I_n = U/R_n = 220 \text{ В} / 100 \text{ Ом} = 2,2 \text{ А.}$$

Сила тока всех ламп

$$I = U/R_{эк} = 220 \text{ В} / 10 \text{ Ом} = 22 \text{ А,}$$

или

$$I = n I_n = 10 \cdot 2,2 \text{ А} = 22 \text{ А.}$$

При параллельном соединении приемников все они находятся под одним и тем же напряжением и режим работы каждого из них не зависит от остальных. Это означает, что ток, проходящий по какому-либо из приемников, не будет оказывать существенного влияния на другие приемники. При всяком выключении или выходе из строя любого приемника остальные приемники остаются вклю-

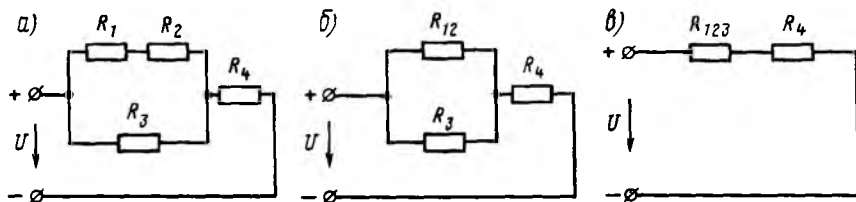


Рис. 27. Схемы смешанного соединения приемников

ченными. Поэтому параллельное соединение имеет существенные преимущества перед последовательным, вследствие чего оно получило наиболее широкое распространение. В частности, электрические лампы и двигатели, предназначенные для работы при определенном (номинальном) напряжении, всегда включают параллельно.

На электровозах постоянного тока и некоторых тепловозах тяговые двигатели в процессе регулирования скорости движения нужно включать под различные напряжения, поэтому они в процессе разгона переключаются с последовательного соединения на параллельное.

Пример 17. Определить силу тока, потребляемого электровозом при соединении двигателей в две и три параллельные группы, если сила тока каждого двигателя 250 А.

Решение. При соединении двигателей в две параллельные группы $I_{эл} = nI_{дв} = 2 \cdot 250 \text{ А} = 500 \text{ А}$; при соединении двигателей в три параллельные группы $I_{эл} = nI_{дв} = 3 \cdot 250 \text{ А} = 750 \text{ А}$.

Смешанное соединение. Смешанным соединением называется такое соединение, при котором часть резисторов включается последовательно, а часть — параллельно. Например, в схеме рис. 27, а имеются два последовательно включенных резистора сопротивлением R_1 и R_2 , параллельно им включен резистор сопротивлением R_3 , а резистор сопротивлением R_4 включен последовательно с группой резисторов сопротивлением R_1 , R_2 и R_3 .

Эквивалентное сопротивление цепи при смешанном соединении обычно определяют методом преобразования, при котором сложную цепь последовательными этапами преобразовывают в простейшую. Например, для схемы рис. 27, а вначале определяют эквивалентное сопротивление R_{12} последовательно включенных резисторов с сопротивлениями R_1 и R_2 : $R_{12} = R_1 + R_2$. При этом схема рис. 27, а заменяется эквивалентной схемой рис. 27, б. Затем определяют эквивалентное сопротивление R_{123} параллельно включенных сопротивлений R_{12} и R_3 по формуле

$$R_{123} = R_{12}R_3 / (R_{12} + R_3) = (R_1 + R_2)R_3 / (R_1 + R_2 + R_3).$$

При этом схема рис. 27, б заменяется эквивалентной схемой рис. 27, в. После этого находят эквивалентное сопротивление всей цепи суммированием сопротивления R_{123} и последовательно включенного с ним сопротивления R_4 :

$$R_{\text{эк}} = R_{123} + R_4 = (R_1 + R_2) R_3 / (R_1 + R_2 + R_3) + R_4.$$

Последовательное, параллельное и смешанное соединения широко применяют для изменения сопротивления пусковых реостатов при пуске э. п. с. постоянного тока.

§ 12. Мостовая схема соединения резисторов и ее применение

При электрических измерениях, а также в некоторых других случаях резисторы включают по схеме *электрического моста*, или *мостовой схеме* (рис. 28, а). Резисторы с сопротивлениями R_1, R_2, R_3, R_4 образуют так называемые *плечи моста*. Участки цепи, соединяющие точки a и c , а также b и d , называются *диагоналями моста*. Обычно на одну из диагоналей, в данном случае ac (*питающая диагональ*), подается напряжение U от источника электрической энергии; в другую диагональ bd (*измерительная диагональ*) включают электроизмерительный прибор или какой-либо аппарат. При равенстве сопротивлений $R_1 = R_4$ и $R_2 = R_3$ напряжения на участках ab и ad от токов I_1 и I_2 (а также на участках bc и dc) будут одинаковыми, поэтому точки b и d будут иметь одинаковые потенциалы. Следовательно, если включить в диагональ bd какой-либо резистор R или электроизмерительный прибор, то в диагонали $I = 0$ (рис. 28, б). Такой мост называется *уравновешенным*.

Для равновесия моста необходимо, чтобы напряжения $U_{ab} = U_{ad}$ и $U_{bc} = U_{dc}$; эти условия имеют место не только при равенстве сопротивлений $R_1 = R_4$ и $R_2 = R_3$, но и при равенстве отношений $R_1/R_4 = R_2/R_3$. Следовательно, *мост будет уравновешен при равенстве произведений сопротивлений резисторов, включенных в противоположные его плечи: $R_1 R_3 = R_2 R_4$* . При несоблюдении этого условия через резистор R будет проходить ток I ; такой мост называется *неуравновешенным*.

Мостовую схему применяют также для включения реле боксования на некоторых электровозах. Реле служит датчиком для выявления боксования колесной пары. Реле P (рис. 29) включают

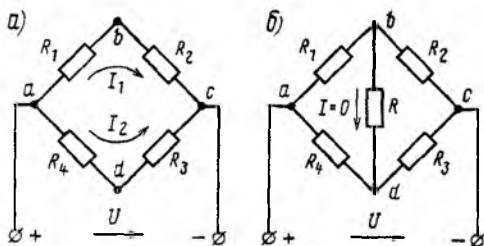


Рис. 28. Мостовые схемы включения резисторов

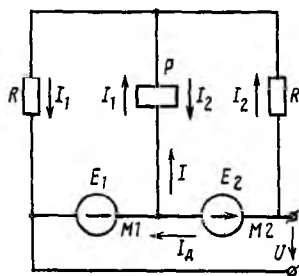


Рис. 29. Схема включения реле боксования

в диагональ моста, образованного двумя последовательно включенными электродвигателями $M1$ и $M2$, по которым проходит ток I_d (электродвигатели в данном случае рассматриваются как источники с э. д. с. E_1 и E_2), и двумя резисторами сопротивлением R . При отсутствии боксования $E_1 = E_2$, следовательно, токи, проходящие через резисторы, $I_1 = I_2$. Поэтому ток в катушке реле $I = I_1 - I_2 = 0$.

При возникновении боксования частота вращения тягового двигателя, связанного с боксующей колесной парой, резко возрастает. При этом резко увеличиваются его э. д. с., например E_1 , и ток I_1 . В результате по катушке реле P начнет проходить ток $I = I_1 - I_2$, который вызовет его срабатывание. Реле P своим блок-контактом включает сигнализацию и подачу песка или воздействует на систему управления электровоза.

§ 13. Работа и мощность электрического тока

Электрическая энергия. В природе и технике непрерывно происходят процессы превращения энергии из одного вида в другой (рис. 30). В источниках электрической энергии различные виды энергии превращаются в электрическую энергию. Например, в электрических генераторах 1, приводимых во вращение каким-либо механизмом, происходит превращение в электрическую энергию механической, в термогенераторах 2 — тепловой, в аккумуляторах 9 при их разряде и гальванических элементах 10 — химической, в фотоэлементах 11 — лучистой.

Приемники электрической энергии, наоборот, электрическую энергию превращают в другие виды энергии — тепловую, механическую, химическую, лучистую и пр. Например, в электродвигателях 3 электрическая энергия превращается в механическую, в электронагревательных приборах 4 — в тепловую, в электролитических ваннах 8 и аккумуляторах 7 при их заряде — в химическую, в электрических лампах 6 — в лучистую и тепловую, в антеннах 4 радиопередатчиков — в лучистую.

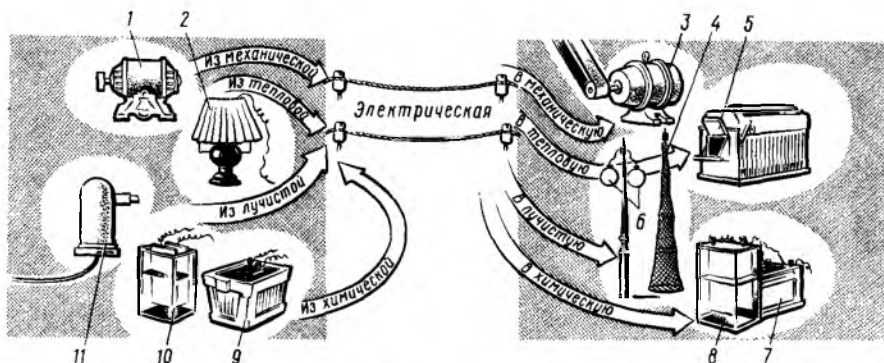


Рис. 30. Пути превращения энергии из одного вида в другой

Мерой количества энергии является работа. *Работа W , совершаемая электрическим током за время t при известном напряжении U и силе тока I , равна произведению напряжения на силу тока и на время его действия:*

$$W = UIt. \quad (29)$$

Работа, совершаемая электрическим током силой 1 А при напряжении 1 В в течение 1 с, принята за единицу электрической энергии. Эта единица называется *джоулем* (Дж). Джоуль, который называют также ватт-секундой (Вт·с), — очень маленькая единица измерения, поэтому на практике для измерения электрической энергии приняты более крупные единицы — ватт-час ($1 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 3600 \text{ Дж}$), киловатт-час ($1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 1000 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$), мегаватт-час ($1 \text{ МВт}\cdot\text{ч} = 1000 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 3,6 \cdot 10^9 \text{ Дж}$).

Пример 18. Через электрическую плитку, включенную в сеть напряжением 220 В, проходит ток 5 А. Определить расход электрической энергии при использовании плитки в течение 3 ч и стоимость пользования ею, если $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ электроэнергии стоит 4 коп.

Решение. Электрическая энергия, потребляемая плиткой,

$$W = 220 \cdot 5 \cdot 3 = 3300 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 3,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Стоимость электроэнергии $3,3 \cdot 4 = 13,2$ коп.

Электрическая мощность. *Энергия, получаемая приемником или отдаваемая источником тока в течение t с, называется мощностью. Мощность P при неизменных значениях U и I равна произведению напряжения U на силу тока I :*

$$P = UI. \quad (30)$$

Используя закон Ома для определения силы тока и напряжения в зависимости от сопротивления R и проводимости G , можно получить и другие выражения для мощности. Если заменить в формуле (30) напряжение $U = IR$ или силу тока $I = U/R = UG$, то получим

$$P = I^2 R, \quad (31)$$

или

$$P = U^2 / R = U^2 G. \quad (32)$$

Следовательно, *электрическая мощность равна произведению квадрата силы тока на сопротивление, или электрическая мощность равна квадрату напряжения, поделенному на сопротивление, либо квадрату напряжения, умноженному на проводимость.*

Мощность, которая создается силой тока 1 А при напряжении 1 В, принята за единицу измерения мощности и называется ватт (Вт). В технике мощность измеряют более крупными единицами: киловаттами (1 кВт=1000 Вт) и мегаваттами (1 МВт=1 000 000 Вт).

Пример 19. Тяговый двигатель электровоза питается напряжением 1500 В при токе 380 А. Определить мощность, потребляемую двигателем.
Решение. $P=UI=1500 \text{ В} \cdot 380 \text{ А}=570\,000 \text{ Вт}=570 \text{ кВт}$.

Пример 20. Через электрическую плитку сопротивлением 24 Ом проходит ток 5 А. Определить мощность, потребляемую плиткой.
Решение. $P=I^2R=5^2 \cdot 24=600 \text{ Вт}$.

Пример 21. Электрическая лампа сопротивлением 484 Ом включена под напряжением 220 В. Определить мощность, потребляемую лампой.
Решение. $P=U^2/R=220^2/484=100 \text{ Вт}$.

Потери энергии и коэффициент полезного действия. При превращении электрической энергии в другие виды энергии или наоборот не вся энергия превращается в требуемый вид энергии, часть ее неизбежно затрачивается (теряется) на преодоление трения в подшипниках машин, нагревание проводов и пр. Эти потери энергии неизбежны в любой машине и любом аппарате.

Отношение мощности, отдаваемой источником или приемником электрической энергии, к получаемой им мощности, называется коэффициентом полезного действия источника или приемника. Коэффициент полезного действия (к. п. д.)

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + \Delta P), \quad (33)$$

где P_2 — отдаваемая (полезная) мощность;
 P_1 — получаемая мощность;
 ΔP — потери мощности.

К. п. д. всегда меньше единицы, так как в любой машине и любом аппарате имеются потери энергии. Иногда к. п. д. выражают в процентах. Так, тяговые двигатели электровозов и тепловозов имеют к. п. д. 86—92 %, мощные трансформаторы — 96—98 %, тяговые подстанции — 94—96 %, контактная сеть электрифицированных железных дорог — около 90 %, генераторы тепловозов — 92—94 %.

Рассмотрим в качестве примера распределение энергии в электрической цепи (рис. 31). Генератор 1, питающий эту цепь, получает от первичного двигателя 2 (например, дизеля) механическую мощность $P_{мх}=28,9 \text{ кВт}$, а отдает электрическую мощность $P_{эл}=26 \text{ кВт}$ (2,9 кВт составляют потери мощности в генераторе). Поэтому он имеет к. п. д. $\eta_{ген} = P_{эл}/P_{мх} = 26/28,9 = 0,9$.

Мощность $P_{эл}=26 \text{ кВт}$, отдаваемая генератором, расходуется на питание электрических ламп (6 кВт), на нагрев электрических плиток (7,2 кВт) и на питание электродвигателя (10,8 кВт). Часть мощности $\Delta P_{пр}=2 \text{ кВт}$ теряется на бесполезный нагрев проводов, соединяющих генератор с потребителями.

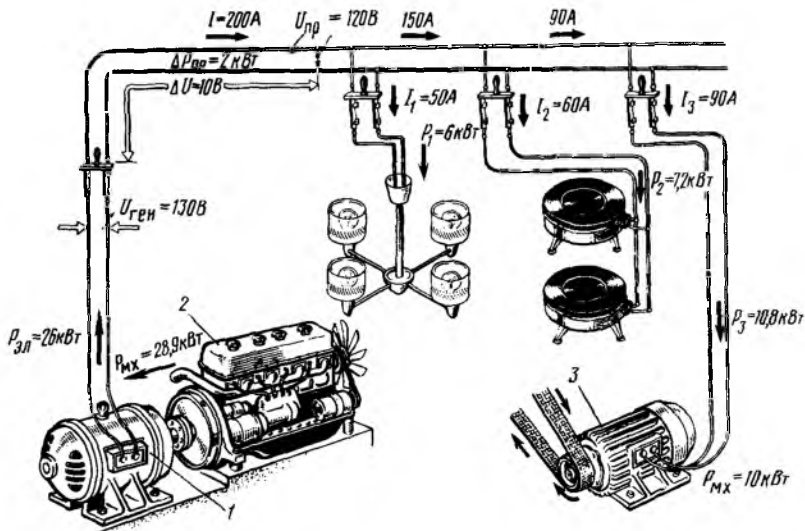


Рис. 31. Схема преобразования энергии в электрической цепи

В каждом приемнике электрической энергии также имеют место потери мощности. В электрическом двигателе 3 потери мощности составляют 0,8 кВт (он получает из сети мощность 10,8 кВт, а отдает только 10 кВт), поэтому к. п. д. $\eta_{дв} = 10/10,8 = 0,925$. Из мощности 6 кВт, полученной лампами, лишь незначительная часть идет на создание лучистой энергии, большая часть ее бесполезно рассеивается в виде тепла. В электрической плитке на нагрев пищи расходуется не вся полученная мощность 7,2 кВт, так как часть созданного ею тепла рассеивается в окружающем пространстве.

При рассмотрении электрических цепей наряду с определением токов и напряжений, действующих на отдельных участках, необходимо определять и передаваемую по ним мощность. При этом должен соблюдаться так называемый *энергетический баланс мощностей*. Это означает, что мощность, получаемая каким-либо устройством (источником тока или потребителем) или участком электрической цепи, должна быть равна сумме отдаваемой ими мощности и потерь мощности, которые возникают в данном устройстве или участке цепи.

Пример 22. Определить к. п. д. тягового двигателя, отдающего мощность 400 кВт, если потери мощности в нем $\Delta P = 32$ кВт. Каковы мощность P_1 , потребляемая двигателем, и сила тока I при напряжении $U = 1500$ В?

Решение. К. п. д.

$$\eta = P_2 / (P_2 + \Delta P) = 400 / (400 + 32) = 0,925 = 92,5 \%$$

Потребляемая мощность

$$P_1 = P_2 + \Delta P = 400 \text{ кВт} + 32 \text{ кВт} = 432 \text{ кВт.}$$

Потребляемый ток

$$I = P_1 / U = 432 \text{ 000} / 1500 = 288 \text{ А.}$$

§ 14. Тепловое действие тока

Выделение тепла при прохождении электрического тока. При прохождении электрического тока по проводнику в результате столкновений свободных электронов с его атомами и ионами проводник нагревается.

Количество тепла, выделяемого в проводнике при прохождении электрического тока, определяется законом Ленца — Джоуля. Его формулируют следующим образом. *Количество выделенного тепла Q равно произведению квадрата силы тока I^2 , сопротивления проводника R и времени t прохождения тока через проводник:*

$$Q = I^2 R t. \quad (34)$$

Если в этой формуле силу тока брать в амперах, сопротивление в омах, а время в секундах, то получим количество выделенного тепла в джоулях. Из сравнения формул (29) и (34) следует, что *количество выделенного тепла равно количеству электрической энергии, полученной данным проводником при прохождении по нему тока.*

Пример 23. Определить количество тепла, выделяющегося в течение 1 ч в электрической плитке, если она включена под напряжение 220 В, а сопротивление ее спирали 55 Ом.

Решение. Сила тока, проходящего через плитку,

$$I = U/R = 220 \text{ В}/55 \text{ Ом} = 4 \text{ А.}$$

Количество выделившегося тепла

$$Q = I^2 R t = 4^2 \cdot 55 \cdot 3600 = 3\,168\,000 \text{ Дж} \approx 0,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Допустимая сила и плотность тока. Превращение электрической энергии в тепловую нашло широкое применение в технике. Оно происходит, например, в различных производственных и бытовых электронагревательных приборах (электрических печах, электроплитах, электрических паяльниках и пр.), в электрических лампах накаливания, аппаратах для электрической сварки и пр. Однако во многих электрических устройствах, например в электрических машинах и аппаратах, электрических проводах и т. д., превращение электрической энергии в тепло вредно, так как это тепло не только не используется, а наоборот, ухудшает работу этих машин и аппаратов, а в некоторых случаях может вызвать повреждения и аварии.

Каждый проводник в зависимости от условий, в которых он находится, может пропускать, не перегреваясь, ток силой, не превышающей некоторое допустимое значение. Для определения токовой нагрузки проводов часто пользуются понятием *допустимой плотности тока J* (сила тока I , приходящаяся на 1 мм^2 площади s поперечного сечения проводника):

$$J = I/s.$$

(35)

Допустимая плотность тока зависит от материала провода (медь или алюминий), вида применяемой изоляции, условий охлаждения, площади поперечного сечения и пр. Например, допустимая плотность тока в проводах обмоток электрических машин не должна превышать 3—6 А/мм², в нити осветительной электрической лампы — 15 А/мм². В проводах силовых и осветительных сетей плотность тока может быть различной в зависимости от площади поперечного сечения провода и его изоляции. Например, для медных проводов с резиновой изоляцией и площадью поперечного сечения 4 мм² допускается плотность тока 10,2 А/мм², а 50 мм² — только 4,3 А/мм²; для неизолированных проводов тех же площадей сечения — 12,5 и 5,6 А/мм². Уменьшение допустимой плотности тока при увеличении площади поперечного сечения провода объясняется тем, что в проводах с большей площадью сечения отвод тепла от внутренних слоев затруднен, так как сами они окружены нагретыми слоями. Для неизолированных проводов допускается большая температура нагрева, чем для изолированных.

Превышение допустимого значения силы тока в проводнике может вызвать чрезмерное повышение температуры, в результате этого изоляция проводов электродвигателей, генераторов и электрических сетей обугливается и даже горит, что может привести к короткому замыканию и пожару. Неизолированные же провода могут при высокой температуре расплавиться и оборваться.

Для того чтобы предотвратить недопустимое увеличение силы тока, во всех электрических установках должны приниматься меры для автоматического отключения от источников электрической энергии тех приемников или участков цепи, в которых имеет место перегрузка или короткое замыкание. Для этой цели в технике широко используют плавкие предохранители, автоматические выключатели и другие устройства.

Нагрев в переходном сопротивлении. Повышенный нагрев проводника, как следует из закона Ленца — Джоуля, может происходить не только вследствие прохождения по нему тока большой силы, но и вследствие повышения сопротивления проводника. Поэтому для надежной работы электрических установок большое значение имеет значение сопротивления в месте соединения отдельных проводников. *При неплотном электрическом контакте и плохом соединении проводников (рис. 32) электрическое сопротивление в этих местах (так называемое переходное сопротивление электрического контакта) сильно возрастает, и здесь происходит усиленное выделение тепла.* В результате место неплотного соединения проводников будет представлять собой опасность в пожарном отношении, а значительный нагрев может привести к полному выгоранию плохо соединенных проводников. Во избежание этого при соединении проводов на э. п. с. и тепловозах концы их тщательно зачищают, облуживают и впаивают в кабельные наконечники, ко-

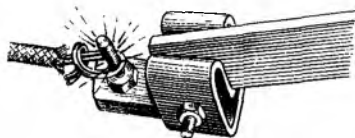
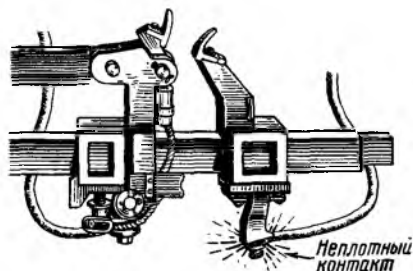


Рис. 32. Схемы выделения тепла и возникновения искрения при неплотном электрическом контакте



которые надежно прикрепляют болтами к зажимам электрических машин и аппаратов. Специальные меры принимают и для уменьшения переходного сопротивления между контактами электрических аппаратов, осуществляющих включение и выключение тока.

§ 15. Передача электрической энергии по проводам

Потеря напряжения в проводах линии. Передача электрической энергии от источника 1 (рис. 33) к приемнику 2 происходит по проводам, образующим электрическую линию. При передаче энергии возникает *потеря напряжения в проводах линии*

$$\Delta U_{\text{л}} = IR_{\text{л}} \quad (36)$$

где $R_{\text{л}}$ — сопротивление проводов линии.

В результате этого напряжение U_2 в конце электрической линии оказывается меньше напряжения U_1 в начале линии. Потеря напряжения в проводах линии $\Delta U_{\text{л}}$ не является постоянной величиной, она колеблется в зависимости от силы тока нагрузки от нуля (при $I=0$) до наибольшего значения (при максимальной нагрузке). Кроме того, она зависит от сопротивления $R_{\text{л}}$ проводов линии,

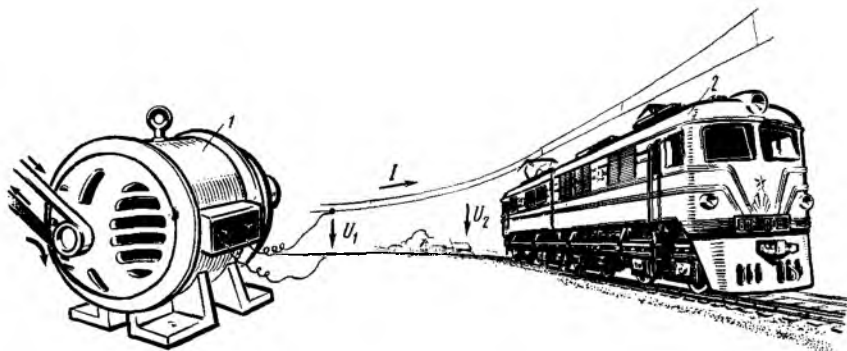


Рис. 33. Схема передачи электрической энергии от источника к приемнику

т. е. от их удельной проводимости ρ , площади поперечного сечения s и длины линии l_n .

На электрифицированных железных дорогах одним из проводов, соединяющих источник питания — тяговую подстанцию с потребителем — электровозом, является контактный провод, а другим — рельсы. Поэтому под потерей напряжения в проводах ΔU_n в этом случае понимается суммарная потеря напряжения в контактной сети и рельсах. Потеря напряжения в линии увеличивается по мере удаления электровоза от тяговой подстанции, в соответствии с этим уменьшается и напряжение на его токоприемнике.

Пример 24. Напряжение у тяговой подстанции 3300 В. Определить напряжение на токоприемнике электровоза, потребляющего ток 1000 А, когда он находится на расстоянии 2 и 8 км от подстанции. Сопротивление 1 км провода контактной сети равно 0,04 Ом и 1 км рельсового пути 0,01 Ом.

Решение. Потеря напряжения в контактном проводе:
при расстоянии 2 км

$$\Delta U_{кп} = IR_{кп} = 1000 \cdot 0,04 \cdot 2 = 80 \text{ В};$$

при расстоянии 8 км

$$\Delta U_{кп} = 1000 \cdot 0,04 \cdot 8 = 320 \text{ В}.$$

Потеря напряжения в рельсах:

при расстоянии 2 км

$$\Delta U_p = IR_p = 1000 \cdot 0,01 \cdot 2 = 20 \text{ В};$$

при расстоянии 8 км

$$\Delta U_p = 1000 \cdot 0,01 \cdot 8 = 80 \text{ В}.$$

Напряжение на токоприемнике электровоза:

при расстоянии 2 км

$$U_2 = U_1 - \Delta U_{кп} - \Delta U_p = 3300 - 80 - 20 = 3200 \text{ В};$$

при расстоянии 8 км

$$U_2 = 3300 - 320 - 80 = 2900 \text{ В}.$$

Потери мощности в линии и ее к. п. д. При прохождении по линии тока I часть мощности P_1 , поступающей от источника, теряется в линии, вызывая нагрев проводов, эти потери мощности

$$\Delta P_n = I^2 R_n = I \Delta U_n. \quad (37)$$

Следовательно, приемник электрической энергии, включенный на конце линии, будет получать меньшую мощность —

$$P_2 = P_1 - \Delta P_n. \quad (38)$$

При увеличении тока I возрастают потери мощности в проводах линии ΔP_n и уменьшаются к. п. д. линии и напряжение U_2 , подаваемое на нагрузку.

Практически электрическую энергию передают по проводам при $\eta = 0,9 \div 0,95$, при этом сопротивление проводов линии составляет 5—10 % сопротивления нагрузки и потери энергии в них не превышают 5—10 % передаваемой мощности.

Рассмотрим теперь, как зависят потери мощности в линии и ее к. п. д. от напряжения U_2 , при котором осуществляется передача электроэнергии. Потери мощности в проводах линии

$$\Delta P_n = I^2 R_n = \frac{P_2^2}{U_2^2} \frac{2\rho l_n}{s_n} \quad (39)$$

Следовательно, чем больше передаваемая мощность P_2 и расстояние l_n , на которое она передается, тем больше потери мощности и энергии в проводах; чем больше площадь сечения проводов s_n и напряжение U_2 в линии передачи, тем меньше эти потери, поэтому выгоднее передавать электрическую энергию при более высоких напряжениях.

Принципы расчета проводов. Для правильной работы приемников электрической энергии весьма важно, чтобы подаваемое к ним напряжение поддерживалось по возможности постоянным и было равно их номинальному напряжению. Понижение напряжения вызывает существенное ослабление накала электрических ламп и ухудшение режима работы электродвигателей, а увеличение по сравнению с номинальным — сокращение срока службы ламп и электрических машин.

Электрические провода обычно рассчитывают по допустимой потере напряжения. Потеря напряжения в проводах допускается небольшой по сравнению с напряжением сети для экономии электрической энергии и обеспечения малого колебания напряжения на приемниках. В электрических сетях различного назначения допустимые потери напряжения составляют примерно 2—6 %. Исходя из этих условий и проводят расчет электрических проводов, т. е. подбор площади s_n их поперечного сечения. Ее выбирают такой, чтобы при максимальной нагрузке потери напряжения на участке от источника питания до самого удаленного приемника не превышали 2—6 % номинального напряжения. При электрической тяге выбор площади сечения контактных проводов также производят из условия, чтобы на токоприемнике электровоза действовало напряжение U_2 , достаточное для нормальной работы электрических машин локомотива.

Относительная потеря напряжения в линии, %,

$$\varepsilon = (\Delta U_n / U_2) 100 \%$$

Заменяя в этой формуле $\Delta U_n = IR_n = I2\rho l_n / s_n$ и $I = P_2 / U_2$, получим, что поперечное сечение проводов линии

$$s_n = (200\rho / \varepsilon) (P_2 l_n / U_2^2) \quad (39')$$

Из формулы (39') следует:

1) чем больше передаваемая мощность и чем на большее расстояние она передается, тем больше должно быть поперечное сечение проводов линии;

2) увеличение напряжения в линии позволяет в значительной степени уменьшить сечение проводов линии и снизить потери мощности в ней.

При передаче электрической энергии на дальнее расстояние широко используются выгоды, которые дает повышение напряжения. Чем большую мощность требуется передать и чем больше расстояние, на которое она передается, тем более высокое напряжение применяют в линиях электропередачи. Например, при передаче энергии от мощных электростанций (Куйбышевской, Волгоградской и др.) на расстояние 800—1000 км используют напряжение 500—750 кВ; при передаче энергии на расстояние 100—200 км — 110—220 кВ; при передаче сравнительно небольшого количества энергии на расстояния нескольких километров или десятков километров — 35 кВ. В электрических установках небольшой мощности при расположении электрических приемников вблизи от источников питания применяют напряжения 110, 220, 440 В (при постоянном токе) и 127, 220, 380, 660 В (при переменном токе).

В Советском Союзе все электростанции, расположенные в европейской части страны, объединены в Единую энергетическую систему европейской части СССР (ЕЕЭС). В нее входят свыше 600 электростанций, обеспечивающих энергоснабжение всех расположенных в этих районах потребителей. Такой системы нет ни в одной стране мира. Она дает большие технико-экономические выгоды, так как позволяет наиболее целесообразно распределять нагрузку между электростанциями, широко маневрировать электроэнергией в пределах всей страны и даже передавать энергию в соседние дружественные страны.

Продолжаются работы по созданию Единой энергетической системы СССР. Для связи ЕЕЭС с мощными электростанциями Сибири и Казахстана сооружают дальние линии электропередачи переменного тока напряжением 750 и 1150 кВ и постоянного тока напряжением 1500 кВ. Расширяются международные энергетические связи. Создана Единая энергетическая система «Мир», связывающая СССР, Болгарию, Венгрию, ГДР, Польшу, Румынию и Чехословакию.

При электрической тяге, чем больше напряжение в контактном проводе, тем меньшую площадь сечения он будет иметь и тем на большем расстоянии могут быть расположены источники питания контактной сети (тяговые подстанции). Например, для снабжения электрической энергией трамвая, двигатели которого имеют сравнительно небольшую мощность, а контактная сеть — небольшую протяженность, используют напряжение 600 В, а на магистральных железных дорогах, электрифицированных на постоянном токе (где эксплуатируются мощные локомотивы), — 3300 В. Электрификация железных дорог на переменном токе дает возможность

поднять напряжение в контактной сети до 27 500 В, что позволяет значительно уменьшить площадь сечения проводов контактной сети и увеличить расстояние между тяговыми подстанциями по сравнению с дорогами постоянного тока. В последнее время ведутся работы по дальнейшему повышению напряжения в контактной сети на дорогах переменного тока до 2×25 кВ.

Контрольные вопросы

1. Как образуется электрическая цепь и из каких частей она состоит?
2. Какова физическая природа электрического тока в металлических проводниках и при каких условиях он возникает?
3. Какова физическая природа электрического сопротивления и в каких единицах оно измеряется?
4. От чего зависит электрическое сопротивление прямолинейных проводников?
5. Сформулируйте закон Ома для электрической цепи и отдельного ее участка.
6. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа.
7. В каких режимах может работать электрическая цепь?
8. Для чего применяют резисторы и реостаты и из чего они изготавливаются?
9. Как определить эквивалентное сопротивление цепи при последовательном, параллельном и смешанном соединениях резисторов?
10. Как определить работу, совершаемую электрическим током, и электрическую мощность? В каких единицах они измеряются?

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 16. Магнитное поле и его основные характеристики

При прохождении электрического тока по проводнику вокруг него образуется *магнитное поле*. Магнитное поле представляет собой один из видов материи. Оно обладает энергией, которая проявляет себя в виде электромагнитных сил, действующих на отдельные движущиеся электрические заряды (электроны и ионы) и на их потоки, т. е. электрический ток.

Под влиянием электромагнитных сил движущиеся заряженные частицы отклоняются от своего первоначального пути в направлении, перпендикулярном полю (рис. 34). Магнитное поле образуется только вокруг движущихся электрических зарядов, и его действие распространяется тоже лишь на движущиеся заряды. *Магнитное и электрические поля неразрывны и образуют совместно единое электромагнитное поле*. Всякое изменение электрического поля приводит к появлению магнитного поля и, наоборот, всякое изменение магнитного поля сопровождается возникновением электрического поля. Электромагнитное поле распространяется со скоростью света, т. е. 300 000 км/с.

Графическое изображение магнитного поля. Графически магнитное поле изображают *магнитными силовыми линиями*, которые проводят так, чтобы направление силовой линии в каждой точке поля совпадало с направлением сил поля; магнитные силовые линии всегда являются непрерывными и замкнутыми. Направление магнитного поля в каждой точке может быть определено при помощи магнитной стрелки. Северный полюс стрелки всегда устанавливается в направлении действия сил поля.

Конец постоянного магнита, из которого выходят силовые линии (рис. 35, а), принято считать северным полюсом, а противоположный конец, в который входят силовые линии,— южным полюсом (силовые линии, проходящие внутри магнита, не показаны). Распределение силовых линий между полюсами плоского магнита можно обнаружить при помощи стальных опилок, насыпанных на лист бумаги, положенный на полюсы (рис. 35, б).

Для магнитного поля в воздушном зазоре между двумя параллельно расположенными разноименными полюсами постоянного магнита характерно равномерное распределение силовых магнитных линий (рис. 36) (силовые линии, проходящие внутри магнита, не показаны).

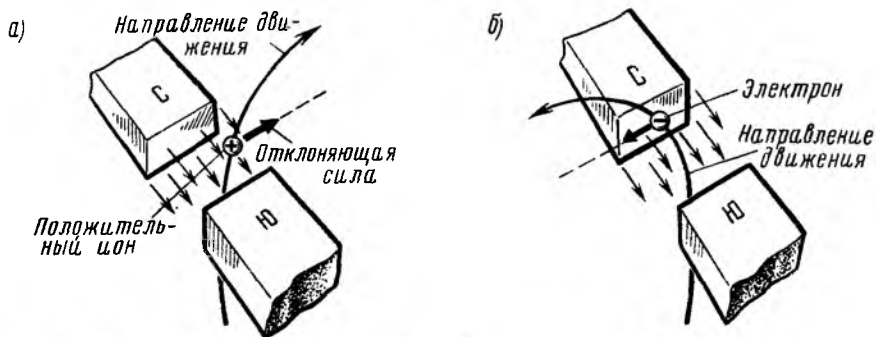


Рис. 34. Схемы действия магнитного поля на движущиеся электрические заряды: положительный ион (а) и электрон (б)

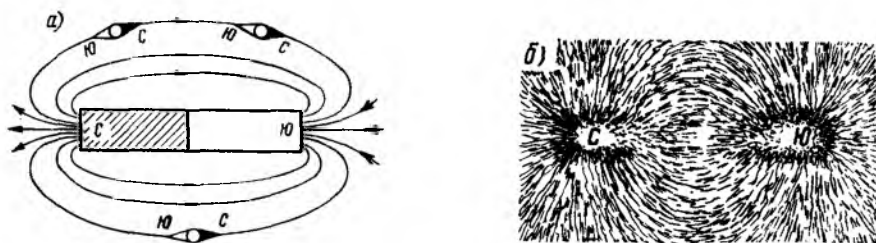


Рис. 35. Магнитное поле, созданное постоянным магнитом

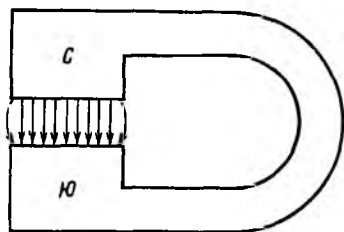


Рис. 36. Однородное магнитное поле между полюсами постоянного магнита

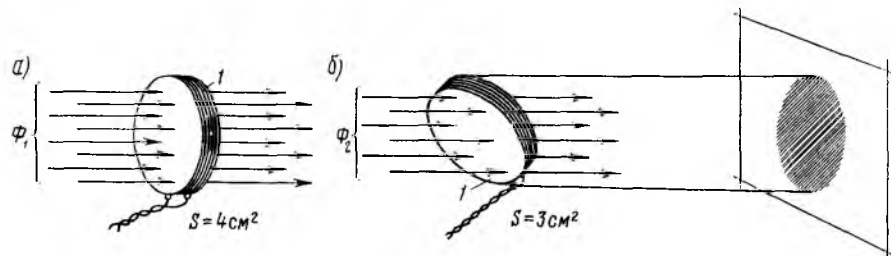


Рис. 37. Магнитный поток, пронизывающий катушку при перпендикулярном (а) и наклонном (б) ее положениях по отношению к направлению магнитных силовых линий

Для более наглядного изображения магнитного поля силовые линии располагают реже или гуще. В тех местах, где магнитное поле сильнее, силовые линии располагают ближе друг к другу, там же, где оно слабее,— дальше друг от друга. Силовые линии нигде не пересекаются.

Во многих случаях удобно рассматривать магнитные силовые линии как некоторые упругие растянутые нити, которые стремятся сократиться, а также взаимно отталкиваются друг от друга (имеют взаимный боковой распор). Такое механическое представление о силовых линиях позволяет наглядно объяснить возникновение электромагнитных сил при взаимодействии магнитного поля и проводника с током, а также двух магнитных полей.

Основными характеристиками магнитного поля являются магнитная индукция, магнитный поток, магнитная проницаемость и напряженность магнитного поля.

Магнитная индукция и магнитный поток. Интенсивность магнитного поля, т. е. способность его производить работу, определяется величиной, называемой *магнитной индукцией*. Чем сильнее магнитное поле, созданное постоянным магнитом или электромагнитом, тем бóльшую индукцию оно имеет. Магнитную индукцию B можно характеризовать плотностью силовых магнитных линий, т. е. числом силовых линий, проходящих через площадь 1 м^2 или 1 см^2 , расположенную перпендикулярно магнитному полю.

Различают однородные и неоднородные магнитные поля. В однородном магнитном поле магнитная индукция в каждой точке поля имеет одинаковое значение и направление. Однородным может считаться поле в воздушном зазоре между разноименными полюсами магнита или электромагнита (см. рис. 36) при некотором удалении от его краев.

Магнитный поток Φ , проходящий через какую-либо поверхность, определяется общим числом магнитных силовых линий, пронизывающих эту поверхность, например катушку I (рис. 37, а), следовательно, в однородном магнитном поле

$$\Phi = BS, \quad (40)$$

где S — площадь поперечного сечения поверхности, через которую проходят магнитные силовые линии.

Отсюда следует, что в таком поле *магнитная индукция равна потоку, поделенному на площадь S поперечного сечения*:

$$B = \Phi/S. \quad (41)$$

Если какая-либо поверхность расположена наклонно по отношению к направлению магнитных силовых линий (рис. 37, б), то пронизывающий ее поток будет меньше, чем при перпендикулярном ее положении, т. е. Φ_2 будет меньше Φ_1 .

В системе единиц СИ магнитный поток измеряется в *веберах* (Вб), эта единица имеет размерность В·с (вольт-секунда). Магнитная индукция в системе единиц СИ измеряется в теслах (Тл); $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб/м}^2$.

Пример 25. Магнитная индукция в сердечнике главного полюса тягового двигателя составляет 1,5 Тл. Полюс имеет длину 300 мм и полезную ширину 220 мм [за вычетом изоляционных прокладок между отдельными листами (см. § 27)].

Определить магнитный поток, проходящий через полюс.

Решение. Полезная площадь поперечного сечения полюса (площадь, занимаемая стальными листами)

$$S = 30 \cdot 22 = 660 \text{ см}^2 = 0,066 \text{ м}^2.$$

Магнитный поток полюса по формуле (40)

$$\Phi = BS = 1,5 \text{ Тл} \cdot 0,066 \text{ м}^2 = 0,099 \text{ Вб}.$$

Магнитная проницаемость. Магнитная индукция зависит не только от силы тока, проходящего по прямолинейному проводнику или катушке, но и от свойств среды, в которой создается магнитное поле. Величиной, характеризующей магнитные свойства среды, служит *абсолютная магнитная проницаемость* μ_a . Единицей ее измерения является генри на метр ($1 \text{ Гн/м} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{с/м}$).

В среде с большей магнитной проницаемостью электрический ток определенной силы создает магнитное поле с большей индукцией. Установлено, что магнитная проницаемость воздуха и всех веществ, за исключением ферромагнитных материалов (см. § 18), имеет примерно то же значение, что и магнитная проницаемость вакуума. Абсолютную магнитную проницаемость вакуума называют *магнитной постоянной*, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$. Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов в тысячи и даже десятки тысяч раз больше магнитной проницаемости неферромагнитных веществ. Отношение магнитной проницаемости μ_a какого-либо вещества к магнитной проницаемости вакуума μ_0 называют *относительной магнитной проницаемостью*:

$$\mu = \mu_a / \mu_0. \quad (42)$$

Напряженность магнитного поля. Напряженность H не зависит от магнитных свойств среды, но учитывает влияние силы тока и формы проводников на интенсивность магнитного поля в данной точке пространства. Магнитная индукция и напряженность связаны отношением

$$H = B / \mu_a = B / (\mu \mu_0). \quad (43)$$

Следовательно, в среде с неизменной магнитной проницаемостью индукция магнитного поля пропорциональна его напряженности.

Напряженность магнитного поля измеряется в *амперах на метр* (А/м) или *амперах на сантиметр* (А/см).

§ 17. Магнитное поле проводника с током и способы его усиления

Магнитное поле проводника с током. При прохождении тока по прямолинейному проводнику вокруг него возникает магнитное поле (рис. 38). Магнитные силовые линии этого поля располагаются по концентрическим окружностям, в центре которых находится проводник с током.

Направление магнитного поля вокруг проводника с током всегда находится в строгом соответствии с направлением тока, проходящего по проводнику. Направление магнитных силовых линий можно определить по правилу буравчика. Его формулируют следующим образом. Если поступательное движение буравчика 1 (рис. 39, а) совместить с направлением тока 2 в проводнике 3 , то вращение его рукоятки укажет направление силовых линий 4 магнитного поля вокруг проводника. Например, если ток проходит по проводнику в направлении от нас за плоскость листа книги (рис. 39, б), то магнитное поле, возникающее вокруг этого проводника, направлено по часовой стрелке. Если ток по проводнику проходит по направлению от плоскости листа книги к нам, то магнитное поле вокруг проводника направлено против часовой стрелки. Чем больше ток, проходящий по проводнику, тем сильнее возникающее вокруг него магнитное поле. При изменении направления тока магнитное поле также изменяет свое направление.

По мере удаления от проводника магнитные силовые линии располагаются реже. Следовательно, индукция магнитного поля и его напряженность уменьшаются. Напряженность магнитного поля в пространстве, окружающем проводник,

$$H = I / (2\pi r), \quad (44)$$

где r — расстояние от рассматриваемой точки до оси проводника.

Максимальная напряженность H_{max} имеет место на внешней поверхности проводника l (рис. 40). Внутри проводника также

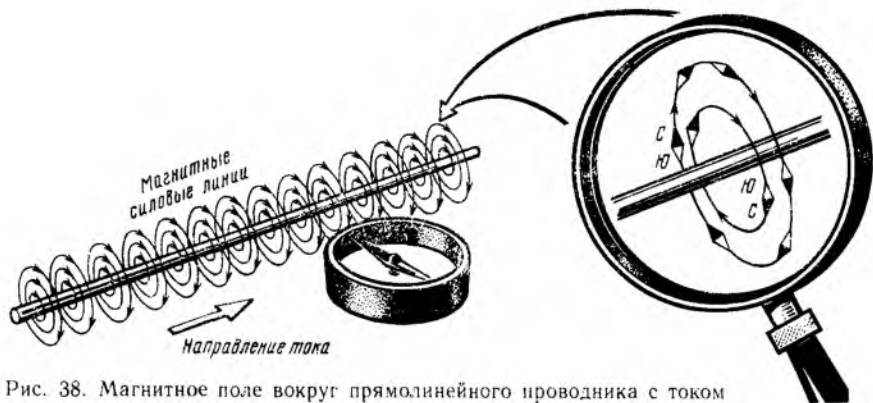


Рис. 38. Магнитное поле вокруг прямолинейного проводника с током

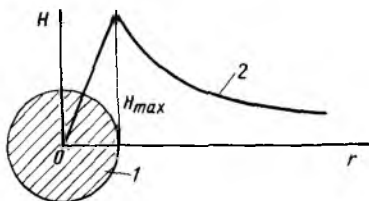
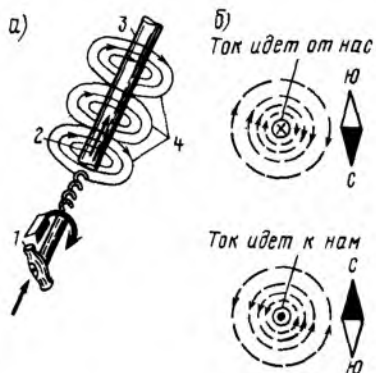


Рис. 39. Определение направления магнитного поля по правилу буравчика

▲ Рис. 40. Кривая распределения напряженности магнитного поля H вокруг и внутри проводника с током

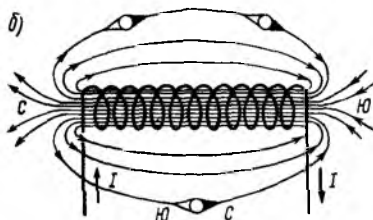
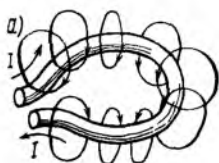


Рис. 41. Магнитные поля, созданные витком с током (а) и катушкой (б)

Рис. 42. Электромагниты с разомкнутым (а) и замкнутым (б) магнитопроводом

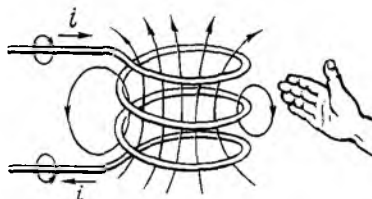
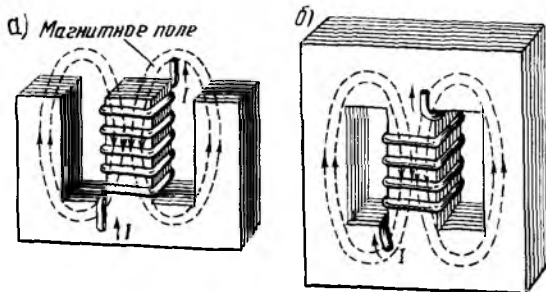


Рис. 43. Определение полярности электромагнита с помощью правой руки

возникает магнитное поле, но напряженность его линейно уменьшается по направлению от внешней поверхности к оси (кривая 2). Магнитная индукция поля вокруг и внутри проводника изменяется таким же образом, как и напряженность.

Способы усиления магнитных полей. Для получения сильных магнитных полей при небольших токах обычно увеличивают число проводников с током и выполняют их в виде ряда витков; такое устройство называют *обмоткой*, или *катушкой*.

При проводнике, согнутом в виде витка (рис. 41, а), магнитные поля, образованные всеми участками этого проводника, будут внутри витка иметь одинаковое направление. Поэтому интенсивность магнитного поля внутри витка будет больше, чем вокруг прямолинейного проводника. При объединении витков в катушку магнитные поля, созданные отдельными витками, складываются (рис. 41, б) и их силовые линии соединяются в общий магнитный поток. При этом концентрация силовых линий внутри катушки возрастает, т. е. магнитное поле внутри нее усиливается. Чем больше ток, проходящий через катушку, и чем больше в ней витков, тем сильнее создаваемое катушкой магнитное поле.

Магнитное поле снаружи катушки также складывается из магнитных полей отдельных витков, однако магнитные силовые линии располагаются не так густо, вследствие чего интенсивность магнитного поля там не столь велика, как внутри катушки. Магнитное поле катушки, обтекаемой током, имеет такую же форму, как и поле прямолинейного постоянного магнита (см. рис. 35, а): силовые магнитные линии выходят из одного конца катушки и входят в другой ее конец. Поэтому катушка, обтекаемая током, представляет собой искусственный электрический магнит. Обычно для усиления магнитного поля внутрь катушки вставляют стальной сердечник; такое устройство называется *электромагнитом*.

Электромагниты нашли чрезвычайно широкое применение в технике. Они создают магнитное поле, необходимое для работы электрических машин, а также электродинамические усилия, требуемые для работы различных электроизмерительных приборов и электрических аппаратов.

Электромагниты могут иметь разомкнутый или замкнутый магнитопровод (рис. 42). Полярность конца катушки электромагнита можно определить, как и полярность постоянного магнита, при помощи магнитной стрелки. К северному полюсу она поворачивается южным концом. Для определения направления магнитного поля, создаваемого витком или катушкой, можно использовать также правило буравчика. Если совместить направление вращения рукоятки с направлением тока в витке или катушке, то поступательное движение буравчика укажет направление магнитного поля.

Полярность электромагнита можно определить и с помощью правой руки. Для этого руку надо положить ладонью на катушку (рис. 43) и совместить четыре пальца с направлением в ней тока, при этом отогнутый большой палец покажет направление магнитного поля

§ 18. Магнитные свойства различных веществ

Ферромагнитные, парамагнитные и диамагнитные материалы. Все вещества — твердые, жидкие и газообразные в зависимости от магнитных свойств делят на три группы: ферромагнитные, парамагнитные и диамагнитные.

К *ферромагнитным* материалам относят железо, кобальт, никель и их сплавы. Они обладают высокой магнитной проницаемостью μ , в тысячи и даже десятки тысяч раз большей магнитной проницаемости неферромагнитных веществ, и хорошо притягиваются к магнитам и электромагнитам.

К *парамагнитным* материалам относят алюминий, олово, хром, марганец, платину, вольфрам, растворы солей железа и др. Относительная магнитная проницаемость μ у них несколько больше единицы. Парамагнитные материалы притягиваются к магнитам и электромагнитам в тысячи раз слабее, чем ферромагнитные материалы.

Диамагнитные материалы к магнитам не притягиваются, а, наоборот, отталкиваются. К ним относят медь, серебро, золото, свинец, цинк, смолу, воду, большую часть газов, воздух и пр. Относительная магнитная проницаемость μ у них несколько меньше единицы.

Магнитные свойства ферромагнитных материалов. Ферромагнитные материалы благодаря их способности намагничиваться широко применяют при изготовлении электрических машин, аппаратов в других электротехнических установках. Основными характеристиками их являются: кривая намагничивания, ширина петли гистерезиса и потери мощности при перемагничивании.

Кривая намагничивания ферромагнитного материала можно изобразить в виде кривой намагничивания (рис. 44, а), которая представляет собой зависимость индукции B от напряженности H магнитного поля. Так как напряженность магнитного поля определяется силой тока, посредством которого намагничивается ферромагнитный материал, эту кривую можно рассматривать как зависимость индукции от намагничивающего тока I .

Кривую намагничивания можно разбить на три участка: *Oa*, на котором магнитная индукция возрастает почти пропорционально намагничивающему току (напряженности поля); *ab*, на котором рост магнитной индукции замедляется («колени» кривой намагничивания), и участок магнитного насыщения за точкой *b*, где зависимость B от H становится опять прямолинейной, но характеризуется медленным нарастанием магнитной индукции при увеличении напряженности поля по сравнению с первым и вторым участками кривой.

Следовательно, при большом насыщении ферромагнитные вещества по способности пропускать магнитный поток приближаются к неферромагнитным материалам (магнитная проницаемость их резко уменьшается). Магнитная индукция, при которой происходит насыщение, зависит от рода ферромагнитного материала (см. гла-

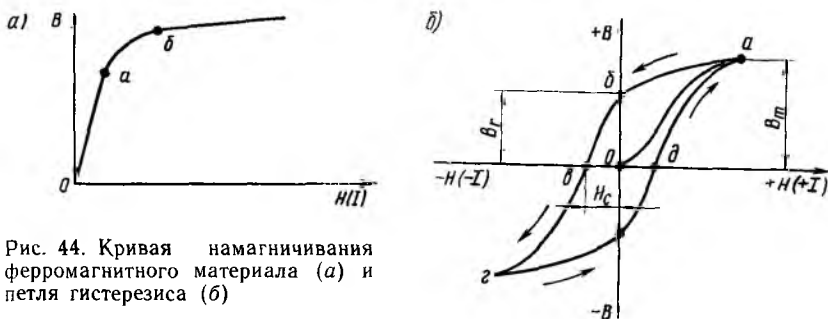


Рис. 44. Кривая намагничивания ферромагнитного материала (а) и петля гистерезиса (б)

ву X). Чем больше индукция насыщения ферромагнитного материала, тем меньший намагничивающий ток требуется для создания в нем заданной индукции и, следовательно, тем лучше он пропускает магнитный поток.

Магнитную индукцию в электрических машинах, аппаратах и приборах выбирают в зависимости от предъявляемых к ним требований. Если необходимо, чтобы случайные колебания намагничивающего тока мало влияли на магнитный поток данной машины или аппарата, то выбирают индукцию, соответствующую условиям насыщения (например, в генераторах постоянного тока с параллельным возбуждением). Если желательно, чтобы индукция и магнитный поток изменялись пропорционально намагничивающему току (например, в электроизмерительных приборах), то выбирают индукцию, соответствующую прямолинейному участку кривой намагничивания.

Перемагничивание ферромагнитных материалов, петля гистерезиса. Большое практическое значение, особенно в электрических машинах и установках переменного тока, имеет процесс перемагничивания ферромагнитных материалов. На рис. 44, б показан график изменения индукции при намагничивании и размагничивании ферромагнитного материала (при изменении намагничивающего тока I или напряженности магнитного поля H). Как видно из этого графика, при одних и тех же значениях напряженности магнитного поля магнитная индукция, полученная при размагничивании ферромагнитного тела (участок $а—б—в$), будет больше индукции, полученной при намагничивании (участки $О—а$ и $д—а$). Когда напряженность поля (намагничивающий ток) будет доведена до нуля, индукция в ферромагнитном материале не уменьшится до нуля, а сохранит некоторое значение B_r , соответствующее отрезку $Об$. Это значение называется *остаточной индукцией*.

Явление отставания, или запаздывания, изменений магнитной индукции от соответствующих изменений напряженности магнитного поля называется *магнитным гистерезисом*, а сохранение в ферромагнитном материале магнитного поля после прекращения протекания намагничивающего тока — *остаточным магнетизмом*.

При изменении направления намагничивающего тока можно

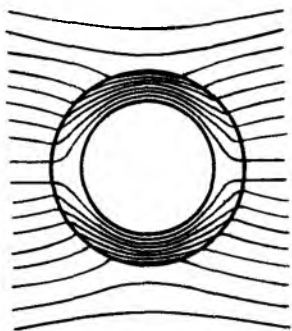


Рис. 45. Распределение магнитных силовых линий в кольце из ферромагнитного материала

полностью размагнитить ферромагнитное тело и довести магнитную индукцию в нем до нуля. Обратная напряженность H_c , при которой индукция в ферромагнитном материале уменьшается до нуля, называется *коэрцитивной силой*. Кривую $O-a$, получающуюся при условии, что ферромагнитное вещество было предварительно размагничено, называют первоначальной кривой намагничивания.

Следовательно, при перемагничивании ферромагнитного вещества, например при постепенном намагничивании и размагничивании стального сердечника электромагнита, кривая изменения индукции будет иметь вид петли; ее называют *петлей гистерезиса*.

Потери энергии при перемагничивании. При периодическом перемагничивании ферромагнитного вещества затрачивается определенная энергия, которая выделяется в виде тепла, вызывая нагревание ферромагнитного вещества. Потери энергии, связанные с процессом перемагничивания стали, называют потерями на гистерезис. Значение этих потерь при каждом цикле перемагничивания пропорционально площади петли гистерезиса. Потери мощности на гистерезис пропорциональны квадрату максимальной индукции B_{max} и частоте перемагничивания f . Поэтому при значительном увеличении индукции в магнитопроводах электрических машин и аппаратов, работающих в переменном магнитном поле, эти потери резко возрастают.

Влияние ферромагнитных материалов на распределение магнитного поля. Если поместить в магнитное поле какое-либо тело из ферромагнитного материала, то магнитные силовые линии будут входить и выходить из него под прямым углом. В самом теле и около него будет иметь место сгущение силовых линий, т. е. индукция магнитного поля внутри тела и вблизи него возрастает. Если выполнить ферромагнитное тело в виде кольца, то во внутреннюю его полость магнитные силовые линии практически проникать не будут (рис. 45) и кольцо будет служить магнитным экраном, защищающим внутреннюю полость от влияния магнитного поля. На этом свойстве ферромагнитных материалов основано действие различных экранов, защищающих электроизмерительные приборы, электрические кабели и другие электротехнические устройства от вредного воздействия внешних магнитных полей.

§ 19. Магнитная цепь

Для того чтобы сосредоточить магнитное поле в определенной части электрической машины, аппарата или прибора и уменьшить мощность, потребляемую катушкой электромагнита, создаю-

щего это поле, в конструкции этих устройств широко применяют различные элементы из ферромагнитных материалов. Совокупность таких элементов с разделяющими их воздушными зазорами составляет *магнитопровод*, или *магнитную цепь*, электрической машины, аппарата или прибора. Например, магнитная цепь электромагнитного реле (рис. 46, а) состоит из трех участков: сердечника 2, якоря 4 и двух воздушных зазоров 6. По замкнутому контуру, образованному этими участками, проходит магнитный поток 3, создаваемый током катушки 1. При переходе через воздушные зазоры, разделяющие сердечник и якорь, часть магнитного потока замыкается по воздуху, т. е. не проходит через якорь, — возникает поток рассеяния 5.

Магнитное поле в магнитной цепи электрической машины постоянного тока создается током катушек 7 (рис. 46, б), расположенных на полюсах 8. Эти катушки называют обмотками возбуждения. Создаваемый ими магнитный поток проходит через сердечники полюсов, вращающуюся часть машины — якорь 9, воздушные зазоры 11 между полюсами и якорем и замыкается через остова 10.

Магнитодвижущая сила. Способность тока возбуждать магнитное поле оценивается его магнитодвижущей силой (м. д. с.). Магнитодвижущая сила F изменяется в амперах. Магнитодвижущая сила проводника с током I равна силе этого тока: $F = I$.

В общем случае, когда какой-либо замкнутый контур охватывает несколько токов (показан на рис. 47, а штриховой линией), суммарная магнитодвижущая сила равна их алгебраической сумме:

$$F = \sum I. \quad (45)$$

Для случая, показанного на рис. 47, а,

$$F = I_1 - I_2 + I_3.$$

Магнитодвижущая сила катушки (рис. 47, б) представляет произведение тока I на число ее витков w . Это объясняется тем, что

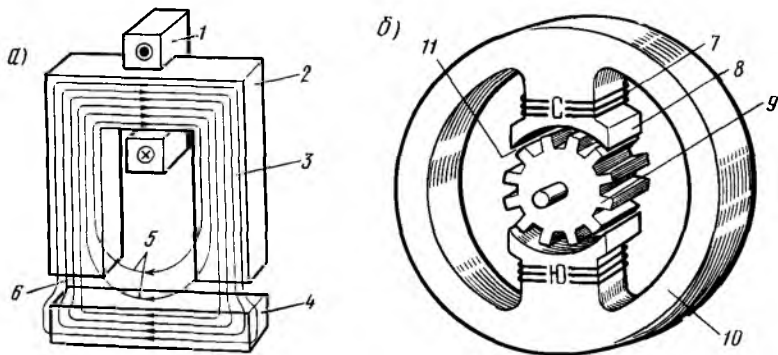


Рис. 46. Магнитные цепи электромагнитного реле (а) и электрической машины постоянного тока (б)

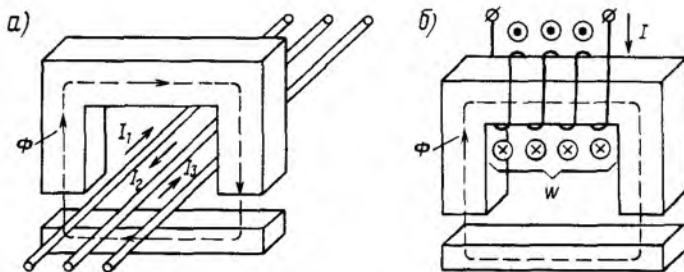


Рис. 47. Замкнутый контур магнитной цепи, сцепленный с тремя электрическими токами (а) и катушкой с током (б)

замкнутый контур магнитной цепи (показан штриховой линией), сцепленный с катушкой, охватывает ток I не один, а w раз, т. е.

$$F = Iw. \quad (45')$$

Закон Ома для магнитной цепи. Для лучшего понимания условий возникновения магнитного поля в магнитных цепях целесообразно провести аналогию между магнитной цепью и цепью электрической. Это можно сделать, например, для простейшей магнитной цепи, на всем протяжении которой напряженность H магнитного поля постоянна. Для такой цепи *произведение напряженности H на длину l магнитной цепи по всему ее замкнутому контуру равно алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром:*

$$Hl = \sum I = F. \quad (46)$$

Формула (46) выражает закон полного тока для рассматриваемой магнитной цепи. Сумма токов $\sum I$, пронизывающих какой-либо замкнутый контур, называется *полным током*: отсюда и получил свое название этот закон.

Если в формулу (46) подставим напряженность H из формулы (43), заменив индукцию B согласно формуле (41), то получим зависимость магнитного потока Φ от магнитодвижущей силы F и параметров данной магнитной цепи, т. е. от ее магнитного сопротивления R_m . Эта зависимость называется *законом Ома для магнитной цепи*. Он формулируется следующим образом. *Магнитный поток, проходящий по магнитной цепи, равен магнитодвижущей силе, деленной на магнитное сопротивление цепи,*

$$\Phi = F/R_m. \quad (47)$$

Магнитное сопротивление $R_m = l/(\mu_a S)$ зависит от длины l магнитной цепи, поперечного сечения S и магнитной проницаемости μ_a .

Например, магнитный поток Φ , созданный катушкой с числом витков ω ,

$$\Phi = F/R_m = \frac{I\omega}{l/(\mu_a S)}. \quad (47')$$

Из формулы (47) следует, что действие магнитодвижущей силы аналогично действию электродвижущей силы. Подобно тому как э. д. с. является причиной возникновения тока в электрической цепи, так и м. д. с. является причиной возникновения магнитного потока в магнитной цепи. Чем больше магнитодвижущая сила F , создаваемая катушкой электромагнита, тем больший магнитный поток проходит по его магнитной цепи.

Магнитное сопротивление R_m играет в магнитной цепи роль, аналогичную электрическому сопротивлению цепи. Так же как в электрической цепи с увеличением сопротивления уменьшается ток, так и в магнитной цепи с увеличением магнитного сопротивления уменьшается магнитный поток. Следует, однако, отметить, что эта аналогия не распространяется на физические процессы, имеющие место в электрических и магнитных цепях. Кроме того, магнитное сопротивление R_m является нелинейным. Оно зависит от магнитной проницаемости μ_a , которая изменяется при изменении индукции, т. е. магнитного потока, проходящего через данный участок цепи. Поэтому при расчетах магнитных цепей пользуются кривыми намагничивания, т. е. зависимостями напряженности H от индукции B для соответствующего ферромагнитного материала.

Пример 26. Определить число витков ω катушки электромагнита, необходимое для прохождения по его магнитной цепи потока $\Phi = 5 \cdot 10^{-3}$ Вб. Через катушку протекает ток 5 А. Магнитопровод электромагнита выполнен из электротехнической стали и имеет площадь поперечного сечения $S = 0,004$ м², среднюю длину $l = 1$ м.

Решение. Индукция в сердечнике по формуле (41)

$$B = \Phi/S = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}/0,004 \text{ м}^2 = 1,25 \text{ Тл}.$$

Напряженность магнитного поля H в сердечнике по кривым намагничивания для электротехнической стали при индукции 1,25 Тл равна 6 А/см.

Требуемая магнитодвижущая сила катушки по формуле (46)

$$F = Hl = 6 \cdot 100 = 600 \text{ А}.$$

Число витков катушки

$$\omega = F/I = 600/5 = 120.$$

Пример 27. Как изменится число витков катушки, если магнитопровод электромагнита будет иметь воздушный зазор шириной 5 мм (магнитная проницаемость для воздуха $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м²)?

Решение. Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре

$$H = B/\mu_0 = 1,25/(4\pi \cdot 10^{-7}) = 1\,000\,000 \text{ А/м} = 10\,000 \text{ А/см}.$$

Магнитодвижущая сила, приходящаяся на воздушный зазор,

$$F = Hl = 10\,000 \cdot 0,5 = 5000 \text{ А}.$$

Общая магнитодвижущая сила катушки $F_{\text{общ}} = 5000 + 600 = 5600 \text{ А}$.

Число витков катушки $\omega = F/I = 5600/5 = 1120$.

Таким образом, появление в магнитной цепи электромагнита воздушного зазора шириной 5 мм потребовало увеличения числа витков катушки примерно в 9 раз.

Формулы (47) и (47') показывают, что возрастание магнитного потока в какой-либо электрической машине или аппарате можно обеспечить: увеличением магнитодвижущей силы F катушки, создающей магнитное поле в данной машине или аппарате, т. е. увеличением проходящего по ней тока I или числа витков w катушки; уменьшением магнитного сопротивления магнитной цепи данной машины или аппарата путем применения ферромагнитных материалов с большей магнитной проницаемостью μ_a ; уменьшением воздушных зазоров, разделяющих отдельные участки магнитной цепи, выполненные из ферромагнитных материалов (воздушные зазоры, имеющиеся в магнитной цепи, создают весьма большое магнитное сопротивление); увеличением площади поперечного сечения S отдельных участков магнитной цепи или же уменьшением общей длины магнитной цепи и ее отдельных участков.

Все эти меры широко используют при конструировании электрических машин и аппаратов. Магнитопроводы стараются выполнить из высококачественных ферромагнитных материалов, обладающих высокой магнитной проницаемостью (электротехнической стали или специальных сплавов), воздушные зазоры свести до минимальных значений.

§ 20. Электромагнитные силы, создаваемые магнитным полем

Проводник с током в магнитном поле. Энергия, заключенная в магнитном поле, может проявлять себя в виде электромагнитных сил, которые возникают при взаимодействии магнитного поля с движущимися электрическими зарядами. Электромагнитная сила, возникающая при движении электрического заряда в магнитном поле, действует на него в направлении, перпендикулярном движению и направлению силовых линий, и стремится вытолкнуть заряд за пределы поля (см. рис. 34).

Если поместить в магнитное поле проводник с током I , то между электронами, проходящими по проводнику, и магнитным полем возникнут электромагнитные силы, которые, складываясь, образуют результирующую силу F , стремящуюся вытолкнуть проводник из магнитного поля (рис. 48). Электромагнитная сила определяется законом Ампера. Он формулируется следующим образом. *Электромагнитная сила, действующая на проводник с током, находящийся в магнитном поле и расположенный перпендикулярно направлению поля, равна произведению силы тока I , индукции магнитного поля B и длины проводника l :*

$$F = IBl.$$

(48)

Если проводник расположен под углом α к силовым магнитным линиям, то

$$F = BIl \sin \alpha. \quad (48')$$

Чтобы получить F в ньютонах, надо B брать в теслах, I — в амперах и l — в метрах.

Направление действия силы F обычно определяют по правилу левой руки: ладонь левой руки нужно расположить так, чтобы магнитные линии входили в нее и четыре вытянутых пальца совместить с направлением тока, тогда расположенный под прямым углом большой палец укажет направление действия электромагнитной силы. Сила F возникает только в том случае, если проводник расположен перпендикулярно или под некоторым углом к магнитным силовым линиям поля. Если же проводник расположен вдоль силовых линий поля, то электромагнитная сила будет равна нулю.

Для того чтобы изменить направление электромагнитной силы, как следует из правила левой руки, необходимо изменить направление тока в проводнике или же направление магнитного поля.

Пример 28. Определить силу, действующую на каждый проводник обмотки якоря тягового двигателя, помещенный в магнитное поле с индукцией 1 Тл. Проводник имеет длину 0,5 м и через него проходит ток 80 А.

Решение. По формуле (48)

$$F = BIl = 1 \cdot 80 \cdot 0,5 = 40 \text{ Н.}$$

Возникновение электромагнитной силы F при взаимодействии проводника с током и магнитного поля можно наглядно представить как результат взаимодействия двух магнитных полей. Как известно, вокруг проводника с током возникает свое собственное круговое магнитное поле (рис. 49), которое будет складываться с внешним магнитным полем (например, постоянного магнита), в которое помещен проводник с током. При этом справа от проводника, где силовые линии поля проводника совпадают с линиями внешнего поля, происходит сгущение силовых линий; слева от проводника, где силовые линии поля проводника направлены навстречу линиям внешнего поля, происходит разрежение силовых линий. Магнитные силовые линии обладают свойством упругости, напоминаям свойство резиновых нитей. Стремясь сократиться по длине, они будут выталкивать проводник из области сгущения силовых линий в сторону их разрежения, т. е. справа налево. В результате возникает электромагнитная сила F



Рис. 48. Электромагнитная сила, действующая в магнитном поле на проводник с током

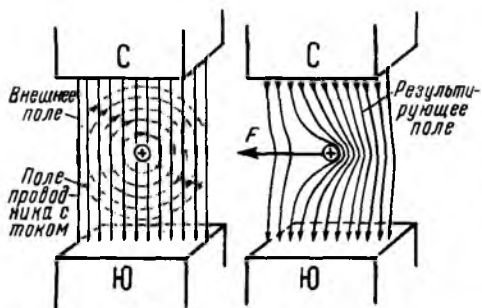


Рис. 49. Сгущение и разрежение магнитных силовых линий при наличии в магнитном поле проводника с током

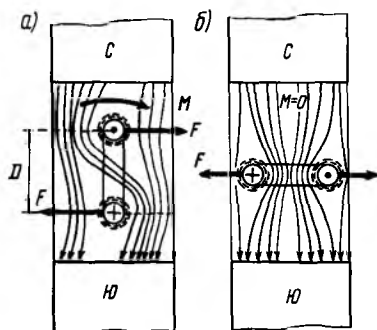


Рис. 50. Электромагнитные силы, действующие в магнитном поле на виток или катушку с током

Виток с током в магнитном поле. Если поместить в магнитное поле не проводник, а виток (или катушку) с током и расположить его вертикально (рис. 50, а), то, применяя правило левой руки к верхней и нижней сторонам витка, получим, что электромагнитные силы F , действующие на них, будут направлены в разные стороны. В результате действия этих двух сил возникает электромагнитный вращающий момент M , который вызовет поворот витка, в данном случае по часовой стрелке. Этот момент

$$M = FD, \quad (49)$$

где D — расстояние между сторонами витка.

Виток будет поворачиваться в магнитном поле до тех пор, пока он не займет положение, перпендикулярное магнитным силовым линиям поля (рис. 50, б). При таком положении через виток будет проходить наибольший магнитный поток. Следовательно, виток или катушка с током, внесенные во внешнее магнитное поле, всегда стремятся занять такое положение, чтобы через виток проходил возможно больший магнитный поток. Свойство витка и катушки с током поворачиваться в магнитном поле широко используется в электротехнике; электрические двигатели и ряд электроизмерительных приборов работают по этому принципу.

Для увеличения вращающего момента в электрических двигателях применяют не один виток, а несколько. Эти витки, соединенные соответствующим образом, образуют обмотку якоря электродвигателя.

§ 21. Электромагнитная индукция

Индуктирование э. д. с. При пересечении проводником силовых линий магнитного поля в нем возникает или, как говорят, индуцируется э. д. с. Это явление называется электромагнитной индукцией.

Возникновение э.д.с. объясняется действием сил магнитного поля на находящиеся в проводниках свободные электроны. Свободные электроны под влиянием этих сил начнут двигаться вдоль проводника (рис. 51, а). В результате этого движения на одном конце проводника накопятся свободные электроны и возникнет отрицательный электрический заряд, а на другом конце ввиду недостатка электронов появится положительный заряд. Такое разделение электрических зарядов при движении проводника в магнитном поле будет происходить до тех пор, пока электромагнитные силы не уравновесятся силами электрического поля, возникающего в проводнике в результате появления на его концах разноименных электрических зарядов. *Разность потенциалов на концах проводника численно равна индуцированной в проводнике э.д.с.* Индуцирование э.д.с. в проводнике происходит независимо от того, включен ли он в какую-либо электрическую цепь или нет. Если присоединить концы этого проводника к какому-либо приемнику электрической энергии, то под влиянием разности потенциалов на концах проводника по замкнутой цепи потечет электрический ток.

Значение индуцированной э. д. с. определяется законом электромагнитной индукции Фарадея. Он формулируется следующим образом. *Индуцированная э. д. с. e прямо пропорциональна индукции магнитного поля B , длине проводника l и скорости его перемещения v в направлении, перпендикулярном силовым линиям поля,*

$$e = Blv. \quad (50)$$

Если проводник движется под углом α к направлению поля, то

$$e = Blv \sin \alpha. \quad (50')$$

Если проводник перемещается вдоль силовых линий поля, т. е. как бы скользит по ним, то э.д.с. в нем не возникает.

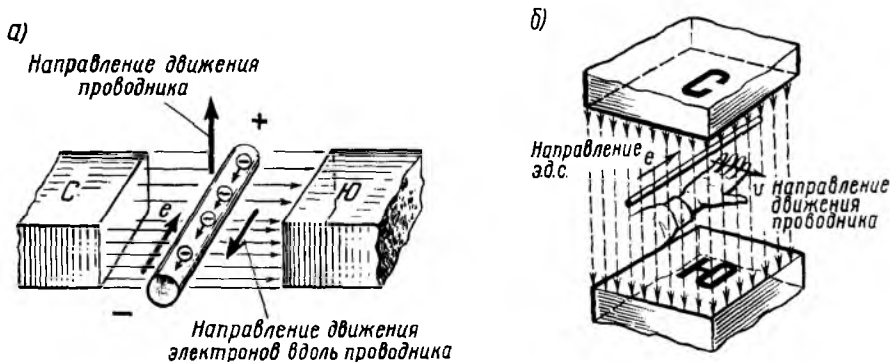


Рис. 51. Индуцирование э.д.с. в проводнике при перемещении его в магнитном поле

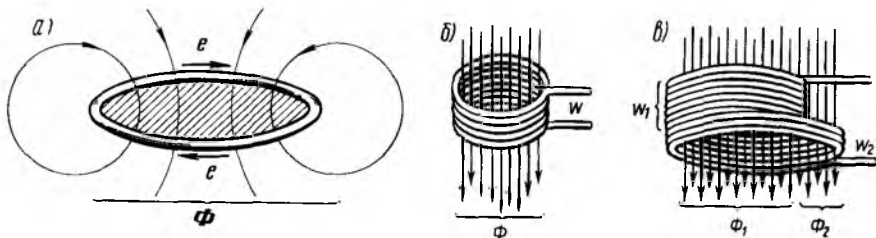


Рис. 52. Индуцирование э.д.с. в витке (а) и в катушках (б и в)

Пример 29. Проводник обмотки якоря тепловозного генератора длиной 0,4 м перемещается в магнитном поле полюсов перпендикулярно силовым линиям со скоростью 30 м/с. Определить э.д.с., индуцированную в проводнике, если индукция магнитного поля $B=1$ Тл.

Решение. Э.д.с., индуцируемая в проводнике, по формуле (50)

$$e = Blv = 1 \cdot 0,4 \cdot 30 = 12 \text{ В.}$$

Направление индуцированной э. д. с. определяют правилом правой руки. Если ладонь правой руки держать так, чтобы в нее входили магнитные силовые линии поля, а отогнутый большой палец совместить с направлением движения проводника (т. е. направлением его скорости v), то вытянутые четыре пальца укажут направление индуцированной э.д.с. e (рис. 51, б). Пользуясь этим правилом, легко убедиться в том, что при изменении направления движения проводника будет изменяться и направление индуцированной э.д.с.

Индуцировать э.д.с. в проводниках можно и не перемещая их в магнитном поле. Для этого необходимо перемещать само магнитное поле или изменять тем или иным путем магнитный поток, охватываемый витком, катушкой или каким-либо другим замкнутым контуром. Индуцированная таким образом э.д.с. определяется согласно закону электромагнитной индукции Максвелла: *э.д.с., индуцированная в замкнутом контуре (рис. 52, а), равна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур, т. е.*

$$e = -\Delta \Phi / \Delta t,$$

где $\Delta \Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ — изменение магнитного потока, пронизывающего контур (от значения Φ_1 до значения Φ_2);

Δt — промежуток времени (от момента t_1 до момента t_2), в течение которого происходит указанное изменение потока.

Иными словами, чем быстрее изменяется магнитный поток, пронизывающий замкнутый контур, тем больше индуцированная э.д.с.

Каждый виток можно рассматривать как некоторый замкнутый контур. Поэтому индуцированная в нем э.д.с. определяется по формуле (51). Э.д.с., индуцированная в катушке с числом витков ω , если все ее витки пронизываются одним и тем же потоком (рис. 52, б),

$$e = -\omega \Delta \Phi / \Delta t. \quad (51')$$

Отдельные витки катушки могут пронизываться различными потоками (рис. 52, *в*), т. е. могут быть сцеплены с различным числом силовых магнитных линий. Алгебраическая сумма потоков, сцепленных со всеми витками катушки называется ее *потокосцеплением* Ψ . Например, для катушки, показанной на рис. 52, *в*,

$$\Psi = \omega_1 \Phi_1 + \omega_2 (\Phi_1 + \Phi_2).$$

Индукцированная э.д.с. в этом случае

$$e = -\Delta \Psi / \Delta t, \quad (52)$$

где $\Delta \Psi$ — изменение потокосцепления Ψ за время Δt .

Следовательно, в общем случае *индуцированная э.д.с. равна скорости изменения потокосцепления катушки*.

Правило Ленца. Направление индуцированной э.д.с. определяется правилом Ленца. Его формулируют следующим образом: *индуцированная э.д.с. имеет такое направление, при котором созданный ею ток противодействует причине, вызвавшей появление э.д.с., т. е. противодействует изменению магнитного потока*. Знак «минус» в формулах (51), (51') и (52) выражает существо правила Ленца: если изменение потока Φ или потокосцепления Ψ положительно (например, увеличивается), то э.д.с. e отрицательна, т. е. созданный ею ток будет уменьшать Φ или Ψ .

Правило Ленца может быть проиллюстрировано следующими примерами. При опускании магнита (или электромагнита) внутрь катушки (рис. 53, *а*) э.д.с., индуцированная в катушке, имеет такое направление, при котором созданное током катушки магнитное поле будет противодействовать опусканию магнита. При удалении же магнита из катушки (рис. 53, *б*) индуцированная в ней э.д.с. создает ток, направленный так, что магнитное поле катушки препятствует удалению магнита.

Если изменять ток i_1 в проводнике AB (рис. 54), например замыкая и размыкая электрическую цепь, в которую он включен, то в рас-

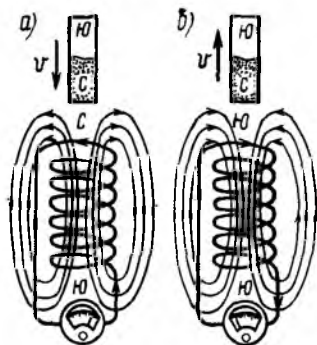


Рис. 53. Индуцирование э. д. с. при движении магнита внутри катушки

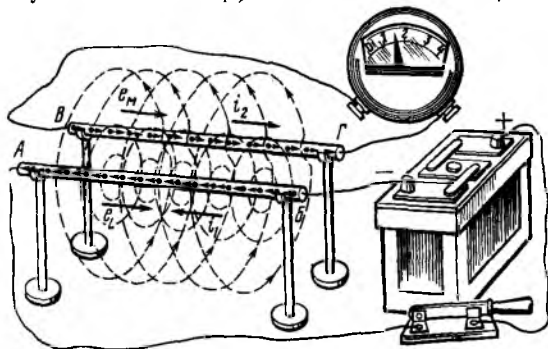


Рис. 54. Индуцирование э.д.с. в параллельно расположенных проводниках при изменении проходящего по одному из них тока

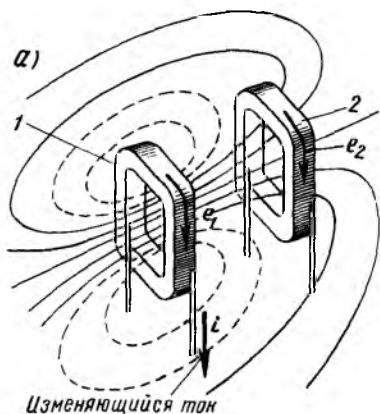
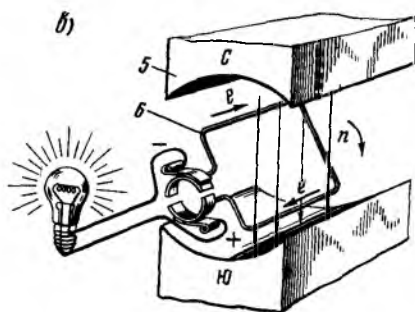
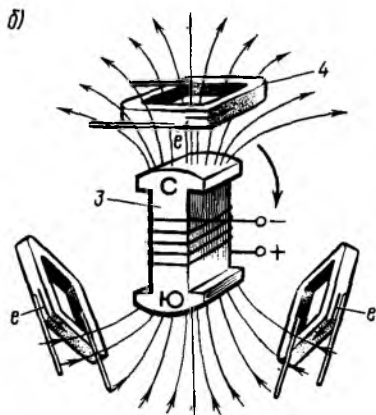


Рис. 55. Способы индуцирования э.д.с. в трансформаторах (а) и электрических машинах (б и в)



положенном параллельно ему проводнике $BГ$ индуцируется э.д.с. e_m . Индуцирование э.д.с. происходит в результате изменения магнитного потока, созданного током i_1 . Часть этого изменяющегося потока пронизывает замкнутый контур, составленный из проводника $BГ$ и присоединенного к нему электроизмерительного прибора. Э. д. с. e_m направлена так, чтобы вызванный ею ток i_2 создавал магнитный поток, препятствующий изменению магнитного поля, созданного током i_1 , протекающим в проводнике $АБ$.

При увеличении тока i_1 э. д. с. e_m и ток i_2 в проводнике $BГ$ будут направлены против тока i_1 . При уменьшении же тока i_1 э. д. с. e_m и ток i_2 будут направлены в ту же сторону, что и ток i_1 .

Способы индуцирования э. д. с. в электрических машинах. Явление электромагнитной индукции широко используется в различных электрических машинах и устройствах. На этом принципе основано устройство электрических генераторов, двигателей и трансформаторов. Для индуцирования э. д. с. в них обычно применяются три способа:

изменение тока в катушке 1 (рис. 55, а), в магнитном поле которой расположена вторая катушка 2. При этом непрерывно изменяется магнитный поток, охватываемый второй катушкой, и в ней, а также и в первой катушке, будут индуцироваться электродвижущие силы e_2 и e_1 . Этот способ используют в трансформаторах;

вращение магнитного поля, созданного постоянными магнитами или электромагнитами 3, относительно неподвижных катушек 4 (рис. 55, б). При этом непрерывно изменяется магнитный поток, пронизывающий каждую катушку, и в них индуцируются э. д. с. *e*. Такой способ используют в основном в машинах переменного тока;

вращение витков б или катушек в постоянном магнитном поле, созданном неподвижными постоянными магнитами 5 или электромагнитами (рис. 55, в). При этом непрерывно изменяется магнитный поток, охватываемый каждым витком или катушкой, вследствие чего в них индуцируется э. д. с. *e*. Этот способ используют в основном в электрических машинах постоянного тока.

В рассмотренных случаях э. д. с., индуцированные в витках или катушках, будут переменными.

§ 22. Вихревые токи

Возникновение вихревых токов. Изменяющийся магнитный поток способен индуцировать э. д. с. не только в проводах или витках катушек, но и в массивных стальных сердечниках, кожухах и других металлических деталях электротехнических установок. Эти э. д. с. являются причиной появлений индуцированных токов, которые действуют в массивных металлических деталях, замыкаясь накоротко в их толще. Такие токи получили название вихревых. Например, при изменении магнитного потока, созданного катушкой 1 (рис. 56, а), в ее стальном сердечнике 2 индуцируются вихревые

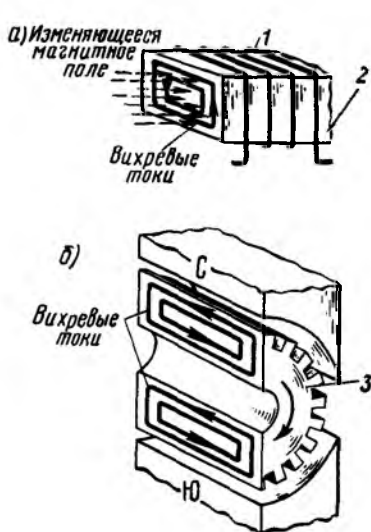


Рис. 56. Возникновение вихревых токов

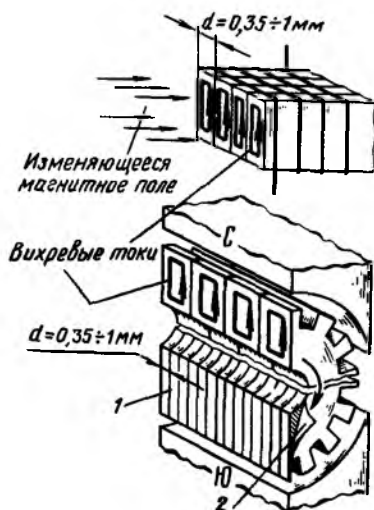


Рис. 57. Устройство сердечников электрических машин и аппаратов из отдельных изолированных стальных листов

токи, замыкающиеся в плоскости, перпендикулярной силовым линиям магнитного поля. Вихревые токи возникают также в сердечниках 3 якорей и роторов электрических машин при вращении их в магнитном поле (рис. 56, б). Природа вихревых токов такая же, как и токов, индуцированных в обычных проводах или катушках. Благодаря очень малому сопротивлению массивных проводников вихревые токи даже при небольшой индуцированной э. д. с. достигают очень больших значений, вызывая чрезмерное нагревание этих проводников.

Способы уменьшения вредного действия вихревых токов. В электрических машинах и аппаратах вихревые токи обычно нежелательны, так как они вызывают нагрев металлических сердечников, создают потери энергии (так называемые потери от вихревых токов), снижают к. п. д. электрических машин и аппаратов и оказывают согласно правилу Ленца размагничивающее действие. Для уменьшения вредного действия вихревых токов применяют два основных способа.

1. Сердечники электрических машин и аппаратов выполняют из отдельных стальных листов 1 (рис. 57) толщиной 0,35—1,0 мм, изолированных один от другого слоем изоляции 2 (лаковой пленкой, окалиной, образующейся при отжиге листов, и пр.). Благодаря этому преграждается путь распространению вихревых токов и уменьшается поперечное сечение каждого отдельного проводника, через которое протекают эти токи, что приводит к уменьшению силы тока.

2. В состав электротехнической стали, из которой изготовляют сердечники электрических машин и аппаратов, вводят 1—5 % кремния, что обеспечивает повышение ее электрического сопротивления. Благодаря этому достигается снижение силы вихревых токов, протекающих по сердечникам электрических машин и аппаратов.

Потери мощности от вихревых токов пропорциональны квадрату индукции B магнитного поля и квадрату частоты f его изменения. При увеличении индукции и частоты изменения магнитного

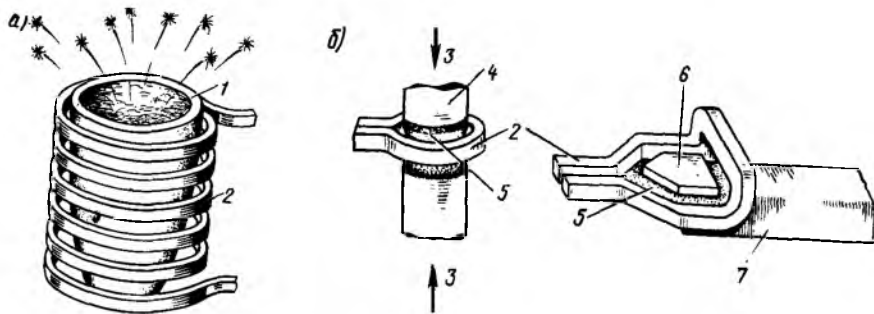


Рис. 58. Расплавление металла (а), сварка и пайка (б) металлических деталей с помощью вихревых токов:

1 — тигель с металлом; 2 — высокочастотный индуктор; 3 — сжимающее усилие; 4 — свариваемые трубы; 5 — нагретый металл; 6 — пластина из твердого сплава; 7 — резец

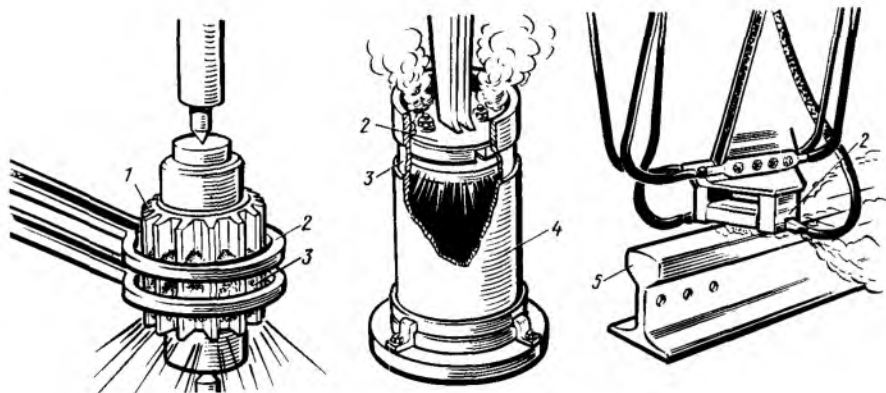


Рис. 59. Закалка металлических изделий с помощью вихревых токов:

1 — шестерня; 2 — высокочастотный индуктор; 3 — нагретый металл; 4 — гильза цилиндра; 5 — головка рельса

поля, а также при увеличении частоты вращения роторов и якорей электрических машин эти потери резко возрастают.

Использование вихревых токов. В ряде случаев вихревые токи используют для полезных целей. Например, при помощи вихревых токов расплавляют металлы (рис. 58, а). Для этой цели тигель с металлом помещают в изменяющееся магнитное поле, которое индуцирует вихревые токи, расплавляющие металл. Таким же образом вихревые токи нагревают металлические детали при сварке, наплавке и пайке (рис. 58, б), а также осуществляют поверхностный нагрев, необходимый для закалки металлических изделий (рис. 59). Ввиду того что в этих случаях требуется увеличить тепло, выделяемое вихревыми токами, т. е. получить большие вихревые токи, для индуцирования их используют магнитные поля, изменяющиеся с большой скоростью. Такие поля могут быть созданы при помощи специальных индукторов, выполненных в виде одного или нескольких витков, по которым проходят переменные быстро изменяющиеся токи — так называемые токи высокой частоты.

§ 23. Самоиндукция

Э. д. с. самоиндукции. Э. д. с. e_L , индуцирования в проводнике или катушке в результате изменения магнитного потока, созданного током, проходящим по этому же проводнику или катушке, носит название э. д. с. самоиндукции (рис. 60). Эта э. д. с. возникает при всяком изменении тока, например при замыкании и размыкании электрических цепей, при изменении нагрузки электродвигателей и пр. Чем быстрее изменяется ток в проводнике или катушке, тем больше скорость изменения пронизывающего их магнитного потока и тем большая э. д. с. самоиндукции в них индуцируется. Например,

э. д. с. самоиндукции e_L возникает в проводнике AB (см. рис. 54) при изменении протекающего по нему тока i_1 . Следовательно, изменяющееся магнитное поле индуцирует э. д. с. в том же самом проводнике, в котором изменяется ток, создающий это поле.

Направление э. д. с. самоиндукции определяется по правилу Ленца. *Э. д. с. самоиндукции имеет всегда такое направление, при котором она препятствует изменению вызвавшего ее тока.* Следовательно, при возрастании тока в проводнике (катушке) индуцированная в них э. д. с. самоиндукции будет направлена против тока, т. е. будет препятствовать его возрастанию (рис. 61, а), и наоборот, при уменьшении тока в проводнике (катушке) возникает э. д. с. самоиндукции, совпадающая по направлению с током, т. е. препятствующая его убыванию (рис. 61, б). Если же ток в катушке не изменяется, то э. д. с. самоиндукции не возникает.

Из рассмотренного выше правила для определения направления э. д. с. самоиндукции вытекает, что эта э. д. с. оказывает тормозящее действие на изменение тока в электрических цепях. В этом отношении ее действие аналогично действию силы инерции, которая препятствует изменению положения тела. В электрической цепи (рис. 62, а), состоящей из резистора с сопротивлением R и катушки K , ток i создается совместным действием напряжения U источника и э. д. с. самоиндукции e_L индуцируемой в катушке. При подключении рассматриваемой цепи к источнику э. д. с. самоиндукции e_L (см. сплошную стрелку) сдерживает нарастание силы тока. Поэтому ток i достигает установившегося значения $I = U/R$ (согласно закону Ома) не мгновенно, а в течение определенного промежутка времени (рис. 62, б). За это время в электрической цепи происходит переходный процесс, при котором изменяются e_L и i . Точно

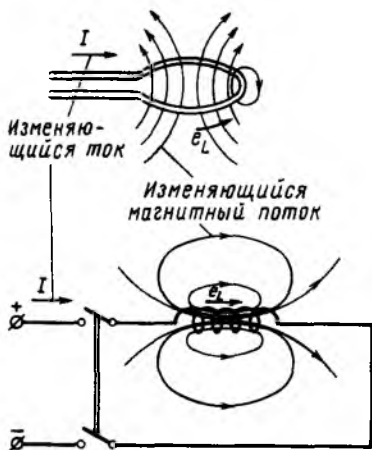


Рис. 60. Возникновение э.д.с. самоиндукции в витке (а) и в катушке (б)

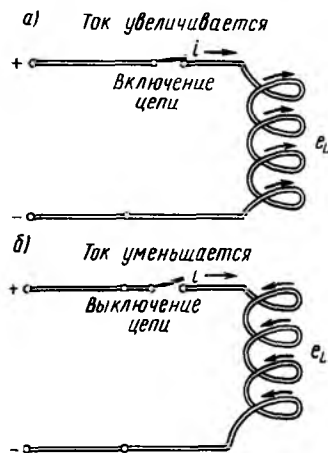


Рис. 61. Направление э.д.с. самоиндукции в катушке при увеличении (а) и уменьшении (б) тока



Рис. 62. Электрическая цепь с катушкой индуктивности (а) и кривая изменения в ней тока при включении и выключении (б)

так же при выключении электрической цепи ток i не уменьшается мгновенно до нуля, а из-за действия э. д. с. e_L (см. штриховую стрелку) постепенно уменьшается.

Индуктивность. Способность различных проводников (катушек) индуцировать э. д. с. самоиндукции оценивается *индуктивностью* L . Она показывает, какая э. д. с. самоиндукции возникает в данном проводнике (катушке) при изменении тока на 1 А в течение 1 с. Индуктивность измеряется в генри (Гн), $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{с}$. На практике индуктивность часто измеряют в тысячных долях генри — миллигенри (мГн) и в миллионных долях генри — микрогенри (мкГн).

Индуктивность катушки зависит от числа витков катушки ω и магнитного сопротивления R_m ее магнитопровода, т. е. от его магнитной проницаемости μ_a и геометрических размеров l и s . Если в катушку вставить стальной сердечник, ее индуктивность резко возрастает из-за усиления магнитного поля катушки. В этом случае ток 1 А создает значительно больший магнитный поток, чем в катушке без сердечника.

Используя понятие индуктивности L , можно получить для э. д. с. самоиндукции следующую формулу:

$$e_L = -L \Delta i / \Delta t, \quad (53)$$

где Δi — изменение тока в проводнике (катушке) за промежуток времени Δt .

Следовательно, э. д. с. самоиндукции пропорциональна скорости изменения тока.

Включение и отключение цепей постоянного тока с катушкой индуктивности. При подключении к источнику постоянного тока с напряжением U электрической цепи, содержащей R и L , выключателем $B1$ (рис. 63, а) ток i возрастает до установившегося значения $I_{уст} = U/R$ не мгновенно, так как э. д. с. самоиндукции e_L , возникающая в индуктивности, действует против приложенного напряжения U и препятствует нарастанию тока. Для рассматриваемого процесса характерным является постепенное изменение тока i (рис. 63, б) и напряжений u_a и u_L по кривым — *экспонентам*. Изменение i , u_a и u_L по указанным кривым называется *апериодическим*.

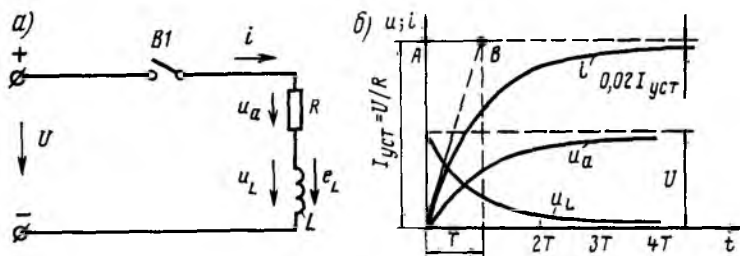


Рис. 63. Схема подключения цепи R - L к источнику постоянного тока (а) и кривые тока и напряжения при переходном процессе (б)

Скорость нарастания силы тока в цепи и изменения напряжений u_R и u_L характеризуется *постоянной времени цепи*

$$T = L/R. \quad (54)$$

Она измеряется в секундах, зависит только от параметров R и L данной цепи и позволяет без построения графиков оценить длительность процесса изменения тока. Эта длительность теоретически бесконечно велика. Практически же обычно считают, что она составляет $(3 \div 4) T$. За это время ток в цепи достигает 95—98 % установившегося значения. Следовательно, чем больше сопротивление и чем меньше индуктивность L , тем быстрее протекает процесс изменения тока в электрических цепях с индуктивностью. Постоянную времени T при аperiodическом процессе можно определить как отрезок AB , отсекаемый касательной, проведенной из начала координат к рассматриваемой кривой (например, тока i) на линии, соответствующей установившемуся значению данной величины.

Свойством индуктивности замедлять процесс изменения тока пользуются для создания выдержек времени при срабатывании различных аппаратов (например, при управлении работой песочниц для периодической подачи порций песка под колеса локомотива). На использовании этого явления основана также работа электромагнитного реле времени (см. § 94).

Коммутационные перенапряжения. Особенно сильно проявляет себя э. д. с. самоиндукции при размыкании цепей, содержащих катушки с большим числом витков и со стальными сердечниками (например, обмотки генераторов, электродвигателей, трансформаторов и пр.), т. е. цепей, обладающих большой индуктивностью. В этом случае возникающая э. д. с. самоиндукции e_L может во много раз превысить напряжение U источника \mathcal{E} , суммируясь с ним, послужить причиной возникновения перенапряжений в электрических цепях (рис. 64, а), называемых *коммутационными* (возникающими при коммутации — переключениях электрических цепей). Они являются опасными для обмоток электродвигателей, генераторов и трансформаторов, так как могут вызвать пробой их изоляции.

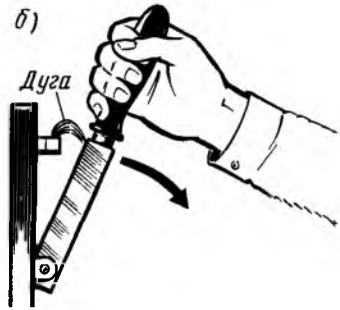
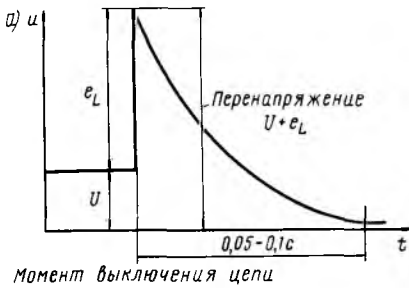


Рис. 64. Возникновение перенапряжения (а) и образование дуги (б) при размыкании электрических цепей с индуктивностью

Большая э. д. с. самоиндукции способствует также возникновению электрической искры или дуги в электрических аппаратах, осуществляющих коммутацию электрических цепей. Например, в момент размыкания контактов рубильника (рис. 64, б) образующаяся э. д. с. самоиндукции сильно увеличивает разность потенциалов между разомкнутыми контактами рубильника и пробивает воздушный промежуток. Возникающая при этом электрическая дуга поддерживается в течение некоторого времени э. д. с. самоиндукции, которая, таким образом, затягивает процесс отключения тока в цепи. Это явление весьма нежелательно, так как дуга оплавляет контакты отключающих аппаратов, что приводит к быстрому выходу их из строя. Поэтому во всех аппаратах, служащих для размыкания электрических цепей, предусматриваются специальные дугогасительные устройства, обеспечивающие ускорение гашения дуги.

Кроме того, в силовых цепях, обладающих значительной индуктивностью (например, обмотки возбуждения генераторов), параллельно цепи $R-L$ (т. е. соответствующей обмотке) включают разрядный резистор R_p (рис. 65, а). В этом случае после отключения выключателя $В1$ цепь $R-L$ не прерывается, а оказывается замкнутой на резистор R_p . Ток в цепи i при этом уменьшается не мгновенно, а постепенно — по экспоненте (рис. 65, б), так как э. д. с. самоиндукции e_L , возникающая в индуктивности L , препятствует уменьшению тока. Напряжение u_p на разрядном резисторе в течение процесса изменения тока также изменяется по экспоненте. Оно равно напряжению, приложенному к цепи $R-L$, т. е. к зажимам соответ-

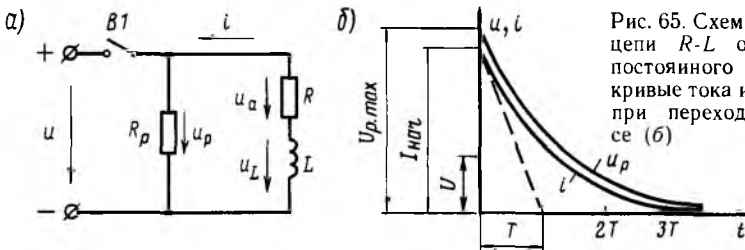


Рис. 65. Схема отключения цепи $R-L$ от источника постоянного тока (а) и кривые тока и напряжения при переходном процессе (б)

ствующей обмотки. В начальный момент $U_{p \text{ нач}} = UR_p/R$, т. е. зависит от сопротивления разрядного резистора; при больших значениях R_p это напряжение может оказаться чрезмерно большим и опасным для изоляции электрической установки. Практически для ограничения возникающих перенапряжений сопротивление R_p разрядного резистора берут не более чем в 4—8 раз больше сопротивления R соответствующей обмотки.

Условия возникновения переходных процессов. Рассмотренные выше процессы при включении и выключении цепи $R-L$ называют *переходными процессами*. Они возникают *при включении и выключении источника или отдельных участков цепи, а также при изменении режима работы*, например при скачкообразном изменении нагрузки, обрывах и коротких замыканиях. Такие же переходные процессы имеют место при указанных условиях и в цепях, содержащих конденсаторы, обладающие емкостью C . В ряде случаев переходные процессы являются опасными для источников и приемников, так как возникающие токи и напряжения могут во много раз превышать номинальные значения, на которые рассчитаны эти устройства. Однако в некоторых элементах электрооборудования, в частности в устройствах промышленной электроники, переходные процессы являются рабочими режимами.

Физически возникновение переходных процессов объясняется тем, что катушки индуктивности и конденсаторы являются накопителями энергии, а процесс накопления и отдачи энергии в этих элементах не может происходить мгновенно, следовательно, не может мгновенно измениться ток в катушке индуктивности и напряжение на конденсаторе. Время переходного процесса, в течение которого при включениях, выключениях и изменениях режима работы цепи происходит постепенное изменение тока и напряжения, определяется значениями R , L и C цепи и может составить доли и единицы секунд. После окончания переходного процесса ток и напряжение приобретают новые значения, которые называют *установившимися*.

§ 24. Взаимоиндукция

Взаимоиндукцией называется явление индуцирования э. д. с. в проводнике или катушке при изменении магнитного потока, создаваемого другим проводником (катушкой). Индуцируемая таким образом э. д. с. e_m носит название *э. д. с. взаимной индукции*. Примером является индуцирование э. д. с. e_m в проводнике $B\Gamma$ (см. рис. 54) при изменении тока i_1 в проводнике AB , а также индуцирование э. д. с. e_2 в катушке 2 (см. рис. 55, а) при изменении тока в катушке 1.

Если два замкнутых контура или две катушки 1 и 2 (рис. 66) сцеплены с общим магнитным потоком Φ_{12} , то такие контуры и катушки называют индуктивно или магнитно связанными. Для оценки степени их связи введено понятие *взаимоиндуктивности* M . Взаимоиндуктивность, так же как и индуктивность L , измеряется в генри (Гн).

Если известна взаимдуктивность M , то э. д. с. взаимдукции e_m , индуцированная в каком-либо контуре или катушке, при изменении тока i в другом контуре или катушке может быть получена из формулы (51) для индуцированной э. д. с. При этом

$$e_m = -M \Delta i / \Delta t. \quad (55)$$

Следовательно, э. д. с. взаимдукции так же как и э. д. с. самоиндукции, пропорциональна скорости $\Delta i / \Delta t$ изменения тока, создающего магнитное поле. Кроме того, она зависит от числа витков обеих катушек w_1 и w_2 и от магнитного сопротивления связывающего их магнитопровода (т. е. от его длины l , поперечного сечения s и магнитной проницаемости). Направление э. д. с. взаимдукции определяется по правилу Ленца: она всегда направлена так, что стремится препятствовать изменению создающего ее тока.

Взаимдукция дает возможность связывать посредством магнитного поля различные электрические цепи. Явление взаимдукции широко используются в трансформаторах, радиотехнических устройствах и устройствах автоматики. Однако в некоторых случаях возникновение э. д. с. взаимдукции является нежелательным. Например, э. д. с. взаимдукции, индуцированные в линиях связи (телефонных и телеграфных проводах), проложенных вдоль высоковольтных линий электропередачи или вдоль контактной сети электрофицированных железных дорог переменного тока, создают помехи при передаче телефонных или телеграфных сигналов. Поэтому линии связи стремятся располагать перпендикулярно проводам линий электропередачи или выполнять их в виде кабельных линий, защищенных металлическими экранами.

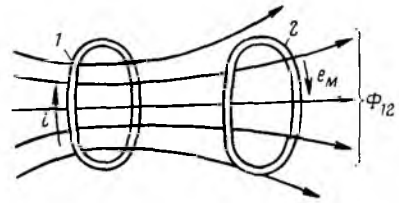


Рис. 66. Две индуктивно связанные катушки

Контрольные вопросы

1. Какие существуют способы усиления магнитных полей?
2. Что такое магнитная индукция, магнитный поток, напряженность магнитного поля?
3. Каковы основные характеристики ферромагнитных материалов?
4. Как определить магнитное сопротивление магнитной цепи?
5. В каких случаях магнитное поле создает механические силы и как они определяются?
6. Что такое индуцированная э. д. с. и как определяется ее значение и направление?
7. Что представляют собой вихревые токи и какие существуют способы уменьшения их вредного действия?
8. Что такое э. д. с. самоиндукции и взаимдукции?
9. Как возникают переходные процессы в электрических цепях?
10. Что характеризует постоянная времени?

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 25. Процесс преобразования энергии в электрических машинах. Режимы их работы

Электрические машины разделяют по назначению на два основных вида: *электрические генераторы и электрические двигатели*. Генераторы предназначены для выработки электрической энергии, а электродвигатели — для приведения в движение колесных пар локомотивов, вращения валов вентиляторов, компрессоров и т. п.

В электрических машинах происходит процесс преобразования энергии. Генераторы преобразуют механическую энергию в электрическую. Это означает, что для работы генератора надо вращать его вал каким-либо двигателем. На тепловозе, например, генератор приводят во вращение дизелем, на тепловой электростанции — паровой турбиной, на гидроэлектростанции — водяной турбиной. Электрические двигатели, наоборот, преобразуют электрическую энергию в механическую. Поэтому для работы двигателя его надо соединить проводами с источником электрической энергии, или, как говорят, включить в электрическую сеть.

Принцип действия любой электрической машины основан на использовании явлений электромагнитной индукции и возникновения электромагнитных сил при взаимодействии проводников с током и магнитного поля. Эти явления имеют место при работе как генератора, так и электродвигателя. Поэтому часто говорят о *генераторном и двигательном режимах работы электрических машин*.

Во вращающихся электрических машинах в процессе преобразования энергии участвуют две основные части: якорь и индуктор со своими обмотками, которые перемещаются относительно друг друга. Индуктор создает в машине магнитное поле; в обмотке якоря индуцируется э. д. с. и возникает ток. При взаимодействии тока в обмотке якоря с магнитным полем создаются электромагнитные силы, посредством которых реализуется процесс преобразования энергии в машине.

Принцип действия электрического генератора. Простейшим электрическим генератором является виток, вращающийся в магнитном поле (рис. 67, а). В этом генераторе виток 1 представляет собой обмотку якоря. Индуктором служат постоянные магниты 2, между которыми вращается якорь 3. При вращении витка с некоторой частотой вращения n его стороны (проводники) пересекают магнитные силовые линии потока Φ и в каждом проводнике индуцируется э. д. с. e . При принятом на рис. 67, а направлении вращения якоря э. д. с. в проводнике, расположенном под южным полюсом, согласно

правилу правой руки направлена от нас, а э. д. с. в проводнике, расположенном под северным полюсом, — к нам. Если подключить к обмотке якоря приемник электрической энергии 4, то по замкнутой цепи пойдет электрический ток i . В проводниках обмотки якоря ток i будет направлен так же, как и э. д. с. e .

Вясним, почему для вращения якоря в магнитном поле придется затрачивать механическую энергию, получаемую от дизеля или турбины (первичного двигателя). Как было установлено в главе II, при прохождении тока i по расположенным в магнитном поле проводникам на каждый проводник действует электромагнитная сила F . При указанном на рис. 67, а направлении тока согласно правилу левой руки на проводник, расположенный под южным полюсом, будет действовать сила F , направленная влево, а на проводник, расположенный под северным полюсом, — сила F , направленная вправо. Указанные силы создают совместно электромагнитный момент M , направленный по часовой стрелке.

Из рассмотрения рис. 67, а видно, что электромагнитный момент M , возникающий при отдаче генератором электрической энергии, направлен в сторону, противоположную вращению проводников, поэтому он является тормозным моментом, стремящимся замедлить вращение якоря генератора. Для того чтобы предотвратить остановку якоря, требуется к валу якоря приложить внешний вращающий момент $M_{вн}$, противоположный моменту M и равный ему по величине. С учетом же трения и других внутренних потерь в машине внешний вращающий момент должен быть больше электро-

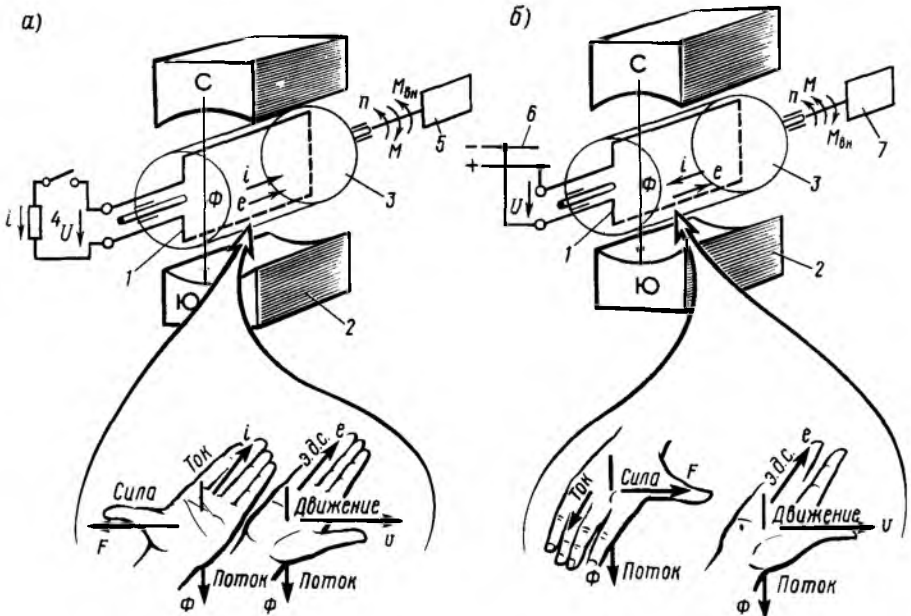


Рис. 67. Принципиальные схемы простейших генератора (а) и электродвигателя (б)

магнитного момента M , созданного током нагрузки генератора. Следовательно, для продолжения нормальной работы генератора к нему необходимо подводить извне механическую энергию — вращать его якорь каким-либо двигателем 5.

При отсутствии нагрузки (при разомкнутой внешней цепи генератора) имеет место режим холостого хода генератора. В этом случае от дизеля или турбины требуется только такое количество механической энергии, которое необходимо для преодоления трения и компенсации других внутренних потерь энергии в генераторе. При увеличении нагрузки генератора, т. е. отдаваемой им электрической мощности $P_{эл}$, увеличиваются ток i , проходящий по проводникам обмотки якоря, и создаваемый им тормозящий момент M . Следовательно, должна быть соответственно увеличена и механическая мощность $P_{мх}$, которую генератор должен получить от дизеля или турбины, для продолжения нормальной работы.

Таким образом, чем больше электрической энергии потребляется, например, электродвигателями тепловоза от тепловозного генератора, тем больше механической энергии забирает он от вращающего его дизеля и тем больше топлива необходимо подавать дизелю.

Из рассмотренных выше условий работы электрического генератора следует, что характерным для него является:

совпадение по направлению тока i и э. д. с е в проводниках обмотки якоря; это указывает на то, что машина отдает электрическую энергию;

возникновение электромагнитного тормозного момента M , направленного против вращения якоря; из этого вытекает необходимость получения машиной извне механической энергии.

Принцип действия электрического двигателя. Принципиально электродвигатель выполнен так же, как генератор. Простейший электродвигатель представляет собой виток 1 (рис. 67, б), расположенный на якоре 3, который вращается в магнитном поле полюсов 2. Проводники витка образуют обмотку якоря. Если подключить виток к источнику электрической энергии, например к электрической сети 6, то по каждому его проводнику начнет проходить электрический ток i . Этот ток, взаимодействуя с магнитным полем полюсов, создает электромагнитные силы F . При указанном на рис. 67, б направлении тока на проводник, расположенный под южным полюсом, будет действовать сила F , направленная вправо, а на проводник, лежащий под северным полюсом, — сила F , направленная влево. В результате совместного действия этих сил создастся электромагнитный вращающий момент M , направленный против часовой стрелки, приводящий якорь с проводником во вращение с некоторой частотой n . Если соединить вал якоря с каким-либо механизмом или устройством 7 (колесной парой тепловоза или электровоза, станком и пр.), то электродвигатель будет приводить это устройство во вращение, т. е. отдавать ему механическую энергию. При этом внешний момент $M_{вн}$, создаваемый этим устройством, будет направлен против электромагнитного момента M .

Выясним, почему при вращении якоря электродвигателя, работающего под нагрузкой, расходуется электрическая энергия. Как было установлено, при вращении проводников якоря в магнитном поле в каждом проводнике индуцируется э. д. с., направление которой определяется по правилу правой руки; следовательно, при указанном на рис. 67, б направлении вращение э. д. с. e , индуцированная в проводнике, расположенном под южным полюсом, будет направлена от нас, а э. д. с. e , индуцированная в проводнике, расположенном под северным полюсом, будет направлена к нам. Из рис. 67, б видно, что э. д. с. e , индуцированные в каждом проводнике, направлены против тока i , т. е. они препятствуют его прохождению по проводникам.

Для того чтобы ток i продолжал проходить по проводникам якоря в прежнем направлении, т. е. чтобы электродвигатель продолжал нормально работать и развивать требуемый вращающий момент, необходимо приложить к этим проводникам внешнее напряжение U , направленное навстречу э. д. с. и большее по величине чем суммарная э. д. с. E , индуцированная во всех последовательно соединенных проводниках обмотки якоря. Следовательно, необходимо подводить к электродвигателю из сети электрическую энергию.

При отсутствии нагрузки (внешнего тормозного момента, приложенного к валу двигателя) электродвигатель потребляет от внешнего источника (сети) небольшое количество электрической энергии и по нему проходит небольшой ток холостого хода. Эта энергия расходуется на покрытие внутренних потерь мощности в машине.

При возрастании нагрузки увеличивается потребляемый электродвигателем ток и развиваемый им электромагнитный вращающий момент. Следовательно, увеличение механической энергии, отдаваемой электродвигателем при возрастании нагрузки, вызывает автоматически увеличение электроэнергии, забираемой им от источника.

Из рассмотренных выше условий работы электрического двигателя следует, что характерным для него является:

совпадение по направлению электромагнитного момента M и частоты вращения n ; это характеризует отдачу машиной механической энергии;

возникновение в проводниках обмотки якоря э. д. с. e , направленной против тока i и внешнего напряжения U . Из этого вытекает необходимость получения машиной извне электрической энергии.

Принцип обратимости электрических машин. Рассматривая принцип действия генератора и электродвигателя, мы установили, что устроены они одинаково и что в основе работы этих машин много общего. Процесс преобразования механической энергии в электрическую в генераторе и электрической энергии в механическую в двигателе связан с индуцированием э. д. с. во вращающихся в магнитном поле проводниках обмотки якоря и возникновением электромагнитных сил в результате взаимодействия магнитного поля и проводников с током. Отличие генератора от электродвигателя заключается только во взаимном направлении э. д. с., тока, электромагнитного момента и частоты вращения.

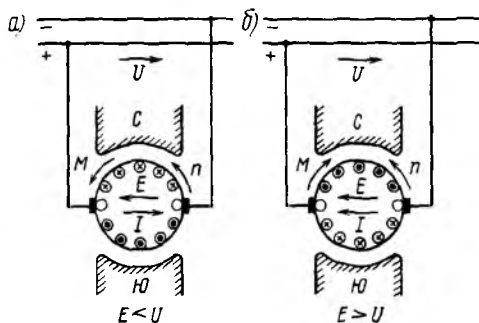


Рис. 68. Направление э. д. с. E , тока I , частоты вращения якоря n и электромагнитного момента M при работе электрической машины постоянного тока в двигательном (а) и генераторном (б) режимах

Обобщая рассмотренные процессы работы генератора и электродвигателя, можно установить *принцип обратимости электрических машин*. Согласно этому принципу *любая электрическая машина может работать и генератором и электродвигателем и переходить из генераторного режима в двигательный и наоборот*.

Для выяснения этого положения рассмотрим работу электрической машины постоянного тока при различных условиях. Если внешнее напряжение U больше суммарной э. д. с. E во всех последовательно соединенных проводниках обмотки якоря, то ток I будет проходить в указанном на рис. 68, а направлении и машина будет работать электродвигателем, потребляя из сети электрическую энергию и отдавая механическую. Однако если по какой-либо причине э. д. с. E станет больше внешнего напряжения U , то ток I в обмотке якоря изменит свое направление (рис. 68, б) и будет совпадать с э. д. с. E . При этом изменится и направление электромагнитного момента M , который будет направлен против частоты вращения n . Совпадение по направлению э. д. с. E и тока I означает, что машина стала отдавать в сеть электрическую энергию, а появление тормозного электромагнитного момента M говорит о том, что она должна потреблять извне механическую энергию. Следовательно, когда э. д. с. E , индуцированная в проводниках обмотки якоря, становится больше напряжения сети U , машина переходит из двигательного режима работы в генераторный, т. е. при $E < U$ машина работает двигателем, при $E > U$ — генератором.

Перевод электрической машины из двигательного режима в генераторный можно осуществить различными способами: уменьшая напряжение U источника, к которому подключена обмотка якоря, или увеличивая э. д. с. E в обмотке якоря.

§ 26. Принцип действия

Машина постоянного тока (рис. 69, а) имеет обмотку возбуждения, расположенную на явно выраженных полюсах статора. По обмотке возбуждения проходит постоянный ток I_b , который создает магнитное поле возбуждения Φ_b . На роторе расположена обмотка якоря, в которой при вращении ротора индуцируется э. д. с.

При заданном направлении вращения якоря направление э. д. с., индуцируемой в его проводниках, зависит только от того, под каким полюсом находится проводник. Поэтому во всех проводниках, расположенных под одним полюсом, направление э. д. с. одинаковое и сохраняется таким независимо от частоты вращения. Иными словами, картина, изображающая направление э. д. с. на рис. 69, а, неподвижна во времени: в проводниках, расположенных выше горизонтальной оси симметрии (геометрической нейтрали), э. д. с. всегда направлена в одну сторону; в проводниках, лежащих ниже геометрической нейтрали, э. д. с. направлена в противоположную сторону.

При вращении якоря проводники обмотки перемещаются от одного полюса к другому; э. д. с., индуцируемая в них, меняет знак, т. е. в каждом проводнике наводится переменная э. д. с. Однако число проводников, находящихся под каждым полюсом, остается неизменным. При этом *суммарная э. д. с., индуцируемая в проводниках, находящихся под одним полюсом, также неизменна по направлению и приблизительно постоянна по величине.* Эта э. д. с. снимается с обмотки якоря при помощи скользящего контакта, включенного между обмоткой и внешней цепью.

Обмотка якоря выполняется замкнутой, симметричной (рис. 69, б). При отсутствии внешней нагрузки ток по обмотке не проходит, так как э. д. с., индуцируемые в различных частях обмотки, взаимно компенсируются.

Если щетки, осуществляющие скользящий контакт с обмоткой якоря, расположить на геометрической нейтрали, то при отсутствии внешней нагрузки к щеткам будет приложено напряжение U , равное э. д. с., индуцированной в каждой из половин обмоток. Это напряжение практически неизменно, хотя и имеет некоторую переменную составляющую, обусловленную изменением положения проводников в пространстве. При большом числе проводников пульсации напряжения незначительны.

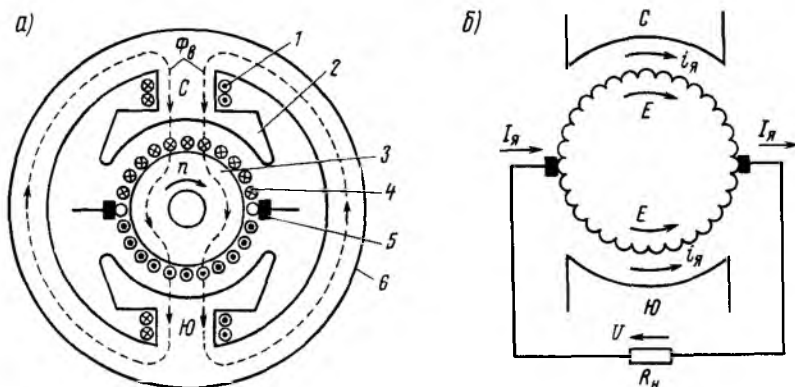


Рис. 69. Электромагнитная схема двухполюсной машины постоянного тока (а) и эквивалентная схема ее обмотки якоря (б):

1 — обмотка возбуждения; 2 — главные полюсы; 3 — якорь; 4 — обмотка якоря; 5 — щетки; 6 — остов (станина)

При подключении к щеткам нагрузки R_n через обмотку якоря будет проходить постоянный ток I_n , направление которого определяется направлением э. д. с. В обмотке якоря ток I_n разветвляется и проходит по двум параллельным ветвям (токи i_n).

Для обеспечения надежного токоотвода щетки скользят не по проводникам обмотки якоря (как это было на заре электромашиностроения), а по коллектору, выполняемому в виде цилиндра, который набирается из медных пластин, изолированных одна от другой. К каждой паре соседних коллекторных пластин присоединяют часть обмотки якоря, состоящую из одного или нескольких витков; эту часть называют *секцией обмотки якоря*.

С помощью коллектора и щеток вращающаяся обмотка якоря соединяется с внешней электрической цепью. В генераторах коллектор и щетки служат для преобразования изменяющихся по направлению э. д. с. и тока в проводниках обмотки якоря в постоянные по величине и направлению э. д. с., напряжение и ток во внешней цепи. В двигателе с помощью коллектора и щеток осуществляется обратное преобразование.

Таким образом, *главной особенностью машины постоянного тока является наличие коллектора, осуществляющего скользящий контакт между обмоткой якоря и внешней электрической цепью.*

Рассмотрим подробнее процесс преобразования э. д. с. и тока с помощью коллектора и щеток.

Назначение коллектора в генераторе. В простейшем генераторе (рис. 70) при вращении витка в магнитном поле его рабочие (активные) стороны 1 и 2 пересекают магнитные силовые линии и в них индуцируется переменная э. д. с. e . Если к кольцам, к которым припаяны концы витка, присоединить внешнюю цепь с некоторым приемником электрической энергии, то по нему пойдет переменный ток i . Участки 3 и 4 витка являются нерабочими, так как при вращении витка они не пересекают магнитных силовых линий и, следовательно, не участвуют в создании э. д. с. Эти участки витка называют *лобовыми частями*.

В положении, показанном на рис. 70, а, виток не пересекает силовых линий магнитного поля, э. д. с. в нем не индуцируется и тока нет. При повороте витка по часовой стрелке на 90° (рис. 70, б) обе стороны его будут пересекать магнитное поле, при этом в активных сторонах 1 и 2 индуцируются э. д. с. e и по витку и внешней цепи начинает проходить ток i . Применяя правило правой руки, можно установить, что э. д. с., индуцированная в стороне 1 витка, будет направлена от нас, а в стороне 2 — к нам. Следовательно, во внешней цепи ток проходит от щетки А, имеющей положительный потенциал, к щетке Б с отрицательным потенциалом. В положении, показанном на рис. 70, в, виток снова не пересекает силовые линии поля, поэтому э. д. с. и ток уменьшаются до нуля. При повороте витка на 270° (рис. 70, г) под северный полюс подходит сторона 2 витка, а под южный — сторона 1. Поэтому направление э. д. с. в рабочих сторонах 1 и 2 изменяется на противоположное по сравнению с направлением его в положении, показанном на рис. 70, б. В резуль-

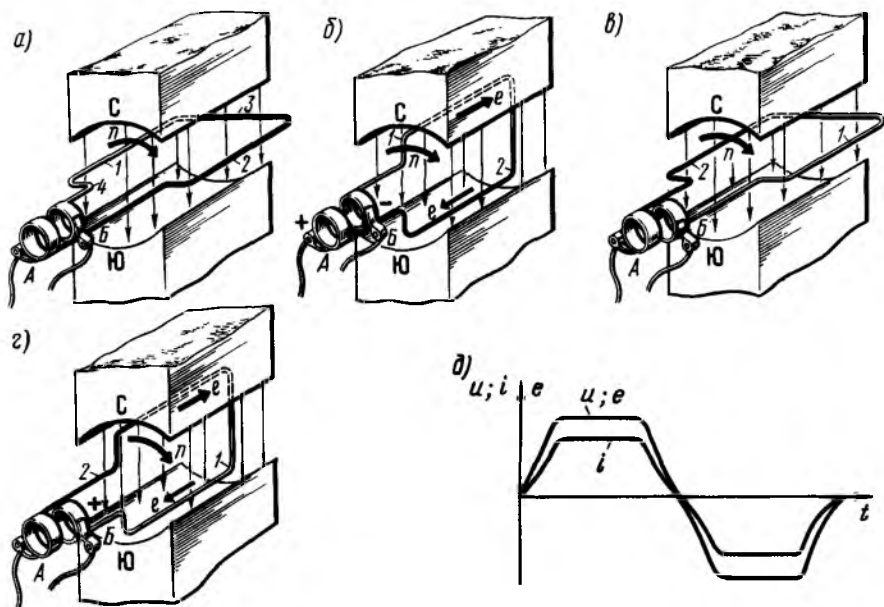


Рис. 70. Процесс индуктирования э.д.с. в простейшем электрическом генераторе (а—г) и кривые изменения э.д.с. e в проводниках обмотки якоря, напряжения u и тока i (д) во внешней цепи

тате изменяются полярность щеток A и B и направление тока i во внешней цепи.

Как следует из закона электромагнитной индукции, значение индуцированной э. д. с. e пропорционально числу силовых магнитных линий, пересекаемых сторонами витка в единицу времени. При перемещении рабочих сторон витка под полюсами э. д. с. e , напряжения u , действующие между щетками A и B , и ток i будут иметь некоторые постоянные значения (см. рис. 70, б). При переходе от одного полюса к другому направления e , u и i будут изменяться.

Для получения во внешней цепи постоянных по направлению э. д. с., напряжения и тока в простейшем генераторе виток присоединяют не к двум кольцам, как показано на рис. 70, а к одному кольцу, разрезанному на две изолированные одна от другой части. Начало витка присоединяют к одной половине кольца, конец — к другой (рис. 71). Такую конструкцию называют коллектором, а отдельные изолированные части его (в данном случае полукольца) — *коллекторными пластинами*.

Рассмотрим процесс изменения напряжения и тока во внешней цепи, подключенной к простейшему генератору, при наличии коллектора.

В положении, показанном на рис. 71, а, э. д. с. в витке не индуцируется и тока во внешней цепи нет. При повороте витка на 90° (рис. 71, б) в его рабочих сторонах 1 и 2 индуцируется э. д. с. e и во внешней цепи будет протекать ток i от щетки B к щетке A . В по-

ложении, показанном на рис. 71, в, э. д. с. в витке не индуцируется и ток во внешней цепи равен нулю. Наконец, при повороте витка на 270° (рис. 71, г) направление э. д. с. e в рабочих сторонах 1 и 2 витка изменяется по сравнению с положением, показанным на рис. 71, б. Однако направление тока во внешней цепи остается неизменным, так как одновременно с поворотом витка меняются местами и коллекторные пластины, вследствие чего к щетке B подходит пластина, связанная со стороной 2 витка, а к щетке A — пластина, связанная со стороной 1. Потенциалы щеток, т. е. напряжение u , при этом сохраняются такими же, как и в положении, показанном на рис. 71, б, и ток i во внешней цепи будет протекать в прежнем направлении. Таким образом, при замене двух контактных колец двумя изолированными одна от другой коллекторными пластинами происходит выпрямление напряжения u , действующего между щетками A и B , а следовательно, и тока i во внешней цепи. Характер изменения напряжения u на щетках и тока i поясняется на рис. 71, д. Напряжение и ток получаются постоянными по направлению, но переменными по значению. Такой ток и напряжение называют *пульсирующими*.

Пульсирующий ток мало пригоден для практических целей. Для сглаживания пульсации в обмотке якоря увеличивают число витков и соответственно число коллекторных пластин.

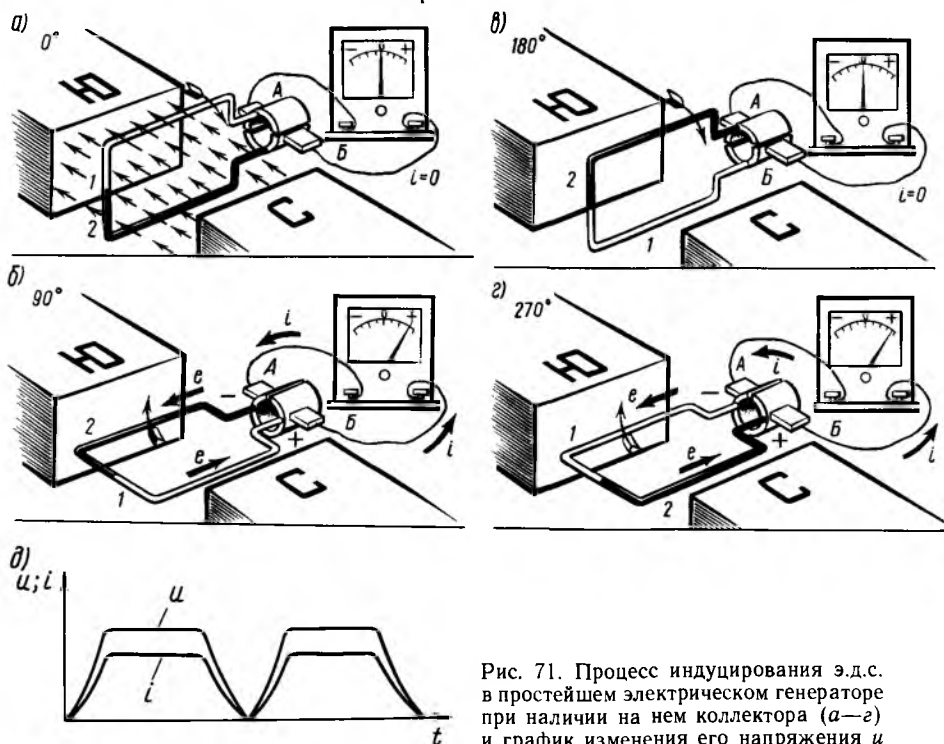


Рис. 71. Процесс индуцирования э.д.с. в простейшем электрическом генераторе при наличии на нем коллектора (а—г) и график изменения его напряжения u и тока i во внешней цепи (д)

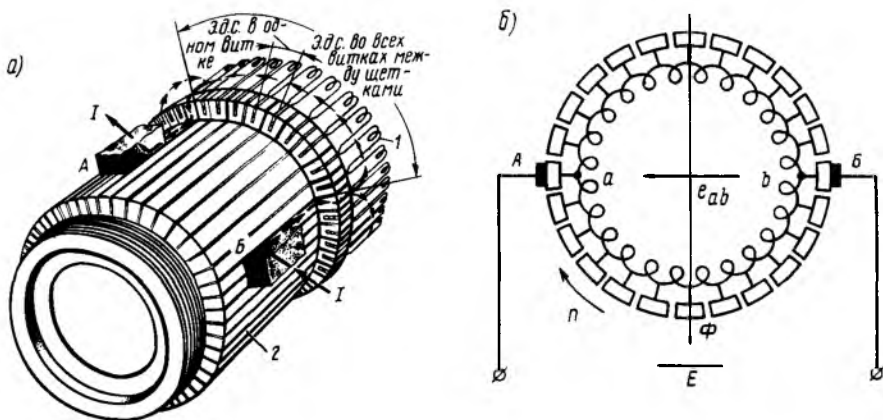


Рис. 72. Схемы подключения обмотки якоря к пластинам коллектора

Для лучшего использования обмотки якоря I (рис. 72) отдельные витки соединяют друг с другом последовательно. К каждой коллекторной пластине 2 присоединяют конец предыдущего и начало следующего витка. В результате получают замкнутую обмотку (рис. 72, а). При вращении якоря между любыми двумя точками такой обмотки, например между a и b (рис. 72, б), действует переменная э. д. с. e_{ab} . Однако во внешней цепи между неподвижными щетками A и B действует постоянная по направлению и значению э. д. с. E , равная сумме э. д. с., индуцированных во всех последовательно соединенных витках якоря, расположенных между этими щетками. Следовательно, коллектор осуществляет преобразование изменяющихся э. д. с. и тока в обмотке якоря в постоянные по величине и направлению э. д. с. и ток, действующие во внешней цепи. т. е. работает в качестве *механического выпрямителя*.

Чем больше витков в обмотке якоря и коллекторных пластин, тем меньше пульсируют э. д. с. и ток. Полностью освободиться от пульсации невозможно. Для большей части электрических потребителей эти пульсации не играют никакой роли и совершенно не отражаются на их работе.

Назначение коллектора в электродвигателе. Электродвигатель питается от сети постоянного напряжения и к его якорю подается постоянный ток. По проводникам же обмотки якоря протекает переменный ток (см. рис. 70, д). Следовательно, в электродвигателе коллектор работает в качестве *механического преобразователя постоянного тока в переменный*, обеспечивая питание обмотки якоря переменным током от внешнего источника постоянного тока.

Важную роль играет коллектор при распределении тока по проводникам обмотки якоря. При вращении якоря проводники его обмотки перемещаются под полюсами машины, переходя от северного полюса к южному, затем снова к северному и т. д. Этот переход должен сопровождаться изменением направления тока в проводниках для того, чтобы электромагнитный момент машины действовал все

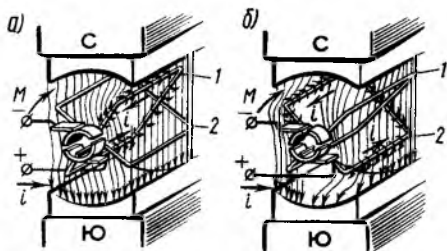


Рис 73 Распределение тока по проводникам обмотки якоря при его вращении

противоположное. Например, в положении, показанном на рис. 73, а, ток i проходит по витку 1. Возникающий при этом электромагнитный момент M направлен по часовой стрелке. Когда виток 1 в процессе поворота якоря займет положение, показанное на рис. 73, б, коллекторные пластины, к которым присоединен этот виток, выйдут из-под щеток, и ток перестанет проходить по витку 1. Однако под щетками окажется вторая пара коллекторных пластин, соединенных с витком 2, и ток i начнет проходить по этому витку. Электромагнитный момент M будет действовать в том же направлении, что и при положении якоря, показанном на рис. 73, а. То же самое будет иметь место при повороте каждого витка на 180° , когда их рабочие стороны перейдут под полюсы другой полярности. Подобную же роль в распределении тока по проводникам обмотки якоря играет коллектор при работе машины в генераторном режиме: при любом положении якоря электромагнитный тормозной момент, созданный всеми проводниками обмотки якоря, действует в одном и том же направлении.

§ 27. Основные части электрических машин и их назначение

Конструктивное выполнение машины. Основными частями машины постоянного тока являются: остов (станина), полюсы, якорь, щеточный аппарат и некоторые вспомогательные детали, служащие для конструктивного оформления машины. Электрические машины общего применения (рис. 74) обычно имеют цилиндрическую форму и снабжены приливами для установки на фундамент или фланцами для крепления.

Тяговые электрические машины имеют те же основные части, но их конструкция приспособлена к особенностям установки этих машин на локомотивах. Например, тяговые двигатели электровозов (рис. 75), тепловозов и электропоездов устанавливают на тележках экипажной части локомотива, поэтому в их конструкции предусматривают специальные элементы для монтажа двигателя на тележке и передачи его вращающего момента на движущую колесную пару. В тяговых генераторах тепловозов (рис. 76) вал якоря имеет

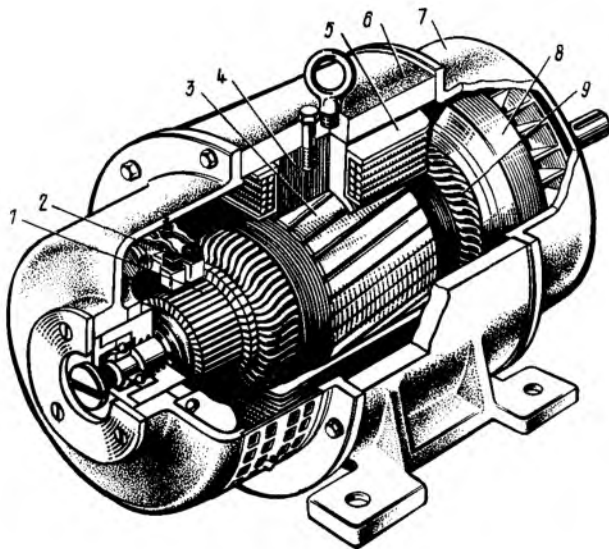


Рис. 74. Устройство машины постоянного тока:

1 — коллектор; 2 — щетки; 3 — сердечник якоря; 4 — главный полюс; 5 — катушка обмотки возбуждения; 6 — остов; 7 — подшипниковый щит; 8 — вентилятор; 9 — обмотка якоря

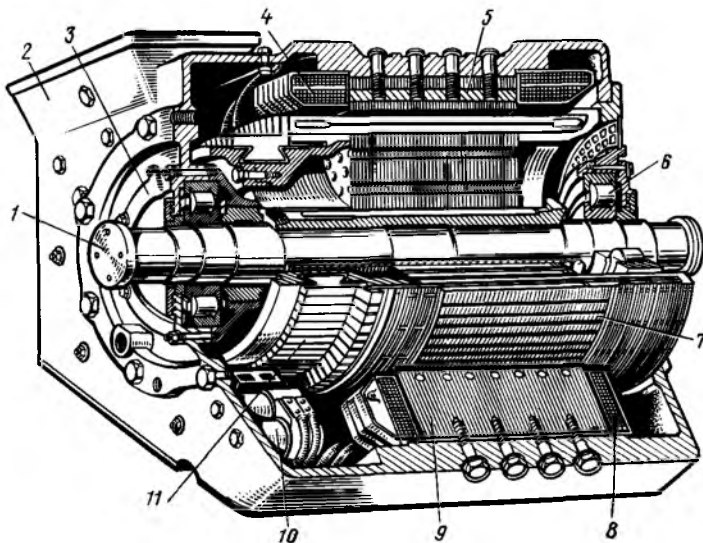


Рис. 75. Устройство тягового двигателя постоянного тока:

1 — вал якоря; 2 — остов; 3 — подшипниковый щит; 4 — обмотка главного полюса; 5 — главный полюс; 6 — роликовый подшипник; 7 — сердечник якоря; 8 — обмотка добавочного полюса; 9 — добавочный полюс; 10 — щеткодержатель; 11 — коллектор

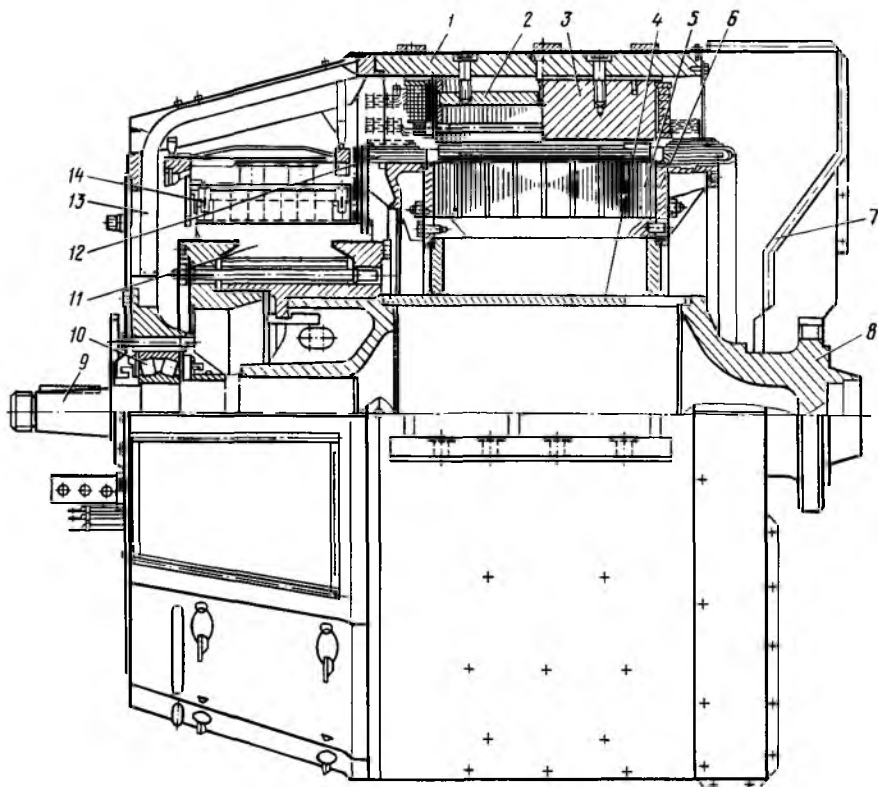


Рис. 76. Продольный разрез тягового генератора тепловоза:

1 — остов; 2 — главный полюс; 3 — добавочный полюс; 4 — барабан; 5 — сердечник якоря; 6 — обмоткодержатель; 7 — сварной кожух; 8 — фланец; 9 — вал; 10 — подшипник; 11 — коллекторная пластина; 12 — обмотка якоря; 13 — подшипниковый щит; 14 — щеткодержатель

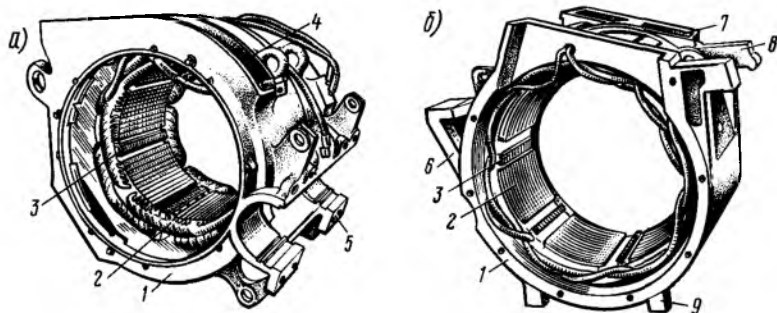


Рис. 77. Остовы тяговых двигателей с установленными полюсами при опорно-осевом подвешивании (а) и при рамном подвешивании (б):

1 — остов; 2 — главный полюс; 3 — добавочный полюс; 4 — люк для осмотра коллектора; 5 — приливы для моторно-осевых подшипников; 6, 8 — кронштейны для подвешивания двигателя на раме тележки; 7 — прилив для крепления коробки с выводными зажимами. 9 — выступы для установки двигателя

только один подшипник; второй опорой якоря является подшипник дизеля, вал которого жестко соединен с валом якоря генератора фланцем.

Остов. В современных электрических машинах остов отливают из стали. Он составляет часть магнитной системы машины и служит для укрепления полюсов с катушками и выводных зажимов, а также для поддержания боковых щитов, несущих подшипники якоря.

Остовы тяговых генераторов тепловозов имеют цилиндрическую форму и снабжены двумя приливами для установки генератора на общую с дизелем раму. Остовы тяговых двигателей (рис. 77) обычно выполняют восьмигранными или цилиндрическими. В них имеются приспособления для монтажа двигателя на тележке, люки для осмотра коллектора и щеток, отверстия для подвода и выхода наружу охлаждающего воздуха и пр. Внутри остова предусмотрены обработанные приливы для установки полюсов, обеспечивающие строго симметричное расположение их на машине. В торцовых стенках остова имеются горловины для установки и крепления подшипниковых щитов.

Полюсы. В современных стационарных и тяговых машинах постоянного тока устанавливают главные и добавочные полюсы.

Главные полюсы (рис. 78, а), на которых расположены катушки обмотки возбуждения, служат для создания в машине магнитного потока возбуждения. Часть сердечника главного полюса со стороны, обращенной к якорю, выполнена более широкой и называется *полюсным наконечником*. Эта часть служит для поддержания катушки, а также для лучшего распределения магнитного потока по поверхности якоря.

Сердечники главных полюсов для уменьшения вихревых токов изготавливают шихтованными — из отдельных стальных листов толщиной 0,5—1,5 мм. По краям полюсов устанавливают более толстые торцовые боковины, которые посредством заклепок удерживают полюсные листы в спрессованном состоянии.

Возникновение вихревых токов в сердечниках главных полюсов объясняется изменением (пульсацией) магнитного поля в полюсных наконечниках, прилегающих к якорю при его вращении. Вследствие

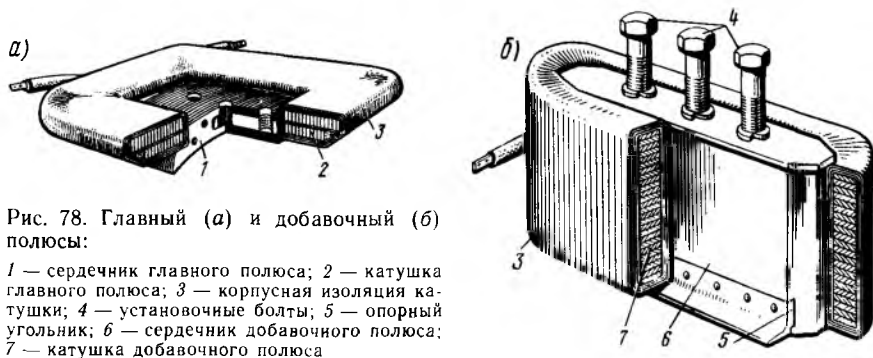


Рис. 78. Главный (а) и добавочный (б) полюсы:

1 — сердечник главного полюса; 2 — катушка главного полюса; 3 — корпусная изоляция катушки; 4 — установочные болты; 5 — опорный угольник; 6 — сердечник добавочного полюса; 7 — катушка добавочного полюса

зубчатости якоря магнитное поле в местах, расположенных против зубов, усиливается (индукция возрастает), а в местах, расположенных против пазов, ослабляется (индукция уменьшается). При вращении якоря против каждой точки поверхности полюсного наконечника оказывается попеременно то зубец, то паз, вследствие чего индукция магнитного поля в отдельных точках наконечника непрерывно изменяется. Это и вызывает появление вихревых токов в стали наконечника.

Электрические машины могут иметь два, четыре, шесть и в общем случае $2r$ главных полюсов. Главные полюсы укрепляют на остовах болтами. В машинах небольшой и средней мощности резьбу под болты нарезают непосредственно в сердечнике полюса (рис. 79, а). В более мощных машинах (тяговых двигателях и тяговых генераторах) болты ввертывают в специальные установочные стержни (один или два на полюс), закладываемые в сердечник при его сборке (рис. 79, б).

Остов, полюсы и якорь составляют *магнитную систему машины*, через которую замыкается магнитный поток, созданный обмоткой возбуждения. Воздушный зазор между якорем и полюсами является также одним из участков магнитной цепи.

Расположение главных полюсов и распределение магнитного потока в четырехполюсной машине поясняются рис. 80, а и б. Соседние (разноименные) полюсы в четырехполюсной машине расположены под углом 90° , а двухполюсной — под углом 180° . Линия, делящая эти углы пополам, называется *геометрической нейтралью*. Магнитный поток Φ , проходящий через полюсы и поступающий в якорь и остов, разделяется по оси симметрии полюсов на две симметричные и равные части. У всех современных машин с симметричными магнитными системами *число полюсов $2r$ всегда четное, все полюсы совершенно одинаковы и углы между осями соседних полюсов равны*.

Добавочные полюсы (см. рис. 78, б) обеспечивают уменьшение искрения, возникающего при работе машины (см. § 30). По своим размерам они меньше главных. Число добавочных полюсов обычно равно числу главных. В машинах постоянного тока сердечники до-

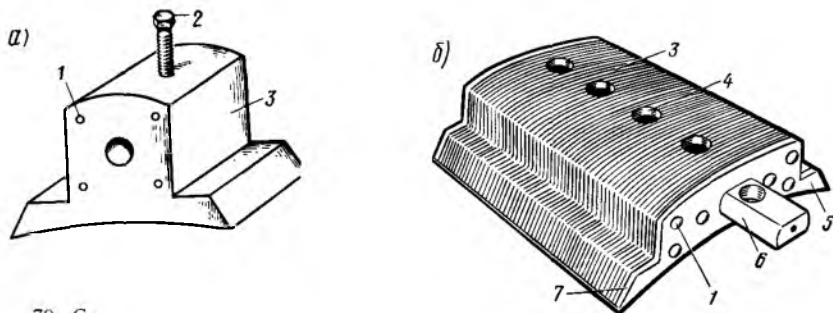


Рис. 79. Сердечники главных полюсов:

1 — заклепки; 2 — установочный болт; 3 — сердечник полюса; 4 — отверстие под установочные болты; 5 — полюсный наконечник; 6 — установочный стержень; 7 — боковина

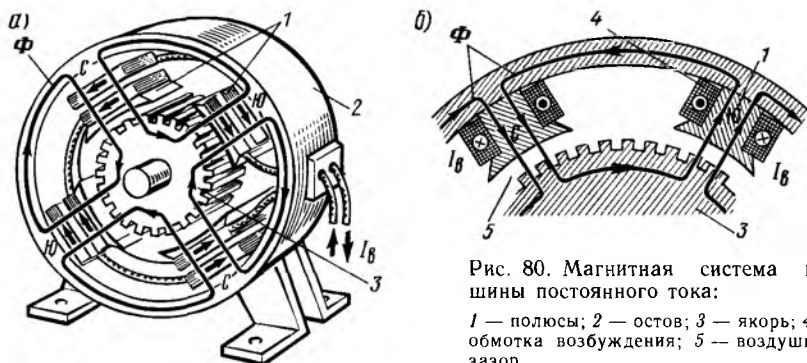


Рис. 80. Магнитная система машины постоянного тока:

1 — полюсы; 2 — осто́в; 3 — якорь; 4 — обмотка возбуждения; 5 — воздушный зазор

бавочных полюсов изготовляют из стали. Они имеют монолитную конструкцию, так как значение индукции под добавочными полюсами выбирается обычно небольшим и при вращении якоря индуцирования вихревых токов в их наконечниках практически не происходит. Однако в тяговых двигателях электровозов переменного тока, работающих при пульсирующем напряжении, сердечники добавочных полюсов выполняют шихтованными — из изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Этим обеспечивается существенное уменьшение вихревых токов, возникающих при прохождении по обмотке добавочных полюсов пульсирующего тока.

Катушки полюсов изготовляют из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения или из шинной меди.

Площадь поперечного сечения проводников и число витков катушек зависят от типа, мощности и напряжения машины. Отдельные витки катушек изолируют друг от друга (межвитковая изоляция), кроме того, на катушку еще накладывают общую корпусную изоляцию 3 (см. рис. 78). Катушки всех главных полюсов обычно соединяются последовательно и составляют обмотку возбуждения машины. Катушки добавочных полюсов также соединяют последовательно.

В современных тяговых электрических машинах постоянного и пульсирующего тока часто применяют компенсационную обмотку, улучшающую условия работы коллектора и щеток (см. § 29). Ее располагают в пазах, проштампованных в полюсных наконечниках, и выполняют в виде отдельных катушек из прямоугольной меди (рис. 81). Катушки крепят в пазах текстолитовыми клиньями.

Якорь. Машина постоянного тока имеет якорь, состоящий из сердечника, обмотки, коллектора и вала. *Сердечник якоря* (рис. 82) собран из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Для уменьшения потерь от вихревых токов, возникающих при пересечении якорем магнитного поля, листы изолируют один от другого. Листы собирают в общий пакет, который насаживают на вал якоря. Пакет удерживается в сжатом состоянии нажимными шайбами. В теле якоря делают вентиляционные каналы для прохода охлаждающего воздуха. В машинах постоянного тока боль-

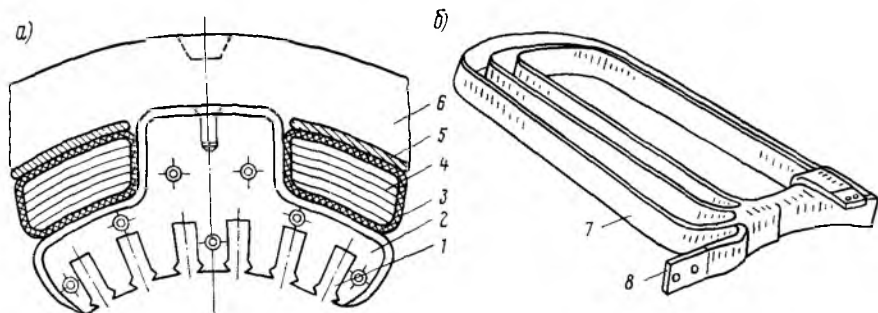


Рис. 81. Главный полюс в машинах с компенсационной обмоткой (а) и общий вид этой обмотки (б):

1 — паз для катушки компенсационной обмотки; 2 — полюсный наконечник; 3 — корпусная изоляция катушки возбуждения; 4 — проводники катушки возбуждения; 5 — немагнитная прокладка; 6 — остов; 7, 8 — катушка и вывод компенсационной обмотки

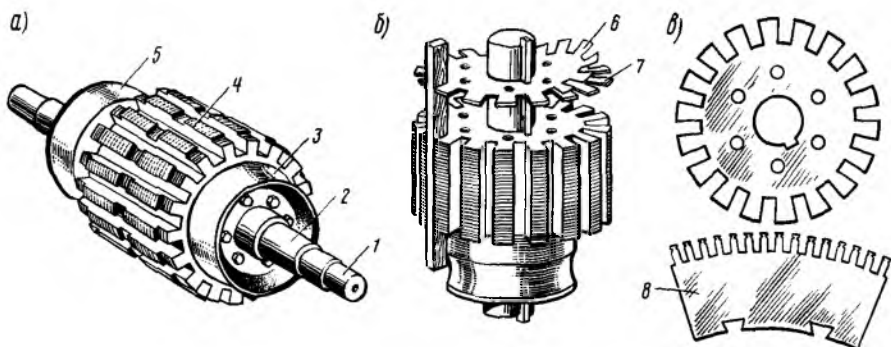


Рис. 82. Сердечник якоря машины постоянного тока без обмотки (а); сборка якоря (б); стальные листы якоря (в):

1 — вал якоря; 2 — место для установки коллектора; 3, 5 — нажимные шайбы (обмоткодержатели); 4 — сердечник якоря; 6 — лаковая пленка; 7 — стальной лист; 8 — сегмент сердечника

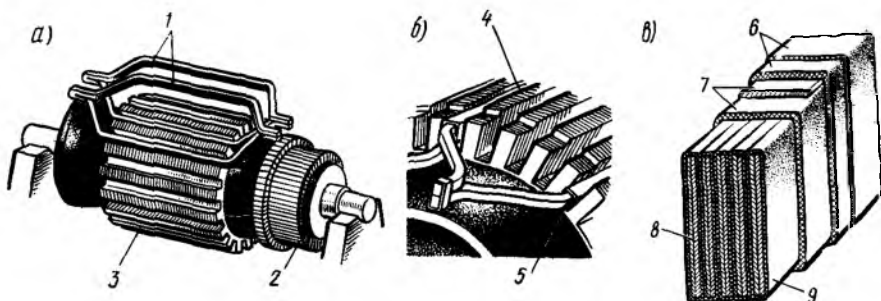


Рис. 83. Устройство обмотки якоря:

а, б — укладка якорных катушек; в — изоляция; 1 — якорные катушки; 2 — коллектор; 3 — сердечник якоря; 4, 5 — верхняя и нижняя стороны катушки; 6, 7, 9 — покровная, корпусная и витковая изоляция; 8 — медные проводники

шой мощности с якорями большого диаметра листы, из которых собирают сердечник якоря, имеют форму сегментов 8. Сегменты собирают на шпильках, образуя полную окружность якоря, и сжимают нажимными шайбами; при сборке пакета якоря стыки между сегментами одного слоя располагаются против середины сегментов предыдущего слоя, благодаря чему уменьшается магнитное сопротивление сердечника якоря.

Якорные листы имеют зубчатую форму, поэтому при сборке их в пакеты образуются пазы (впадины), в которые укладывают обмотку якоря. Пазы бывают открытые и полужакрытые. Тяговые электрические машины имеют открытые пазы. Для улучшения коммутации и снижения магнитного шума в некоторых машинах применяют якоря со скошенными пазами, т. е. пазы по длине сердечника смещаются на одно зубцовое деление.

В тяговых двигателях сердечник якоря, нажимные шайбы и коллектор обычно насаживают не на вал, а на промежуточную втулку, которую затем запрессовывают под давлением на вал. Применение промежуточной втулки дает возможность сменить неисправный вал без полной разборки якоря.

Обмотку якоря (рис. 83) выполняют из медной изолированной проволоки, в машинах большой мощности — из медных стержней. Обычно обмотка якоря состоит из отдельных якорных катушек, которые обматывают изоляционными лентами из миканита, асбеста, стеклоткани или хлопчатобумажной ткани и укладывают в пазы якоря. В каждом пазу укладывают обычно две стороны различных якорных катушек, одна поверх другой. Каждая якорная катушка включает в себя несколько секций, концы которых припаивают к соответствующим коллекторным пластинам.

Различают следующие виды изоляции катушек: *витковая* — изоляция каждого из проводников; *корпусная* — изоляция всей катушки относительно сердечника якоря и *покровная* — наружная изоляция, защищающая корпусную изоляцию от механических повреждений. После наложения обмотки якорь пропитывают изоляционными лаками (асфальтовым, бакелитовым и др.), благодаря чему повышается качество изоляции машины. В тяговых электрических машинах для изоляции обмотки якоря применяют монолитную изоляцию из материалов высокой нагревостойкости (стекло-слюдянистое полотно), залитых эпоксидным компаундом горячего отверждения. Такая изоляция повышает надежность и долговечность электрических машин.

При вращении якоря обмотка может выпасть из пазов под действием возникающих центробежных сил. Чтобы предупредить выпадение обмотки, ее закрепляют изоляционными клиньями, а также проволочными бандажами или бандажами из стеклоленты (стеклобандажами) (рис. 84). Якорные катушки изготавливают на специальных приспособлениях, позволяющих придавать им правильную и одинаковую форму (рис. 85).

Коллектор (рис. 86, а) выполнен из отдельных пластин 2 толщиной до 5—8 мм, изготовленных из твердотянутой меди или кадмиевой

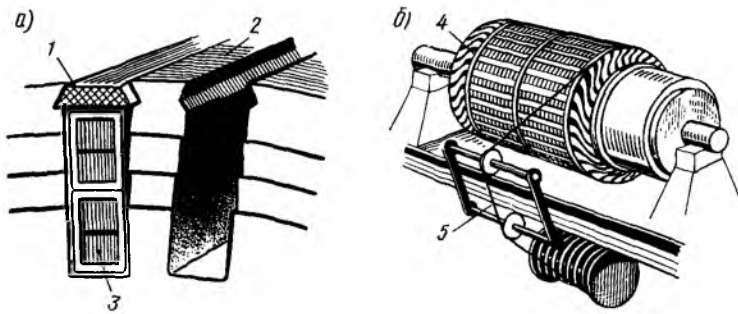


Рис. 84. Крепление обмотки якоря изоляционными клиньями (а) и проволочными бандажами (б):

1 — текстолитовый клин; 2 — сердечник якоря; 3 — якорная катушка; 4 — проволочный бандаж; 5 — бандажная проволока

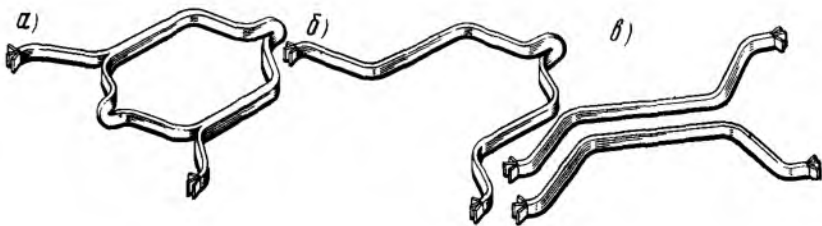


Рис. 85. Общий вид якорных катушек:

а, б — при многовитковых и одновитковых секциях; в — при обмотке с разрезными секциями

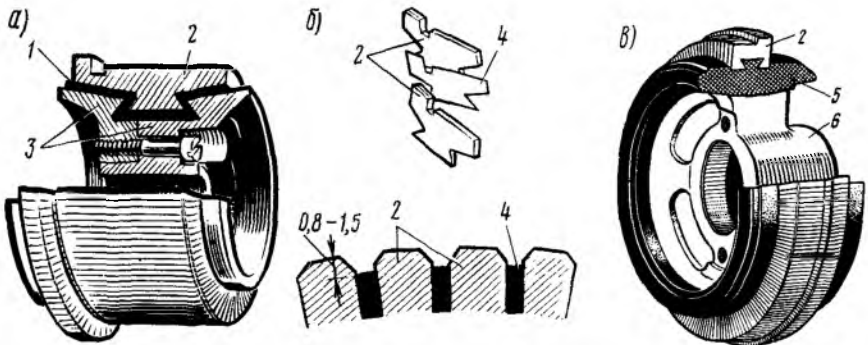


Рис. 86. Общий вид коллектора машины постоянного тока (а); расположение коллекторных пластин и изоляционных прокладок (б) и коллектор в пластмассовом корпусе (в)

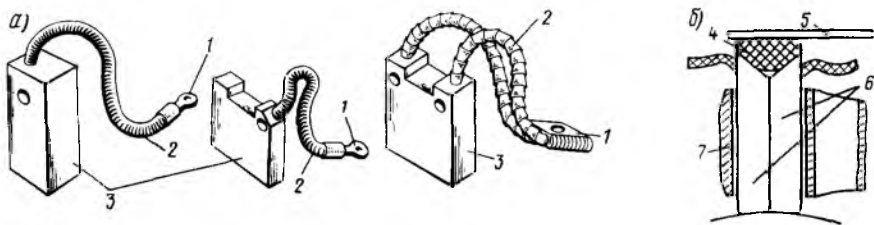


Рис. 87. Неразрезные (а) и разрезные (б) щетки электрических машин:
 1 — кабельный наконечник; 2 — щеточный канатик; 3 — щетка; 4 — резиновый гаситель; 5 — нажимной палец; 6 — разрезная щетка; 7 — обойма

бронзы клинообразного сечения. Пластины изолируют одну от другой миканитовыми прокладками 4. К выступающей части коллекторной пластины припаивают провода от обмотки якоря. Для этого в ней имеется соответствующая прорезь. Узкие края пластины имеют форму ласточкина хвоста, после сборки коллектора эти края зажимаются между двумя нажимными шайбами. Пластины изолируют от нажимных шайб 3 и вала якоря миканитовыми манжетами 1 и цилиндрами. Когда коллектор окончательно собран, его поверхность обтачивают на токарном станке и тщательно шлифуют. Чтобы миканитовые прокладки при износе коллектора не выступали над пластинами и не вызывали вибрации щеток, их профрезеровывают на 0,8—1,5 мм ниже поверхности коллектора (рис. 86, б). Эту операцию называют *продороживанием коллектора*.

В машинах с большим диаметром якоря (в тяговых генераторах тепловозов) для соединения проводников обмотки якоря с пластинами коллектора предусматривают промежуточные звенья — гибкие медные пластины, называемые *петушками*. Петушки нижними концами прикрепляют к коллекторным пластинам, а в верхние их части вплавляют проводники обмотки якоря.

Вращаясь, коллектор соприкасается со щетками и постепенно изнашивается. Кроме того, при работе коллектор нагревается, и возникающие при этом механические напряжения могут вызвать его деформацию, следствием которой будет вибрация щеток, плохой их контакт с коллектором и значительное искрение. Поэтому в эксплуатации периодически выполняют обточку коллекторов.

В машинах малой и средней мощности, например в тяговых двигателях электропоездов и во вспомогательных машинах, широко применяют коллекторы с пластмассовым корпусом (рис. 86, в). В этих коллекторах медные пластины 2 и миканитовые прокладки опрессованы пластмассой 5, обладающей большой механической и электрической прочностью. Для посадки коллектора на вал служит стальная втулка б, которую вставляют в пресс-форму перед запрессовкой пластин в пластмассу.

Щеточный аппарат. Щетки предназначены для соединения коллектора с внешней цепью. Они представляют собой прямоугольные призмы шириной 4—32 мм (рис. 87, а). Рабочую поверх-

ность щеток шлифуют к коллектору, чтобы обеспечить надежный контакт. Каждая щетка имеет определенную марку. Щетки различных марок различаются составом, способом изготовления и физическими свойствами.

Щетки, применяемые для электрических машин, подразделяются на четыре основные группы: угольно-графитные, графитные, электрографитированные и металлографитные. Для каждой машины, работающей в определенных условиях, нужно применять щетки только соответствующих марок. Эти марки подбираются заводом — изготовителем машин; при замене изношенных щеток нужно брать щетки той же марки. В тяговых электрических машинах применяют исключительно электрографитированные щетки, которые обладают хорошими коммутационными свойствами, значительной механической прочностью и способностью выдерживать большие перегрузки.

Щетки устанавливают в специальные обоймы, называемые *щеткодержателями* (рис. 88, а). Для отвода тока от щетки к ней прикрепляют медный гибкий проводник (щеточный канатик), который присоединяют к щеткодержателю. Одним из основных условий хорошей работы щеток является плотный, надежный контакт между щеткой и коллектором. Он достигается при помощи нажимного устройства, смонтированного на щеткодержателе. Нажим на щетку осуществляется пружиной (спиральной, цилиндрической или пластинчатой), упирающейся одним концом в щетку, а другим — в щеткодержатель. В тяговых двигателях нажимная пружина воздействует на специальный палец, прижимаемый к верхней торцовой поверхности щетки (рис. 88, б). Нажатие на щетку должно быть отрегулировано в строго определенных пределах, так как чрезмерный нажим вызывает быстрый износ щетки и нагрев коллектора, а недостаточный нажим не дает надежного контакта между щеткой и коллектором, вследствие чего возникает искрение под щеткой. Нажатие принимают из расчета 1,5—3,5 Н на 1 см² опорной поверхности щетки. Для улучшения щеточного контакта и предотвращения искрения щеток в некоторых случаях применяют разрезные щетки (рис. 87, б). Такая щетка состоит из двух частей, установленных

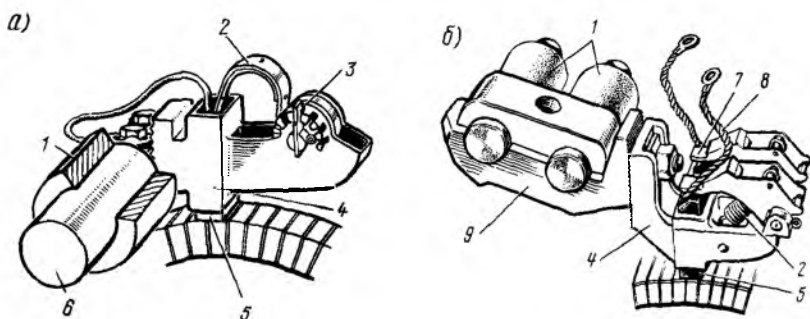


Рис. 88. Щеткодержатели вспомогательных машин (а) и тяговых двигателей (б): 1 — изолятор; 2 — пружина; 3 — натяжное устройство; 4 — обойма; 5 — щетка; 6 — щеточный палец; 7 — нажимной палец; 8 — щеточный канатик; 9 — кронштейн

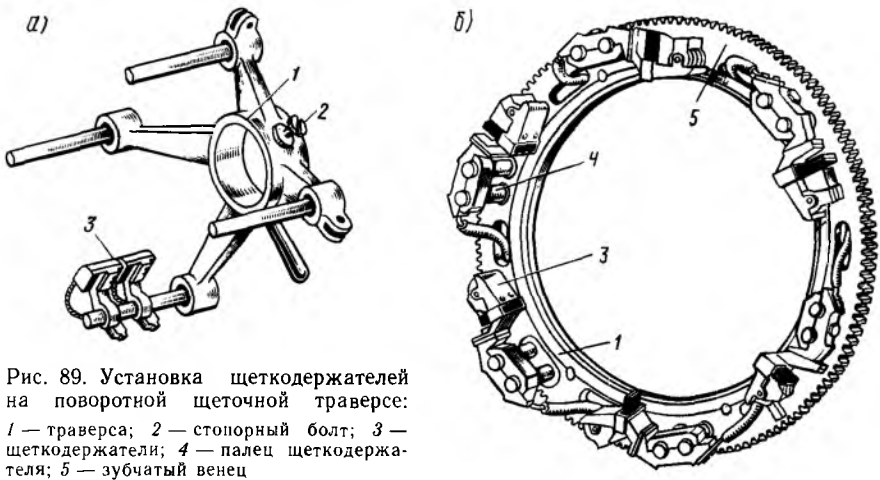


Рис. 89. Установка щеткодержателей на поворотной щеточной траверсе: 1 — траверса; 2 — стопорный болт; 3 — щеткодержатели; 4 — палец щеткодержателя; 5 — зубчатый венец

в общую обойму. Равномерное нажатие на отдельные части щетки обеспечивается резиновым гасителем 4.

Щеткодержатели укрепляют на кронштейнах и щеточных пальцах непосредственно к остову машины (в четырехполюсных тяговых двигателях) или к боковым подшипниковым щитам и изолируют от них специальными изоляторами 1 (см. рис. 88). В некоторых тяговых и стационарных машинах щеткодержатели устанавливают на поворотных траверсах (рис. 89, а и б), прикрепляемых к боковым щитам. Поворотом траверсы обеспечивается возможность некоторого перемещения щеток по окружности коллектора. Благодаря этому можно подобрать наиболее выгодное положение щеток, при котором искрение под щетками при данном режиме работы будет минимальным. Применение поворотной траверсы облегчает также осмотр щеткодержателей и замену в них щеток.

Кроме описанных выше частей, в электрических машинах имеется ряд конструктивных деталей: подшипники, подшипниковые щиты (крышки), смазочные и маслозащитные устройства и т. п.

Подшипники. В тяговых двигателях, тепловозных генераторах и вспомогательных машинах обычно устанавливают шариковые и роликовые подшипники (рис. 90), очень надежные и требующие небольшого ухода. Подшипники помещают в специальных подшипниковых щитах, которые прикрепляют к обеим сторонам остова.

Для смазки подшипников применяют в большинстве случаев густую консистентную смазку. Эта смазка не требует большого объема смазочных камер, и запас ее, закладываемый в подшипник, при периодических ревизиях двигателя оказывается вполне достаточным для работы машины без замены смазки до следующей ревизии. Для предотвращения выхода смазки из смазочных камер в тяговых машинах применяют гидравлические (лабиринтовые) уплотнения. Действие этих уплотнений основано на вязкости смазки, попавшей в небольшой зазор между вращающейся и неподвижной де-

талями, а также на создании самой смазкой гидравлических перегородок вследствие отбрасывания ее к стенкам лабиринта под действием центробежной силы, возникающей при вращении якоря.

Устройство для охлаждения электрических машин. В большинстве электрических машин для охлаждения нагретых частей (сердечника и обмотки якоря, коллектора и полюсов) на валу якоря устанавливают вентилятор. Такой способ охлаждения электрических машин называется самовентиляцией, а машины этого типа — *машинами с самовентиляцией*. Тяговые двигатели электропоездов и вспомогательные машины, установленные на электровозах и тепловозах, являются машинами с самовентиляцией. В этих машинах засасываемый воздух поступает внутрь машины обычно со стороны коллектора и распределяется на два параллельных потока (рис. 91, а). Один из таких потоков омывает поверхность коллектора, катушки полюсов и пространство между полюсами и якорем. Другой поток проходит под коллектором и по вентиляционным каналам внутри сердечника якоря. Нагретый воздух выбрасывается через отверстия, имеющиеся в остовае и подшипниковом щите со стороны, противоположной коллектору, или же через специальный патрубок, прикрепленный к остову машины.

В тяговых двигателях электровозов и тепловозов для улучшения охлаждения воздух в машину нагнетают извне вентилятором (рис. 91, б), приводимым во вращение отдельным электродвигателем (мотор-вентилятором). Такие машины называются *машинами с неза-*

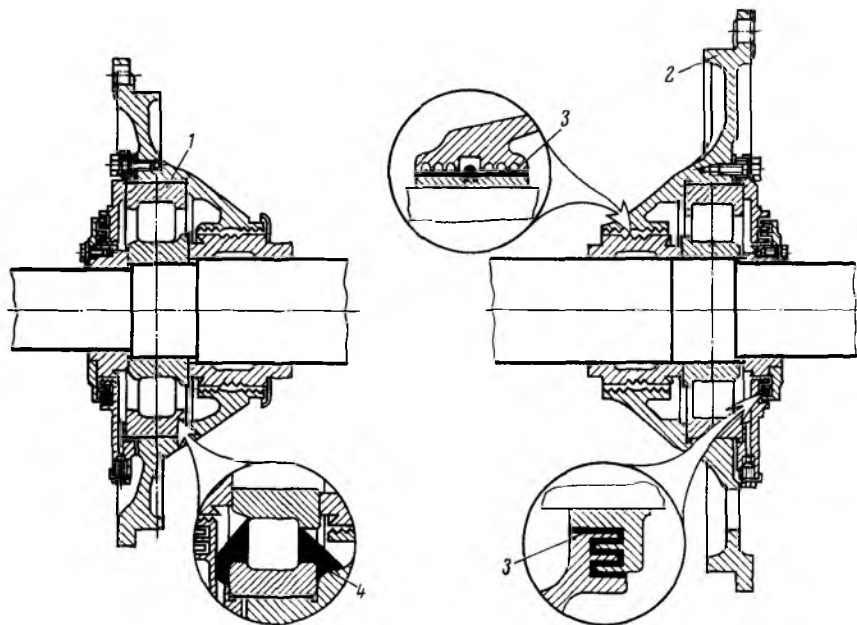


Рис. 90. Установка роликовых подшипников в тяговых двигателях:

1 — подшипник; 2 — подшипниковый щит; 3 — лабиринтовое уплотнение; 4 — смазка

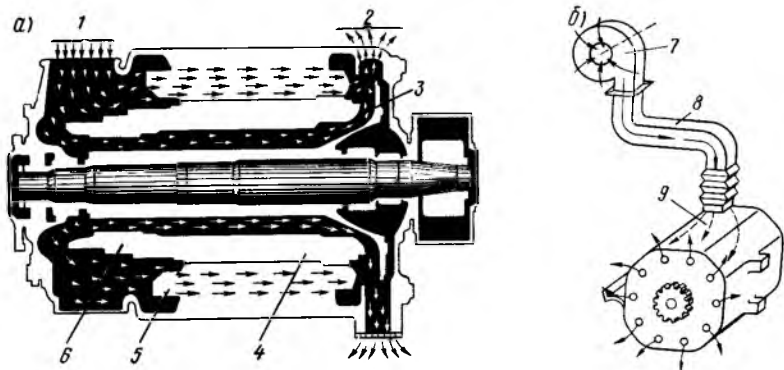


Рис. 91. Схемы прохождения охлаждающего воздуха в машинах с самовентиляцией (а) и независимой вентиляцией (б):

1 — вход воздуха; 2 — выход воздуха; 3 — вентилятор; 4 — сердечник якоря; 5 — полюсы; 6 — коллектор; 7 — внешний вентилятор; 8 — воздухопровод; 9 — тяговый двигатель

висимой вентиляцией. При такой вентиляции воздух распределяется внутри машины двумя параллельными потоками, как и при самовентиляции.

Охлаждение оказывает большое влияние на работу электрических машин. Мощность, которую можно получить от электрической машины, ограничена предельной температурой, которую может выдержать изоляция ее обмоток. Поэтому при интенсивном охлаждении значительно снижается нагрев обмотки, что позволяет повысить мощность, которую может отдать машина.

§ 28. Обмотки якоря

Принцип соединения отдельных проводников в обмотку. В современных машинах постоянного тока применяют барабанные якоря, в которых проводники обмотки укладываются в пазы на наружной поверхности цилиндрического якоря.

При выполнении обмотки проводники, расположенные в пазах якоря, следует соединять таким образом, чтобы э. д. с. в них складывалась. Для этого два проводника, образующие виток обмотки, должны соединяться так, как указано на рис. 92, а, т. е. проводник А, расположенный под северным полюсом, должен соединяться с проводником Б, расположенным под южным полюсом. Расстояние между проводниками, составляющими виток, должно быть равно или незначительно отличаться от полюсного деления τ — расстояния между осями соседних полюсов. При этом условии виток будет охватывать весь магнитный поток полюса и э. д. с., возникающая в нем при вращении якоря, будет иметь наибольшее значение.

Для наглядного изображения обмоток цилиндрическую поверхность якоря вместе с обмоткой разворачивают в плоскость и все

соединения проводников изображают в виде прямых линий на плоскости чертежа (рис. 92, б).

Обмотка якоря состоит из отдельных секций. *Секцией* называют часть обмотки, расположенную между двумя коллекторными пластинами, следующими одна за другой по ходу обмотки. Число секций S в обмотке равно числу коллекторных пластин K . Секция может состоять из одного или нескольких последовательно соединенных витков. В первом случае секции называют *одновитковыми* (рис. 93, а, см. рис. 85, б), во втором — *многовитковыми* (рис. 93, б, см. рис. 85, а). Одновитковые секции состоят из двух *активных проводников*, которые непосредственно пересекают магнитный поток; активные проводники расположены в пазах якоря и соединяются *лобовыми частями*, лежащими вне сердечника якоря. Лобовые части в индуцировании э. д. с. практически не участвуют. Многовитковые секции состоят из двух активных сторон, каждая из которых объединяет несколько активных проводников. В некоторых машинах большой мощности применяют якорные катушки, выполненные из разрезных секций (см. рис. 85, в). Обмотка якоря, состоящая из таких секций, называется *стержневой*.

В ряде случаев по конструктивным соображениям и для уменьшения потерь мощности в обмотке якоря при изготовлении секций вместо одного сплошного проводника требуемого поперечного сечения берут несколько проводников меньшего сечения. Эти проводники обычно располагают в пазу друг над другом и присоединяют к одним и тем же коллекторным пластинам. Все секции обмотки обычно имеют одинаковое число витков. На схемах обмотки секции для простоты всегда изображают одновитковыми. Секцию обмотки укладывают в пазы таким образом, чтобы одна из ее активных сторон находилась в верхнем слое, а другая — в нижнем. На схемах стороны секции, расположенные в верхнем слое, изображают сплошными линиями, а в нижнем слое — штриховыми.

При объединении нескольких секций в якорную катушку каждую из сторон якорной катушки в большинстве случаев укладывают в один общий паз. Для того чтобы э. д. с., индуцированные в отдельных секциях, складывались, при соединении их руководствуются тем же правилом, что и при соединении проводников в витки: расстояние между соединяемыми частями секций должно быть приблизительно равно расстоянию между осями полюсов.

Обмотки якоря подразделяются на две основные группы: *петлевые (параллельные)* и *волновые (последовательные)*.

Простая волновая обмотка. При простой волновой обмотке секции, лежащие под разными полюсами, соединяют последовательно (рис. 94). При этом после одного обхода окружности якоря, т. е. после последовательного соединения p секций приходят к коллекторной пластине, расположенной рядом с исходной. Например, начало секции 1 присоединяют к коллекторной пластине K_{PI} , а ее конец соединяют с коллекторной пластиной K_{P10} и началом секции 2, которая расположена под следующей парой полюсов; затем конец секции 2 соединяют с другой коллекторной пластиной и с началом

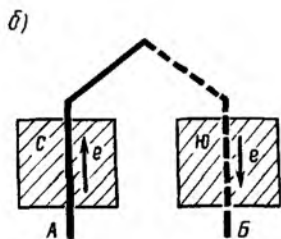
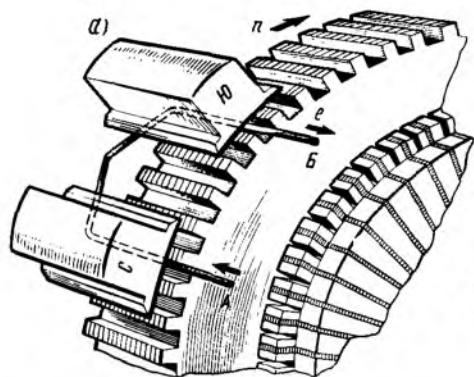


Рис. 92. Принцип выполнения обмотки барабанного якоря

Рис. 93. Схемы одновитковой (а) и многовитковой (б) секций:

1 — активные проводники; 2 — лобовая часть; 3 — активная сторона; 4 — коллекторные пластины

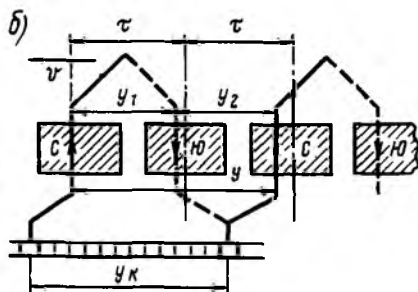
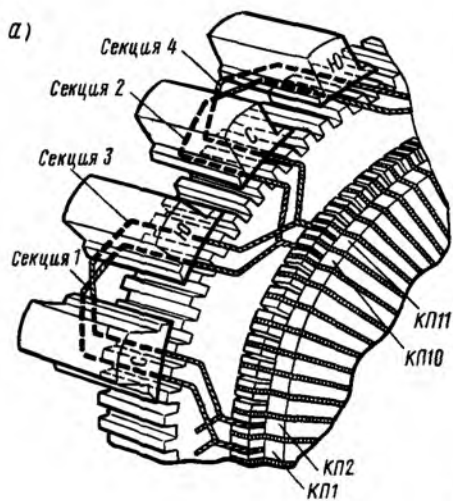
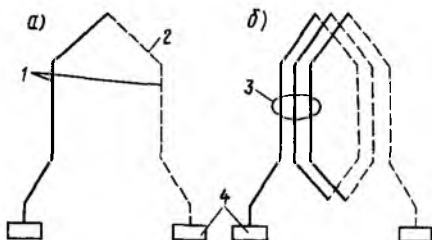


Рис. 94. Общий вид волновой обмотки (а) и схема соединения ее секций (б)

следующей секции. После завершения полного обхода окружности якоря конец соответствующей секции соединяют с коллекторной пластиной *КП2* и началом секции 3, затем таким же образом с коллекторной пластиной *КП11* и секцией 4 и т. д. до тех пор, пока обмотка не замкнется, т. е. пока не придут к началу секции 1. Якорная катушка в волновой обмотке имеет форму волны (рис. 95, *а*), откуда получила это название.

Для выполнения обмотки необходимо знать ее результирующий шаг *y* (см. рис. 94, *б*), первый *y*₁ и второй *y*₂ частичные шаги, а также шаг по коллектору *y*_к. Указанные шаги обычно выражают в числе пройденных секций (шаг по коллектору выражается в этих же единицах, так как число коллекторных пластин равно числу секций).

В простой волновой обмотке число параллельных ветвей обмотки 2а всегда равно двум и не зависит от числа полюсов:

$$\boxed{2a = 2.} \quad (56)$$

На рис. 96, *а* приведена в качестве примера развернутая в плоскость схема простой волновой обмотки якоря четырехполюсной машины, имеющей 19 секций, а на рис. 96, *б* — эквивалентная схема этой обмотки, показывающая последовательность соединения ее секций и образующиеся параллельные ветви. Цифрами 1, 2, 3 и т. д. обозначены активные проводники, лежащие в верхнем слое каждого паза, а 1', 2', 3' и т. д. — в нижнем слое. При волновой обмотке в машине можно устанавливать только два щеточных пальца. Однако это делают лишь в машинах малой мощности; в более мощных машинах обычно ставят полный комплект (2*p*) щеточных пальцев для уменьшения плотности тока под щетками и улучшения токо-съема.

Простая петлевая обмотка. При простой петлевой обмотке каждую секцию присоединяют к соседним коллекторным пластинам (рис. 97). Например, начало 1-й секции присоединяют к коллекторной пластине *КП1*, а конец ее соединяют с соседней коллекторной пластиной *КП2* и началом рядом лежащей 2-й секции. Далее

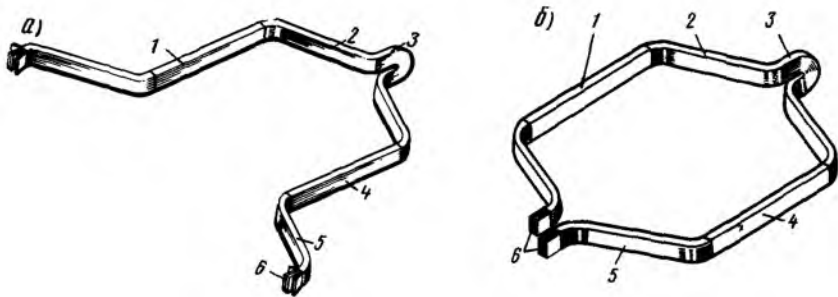


Рис. 95. Форма якорных катушек при волновой (*а*) и петлевой (*б*) обмотках: 1, 4 — пазовые части (верхняя и нижняя стороны); 2, 5 — задняя и передняя лобовые части; 3 — задняя головка; 6 — концы секций, припаиваемые к коллектору

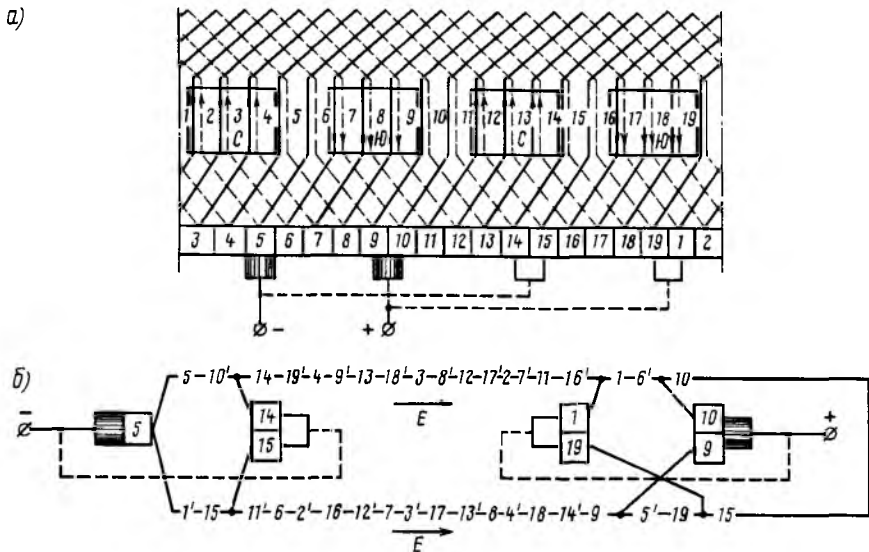


Рис. 96. Схемы простой волновой обмотки четырехполюсной машины

конец 2-й секции присоединяют к следующей коллекторной пластине и к началу соседней секции и т. д. до тех пор, пока обмотка не замкнется, т. е. пока не придут к началу 1-й секции. В этой обмотке каждая последующая секция расположена рядом с предыдущей, а якорная катушка имеет форму петли (рис. 95, б), откуда получила название обмотка.

В простой петлевой обмотке секции, расположенные под каждой парой полюсов, образуют две параллельные ветви, поэтому число параллельных ветвей по всей обмотке $2a$ равно числу полюсов $2p$:

$$2a = 2p.$$

$$(56')$$

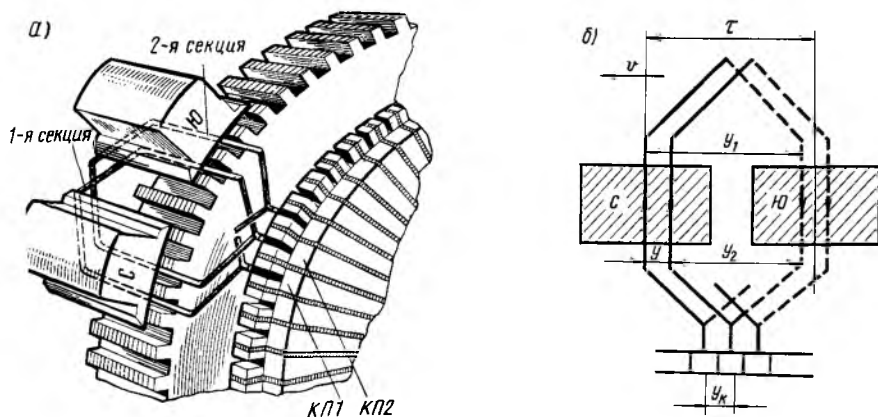


Рис. 97. Общий вид петлевой обмотки (а) и схема соединения ее секций (б)

Условие $2a = 2r$ выражает основное свойство простой петлевой обмотки: *чем больше число полюсов, тем больше параллельных ветвей имеет обмотка*, следовательно, тем больше щеточных пальцев должно быть в машине. На рис. 98, *a* приведена в качестве примера развернутая в плоскость схема простой петлевой обмотки якоря четырехполюсной машины, имеющей 24 секции, а на рис. 98, *б* — эквивалентная схема этой обмотки, показывающая последовательность соединения ее секций и образующиеся параллельные ветви (обозначение проводников и коллекторных пластин такое же, как и на рис. 96).

Применение петлевой и волновой обмоток. Каждая из обмоток — петлевая и волновая — имеет свои преимущества. При одном и том же числе проводников в обмотке якоря и числе полюсов простая петлевая обмотка будет иметь в p раз больше параллельных ветвей, чем волновая. Следовательно, она может пропускать значительно больший ток $I_{\text{я}} = 2ai_{\text{я}}$, чем волновая обмотка (здесь $i_{\text{я}}$ — ток в параллельной ветви) (рис. 99). Число же витков в каждой параллельной ветви при петлевой обмотке в p раз меньше, чем при волновой. Так как напряжение машины определяется числом последовательно включенных витков в каждой параллельной ветви, то в машине с петлевой обмоткой напряжение будет в p раз меньше, чем с волновой обмоткой.

Из сказанного следует, что *в машинах, рассчитанных для работы при высоких напряжениях, целесообразно применять волновую обмотку*. Такая обмотка имеется у большей части вспомогательных машин электровозов и электропоездов, которые рассчитаны для работы при напряжении 1500—3000 В, и у некоторых тяговых двигателей электропоездов. *В машинах, рассчитанных для работы при больших токах, целесообразно применять петлевую обмотку*. Такую обмотку имеет тяговые двигатели электровозов и тепловозов, а также электровозные генераторы возбуждения, используемые при рекуперации. Машины постоянного тока небольшой мощности обычно выполняют двухполюсными. При двух полюсах петлевая и волновая обмотки не различаются.

Уравнительные соединения. В простой петлевой обмотке э. д. с., индуцированная в каждой параллельной ветви, создается магнитным потоком определенной пары полюсов. Э. д. с. E , индуцированные во всех параллельных ветвях обмотки, теоретически должны быть равны (рис. 100, *a*). Однако практически из-за технологических допусков в значении воздушного зазора под различными полюсами, дефектов литья в остове и других причин магнитные потоки отдельных полюсов несколько различаются, вследствие чего в параллельных ветвях действуют неодинаковые э. д. с.

Если два параллельно соединенных источника имеют неодинаковые э. д. с. (рис. 101), то по контуру, образованному двумя источниками, будет проходить некоторый дополнительный ток, обусловленный разностью э. д. с. $E_1 - E_2$ источников. Этот ток носит название *уравнительного*. Уравнительный ток $I_{\text{ур}}$ циркулирует внутри источников, не совершает никакой полезной работы, а создает лишь

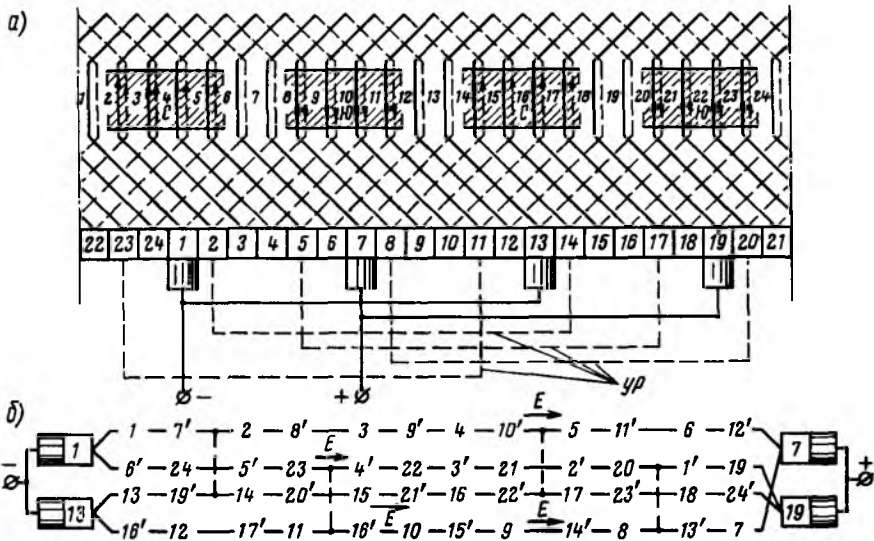


Рис. 98. Схемы петлевой обмотки четырехполюсной машины ($УР$ — уравнивательные соединения)

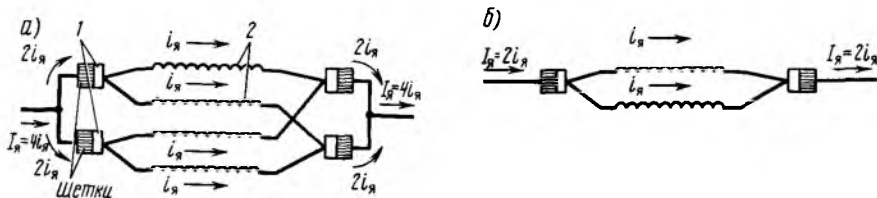


Рис. 99. Схемы параллельных ветвей в четырехполюсной машине при петлевой (а) и волновой (б) обмотках:

1 — коллекторные пластины; 2 — секции обмотки

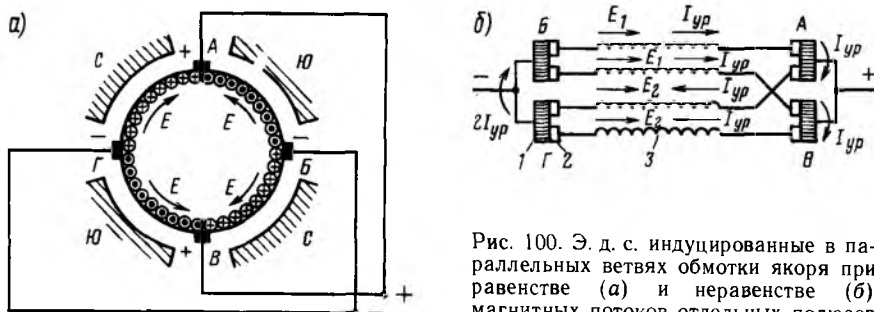


Рис. 100. Э. д. с. индуцированные в параллельных ветвях обмотки якоря при равенстве (а) и неравенстве (б) магнитных потоков отдельных полюсов

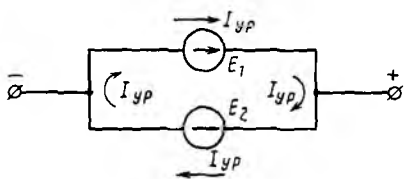


Рис. 101. Возникновение уравнильного тока при неравенстве э. д. с. двух источников

будут перегружать щетки и ухудшать работу машин. Например, при неравенстве э. д. с. E_1 и E_2 в параллельных ветвях обмотки якоря \mathcal{Z} (рис. 100, б) по обмотке и через щетки I ($A - \Gamma$) будет проходить уравнильный ток $I_{ур}$. Разница между э. д. с. E_1 и E_2 составляет 3—5 %, но из-за небольшого сопротивления обмотки якоря этого оказывается достаточно, чтобы по параллельным ветвям проходили довольно значительные уравнильные токи, которые способствуют возникновению искрения под щетками. Чтобы уравнильные токи замыкались помимо щеток, в петлевых обмотках предусматривают *уравнильные соединения*, которые соединяют точки обмотки, имеющие теоретически равные потенциалы. Такими точками являются начала и концы проводников обмотки якоря, расположенные один от другого на расстоянии, равном двойному полюсному делению 2τ . Идеальным было бы соединить все такие точки обмотки. Однако большое число уравнильных соединений сильно удорожает обмотку, поэтому практически достаточно иметь одно-два уравнильных соединения на каждую группу секций, лежащих в одном пазу якоря.

С производственной точки зрения уравнильные соединения удобно присоединять к коллекторным пластинам 2 (см. рис. 100, б). Обычно они связывают каждую третью — пятую пластины коллектора (рис. 102). Площадь поперечного сечения проводов, которыми выполняют уравнильные соединения, в 3—5 раз меньше площади поперечного сечения проводников обмотки якоря. Уравнильные соединения располагают чаще всего под лобовыми частями обмотки якоря рядом с коллектором, в этом случае они находятся вне магнитного поля главных полюсов и в них не индуцируется э. д. с.

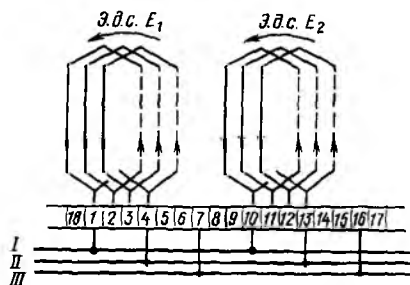


Рис. 102. Схема выполнения уравнильных соединений I, II, III в петлевой обмотке

потери электрической энергии в обоих источниках. Он вызывает *неравномерную нагрузку отдельных источников, перегружая источник с большей э. д. с. и разгружая источник с меньшей э. д. с.*

В машинах постоянного тока при неравенстве э. д. с. в отдельных параллельных ветвях возникающие уравнильные токи будут перегружать щетки и ухудшать работу машин. Например, при неравенстве э. д. с. E_1 и E_2 в параллельных ветвях обмотки якоря \mathcal{Z} (рис. 100, б) по обмотке и через щетки I ($A - \Gamma$) будет проходить уравнильный ток $I_{ур}$. Разница между э. д. с. E_1 и E_2 составляет 3—5 %, но из-за небольшого сопротивления обмотки якоря этого оказывается достаточно, чтобы по параллельным ветвям проходили довольно значительные уравнильные токи, которые способствуют возникновению искрения под щетками. Чтобы уравнильные токи замыкались помимо щеток, в петлевых обмотках предусматривают *уравнильные соединения*, которые соединяют точки обмотки, имеющие теоретически равные потенциалы. Такими точками являются начала и концы проводников обмотки якоря, расположенные один от другого на расстоянии, равном двойному полюсному делению 2τ . Идеальным было бы соединить все такие точки обмотки. Однако большое число уравнильных соединений сильно удорожает обмотку, поэтому практически достаточно иметь одно-два уравнильных соединения на каждую группу секций, лежащих в одном пазу якоря.

Сложные обмотки. При мощности машины более 1000 кВт применяют сложные многоходовые обмотки якоря, представляющие собой несколько простых петлевых или волновых обмоток, намотанных на общий якорь, смещенных относительно друг друга и

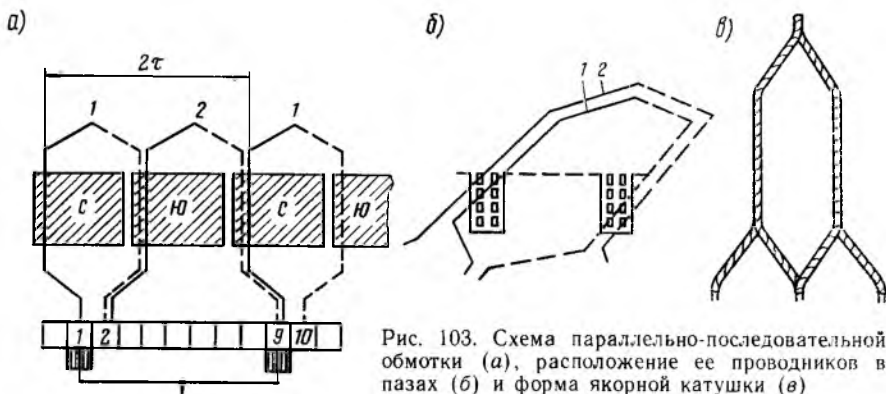


Рис. 103. Схема параллельно-последовательной обмотки (а), расположение ее проводников в пазах (б) и форма якорной катушки (в)

присоединенных к одному коллектору. Применение многоходовых обмоток позволяет увеличивать число параллельных ветвей при неизменном числе полюсов, увеличение которых в ряде случаев невозможно. Однако эти обмотки требуют сложных уравнильных соединений.

Одной из разновидностей сложных обмоток является *параллельно-последовательная* обмотка, применяемая в некоторых тяговых генераторах. Она представляет собой комбинацию простой петлевой 1 (рис. 103, а) и многоходовой волновой 2 обмоток. Обе обмотки уложены в одни и те же пазы и имеют общие коллекторные пластины. Для равенства э. д. с. параллельных ветвей, образуемых петлевой и волновой обмотками, число параллельных ветвей этих обмоток должно быть одинаково.

Параллельно-последовательную обмотку выполняют в четыре слоя (рис. 103, б), так как в пазы якоря закладывают две двухслойные обмотки. Эта обмотка получила название «лягушачья» из-за формы свой якорной катушки (рис. 103, в). Рассматриваемая обмотка не требует уравнильных соединений, что выгодно отличает ее от других обмоток. Возможность уменьшения напряжения, действующего между соседними коллекторными пластинами, вдвое по сравнению с простыми обмотками является важным преимуществом параллельно-последовательной обмотки.

§ 29. Реакция якоря

Физическая сущность реакции якоря. При холостом ходе магнитный поток в машине создается только магнитодвижущей силой обмотки возбуждения 1 (рис. 104). В этом случае магнитный поток возбуждения Φ_v , пронизывающий якорь 2, распределяется симметрично относительно продольной оси. Поток возбуждения направлен по продольной оси полюсов, поэтому магнитное поле возбуждения называют *продольным* (рис. 105, а).

При работе машины под нагрузкой по обмотке якоря проходит

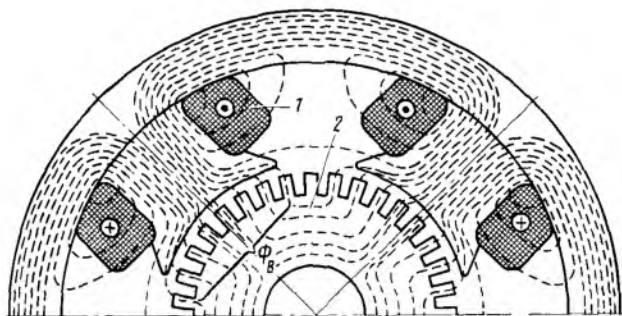


Рис. 104. Магнитное поле машины постоянного тока в режиме холостого хода

ток, который создает свое магнитное поле. *Воздействие поля якоря на магнитное поле машины называют реакцией якоря.* Магнитный поток $\Phi_{\text{я}}$, созданный током якоря, в двухполюсной машине при установке щеток на геометрической нейтрали направлен по поперечной оси машины (рис. 105, б), поэтому магнитное поле якоря называют *поперечным*.

В результате действия потока якоря $\Phi_{\text{я}}$ симметричное распределение магнитного поля машины искажается и результирующий поток $\Phi_{\text{рез}}$ оказывается сосредоточенным в основном у краев главных полюсов (рис. 105, в). Рис. 106 поясняет распределение магнитного поля машины вдоль окружности якоря (кривые распределения индукции).

Вредные последствия реакции якоря. 1. Физическая нейтраль $б — б$ (линия, соединяющая точки окружности якоря, в которых индукция равна нулю) смещается относительно геометрической нейтрали $а — а$ на некоторый угол β (см. рис. 105, в и 106, в). *В генераторах физическая нейтраль смещается по направлению вращения якоря, в двигателях — против направления вращения.* Как будет показано далее, это ухудшает коммутацию машины, т. е. способствует возникновению искрения под щетками.

2. Результирующий магнитный поток машины $\Phi_{\text{рез}}$ при насыщении магнитной цепи уменьшается, т. е. уменьшается и э. д. с. E , индуцированная при нагрузке, по сравнению с э. д. с. E_0 при холостом ходе.

3. В кривой распределения результирующей индукции в воздушном зазоре (см. рис. 106, в) возникают пики индукции B_{max} под краями главных полюсов, способствующие образованию в машине кругового огня.

Размагничивающее действие реакции якоря. Поток якоря $\Phi_{\text{я}}$ усиливает результирующий магнитный поток под одной половиной полюса и ослабляет его под другой половиной (см. рис. 105, в). Однако благодаря насыщению магнитной цепи машины увеличение потока под одной половиной полюса оказывается меньшим, чем ослабление потока под другой его половиной,

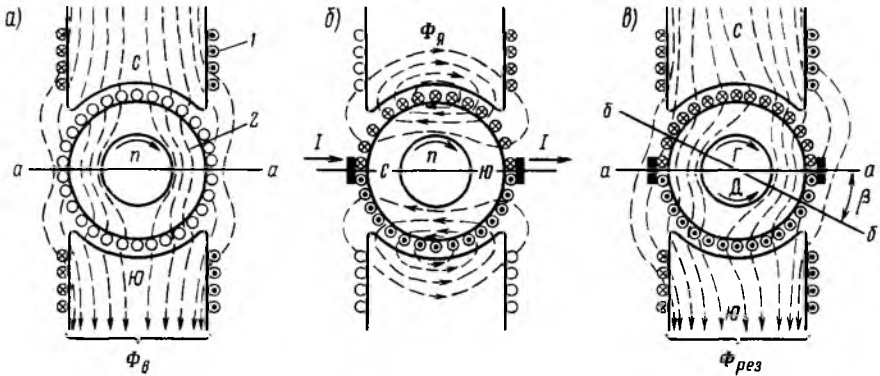


Рис. 105. Магнитное поле машины постоянного тока:

a — от обмотки возбуждения; b — от обмотки якоря; $в$ — результирующее; 1 — обмотка возбуждения; 2 — якорь

вследствие чего общий поток машины уменьшается. Это наглядно видно на магнитной характеристике магнитной цепи машины (рис. 107), на которой показаны потоки под «правой» и под «левой» половинами полюса $\Phi_{пр}$ и $\Phi_{лев}$ и их приращение $\Delta\Phi_{пр}$ и $\Delta\Phi_{лев}$, обусловленные действием реакции якоря.

Поток $\Phi_{пр}$ создается совместным действием м. д. с. возбуждения F_v и м. д. с. якоря $F_я$, направленных согласно, т. е. $F_v + F_я$, по-

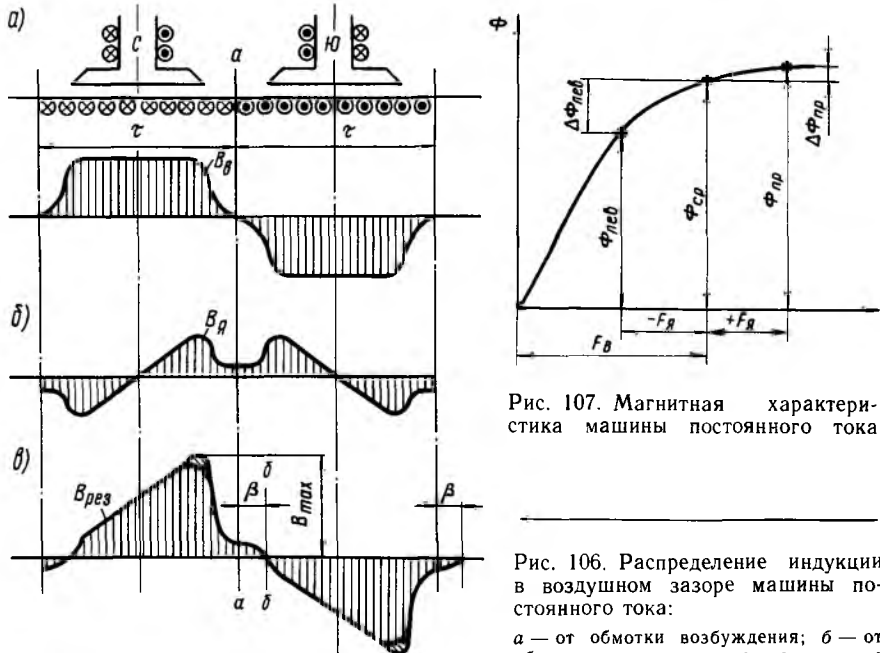


Рис. 107. Магнитная характеристика машины постоянного тока

Рис. 106. Распределение индукции в воздушном зазоре машины постоянного тока:

a — от обмотки возбуждения; b — от обмотки якоря; $в$ — результирующее

ток $\Phi_{лев}$ — действием этих м. д. с., направленных встречно, т. е. $F_B - F_A$. Поэтому в данном случае $\Delta\Phi_{пр} < \Phi_{лев}$.

При холостом ходе, когда м. д. с. $F_A = 0$, потоки $\Phi_{пр}$ и $\Phi_{лев}$ будут равны.

Хотя уменьшение магнитного потока под действием м. д. с. якоря обычно невелико и составляет всего 1—3 %, это существенно сказывается на характеристиках генераторов постоянного тока и приводит к уменьшению э. д. с. E машины при нагрузке по сравнению с э. д. с. E_0 при холостом ходе.

Круговой огонь на коллекторе. Круговым огнем называют мощную электрическую дугу, возникающую в некоторых случаях на коллекторе машин постоянного тока. Эта дуга замыкает накоротко всю или значительную часть обмотки якоря (рис. 108, а), вследствие чего резко возрастает ток машины. Круговой огонь является крупной аварией. Образовавшаяся дуга сильно повреждает коллекторные пластины, изоляторы щеткодержателей и изоляцию лобовых частей машины, выводя ее из строя. В тяговых двигателях дуга часто перебрасывается на ближайшие заземленные части машины — корпус и наконечник главного полюса (рис. 108, б), вызывая также тяжелые повреждения. Появление такой дуги называют вспышкой на коллекторе электрической машины.

Причинами возникновения кругового огня могут быть вытягивание дуги из-под щетки или образование дуги между соседними коллекторными пластинами из-за замыкания их осколками щеток или щеточной пылью. Однако для того, чтобы эти причины могли вызвать круговой огонь, вдоль коллектора должно действовать сильное электрическое поле.

Электрическое поле, действующее вдоль окружности коллектора, определяется напряжением между положительными и отрицательными щетками. Интенсивность его в пространстве, прилегающем к коллектору, зависит от распределения напряжений u_k между смежными коллекторными пластинами. Чем больше это напряжение, тем интенсивнее электрическое поле в данном месте и тем больше его напряженность. Напряжение u_k между смежными коллекторными пластинами практически равно э. д. с. e_c , индуцированной в одной

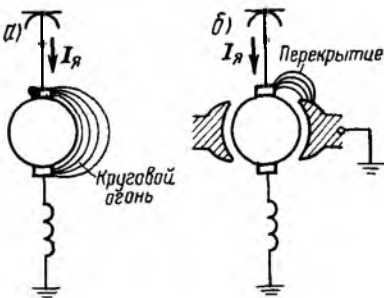


Рис. 108. Образование кругового огня на коллекторе

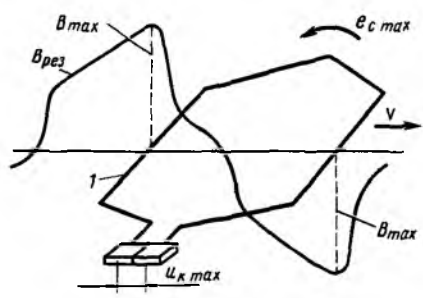


Рис. 109. Возникновение напряжения u_k max



Рис. 110. Схема образования кругового огня при замыкании коллекторных пластин посторонними частицами:

1 — замыкание; 2 — посторонняя частица; 3 — наволакивание меди; 4 — щеточная пыль; 5 — прогоревший миканит; 6 — первичная дуга; 7 — газы и пары меди; 8 — мощная дуга

секции обмотки якоря, которая согласно закону электромагнитной индукции пропорциональна индукции в воздушном зазоре машины.

При перемещении секций 1 (рис. 109) обмотки якоря они проходят под краями полюсов, где результирующая индукция в воздушном зазоре $B_{рез}$ достигает максимального значения B_{max} . При этом напряжении между смежными коллекторными пластинами также будет максимальным $u_{кmax}$. Увеличение $u_{кmax}$ свыше 36—40 В для машин большой мощности, какими являются тяговые двигатели и тяговые генераторы, недопустимо, так как это приводит к возникновению кругового огня на коллекторе. Следовательно, реакция якоря, создавая пики индукции B_{max} под краями полюсов и увеличивая этим напряжение $u_{кmax}$ способствует возникновению в машине кругового огня. Чем больше ток якоря и максимальная индукция $B_{я}$ по отношению к индукции $B_{в}$, тем больше неравномерность распределения индукции вдоль окружности якоря и тем больше «склонность» машины к круговому огню. По этой причине при работе тяговых двигателей в режиме ослабления возбуждения, когда индукция $B_{в}$ уменьшается, а ток якоря и индукция $B_{я}$ возрастают, увеличивается опасность кругового огня. То же имеет место и при боксовании колесных пар, при этом возрастает напряжение на коллекторе двигателя, связанного с боксующей колесной парой, что приводит к увеличению напряжения $u_{к}$.

Круговой огонь на коллекторе обычно развивается из небольших дуг, возникающих между соседними коллекторными пластинами А, Б в результате замыкания их накоротко посторонней частицей 2 (угольной пылью, осколками щеток) (рис. 110, а), а у тепловозных генераторов также частицами дизельного топлива и масла, попадающими на коллектор вместе с охлаждающим воздухом. Замыканию коллекторных пластин угольной пылью способствует плохой уход за коллектором, некачественная его шлифовка, наволакивание меди 3 в верхней части пластин (медь под действием силы трения и нагрева коллектора и щеток сползает в сторону, обратную вращению якоря) (рис. 110, б) и пр. Через электропроводящие мостики, образованные этими посторонними частицами, проходит ток, и мостик сгорает; если при этом между соседними пластинами имеется достаточно большое напряжение $u_{к}$, то между ними возникает первичная дуга б (рис. 110, в). В результате горения первичной

дуги пространство, прилегающее к коллектору, заполняется раскаленными газами и парами меди, т. е. становится ионизированным. Поэтому может легко произойти его пробой с образованием мощной электрической дуги δ , охватывающей ряд коллекторных пластин (рис. 110, з).

Сильное искрение щеток также способствует возникновению кругового огня. В этом случае резко увеличивается износ щеток, поверхность коллектора загрязняется щеточной пылью и возрастает вероятность попадания этой пыли и осколков щеток между коллекторными пластинами. Поэтому в машинах с большим значением напряжения u_k опасность появления кругового огня в значительной мере зависит от состояния коллектора. При сильном искрении может произойти вытягивание дуги из-под щетки в направлении вращения коллектора. Если такая дуга доходит до места на коллекторе, где напряжение u_k достигает 36—40 В, то она не гаснет, а продолжает гореть, вследствие чего дуги между отдельными пластинами быстро сливаются в сплошную дугу.

Устранение вредных последствий реакции якоря. «Склонность» машины к круговому огню, вызванную увеличением индукции под краями полюсных наконечников, устраняют, применяя компенсационную обмотку (рис. 111). Ею снабжают крупные машины постоянного тока, в частности генераторы тепловозов и тяговые двигатели мощных электровозов переменного и постоянного тока. *Компенсационную обмотку включают таким образом, чтобы поток Φ_k , создаваемый ею, был направлен, против потока якоря Φ_a . При условии равенства м. д. с. этих обмоток $F_k = F_a$ происходит полная компенсация поперечного потока якоря и устраняются все вызываемые им вредные последствия.* Компенсационную обмотку включают последовательно с обмоткой якоря, что обеспечивает компенсацию потока якоря при любой нагрузке машины. При увеличении тока якоря возрастает поток якоря Φ_a , но одновременно увеличивается и поток компенсационной обмотки, вследствие чего результирующий поперечный поток машины $\Phi_n = \Phi_a - \Phi_k = 0$.

В машинах без компенсационной обмотки для предотвращения сильного увеличения индукции под краями полюсных наконечников

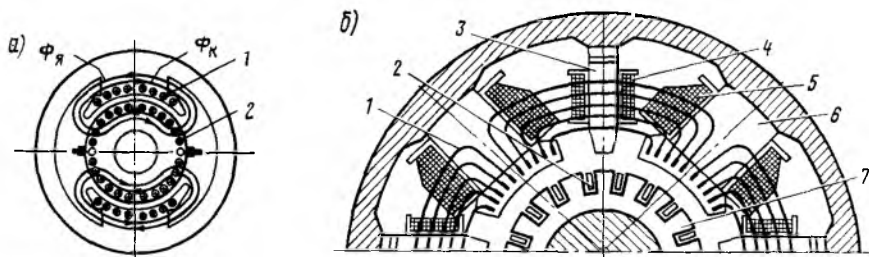


Рис. 111. Схема компенсации потока якоря (а) и расположение компенсационной обмотки на главных полюсах (б):

1 — компенсационная обмотка; 2 — обмотка якоря; 3 — добавочный полюс; 4 — обмотка добавочного полюса; 5 — обмотка возбуждения; 6 — главный полюс; 7 — якорь

искусственно увеличивают магнитное сопротивление в указанных местах. Для этого делают больше воздушный зазор под краями полюсных наконечников, внутреннюю поверхность которых располагают эксцентрично относительно наружной поверхности якоря. Так как магнитный поток стремится пройти по пути с наименьшим магнитным сопротивлением, то большая часть потока полюса проходит в этом случае в якорь через среднюю часть полюса, а потоки, проходящие через края полюсных наконечников, будут минимальными.

§ 30. Коммутация

Под коммутацией в широком смысле слова понимают все явления и процессы, возникающие под щетками при работе коллекторных электрических машин. Если щетки искрят, то говорят, что машина имеет плохую коммутацию; если искрение отсутствует, то коммутацию называют хорошей. Качество коммутации в значительной степени определяет работоспособность машины и ее надежность в эксплуатации.

Причины искрения щеток. Искрение может вызываться большим количеством причин; обычно их разбивают на две группы: механические и электромагнитные. Механическими причинами являются биение коллектора, его эллиптичность, шероховатость, наличие выступающих коллекторных пластин и изоляционных прокладок, вибрация щеткодержателей и т. д. Все эти причины приводят к вибрации щеток, в связи с чем возможны кратковременный разрыв контакта между щеткой и коллектором и возникновение кратковременной электрической дуги. Особенно трудно обеспечить отсутствие вибрации щеток при больших окружных скоростях коллектора (50 м/с и выше).

Электромагнитные причины приводят к тому, что даже при идеальном состоянии щеточного контакта при выходе коллекторной пластины из-под щетки разрывается ток и возникает короткая электрическая дуга, повреждающая сбегавшие части щетки и коллекторных пластин. Искрение, вызванное электромагнитными причинами, повреждает поверхность коллектора и, как следствие, приводит к вибрации щеток, т. е. способствует возникновению искрения из-за механических причин. Неустойчивость же щеточного контакта оказывает существенное влияние на электромагнитные процессы в секциях, переходящих из одной параллельной ветви обмотки якоря в другую. Поэтому, как правило, искрение щеток на коллекторе вызывается совместным действием многих причин.

Качество коммутации оценивается степенью искрения (классом коммутации) под сбегавшим краем щетки, из-под которого выходят пластины коллектора при его вращении. Допускаемые степени искрения согласно Государственному стандарту приведены в табл. 3.

Физическая сущность процесса коммутации. Как было установлено в § 28, щетки разделяют обмотку якоря на несколько параллельных ветвей. При вращении якоря каждая секция его обмотки

Степень искрения	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения (темная коммутация)	—
1 ^{1/4}	Слабое точечное искрение под небольшой частью	Отсутствие почернения на коллекторе и следов нагара на щетках
1 ^{1/2}	Слабое искрение под большей частью щетки	Появление следов почернения на коллекторе и следов нагара на щетках, легко устранимых протиранием поверхности коллектора бензином
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузках	Появление следов почернения на коллекторе и следов нагара на щетках, не устранимых протиранием поверхности коллектора бензином
3	Значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных и вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, не устранимое протиранием коллектора бензином, а также подгар и частичное разрушение щеток

переходит из одной параллельной ветви в другую, что сопровождается резким изменением направления тока в секции и замыканием этой секции накоротко щетками. *Процесс переключения секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую и изменения направления в них тока называется процессом коммутации.*

Предположим, что в какой-либо момент секция 1 (рис. 112, а) находится в нижней параллельной ветви, при этом ток ветви i_a протекает по секции в направлении от ее начала H к концу K (для простоты принимаем, что щетки скользят не по коллектору, а непосредственно по виткам обмотки якоря). Через некоторое время якорь повернется и секция 1 окажется в верхней параллельной ветви (рис. 112, б). При этом ток i_a будет уже проходить по секции в обратном направлении, т. е. от ее конца K к началу H .

Большую часть времени, соответствующую одному обороту якоря, ток секции равен току параллельной ветви i_a . Однако поскольку секция, перемещаясь под полюсами, попадает то в одну, то в другую параллельную ветвь, направление тока в ней периодически меняется (рис. 112, в). Изменение направления тока в секции происходит за период времени, в течение которого соединенные с секцией коллекторные пластины соприкасаются со щеткой. Это время называется *периодом коммутации* T_k . Секция начинает коммутироваться в момент, когда коллекторные пластины, между которыми подключена секция, перекрываются набегающим краем щетки; заканчивается же процесс коммутации этой секции в момент выхода указанных коллекторных пластин из-под противоположного (сбегающего) края щетки.

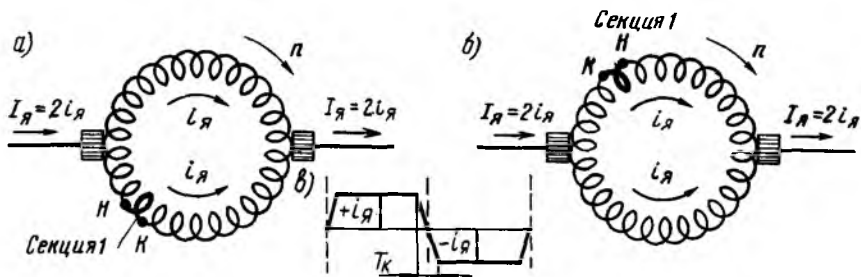


Рис. 112. Переход секции обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую (а и б) и кривая изменения тока в секции (в)

Рассмотрим более подробно процесс коммутации в какой-либо секции обмотки якоря двухполюсной машины при различных положениях щетки относительно коллекторных пластин. При этом ради простоты будем считать, что ширина щетки равна ширине коллекторной пластины. В начальный момент коммутации (рис. 113, а) щетка перекрывает коллекторную пластину 1, и ток в обмотке якоря $I_я = 2i_я$, пройдя щетку и коллекторную пластину, разветвляется на две ветви, при этом по каждой параллельной ветви (правой и левой) протекают токи $i_я$. При вращении якоря коллекторные пластины сдвигаются относительно щетки, и через некоторое время щетка начинает перекрывать обе коллекторные пластины 1 и 2, замыкая накоротко коммутируемую секцию 1—4, обозначенную жирной линией (рис. 113, б). При этом через коммутируемую секцию будет протекать некоторый ток i , в обеих же параллельных ветвях будут проходить токи $i_я$. Поэтому через набегающую коллекторную пластину 1 будет проходить ток $i_1 = i_я + i$, а через сбегающую пластину 2 — ток $i_2 = i_я - i$.

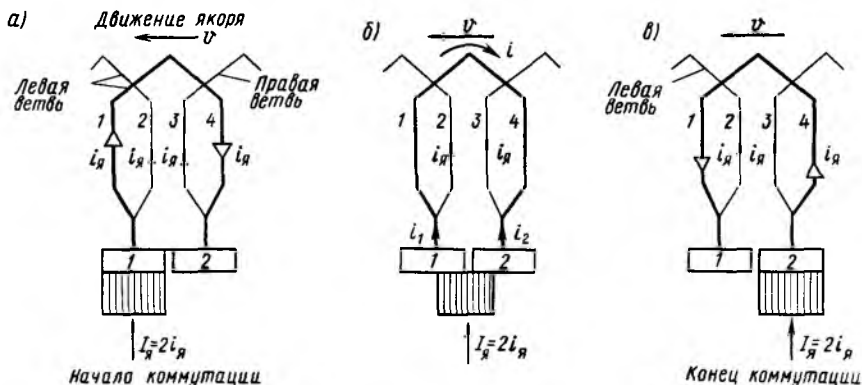


Рис. 113. Распределение тока в коммутируемой секции в различные моменты коммутации

В конце процесса коммутации (рис. 113, в) щетка сходит с коллекторной пластины 1 и перекрывает только одну пластину 2, при этом ток в коммутируемой секции будет направлен противоположно его направлению в начале коммутации.

Таким образом, в течение периода коммутации T_k рассматриваемая секция 1—4 переходит из правой параллельной ветви в левую. В течение этого периода ток i в коммутируемой секции линейно изменяется от $+i_a$ до $-i_a$, ток i_1 — от $2i_a$ до нуля, а ток i_2 — от нуля до $2i_a$ (рис. 114, а). Такая коммутация носит название *прямолинейной, или идеальной*.

Рассмотренный выше процесс коммутации не вызывает каких-либо неприятных последствий в машине. Для нее характерно:

сбегающая коллекторная пластина 2 выходит из-под края щетки без разрыва тока;

плотность тока под щетками в течение периода коммутации остается неизменной, так как по мере уменьшения тока i_1 пропорционально уменьшается перекрываемая щеткой площадь S_1 коллекторной пластины 1. Точно так же по мере увеличения тока i_2 пропорционально увеличивается перекрываемая щеткой площадь S_2 коллекторной пластины 2.

По этим причинам прямолинейная коммутация считается оптимальной. Если при расчете машины выбрать площадь щеток так, чтобы плотность тока под ними не превышала некоторую предельную для щеток данной марки, то данная машина будет работать без искрения.

Однако в действительных условиях работы машин постоянного тока процесс коммутации протекает более сложно. В современных машинах период коммутации T_k весьма мал и составляет примерно 0,001—0,0001 с. Вследствие этого скорость изменения тока в коммутируемой секции очень велика и в ней индуцируется довольно большая э. д. с. самоиндукции e_L . Обычно в процессе коммутации участвует несколько секций, одновременно замыкаемых накоротко щетками. При этом в них возникает также и э. д. с. взаимоиנדукции e_m . Сумма возникающих в каждой коммутируемой секции э. д. с.

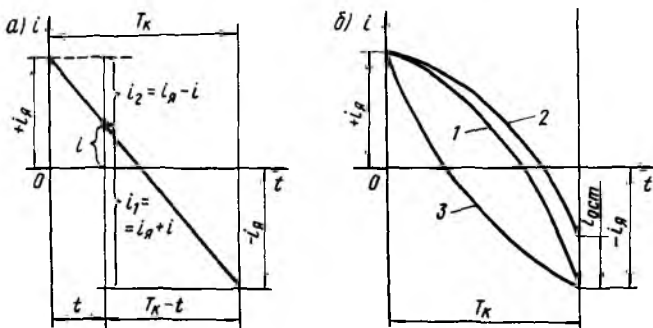


Рис. 114. Зависимости изменения токов i , i_1 , i_2 в коммутируемой секции во времени при прямолинейной (а), замедленной и ускоренной (б) коммутации

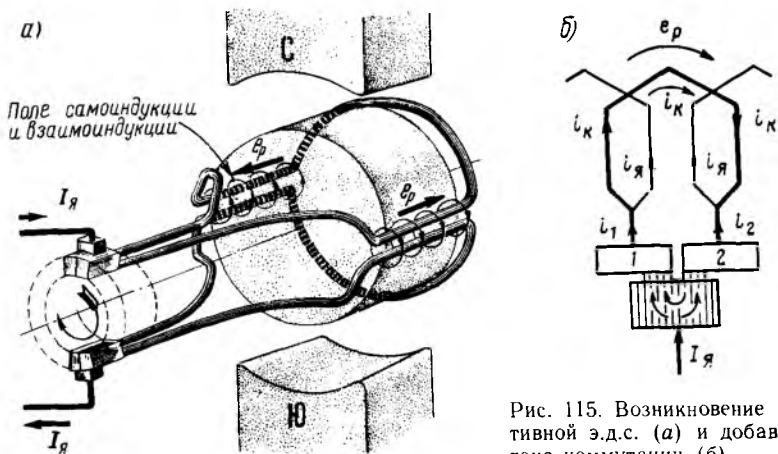


Рис. 115. Возникновение реактивной э. д. с. (а) и добавочного тока коммутации (б)

самоиндукции и взаимной индукции носит название *реактивной э. д. с.*: $e_p = e_L + e_m$ (рис. 115, а). Эта э. д. с., действуя в замкнутой накоротко секции, сильно изменяет характер коммутации и вызывает добавочный ток коммутации i_k (рис. 115, б).

Согласно правилу Ленца э. д. с. самоиндукции и взаимной индукции должны противодействовать вызывающей их причине, т. е. замедлять изменение тока i в коммутируемой секции. Так как этот ток в процессе коммутации стремится уменьшиться, а затем изменить свой знак, реактивная э. д. с. e_p должна противодействовать этому уменьшению; следовательно, она будет иметь направление, совпадающее с направлением тока i в коммутируемой секции в первую половину периода коммутации. Такое же направление имеет и добавочный ток коммутации i_k .

Циркулируя в цепи коммутируемой секции, замкнутой накоротко щеткой, ток i_k уменьшает ток i_2 на набегающем крае щетки и увеличивает ток i_1 на сбегающем крае. В результате плотность тока под щетками становится неравномерной: пониженной на набегающем крае щетки и повышенной на сбегающем. Такая коммутация называется *замедленной*. Ток в коммутируемой секции в этом случае изменяется по кривой 1 или 2 (см. рис. 114, б).

Влияние коммутации на работу машины. При замедленной коммутации площадь S_1 соприкосновения пластины 1 (см. рис. 113) со щеткой уменьшается быстрее, чем ток i_1 , вследствие чего увеличивается плотность тока под сбегающим краем щетки.

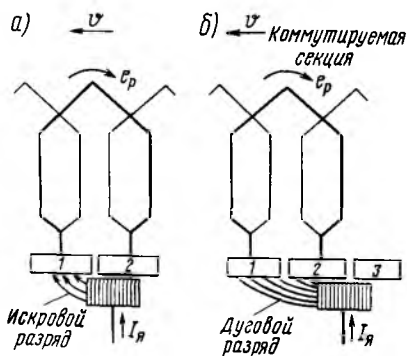


Рис. 116. Возникновение искрения под сбегающим краем при замедленной коммутации

В конце процесса коммутации эта плотность тока может достичь большого значения и вызвать искрение под щетками. В этом случае небольшая площадь электрического контакта между щеткой и сбегающей пластиной не может пропустить через себя значительный ток, и он начинает проходить помимо этого контакта. Практически при этом образуется искровой разряд (рис. 116, а) между щеткой и сбегающей коллекторной пластиной 1.

При большом значении реактивной э. д. с. e_p ток i_1 к моменту схода щетки со сбегающей пластины не успевает уменьшиться до нуля (кривая 2 на рис. 114, б). При этом через сбегающую пластину проходит остаточный ток $i_{ост}$, который разрывается щеткой. В этом случае запас электромагнитной энергии в цепи коммутируемой секции оказывается достаточным, чтобы ионизировать воздушный промежуток между щеткой и сбегающей коллекторной пластиной, поэтому между ними появляется довольно значительный дуговой разряд, т. е. интенсивное искрение (рис. 116, б). В результате длительного искрения неизбежен преждевременный износ коллектора и щеток. Коллектор загрязняется, чернеет и становится непригодным к работе. Необходимо периодически выполнять его очистку. При сильном искрении разрушаются щетки и поверхность коллектора, которую приходится подвергать обточке. При неблагоприятных условиях (в машинах с сильным искажением магнитного поля от действия реакции якоря) дуга будет переходить от пластины к пластине, что приведет к возникновению кругового огня.

Чем больше мощность электрической машины и чем выше частота вращения якоря, тем большая реактивная э. д. с. индуцируется в коммутируемых секциях и тем неблагоприятнее протекает процесс коммутации.

На протекание процесса коммутации оказывает также вредное влияние сдвиг физической нейтрали относительно геометрической, возникающий под действием реакции якоря. Обычно щетки устанавливаются под серединами полюсов так, чтобы замыкаемые ими коллекторные пластины были соединены с секциями обмотки якоря, расположенными на геометрической нейтрали. В этом месте не действует магнитный поток, созданный обмоткой возбуждения машины, и при холостом ходе в указанных секциях не индуцируется никакой э. д. с. Однако при нагрузке из-за сдвига физической нейтрали относительно геометрической расположенные на геометрической нейтрали коммутируемые секции оказываются в зоне действия магнитного потока якоря Φ_a (см. рис. 105, б), поэтому при вращении якоря в них так же, как и в остальных секциях обмотки якоря, будут индуцироваться э. д. с., называемые э. д. с. вращения. Э. д. с. вращения, созданная потоком якоря, ухудшает коммутацию, так как совпадает по направлению с реактивной э. д. с. e_p .

Способы улучшения коммутации. Основной причиной искрения в машинах постоянного тока является разрыв щетками остаточного тока, созданного в коммутируемой секции реактивной э. д. с. и э. д. с. вращения от действия потока якоря. Следовательно, улучшение коммутации может быть осуществлено тремя путями:

- 1) уменьшением реактивной э. д. с.;
- 2) компенсацией реактивной э. д. с. и э. д. с. вращения от потока якоря некоторой добавочной э. д. с., называемой *коммутирующей*; эта э. д. с. может быть индуцирована при помощи какого-либо дополнительного внешнего (коммутирующего) магнитного поля;
- 3) уменьшением тока коммутации i_k путем увеличения сопротивления цепи коммутируемой секции.

Рассмотрим более подробно эти способы.

Уменьшение реактивной э. д. с. Это достигается путем уменьшения индуктивности секции различными конструктивными мерами. Индуктивность секции стараются сделать возможно меньшей, уменьшая число витков. Поэтому в тяговых двигателях и тепловозных генераторах секции делают одновитковыми. Пазы якоря стараются также делать открытыми и не очень глубокими (глубина их не превышает 4,5—5,5 см даже у самых крупных машин).

На значение индуктивности оказывает влияние положение стороны секции в пазу; индуктивность верхнего слоя всегда меньше индуктивности нижнего слоя. Чтобы индуктивности всех секций были примерно одинаковыми, одну сторону каждой секции располагают в верхнем слое, а другую — в нижнем.

Определенное значение для коммутации имеет и ширина щетки. Чем шире щетка, тем больше число коллекторных пластин перекрывает она одновременно и тем больше коммутируется одновременно секций. Поэтому уменьшение ширины щетки обеспечивает уменьшение реактивной э. д. с. Практика тягового электромашиностроения выработала наиболее рациональное соотношение между шириной щетки и шириной коллекторной пластины; обычно в тяговых двигателях и генераторах щетка перекрывает 3,5—4,5 коллекторных пластины.

Однако в крупных машинах все рассмотренные конструктивные меры не могут снизить индуктивность секций и реактивную э. д. с. до допустимых значений. Поэтому в таких машинах приходится уменьшать длину, окружную скорость и суммарный ток проводников, лежащих в пазах якоря, а для получения необходимой мощности машины увеличивать диаметр якоря, что приводит к увеличению габаритных размеров и массы машины. По этим причинам *машины постоянного тока имеют примерно на 20—25 % меньшую мощность, чем машины переменного тока при тех же габаритных размерах и частоте вращения.*

Поскольку конструктивные меры уменьшения реактивной э. д. с. влекут за собой увеличение габаритных размеров и массы, этими способами добиваются лишь снижения реактивной э. д. с. при номинальной нагрузке до уровня 3—5 В. При такой реактивной э. д. с. обычно удается наладить коммутацию, применив добавочные полюсы.

Создание в короткозамкнутой секции коммутирующей э. д. с. В машинах мощностью свыше 1—1,5 кВт для создания коммутирующего поля с целью компенсации реактивной э. д. с. и э. д. с. вращения от потока якоря применяют добавочные

полюсы. Они расположены между главными полюсами на геометрической нейтрали машины (см. рис. 111, а), т. е. там же, где находятся коммутируемые секции, замыкаемые накоротко щетками. Ширину этих полюсов выбирают небольшой (рис. 117, а), чтобы созданное ими магнитное поле действовало только в зоне, где происходит процесс коммутации (коммутационной зоне). Магнитный поток добавочных полюсов направлен против потока якоря в коммутационной зоне и компенсирует его; в этом случае в коммутируемых секциях не будет индуцироваться э. д. с. вращения. Кроме того, поток добавочных полюсов индуцирует в коммутируемых секциях коммутирующую э. д. с. e_k , направленную против реактивной э. д. с. e_p (рис. 117, б). *Добавочные полюсы рассчитывают так, чтобы коммутирующая э. д. с. e_k была приблизительно равна реактивной э. д. с. e_p .* В этом случае имеют место рассмотренные выше условия идеальной коммутации, обеспечивающие безыскровую работу машин. Полярность каждого добавочного полюса в генераторах должна быть такой же, как у следующего по направлению вращения главного полюса, а в двигателях — как у предшествующего главного полюса. Если коммутирующая э. д. с. e_k будет больше реактивной э. д. с. e_p , то имеет место *ускоренная коммутация*, при этом ток в коммутируемой секции изменяется по кривой 3 (см. рис. 114, б). При небольшом преобладании э. д. с. e_k коммутация протекает благоприятно, плотность тока под сбегающей пластиной становится малой (образуется так называемая «ступень малого тока») и сход этой пластины из-под щетки происходит без искрения. Однако если e_k значительно превосходит e_p , то искрение возникает под набегающим краем щетки. Осуществить точную компенсацию реактивной э. д. с. коммутирующей невозможно из-за технологических неточ-

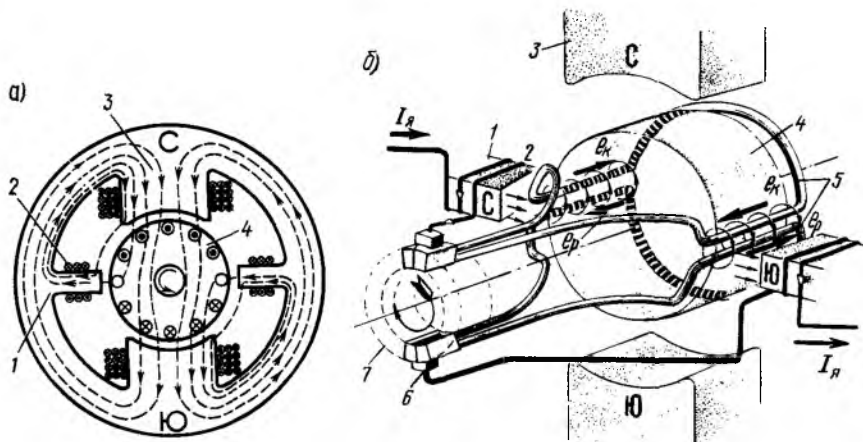


Рис. 117. Электромагнитная схема машины с добавочными полюсами (а) и индуктирование в короткозамкнутых секциях коммутирующей э.д.с. (б):

1, 3 — добавочный и главный полюсы; 2 — обмотка добавочного полюса; 4 — якорь; 5 — коммутируемые секции; 6 — щетка; 7 — коллектор

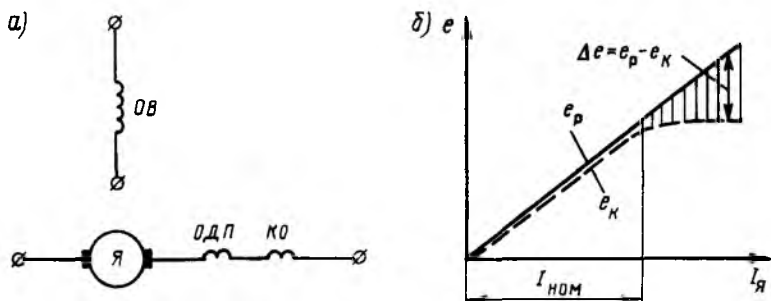


Рис. 118. Схема включения обмоток якоря, возбуждения, добавочных полюсов и компенсационной в машине постоянного тока (а) и зависимости э.д.с. e_p и e_k от тока якоря I_a (б):

Я — обмотка якоря; ОВ — обмотка возбуждения; ОДП — обмотка добавочных полюсов; КО — компенсационная обмотка

ностей при изготовлении машины (неточное расположение главных и добавочных полюсов, щеток на коллекторе, неодинаковая толщина коллекторных пластин и изоляционных прокладок, несимметричное расположение пластин на коллекторе и пр.) и нестабильного характера щеточного контакта. Однако практика показывает, что *если нескомпенсированная э. д. с. $\Delta e = e_p - e_k$ не превышает 0,8—1,0 В, то коммутация протекает удовлетворительно.*

При изменении нагрузки машины изменяется ток, протекающий по обмотке якоря, а следовательно, и реактивная э. д. с. e_p в коммутируемой секции. Для того чтобы поле добавочных полюсов автоматически компенсировало э. д. с. e_p при различных нагрузках, обмотку добавочных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря (рис. 118, а), а их магнитную цепь делают ненасыщенной. Поэтому создаваемое этими полюсами коммутирующее магнитное поле, а следовательно, и коммутирующая э. д. с. e_k будут изменяться пропорционально току в обмотке якоря, т. е. так же, как и реактивная э. д. с.

Рассмотренные выше условия имеют место при изменении нагрузки машины от холостого хода до несколько большей ее номинальной. Однако при сильных перегрузках компенсация реактивной э. д. с. e_p нарушается, так как при больших токах в обмотке якоря начинает сказываться насыщение магнитной цепи добавочных полюсов. В этом случае реактивная э. д. с. будет возрастать пропорционально току, рост же коммутирующей э. д. с. e_k из-за насыщения будет более замедленным (рис. 118, б), вследствие чего в коммутируемых секциях появится некоторая нескомпенсированная э. д. с. $\Delta e = e_p - e_k$, вызывающая искрение под щетками.

Чтобы увеличить предельную нагрузку, при которой происходит насыщение магнитной цепи добавочных полюсов, поперечное сечение их сердечников делают достаточно большим, а воздушный зазор под добавочными полюсами устраивают значительно большим, чем воздушный зазор под главными полюсами (рис. 119, а). В машинах

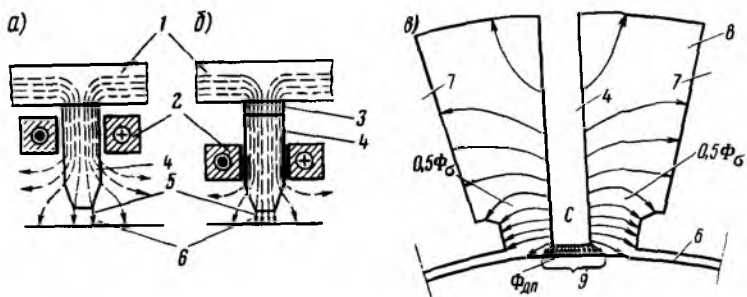


Рис. 119. Магнитная цепь добавочных полюсов в машинах большой мощности (а и б) и схема магнитных потоков, проходящих через добавочный полюс (в):

1 — остов; 2 — обмотка добавочного полюса; 3 — дополнительный воздушный зазор (немагнитная прокладка); 4 — сердечник добавочного полюса; 5 — основной воздушный зазор; 6 — якорь; 7 — главный полюс; 8 — междуполюсное пространство; 9 — коммутационная зона

большой и средней мощности при конструировании магнитной цепи добавочных полюсов приходится принимать специальные меры для уменьшения магнитного потока рассеяния Φ_c добавочного полюса, который проходит через междуполюсное пространство помимо якоря (рис. 119, в). Этот поток превышает в 2—4 раза полезный поток добавочного полюса $\Phi_{дл}$, проходящий через коммутационную зону. Для уменьшения потока рассеяния, который может вызвать насыщение сердечников добавочных полюсов, обмотку добавочного полюса размещают ближе к якорю и делают воздушный зазор на две части, устанавливая немагнитные прокладки 3 между остовом и торцами сердечников добавочных полюсов (рис. 119, б). Дополнительный воздушный зазор у остова повышает магнитное сопротивление для потока рассеяния, что обеспечивает уменьшение этого потока. Кроме того, такой зазор улучшает коммутацию при переходных режимах.

Увеличение сопротивления цепи коммутируемой секции. Щетки по своей физической природе являются нелинейными сопротивлениями. При быстром увеличении плотности тока под сбегающим краем щетки сопротивление ее резко возрастает, что ведет к уменьшению остаточного тока или к полному его устранению даже в случае, когда коммутация является неидеальной. Коммутирующие свойства щеток характеризуются падением напряжения $2\Delta u_{щ}$ в контактном слое пары щеток, одна из которых проводит, а другая отводит ток. Наилучшие коммутирующие свойства имеют электрографитированные щетки, для них $2\Delta u_{щ} \approx 2,4 \div 2,6$ В. Стремление к улучшению коммутации — основная причина перехода от медных щеток, первоначально применявшихся в электромашиностроении, к электрографитированным.

При прохождении тока между щеткой и коллектором происходят сложные электролитические процессы. Вследствие этого поверхность коллектора покрывается политурой — тонкой пленкой светло-

или темно-коричневого цвета, содержащей, главным образом, окислы меди и углерод. Наличие политуры благотворно сказывается на работе щеток; коэффициент трения уменьшается и возрастает переходное сопротивление контакта между щеткой и коллектором. Процесс появления политуры при обычных условиях длится от 2 до 10 ч. При очень больших скоростях перемещения щетки по коллектору (свыше 50—60 м/с) может происходить частичное разрушение политуры.

Улучшение условий коммутации можно обеспечить при применении разрезных щеток (см. рис. 87, б). В этом случае удлиняется путь, по которому проходит добавочный ток коммутации i_k , и увеличивается сопротивление цепи коммутируемой секции. Следовательно, уменьшается ток i_k .

Особенности коммутации при переходных режимах. Тяговые двигатели электроподвижного состава нередко работают при переходных режимах, вызываемых резкими колебаниями напряжения в сети, нарушением электрического контакта между токоприемником и контактной сетью (отрыв токоприемника от контактного провода), нарушением сцепления между колесными парами и рельсами (боксование, юз и восстановление нормального сцепления) и переключениями электрических цепей в процессе управления локомотивами.

При прекращении питания двигателя (отрыв токоприемника от контактного провода) и последующем его восстановлении происходит процесс изменения тока якоря I_a и магнитного потока Φ главных полюсов. Магнитный поток Φ достигает первоначального значения только через некоторое время Δt , так как в массивном остове машины индуцируются вихревые токи, которые согласно правилу Ленца противодействуют изменению потока. Медленное восстановление магнитного потока главных полюсов Φ , а следовательно, и э. д. с. двигателя E приводит к резкому возрастанию тока I_a до значения I_{\max} , примерно в 2—3 раза большего его значения до прекращения питания. В результате происходит нарушение нормальной коммутации машины и соответствующее увеличение потока якоря, сопровождающееся возрастанием напряжения между смежными коллекторными пластинами, что может привести к возникновению кругового огня.

Возникновение вихревых токов в массивном остове машины и сердечниках добавочных полюсов приводит к нарушению коммутации также и потому, что они задерживают изменение магнитного потока добавочных полюсов, который должен быстро следовать за изменением реактивной э. д. с., т. е. тока в обмотке якоря. В результате нарушается условие компенсации реактивной э. д. с. $e_p - e_k = 0$ и возникает нескомпенсированная э. д. с. $\Delta e = e_p - e_k$, вызывающая искрение под щетками. Введение в магнитную цепь добавочных полюсов второго воздушного зазора у остова (см. рис. 119, б) ослабляет этот задерживающий эффект и способствует более быстрому изменению коммутирующей э. д. с. e_k в соответствии с изменением e_p .

§ 31. Основы работы генераторов

Э. д. с. и напряжение генератора. При вращении якоря в каждом проводнике его обмотки индуцируется э. д. с.

$$e = Bl_n v_n, \quad (57)$$

где B — индукция в воздушном зазоре машины; l_n , v_n — активная длина проводника и скорость его перемещения в магнитном поле.

Э. д. с. генератора E равна сумме э. д. с. e , индуцируемых во всех проводниках, входящих в параллельную ветвь обмотки якоря:

$$E = \frac{p}{a} \frac{N}{60} n \Phi, \quad (58)$$

где N — число проводников обмотки якоря.

Произведение $\frac{p}{a} \frac{N}{60}$ для каждой данной машины представляет собой некоторую постоянную величину и может быть обозначено c_E . Поэтому э. д. с.

$$E = c_E \Phi n. \quad (59)$$

Э. д. с. E в каждой данной машине зависит только от частоты вращения якоря n и магнитного потока Φ . Регулировать ее можно двумя способами:

изменением магнитного потока Φ ; для этого требуется изменить ток I_a в обмотке возбуждения;

изменением частоты вращения n .

Напряжение генератора

$$U = E - I_a \Sigma R_n, \quad (60)$$

где $I_a \Sigma R_n$ — падение напряжения во всех обмотках, включенных последовательно в цепь якоря (обмотках якоря, добавочных полюсов, компенсационной и последовательного возбуждения);

ΣR_n — суммарное сопротивление этих обмоток.

Следовательно, для регулирования напряжения генератора надо регулировать его э. д. с. двумя указанными способами. Оба способа используют в тепловозах для регулирования напряжения тяговых генераторов. Генераторы, применяемые для питания цепей управления локомотивов, зарядки аккумуляторных батарей и пр., работают обычно при постоянной частоте вращения n , поэтому регулирование их напряжения осуществляется путем изменения тока возбуждения.

Ток нагрузки и электромагнитный тормозный момент генератора. В генераторах постоянного тока нагрузка (приемник электрической энергии) включается в цепь обмотки якоря. Поэтому ток нагрузки

$$I_n = U / R_n = (E - I_a \Sigma R_n) / R_n. \quad (61)$$

Следовательно, регулировать ток нагрузки генератора можно двумя способами:

изменением сопротивления R_n приемника;

изменением напряжения U генератора, т. е. его э. д. с. E .

На каждый проводник обмотки якоря, находящийся в магнитном поле, действует электромагнитная сила

$$f = B l_n i_n = B l_n I_n / (2a). \quad (62)$$

Совместное действие электромагнитных сил f всех N проводников якоря создает электромагнитный момент (см. § 25):

$$M = [pN / (2\pi a)] \Phi I_n. \quad (63)$$

Произведение $\frac{pN}{2\pi a}$ для каждой данной машины представляет собой постоянную величину и может быть обозначено c_M . Поэтому

$$M = c_M \Phi I_n. \quad (63')$$

Очевидно, что при увеличении тока генератора $I_n \approx I_n$ увеличивается и электромагнитный тормозной момент M , что требует соответствующего увеличения внешнего момента $M_{вн}$ первичного двигателя (дизеля), приводящего генератор во вращение.

§ 32. Схемы генераторов и их характеристики

Свойства генератора постоянного тока определяются в основном способом включения обмотки возбуждения. В зависимости от этого различают генераторы:

с независимым возбуждением: обмотка возбуждения получает питание от постороннего источника постоянного тока (аккумуляторной батареи, небольшого вспомогательного генератора, называемого возбудителем, или выпрямителя);

с параллельным возбуждением: обмотка возбуждения подключена параллельно обмотке якоря и нагрузке;

с последовательным возбуждением: обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря и нагрузкой;

со смешанным возбуждением: имеются две обмотки возбуждения — параллельная и последовательная; первая подключена параллельно обмотке якоря, а вторая — последовательно с нею и нагрузкой.

Генераторы с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением относятся к машинам с самовозбуждением, так как питание их обмоток возбуждения осуществляется от самого генератора.

Все перечисленные генераторы имеют одинаковое устройство и отличаются лишь выполнением обмоток возбуждения. Обмотки независимого и параллельного возбуждения изготавливают из провода

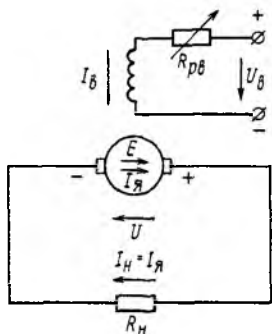


Рис. 120. Принципиальная схема генератора с независимым возбуждением

малого сечения, они имеют большое число витков, обмотку последовательного возбуждения — из провода большого сечения, она имеет малое число витков.

О свойствах генераторов постоянного тока судят по их характеристикам: холостого хода, внешней и регулировочной. Ниже будут рассмотрены эти характеристики для генераторов различного типа.

Генератор с независимым возбуждением.

Характерной особенностью генератора с независимым возбуждением (рис. 120) является то, что его ток возбуждения $I_{\text{в}}$ не зависит от тока якоря $I_{\text{я}}$, а определяется только напряжением $U_{\text{в}}$, подаваемым на обмотку возбуждения, и сопротивлением $R_{\text{в}}$

цепи возбуждения. Обычно ток возбуждения невелик и составляет 2—5 % номинального тока якоря. Для регулирования напряжения генератора в цепь обмотки возбуждения часто включают регулировочный реостат $R_{\text{рв}}$. На тепловозах ток $I_{\text{в}}$ регулируют путем изменения напряжения $U_{\text{в}}$.

Характеристика холостого хода генератора (рис. 121, а) — зависимость напряжения U_0 при холостом ходе от тока возбуждения $I_{\text{в}}$ при отсутствии нагрузки $R_{\text{н}}$, т. е. при $I_{\text{н}} = I_{\text{я}} = 0$ и при постоянной частоте вращения n . При холостом ходе, когда цепь нагрузки разомкнута, напряжение генератора U_0 равно его э. д. с. $E_0 = c_E \Phi n$. Так как при снятии характеристики холостого хода частота вращения n поддерживается неизменной, то напряжение U_0 зависит только от магнитного потока Φ . Поэтому характеристика холостого хода будет подобна зависимости потока Φ от тока возбуждения $I_{\text{н}}$ (магнитной характеристике магнитной цепи генератора). Характеристику холостого хода легко снять экспериментально, постепенно увеличивая ток возбуждения от нуля до значения, при котором $U_0 \approx 1,25 U_{\text{ном}}$, а затем уменьшая ток возбуждения до нуля. При этом получаются восходящая 1 и нисходящая 2 ветви характеристики. Расхождение этих ветвей объясняется наличием гистерезиса в магнитопроводе машины. При $I_{\text{в}} = 0$ в обмотке якоря потоком остаточного магнетизма индуцируется *остаточная э. д. с.* $E_{\text{ост}}$, которая обычно составляет 2—4 % номинального напряжения $U_{\text{ном}}$.

При малых токах возбуждения магнитный поток машины невелик, поэтому в этой области поток и напряжение U_0 изменяются прямо пропорционально току возбуждения и начальная часть этой характеристики представляет собой прямую. При увеличении тока возбуждения магнитная цепь генератора насыщается и нарастание напряжения U_0 замедляется. Чем больше становится ток возбуждения, тем сильнее сказывается насыщение магнитной цепи машины и тем медленнее возрастает напряжение U_0 . При очень больших токах возбуждения напряжение U_0 практически перестает возрастать.

Характеристика холостого хода позволяет судить о значении возможного напряжения и о магнитных свойствах машины. Номинальное напряжение (указанное в паспорте) для машин общего применения соответствует насыщенной части характеристики («колену» этой кривой). В тепловозных генераторах, требующих регулирования напряжения в широких пределах, используют как криволинейную, так и прямолинейную ненасыщенную часть характеристики.

Э. д. с. машины изменяется пропорционально частоте вращения n , поэтому при $n_2 < n_1$ характеристика холостого хода лежит ниже кривой для n_1 . При изменении направления вращения генератора изменяется направление э. д. с. E , индуцированной в обмотке якоря, а следовательно, и полярность щеток.

Внешняя характеристика генератора (рис. 121, б) представляет собой зависимость напряжения U от тока нагрузки $I_H = I_n$ при постоянных частоте вращения n и токе возбуждения I_B . Напряжение генератора U всегда меньше его э. д. с. E на значение падения напряжения $I_n \Sigma R_n$ во всех обмотках, включенных последовательно в цепь якоря.

С увеличением нагрузки генератора (тока обмотки якоря $I_n = I_n$) напряжение генератора уменьшается по двум причинам: 1) из-за увеличения падения напряжения $I_n \Sigma R_n$ в цепи обмотки якоря; 2) из-за уменьшения э. д. с. $E = c_E \Phi n$ в результате размагничивающего действия потока якоря. Как было установлено в § 29, магнитный поток якоря несколько ослабляет главный магнитный поток Φ генератора, что приводит к некоторому уменьшению его э. д. с. E при нагрузке по сравнению с э. д. с. E_0 при холостом ходе.

Изменение напряжения при переходе от режима холостого хода к номинальной нагрузке в рассматриваемом генераторе составляет 3—8 % от U_0 .

Если замкнуть внешнюю цепь на очень малое сопротивление, т. е. произвести короткое замыкание генератора, то напряжение его падает до нуля. Ток в обмотке якоря I_k при коротком замыкании достигнет недопустимого значения, при котором может перегореть обмотка якоря. В машинах малой мощности ток короткого замыкания может в 10—15 раз превысить номинальный ток, в машинах большой мощности это соотношение может достигать 20—25.

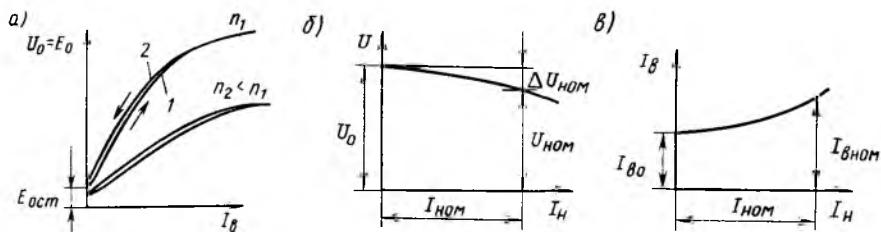


Рис. 121. Характеристики генератора с независимым возбуждением:

а — холостого хода; б — внешняя; в — регулировочная

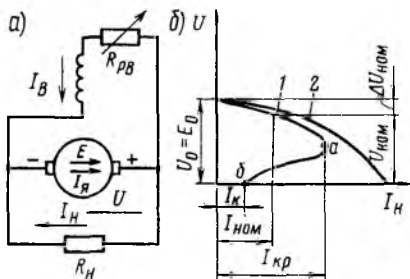


Рис. 122. Принципиальная схема генератора с параллельным возбуждением (а) и внешние характеристики генераторов с независимым и параллельным возбуждением (б)

Регулировочная характеристика генератора (рис. 121, в) представляет собой зависимость тока возбуждения I_B от тока нагрузки I_H при неизменном напряжении U и частоте вращения n . Она показывает, как надо регулировать ток возбуждения, чтобы поддерживать постоянным напряжение генератора при изменении нагрузки. Очевидно, что в этом случае по мере роста нагрузки нужно увеличивать ток возбуждения.

Достоинствами генератора с независимым возбуждением являются возможность регулирования напряжения в широких пределах от 0 до U_{max} путем изменения тока возбуждения и малое изменение напряжения генератора под нагрузкой. Однако он требует наличия внешнего источника постоянного тока для питания обмотки возбуждения.

Генератор с параллельным возбуждением. В этом генераторе (рис. 122, а) ток обмотки якоря I_A разветвляется во внешнюю цепь нагрузки R_H (ток I_H) и в обмотку возбуждения (ток I_B); ток I_B для машин средней и большой мощности составляет 2—5 % номинального значения тока в обмотке якоря. В машине используется принцип самовозбуждения, при котором обмотка возбуждения получает питание непосредственно от обмотки якоря генератора. Однако самовозбуждение генератора возможно только при выполнении ряда условий.

1. Для начала процесса самовозбуждения генератора необходимо наличие в магнитной цепи машины потока остаточного магнетизма, который индуцирует в обмотке якоря э. д. с. $E_{ост}$. Эта э. д. с. обеспечивает протекание по цепи «обмотка якоря — обмотка возбуждения» некоторого начального тока.

2. Магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, должен быть направлен согласно с магнитным потоком остаточного магнетизма. В этом случае в процессе самовозбуждения будет нарастать ток возбуждения I_B и, следовательно, магнитный поток Φ машины э. д. с. E . Это будет продолжаться до тех пор, пока из-за насыщения магнитной цепи машины не прекратится дальнейшее увеличение Φ , а следовательно, E и I_B . Совпадение по направлению указанных потоков обеспечивается путем правильного присоединения обмотки возбуждения к обмотке якоря. При неправильном ее подключении происходит размагничивание машины (исчезает остаточный магнетизм) и э. д. с. E уменьшается до нуля.

3. Сопротивление цепи возбуждения $R_{\text{в}}$ должно быть меньше некоторого предельного значения, называемого *критическим сопротивлением*. Поэтому для быстрого возбуждения генератора рекомендуется при включении генератора в работу полностью выводить регулировочный реостат $R_{\text{рв}}$, включенный последовательно с обмоткой возбуждения (см. рис. 122, а). Это условие ограничивает также возможный диапазон регулирования тока возбуждения, а следовательно, и напряжения генератора с параллельным возбуждением. Обычно уменьшать напряжение генератора путем увеличения сопротивления цепи обмотки возбуждения можно лишь до $(0,6 \div 0,7) U_{\text{ном}}$.

Следует отметить, что для самовозбуждения генератора необходимо, чтобы процесс увеличения его э. д. с. E и тока возбуждения $I_{\text{в}}$ происходил при работе машины в режиме холостого хода. В противном случае из-за малого значения $E_{\text{ост}}$ и большого внутреннего падения напряжения в цепи обмотки якоря напряжение, подаваемое на обмотку возбуждения, может уменьшиться почти до нуля и ток возбуждения не сможет увеличиться. Поэтому нагрузку к генератору следует подключать только после установления на его зажимах напряжения, близкого к номинальному.

При изменении направления вращения якоря изменяется полярность щеток, а следовательно, и направление тока в обмотке возбуждения; в этом случае генератор размагничивается.

Во избежание этого при изменении направления вращения необходимо переключить провода, присоединяющие обмотку возбуждения к обмотке якоря.

Внешняя характеристика генератора (кривая 1 на рис. 122, б) представляет собой зависимость напряжения U от тока нагрузки $I_{\text{н}}$ при неизменных значениях частоты вращения n и сопротивления цепи возбуждения $R_{\text{в}}$. Она располагается ниже внешней характеристики генератора с независимым возбуждением (кривая 2). Объясняется это тем, что кроме тех же двух причин, вызывающих уменьшение напряжения с ростом нагрузки в генераторе с независимым возбуждением (падение напряжения в цепи якоря и размагничивающее действие реакции якоря), в рассматриваемом генераторе существует еще третья причина — уменьшение тока возбуждения. Так как ток возбуждения $I_{\text{в}} = U/R_{\text{в}}$, т. е. зависит от напряжения U машины, то с уменьшением напряжения по указанным двум причинам уменьшается магнитный поток Φ и э. д. с. генератора E , что приводит к дополнительному уменьшению напряжения. Максимальный ток $I_{\text{кр}}$, соответствующий точке а, называется *критическим*.

При коротком замыкании обмотки якоря ток $I_{\text{к}}$ генератора с параллельным возбуждением мал (точка б), так как в этом режиме напряжение и ток возбуждения равны нулю. Поэтому ток короткого замыкания создается только э. д. с. от остаточного магнетизма и составляет $(0,4 \div 0,8) I_{\text{ном}}$. Внешняя характеристика точкой а делится на две части: верхнюю — рабочую и нижнюю — нерабочую. Обычно используется не вся рабочая часть, а только некоторый ее отрезок. Работа на участке *аб* внешней характеристики неустойчива;

в этом случае машина переходит в режим, соответствующий точке б, т. е. в режим короткого замыкания.

Характеристику холостого хода генератора с параллельным возбуждением снимают при независимом возбуждении (когда ток в якоре $I_a = 0$), поэтому она ничем не отличается от соответствующей характеристики для генератора с независимым возбуждением (см. рис. 121, а). Регулировочная характеристика генератора с параллельным возбуждением имеет такой же вид, как и характеристика для генератора с независимым возбуждением (см. рис. 121, в).

Генераторы с параллельным возбуждением применяют для питания электрических потребителей в пассажирских вагонах, автомобилях и самолетах, в качестве генераторов управления на электровозах, тепловозах и моторных вагонах и для заряда аккумуляторных батарей.

Генератор с последовательным возбуждением. У этого генератора (рис. 123, а) ток возбуждения I_b равен току нагрузки $I_n = I_a$ и напряжение сильно изменяется при изменении тока нагрузки. При холостом ходе в генераторе индуцируется небольшая э. д. с. $E_{ост}$, создаваемая потоком остаточного магнетизма (рис. 123, б). С увеличением тока нагрузки $I_n = I_b = I_a$ возрастают магнитный поток, э. д. с. и напряжение генератора; это возрастание, как и у других самовозбуждающихся машин (генератора с параллельным возбуждением), продолжается до известного предела, обусловленного магнитным насыщением машины. При увеличении тока нагрузки свыше $I_{кр}$ напряжение генератора начинает уменьшаться, так как магнитный поток возбуждения из-за насыщения почти перестает увеличиваться, а размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в цепи обмотки якоря $I_a \Sigma R_a$ продолжают возрастать. Обычно ток $I_{кр}$ значительно больше номинального тока. Генератор может работать устойчиво только на части *аб* внешней характеристики, т. е. при токах нагрузки, больших номинального.

Так как в генераторах с последовательным возбуждением напряжение сильно изменяется при изменении нагрузки, а при холостом ходе близко к нулю, они непригодны для питания большинства электрических потребителей. Используют их лишь при электрическом (реостатном) торможении двигателей с последовательным возбуждением, которые при этом переводятся в генераторный режим.

Генератор со смешанным возбуждением. В этом генераторе (рис. 124, а) чаще всего параллельная обмотка возбуждения является основной, а последовательная — вспомогательной. Обе обмотки находятся на одних полюсах и соединены так, чтобы создаваемые ими магнитные потоки складывались (при согласном включении) или вычитались (при встречном включении).

Генератор со смешанным возбуждением при согласном включении его обмоток возбуждения позволяет получить приблизительно постоянное напряжение при изменении нагрузки. Внешняя характеристика генератора (рис. 124, б) может быть в первом приближении представлена в виде суммы характеристик, создаваемых каждой

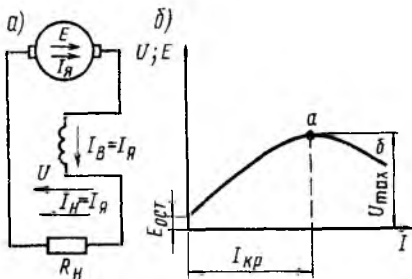


Рис. 123. Принципиальная схема генератора с последовательным возбуждением (а) и его внешняя характеристика (б)

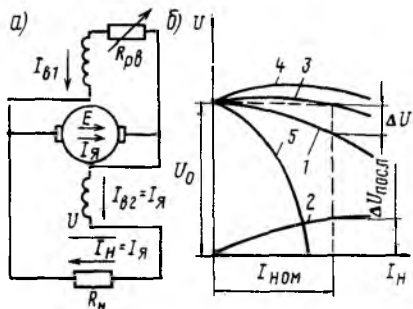


Рис. 124. Принципиальная схема генератора со смешанным возбуждением (а) и его внешние характеристики (б)

обмоткой возбуждения. При включении только одной параллельной обмотки, по которой проходит ток возбуждения $I_{в1}$, напряжение генератора U постепенно уменьшается с ростом тока нагрузки I_H (кривая 1). При включении одной последовательной обмотки, по которой проходит ток возбуждения $I_{в2} = I_H$, напряжение U возрастает с увеличением тока I_H (кривая 2). Если подобрать число витков последовательной обмотки так, чтобы при номинальной нагрузке создаваемое ею напряжение $\Delta U_{\text{посл}}$ компенсировало суммарное падение напряжения ΔU при работе машины с одной только параллельной обмоткой, то можно добиться, чтобы напряжение U при изменении тока нагрузки от нуля до номинального значения оставалось почти неизменным (кривая 3). Практически оно изменяется в пределах 2—3%. Увеличивая число витков последовательной обмотки, можно получить характеристику, при которой напряжение $U_{\text{ном}}$ будет больше напряжения U_0 при холостом ходе (кривая 4); такая характеристика обеспечивает компенсацию падения напряжения не только во внутреннем сопротивлении цепи якоря генератора, но и в линии, соединяющей его с нагрузкой. Если последовательную обмотку включить так, чтобы создаваемый ею магнитный поток был направлен против потока параллельной обмотки (встречное включение), то внешняя характеристика генератора при большом числе витков последовательной обмотки будет круто падающей (кривая 5).

Встречное включение последовательной и параллельной обмоток возбуждения применяют в сварочных генераторах, работающих в условиях частых коротких замыканий. В таких генераторах при коротком замыкании последовательная обмотка почти полностью размагничивает машину и уменьшает ток к. з. до значения, безопасного для генератора. Генераторы со встречно включенными обмотками возбуждения используют на некоторых тепловозах в качестве возбудителей тяговых генераторов; они обеспечивают постоянство мощности, отдаваемой генератором. Такие возбудители применяют также на электровозах постоянного тока. Они питают обмотки воз-

буждения тяговых двигателей, которые при рекуперативном торможении работают в генераторном режиме, и обеспечивают круто падающих внешних характеристик (см. § 37).

§ 33. Основы работы электродвигателей

Э. д. с. и ток нагрузки электродвигателя. Э. д. с. электродвигателя определяется по той же формуле, что и для генератора [см. формулу (59)].

Ток I_a в цепи обмотки якоря электродвигателя (ток нагрузки) определяется разностью питающего напряжения U и э. д. с. E , которые направлены по контуру цепи якоря встречно (см. рис. 69, а). Поэтому согласно второму закону Кирхгофа получим:

$$U - E = I_a \Sigma R_a,$$

откуда

$$I_a = (U - E) / \Sigma R_a. \quad (64)$$

Из формулы (64) следует, что от э. д. с. E зависит сила тока I_a и, следовательно, мощность, потребляемая двигателем. Если э. д. с. уменьшается, например, при уменьшении частоты вращения n (в результате возрастания механической нагрузки на валу) или магнитного потока Φ , то возрастает ток I_a и мощность, потребляемая электродвигателем.

Частота вращения и вращающий электромагнитный момент. Формулу для частоты вращения электродвигателя можно получить из формулы (59), если подставить в нее э. д. с. $E = U - I_a \Sigma R_a$:

$$n = E / (c_E \Phi) = (U - I_a \Sigma R_a) / (c_E \Phi). \quad (65)$$

Электромагнитный вращающий момент электродвигателя определяется по той же формуле, что и электромагнитный тормозной момент генератора [см. формулу (63')]. При работе электродвигателя под нагрузкой на его вал, кроме вращающего электромагнитного момента M , действует еще противоположно направленный внешний тормозной момент $M_{вн}$ (см. рис. 68, в), создаваемый приводимым им в движение механизмом. Например, в грузоподъемных механизмах поднимаемый груз оказывает сопротивление вращению якоря электродвигателя, который тянет трос с подвешенным к нему грузом. При работе электровозов и тепловозов масса поезда и самого локомотива, различные виды трения (колес о рельсы, осей в буксовых подшипниках локомотива и вагонов, различных движущихся частей в локомотиве и его тяговых двигателях), а также давление воздуха на торцовую поверхность локомотива и вагонов создают сопротивление движению поезда, которое приходится преодолевать тяговым двигателям этих локомотивов. Чем больше масса состава, скорость движения или подъем, по которому следует поезд, тем больше сопротивление, оказываемое вращению тяговых двигателей локомотива.

В зависимости от значений этих моментов якорь электродвигателя ускоряется (при $M > M_{вн}$), замедляется (при $M < M_{вн}$) или вращается с постоянной частотой (при $M = M_{вн}$). Следовательно, при равномерном вращении якоря (после окончания периода разгона или торможения) электромагнитный вращающий момент M определяется тормозным внешним моментом $M_{вн}$, приложенным к его валу. Например, при увеличении внешнего момента $M_{вн}$ равновесие моментов нарушается и частота n вращения якоря уменьшается. Это вызывает уменьшение э. д. с. E , индуцируемой в обмотке якоря, и, следовательно, увеличение тока $I_я$ и электромагнитного момента M . Указанный процесс продолжается до тех пор, пока моменты M и $M_{вн}$ не уравниваются. После этого якорь будет снова вращаться с постоянной частотой, несколько меньшей, чем до увеличения момента $M_{вн}$. Следовательно, электродвигатели обладают свойством саморегулирования: при увеличении внешнего момента $M_{вн}$, приложенного к валу, автоматически возрастает ток в обмотке якоря и электромагнитный момент M , пока не будет обеспечено условие $M = M_{вн}$.

Процесс изменения момента M при увеличении момента $M_{вн}$ можно объяснить также исходя из энергетических соотношений. При увеличении внешнего момента $M_{вн}$ увеличивается механическая энергия, которую электродвигатель отдает приводимой во вращение колесной паре или производственному механизму. Следовательно, должна увеличиться электрическая энергия, потребляемая двигателем от источника (контактной сети, тепловозного генератора), т. е. ток $I_я$, поступающей в обмотку якоря, и создаваемый им момент M .

Из рассмотренных условий изменения момента M при увеличении или уменьшении момента $M_{вн}$ следует, что ток $I_я$ в обмотке якоря зависит от механической нагрузки на валу электродвигателя. Чем больше тормозной момент $M_{вн}$, приложенный к валу, тем больше должен быть ток $I_я$, чтобы создать электромагнитный вращающий момент $M \approx M_{вн}$. Из формулы $M = c_M \Phi I_я$ можно получить

$$\boxed{I_я = M / (c_M \Phi) \approx M_{вн} / (c_M \Phi)}. \quad (66)$$

По этой причине ток обмотки якоря часто называют *током нагрузки электродвигателя*.

Из формулы (66) следует также, что ток $I_я$ зависит от магнитного потока Φ . Физически это объясняется следующим образом. Если уменьшить поток Φ , то должны уменьшиться электромагнитный момент M и э. д. с. в обмотке якоря E . Однако это сейчас же приведет к увеличению тока $I_я$, который будет возрастать до тех пор, пока момент M не уравнивается с внешним моментом $M_{вн}$.

§ 34. Схемы электродвигателей и их характеристики

Свойства электродвигателей постоянного тока определяются в основном способом включения обмотки возбуждения. В зависимости от этого различают электродвигатели:

с независимым возбуждением: обмотка возбуждения питается от постороннего источника постоянного тока (возбудителя или выпрямителя);

с параллельным возбуждением: обмотка возбуждения подключена параллельно обмотке якоря;

с последовательным возбуждением: обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря;

со смешанным возбуждением: он имеет две обмотки возбуждения, одна подключена параллельно обмотке якоря, а другая — последовательно с ней.

Все эти электродвигатели имеют одинаковое устройство и отличаются лишь выполнением обмотки возбуждения. Обмотки возбуждения указанных электродвигателей выполняют так же, как у соответствующих генераторов.

Электродвигатель с независимым возбуждением. В этом электродвигателе (рис. 125, а) обмотка якоря подключена к основному источнику постоянного тока (сети постоянного тока, генератору или выпрямителю) с напряжением U , а обмотка возбуждения — к вспомогательному источнику в напряжении U_B . В цепь обмотки возбуждения включен регулировочный реостат R_{pB} , а в цепь обмотки якоря — пусковой реостат R_n . Регулировочный реостат служит для регулирования частоты вращения якоря двигателя, а пусковой — для ограничения тока в обмотке якоря при пуске. Характерной особенностью электродвигателя является то, что его ток возбуждения I_B не зависит от тока I_A в обмотке якоря (тока нагрузки). Поэтому, пренебрегая размагничивающим действием реакции якоря, можно приближенно считать, что и поток двигателя Φ не зависит от нагрузки. При этом условии согласно формулам (63') и (65) получим, что зависимости электромагнитного момента M и частоты вращения n от тока I_A будут линейными (рис. 126, а). Следовательно, линейной будет и механическая характеристика двигателя — зависимость $n(M)$ (рис. 126, б).

При отсутствии в цепи якоря реостата с сопротивлением R_n скоростная и механическая характеристики будут жесткими, т. е. с малым углом наклона к горизонтальной оси, так как падение напряжения $I_A \Sigma R_n$ в обмотках машины, включенных в цепь якоря, при номинальной нагрузке составляет лишь 3—5 % от $U_{ном}$. Эти характеристики (прямые 1 на рис. 126, а и б) называются *естественными*. При включении в цепь якоря реостата с сопротивлением R_n угол наклона этих характеристик возрастает, вследствие чего можно получить семейство реостатных характеристик 2, 3 и 4, соответствующих различным

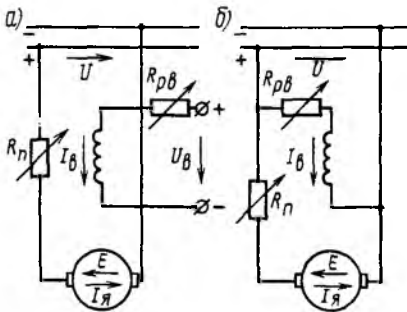


Рис. 125. Принципиальные схемы электродвигателей с независимым (а) и параллельным (б) возбуждением

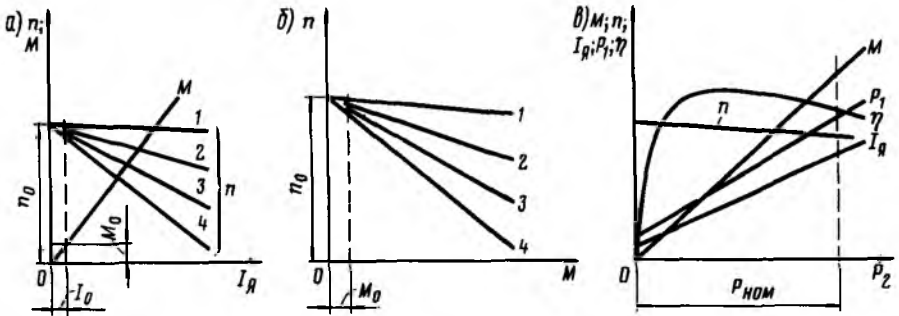


Рис. 126. Характеристики электродвигателей с независимым и параллельным возбуждением:

а — скоростные и моментная; б — механические; в — рабочие

значениям $R_{п1}$, $R_{п2}$ и $R_{п3}$. Чем больше сопротивление $R_{п}$, тем больший угол наклона имеет реостатная характеристика, т. е. тем она мягче.

Регулировочный реостат $R_{рв}$ позволяет изменять ток возбуждения двигателя I_b и его магнитный поток Φ . Как следует из формулы (65), при этом будет изменяться и частота вращения n . В цепь обмотки возбуждения никаких выключателей и предохранителей не устанавливают, так как при разрыве этой цепи резко уменьшается магнитный поток электродвигателя (в нем остается лишь поток от остаточного магнетизма) и возникает аварийный режим. Если электродвигатель работает при холостом ходе или небольшой нагрузке на валу, то частота вращения, как следует из формулы (65), резко возрастает (двигатель идет вразнос). При этом сильно увеличивается ток в обмотке якоря I_a [см. формулу (66)] и может возникнуть круговой огонь. Во избежание этого защита должна отключить электродвигатель от источника питания. Резкое увеличение частоты вращения при обрыве цепи обмотки возбуждения объясняется тем, что в этом случае резко уменьшаются магнитный поток Φ (до значения потока $\Phi_{ост}$ от остаточного магнетизма) и э. д. с. E и возрастает ток I_a . А так как приложенное напряжение U остается неизменным, то частота вращения n будет увеличиваться до тех пор, пока э. д. с. E не достигнет значения, приблизительно равного U (что необходимо для равновесного состояния электрической цепи якоря, при котором $E = U - I_a \Sigma R_a$).

При нагрузке на валу, близкой к номинальной, электродвигатель в случае разрыва цепи возбуждения остановится, так как электромагнитный момент, который может развить двигатель при значительном уменьшении магнитного потока, уменьшается [см. формулу (63')] и станет меньше нагрузочного момента на валу. В этом случае так же резко увеличивается ток I_a [так как в формуле (64) э. д. с. E будет равна нулю], и машина должна быть отключена от источника питания.

Следует отметить, что частота вращения n_0 соответствует идеальному холостому ходу, когда двигатель не потребляет из

сети электрической энергии и его электромагнитный момент равен нулю. В реальных условиях в режиме холостого хода двигатель потребляет из сети ток холостого хода I_0 , необходимый для компенсации внутренних потерь мощности (см. § 25), и развивает некоторый момент M_0 , требуемый для преодоления сил трения в машине. Поэтому в действительности частота вращения при холостом ходе меньше n_0 .

Зависимость частоты вращения n и электромагнитного момента M от мощности P_2 (рис. 126, в) на валу двигателя, как следует из рассмотренных соотношений, является линейной. Зависимости тока обмотки якоря I_a и мощности P_1 от P_2 также практически линейны. Ток I_a и мощность P_1 при $P_2=0$ представляют собой ток холостого хода I_0 и мощность P_0 , потребляемую при холостом ходе. Кривая к. п. д. имеет характер, общий для всех электрических машин (см. § 37).

Электродвигатель с параллельным возбуждением. В этом электродвигателе (см. рис. 125, б) обмотки возбуждения и якоря питаются от одного и того же источника электрической энергии с напряжением U . В цепь обмотки возбуждения включен регулировочный реостат $R_{рв}$, а в цепь обмотки якоря — пусковой реостат R_n . В рассматриваемом электродвигателе имеет место, по существу, раздельное питание цепей обмоток якоря и возбуждения, вследствие чего ток возбуждения I_b не зависит от тока обмотки якоря I_a . Поэтому электродвигатель с параллельным возбуждением будет иметь такие же характеристики, как и двигатель с независимым возбуждением. Однако двигатель с параллельным возбуждением работает нормально только при питании от источника постоянного тока с неизменным напряжением.

При питании электродвигателя от источника с изменяющимся напряжением (генератор или управляемый выпрямитель) уменьшение питающего напряжения U вызывает соответствующее уменьшение тока возбуждения I_b и магнитного потока Φ , что приводит к увеличению тока обмотки якоря I_a [см. формулу (66)]. Это ограничивает возможность регулирования частоты вращения якоря путем изменения питающего напряжения U . Поэтому электродвигатели, предназначенные для питания от генератора или управляемого выпрямителя, должны иметь независимое возбуждение.

Электродвигатель с последовательным возбуждением. Для ограничения тока при пуске в цепь обмотки якоря включен пусковой реостат R_n (рис. 127, а), а для регулирования частоты вращения

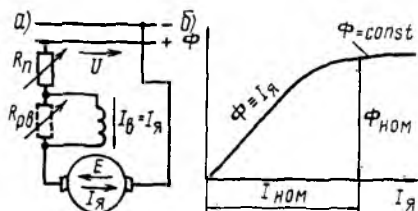


Рис. 127. Принципиальная схема электродвигателя с последовательным возбуждением (а) и зависимость его магнитного потока Φ от тока I_a в обмотке якоря (б)

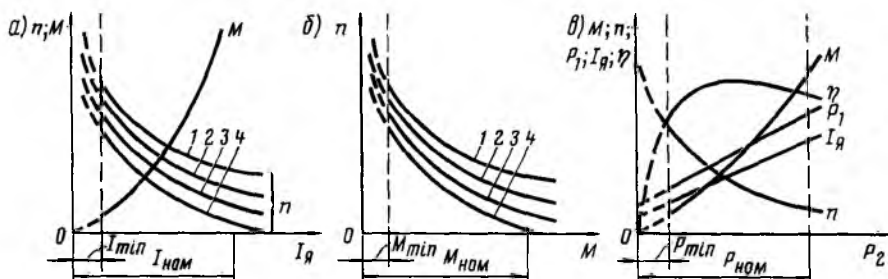


Рис. 128. Характеристики электродвигателя с последовательным возбуждением: а — скоростные и моментная; б — механические; в — рабочие

параллельно обмотке возбуждения может быть включен регулируемый реостат $R_{\text{рв}}$. Характерной особенностью этого электродвигателя является то, что его ток возбуждения $I_{\text{в}}$ равен или пропорционален (при включении реостата $R_{\text{рв}}$) току обмотки якоря $I_{\text{я}}$, поэтому магнитный поток Φ зависит от нагрузки двигателя (рис. 127, б).

При токе обмотки якоря $I_{\text{я}}$, меньшем (0,8—0,9) номинального тока $I_{\text{ном}}$, магнитная система машины не насыщена и можно считать, что магнитный поток Φ изменяется прямо пропорционально току $I_{\text{я}}$. Поэтому скоростная характеристика электродвигателя будет мягкая — с увеличением тока $I_{\text{я}}$ частота вращения n будет резко уменьшаться (рис. 128, а). Уменьшение частоты вращения n , как следует из формулы (65), происходит из-за увеличения падения напряжения $I_{\text{я}}\Sigma R_{\text{я}}$ во внутреннем сопротивлении $\Sigma R_{\text{я}}$ цепи обмотки якоря, а также из-за увеличения магнитного потока Φ .

Электромагнитный момент M при увеличении тока $I_{\text{я}}$ будет резко возрастать, так как в этом случае увеличивается и магнитный поток Φ , т. е. момент M будет пропорционален току $I_{\text{я}}^2$. Поэтому при токе $I_{\text{я}}$, меньшем (0,8 ÷ 0,9) $I_{\text{ном}}$, скоростная характеристика имеет форму гиперболы, а моментная — параболы.

При токах $I_{\text{я}} > I_{\text{ном}}$ зависимости M и n от $I_{\text{я}}$ линейны, так как в этом режиме магнитная цепь будет насыщена и магнитный поток Φ при изменении тока $I_{\text{я}}$ меняться не будет.

Механическая характеристика, т. е. зависимость n от M (рис. 128, б), может быть построена на основании зависимостей n и M от $I_{\text{я}}$. Кроме естественной характеристики 1, можно путем включения в цепь обмотки якоря реостата с сопротивлением $R_{\text{п}}$ получить семейство реостатных характеристик 2, 3 и 4. Эти характеристики соответствуют различным значениям $R_{\text{п1}}$, $R_{\text{п2}}$ и $R_{\text{п3}}$; при этом чем больше $R_{\text{п}}$, тем ниже располагается характеристика. Механическая характеристика рассматриваемого двигателя мягкая и имеет гиперболический характер. При малых нагрузках магнитный поток Φ сильно уменьшается, частота вращения n резко возрастает и может превысить максимально допустимое значение (двигатель идет вразнос). Поэтому такие двигатели нельзя применять для привода механизмов, работающих в режиме холостого хода и при небольшой нагруз-

ке (различные станки, транспортеры и пр.). Обычно минимально допустимая нагрузка для двигателей большой и средней мощности составляет $(0,2 \div 0,25) I_{ном}$. Чтобы предотвратить возможность работы двигателя без нагрузки, его соединяют с приводным механизмом жестко (зубчатой передачей или глухой муфтой); применение ременной передачи или фрикционной муфты недопустимо.

Несмотря на указанный недостаток, двигатели с последовательным возбуждением широко применяют, особенно там, где имеют место изменения нагрузочного момента в широких пределах и тяжелые условия пуска: во всех тяговых приводах (электровозы, тепловозы, электропоезда, электрокары, электропогрузчики и пр.), а также в приводах грузоподъемных механизмов (краны, лифты и пр.). Объясняется это тем, что при мягкой характеристике увеличение нагрузочного момента приводит к меньшему возрастанию тока и потребляемой мощности, чем у двигателей с независимым и параллельным возбуждением; поэтому двигатели с последовательным возбуждением лучше переносят перегрузки. Кроме того, эти двигатели имеют большой пусковой момент, чем двигатели с параллельным и независимым возбуждением, так как при увеличении тока обмотки якоря при пуске соответственно увеличивается и магнитный поток.

Если принять, например, что кратковременный пусковой ток может в 2 раза превышать номинальный рабочий ток машины, и пренебречь влиянием насыщения, реакцией якоря и падением напряжения в цепи его обмотки, то в двигателе с последовательным возбуждением пусковой момент будет в 4 раза больше номинального (в 2 раза увеличиваются и ток, и магнитный поток), а в двигателях с независимым и параллельным возбуждением — только в 2 раза больше. В действительности из-за насыщения магнитной цепи магнитный поток не увеличивается пропорционально току, но все же пусковой момент двигателя с последовательным возбуждением при прочих равных условиях будет значительно больше пускового момента такого же двигателя с независимым или параллельным возбуждением.

Зависимости n и M от мощности P_2 на валу электродвигателя (рис. 128, в), как следует из рассмотренных выше положений, являются нелинейными; зависимости P_1 , I_a и η от P_2 имеют такую же форму, как и у двигателей с параллельным возбуждением.

Электродвигатель со смешанным возбуждением. В этом электродвигателе (рис. 129, а) магнитный поток Φ создается в результате совместного действия двух обмоток возбуждения — параллельной (или независимой) и последовательной, по которым проходят токи возбуждения $I_{в1}$ и $I_{в2} = I_a$. Поэтому

$$\Phi = \Phi_{посл} + \Phi_{пар},$$

где $\Phi_{посл}$ — магнитный поток последовательной обмотки, зависящий от тока I_a ;

$\Phi_{пар}$ — магнитный поток параллельной обмотки, который не зависит от нагрузки (определяется током возбуждения $I_{в1}$).

Механическая характеристика электродвигателя со смешанным возбуждением (рис. 129, б) располагается между характеристиками двигателей с параллельным (прямая 1) и последовательным (кривая 2) возбуждением. В зависимости от соотношения магнитодвижущих сил параллельной и последовательной обмоток при номинальном режиме можно приблизить характеристики двигателя со смешанным возбуждением к характеристике 1 (кривая 3 при малой м. д. с. последовательной обмотки) или к характеристике 2

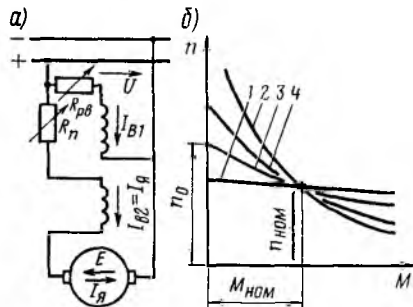


Рис. 129. Принципиальная схема электродвигателя со смешанным возбуждением (а) и его механические характеристики (б)

(кривая 4 при малой м. д. с. параллельной обмотки). Достоинством двигателя со смешанным возбуждением является то, что он, обладая мягкой механической характеристикой, может работать при холостом ходе, когда $\Phi_{\text{посл}} = 0$. В этом режиме частота вращения его якоря определяется магнитным потоком $\Phi_{\text{пар}}$ и имеет ограниченное значение (двигатель не идет вразнос).

§ 35. Пуск в ход электродвигателей постоянного тока

Для пуска двигателя могут быть применены три способа: прямой пуск; реостатный пуск; пуск путем изменения питающего напряжения.

Прямой пуск. При прямом пуске обмотка якоря подключается непосредственно к сети. Обычно в электродвигателях постоянного тока падение напряжения $I_{\text{я}} \Sigma R_{\text{я}}$ во внутреннем сопротивлении цепи обмотки якоря при номинальном токе составляет 5—10% от $U_{\text{ном}}$, поэтому при прямом пуске ток $I_{\text{п}} = U_{\text{ном}} / \Sigma R_{\text{я}} = (10 \div 20) I_{\text{ном}}$, что недопустимо для машины. По этой причине прямой пуск применяют только для двигателей очень малой мощности (до нескольких сотен ватт), в которых сопротивление $\Sigma R_{\text{я}}$ относительно велико, и лишь в отдельных случаях — для двигателей мощностью в несколько киловатт. При прямом пуске таких двигателей пусковой ток $I_{\text{п}} = (4 \div 6) I_{\text{ном}}$.

Реостатный пуск. Наибольшее применение получил реостатный пуск, при котором для ограничения тока в цепь якоря включают пусковой реостат $R_{\text{п}}$ (рис. 130, а); он обычно имеет несколько ступеней (секций) R_1, R_2, R_3 , которые в процессе пуска замыкают накоротко специальными выключателями (контакторами) 1, 2 и 3. При этом сопротивление реостата постепенно уменьшается, что обеспечивает высокое значение пускового момента в течение всего времени разгона двигателя.

Рассмотрим процесс реостатного пуска на примере электродвигателя с последовательным возбуждением. В начальный момент пуска при $n=0$ в цепь обмотки якоря вводится максимальное сопротивление $R_n = R_1 + R_2 + R_3$, вследствие чего пусковой ток согласно закону Ома

$$I_n = U / (\Sigma R_{я} + R_n).$$

Сопротивление R_n подбирают так, чтобы для машин большой и средней мощности $I_n = (1,5 \div 1,8) I_{ном}$, а для машин малой мощности $I_n = (2 \div 2,5) I_{ном}$. При включении в цепь обмотки якоря сопротивления R_n двигатель разгоняется по реостатной характеристике 1 (рис. 130, б), при этом в начальный момент пуска двигатель развивает максимальный пусковой момент M_{nmax} . Регулируемый реостат $R_{рв}$ в этом случае выводят так, чтобы ток возбуждения I_b и поток Φ были максимальными. После того как якорь двигателя придет во вращение, в обмотке якоря индуцируется э. д. с. E и ток

$$I_{я} = (U - E) / (\Sigma R_{я} + R_n).$$

По мере разгона двигателя и увеличения частоты вращения n растет э. д. с. E , вследствие чего уменьшается ток в обмотке $I_{я}$ и электромагнитный момент M . При достижении некоторого значения M_{nmin} ступень R_1 сопротивления пускового реостата выключают, замыкая контактор 1, вследствие чего увеличивается ток $I_{я}$. Электромагнитный момент при этом возрастает до M_{nmax} , а затем с увеличением частоты вращения n постепенно уменьшается по реостатной характеристике 2, соответствующей сопротивлению реостата $R'_n = R_2 + R_3$. При уменьшении момента до M_{nmin} выключают контактором 2 часть R_2 сопротивления пускового реостата, и двигатель переходит на работу по характеристике 3, соответствующей сопротивлению $R''_n = R_3$. Таким способом, уменьшая постепенно сопротивление пускового реостата, осуществляют разгон двигателя по отдельным отрезкам реостатных характеристик 1, 2 и 3 (см. жирные линии на рис. 130, б) до выхода на естественную характеристику 4, соответствующую сопротивлению $R_n = 0$. Пусковой момент двигателя при этом изменяется от M_{nmax} до M_{nmin} .

Следовательно, путем включения пускового реостата в цепь якоря можно осуществить пуск двигателя при некотором среднем пусковом моменте $M_{ncp} = (M_{nmax} + M_{nmin}) / 2$ и резко уменьшить пусковой ток. Число ступеней пускового реостата зависит от жесткости естественной механической характеристики 4 и тре-

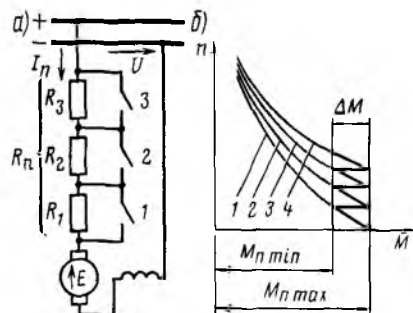


Рис. 130. Принципиальная схема реостатного пуска электродвигателя (а) и кривые изменения пускового момента (б)

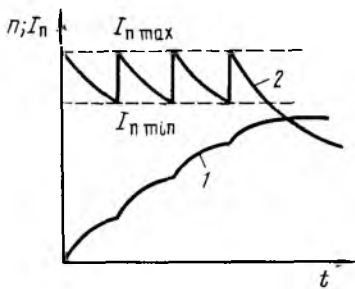


Рис. 131. Кривые изменения тока и частоты вращения при пуске электродвигателя

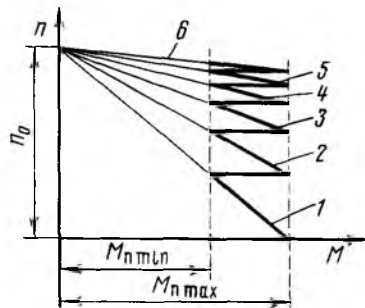


Рис. 132. Кривые изменения момента при реостатном пуске электродвигателей с независимым и параллельным возбуждением

бований, предъявляемых к плавности пуска (допустимой разности $M_{n\max} - M_{n\min}$). Пусковые реостаты рассчитывают на кратковременную работу под током. При пуске двигателя указанным способом частота вращения его якоря возрастает по ломаной кривой 1 (рис. 131), а ток обмотки якоря изменяется по ломаной кривой 2 между двумя крайними значениями пускового тока $I_{n\max}$ и $I_{n\min}$.

В процессе реостатного пуска происходят некоторые колебания тока и пускового момента (силы тяги) (см. рис. 130, б). Однако при достаточно большом числе ступеней пускового реостата эти колебания не оказывают вредного влияния на работу подвижного состава.

Реостатный пуск электродвигателей с независимым и параллельным возбуждением осуществляется так же, как и в двигателях с последовательным возбуждением, путем постепенного выключения отдельных ступеней пускового реостата. При этом электродвигатель разгоняется по отдельным отрезкам реостатных характеристик 1—5 (см. жирные линии на рис. 132) до выхода на естественную характеристику 6.

При работе электродвигателя по естественной характеристике развиваемый им электромагнитный момент M и частота вращения n изменяются автоматически в соответствии с изменением нагрузочного момента на валу $M_{вн}$. В процессе же пуска при работе на реостатных характеристиках электромагнитный момент двигателя можно регулировать независимо от значения $M_{вн}$. Момент M должен быть больше $M_{вн}$, чтобы обеспечить разгон двигателя и подвижного состава с заданным ускорением. Развиваемый двигателем при пуске электромагнитный момент зависит от сопротивления пускового реостата и от скорости его изменения, т. е. скорости выключения отдельных его ступеней.

Реостатный пуск применяют на электровозах и электропоездах постоянного тока.

При приблизительно постоянной массе поезда, характерной для электропоездов, выключение ступеней пускового реостата производят автоматически. Для этой цели на электропоездах преду-

смотрено специальное реле ускорения (реле минимального тока), срабатывающее, когда пусковой ток уменьшается до установленного значения, и тем самым обеспечивающее замыкание соответствующих контакторов. На электровозах ступени пускового реостата выключаются по мере увеличения скорости движения поезда непосредственно самим машинистом при помощи ручного аппарата, называемого контроллером машиниста. Однако на некоторых электровозах применяют автоматическое выключение ступеней пусковых реостатов с той или иной скоростью.

Пуск путем изменения питающего напряжения. При реостатном пуске возникают довольно большие потери энергии в пусковом реостате. Этот недостаток можно устранить, если пускать двигатель путем плавного повышения напряжения, подаваемого на обмотку якоря. Такой пуск называют *безреостатным*. Для этого необходимо иметь отдельный источник постоянного тока с регулируемым напряжением (генератор или управляемый выпрямитель). Безреостатный пуск применяют на э. п. с. переменного тока и тепловозах.

§ 36. Регулирование частоты вращения якоря электродвигателя

Из формулы (65) следует, что частота вращения якоря электродвигателя постоянного тока зависит от падения напряжения $I_n \Sigma R_n$ в цепи обмотки якоря, питающего напряжения U и магнитного потока Φ . Поэтому ее можно регулировать тремя способами:

- включением реостата с сопротивлением R_n в цепь обмотки якоря;
- изменением питающего напряжения U ;
- изменением магнитного потока Φ .

Рассмотрим более подробно эти способы на примере двигателей с последовательным и параллельным возбуждением.

Включение реостата в цепь обмотки якоря. При включении реостата с сопротивлением R_n в цепь обмотки якоря, кроме естественной механической характеристики I , получают и ряд реостатных характеристик 2, 3 и 4 (рис. 133). При этом заданному нагрузочному моменту $M_{\text{нн}}$ соответствуют различные значения частоты вращения n_1, n_2, n_3 и n_4 ; чем больше сопротивление R_n , тем меньше частота вращения якоря двигателя. Такой способ регулирования весьма прост и позволяет осуществлять плавное регулирование частоты вращения в широком диапазоне. Однако при этом возникают большие потери энергии в регулирующем реостате, вследствие чего его практически применяют только при кратковременных режимах работы двигателя (например, при пуске). Другим недостатком рассматриваемого способа регулирования является то, что частоту вращения n можно только уменьшать от n_1 до нуля.

Изменение питающего напряжения. При изменении питающего напряжения частота вращения n изменяется пропорционально U . Следовательно, подавая на обмотку якоря различные напряжения U_1, U_2, U_3 , можно получить семейство механических характе-

ристик 1, 2 и 3, у которых при любой нагрузке $n_1:n_2:n_3 = U_1:U_2:U_3$ (рис. 134). При уменьшении питающего напряжения механические характеристики двигателя смещаются в область меньших частот вращения и располагаются параллельно. Для осуществления указанного способа регулирования частоты вращения двигателя должен быть подключен к источнику постоянного тока с регулируемым напряжением: к генератору Γ с независимым возбуждением (рис. 135, а) или выпрямителю Bn (рис. 135, б). Питание тяговых двигателей от генератора осуществляется на тепловозах, а от выпрямителя — на электровозах и электропоездах переменного тока. На электровозах и электропоездах выпрямитель подключают к трансформатору, позволяющему изменять напряжение, подаваемое на вход выпрямителя, а следовательно, и его выходное напряжение U . На тепловозах в цепях управления имеется специальная электрическая аппаратура, позволяющая изменять ток возбуждения генератора, т. е. его выходное напряжение U , ручным способом или автоматически.

Несмотря на то, что рассмотренный способ требует довольно сложного оборудования, его широко применяют на современных локомотивах и электропоездах, так как он обеспечивает плавное и экономичное (без потерь энергии в реостатах) регулирование частоты вращения в очень широких пределах. Следует отметить, что для электродвигателей с па-

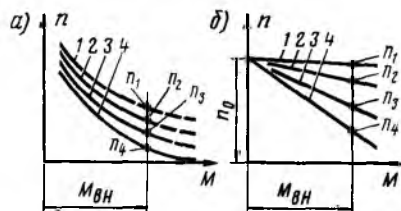


Рис. 133. Механические характеристики электродвигателей с последовательным (а) и независимым или параллельным (б) возбуждением при регулировании частоты вращения включением реостата в цепь обмотки якоря

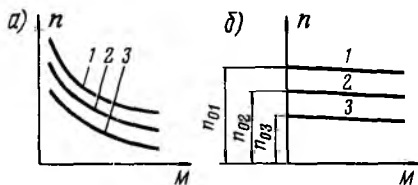


Рис. 134. Механические характеристики электродвигателя с последовательным (а) и независимым (б) возбуждением при регулировании частоты вращения путем изменения питающего напряжения

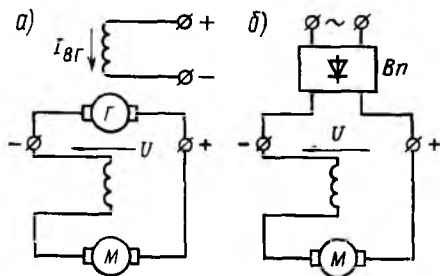


Рис. 135. Схемы питания электродвигателя с последовательным возбуждением от генератора (а) и выпрямителя (б)

раллельным возбуждением указанный способ регулирования применять нельзя, так как при уменьшении питающего напряжения соответственно уменьшался бы магнитный поток двигателя и увеличивался ток обмотки якоря. В этом случае двигатель должен быть переведен на независимое возбуждение.

На э. п. с. постоянного тока напряжение, подводимое от контактной сети к электровозу или моторному вагону, не может регулироваться, поэтому здесь для изменения подаваемого к двигателям напряжения применяют последовательно-параллельное переключение тяговых двигателей. При этом изменяется напряжение, приходящееся на каждый двигатель локомотива, и частота вращения.

При регулировании частоты вращения двигателей путем их последовательно-параллельного переключения число возможных схем соединений зависит от числа двигателей, установленных на данном локомотиве. Например, на четырехосных электровозах может быть использовано последовательное соединение тяговых двигателей (рис. 136, а); при этом напряжение, подводимое к двигателю, в 4 раза меньше напряжения U в контактной сети и двигатель имеет некоторую минимальную частоту вращения n_{min} при заданном моменте $M_{вн}$. При соединении двигателей в две параллельные группы (рис. 136, б), в каждую из которых включено по два последовательно соединенных двигателя, напряжение, подводимое к каждому двигателю, будет в 2 раза меньше напряжения U в контактной сети и частота его вращения будет составлять $2n_{min}$. Характеристики двигателей при этом располагаются одна над другой (рис. 136, в).

Последовательно-параллельное переключение тяговых двигателей применяют также на тепловозах. Это позволяет ограничить диапазон регулирования напряжения генератора, от которого зависят его габаритные размеры и масса.

Изменение магнитного потока. Для того чтобы изменить магнитный поток Φ , регулируют ток возбуждения двигателя с помощью

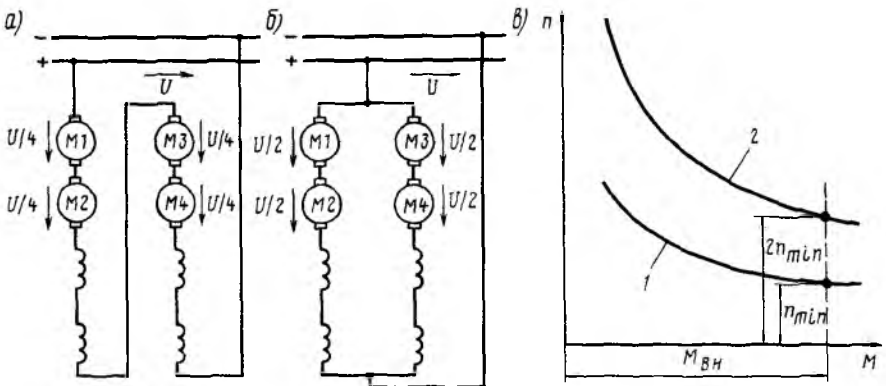


Рис. 136. Схемы соединения тяговых двигателей на четырехосных электровозах или электропоездах (а и б) и механические характеристики двигателей при различных схемах соединения (в):

1 — последовательное соединение; 2 — последовательно-параллельное соединение

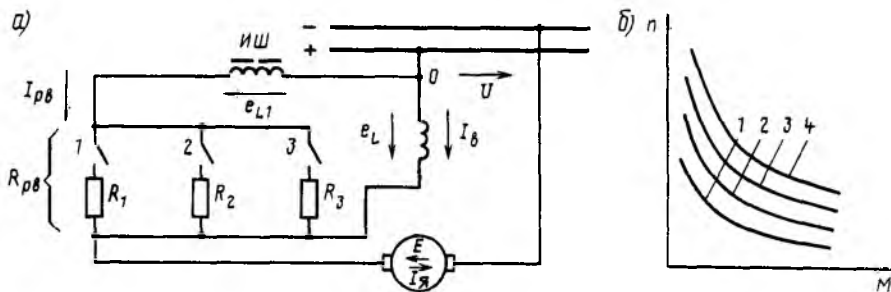


Рис. 137. Схема включения регулирующего реостата параллельно обмотке возбуждения в двигателе с последовательным возбуждением (а) и механические характеристики (б) при различных сопротивлениях реостата

регулирующего реостата $R_{рв}$ (рис. 137, а). В двигателях с последовательным возбуждением регулируемый реостат включают параллельно обмотке возбуждения, вследствие чего через обмотку возбуждения будет протекать только часть тока якоря (другая часть ответвляется в точке O в реостат $R_{рв}$). Обычно регулируемый реостат имеет несколько ступеней с сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 , которые позволяют получать несколько ступеней регулирования тока возбуждения двигателя.

Включение ступеней R_1 , R_2 , R_3 осуществляется контакторами 1, 2 и 3; при этом механические характеристики двигателя 2 (при включении ступени R_1), 3 (при включении R_1 и R_2) и 4 (при включении R_1 , R_2 и R_3) располагаются выше естественной характеристики 1 (рис. 137, б).

Степень регулирования тока возбуждения характеризуется коэффициентом регулирования возбуждения β , который представляет собой отношение тока возбуждения $I_{в0}$ при ослабленном возбуждении (включен регулируемый реостат $R_{рв}$) к току возбуждения $I_{вн}$ при нормальном возбуждении при одном и том же токе в обмотке якоря:

$$\beta = I_{в0}/I_{вн} = R_{рв}/(R_{в} + R_{рв}),$$

где $R_{в}$ — сопротивление обмотки возбуждения.

Рассмотренный способ регулирования прост и экономичен, поэтому его широко применяют на локомотивах и электропоездах. Однако в этом случае регулирование частоты вращения можно осуществлять только в сравнительно небольшом диапазоне. Нижний предел n_{\min} ограничивается насыщением магнитной цепи машины, которое не позволяет увеличивать в значительной степени магнитный поток, верхний предел n_{\max} — условиями устойчивости (при сильном уменьшении Φ двигатель идет вразнос), а также тем, что при глубоком ослаблении возбуждения сильно увеличивается ток якоря $I_{я}$, что приводит к возрастанию реактивной э. д. с. и искажающего действия реакции якоря. При этом повышается опасность

возникновения искрения на коллекторе и появления кругового огня. По этой причине двигатели, предназначенные для работы в режимах глубокого ослабления возбуждения, обязательно должны иметь компенсационную обмотку и пониженное значение реактивной э. д. с. при номинальном режиме. Обычно предельное значение коэффициента возбуждения β для двигателей без компенсационной обмотки составляет 0,3—0,33, а при наличии компенсационной обмотки — 0,2.

В двигателях с независимым и параллельным возбуждением регулировочный реостат, посредством которого изменяют ток возбуждения I_b и магнитный поток Φ , включают последовательно с обмоткой возбуждения (см. рис. 125). В этом случае при изменении тока возбуждения частота вращения n_0 при холостом ходе будет изменяться, т. е. механическая характеристика 2 при ослабленном возбуждении будет располагаться выше характеристики 1 при нормальном возбуждении (рис. 138). Однако характеристики 1 и 2 при различных значениях Φ не будут параллельны, так как согласно формуле (65) изменяется снижение частоты вращения, обусловленное падением напряжения $I_a \Sigma R_a$ в цепи обмотки якоря.

Работа электродвигателя с ослабленным возбуждением при переходных процессах. При включении регулировочного реостата параллельно обмотке возбуждения (см. рис. 137, а) приходится применять специальные меры для сохранения требуемого распределения тока между нею и реостатом при переходных процессах, возникающих в случаях резкого изменения режима работы двигателя, изменения напряжения в контактной сети и пр.

При переходных процессах, когда токи I_a , I_b и $I_{рв}$ изменяются, в обмотке возбуждения возникает значительная э. д. с. самоиндукции e_L . В результате ее действия ток I_b уменьшается по сравнению с его значением при стационарном режиме, а ток $I_{рв}$ возрастает, т. е. происходит значительно большее ослабление возбуждения. Наиболее опасным переходным процессом для тяговых двигателей, работающих с ослабленным возбуждением, является включение их на полное напряжение после кратковременного отключения от

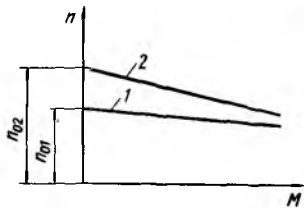


Рис. 138

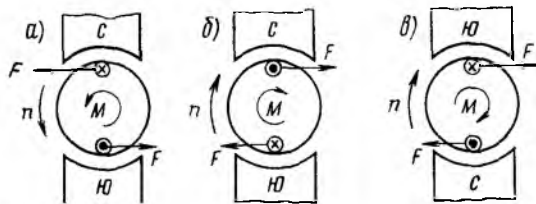


Рис. 139

Рис. 138. Механические характеристики электродвигателя с независимым и параллельным возбуждением при регулировании частоты вращения путем изменения магнитного потока

Рис. 139. Направление электромагнитного момента M при различном направлении тока в обмотке якоря и различной полярности полюсов

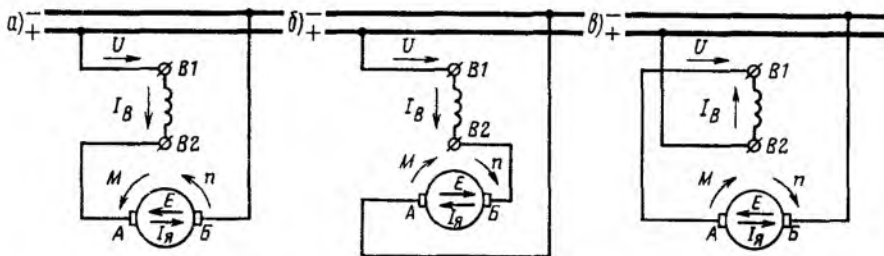


Рис. 140. Схемы переключений обмотки электродвигателя с последовательным возбуждением при изменении направления вращения

сети (при отрыве токоприемника от контактного провода). В этом случае из-за большой э. д. с. самоиндукции e_L в первый момент после включения почти весь ток $I_{\text{я}}$ пойдет по регулировочному реостату $R_{\text{рв}}$, а ток $I_{\text{в}}$ в обмотке возбуждения будет мал. Это приведет к значительному возрастанию тока $I_{\text{я}}$ в обмотке якоря из-за уменьшения э. д. с. E , индуцированной в ней. Практически при этих условиях возникает резкий бросок тока $I_{\text{я}}$, сопровождающийся нарушением нормальной коммутации (искрением под щетками) и образованием кругового огня. Кроме того, из-за большой скорости изменения тока создаются большие коммутационные перенапряжения, которые могут вызвать пробой изоляции обмоток якоря и возбуждения.

Бросок тока $I_{\text{я}}$ при включении двигателя под напряжение и скорость его изменения зависят от распределения токов $I_{\text{в}}$ и $I_{\text{рв}}$ между обмоткой возбуждения и регулировочным реостатом $R_{\text{рв}}$. Чтобы обеспечить при переходных процессах такое же распределение токов $I_{\text{в}}$ и $I_{\text{рв}}$, как и при стационарном режиме, последовательно с реостатом $R_{\text{рв}}$ включают индуктивный шунт *ИШ*, представляющий собой катушку с ферромагнитным сердечником. Индуктивность этой катушки подбирают так, чтобы отношение индуктивностей обмотки возбуждения и цепи реостата $R_{\text{рв}}$ было приблизительно равно отношению их сопротивлений. При этом условии возникающие при переходных процессах э. д. с. самоиндукции e_L в обмотке возбуждения и e_{L_1} в индуктивном шунте не будут влиять на распределение токов $I_{\text{в}}$ и $I_{\text{рв}}$ и возрастание тока $I_{\text{я}}$ будет небольшим.

Изменение направления вращения. Чтобы изменить направление вращения двигателя, необходимо изменить направление электромагнитного момента M , действующего на якорь. Направление момента M определяется правилом левой руки (см. рис. 68, б). Изменить направление M можно двумя способами (рис. 139, а — в): 1) изменением направления тока $I_{\text{я}}$ в обмотке якоря; 2) изменением полярности полюсов, т. е. направления магнитного потока Φ , путем изменения направления тока возбуждения $I_{\text{в}}$. Для этого переключают провода, подводящие ток к обмотке якоря или к обмотке возбуждения. Например, если при вращении электродвигателя в направлении *Вперед* ток $I_{\text{я}}$ проходил от щетки А к щетке Б (рис. 140, а), а ток возбуждения $I_{\text{в}}$ — от зажима В1 к зажиму В2, то для перевода

двигателя в направлении *Назад* необходимо переключить цепь обмотки якоря так, чтобы ток I_a проходил от щетки *Б* к щетке *А*, оставив неизменным направление тока I_b (рис. 140, б), или, оставив неизменным направление тока I_a от *А* к *Б*, переключить цепь возбуждения так, чтобы ток I_b проходил от зажима *В2* к зажиму *В1* (рис. 140, в).

§ 37. Электрическое торможение

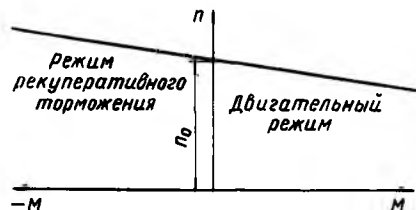
Для торможения подвижного состава тяговые двигатели переводятся в генераторный режим, при котором они создают тормозной момент. В зависимости от условий, при которых требуется осуществлять торможение, генератор может отдавать электрическую энергию в сеть или гасить ее в реостате. В первом случае торможение называется *рекуперативным*, во втором — *реостатным*. На э. п. с. применяют как рекуперативное, так и реостатное торможение. Рекуперативное торможение с энергетической точки зрения является наиболее выгодным, так как отданная в сеть электрическая энергия полезно используется другими электровозами или электропоездами. На тепловозах применять рекуперативное торможение нельзя, так как отсутствует приемник электрической энергии. Реостатное торможение может быть использовано, если оборудовать тепловозы реостатами для гашения электрической энергии.

Преимуществом электрического торможения является значительно меньшая склонность колес к заклиниванию (юз) при больших значениях тормозной силы, чем при механическом торможении, и способность к самозащите колес от юза. В этом случае юз, как правило, проявляется в форме частичного проскальзывания колес по рельсу без резкой потери сцепления, как это имеет место при механическом торможении.

Рекуперативное торможение. В режим рекуперативного торможения можно перевести только электродвигатели с независимым, параллельным и смешанным возбуждением. В электродвигателе с независимым (параллельным) возбуждением при уменьшении нагрузочного момента $M_{вн}$, например при переходе локомотива с подъема на площадку, частота вращения якоря возрастает, при этом увеличивается индуцированная в нем э. д. с., уменьшается ток и создаваемый двигателем электромагнитный момент. При $M_{вн}=0$ частота вращения возрастает до значения n_0 (частота вращения при холостом ходе).

Если пренебречь трением и внутренними потерями в машине, то при холостом ходе э. д. с. электродвигателя становится равной напряжению сети, а ток и развиваемый двигателем электромагнитный момент оказывается равным нулю. (В действительности при холостом ходе двигатель потребляет из сети некоторый ток, необходимый для компенсации внутренних потерь мощности в машине.) При изменении направления нагрузочного момента (например, при переходе локомотива на спуск) частота вращения якоря становит-

Рис. 141. Механическая характеристика электродвигателя с независимым (параллельным) возбуждением в двигательном режиме и при рекуперативном торможении



ся больше n_0 , э. д. с.— больше напряжения сети, ток и вращающий момент изменяют свое направление и машина переходит из двигательного режима в генераторный (рис. 141). При этом электромагнитный момент направлен против вращения якоря, а выработанная генератором электрическая энергия отдается в сеть.

Таким образом, двигатель с независимым (параллельным) возбуждением при изменении направления $M_{вн}$, т. е. при возрастании частоты вращения более n_0 , автоматически переходит в режим рекуперативного торможения.

Двигатель с последовательным возбуждением не может быть переведен в режим рекуперативного торможения, так как при уменьшении внешней нагрузки, т. е. вращающего момента двигателя, частота вращения возрастает и он идет вразнос. Следовательно, не представляется возможным изменить направление вращающего момента двигателя и перейти через промежуточный режим холостого хода, что необходимо для перевода его с двигательного в генераторный режим. Поэтому для осуществления рекуперативного торможения обмотку возбуждения такого электродвигателя необходимо переключить на независимое питание от специального электромашиного или полупроводникового возбудителя. При таком переключении электродвигатель начинает работать как генератор с независимым возбуждением.

Генераторы с независимым возбуждением работают вполне надежно и устойчиво. Однако они имеют пологую внешнюю характеристику (см. рис. 121, б) и поэтому непригодны для рекуперативного торможения в условиях тяговых сетей, напряжение которых сильно изменяется. При неизбежных колебаниях напряжения в контактной сети ток такого генератора и создаваемый им тормозной момент очень резко изменяются, что не дает возможности обеспечить надежное торможение поезда. Для того чтобы генератор был малочувствителен к колебаниям напряжения в контактной сети, необходимо придать его внешней характеристике крутопадающий характер, как это имеет место у генератора со смешанным возбуждением при встречном включении обмоток возбуждения (встречно-смешанное возбуждение). Для этого можно питать обмотку возбуждения тягового двигателя в режиме рекуперативного торможения от возбудителя со встречно-смешанным возбуждением или включить в цепь возбудителя так называемый стабилизирующий резистор. Благодаря этим мероприятиям ток, отдаваемый в контактную сеть тяговым двигателем, который работает в генераторном режиме, сохраняется

примерно постоянным. Такими способами стабилизируют (поддерживают постоянным) этот ток.

При использовании возбудителя со встречно-смешанным возбуждением (рис. 142, а) уменьшение напряжения в контактной сети и возрастание в связи с этим тока рекуперации $I_{я}$, отдаваемого тяговым двигателем, работающим в генераторном режиме, вызовут размагничивание возбудителя и снижение его напряжения, а следовательно, и магнитного потока обмотки возбуждения двигателя. В результате этого э. д. с. тягового двигателя, работающего в генераторном режиме, будет снижаться и ток рекуперации не будет испытывать сильных колебаний. То же самое будет происходить и при увеличении напряжения в контактной сети.

При использовании стабилизирующего резистора его включают в цепь возбудителя так, что по нему, кроме тока возбуждения $I_{в}$, проходит и ток обмотки якоря $I_{я}$ тягового двигателя, работающего в генераторном режиме (рис. 142, б). При уменьшении напряжения в контактной сети возрастут ток рекуперации $I_{я}$, отдаваемый тяговым двигателем, и падение напряжения ΔU в стабилизирующем резисторе 7. Так как падение напряжения ΔU в контуре «стабилизирующий резистор — обмотка якоря возбудителя» действует против напряжения возбудителя $U_{в}$, его увеличение приведет к уменьшению тока $I_{в}$, поступающего в обмотку возбуждения тягового двигателя, и снижению создаваемой в нем э. д. с. В результате будет иметь место такой же стабилизирующий эффект, как и при возбудителе со встречно-смешанным возбуждением.

Применять рекуперативное торможение для остановки поезда нельзя. Получение от двигателя, работающего в генераторном режиме на контактную сеть, необходимой э. д. с. потребовало бы при низких частотах вращения очень сильного увеличения его магнитного потока и тока, отдаваемого возбудителем. Поэтому рекуперативное торможение может применяться только до некоторой минимальной частоты вращения n_{\min} .

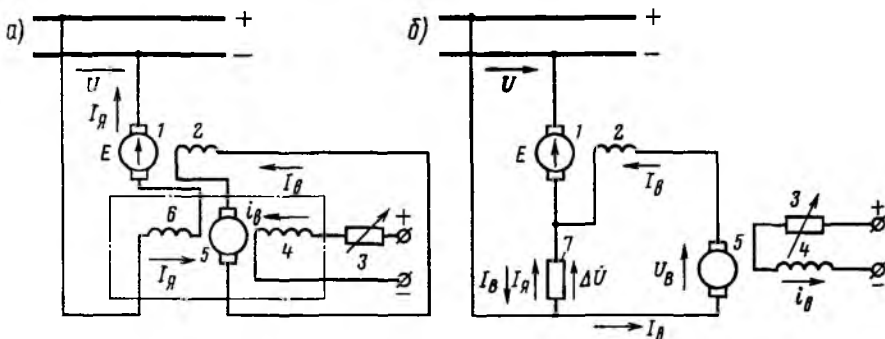


Рис. 142. Схемы включения тягового двигателя при рекуперативном торможении: 1 — якорь тягового двигателя; 2 — обмотка возбуждения; 3 — регулировочный реостат; 4 — обмотка независимого возбуждения возбудителя; 5 — якорь возбудителя; 6 — последовательная обмотка возбуждения возбудителя; 7 — стабилизирующий резистор

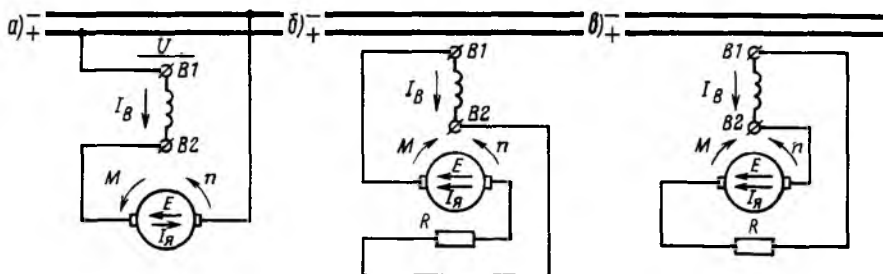


Рис. 143. Схемы перехода из двигательного режима (а) в режим реостатного торможения с переключением обмотки возбуждения (б) или обмотки якоря (в)

Если электродвигатель в режиме рекуперативного торможения отдает энергию не непосредственно в сеть, а через какой-либо преобразователь, то путем уменьшения напряжения, подаваемого от преобразователя на обмотку якоря двигателя, можно существенно уменьшить n_{\min} .

Реостатное торможение. При реостатном торможении тяговые двигатели работают как генераторы с последовательным возбуждением и включаются на тормозные резисторы, в которых электрическая энергия, выработанная генератором во время торможения поезда, превращается в тепловую. В качестве тормозных резисторов используют обычно те же реостаты, что и при пуске двигателя. *Реостатное торможение может применяться как при высоких, так и при низких частотах вращения*, так как напряжение генератора в этом случае не связано с напряжением сети и может быть установлено таким, какое необходимо для получения требуемой тормозной силы. Для перехода на реостатное торможение двигателя с последовательным возбуждением необходимо отключить его от контактной сети, переключить концы обмотки якоря или обмотки возбуждения двигателя и подключить к обмотке якоря резистор (рис. 143).

Как известно, при переходе машины из двигательного режима в генераторный ток I_A в обмотке якоря изменяет свое направление. Если не переключить концы обмотки якоря или обмотки возбуждения, то при изменении направления тока произошло бы размагничивание машины (исчезновение в ней остаточного магнетизма) и она не смогла бы начать работать в качестве генератора последовательного возбуждения. При переключении направление тока в обмотке возбуждения в генераторном режиме остается таким же, как и при двигательном, благодаря чему обеспечивается самовозбуждение машины за счет остаточного магнетизма.

При уменьшении частоты вращения тягового двигателя в процессе реостатного торможения будет уменьшаться создаваемое им напряжение, а следовательно, ток I_A и развиваемый им тормозной момент (тормозная сила). Чтобы поддержать тормозную силу на определенном уровне по мере уменьшения частоты вращения, не-

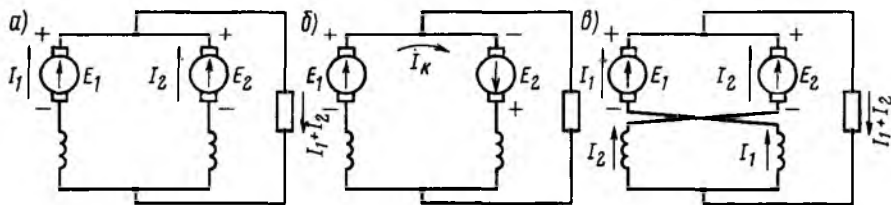


Рис. 144. Параллельное включение двух тяговых двигателей с последовательным возбуждением при реостатном торможении

обходимо постепенно уменьшать сопротивление тормозного резистора.

Применять реостатное торможение для остановки поезда нельзя, так как при малых частотах вращения тягового двигателя, работающего в генераторном режиме, резко уменьшаются его э. д. с. E , ток $I_{я}$ и электромагнитный тормозной момент. Поэтому окончательная остановка поезда производится в таких случаях механическим тормозом.

Тяговые двигатели локомотивов и электропоездов при реостатном торможении включаются только параллельно. При включении двигателей последовательно суммарное их напряжение могло бы достичь больших значений, что недопустимо для нормальной работы электрического оборудования. Однако параллельно включенные генераторы с последовательным возбуждением не в состоянии работать устойчиво, т. е. поддерживать постоянство своих токов и э. д. с.

Например, если по какой-то причине увеличится ток I_1 (рис. 144, а) в одном из параллельно включенных тяговых двигателей, работающих в генераторном режиме, это вызовет увеличение его э. д. с. E_1 . Одновременно уменьшатся ток I_2 и э. д. с. E_2 второго двигателя. Этот процесс продолжается до тех пор, пока ток I_2 не упадет до нуля, после чего он изменит свое направление. При этом изменится полярность второй машины и вместо параллельного включения двух генераторов образуется замкнутый контур, в который оба генератора будут включены последовательно без какого-либо внешнего сопротивления (рис. 144, б). Такое включение генераторов представляет собой, по сути дела, их короткое замыкание, поэтому по замкнутому контуру начнет проходить большой ток $I_{к}$.

Для получения устойчивой работы нескольких параллельно соединенных генераторов обмотки возбуждения их включают с перекрещиванием (рис. 144, в). В этом случае ток первого генератора проходит через обмотку возбуждения второго генератора и наоборот. Поэтому всякое случайное возрастание тока в цепи одного из генераторов вызовет усиление магнитного потока, а следовательно, и э. д. с. во втором генераторе, что обеспечивает автоматическое выравнивание э. д. с. и токов этих генераторов.

§ 38. Мощность и коэффициент полезного действия электрических машин

Потери мощности в электрических машинах. Преобразование механической энергии в электрическую в генераторе и электрической энергии в механическую в двигателе сопровождается некоторыми потерями энергии, которые выделяются в виде тепла, называемая электрической машиной.

Энергетические диаграммы генератора и двигателя (рис. 145) наглядно показывают баланс мощности в этих машинах. Как видно из них, при работе электрической машины возникают потери мощности: электрические, магнитные, механические и добавочные.

Электрические потери $\Delta P_{эл}$ появляются в результате того, что каждая обмотка (в машине постоянного тока обмотки якоря, возбуждения, добавочных полюсов и компенсационная) обладает определенным сопротивлением, препятствующим прохождению по ней электрического тока. Как было показано в § 13, они пропорциональны сопротивлению данной обмотки и квадрату протекающего по ней тока, т. е. сильно возрастают с увеличением нагрузки машины. Электрические потери вызывают нагрев проводов обмоток. К электрическим потерям относятся также потери, возникающие при протекании тока через щетки и через переходное сопротивление между щетками и коллектором; они вызывают нагрев коллектора и щеток.

Магнитные потери ΔP_m (потери в стали) возникают в сердечниках якоря и полюсов (главным образом, в полюсных наконечниках) в результате перемагничивания стали этих сердечников и образования в них вихревых токов. Перемагничивание стали сердечника якоря происходит потому, что при вращении якоря каждая его точка попеременно проходит то под северным, то под южным полюсом. Перемагничивание стали полюсных наконечников вызывается в результате изменения магнитной индукции в воздушном зазоре машины в пределах $\pm \Delta B$ при вращении зубчатого якоря (рис. 146). При этом в прилегающих к зазору ферромаг-

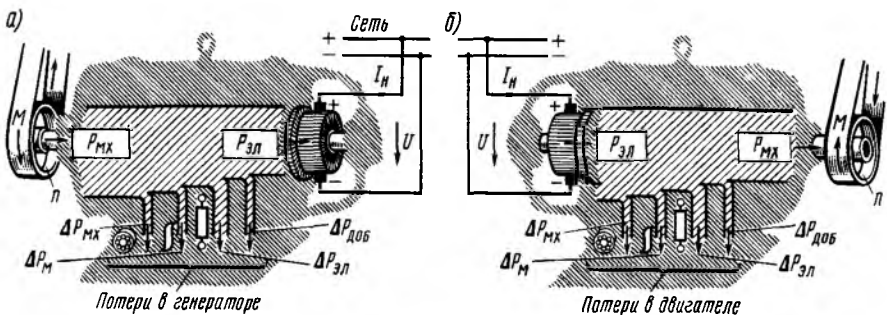


Рис. 145. Энергетические диаграммы машины постоянного тока при работе ее в режиме генератора (а) и электродвигателя (б)

нитных элементах магнитной системы (полюсных наконечниках и зубцах якоря) индуцируются вихревые токи, изменяющиеся с высокой частотой (1000 Гц и более) и сосредоточенные, главным образом, на их поверхности. Поэтому потери мощности, созданные этими токами, называют *поверхностными*.

В машинах, имеющих зубцы на статоре и роторе (машины постоянного тока с компенсационной обмоткой, асинхронные и синхронные), при вращении ротора создаются заметные пульсации индукции в зубцах, что также приводит к образованию вихревых токов и соответствующим потерям мощности. Эти потери называют *пульсационными*. Магнитные потери возникают также и в стальных бандажах, укрепляющих обмотку якоря, которые при вращении якоря пересекают силовые линии магнитного поля машины. Магнитные потери вызывают нагрев сердечника якоря и полюсов, они почти не зависят от нагрузки машины, но резко возрастают с увеличением частоты перемагничивания, т. е. частоты вращения якоря.

Механические потери $\Delta P_{\text{мх}}$ возникают в результате трения: в подшипниках, щеток по коллектору, деталей машины о воздух в процессе вентиляции. Эти потери вызывают нагрев подшипников, коллектора и щеток, с увеличением нагрузки они возрастают незначительно. При повышении частоты вращения якоря электрической машины механические потери резко возрастают.

Добавочные потери $\Delta P_{\text{доб}}$ обуславливаются различными вторичными явлениями, имеющими место при работе электрических машин под нагрузкой: возникновением вихревых токов в проводниках обмотки якоря, неравномерным распределением тока по сечению проводников и индукции в воздушном зазоре машины, воздействием коммутационных токов (в машинах постоянного тока) и переменных потоков рассеяния (в машинах переменного тока), которые индуцируют вихревые токи в крепежных деталях, и др.

При работе электрической машины под нагрузкой ее проводники, лежащие в пазах ротора и статора, пронизываются продольным и поперечным пазовыми потоками (рис. 147). При вра-

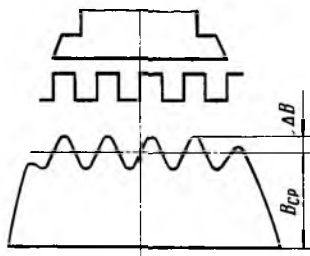


Рис. 146. Распределение индукции в воздушном зазоре машины с зубчатым якорем

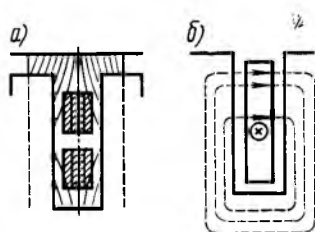


Рис. 147. Схема возникновения продольных (а) и поперечных (б) потоков

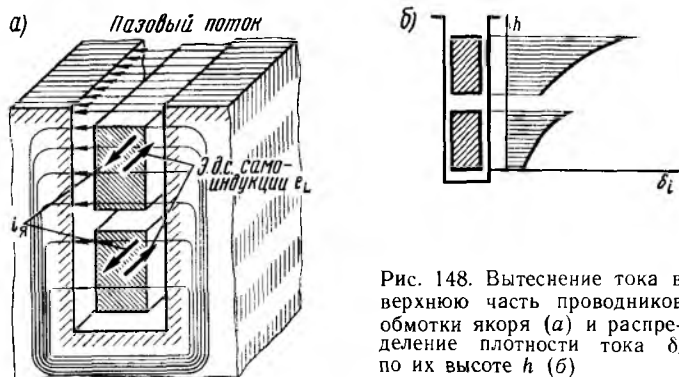


Рис. 148. Вытеснение тока в верхнюю часть проводников обмотки якоря (а) и распределение плотности тока δ_i по их высоте h (б)

щении якоря эти потоки индуцируют в проводниках вихревые токи, так как якорь, непрерывно перемещаясь, проходит под различными полюсами, вследствие чего все время изменяются и пронизывающие его продольный и поперечный пазовые потоки. То же происходит и при изменении тока в проводниках, т. е. нагрузки машины.

Вихревые токи не только увеличивают электрические потери в проводниках обмоток, но и приводят к неравномерному распределению тока по сечению проводников, вызывая вытеснение тока в более удаленные от дна паза слои. Это явление возникает из-за действия индуцируемых поперечными пазовыми потоками э. д. с. самоиндукции e_L (рис. 148, а), которые стремятся противодействовать прохождению по проводникам тока нагрузки i_a . В нижних слоях каждого проводника индуцируются большие э. д. с. e_L , чем в верхних, так как их охватывает большое количество силовых магнитных линий (от нижней части паза до рассматриваемого слоя). Поэтому ток, проходящий по проводникам, несколько вытесняется в верхнюю часть и плотность тока δ_i этой части увеличивается (рис. 148, б). В этом отношении условия прохождения постоянного тока по проводникам обмотки якоря аналогичны условиям прохождения переменного тока, который, как это будет подробно рассмотрено ниже, всегда стремится проходить по наружным слоям проводника. Неравномерное распределение тока по поперечному сечению проводника создает добавочные потери мощности, так как при этом как бы уменьшается площадь поперечного сечения и увеличивается электрическое сопротивление проводников.

Для уменьшения добавочных потерь, связанных с этим явлением, в тяговых двигателях стремятся уменьшить высоту проводников обмотки якоря. Для этого проводники разделяют по высоте паза на две-три параллельно соединенные части (рис. 49, а) или располагают их в пазах плашмя (рис. 149, б). При разделении проводников на несколько частей каждую из них изолируют отдельно, для того чтобы вихревые токи замыкались только в пределах одной части.

Коэффициент полезного действия. Соотношение между потребляемой и отдаваемой машиной мощностями характеризуется коэффициентом полезного действия:

для генератора

$$\eta = P_{эл}/P_{мх} = P_{эл}/(P_{эл} + \Delta P);$$

для двигателя

$$\eta = P_{мх}/P_{эл} = P_{мх}/(P_{мх} + \Delta P),$$

где ΔP — суммарные потери мощности.

К. п. д. стационарных машин постоянного тока колеблется в зависимости от мощности машины в пределах от 0,75 до 0,95 (машины большой мощности имеют более высокий к. п. д.). К. п. д. тяговых двигателей составляет 0,86—0,92, к. п. д. тепловозных генераторов — 0,92—0,94.

При изменении нагрузки отдельные виды потерь изменяются по-разному. Электрические потери $\Delta P_{эл}$ в обмотках, по которым проходит ток нагрузки $I_{я}$ (обмотках якоря, добавочных полюсов и компенсационной), изменяются пропорционально $I_{я}^2$, электрические потери в щеточном контакте $\Delta P_{щ.эл}$ — пропорционально $I_{я}$, а магнитные $\Delta P_{м}$ и механические $\Delta P_{мх}$ остаются практически постоянными — такими же, как и при холостом ходе, если напряжение машины U и частота ее вращения n не изменяются. По этому принципу все виды потерь можно разделить на две группы: постоянные потери $\Delta P_{пост} = \Delta P_{м} + \Delta P_{мх}$ и переменные $\Delta P_{пер} = \Delta P_{эл} + \Delta P_{щ.эл}$, которые можно считать пропорциональными квадрату тока нагрузки $I_{я}^2$ (обычно значение потерь $\Delta P_{щ.эл}$ мало по сравнению с $\Delta P_{эл}$).

Формула для определения к. п. д. принимает вид

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + \Delta P_{пер} + \Delta P_{пост}),$$

где P_2 — полезная мощность, отдаваемая машиной ($P_{эл}$ в генераторах и $P_{мх}$ — электродвигателях);

P_1 — потребляемая машиной мощность.

При холостом ходе полезная мощность $P_2 = 0$, поэтому к. п. д. тоже равен нулю (рис. 150). При малых нагрузках магнитные и механические потери, оставаясь постоянными, имеют относительно большое значение по сравнению с полезной мощностью и к. п. д. незначителен. В дальнейшем с увеличением нагрузки полезная мощность P_2 и к. п. д. увеличиваются и при некотором значении $P_{2кр}$ к. п. д. достигает максимального значения. Этот режим соответствует равенству $\Delta P_{пост} = \Delta P_{пер}$ (точка А на рис. 150). Обычно максимум к. п. д. имеет место при 75—85 % номинальной мощности. При дальнейшем возрастании нагрузки к. п. д. начинает падать, так как рост электрических потерь, пропорциональный квадрату

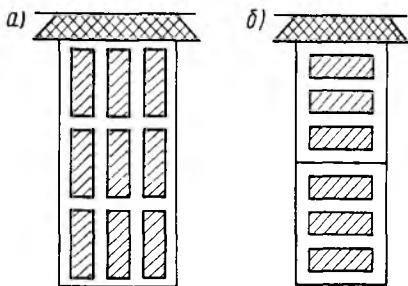


Рис. 149. Вертикальное (а) и горизонтальное (б) размещение проводников обмотки якоря в пазах

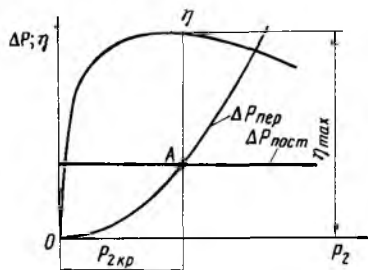


Рис. 150. Зависимости к.п.д. и потерь мощности от полезной мощности P_2

тока нагрузки I_2^2 , начинает превышать прирост полезной мощности, пропорциональный только первой степени от этого тока.

В зависимости от назначения локомотива целесообразно, чтобы максимальное к. п. д. электродвигателей было при различных нагрузках. Это обеспечивают при проектировании благодаря перераспределению отдельных видов потерь мощности. Например, для тяговых двигателей электропоездов, работающих в условиях частых пусков с большими токами, выгоднее, чтобы максимальный к. п. д. располагался в зоне больших нагрузок, что достигают путем снижения электрических потерь. Для двигателей электровозов и тепловозов, работающих преимущественно при токах, меньших номинального, стремятся, чтобы максимальный к. п. д. находился в зоне средних токов. Добиться этого можно уменьшением магнитных и механических потерь.

Нагревание электрических машин. Нагрузочная способность электрических машин в большинстве случаев определяется условиями нагревания, так как повышение температуры является главной причиной, ограничивающей мощность машины при длительных нагрузках. С увеличением нагрузки возрастают потери энергии в машине, увеличивается количество выделяющегося тепла и при чрезмерной нагрузке температура отдельных ее частей может превысить допустимые пределы.

Процесс нагревания и охлаждения в электрических машинах всех типов подчиняются общим законам, так как любую электрическую машину можно в первом приближении рассматривать как некоторое однородное тело. Тепло, выделяющееся в электрической машине, частично затрачивается на повышение температуры машины, а частично отдается в окружающую среду. Чем больше превышение температуры машины θ над температурой окружающей среды, тем энергичнее идет теплоотдача, поэтому при некотором определенном превышении температуры устанавливается тепловое равновесие; в машине выделяется столько тепла, сколько она отдает в окружающую среду.

Превышение температуры, при котором наступает тепловое равновесие, называется *установившимся превышением темпера-*

туры θ_{∞} . После достижения теплового равновесия машина может работать при данной нагрузке сколь угодно долгое время без дальнейшего повышения температуры.

При увеличении нагрузки машины возрастают потери мощности ΔP и количество выделяемого тепла, а также повышается значение θ_{∞} . Следовательно, *чем больше мощность, отдаваемая машиной, тем выше ее температура*. При снятии нагрузки температура машины постепенно снижается.

Для более наглядного представления о характере изменения превышения температуры θ во времени по опытным данным строят кривые нагревания и охлаждения электрических машин.

В процессе нагревания и охлаждения превышение температуры машины θ над температурой окружающей среды изменяется. При нагревании (например, при увеличении нагрузки) величина θ возрастает (кривая 1 на рис. 151, а) от некоторого начального значения θ_0 , постепенно приближаясь к установившемуся значению θ_{∞} . При охлаждении (например, при уменьшении нагрузки) величина θ уменьшается (кривая 2) до другого установившегося значения $\theta_{\infty 2}$.

Температура, при которой может нормально работать электрическая машина, строго ограничена теплостойкостью ее деталей. Особенно чувствительны к повышению температуры изоляционные материалы, применяемые в электрических машинах, в частности, изоляция проводов их обмоток. Поэтому тепловое равновесие в машине должно устанавливаться при такой температуре, которая не вызывает разрушение изоляции, однако постепенный износ изоляции (ее старение) неизбежен. Чем выше допустимая предельная температура отдельных частей, тем меньше срок службы электрической машины вследствие старения ее изоляции и тем менее надежна она в эксплуатации. С другой стороны, чем выше эта температура, тем больше можно нагрузить данную машину. Государственными стандартами на электрические машины установлены предельные значения температуры отдельных их деталей. Эти температуры выбраны на основании опытов. Их соблюдение позволяет обеспечить длительную (примерно 15—20 лет) и надежную работу машины при хорошем использовании материалов.

Нормируются превышения температуры различных частей электрической машины по отношению к температуре окружающей среды. Предельные превышения температуры определяются теплостойкостью изоляции, применяемой в электрической машине (классом изоляции, см. главу X).

Мощности продолжительного и часового режимов. В паспорте стационарных электрических машин обычно указывают их номинальную мощность продолжительного режима P_{∞} , т. е. такую мощность, которую машина может отдавать неограниченно долго, не перегреваясь ни в одной своей части свыше значений θ_{\max} , допускаемых нормами. При работе машины в режиме номинальной мощности $\theta_{\infty 1} = \theta_{\max}$ (рис. 151, б) тепловое равновесие практически достигается через 3—6 ч.

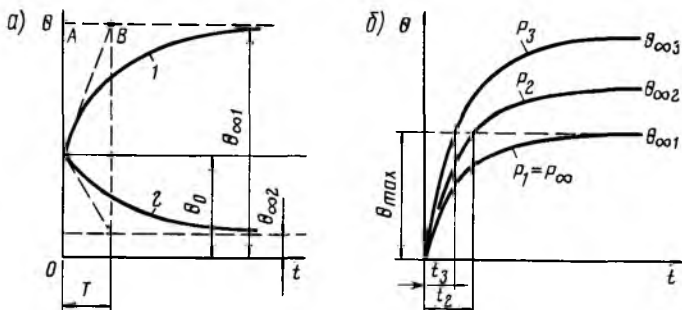


Рис. 151. Кривые нагревания и охлаждения электрической машины

Номинальная мощность P_{∞} зависит от теплостойкости применяемой изоляции и интенсивности охлаждения. Чем выше интенсивность охлаждения, тем большую мощность можно получить от данной машины без недопустимого превышения ее температуры. Поэтому в большей части электрических машин применяют принудительное охлаждение внутренних деталей воздухом, прогоняемым посторонним вентилятором (при независимой вентиляции) или вентилятором, насаженным на вал самой машины (при самовентиляции).

Таким образом, основными мероприятиями, обеспечивающими увеличение мощности, которую можно получить от электрических машин, является применение более теплостойкой изоляции и усиление интенсивности их охлаждения. Эти меры широко применяют в электромашиностроении, благодаря их использованию удалось в течение последних 50 лет уменьшить примерно в 2—4 раза массу и размеры электрических машин одинаковой мощности.

При работе машины с мощностями P_2 и P_3 , большими, чем P_{∞} (с перегрузкой), величины $\theta_{\infty 2}$ и $\theta_{\infty 3}$ будут больше максимально допустимого значения θ_{\max} (см. рис. 151, б). Следовательно, длительная работа машины при таких мощностях недопустима и время ее работы должно быть ограничено соответственно значениями t_2 и t_3 . При этом перегрузка должна быть снята прежде, чем температура машины достигнет предельного значения. Чем больше перегрузка, тем быстрее возрастает температура и тем скорее она достигает предельного значения. Поэтому небольшие перегрузки электрические машины могут выдерживать сравнительно длительное время, большие же перегрузки должны быть кратковременными.

При работе тяговых двигателей режим их нагрузки резко меняется в зависимости от профиля пути и массы поезда; эти условия работы тяговых двигателей не позволяют характеризовать их работоспособность одним значением номинальной мощности P_{∞} . Поэтому наряду с номинальной длительной мощностью для характеристики тяговых двигателей используют также понятия

часовой и максимальной мощностей. *Часовой мощностью $P_ч$ (мощностью часового режима)* называется мощность, при которой машина может работать в течение 1 ч с нормально действующей вентиляцией от холодного состояния, не перегреваясь свыше предельной температуры. Эта мощность, так же как и P_∞ , ограничивается условиями нагревания машины, она позволяет судить о временной перегрузочной способности двигателя. Токи, соответствующие номинальным мощностям P_∞ и $P_ч$, называются продолжительным и часовым токами тягового двигателя. В паспортах тяговых двигателей указывают обычно их часовую мощность.

Наибольшей мощностью тягового двигателя называется мощность, которую он может кратковременно отдавать (в течение 1 мин) без недопустимого искрения под щетками и возникновения кругового огня; следовательно, она ограничивается условиями коммутации машины. Отношение максимальной мощности к часовой называют *коэффициентом перегрузки*, или перегрузочной способностью машины. По стандарту на тяговые двигатели коэффициент перегрузки их должен быть не менее двух. Отношение $P_\infty/P_ч$ характеризует интенсивность вентиляции двигателя и называется *коэффициентом вентиляции*. У современных тяговых машин с независимой вентиляцией этот коэффициент составляет 0,8—0,9.

В эксплуатации работа тяговых двигателей с часовой мощностью может иметь место при движении поезда на подъемах. На руководящих подъемах, движение по которым продолжается менее получаса, реализуется мощность несколько бóльшая, чем часовая. При движении на наибольших незатяжных подъемах мощность двигателей может превышать часовую на 10—15 %. При пуске электровозов и тепловозов токи тяговых двигателей могут превышать часовую ток на 60—80 %.

§ 39. Особенности работы машин постоянного тока при пульсирующем напряжении

Пульсации напряжения и тока. На электрифицированных железных дорогах переменного тока широко используют электровозы и электропоезда с полупроводниковыми выпрямителями, от которых питаются тяговые двигатели постоянного тока. Эти выпрямители дают не постоянное, а пульсирующее напряжение, создающее соответствующую пульсацию тока в двигателе и его магнитного потока. Пульсирующее напряжение может быть представлено суммой двух составляющих: постоянной $U_{\text{пост}}$ (рис. 152, а), не меняющейся по величине и направлению, и переменной $U_{\text{пер}}$, которая представляет собой переменное напряжение, изменяющееся с частотой 100 Гц. Аналогично и пульсирующий ток может быть представлен как сумма постоянной $I_{\text{пост}}$ и переменной $I_{\text{пер}}$ составляющих (рис. 152, б).

Отношение максимального значения переменной составляющей напряжения к постоянной его составляющей (среднему значению

пульсирующего напряжения) называют коэффициентом пульсации напряжения:

$$K_u = U_{\text{пер max}} / U_{\text{пост.}}$$

Для выпрямителей, применяемых на э. п. с., этот коэффициент составляет около 0,77. Аналогично отношение максимального значения переменной составляющей тока к постоянной его составляющей называют коэффициентом пульсации тока:

$$K_i = I_{\text{пер max}} / I_{\text{пост.}}$$

Пульсация тока зависит от индуктивности цепи, по которой проходит выпрямленный ток, и от силы этого тока. При увеличении индуктивности цепи происходит сглаживание пульсирующего тока, т. е. уменьшается $I_{\text{пер max}}$.

Работа машины постоянного тока при пульсирующем напряжении вызывает увеличение потерь мощности и нагрева, снижение отдаваемой мощности и ухудшение условий коммутации.

Дополнительные потери и нагрев. При пульсации магнитного потока в остове двигателя возникают значительные вихревые токи, для которых массивный остов представляет малое сопротивление. Они увеличивают потери мощности в машине и вызывают дополнительный нагрев остова. При этом ухудшается отвод тепла от катушек полюсов и возрастает их температура. Одновременно возникают вихревые токи в проводниках обмотки якоря и обмоток главных и добавочных полюсов, по которым проходит пульсирующий ток. Все это уменьшает мощность, которую может развить двигатель, на 5—12 % по сравнению с работой его при постоянном напряжении.

Коммутация. В двигателе, работающем при пульсирующем напряжении, значительно ухудшаются условия коммутации. При

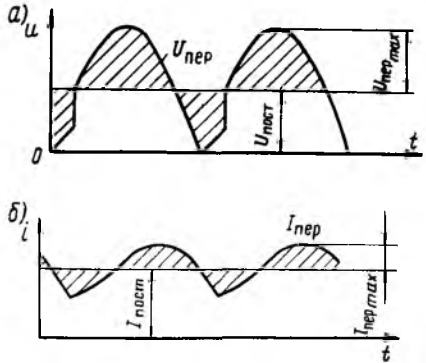


Рис. 152. Пульсации напряжения (а) и тока (б) тяговых двигателей при питании их от выпрямителя

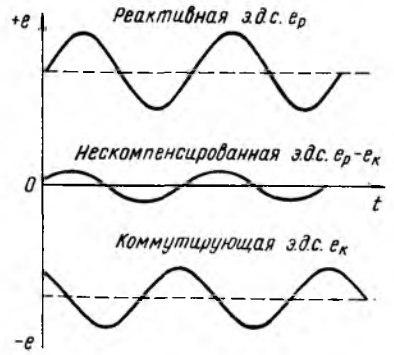


Рис. 153. Кривые реактивной и коммутационной э.д.с. в электродвигателе, работающем при пульсирующем напряжении

пульсирующем токе происходят пульсации реактивной э. д. с. e_p . Поэтому для ее компенсации необходимо, чтобы коммутирующая э. д. с. e_k изменялась точно в соответствии с изменениями реактивной э. д. с. e_p . Очевидно, для этого необходимо, чтобы магнитный поток добавочных полюсов изменялся в соответствии с пульсациями тока в цепи якоря. Однако создать такой пульсирующий поток в добавочных полюсах не представляется возможным, так как этому препятствуют вихревые токи; согласно правилу Ленца они замедляют изменение потока добавочных полюсов и сдвигают во времени изменения э. д. с. e_k относительно изменений э. д. с. e_p (рис. 153). В результате эффективность действия добавочных полюсов по компенсации реактивной э. д. с. уменьшается и в коммутируемой секции действует некоторая нескомпенсированная э. д. с. $e_p - e_k$, вызывающая искрение под щетками.

Кроме нескомпенсированной э. д. с. $e_p - e_k$, в коммутируемой секции 1 (рис. 154, а) из-за пульсаций потока главных полюсов индуцируется так называемая *трансформаторная э. д. с.* $e_{тр}$. Она не зависит от частоты вращения якоря и определяется лишь значением и частотой изменения переменной составляющей потока возбуждения. Без специальных мер по уменьшению пульсаций этого потока трансформаторная э. д. с. может достигать 1—1,5 В и будет существенно ухудшать процесс коммутации.

Способы улучшения коммутации. Для удовлетворительной работы тяговых двигателей, работающих при пульсирующем токе, применяют различные способы.

При заданной пульсации напряжения на выходе выпрямителя пульсация тока в тяговых двигателях зависит от индуктивности их цепи. Однако собственная индуктивность двигателей недостаточна для значительного снижения пульсаций тока. Ее можно увеличить, включая последовательно в цепь двигателей сглаживающие реакторы, конструктивно выполненные в виде катушек со стальными сердечниками. Однако устанавливаемые на электровозах реакторы не в состоянии уменьшить пульсацию тока до такой степени, чтобы она не оказывала существенного влияния на работу двигателей. Для этого реактор должен был бы иметь очень большую индуктивность, при которой его масса и габаритные размеры были бы велики. Поэтому реакторы обеспечивают уменьшение коэффициента пульсации тока до 0,2—0,25.

Для уменьшения пульсации магнитного потока возбуждения в тяговых двигателях, работающих при пульсирующем токе, параллельно обмотке возбуждения двигателя включают шунтирующий резистор $R_{ш}$ (рис. 154, б), сопротивление которого примерно в 10—15 раз больше сопротивления самой обмотки. Этот резистор оказывает неодинаковое влияние на переменную и постоянную составляющие тока. Постоянная составляющая тока $I_{пост}$ распределяется между обмоткой и резистором обратно пропорционально их сопротивлениям. Это вызывает незначительное (примерно на 7—10 %) уменьшение тока возбуждения и магнитного потока машины. Переменная же составляющая тока $I_{пер}$ проходит в ос-

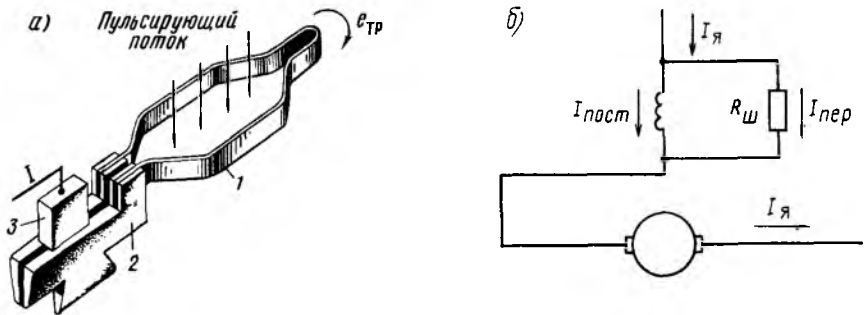


Рис. 154. Трансформаторная э.д.с. в коммутруемой секции (а) и схема включения шунтирующего резистора для уменьшения пульсаций магнитного потока электродвигателя (б):

1 — коммутруемая секция; 2 — коллекторные пластины; 3 — щетка

новном по резистору, так как обмотка возбуждения обладает большой индуктивностью и представляет для этого тока весьма большое сопротивление. Поэтому ток, проходящий через обмотку возбуждения, и создаваемый им магнитный поток практически не будут иметь никаких пульсаций.

Чтобы уменьшить вредное действие вихревых токов на процесс коммутации, сердечники добавочных полюсов тяговых двигателей, работающих при пульсирующем токе, изготавливают шихтованными из листов электротехнической стали и увеличивают воздушный зазор в магнитной цепи добавочных полюсов (используя дополнительную диамагнитную прокладку между полюсом и остовом). Эти мероприятия позволяют уменьшить сдвиг во времени пульсаций коммутрующей э. д. с. e_k относительно э. д. с. e_p .

В современных тяговых двигателях электровозов переменного тока обычно применяют компенсационную обмотку. Она позволяет существенно уменьшить переменную составляющую реактивной э. д. с., так как поток компенсационной обмотки направлен против потока якоря и вихревые токи воздействуют на них одинаково (эти потоки замыкаются по одной и той же магнитной цепи). Кроме того, компенсационная обмотка существенно снижает максимальное значение напряжения, действующего между соседними коллекторными пластинами, что повышает устойчивость двигателя против возникновения кругового огня.

Контрольные вопросы

1. Из каких основных частей состоит машина постоянного тока?
2. Каково назначение и устройство коллектора?
3. От чего зависят э. д. с. и электромагнитный момент машины?
4. Какие виды обмоток якоря применяют и каковы их особенности?
5. Какие схемы и характеристики имеют генераторы с независимым, параллельным и смешанным возбуждением?
6. Как регулируют напряжение генераторов?
7. Какие схемы и характеристики у двигателей с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением?
8. Как осуществляют пуск двигателей и регулирование частоты вращения?

ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА

§ 40. Электрический ток в жидких проводниках

Химические источники тока представляют собой устройства, в которых энергия химических реакций преобразуется в электрическую энергию. К химическим источникам тока относятся гальванические элементы и аккумуляторы.

Прохождение тока через жидкие проводники. В жидких проводниках (электролитах) происходит процесс электролитической диссоциации, т. е. непрерывный самопроизвольный распад молекул на составные части. Например, при растворении медного купороса CuSO_4 в воде его молекулы распадаются на положительные ионы меди Cu и отрицательные ионы SO_4 (так называемый кислотный остаток). В электролите происходит беспорядочное движение ионов и молекул: ионы соединяются, образуют молекулы, вновь распадаются и т. д. В целом такой раствор является электрически нейтральным, так как в нем содержится одинаковое количество положительных и отрицательных ионов. Однако если жидкий проводник, например раствор медного купороса, поместить в электрическое поле (рис. 155), созданное при помощи двух электродов — заряженных медных пластин — анода 2 и катода 3, то на положительные и отрицательные ионы начнут дей-

ствовать электрические силы. При этом положительно заряженные ионы меди Cu^+ устремятся к пластине, соединенной с отрицательным полюсом источника тока (катоде 3), а отрицательно заряженные ионы кислотного остатка SO_4^- — к пластине, соединенной с положительным полюсом источника тока (аноду 2). Это упорядоченное движение ионов представляет собой электрический ток в жидких проводниках. Следовательно, ток в жидких проводниках существенно отличается от тока в металлах, так как вместо легких электронов здесь движутся в тысячи и десятки тысяч раз более тяжелые положительные и отрицательные ионы.

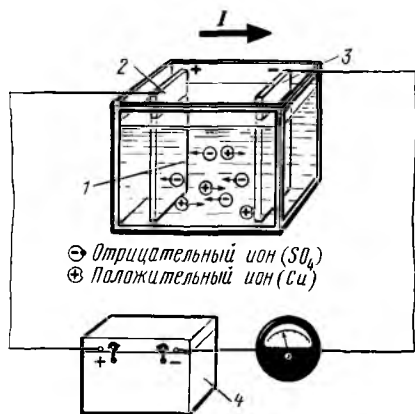


Рис. 155. Схема прохождения электрического тока через электролит:

1 — электролит; 2 — анод; 3 — катод; 4 — источник электрической энергии

§ 41. Понятие о гальванических элементах

Возникновение э. д. с. в гальваническом элементе. Простейший медно-цинковый гальванический элемент Вольта (рис. 156) состоит из двух пластин (электродов): цинковой 2 (катода) и медной 1 (анода), опущенных в электролит 3, представляющий собой водный раствор серной кислоты H_2SO_4 . При растворении серной кислоты в воде происходит процесс электролитической диссоциации, т. е. часть молекул кислоты распадается на положительные ионы водорода H_2^+ и отрицательные ионы кислотного остатка SO_4^- . Одновременно происходит растворение цинкового электрода в серной кислоте. При растворении этого электрода положительные ионы цинка Zn^+ переходят в раствор и соединяются с отрицательными ионами SO_4^- кислотного остатка, образуя нейтральные молекулы сернокислого цинка $ZnSO_4$. При этом на цинковом электроде будут скапливаться оставшиеся свободные электроны, вследствие чего этот электрод приобретает отрицательный заряд. В электролите же образуется положительный заряд ввиду нейтрализации части отрицательных ионов SO_4^- . Таким образом, в пограничном слое между цинковым электродом и электролитом возникает некоторая разность потенциалов и создается электрическое поле, которое препятствует дальнейшему переходу положительных ионов цинка в электролит; при этом растворение цинкового электрода прекращается. Медный электрод практически не растворяется в электролите и приобретает тот же положительный потенциал, что и электролит. Разность потенциалов медного φ_{Cu} и цинкового φ_{Zn} электродов при разомкнутой внешней цепи представляет собой э. д. с. E рассматриваемого гальванического элемента.

Э. д. с., создаваемая гальваническим элементом, зависит от химических свойств электролита и металлов, из которых выполнены электроды. Обычно подбирают такие комбинации металлов и электролита, при которых э. д. с. наибольшая, однако почти во всех применяемых элементах она не превышает 1,1—1,5 В.

При подключении к электродам гальванического элемента какого-либо приемника электрической энергии (см. рис. 156) по внешней цепи начнет протекать ток I от медного электрода (положительный полюс элемента) к цинковому (отрицательный полюс). В электролите в это время начнется движение положительных ионов цинка Zn^+ и водорода H_2^+ от цинковой пластины к медной и отрицательных ионов кислотного остатка SO_4^- от медной пластины к цинковой. В результате нарушится равновесие электрических зарядов между электродами и электролитом, вследствие чего в электролит с катода снова начнут ступать положительные ионы цинка, поддерживая на этом электроде отрицательный заряд; на медном же электроде будут осаждаться новые положительные ионы. Таким образом, между анодом и катодом все время будет существовать разность потенциалов, необходимая для прохождения тока по электрической цепи.

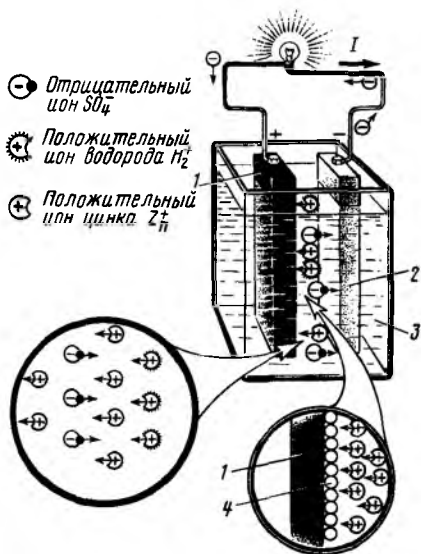


Рис. 156. Устройство медно-цинкового гальванического элемента

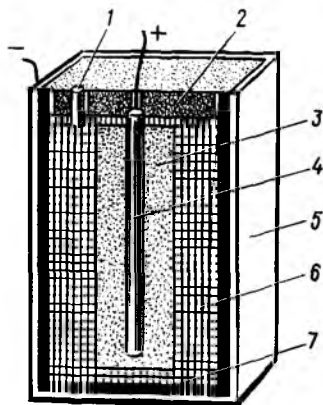


Рис. 157. Устройство сухого угольно-цинкового гальванического элемента:

1 — газоотводная трубка; 2 — смоляная заливка; 3 — деполаризатор; 4 — угольный электрод; 5 — картонный футляр; 6 — тестообразная паста (сухой электролит); 7 — цинковый электрод

Поляризация. Рассмотренный гальванический элемент Вольта не может длительно работать вследствие возникающего в нем вредного явления поляризации. Сущность этого явления заключается в следующем. Положительные ионы водорода H^+ , направляющиеся к медному электроду 1, взаимодействуют с имеющимися на нем свободными электронами и превращаются в нейтральные атомы водорода. Эти атомы покрывают поверхность медного электрода сплошным слоем 4, что ухудшает работу гальванического элемента по двум причинам. Во-первых, между слоем водорода и электролитом возникает дополнительная э. д. с. (э. д. с. поляризации), направленная против основной э. д. с. элемента, поэтому его результирующая э. д. с. E уменьшается. Во-вторых, слой водорода отделяет медный электрод от электролита и препятствует подходу к нему новых положительных ионов. При этом резко возрастает внутреннее сопротивление гальванического элемента.

Для борьбы с поляризацией во всех гальванических элементах вокруг положительного электрода располагают специальные вещества — *деполаризаторы*, которые легко вступают в химическую реакцию с водородом. Они поглощают подходящие к положительному электроду ионы водорода, не позволяя им осаждаться на этом электроде.

Промышленность выпускает гальванические элементы различных типов (с различными электродами и электролитами), имеющие разное конструктивное выполнение. Наиболее распростра-

нены угольно-цинковые элементы, в которых угольный и цинковый электроды погружены в водный раствор хлористого аммония (нашатыря) или поваренной соли, а в качестве деполяризатора применяется перекись марганца.

Сухие элементы. Разновидностью гальванического элемента является сухой элемент (рис. 157), применяемый в батареях карманных электрофонарей, радиоприемниках и пр. В этом элементе жидкий электролит заменен тестообразной массой, состоящей из раствора нашатыря, смешанного с древесными опилками и крахмалом, а цинковый электрод выполнен в виде цилиндрической коробки, используемой в качестве сосуда, в котором помещают электролит и угольный электрод. Для отвода газов, образующихся при работе элемента, в нем предусматривают газоотводную трубку.

Емкость. Способность химических источников тока отдавать электрическую энергию характеризуется их емкостью. *Под емкостью понимают количество электричества, запасенного в гальванических элементах или аккумуляторах.* Емкость измеряется в ампер-часах. Номинальная емкость химического источника тока равна произведению номинального (расчетного) разрядного тока (в амперах), отдаваемого химическим источником тока при подключении к нему нагрузки, на время (в часах) до того момента, пока его э. д. с. не достигнет минимально допустимого значения. При длительной работе количество электроэнергии, которое может отдать гальванический элемент, уменьшается, так как постепенно расходуются имеющиеся в нем активные химические вещества, обеспечивающие возникновение э. д. с.; при этом уменьшаются э. д. с. элемента и его емкость и возрастает его внутреннее сопротивление.

Гальванический элемент обладает номинальной емкостью только в том случае, если после его изготовления прошло сравнительно небольшое время. Емкость гальванического элемента постепенно уменьшается, даже если он не отдает электрической энергии (после 10—12 месяцев хранения емкость сухих элементов уменьшается на 20—30 %). Это объясняется тем, что химические реакции в таких элементах протекают непрерывно и запасенные в них активные химические вещества все время расходуются.

Уменьшение емкости химических источников тока с течением времени называются *саморазрядом*. Емкость гальванического элемента снижается также при разряде его большим током.

§ 42. Кислотные аккумуляторы

Принцип действия. *Аккумулятором* называется химический источник тока, который способен накапливать (аккумулировать) в себе электрическую энергию и по мере необходимости отдавать ее во внешнюю цепь. Накапливание в аккумуляторе электрической энергии происходит при пропускании по нему тока от

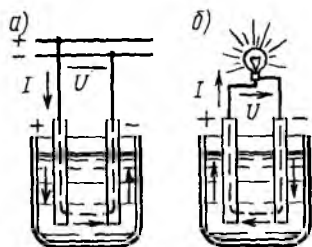


Рис. 158. Заряд (а) и разряд (б) аккумулятора

постороннего источника (рис. 158,а). Этот процесс, называемый *зарядом аккумулятора*, сопровождается превращением электрической энергии в химическую, в результате чего аккумулятор сам становится источником тока. При разряде аккумулятора (рис. 158,б) происходит обратное превращение химической энергии в электрическую. Аккумулятор обладает большим преимуществом по сравнению с гальваническим элементом. Если элемент разрядился, то он приходит в полную негодность; аккумулятор же после разряда может быть вновь заряжен и будет служить источником электрической энергии. В зависимости от рода электролита аккумуляторы разделяют на кислотные и щелочные.

На локомотивах и электропоездах наибольшее распространение получили щелочные аккумуляторы, которые имеют значительно больший срок службы, чем кислотные. Кислотные аккумуляторы ТН-450 применяют только на тепловозах, они имеют емкость 450 А·ч, номинальное напряжение — 2,2 В. Аккумуляторная батарея 32 ТН-450 состоит из 32 последовательно соединенных аккумуляторов; буква Т означает, что батарея установлена на тепловозе, буква Н — тип положительных пластин (намазные).

Устройство. В кислотном аккумуляторе электродами являются свинцовые пластины, покрытые так называемыми активными массами, которые взаимодействуют с электролитом при электрохимических реакциях в процессе заряда и разряда. Активной массой положительного электрода (анода) служит перекись свинца PbO_2 , а активной массой отрицательного электрода (катода) — чистый (губчатый) свинец Pb . Электролитом является 25—34 %-ный водный раствор серной кислоты.

Пластины аккумулятора могут иметь конструкцию поверхностного или намазного типа. Пластины поверхностного типа отливают из свинца; поверхность их, на которой происходят электрохимические реакции, увеличена благодаря наличию ребер, борозд и т. п. Их применяют в стационарных аккумуляторных батареях и некоторых батареях пассажирских вагонов.

В аккумуляторных батареях тепловозов применяют пластины намазного типа (рис. 159,а). Такие пластины имеют остов из сплава свинца с сурьмой, в котором устроен ряд ячеек, заполняемых пастой.

Ячейки пластин после заполнения пастой закрывают свинцовыми листами с большим количеством отверстий. Эти листы

предотвращают возможность выпадания из пластин активной массы и не препятствуют в то же время доступу к ней электролита.

Исходным материалом для изготовления пасты для положительных пластин служит порошок свинца Pb , а для отрицательных — порошок перекиси свинца PbO_2 , которые замешиваются на водном растворе серной кислоты. Строение активных масс в таких пластинах пористое; благодаря этому в электрохимических реакциях участвуют не только поверхностные, но и глубоколежащие слои электродов аккумулятора.

Для повышения пористости и уменьшения усадки активной массы в пасту добавляют графит, сажу, кремний, стеклянный порошок, сернокислый барий и другие инертные материалы, называемые *расширителями*. Они не принимают участия в электрохимических реакциях, но затрудняют слипание (спекание) частиц свинца и его окислов и предотвращают этим уменьшение пористости.

Намазные пластины имеют большую поверхность соприкосновения с электролитом и хорошо им пропитываются, что способствует уменьшению массы и размеров аккумулятора и позволяет получать при разряде большие токи.

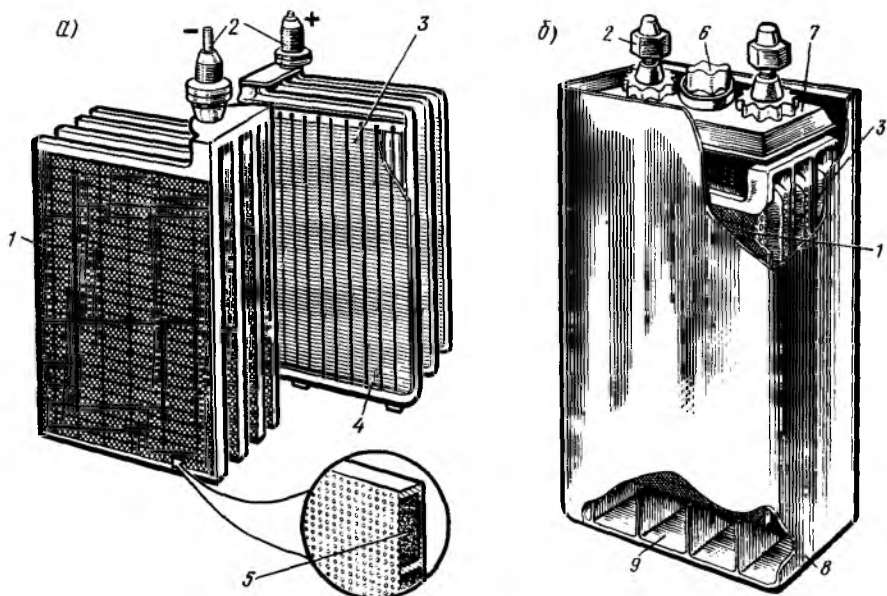


Рис. 159. Устройство пластин (а) и общий вид (б) кислотного аккумулятора: 1 — блок намазных отрицательных пластин; 2 — выводные штыри; 3 — блок папцирных положительных пластин; 4 — папцирь; 5 — активная масса; 6 — отверстие с пробкой для заливки электролита; 7 — крышка; 8 — эбонитовый сосуд; 9 — пространство для осаждения шлама

При изготовлении аккумуляторов пластины подвергают специальным зарядно-разрядным циклам. Этот процесс носит название *формовки аккумулятора*. В результате формовки паста положительных пластин электрохимическим путем превращается в перекись (двуокись) свинца PbO_2 и приобретает коричневый цвет. Паста отрицательных пластин при формовке переходит в чистый свинец Pb , имеющий пористую структуру и называемый поэтому губчатым; отрицательные пластины приобретают серый цвет.

В некоторых аккумуляторах применены положительные пластины панцирного типа. В них каждая положительная пластина заключена в специальный панцирь (чехол) из эбонита или стеклоткани. Панцирь надежно удерживает активную массу пластины от осыпания при тряске и толчках; для сообщения же активной массы пластин с электролитом в панцире делают горизонтальные прорезы шириной около 0,725 мм.

Для предотвращения замыкания пластин посторонними предметами (щупом для измерения уровня электролита, устройством для заливки электролита и др.) пластины в некоторых аккумуляторах покрывают полихлорвиниловой сеткой.

Для увеличения емкости в каждый аккумулятор устанавливают несколько положительных и отрицательных пластин; одноименные пластины соединяют параллельно в общие блоки, к которым приваривают выводные штыри. Блоки положительных и отрицательных пластин обычно устанавливают в эбонитовом аккумуляторном сосуде (рис. 159, б) так, чтобы между каждыми двумя

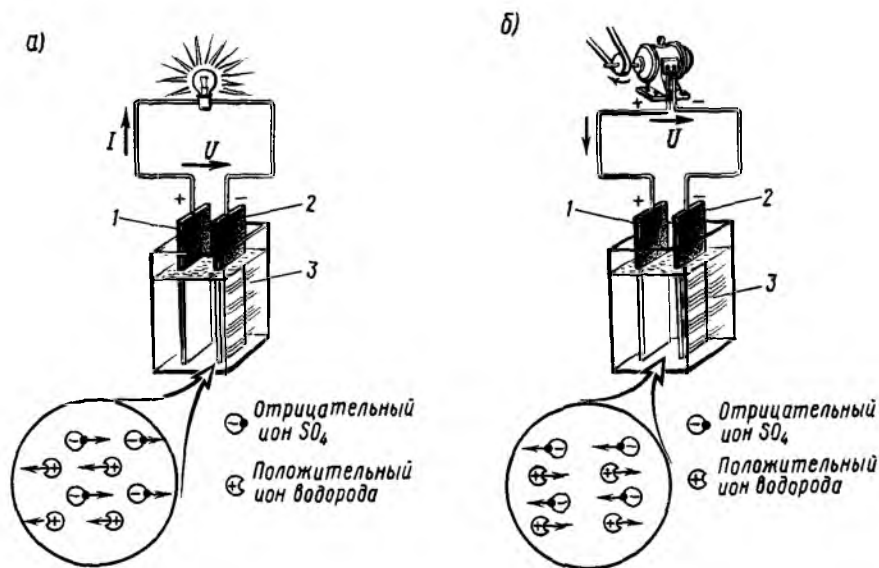


Рис. 160. Прохождение через электролит положительных и отрицательных ионов при разряде (а) и заряде (б) кислотного аккумулятора

пластинами одной полярности располагались пластины другой полярности. По краям аккумулятора ставят отрицательные пластины, так как положительные пластины при установке по краям склонны к короблению. Пластины отделяют одну от другой сепараторами, выполненными из микропористого эбонита, полихлорвинила, стекловойлока или другого изоляционного материала. Сепараторы предотвращают возможность короткого замыкания между пластинами при их короблении.

Пластины устанавливают в аккумуляторном сосуде так, чтобы между их нижней частью и дном сосуда имелось некоторое свободное пространство. В этом пространстве скапливается свинцовый осадок (шлам), образующийся вследствие отпадания отработавшей активной массы пластин в процессе эксплуатации.

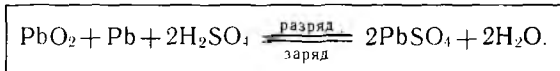
Разряд и заряд. При разряде аккумулятора (рис. 160, *а*) положительные ионы H_2^+ и отрицательные ионы кислотного остатка SO_4^- , на которые распадаются молекулы серной кислоты H_2SO_4 электролита 3, направляются соответственно к положительному 1 и отрицательному 2 электродам и вступают в электрохимические реакции с их активными массами. Между электродами возникает разность потенциалов около 2 В, обеспечивающая прохождение электрического тока при замыкании внешней цепи. В результате электрохимических реакций, возникающих при взаимодействии ионов водорода H_2^+ с перекисью свинца PbO_2 положительного электрода и ионов сернокислого остатка SO_4^- со свинцом Pb отрицательного электрода, образуется сернокислый свинец $PbSO_4$ (сульфат свинца), в который превращаются поверхностные слои активной массы обоих электродов. Одновременно при этих реакциях образуется некоторое количество воды, поэтому концентрация серной кислоты понижается, т. е. плотность электролита уменьшается.

Аккумулятор может разряжаться теоретически до полного превращения активных масс электродов в сернокислый свинец и истощения электролита. Однако практически разряд прекращают гораздо раньше. Образующийся при разряде сернокислый свинец представляет собой соль белого цвета, плохо растворяющуюся в электролите и обладающую низкой электропроводностью. Поэтому разряд ведут не до конца, а только до того момента, когда в сернокислый свинец перейдет около 35 % активной массы. В этом случае образовавшийся сернокислый свинец равномерно распределяется в виде мельчайших кристалликов в оставшейся активной массе, которая сохраняет еще достаточную электропроводность, чтобы обеспечить напряжение между электродами 1,7—1,8 В.

Разряженный аккумулятор подвергают заряду, т. е. присоединяют к источнику тока с напряжением, большим напряжения аккумулятора. При заряде (рис. 160, *б*) положительные ионы водорода H_2^+ перемещаются к отрицательному электроду 2, а отрицательные ионы сернокислого остатка SO_4^- — положительному электроду 1 и вступают в химическое взаимодействие с суль-

фатом свинца $PbSO_4$, покрывающим оба электрода. В процессе возникающих электрохимических реакций сульфат свинца $PbSO_4$ растворяется и на электродах вновь образуются активные массы: перекись свинца PbO_2 на положительном электроде и губчатый свинец Pb — на отрицательном. Концентрация серной кислоты при этом возрастает, т. е. плотность электролита увеличивается.

Электрохимические реакции при разряде и заряде аккумулятора могут быть выражены уравнением



Читая это уравнение слева направо, получаем процесс разряда, справа налево — процесс заряда.

Номинальный разрядный ток численно равен $0,1C_{ном}$, максимальный при запуске дизеля (стартерный режим) — примерно $3C_{ном}$, зарядный ток — $0,2C_{ном}$, где $C_{ном}$ — номинальная емкость.

Полностью заряженный аккумулятор имеет э. д. с. около 2,2 В. Таково же приблизительно и напряжение на его зажимах, так как внутреннее сопротивление аккумулятора весьма мало. При разряде напряжение аккумулятора довольно быстро падает до 2 В, а затем медленно понижается до 1,8—1,7 В (рис. 161), при этом напряжении разряд прекращают во избежание повреждения аккумулятора. Если разряженный аккумулятор оставить на некоторое время в бездействии, то напряжение его снова восстанавливается до среднего значения 2 В. Это явление носит название «отдыха» аккумулятора. При нагрузке подобного «отдохнувшего» аккумулятора напряжение быстро понижается, поэтому измерение напряжения аккумулятора без нагрузки не дает правильного суждения о степени разряда.

При заряде напряжение аккумулятора быстро поднимается до 2,2 В, а затем медленно повышается до 2,3 В и, наконец, снова довольно быстро возрастает до 2,6—2,7 В. При 2,4 В начинают выделяться пузырьки газа, образующегося в результате разложения воды на водород и кислород. При 2,5 В оба электрода выделяют сильную струю газа, а при 2,6—2,7 В аккумулятор начинает как бы кипеть, что служит признаком окончания заряда. При отключении аккумулятора от источника зарядного тока напряжение его быстро снижается до 2,2 В.

Уход за аккумуляторами. Кислотные аккумуляторы быстро теряют емкость или даже приходят в полную негодность при

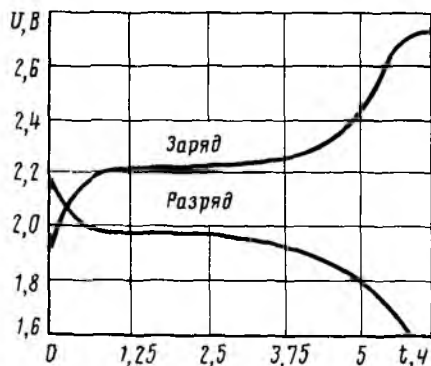


Рис. 161. Кривые напряжения кислотного аккумулятора при заряде и разряде

неправильной эксплуатации. В них происходит саморазряд, в результате которого они теряют свою емкость (примерно 0,5—0,7 % в сутки). Для компенсации саморазряда неработающие аккумуляторные батареи необходимо периодически подзаряжать. При загрязнении электролита, а также крышек аккумуляторов, их выводов и междуэлементных соединений происходит повышенный саморазряд, быстро истощающий батарею.

Батарея аккумулятора должна быть всегда чистой, а выводы для предохранения от окисления покрыты тонким слоем технического вазелина. Периодически нужно проверять уровень электролита и степень заряженности аккумуляторов. Аккумуляторы должны периодически заряжаться. Хранение незаряженных аккумуляторов недопустимо. При неправильной эксплуатации аккумуляторов (разряде ниже 1,8—1,7 В, систематическом недозаряде, неправильном проведении заряда, длительном хранении незаряженного аккумулятора, понижении уровня электролита, чрезмерной плотности электролита) происходит повреждение их пластин, называемое *сульфатацией*. Это явление заключается в переходе мелкокристаллического сульфата свинца, покрывающего пластины при разряде, в нерастворимые крупнокристаллические химические соединения, которые при заряде не переходят в перекись свинца PbO_2 и свинец Pb . При этом аккумулятор становится непригодным для эксплуатации.

§ 43. Щелочные аккумуляторы

Устройство. Наиболее распространены никель-железные и никель-кадмиевые щелочные аккумуляторы. Их широко применяют на э. п. с., тепловозах и пассажирских вагонах. На тепловозах устанавливают аккумуляторную батарею 46ТПНЖ-550, состоящую из 46 последовательно соединенных никель-железных аккумуляторов емкостью 550 А·ч [буква Т — означает, что батарея установлена на тепловозах; П — тип положительных пластин (панцирные)]. Для тепловозов применяют усовершенствованные аккумуляторы ТПНЖК (буква К означает, что электроды комбинированные). На электровозах отечественной постройки применяют батарею 42НК-125, состоящую из 42 последовательно соединенных никель-кадмиевых аккумуляторов емкостью 125 А·ч, а на электропоездах — батарею 90НК-55, состоящую из 90 последовательно соединенных никель-кадмиевых аккумуляторов емкостью 55 А·ч, на электровозах ЧС — батареи 40НКТ-120 и 40НКТ-160, состоящие из 40 последовательно соединенных никель-кадмиевых аккумуляторов емкостью 120 и 160 А·ч. Номинальное напряжение всех щелочных аккумуляторов 1,2 В.

В никель-железных и никель-кадмиевых аккумуляторах активная масса положительного электрода в заряженном состоянии состоит из гидрата окиси никеля $NiOОН$, к которому добавляют

графит и окись бария. Графит увеличивает электропроводность активной массы, а окись бария — срок службы электрода. Активная масса отрицательного электрода никель-железного аккумулятора состоит из порошкового железа Fe и его окислов с добавкой сернокислого никеля и сернистого железа, а никель-кадмиевого аккумулятора — из смеси порошков кадмия Cd и железа Fe. Электролитом служит 20 %-ный раствор едкого калия КОН с примесью моногидрата лития (20—30 г/л). Эта примесь увеличивает срок службы аккумулятора.

Промышленность выпускает никель-железные аккумуляторы (НЖ) и никель-кадмиевые (НК). Оба электрода в этих аккумуляторах изготовляют в виде стальных никелированных рамок (рис. 162 и 163), в пазы которых впрессованы наполненные активной массой пакеты (ламели) из никелированной жести с большим количеством мелких отверстий для доступа электролита к активной массе. В аккумуляторах НК каждая отрицательная пластина расположена между двумя положительными, в аккумуляторах НЖ каждая положительная пластина — между двумя отрицательными. Для предотвращения короткого замыкания между ними устанавливают сепараторы, выполненные в виде эбонитовых стержней или полихлорвиниловых сеток. В аккумуляторах ТПНЖ и ТПНЖК применяют панцирные положительные пластины. Каждая такая пластина заключена в специальный панцирь (чехол). Корпус, в который помещают пластины и электролит, также изготовляют из никелированной жести. Он имеет приваренную крышку с отверстиями для выводных штырей, для выхода газов

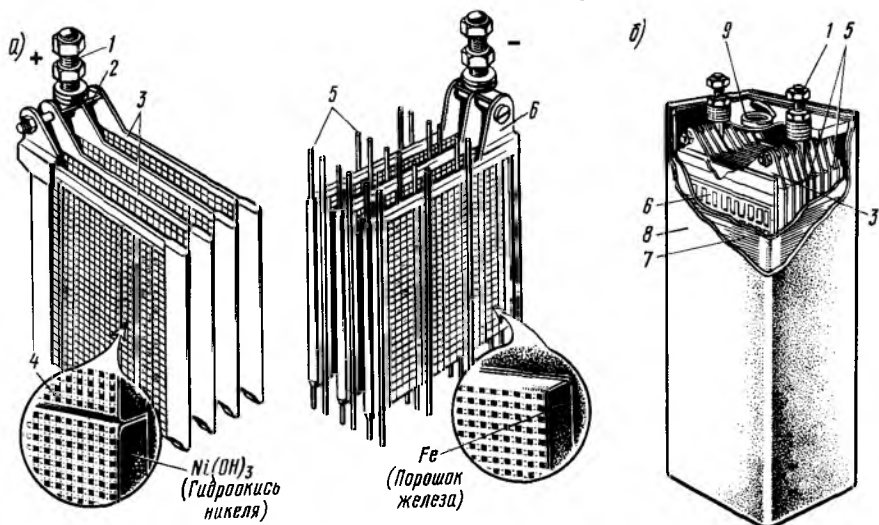


Рис. 162. Полублоки отрицательных и положительных пластин (а) и общий вид (б) никель-железного аккумулятора ТПНЖ, применяемого на тепловозах:

1 — выводной штырь; 2 — шпилька; 3 — положительные пластины; 4 — ламели; 5 — сепараторы; 6 — отрицательные пластины; 7 — корпус; 8 — резиновый чехол; 9 — отверстие с пробкой для заливки электролита

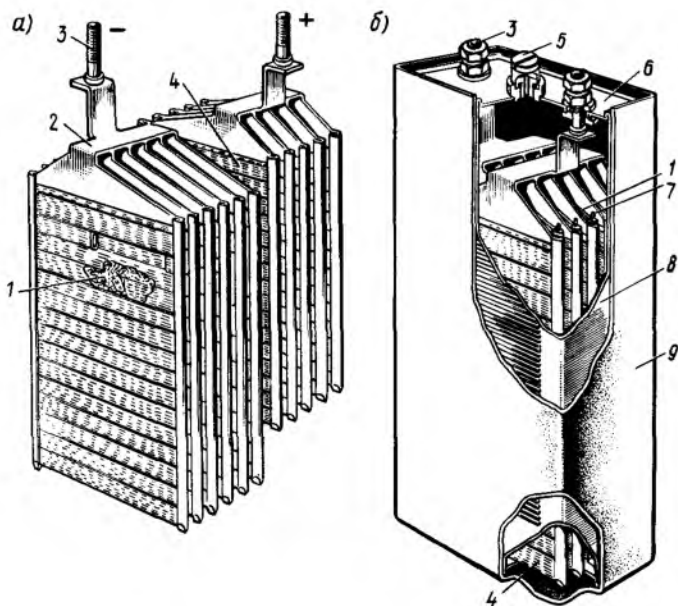


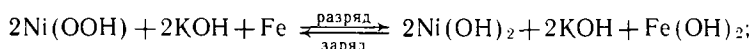
Рис. 163. Подушки положительных и отрицательных пластин (а) и общий вид (б) никель-кадмиевого аккумулятора НКН-100 для э.п.с.:

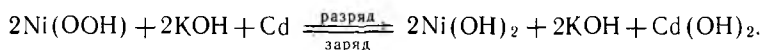
1 — отрицательные пластины; 2 — соединительный мостик; 3 — выводной штырь; 4 — положительные пластины; 5 — отверстие с пробкой для заливки электролита; 6 — крышка; 7 — сепаратор; 8 — корпус; 9 — резиновый чехол

и заливки электролита. Для придания корпусу механической прочности стенки его выполняют гофрированными. Корпус помещают в резиновый чехол, обеспечивающий изоляцию аккумуляторов друг от друга и от ящика, в котором устанавливают батарею.

Разряд и заряд. При разряде щелочного аккумулятора гидрат окиси никеля NiOOH на положительном электроде, взаимодействуя с ионами электролита, переходит в гидрат закиси никеля Ni(OH)_2 , а железо или кадмий отрицательного электрода превращается соответственно в гидрат окиси железа Fe(OH)_2 или гидрат окиси кадмия CdOH_2 . Между электродами возникает разность потенциалов около 1,45 В, обеспечивающая протекание тока по внешней цепи и внутри аккумуляторов.

При заряде аккумулятора под действием электрической энергии, подводимой от внешнего источника тока, происходит окисление активной массы положительных пластин, сопровождаемое переходом гидрата закиси никеля Ni(OH)_2 в гидрат окиси никеля NiOOH . В то же время активная масса отрицательных пластин восстанавливается с образованием железа Fe или кадмия Cd . Электрохимические реакции при разряде и заряде никель-железного аккумулятора могут быть выражены уравнением





Номинальный разрядный ток численно равен $0,2 C_{\text{ном}}$, максимальный при запуске дизеля — $(3 \div 4) C_{\text{ном}}$, зарядный ток — $0,25 C_{\text{ном}}$, где $C_{\text{ном}}$ — номинальная емкость.

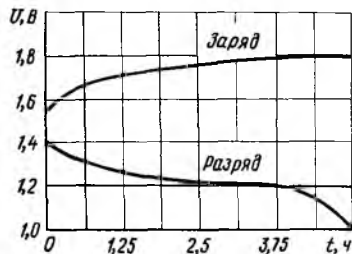
Положительным качеством щелочного аккумулятора является то, что все компоненты, образующиеся в процессе заряда и разряда, практически нерастворимы в электролите и не вступают в какие-либо химические реакции. Электролит в процессе электрохимических реакций не расходуется, поэтому плотность его не изменяется. Это позволяет обходиться сравнительно небольшими количествами электролита, что делает эти аккумуляторы более компактными, чем кислотные.

Для правильной работы никель-железного аккумулятора отрицательный электрод (губчатое железо) должен иметь большую массу, чем положительный (гидрат окиси кадмия). Поэтому отрицательных пластин берут на одну больше, чем положительных. В сборном блоке никель-железного аккумулятора крайние пластины отрицательные; они электрически соединены с корпусом. В никель-кадмиевых аккумуляторах, наоборот, положительная активная масса должна занимать больший объем, чем отрицательная. Поэтому у них крайние пластины положительные и электрически соединены с корпусом.

Полностью заряженный аккумулятор имеет э. д. с. около 1,45 В. Вследствие большого внутреннего сопротивления его напряжение при разряде значительно меньше этого значения, а при заряде значительно больше. При разряде напряжение аккумулятора довольно быстро падает до 1,3 В, а затем медленно уменьшается до 1 В (рис. 164); при этом напряжении разряд следует прекращать. Среднее расчетное напряжение при разряде составляет 1,25 В. *Разряжать щелочные аккумуляторы ниже установленного конечного напряжения нельзя, так как это приведет к безвозвратной потере емкости и уменьшению срока службы.* При заряде напряжение с 1,55 В быстро поднимается до 1,75 В, а затем медленно повышается до 1,8 В. Заряд щелочного аккумулятора ведут до тех пор, пока не будет сообщено требуемое количество ампер-часов (согласно паспортным данным). Заряд щелочного аккумулятора осуществляется током, равным одной четвертой его номинальной емкости, при этом аккумулятору сообщается 150 % емкости.

Выделение газа у щелочных аккумуляторов не является признаком конца заряда, однако при бурном газовыделении необходимо уменьшить зарядный ток. Щелочные аккумуляторы лучше перезарядить, чем недозарядить, так как неполные заряды способствуют преждевременному выходу их из строя. Повышение

Рис. 164. Кривые напряжения щелочного аккумулятора при заряде и разряде



температуры выше 45°C также приводит к разрушению активной массы электродов.

Особенности эксплуатации. Уход за щелочными аккумуляторами в принципе такой же, как и за кислотными. Необходимо периодически проверять уровень электролита и степень заряженности аккумулятора. Аккумуляторы должны содержаться в чистоте и периодически заряжаться.

Щелочные аккумуляторы имеют ряд преимуществ перед кислотными. Они могут долгое время находиться в полужаряженном и даже в полностью разряженном состоянии, что совершенно недопустимо для кислотных. Кроме того, щелочные аккумуляторы не выходят из строя вследствие действия низких температур. Щелочные аккумуляторы имеют большую перегрузочную способность, т. е. могут работать с большими токами при разрядах и зарядах. Благодаря большому внутреннему сопротивлению кратковременное короткое замыкание и глубокие разряды не выводят из строя эти аккумуляторы. Для них характерны большая механическая прочность (аккумулятор не боится тряски, вибраций, ударов), большая, чем у кислотных, энергия на единицу массы (удельная энергия), больший срок службы и срок хранения.

У щелочных аккумуляторов саморазряд при отключенном состоянии очень мал (после 9 мес хранения они теряют лишь 20 % емкости). В то же время у кислотных аккумуляторов суточный саморазряд составляет около 0,5—0,7 % емкости, т. е. в течение месяца они теряют 15—21 % емкости. При эксплуатации щелочных аккумуляторов не происходит вредных выделений паров и газов, что характерно для кислотных аккумуляторов. По указанным причинам они в эксплуатации значительно надежнее, чем кислотные, и требуют значительно меньшего ухода.

Однако щелочные аккумуляторы имеют ряд недостатков. Напряжение щелочного аккумулятора при разряде значительно ниже (почти на 40 %), чем кислотного, вследствие чего при одном и том же напряжении количество аккумуляторов в щелочной батарее будет больше, чем в кислотной. Внутреннее сопротивление щелочного аккумулятора значительно выше, чем у кислотного, следовательно, его напряжение, особенно при больших токах разряда, падает гораздо быстрее и при очень интенсивном разряде аккумуляторной батареи резко уменьшается.

§ 44. Электрические характеристики аккумуляторов

За номинальную емкость для большинства кислотных аккумуляторов принимают емкость при десятичасовом режиме, а для большинства щелочных аккумуляторов — емкость при пятичасовом режиме, т. е. при разряде аккумулятора таким током, при котором он разряжается до номинального допустимого конечного напряжения (1,7—1,8 В для кислотных аккумуляторов и 1,0 В для щелочных) в течение соответственно 10 и 5 ч.

При увеличении разрядного тока емкость аккумулятора понижается. Например, аккумуляторы ТН-450 при номинальном разрядном токе 45 А разряжаются до напряжения 1,8 В за 10 ч, т. е. емкость их составляет $45 \text{ А} \cdot 10 \text{ ч} = 450 \text{ А} \cdot \text{ч}$. Если разряжать такой аккумулятор током 68 А, то он разрядится до напряжения 1,8 В за 5 ч и емкость его составит $68 \text{ А} \cdot 5 \text{ ч} = 340 \text{ А} \cdot \text{ч}$.

При понижении температуры емкость аккумулятора уменьшается, так как понижается способность электролита проникать в поры пластин. С приближением температуры электролита к температуре замерзания минус 40—45 °С напряжение и емкость аккумулятора падают почти до нуля. При повышении температуры емкость аккумулятора увеличивается, однако при достижении 40—50 °С усиливается саморазряд в аккумуляторах и сокращается срок их службы. В процессе эксплуатации аккумулятора при многократных зарядах и разрядах поры пластин постепенно закрываются, активная масса частично отпадает от пластин. Это приводит к снижению емкости аккумулятора.

Экономичность работы аккумулятора характеризуется его к. п. д. и коэффициентом отдачи по емкости. *К. п. д. аккумулятора* называется отношение количества энергии в киловатт-часах, полученной от него при разряде, к количеству энергии, затраченной при заряде. Для кислотных аккумуляторов к. п. д. равен 65—75 %, для щелочных 47—50 %. *Коэффициентом отдачи аккумулятора по емкости* называется отношение количества электричества в ампер-часах, отданного при разряде аккумулятора, к количеству электричества, полученному при заряде. Значение его для кислотных аккумуляторов составляет 85—90 %, для щелочных — 65—70 %, поэтому экономичность работы щелочных аккумуляторов меньше, чем кислотных.

§ 45. Способы соединения аккумуляторов в батареи

В тех случаях, когда ток и напряжение отдельного источника электрической энергии (в том числе аккумулятора) являются недостаточными для нормальной работы электрических потребителей, применяют последовательное, параллельное и смешанное соединения таких источников.

Последовательное соединение. При последовательном соединении аккумуляторов отрицательный электрод первого аккумуля-

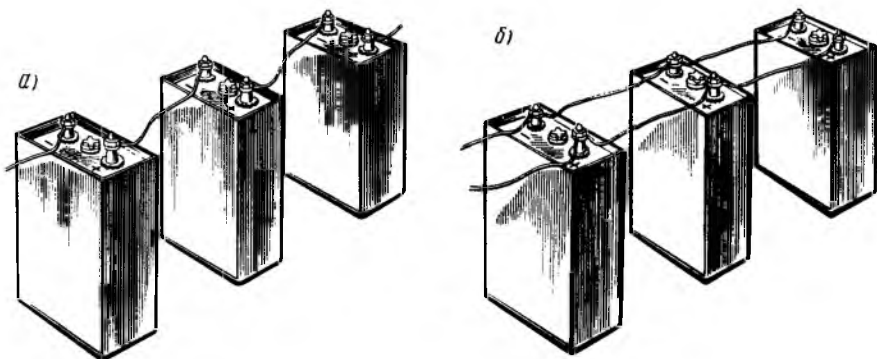


Рис. 165. Последовательное (а) и параллельное (б) соединения аккумуляторов

тора соединяют с положительным электродом второго, отрицательный электрод второго — с положительным электродом третьего и т. д. (рис. 165, а). Нагрузку (приемник) присоединяют к положительному электроду первого и отрицательному электроду последнего аккумулятора.

При последовательном соединении аккумуляторов их электродвижущие силы согласно второму закону Кирхгофа складываются и результирующая э. д. с. равна сумме э. д. с. отдельных аккумуляторов. Следовательно, чем больше аккумуляторов включено в цепь, тем больше напряжение, под которым находятся приемники (рис. 166).

Эквивалентное внутреннее сопротивление последовательно соединенных аккумуляторов равно сумме их внутренних сопротивлений.

Аккумуляторные батареи состояются из ряда совершенно одинаковых аккумуляторов. При этом на заводе их подбирают

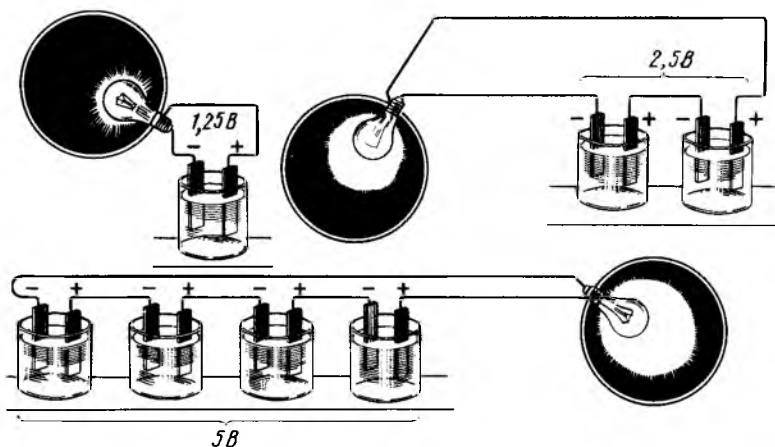


Рис. 166. Напряжение, приложенное к приемнику, при различном числе последовательно соединенных аккумуляторов

так, чтобы все они имели одинаковые э. д. с. $E = E_{\text{ак}}$ и одинаковое внутреннее сопротивление $R_{\text{ак}}$. Поэтому для батареи, состоящей из n аккумуляторов,

$$E = nE_{\text{ак}}; \quad R_{\text{эвб}} = nR_{\text{ак}}$$

Пример 30. Определить э. д. с. батареи, состоящей из 25 последовательно соединенных аккумуляторов, каждый из которых имеет э. д. с. $E_{\text{ак}} = 2,2$ В и внутреннее сопротивление $R_{\text{ак}} = 0,04$ Ом. Какой ток отдает батарея, если к ней подключен резистор с сопротивлением $R = 10$ Ом и каково будет напряжение на ее зажимах?

Решение. Э. д. с. батареи $E = nE_{\text{ак}} = 25 \cdot 2,2 = 55$ В.

Ток батареи

$$I = E / (R + nR_{\text{ак}}) = 55 / (10 + 0,04 \cdot 25) = 5 \text{ А.}$$

Падение напряжения на внутреннем сопротивлении батареи

$$\Delta U_{\text{бат}} = InR_{\text{ак}} = 5 \cdot 0,04 \cdot 25 = 5 \text{ В.}$$

Напряжение на зажимах батареи

$$U = E - \Delta U_{\text{бат}} = 55 - 5 = 50 \text{ В.}$$

Параллельное соединение. При параллельном соединении все положительные электроды отдельных аккумуляторов соединяют вместе, и они образуют положительный полюс; все отрицательные электроды отдельных аккумуляторов также соединяют вместе, и они образуют общий отрицательный полюс (рис. 165, б). Нагрузку (приемник) присоединяют к общим отрицательному и положительному полюсам. При этом все аккумуляторы будут находиться под одинаковым напряжением U , а общий ток I равен сумме токов, отдаваемых отдельными аккумуляторами. При параллельном соединении n одинаковых аккумуляторов э. д. с. батареи $E = E_{\text{ак}}$; ее внутреннее сопротивление $R = R_{\text{ак}}/n$ и ток $I = nI_{\text{ак}}$.

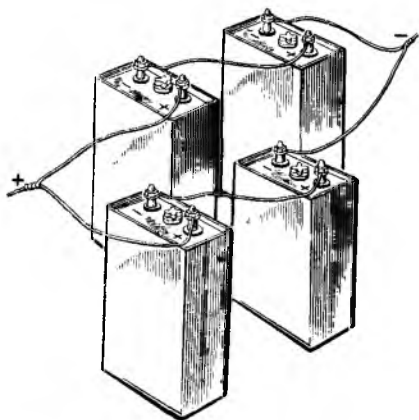


Рис. 167. Смешанное соединение аккумуляторов

Смешанное соединение. В тех случаях, когда аккумуляторы не обеспечивают возможности получения необходимого тока и напряжения, применяют последовательно-параллельное (смешанное) их соединение (рис. 167). В данном случае в каждой из двух параллельных групп аккумуляторной батареи имеется по два последовательно соединенных аккумулятора.

Аккумуляторные батареи в большинстве случаев состоят из последовательно соединенных аккумуляторов. Смешанное и параллельное соединения аккумуляторов применяют редко, так

как в этих случаях трудно обеспечить равномерное распределение тока между параллельными ветвями. Равенство токов I_1 и I_2 в отдельных ветвях будет иметь место только в том случае, если будут равны э. д. с. E_1 и E_2 , действующие в этих ветвях, и их внутренние сопротивления $R_{\text{эк}1} = R_{\text{эк}2}$.

Пример 31. Выбрать аккумуляторную батарею (определить число аккумуляторов и способ их соединения), необходимую для аварийного питания электроэнергией ламп сигнального и служебного освещения. Лампы работают при напряжении $U = 50$ В и потребляют ток $I = 12$ А; каждый аккумулятор имеет напряжение $U_{\text{ак}} = 2$ В и может отдать ток $I_{\text{ак}} = 6$ А.

Решение. Число параллельных групп в аккумуляторной батарее

$$n_{\text{пар}} = I / I_{\text{ак}} = 12 / 6 = 2.$$

Число последовательно соединенных аккумуляторов

$$n_{\text{пос}} = U / U_{\text{ак}} = 50 / 2 = 25.$$

Контрольные вопросы

1. Как проходит электрический ток в жидких проводниках?
2. Какова конструкция кислотных аккумуляторов?
3. Расскажите об устройстве щелочных аккумуляторов.
4. Каким образом заряжают аккумуляторы и что служит признаками конца заряда у кислотного и щелочного аккумуляторов?
5. Как соединяют аккумуляторы в батарее?

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

§ 46. Получение переменного тока

В промышленности в основном применяют синусоидальный переменный ток, который в отличие от постоянного каждое мгновение изменяет свое значение и периодически направление. Для получения такого тока используют источники электрической энергии, создающие переменную э. д. с., периодически изменяющуюся по величине и направлению; такие источники называются генераторами переменного тока.

Принцип получения переменного тока. Простейшим генератором переменного тока может служить виток, вращающийся в равномерном магнитном поле (рис. 168, а). Пользуясь правилом правой руки, легко определить, что в процессе вращения витка направление э. д. с. e , индуцированной в рабочих участках 1 и 2 витка, непрерывно изменяется (показано стрелками), следовательно, изменяется и направление проходящего по замкнутой цепи тока i .

По закону электромагнитной индукции э. д. с., индуцируемая в витке при вращении его с окружной скоростью v в магнитном поле с индукцией B ,

$$e = 2lBv \sin \alpha,$$

где $2l$ — длина двух рабочих частей витка, находящихся в магнитном поле; α — угол между направлением силовых магнитных линий и направлением движения витка в рассматриваемый момент времени (направлением вектора скорости v).

При вращении витка с угловой скоростью ω угол $\alpha = \omega t$, следовательно,

$$e = 2lBv \sin \omega t.$$

Переменный угол ωt называется *фазой э. д. с.* Величина $2lBv$ представляет собой максимальное значение э. д. с. e , которое она принимает при $\omega t = 90^\circ$ (когда плоскость витка перпендикулярна силовым магнитным линиям). Обозначив его E_m , получим:

$$e = E_m \sin \omega t.$$

Полученная зависимость изменения э. д. с. e от угла ωt или от времени t графически изображается синусоидой (рис. 168, б). Э. д. с., токи и напряжения, изменяющие свои значения и направ-

ления по закону синусоиды, называются *синусоидальными*. Ось, по которой откладывают углы ωt , можно рассматривать как ось времени t .

Рассмотрим несколько отдельных положений витка. В момент времени, соответствующий углу ωt_1 (см. рис. 168, *a*), когда виток находится в горизонтальном положении, его рабочие участки как бы скользят вдоль силовых магнитных линий, не пересекая их; поэтому в этот момент э. д. с. в них не индуцируется (точка 1 на рис. 168, *b*). При дальнейшем повороте витка стороны его начнут пересекать магнитные силовые линии. По мере увеличения угла поворота увеличивается и число силовых линий, пересекаемых сторонами витка в единицу времени, и соответственно возрастает индуцированная в витке э. д. с. e .

В момент времени, соответствующий углу ωt_2 , виток пересекает наибольшее число силовых магнитных линий, так как его рабочие участки 1 и 2 движутся перпендикулярно силовым линиям магнитного поля; в этот момент э. д. с. e достигает своего максимального значения E_m (точка 2 на графике). При дальнейшем вращении витка число пересекаемых силовых линий уменьшается и соответственно уменьшается индуцированная в витке э. д. с. В момент времени, соответствующий углу ωt_3 , рабочие участки витка опять как бы скользят вдоль магнитных силовых линий, в результате чего э. д. с. e будет равна нулю (точка 3). Затем рабочие участки 1 и 2 витка вновь начинают пересекать магнитные силовые линии, но уже в другом направлении, поэтому в витке появляется э. д. с. противоположного направления. В момент времени, соответствующий углу ωt_4 , при вертикальном расположении витка э. д. с. e достигает максимального значения $-E_m$ (точка 4), затем она уменьшается, и в момент времени, соответствующий ωt_5 , снова становится равной нулю (точка 5). При дальнейшем движении витка с каждым

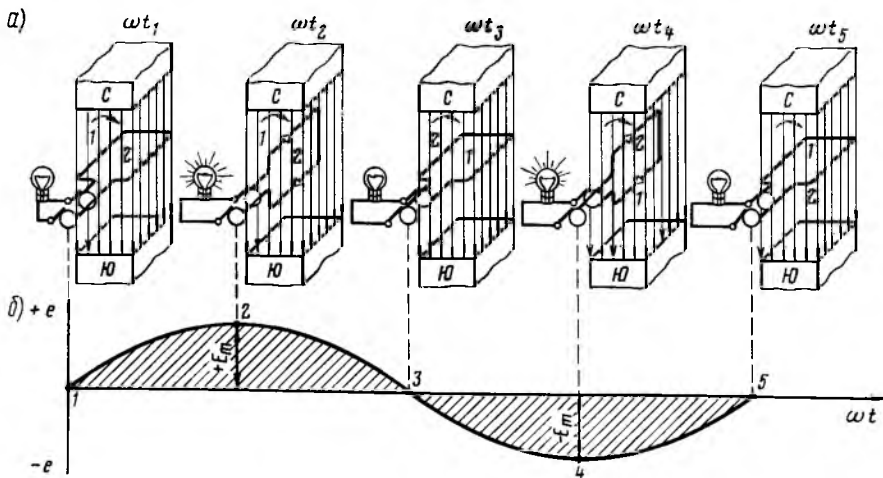


Рис. 168. Индуцирование синусоидальной э. д. с. (*a*) и кривая ее изменения (*b*)

новым оборотом описанный выше процесс индуцирования э. д. с. будет повторяться.

В современных генераторах переменного тока магниты или электромагниты, создающие магнитное поле, обычно располагаются на вращающейся части машины — *роторе*, а витки, в которых индуцируется переменная э. д. с., — на неподвижной части генератора — *статоре*. Однако с точки зрения принципа действия генератора переменного тока безразлично, на какой части машины — роторе или статоре — расположены витки, в которых индуцируется переменная э. д. с.

Работа приемников электрической энергии при переменном токе. Если подключить к генератору переменного тока электрическую лампу (см. рис. 168, *а*), то нить ее будет периодически накаляться и остывать. Однако если частота изменений переменного тока достаточно велика, то нить лампы не будет успевать охлаждаться и глаз человека не будет улавливать изменений ее накала. Такие же условия имеют место и при работе электродвигателей переменного тока; такой двигатель при работе получает от источника импульсы переменного тока, следующие один за другим с большой частотой, и его ротор будет вращаться с постоянной частотой.

§ 47. Основные параметры переменного тока

При подключении к источнику переменного тока с синусоидально изменяющейся э. д. с. электрических цепей с линейными сопротивлениями в них будут действовать синусоидально изменяющиеся напряжения и проходить синусоидально изменяющиеся токи. Переменные токи, э. д. с. и напряжения характеризуются четырьмя основными параметрами: периодом, частотой, амплитудой и действующим значением.

Период. Промежуток времени T , в течение которого э. д. с., напряжение u или ток i (рис. 169, *а*) совершают полный цикл изменений, называется периодом. Чем быстрее вращается виток или ротор генератора переменного тока, тем меньше период изменения э. д. с. или тока.

Частота. Число полных периодов изменения э. д. с., напряжения или тока в 1 с называется частотой,

$$f = 1/T.$$

Она измеряется в герцах (Гц), т. е. числом периодов в секунду. Чем больше частота, тем меньше период изменения тока, напряжения или э. д. с. (рис. 169, *б*). В Советском Союзе все электрические станции переменного тока вырабатывают ток, изменяющийся с частотой 50 Гц, т. е. 50 периодов в секунду. В автоматике и радиотехнике применяют электрические токи и более высоких частот. Такие частоты измеряются в килогерцах ($1 \text{ кГц} = 10^3 \text{ Гц}$) и мегагерцах ($1 \text{ МГц} = 10^6 \text{ Гц}$).

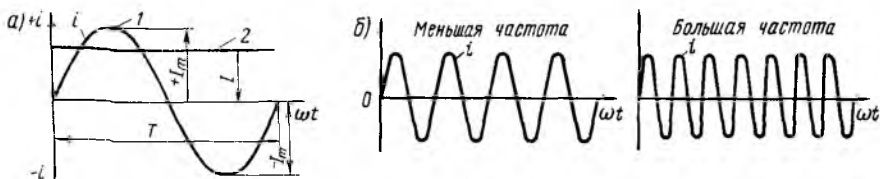


Рис. 169. Кривые изменения синусоидального переменного тока при различной частоте

Из рис. 169, *a* следует, что в течение времени одного периода T фаза ωt тока (э. д. с. или напряжения) изменяется на угол 360° , или 2π радиан. Поэтому

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f.$$

Эту величину называют угловой частотой переменного тока, она имеет размерность рад/с.

Амплитуда. Наибольшее значение переменного тока (переменных э. д. с. и напряжения) называют амплитудным значением, или амплитудой. В рассмотренном нами простейшем генераторе переменного тока (см. рис. 168, *a*) э. д. с. e дважды достигает амплитудного значения: во время первого полуоборота $+E_m$ (направлена от начала витка к его концу), а во время второго полуоборота $-E_m$ (направлена от конца витка к его началу). Точно так же за один период ток i 2 раза достигает амплитудного значения: $+I_m$ и $-I_m$. Амплитудное значение тока, напряжения и э. д. с. в формулах обозначают соответствующими буквами с индексами « m », т. е. I_m , U_m , E_m и др.

Действующее значение. Ток, напряжение и э. д. с., действующие в электрической цепи в каждый отдельный момент времени, определяются так называемыми мгновенными значениями. Эти значения принято обозначать строчными буквами i , u , e . Однако судить о переменных э. д. с., токе или напряжении по их мгновенным значениям неудобно, так как эти значения непрерывно меняются. Поэтому оценивать способность переменного тока совершать механическую работу или создавать тепло принято по действующему его значению. Под действующим значением переменного тока понимают силу такого постоянного тока (прямая 2 на рис. 169, *a*), который, проходя по проводнику в течение некоторого времени (например, в течение одного периода или 1 с), выделит в нем такое же количество тепла (произведет такую же механическую работу), как и данный переменный ток (кривая 1). Действующие значения тока, напряжения и э. д. с. обозначают соответственно I , U , E .

При синусоидальном переменном токе

$$I = I_m / \sqrt{2} = 0,707 I_m.$$

Если известно действующее значение тока I , то его амплитудное значение

$$I_m = \sqrt{2} I = 1,41I.$$

Аналогично для синусоидальных напряжений и э. д. с.

$$U/U_m = E_1/E_m = 1/\sqrt{2} = 0,707.$$

На практике для характеристики параметров переменного тока используют, главным образом, действующие значения тока, напряжения и э. д. с. Например, когда говорят, что напряжение в осветительной сети переменного тока составляет 220 В или что по цепи проходит ток 100 А, то это значит, что в данной сети действующее значение напряжения равно 220 В или что действующее значение тока, проходящего по данной цепи, равно 100 А. Электрическая энергия и механическая работа, создаваемые переменным током в различных электрических устройствах, пропорциональны действующим значениям тока и напряжения. Большая часть существующих приборов для измерения переменного тока измеряет действующие значения тока, напряжения и э. д. с.

Пример 32. Определить действующее значение переменного тока, амплитудное значение которого 100 А.

Решение. $I = 0,707I_m = 0,707 \cdot 100 = 70,7$ А.

Пример 33. Определить, какое наибольшее напряжение воздействует на человека при прикосновении его к двум проводам электрической сети переменного тока с действующим значением напряжения 220 В.

Решение. $U_m = 1,41U = 1,41 \cdot 220 = 310,2$ В.

§ 48. Векторные диаграммы

Векторный метод изображения синусоидально изменяющихся величин. При изучении процессов, происходящих в цепях переменного тока, удобно пользоваться методом векторного изображения синусоидально изменяющихся величин. Этот метод основан на том, что при вращении некоторого вектора OA (рис. 170, а) с равномерной угловой скоростью ω проекция OB этого вектора на неподвижную вертикальную ось $y-y$ пропорциональна синусу угла ωt , образованного вектором OA с горизонтальной осью $x-x$, т. е. $OB = OA \sin \omega t$. Следовательно, кривая, выражающая зависимость длины проекции OB от угла ωt за один оборот вектора OA , будет представлять собой синусоиду (рис. 170, б). Если в качестве длины (модуля) вектора принять амплитудное значение переменного тока I_m , то полученная кривая будет представлять собой графическое изображение изменения мгновенного значения тока i от угла ωt . При $\omega t = 0$ (точка 1) вектор OA будет расположен горизонтально и $i = 0$; при $\omega t = 90^\circ$ (точка 2) вектор OA расположен вертикально вверх и $i = I_m$; при $\omega t = 180^\circ$ (точка 3) вектор OA также расположен горизонтально и $i = 0$; при $\omega t = 270^\circ$ (точка 4)

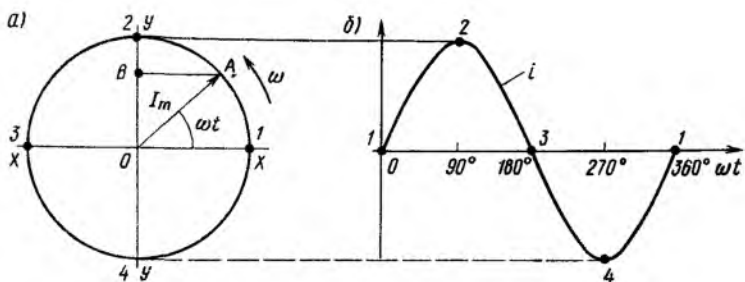


Рис. 170. Изображение синусоидально изменяющегося тока:

a — вращающимся вектором; *б* — в виде кривой

вектор OA расположен вертикально вниз и $i = -I_m$ (проекции OB вектора OA , расположенные выше точки O , будем считать положительными, а расположенные ниже этой точки — отрицательными). Точкам 1—4 на рис. 170, *a* при различных положениях вращающегося вектора OA соответствуют точки 1—4 на кривой изменения тока i (см. рис. 170, *б*). Направление вращения векторов условно принимают против часовой стрелки, поэтому углы ωt , которые отсчитывают в направлении вращения векторов, считают положительными, а против этого направления — отрицательными.

В случае если требуется получить векторное изображение нескольких синусоидально изменяющихся величин, например двух токов i_1 и i_2 , чертят два вращающихся вектора OA_1 и OA_2 (рис. 171, *a*) с различными модулями I_{m1} и I_{m2} .

Если в момент начала отсчета синусоидально изменяющаяся величина не равна нулю, а имеет некоторое значение $I_m \sin \Psi_1$ (рис. 171, *б*), то вектор OA_1 в начальный момент при фазе $\omega t = 0$ образует с горизонтальной осью некоторый угол Ψ_1 . Этот угол называется *начальным фазным углом*, или *начальной фазой*. Разность начальных фаз синусоидально изменяющихся величин называют *сдвигом фаз*, или *углом сдвига фаз*. Например, синусоида

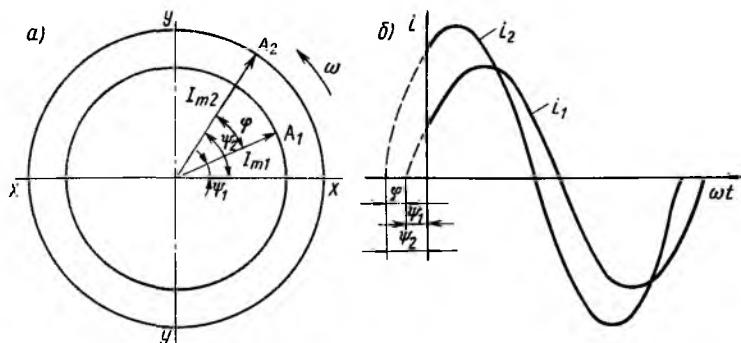


Рис. 171. Изображение двух синусоидально изменяющихся токов:

a — вращающимися векторами; *б* — в виде кривых

тока i_1 имеет начальную фазу Ψ_1 , а синусоида тока i_2 — начальную фазу Ψ_2 . Следовательно, токи i_1 и i_2 сдвинуты друг относительно друга по фазе на угол $\varphi = \Psi_2 - \Psi_1$. Это означает, что каждая точка синусоиды тока i_1 сдвинута относительно соответствующей точки синусоиды тока i_2 на угол φ . При векторном изображении токов i_1 и i_2 сдвиг фаз между ними выражается в виде угла φ между векторами OA_1 и OA_2 .

Из рис. 171, *а* и *б* видно, что вектор OA_2 при своем вращении идет впереди вектора OA_1 , т. е. ток i_2 при своем изменении достигает нулевых и максимальных значений раньше, чем ток i_1 . Следовательно, ток i_2 опережает по фазе ток i_1 на угол φ . Можно также считать, что ток i_1 отстает от тока i_2 на угол φ . Если же две синусоидально изменяющиеся величины, например токи i_1 и i_2 , одновременно проходят через нулевые и максимальные значения, то говорят, что они совпадают по фазе. В этом случае они изображаются двумя совпадающими по направлению векторами ($\varphi = 0$). Векторы, изображающие синусоидально изменяющиеся токи, напряжения и э. д. с., обозначаются соответствующими буквами с точкой над обозначением, например, I, U, E .

Построение векторных диаграмм. Векторные диаграммы представляют собой совокупность векторов, изображающих синусоидально изменяющиеся величины, действующие в данной электрической цепи. Они позволяют упростить расчет цепей синусоидального тока и сделать его наглядным, применив вместо алгебраического сложения или вычитания мгновенных значений синусоидально изменяющихся токов, напряжений или э. д. с. сложение или вычитание их векторов. Обычно при расчете электрических цепей переменного тока нас не интересуют мгновенные значения токов, напряжений и э. д. с., требуется определить только их действующие значения и сдвиг по фазе относительно друг друга. Поэтому при построении векторных диаграмм рассматривают неподвижные векторы для некоторого момента времени, который выбирают так, чтобы диаграмма была наглядной. В качестве модулей векторов принимают действующие значения соответствующих величин. Это обуславливает лишь уменьшение длины всех векторов по сравнению с длиной, принятой на рис. 170 и 171, в $\sqrt{2}$ раз; все же углы между векторами остаются при этом неизменными.

Рассмотрим в качестве примера построение векторной диаграммы для действующих значений токов i_1 , i_2 и i (рис. 172), причем согласно первому закону Кирхгофа ток i равен сумме токов i_1 и i_2 . Токи i_1 и i_2 имеют различные амплитудные, а следовательно, и действующие значения и сдвинуты относительно друг друга на некоторый угол φ . Путем суммирования ординат синусоид i_1 и i_2 можно получить кривую тока i , определить по ней амплитудное значение I_m , а затем и действующее значение $I = I_m/\sqrt{2}$.

Однако более удобно определять действующее значение тока i путем сложения векторов токов i_1 и i_2 согласно формуле

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2.$$

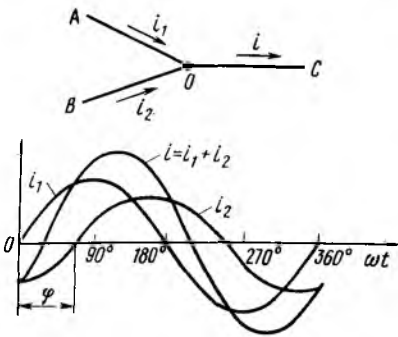


Рис. 172. Графическое сложение двух переменных токов

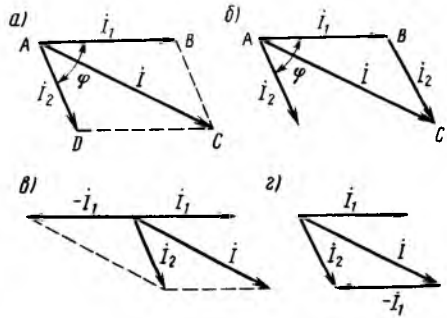


Рис. 173. Векторное сложение и вычитание двух переменных токов

Сложение векторов осуществляется по правилу параллелограмма или треугольника. В первом случае (рис. 173, а) строят параллелограмм $ABCD$ со сторонами, образованными векторами I_1 и I_2 . Вектор I_1 направляют, например, горизонтально (можно начертить этот вектор и в любом другом положении), вектор I_2 — под углом φ к вектору I_1 . Угол φ на векторной диаграмме отсчитывают от вектора I_1 по часовой стрелке, так как для рассматриваемого случая ток i_2 отстает от тока i_1 на угол φ . Диагональ AC векторной диаграммы дает нам суммарный вектор результирующего тока I . Во втором случае (рис. 173, б) строят треугольник ABC со сторонами AB и BC , равными соответствующим векторам I_1 и I_2 , и получают суммарный вектор I в виде гипотенузы AC этого треугольника.

Вычитание векторов двух синусоидально изменяющихся величин можно представить в виде сложения одного вектора с другим вектором, взятым с обратным знаком. Например, если известны токи i и i_1 (см. рис. 172), то действующее значение тока i_2 можно получить вычитанием из вектора I вектора I_1 , т. е. $I_2 = I - I_1 = I + (-I_1)$. Вектор $-I_1$ имеет такой же модуль, что и вектор $+I_1$, но направлен противоположно. Следовательно, операцию вычитания векторов I и I_1 можно осуществить с помощью векторных диаграмм (рис. 173, в и г).

§ 49. Виды сопротивлений в электрической цепи переменного тока

При изучении цепей постоянного тока мы установили, что все проводники обладают электрическим сопротивлением, на преодоление которого затрачивается определенное количество электрической энергии. В цепях переменного тока мы встречаемся с несколькими видами сопротивлений, различающихся своей физической природой. Все эти сопротивления можно подразделить на две

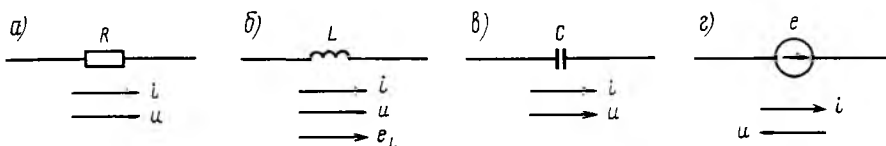


Рис. 174. Условные обозначения основных элементов электрических цепей переменного тока

основные группы: активные и реактивные. В активных сопротивлениях при включении в цепь переменного тока электрическая энергия преобразуется в тепловую. Активным сопротивлением R обладают, например, провода электрических линий, обмотки электрических машин и аппаратов и пр., т. е. те же устройства, которые обладают электрическим сопротивлением в цепи постоянного тока. В реактивных сопротивлениях электрическая энергия, вырабатываемая источниками, не расходуется. Как будет показано ниже, при включении реактивного сопротивления в цепь переменного тока возникает лишь обмен энергией между ним и источником электрической энергии.

Реактивное сопротивление создают индуктивности и емкости. Под индуктивностью L будем понимать идеализированный элемент электрической цепи (идеализированную катушку индуктивности), способный запасать энергию в своем магнитном поле, который не имеет активного сопротивления R и емкости C . Аналогично под емкостью C будем понимать идеализированный элемент электрической цепи (идеализированный конденсатор), способный запасать энергию в своем электрическом поле, который не имеет активного сопротивления R и индуктивности L .

При проведении расчетов реальные катушки индуктивности и конденсаторы, в которых имеются потери мощности (из-за наличия активного сопротивления R), часто могут быть заменены с некоторым приближением этими идеализированными элементами, так как переменный ток, проходящий через реальную катушку индуктивности при заданном напряжении и частоте, определяется в основном ее индуктивностью L , а ток, проходящий через реальный конденсатор,— его емкостью C . На рис. 174, а—г стрелками показаны условные положительные направления в идеализированных элементах электрической цепи тока i , напряжения u и э. д. с.

§ 50. Активное сопротивление в цепи переменного тока

Ток и напряжение. При включении в цепь переменного тока активного сопротивления R (рис. 175, а) напряжение u источника создает в цепи ток i . Если напряжение u изменяется по синусоидальному закону $u = U_m \sin \omega t$, то ток i также изменяется синусоидально:

$$i = I_m \sin \omega t.$$

При этом

$$I_m = U_m/R.$$

Таким образом, ток и напряжение изменяются по одному и тому же закону; они одновременно достигают своих максимальных значений и одновременно проходят через нуль (рис. 175, б). Следовательно, при включении в цепь переменного тока активного сопротивления ток и напряжение совпадают по фазе (рис. 175, в).

Если обе части равенства $I_m = U_m/R$ разделить на $\sqrt{2}$, то получим выражение закона Ома для рассматриваемой цепи для действующих значений напряжения и тока:

$$I = U/R. \quad (67)$$

Следовательно, для цепи переменного тока, содержащей только активное сопротивление, этот закон имеет такую же математическую форму, как и для цепи постоянного тока.

Электрическая мощность. Электрическая мощность p в цепи с активным сопротивлением в любой момент времени равна произведению мгновенных значений силы тока i и напряжения u . Следовательно, мгновенная мощность p не является постоянной величиной, как при постоянном токе, а изменяется по кривой (см. рис. 175, б). Эту кривую можно также получить графически, перемножая ординаты кривых силы тока i и напряжения u при различных углах ωt . Изменение мощности происходит с двойной частотой 2ω по отношению к изменению тока и напряжения, т. е. один период изменения мощности соответствует половине периода изменения тока и напряжения. Все значения мощности являются положительными. Физически положительное значение мощности означает, что энергия передается от источника электрической энергии к приемнику. Максимальное значение мощности при $\omega t = 90^\circ$ и $\omega t = 270^\circ$

$$P_{\max} = U_m I_m = 2UI.$$

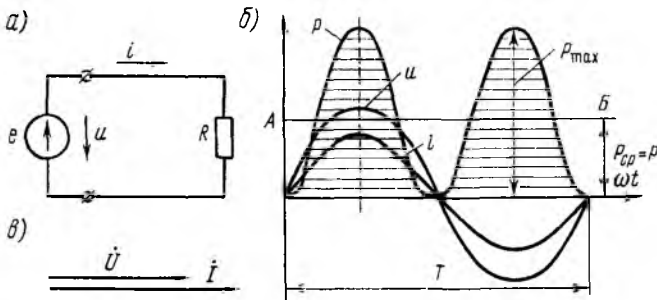


Рис. 175. Схема включения в цепь переменного тока активного сопротивления (а), кривые тока i , напряжения u , мощности p (б) и векторная диаграмма (в)

Практически об энергии W , создаваемой электрическим током, судят не по максимальной мощности, а по средней мощности $P_{\text{ср}} = P$, так как эта энергия может быть выражена как произведение среднего значения мощности P на время протекания тока:

$$W = Pt.$$

Кривая мгновенной мощности симметрична относительно линии AB , которая соответствует среднему значению мощности P . Поэтому

$$P = P_{\text{max}}/2 = UI.$$

Используя формулу (67) закона Ома, активную мощность можно выразить также в виде $P = I^2 R$ или $P = U^2/R$.

В электротехнике *среднюю мощность, потребляемую активным сопротивлением, обычно называют активной мощностью*, или просто мощностью, и обозначают буквой P .

Поверхностный эффект. Следует отметить, что активное сопротивление проводников в цепи переменного тока всегда больше их сопротивления в цепи постоянного тока. Переменный ток i не протекает равномерно по всему поперечному сечению проводника, как постоянный ток I , а вытесняется на его поверхность (рис. 176, а). Поэтому полезное сечение проводника как бы уменьшается и сопротивление его при переменном токе возрастает. Это явление носит название поверхностного эффекта. Неравномерное распределение переменного тока по поперечному сечению проводника объясняется действием э. д. с. самоиндукции, индуцированной в проводнике магнитным полем, которое создается проходящим по проводнику током i . Это магнитное поле действует не только в пространстве, окружающем проводник (внешний поток Φ_1), но и внутри самого проводника (внутренний поток Φ_2) (рис. 176, б). Поэтому слои проводника, расположенные ближе к его центру, будут охватываться большим магнитным потоком, чем слои, расположенные ближе к его поверхности, и э. д. с. самоиндукции, индуцированная во внутренних слоях, будет большей, чем во внешних. Поскольку э. д. с. самоиндукции препятствует изменению

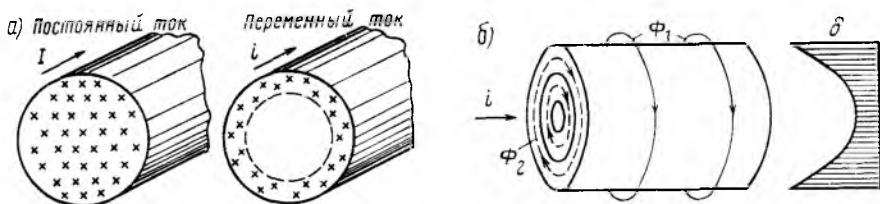


Рис. 176. Схема протекания постоянного I и переменного i токов по проводнику (а) и возникновение поверхностного эффекта (б)

Если задана активная мощность P , то при увеличении реактивной мощности Q возрастут реактивный ток I_p и общий ток I , проходящий по проводам генераторов переменного тока, трансформаторов, электрических сетей и приемников электрической энергии. При этом увеличиваются и потери мощности $\Delta P = I^2 R_{пр}$ в активном сопротивлении $R_{пр}$ этих проводов.

Таким образом, бесполезная циркуляция электрической энергии между источником переменного тока и приемником, обусловленная наличием в нем реактивных сопротивлений, требует также затраты определенного количества энергии, которая теряется в проводах всей электрической цепи.

Коэффициент мощности. Из формулы (75) следует, что активная мощность P зависит не только от тока I и напряжения U , но и от величины $\cos \varphi$, называемой *коэффициентом мощности*:

$$\cos \varphi = P / (UI) = P / S = P / \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

По значению $\cos \varphi$ можно судить, как использует мощность источника данный приемник или электрическая цепь. Чем больше $\cos \varphi$, тем меньше $\sin \varphi$, следовательно, согласно формулам (75) и (76) при заданных U и I , т. е. S , тем больше активная и меньше реактивная мощности, отдаваемые источником. При повышении $\cos \varphi$ и постоянной активной мощности P , поступающей в приемник, уменьшается ток в цепи $I = P / (U \cos \varphi)$. При этом уменьшаются потери мощности $\Delta P = I^2 R_{пр}$ в проводах и обеспечивается возможность дополнительной загрузки источника и электрической сети, т. е. лучшего их использования. Если приемник питается от источника при неизменном токе нагрузки, то повышение $\cos \varphi$ ведет к возрастанию активной мощности P , используемой приемником. При $\cos \varphi = 1$ реактивная мощность равна нулю, и вся мощность, отдаваемая источником, является активной. Поэтому на всех предприятиях и во всех отраслях народного хозяйства стремятся всемерно повышать коэффициент мощности и доводить его по возможности до единицы.

Значения коэффициента мощности электрических установок переменного тока различны. Электрические лампы обладают, главным образом, активным сопротивлением, поэтому при их включении сдвиг фаз между током и напряжением практически отсутствует. Следовательно, для осветительной нагрузки коэффициент мощности можно считать равным единице. Коэффициент мощности для двигателей переменного тока зависит от нагрузки. При номинальной расчетной нагрузке двигателя $\cos \varphi = 0,8 \div 0,9$, а у крупных двигателей даже выше. При недогрузке двигателей коэффициент мощности их резко снижается (при холостом ходе $\cos \varphi = 0,25 \div 0,3$).

Пример 40. В цепь переменного тока напряжением 220 В включены последовательно резистор с активным сопротивлением $R = 8$ Ом, катушка индуктивности $X_L = 12$ Ом и конденсатор $X_C = 6$ Ом. Определить активную, реактивную и полную мощности, потребляемые данной электрической цепью, и коэффициент мощности.

§ 51. Индуктивность в цепи переменного тока

Ток, напряжение и э. д. с. самоиндукции. При включении в цепь переменного тока индуктивности (катушки индуктивности, потерями в которой можно пренебречь) (рис. 178, *a*) изменяющийся ток непрерывно индуцирует в ней э. д. с. самоиндукции

$$e_L = -L \Delta i / \Delta t, \quad (68)$$

где $\Delta i / \Delta t$ — скорость изменения тока.

Рассматривая график изменения силы тока i (рис. 178, *б*), можно установить, что скорость его изменения $\Delta i / \Delta t$ будет наибольшей в моменты времени, когда угол ωt равен 0 ; 180 и 360° . Следовательно, в эти минуты времени э. д. с. имеет наибольшее значение. В моменты времени, когда угол ωt равен 90° и 270° , скорость изменения тока $\Delta i / \Delta t = 0$ и поэтому э. д. с. $e_L = 0$.

Э. д. с. самоиндукции e согласно правилу Ленца направлена так, чтобы препятствовать изменению тока. Поэтому в первую четверть периода, когда ток i увеличивается, э. д. с. e_L имеет отрицательное значение (направлена против тока); во вторую четверть периода, когда ток i уменьшается, э. д. с. e_L имеет положительное значение (совпадает по направлению с током). В третью четверть периода ток i изменяет свое направление и увеличивается, поэтому э. д. с. самоиндукции e_L направлена против тока и имеет положительное значение. В четвертую четверть периода ток i уменьшается и э. д. с. самоиндукции e_L стремится поддержать прежнее направление тока, т. е. имеет отрицательное значение. Таким образом, э. д. с. самоиндукции e_L отстает по фазе от тока i на угол 90° .

Так как в цепи, куда включена индуктивность L , отсутствует активное сопротивление (рассматривается идеальная катушка индуктивности), то по второму закону Кирхгофа $u + e_L = 0$, т. е. $u = -e_L$. Следовательно, напряжение источника всегда равно по величине и противоположно по направлению э. д. с. самоиндукции.

Из рассмотрения кривых (см. рис. 178, *б*) видно, что кривая напряжения u сдвинута относительно кривой силы тока i на четверть периода, т. е. на угол 90° . При этом напряжение достигает наибольших и нулевых значений раньше, чем ток. Следовательно,

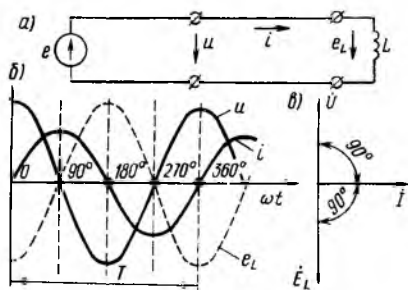


Рис. 178. Схема включения в цепь переменного тока индуктивности (*a*), кривые тока i , напряжения u , э. д. с. e_L (*б*) и векторная диаграмма (*в*)

при включении в цепь переменного тока индуктивности ток i отстает по фазе от напряжения и на угол 90° или, что то же самое, напряжение и опережает ток по фазе на угол 90° (рис. 178, в).

Индуктивное сопротивление. Сопротивление катушки или проводника переменному току, вызванное действием э. д. с. самоиндукции, называется индуктивным сопротивлением. Оно обозначается X_L и измеряется в омах. Физическая природа индуктивного сопротивления совершенно другая, чем активного. Э. д. с. самоиндукции e_L направлена против приложенного напряжения u , которое заставляет изменяться ток; согласно закону Ленца она препятствует изменению тока i , т. е. оказывает прохождению переменного тока определенное сопротивление.

Чем большая э. д. с. самоиндукции e_L индуцируется в проводнике (катушке), тем большее они имеют индуктивное сопротивление X_L . Э. д. с. самоиндукции согласно формуле (68) прямо пропорциональна индуктивности L и скорости изменения тока $\Delta i/\Delta t$, т. е. частоте его изменения f (значению ω). Поэтому индуктивное сопротивление

$$X_L = \omega L.$$

Следовательно, индуктивное сопротивление не зависит от материала, из которого изготовлен проводник (катушка), и от площади поперечного сечения проводника.

Закон Ома для цепи с индуктивностью

$$I = U/X_L = U/(\omega L).$$

Пример 35. Катушка индуктивности с ничтожным активным сопротивлением и индуктивностью $L=200$ мГн включена в сеть переменного тока напряжением $U=220$ В и частотой $f=50$ Гц. Определить ток, протекающий по катушке.

Решение. Угловая частота

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с.}$$

Индуктивное сопротивление катушки

$$X_L = \omega L = 3,14 \cdot 200/1000 = 62,8 \text{ Ом.}$$

Сила тока, проходящего по катушке,

$$I = U/X_L = 220/62,8 = 3,5 \text{ А.}$$

Электрическая мощность. Рассмотрим, как изменяется электрическая мощность в цепи переменного тока с индуктивностью. Мгновенное значение мощности p , равное произведению мгновенных значений силы тока i и напряжения u , можно получить графическим путем, перемножая ординаты кривых тока и напряжения при различных углах ωt . Кривая мгновенной мощности p (рис. 179, а) представляет собой синусоиду, которая изменяется с двойной частотой 2ω по сравнению с частотой изменения тока i и напряжения u .

При рассмотрении этой кривой видно, что мощность p может иметь положительные и отрицательные значения. В течение первой четверти периода ток и напряжение положительны и мощность $p=ui$ также положительна. Во второй четверти периода ток положителен, а напряжение отрицательно; следовательно, мощность p будет отрицательна. В течение третьей четверти периода мощность снова становится положительной, а в течение четвертой четверти — отрицательной.

Понятие положительной и отрицательной электрической мощности физически определяет направление потока энергии. Положительный знак мощности означает, что электрическая энергия W передается от источника к приемнику; отрицательный знак мощности означает, что электрическая энергия W переходит от приемника к источнику. Следовательно, при включении в цепь переменного тока индуктивности возникает непрерывный колебательный процесс обмена энергией между источником и индуктивностью, при котором не создается никакой работы. В первую и третью четверти периода мощность положительна, т. е. индуктивность получает энергию W от источника (см. стрелки W) и накапливает ее в своем магнитном поле. Во вторую и четвертую четверти периода индуктивность отдает накопленную энергию W источнику. При этом протекание по цепи тока поддерживается благодаря действию э. д. с. самоиндукции e_L .

Таким образом, в целом за период в индуктивное сопротивление не поступает электрическая энергия (на это указывает то, что среднее значение мощности за период равно нулю). Для того чтобы подчеркнуть указанную особенность индуктивного сопротивления, его относят к группе реактивных сопротивлений, т. е. сопротивлений, которые в цепи переменного тока в целом за период не потребляют электрической энергии. Следует отметить, что в реальные катушки индуктивности поступает некоторая энергия от источника переменного тока из-за наличия активного сопротивления проводов, из которых выполнены эти катушки. Эта энергия превращается в тепло.

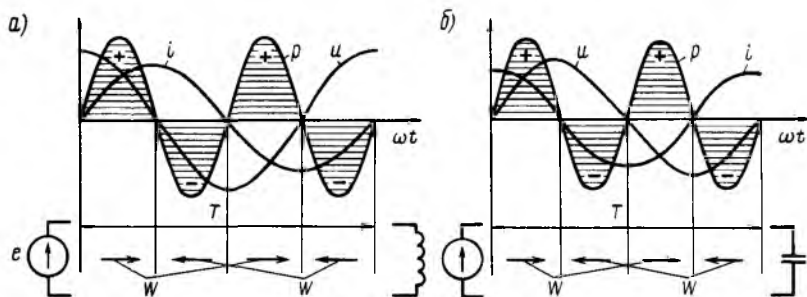
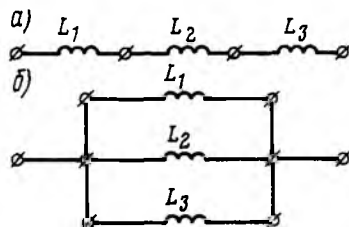


Рис. 179. Кривые тока i , напряжения u и мощности p при включении в цепь переменного тока катушки индуктивности (а) и конденсатора (б)

Рис. 180. Последовательное (а) и параллельное (б) соединения катушек индуктивности



Так как среднее значение мощности в цепи с индуктивностью равно нулю, для характеристики процесса обмена энергией между источником и индуктивностью введено понятие *реактивной мощности индуктивности*:

$$Q_L = U_L I,$$

где U_L — напряжение, приложенное к индуктивности L (действующее значение).

Реактивная мощность измеряется в варах (вар) и киловарах (квар). Наименование единицы происходит от первых букв слов вольт-амперреактивный. Реактивную мощность можно выразить также в виде

$$Q_L = U_L^2 / X_L, \text{ или } Q_L = I^2 X_L.$$

Способы соединения катушек индуктивности. В цепях переменного тока приходится соединять катушки индуктивности последовательно и параллельно.

При последовательном соединении катушек индуктивности эквивалентная индуктивность $L_{\text{эк}}$ равна сумме индуктивностей; например, при трех катушках с индуктивностями L_1 , L_2 и L_3 (рис. 180, а)

$$L_{\text{эк}} = L_1 + L_2 + L_3.$$

В этом случае эквивалентное индуктивное сопротивление

$$X_{L_{\text{эк}}} = X_{L_1} + X_{L_2} + X_{L_3}.$$

При параллельном соединении катушек индуктивности (рис. 180, б) для эквивалентной индуктивности имеем:

$$\frac{1}{L_{\text{эк}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3};$$

для эквивалентного индуктивного сопротивления

$$\frac{1}{X_{L_{\text{эк}}}} = \frac{1}{X_{L_1}} + \frac{1}{X_{L_2}} + \frac{1}{X_{L_3}}.$$

§ 52. Конденсаторы, их назначение и устройство

Заряд и разряд конденсатора. Конденсатор представляет собой устройство, способное накапливать электрические заряды. Простейшим конденсатором являются две металлические пластины (электроды), разделенные каким-либо диэлектриком. Конденсатор 2 можно зарядить, если соединить его электроды с источником 1 электрической энергии постоянного тока (рис. 181, а).

При заряде конденсатора свободные электроны, имеющиеся на одном из его электродов, устремляются к положительному полюсу источника, вследствие чего этот электрод становится положительно заряженным. Электроны с отрицательного полюса источника устремляются ко второму электроду и создают на нем избыток электронов, поэтому он становится отрицательно заряженным. В результате протекания зарядного тока i_z на обоих электродах конденсатора образуются равные, но противоположные по знаку заряды и между ними возникает электрическое поле, создающее между электродами конденсатора определенную разность потенциалов. Когда эта разность потенциалов станет равной напряжению источника тока, движение электронов в цепи конденсатора, т. е. прохождение по ней тока i_z прекращается. Этот момент соответствует окончанию процесса заряда конденсатора.

При отключении от источника (рис. 181, б) конденсатор способен длительное время сохранять накопленные электрические заряды. Заряженный конденсатор является источником электрической энергии, имеющим некоторую э. д. с. e_c . Если соединить электроды заряженного конденсатора каким-либо проводником (рис. 181, в), то конденсатор начнет разряжаться. При этом по цепи пойдет ток i_p разряда конденсатора. Начнет уменьшаться и разность потенциалов между электродами, т. е. конденсатор будет отдавать накопленную электрическую энергию во внешнюю цепь. В тот момент, когда количество свободных электронов на каждом электроде конденсатора станет одинаковым, электрическое поле между электродами исчезнет и ток станет равным нулю. Это означает, что произошел полный разряд конденсатора, т. е. он отдал накопленную им электрическую энергию.

Емкость конденсатора. Свойство конденсатора накапливать и удерживать электрические заряды характеризуется его емкостью. Чем больше емкость конденсатора, тем больше накопленный им заряд, так же как с увеличением вместимости сосуда или газового баллона увеличивается объем жидкости или газа в нем.

Емкость C конденсатора определяется как отношение заряда q , накопленного в конденсаторе, к разности потенциалов между его электродами (приложенному напряжению U :

$$C = q/U. \quad (69)$$

Емкость конденсатора измеряется в фарадах (Ф). Емкостью в 1 Ф обладает конденсатор, у которого при сообщении заряда

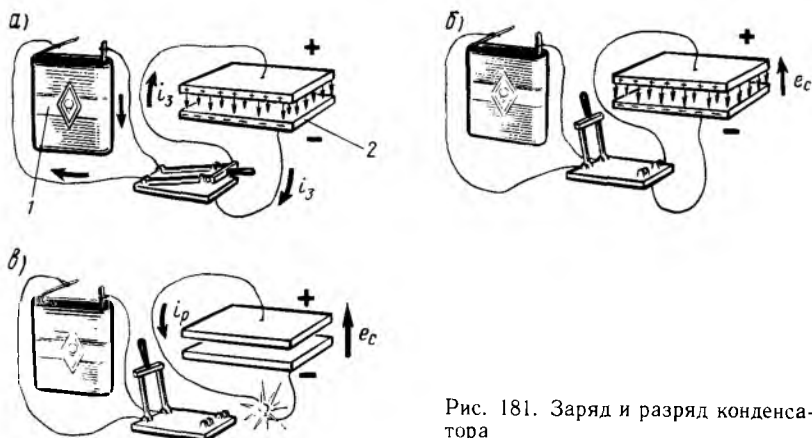


Рис. 181. Заряд и разряд конденсатора

в 1 Кл разность потенциалов возрастает на 1 В. В практике преимущественно пользуются более мелкими единицами: микрофарадой ($1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$), пикофарадой ($1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ мкФ}$).

Емкость конденсатора зависит от формы и размеров его электродов, их взаимного расположения и свойств диэлектрика, разделяющего электроды. Различают плоские конденсаторы, электродами которых служат плоские параллельные пластины (рис. 182, а), и цилиндрические (рис. 182, б).

Свойствами конденсатора обладают не только специально изготовленные на заводе устройства, но и любые два проводника, разделенные диэлектриком. Емкость их оказывает существенное влияние на работу электротехнических установок при переменном токе. Например, конденсаторами с определенной емкостью являются два электрических провода, провод и земля (рис. 183, а), жилы электрического кабеля, жилы и металлическая оболочка кабеля (рис. 183, б).

Устройство конденсаторов и их применение в технике. В зависимости от применяемого диэлектрика конденсаторы бывают бумажными, слюдяными, воздушными (рис. 184). Используя в качестве диэлектрика вместо воздуха слюду, бумагу, керамику и другие материалы с высокой диэлектрической проницаемостью, удается при тех же размерах конденсатора увеличить в несколько раз его емкость. Для того чтобы увеличить площади электродов конденсатора, его делают обычно многослойным.

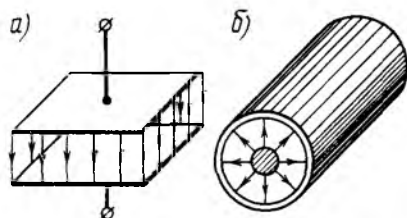


Рис. 182. Плоский (а) и цилиндрический (б) конденсаторы

В электротехнических установках переменного тока обычно применяют силовые конденсаторы. В них электродами служат длинные полосы из алюминиевой, свинцовой или медной фольги, разделенные несколькими слоями специальной (конденсаторной) бумаги, пропитанной нефтяными маслами или синтетическими пропитывающими жидкостями. Ленты фольги 2 и бумаги 1 сматывают в рулоны (рис. 185), сушат, пропитывают парафином и помещают в виде одной или нескольких секций в металлический или картонный корпус. Необходимое рабочее напряжение конденсатора обеспечивается последовательным, параллельным или последовательно-параллельным соединениями отдельных секций.

Всякий конденсатор характеризуется не только значением емкости, но и значением напряжения, которое выдерживает его диэлектрик. При слишком больших напряжениях электроны диэлектрика отрываются от атомов, диэлектрик начинает проводить ток и металлические электроды конденсатора замыкаются накоротко (конденсатор пробивается). Напряжение, при котором это происходит, называют пробивным. Напряжение, при котором конденсатор может надежно работать неограниченно долгое время, называют рабочим. Оно в несколько раз меньше пробивного.

Конденсаторы широко применяют в системах энергоснабжения промышленных предприятий и электрифицированных железных дорог для улучшения использования электрической энергии при переменном токе. На э. п. с. и тепловозах конденсаторы используют для сглаживания пульсирующего тока, получаемого от выпрямителей и импульсных прерывателей, борьбы с искрением контактов электрических аппаратов и с радиопомехами, в системах управления полупроводниковыми преобразователями, а также для созда-

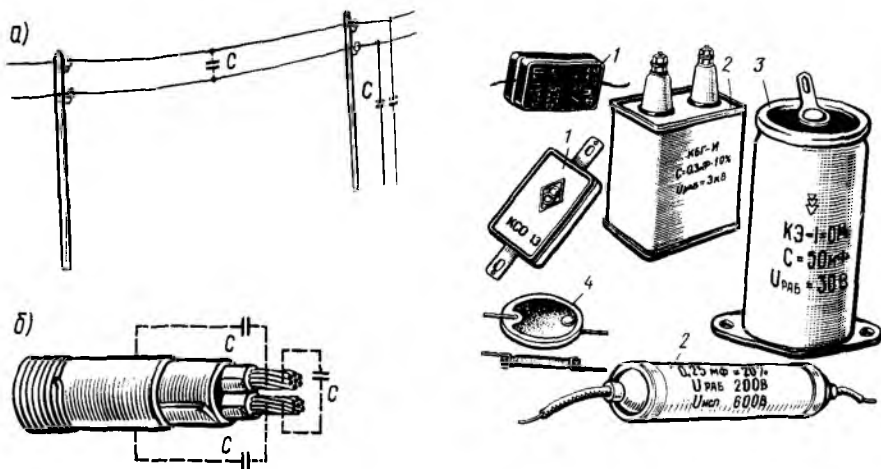


Рис. 183. Емкости, образованные проводниками воздушной линии (а) и жилами кабеля (б)

Рис. 184. Общие виды применяемых конденсаторов:

1 — электролитический; 2 — бумажные; 3 — электролитический; 4 — керамический

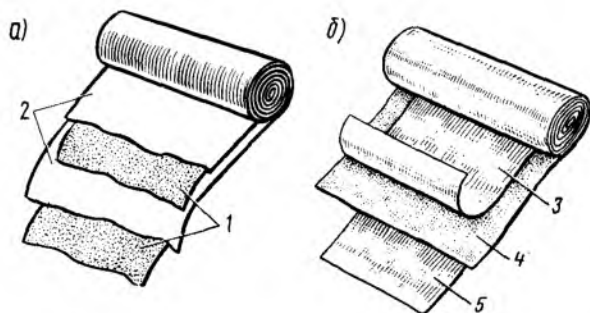


Рис. 185. Устройство бумажного (а) и электролитического (б) конденсаторов

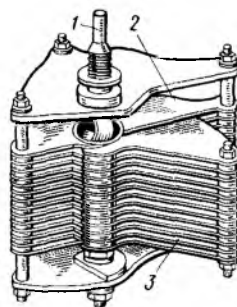


Рис. 186. Устройство конденсатора переменной емкости

ния симметричного трехфазного напряжения, требуемого для питания электродвигателей вспомогательных машин. В радиотехнике конденсаторы служат для создания высокочастотных электромагнитных колебаний, разделения электрических цепей постоянного и переменного тока и др.

В цепях постоянного тока часто устанавливают электролитические конденсаторы. Их изготовляют из двух скатанных в рулон тонких алюминиевых лент 3 и 5 (рис. 185, б), между которыми проложена бумага 4, пропитанная специальным электролитом (раствор борной кислоты с аммиаком в глицерине). Алюминиевую ленту 3 покрывают тонкой пленкой окиси алюминия; эта пленка образует диэлектрик, обладающий высокой диэлектрической проницаемостью. Electroдами конденсатора служат лента 3, покрытая окисной пленкой, и электролит; вторая лента 5 предназначена лишь для создания электрического контакта с электролитом. Конденсатор помещают в цилиндрический алюминиевый корпус.

При включении электролитического конденсатора в цепь постоянного тока необходимо строго соблюдать полярность его полюсов; электрод, покрытый окисной пленкой, должен быть соединен с положительным полюсом источника тока. При неправильном включении диэлектрик пробивается. По этой причине электролитические конденсаторы нельзя включать в цепи переменного тока. Их нельзя также использовать в устройствах, работающих при высоких напряжениях, так как окисная пленка имеет сравнительно небольшую электрическую прочность.

В радиотехнических устройствах применяют также конденсаторы переменной емкости (рис. 186). Такой конденсатор состоит из двух групп пластин: неподвижных 2 и подвижных 3, разделенных воздушными промежутками. Подвижные пластины могут перемещаться относительно неподвижных; при повороте оси 1 конденсатора изменяется площадь взаимного перекрытия пластин, а следовательно, и емкость конденсатора.

Способы соединения конденсаторов. Конденсаторы можно соединять последовательно и параллельно. При последовательном

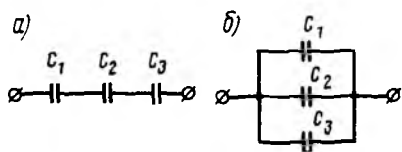


Рис. 187. Последовательное (а) и параллельное (б) соединения конденсаторов

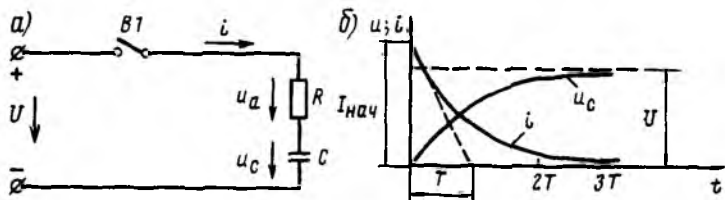


Рис. 188. Схема подключения цепи R - C к источнику постоянного тока (а) и кривые тока и напряжения при переходном процессе (б)

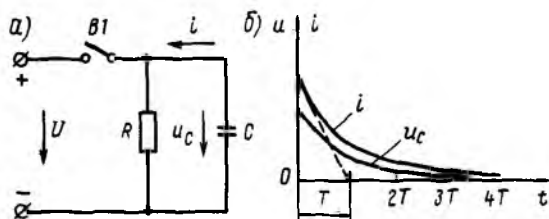


Рис. 189. Схема разряда емкости C на резистор R (а) и кривые тока и напряжения при переходном процессе (б)

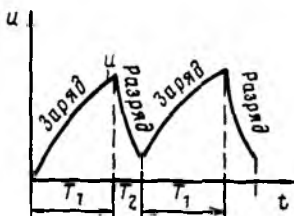


Рис. 190. Кривая пилообразного напряжения

соединении нескольких (например, трех) конденсаторов (рис. 187, а) эквивалентная емкость

$$\frac{1}{C_{\text{эк}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3};$$

эквивалентное емкостное сопротивление

$$X_{C_{\text{эк}}} = X_{C_1} + X_{C_2} + X_{C_3}.$$

При параллельном соединении конденсаторов (рис. 187, б) их результирующая емкость

$$C_{\text{эк}} = C_1 + C_2 + C_3;$$

результирующее емкостное сопротивление

$$\frac{1}{X_{C_{\text{эк}}}} = \frac{1}{X_{C_1}} + \frac{1}{X_{C_2}} + \frac{1}{X_{C_3}}.$$

Включение и отключение цепей постоянного тока с конденсатором. При подключении цепи R - C к источнику постоянного тока и при разряде конденсатора на резистор также возникает переходный процесс с аperiodическим изменением тока i и напряжения u_c . При подключении к источнику постоянного тока цепи R - C выключателем $ВI$ (рис. 188, а) происходит заряд конденсатора. В начальный момент зарядный ток $I_{\text{нач}} = U/R$. Но по мере накопления зарядов на электродах конденсатора напряжение его u_c будет возрастать, а ток уменьшаться (рис. 188, б). Если сопротивление R мало, то в начальный момент подключения конденсатора возникает большой скачок тока, значительно превышающий номинальный ток данной цепи. При разряде конденсатора на резистор R (размыкается выключатель $ВI$ на рис. 189, а) напряжение на конденсаторе u_c и ток i постепенно уменьшаются до нуля (рис. 189, б).

Скорость изменения тока i и напряжения u_c при переходном процессе отделяется постоянной времени

$$T = RC.$$

Чем больше R и C , тем медленнее происходит заряд конденсатора.

Процессы заряда и разряда конденсатора широко используют в электронике и автоматике. С помощью их получают периодические несинусоидальные колебания, называемые *релаксационными*, и, в частности, пилообразное напряжение, необходимое для работы систем управления тиристорами, осциллографов и других устройств. Для получения пилообразного напряжения (рис. 190) периодически подключают конденсатор к источнику питания, а затем к разрядному резистору. Периоды T_1 и T_2 , соответствующие заряду и разряду конденсатора, определяются постоянными времени цепей заряда T_3 и разряда T_p , т. е. сопротивлениями резисторов, включенных в эти цепи.

§ 53. Емкость в цепи переменного тока

Ток и напряжение. В цепи постоянного тока емкость (идеальный конденсатор) имеет сопротивление бесконечно большое, так как после окончания процесса заряда такой конденсатор не пропускает электрический ток. Однако при подключении емкости к источнику переменного тока (рис. 191, а) происходит непрерывный процесс его заряда и разряда, при этом через емкость проходит переменный ток.

Ток i при включении в цепь переменного тока емкости определяется количеством электричества q , проходящим по этой цепи в единицу времени. Следовательно,

$$i = \Delta q / \Delta t,$$

где Δq — изменение количества электричества (заряда q) за время Δt .

Количество электричества q , накопленное в конденсаторе при изменении напряжения u , также непрерывно изменяется. Поэтому, учитывая формулу (69), будем иметь:

$$i = C \Delta u / \Delta t, \quad (70)$$

где Δu — изменение напряжения u за время Δt .

Из рис. 191, б видно, что скорость изменения напряжения $\Delta u / \Delta t$ будет наибольшей в моменты времени, когда угол ωt равен 0; 180 и 360°. Следовательно, в эти моменты времени ток i имеет максимальное значение. В моменты же времени, когда угол ωt равен 90° и 270°, скорость изменения напряжения $\Delta u / \Delta t = 0$ и поэтому $i = 0$.

В течение первой четверти периода происходит заряд емкости и в цепи течет ток заряда, который считаем положительным. При этом по мере заряда емкости и увеличения разности потенциалов на электродах ток i уменьшается. При $\omega t = 90^\circ$ емкость полностью заряжается, разность потенциалов на электродах становится равной напряжению u источника и ток $i = 0$.

Во второй четверти периода емкость начнет разряжаться и ток i изменяет свое направление (становится отрицательным). При

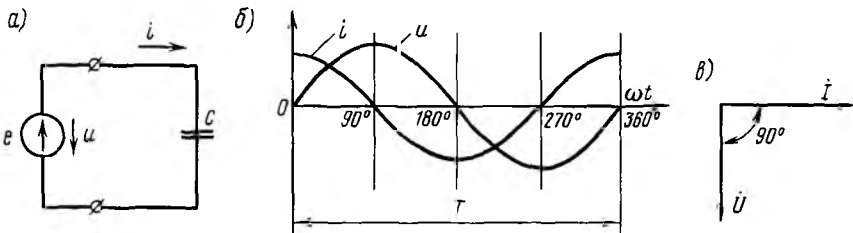


Рис. 191. Схема включения в цепь переменного тока емкости (а), кривые тока i , напряжения u (б) и векторная диаграмма (в)

$\omega t = 180^\circ$, когда $u = 0$, ток i разряда достигает максимального значения. В этот момент изменяется полярность напряжения u источника и начинается процесс перезаряда емкости при противоположном (отрицательном) направлении тока i . При $\omega t = 270^\circ$ заряд прекращается, ток i становится равным нулю и начинается разряд при первоначальном (положительном) направлении тока.

Таким образом, емкость в течение одного периода изменения напряжения u дважды заряжается и дважды разряжается. Следовательно, в цепи (см. рис. 191, а) непрерывно протекает переменный ток i . Из рис. 191, б видно, что при включении в цепь переменного тока емкости ток i опережает по фазе напряжение u на угол 90° или же что напряжение u отстает по фазе от тока i на угол 90° (рис. 191, в).

Емкостное сопротивление. Сопротивление, которое оказывает емкость переменному току, называют *емкостным*. Оно обозначается X_C и измеряется в омах. Физически емкостное сопротивление обусловлено действием э. д. с. e_C , возникающей в конденсаторе C . Эта э. д. с. направлена против приложенного напряжения u , так как заряженный конденсатор можно рассматривать как источник с некоторой э. д. с. e_C , действующей между его пластинами. Поэтому э. д. с. e_C препятствует изменению тока под действием напряжения u , т. е. оказывает прохождению переменного тока определенное сопротивление.

Из формулы (70) следует, что чем больше емкость C и скорость изменения напряжения $\Delta u / \Delta t$, т. е. частота его изменения f (значение ω), тем больше ток i в цепи с емкостью и тем меньше емкостное сопротивление:

$$X_C = 1 / (\omega C).$$

Закон Ома для цепи с емкостью:

$$I = \frac{U}{X_C} = \frac{U}{1 / (\omega C)}.$$

Пример 36. В цепь переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц включен конденсатор емкостью 10 мкФ. Определить ток, протекающий по конденсатору.

Решение. Угловая частота

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с.}$$

Емкостное сопротивление

$$X_C = 1 / (\omega C) = 1 / (314 \cdot 0,00001) = 318 \text{ Ом;}$$

ток, протекающий через конденсатор,

$$I = U / X_C = 220 / 318 = 0,7 \text{ А.}$$

Электрическая мощность. Рассмотрим, как изменяется электрическая мощность в цепи переменного тока с емкостью. Ее можно

получить графическим путем, перемножая ординаты кривых тока и напряжения при различных углах ωt . Кривая мгновенной мощности (см. рис. 179, б) представляет собой синусоиду, которая изменяется с двойной частотой 2ω по сравнению с частотой изменения тока i и напряжения u . Следовательно, в этой цепи тоже имеет место непрерывный колебательный процесс обмена энергией между источником и емкостью. В первую и третью четверти периода мощность положительна, т. е. конденсатор получает энергию W от источника и накапливает ее в своем электрическом поле. Во вторую и четвертую четверть периода конденсатор отдает накопленную энергию источнику (мощность отрицательна); при этом протекание тока по цепи поддерживается э. д. с. e_C . В целом за период в емкостное сопротивление не поступает электрическая энергия (среднее значение мощности за период равно нулю). Поэтому емкостное сопротивление, так же как и индуктивное, относят к группе реактивных сопротивлений.

Для характеристики процесса обмена энергией между источником и емкостью введено понятие *реактивной мощности емкости*:

$$Q_C = U_C I,$$

где U_C — напряжение, приложенное к конденсатору (действующее значение).

Эту мощность можно выразить также в виде

$$Q_C = U_C^2 / X_C, \text{ или } Q_C = I^2 X_C.$$

Следует отметить, что в реальных конденсаторах имеют место потери мощности, вследствие чего они потребляют от источника некоторую электрическую энергию. Потери мощности вызваны тем, что в диэлектрике, разделяющем пластины конденсатора, под действием переменного электрического поля возникают токи смещения, нагревающие диэлектрик. Чем больше напряжение и частота его изменения, тем больше потери мощности в конденсаторах от токов смещения. Однако эти потери имеют значение только в конденсаторах, применяемых в высокочастотных установках. При стандартной частоте 50 Гц потери в конденсаторах настолько малы, что их обычно не учитывают.

§ 54. Последовательное соединение активного сопротивления, индуктивности и емкости

В общем случае в цепях переменного тока обычно имеются все виды сопротивлений: активное, индуктивное и емкостное. Например, электрические двигатели переменного тока могут быть представлены эквивалентной схемой, состоящей из индуктивного сопротивления имеющих в нем катушек и активного сопротивления образующих эти катушки проводов. Воздушные линии элек-

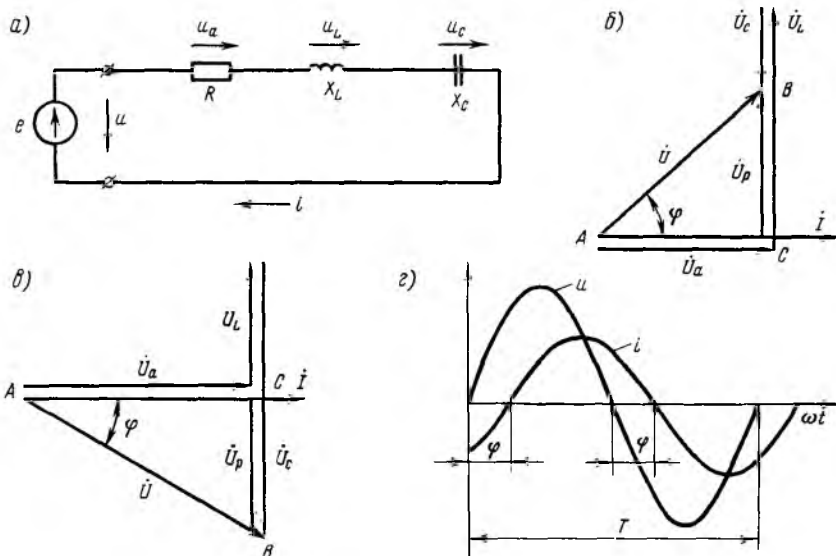


Рис. 192. Схема цепи переменного тока, содержащей последовательно включенные активное, индуктивное и емкостное сопротивления (а), векторные диаграммы (б и в), кривые тока i и напряжения u (г).

тропередачи или кабельные линии обычно представляют в виде совокупности активного, индуктивного и емкостного сопротивлений. Активное сопротивление обусловлено сопротивлением электрических проводов, индуктивное — индуктивностью линии, а емкостное — емкостью, возникающей между отдельными проводами, между проводами и землей или же между отдельными жилами кабеля и между жилами кабеля и его оболочкой.

Расчет электрических цепей переменного тока существенно отличается от расчета цепей постоянного тока, так как при переменном токе в активном, индуктивном и емкостном сопротивлениях имеют место различные сдвиги фаз между токами и напряжениями.

Ток, напряжение и полное сопротивление. При последовательном включении в цепь переменного тока активного R , индуктивного X_L и емкостного X_C сопротивлений (рис. 192, а) к ним приложены напряжения: активное $u_a = iR$, индуктивное $u_L = iX_L$ и емкостное $u_C = iX_C$. Мгновенное значение напряжения u , приложенного к данной цепи, согласно второму закону Кирхгофа равно алгебраической сумме напряжений:

$$u = u_a + u_L + u_C.$$

Но для действующих значений эта формула неприменима, так как между всеми указанными напряжениями имеется сдвиг по фазе (амплитудные значения этих напряжений не совпадают по

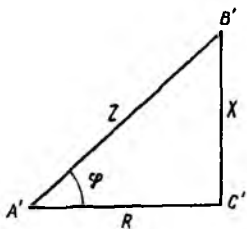


Рис. 193. Треугольник сопротивлений

времени). Чтобы учесть сдвиг по фазе между напряжениями u_a , u_L и u_C , осуществляют сложение их векторов:

$$\dot{U} = \dot{U}_a + \dot{U}_L + \dot{U}_C$$

Для этого строят векторную диаграмму, на которой откладывают в определенном масштабе векторы тока I и напряжений \dot{U}_a , \dot{U}_L , \dot{U}_C . Из этих напряжений первое совпадает по фазе с током, второе опережает его на 90° . Векторная диаграмма (рис. 192, б) построена для цепи, в которой индуктивное сопротивление X_L больше емкостного X_C (вектор U_L больше вектора U_C), а рис. 192, в — для цепи, в которой X_L меньше X_C (вектор U_L меньше вектора U_C). Вектор напряжения U является замыкающим — он сдвинут по фазе относительно вектора тока I на некоторый угол φ . Напряжение U (действующее значение) может быть определено из треугольника ABC по теореме Пифагора:

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2} \quad (71)$$

Таким образом, из-за наличия угла сдвига фаз φ напряжение U всегда меньше алгебраической суммы $U_a + U_L + U_C$. Разность $U_L - U_C = U_p$ называется *реактивной составляющей напряжения*.

Рассмотрим, как изменяются ток и напряжение в последовательной цепи переменного тока.

В цепи, содержащей все три вида сопротивления, ток i и напряжение u оказываются сдвинутыми по фазе на некоторый угол φ (рис. 192, з), при этом $0 < \varphi < 90^\circ$.

Полное сопротивление и угол сдвига фаз. Если подставить в формулу (71) значения $U_a = IR$; $U_L = I\omega L$ и $U_C = I/(\omega C)$, то будем иметь: $U = \sqrt{(IR)^2 + [I\omega L - I/(\omega C)]^2}$, откуда получаем формулу закона Ома для последовательной цепи переменного тока:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + [\omega L - 1/(\omega C)]^2}} = \frac{U}{Z} \quad (72)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + [\omega L - 1/(\omega C)]^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$.

Величину Z называют *полным сопротивлением цепи*, оно измеряется в омах. Разность $\omega L - 1/(\omega C)$ называют *реактивным сопротивлением цепи* и обозначают буквой X . Следовательно, полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

Соотношение между активным, реактивным и полным сопротивлениями цепи переменного тока можно также получить по теореме Пифагора из треугольника сопротивлений (рис. 193). Треугольник сопротивлений $A'B'C'$ можно получить из треугольника напряжений ABC (см. рис. 192, б), если разделить все его стороны на ток I .

Угол сдвига фаз φ определяется соотношением между отдельными сопротивлениями, включенными в данную цепь. Из треугольника $A'B'C'$ (см. рис. 193) имеем:

$$\sin \varphi = X/Z; \quad \cos \varphi = R/Z; \quad \operatorname{tg} \varphi = X/R. \quad (73)$$

Например, если активное сопротивление R значительно больше реактивного сопротивления X , угол φ сравнительно небольшой. Если в цепи имеется большое индуктивное или большое емкостное сопротивление, то угол сдвига фаз φ возрастает и приближается к 90° . При этом, если индуктивное сопротивление больше емкостного, напряжение и опережает ток i на угол φ ; если же емкостное сопротивление больше индуктивного, то напряжение и отстает от тока i на угол φ .

Пример 37. В цепь переменного тока напряжением 220 В включены последовательно: резистор с активным сопротивлением $R=8$ Ом, катушка с индуктивным сопротивлением $X_L=10$ Ом и конденсатор с емкостным сопротивлением $X_C=4$ Ом. Определить реактивное и полное сопротивления всей цепи, проходящий по ней ток и напряжения на отдельных ее участках.

Решение. Реактивное сопротивление цепи

$$X = X_L - X_C = 10 - 4 = 6 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \text{ Ом.}$$

Ток

$$I = U/Z = 220/10 = 22 \text{ А.}$$

Напряжение на резисторе

$$U_a = IR = 22 \cdot 8 = 176 \text{ В.}$$

Напряжение на катушке индуктивности

$$U_L = IX_L = 22 \cdot 10 = 220 \text{ В.}$$

Напряжение на конденсаторе

$$U_C = IX_C = 22 \cdot 4 = 88 \text{ В.}$$

§ 55. Параллельное соединение сопротивлений в цепи переменного тока

Простейшая параллельная цепь. Рассмотрим простейшую цепь, состоящую из параллельно соединенных активного R и реактивного X сопротивлений (рис. 194, а). В данной схеме в качестве

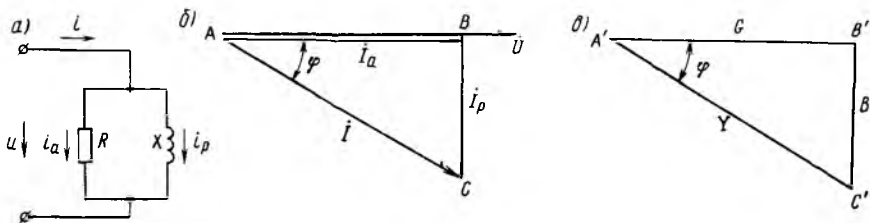


Рис. 194. Схема простейшей параллельной цепи переменного тока (а), векторная диаграмма (б) и треугольник проводимостей (в)

реактивного принято индуктивное сопротивление, но оно может быть также и емкостным. Для каждой ветви этой схемы можно по закону Ома определить токи I_a и I_p в ветвях и их углы сдвига фаз относительно напряжения, а затем, построив векторную диаграмму (рис. 194, б), найти по правилу сложения векторов ток в неразветвленной части цепи:

$$I = I_a + I_p$$

При построении векторной диаграммы в качестве исходного вектора используют вектор напряжения \dot{U} , а затем под соответствующими углами откладывают векторы токов \dot{I}_a и \dot{I}_p . В данном случае ток \dot{I}_a будет совпадать по фазе с напряжением \dot{U} , а ток \dot{I}_p — отставать от него на угол 90° . Ток I сдвинут относительно напряжения \dot{U} на угол φ .

Из треугольника токов ABC имеем:

$$I_a = I \cos \varphi; \quad I_p = I \sin \varphi; \quad I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$$

Проводимости при переменном токе. Если разделить все стороны треугольника токов ABC на напряжение U , то получим треугольник проводимостей $A'B'C'$ (рис. 194, в).

При переменном токе существуют три вида проводимостей: *активная G, реактивная B и полная Y*. Активная проводимость для цепи, содержащей последовательно включенные R, L и C :

$$G = R/Z^2 = R/(R^2 + X^2);$$

реактивная проводимость

$$B = X/Z^2 = X/(R^2 + X^2).$$

Реактивная проводимость в общем случае состоит из двух составляющих: емкостной проводимости $B_C = X_C/Z^2$ и индуктивной проводимости $B_L = X_L/Z^2$. При этом $B = B_C - B_L$.

Полная проводимость

$$Y = 1/Z = 1/\sqrt{R^2 + X^2}, \text{ или } Y = \sqrt{G^2 + B^2}$$

В цепи переменного тока активная проводимость в общем случае не равна $1/R$, она принимает это значение только в том случае, когда в данной параллельной ветви реактивное сопротивление $X=0$. Точно так же и реактивная проводимость в общем случае не равна $1/X$, она принимает это значение только когда в данной параллельной ветви $R=0$.

Зная проводимость Y , можно определить ток в цепи:

$$I = UY.$$

Из треугольника проводимостей $A'B'C'$ можно определить угол сдвига фаз φ между током I в неразветвленной части цепи и напряжением U :

$$\cos \varphi = G/Y; \quad \sin \varphi = B/Y; \quad \operatorname{tg} \varphi = B/G.$$

Пример 38. В цепь переменного тока с напряжением $U=120$ В включены параллельно резистор с активным сопротивлением 20 Ом и катушка с индуктивным сопротивлением 15 Ом. Определить токи I_a и I_p в ветвях, ток I в неразветвленной части цепи, угол сдвига фаз между током I и напряжением U .

Решение. Ток, протекающий через резистор,

$$I_a = U/R = 120/20 = 6 \text{ А.}$$

Ток, протекающий через катушку индуктивности,

$$I_p = U/X = 120/15 = 8 \text{ А.}$$

Активная проводимость цепи

$$G = 1/R = 1/20 \text{ См.}$$

Реактивная проводимость цепи

$$B = 1/X = 1/15 \text{ См.}$$

Полная проводимость

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \sqrt{(1/20)^2 + (1/15)^2} = 1/12 \text{ См.}$$

Ток в неразветвленной части цепи

$$I = UY = 120 \cdot 1/12 = 10 \text{ А.}$$

Угол сдвига фаз между током I и напряжением U :

$$\cos \varphi = \frac{G}{Y} = \frac{1/20}{1/12} = \frac{3}{5} = 0,6.$$

Общий случай параллельного соединения сопротивлений. В случае если в каждой ветви включены активное R и реактивное X сопротивления (рис. 195, а), следует по формулам (72) и (73) определить токи I_1 и I_2 в параллельных ветвях и углы их сдвига фаз φ_1 и φ_2 относительно напряжения U , а затем, построив векторную диаграмму (рис. 195, б), найти по правилу сложения векторов ток в неразветвленной части цепи $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$ и угол его сдвига фаз φ относительно напряжения U .

Можно также определить эквивалентную активную проводимость всей цепи:

$$G_{\text{эк}} = G_1 + G_2;$$

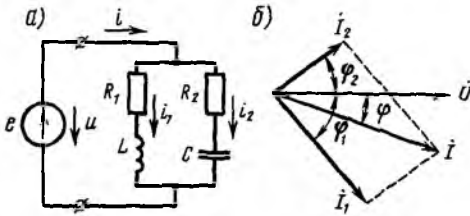


Рис. 195. Схема параллельной цепи переменного тока, содержащая активное, индуктивное и емкостное сопротивления (а), и векторная диаграмма (б)

эквивалентную реактивную проводимость

$$B_{\text{эк}} = B_{C2} - B_{L1};$$

полную проводимость всей цепи

$$Y_{\text{эк}} = \sqrt{G_{\text{эк}}^2 + B_{\text{эк}}^2},$$

а затем найти ток в неразветвленной части цепи

$$I = UY_{\text{эк}}.$$

В общем случае при определении эквивалентной реактивной проводимости нескольких параллельных ветвей *емкостные проводимости ветвей* B_C *берут со знаком «плюс», а индуктивные* B_L *— со знаком «минус».*

Пример 39. Цепь переменного тока напряжением $U = 120$ В имеет две параллельные ветви. В первую ветвь включены последовательно резистор с $R_1 = 6$ Ом и катушка индуктивности с $X_{L1} = 8$ Ом, во вторую — последовательно резистор с $R_2 = 3$ Ом и конденсатор с $X_{C2} = 4$ Ом.

Определить токи I_1 и I_2 в ветвях, ток I в неразветвленной части цепи, угол сдвига фаз между током I и напряжением U .

Решение. Полные сопротивления первой и второй ветвей:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10 \text{ Ом};$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{C2}^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ Ом}.$$

Токи I_1 и I_2 в ветвях:

$$I_1 = U/Z_1 = 120/10 = 12 \text{ А}; \quad I_2 = U/Z_2 = 120/5 = 24 \text{ А}.$$

Эквивалентная активная проводимость всей цепи

$$G_{\text{эк}} = G_1 + G_2 = R_1/Z_1^2 + R_2/Z_2^2 = 6/100 + 3/25 = 18/100 \text{ См}.$$

Эквивалентная реактивная проводимость всей цепи

$$B_{\text{эк}} = B_{C2} - B_{L1} = X_{C2}/Z_2^2 - X_{L1}/Z_1^2 = 4/25 - 8/100 = 8/100 \text{ См}.$$

Полная проводимость всей цепи

$$Y_{\text{эк}} = \sqrt{G_{\text{эк}}^2 + B_{\text{эк}}^2} = \sqrt{(18/100)^2 + (8/100)^2} \approx 20/100 \text{ См}.$$

Ток в неразветвленной части цепи

$$I = UY_{\text{эк}} = 120 \cdot 20/100 = 24 \text{ А}.$$

Угол сдвига фаз между током и напряжением

$$\cos \varphi = \frac{G_{\text{эк}}}{Y_{\text{эк}}} = \frac{18/100}{20/100} = 0,9.$$

§ 56. Резонанс напряжений и резонанс токов

Явление резонанса. Электрическая цепь, содержащая индуктивность и емкость, может служить колебательным контуром, где возникает процесс колебаний электрической энергии, переходящей из индуктивности в емкость и обратно. В идеальном колебательном контуре эти колебания будут незатухающими. При подсоединении колебательного контура к источнику переменного тока угловая частота источника ω может оказаться равной угловой частоте ω_0 , с которой происходят колебания электрической энергии в контуре. В этом случае имеет место явление резонанса, т. е. совпадения частоты свободных колебаний ω_0 , возникающих в какой-либо физической системе, с частотой вынужденных колебаний ω , сообщаемых этой системе внешними силами.

Резонанс в электрической цепи можно получить тремя способами: изменяя угловую частоту ω источника переменного тока, индуктивность L или емкость C . Различают резонанс при последовательном соединении L и C — *резонанс напряжений* и при параллельном их соединении — *резонанс токов*. Угловая частота ω_0 , при которой наступает резонанс, называется *резонансной*, или *собственной частотой колебаний резонансного контура*.

Резонанс напряжений. При резонансе напряжений (рис. 196, а) индуктивное сопротивление X_L равно емкостному X_C и полное сопротивление Z становится равным активному сопротивлению R :

$$Z = \sqrt{R^2 + [\omega_0 L - 1/(\omega_0 C)]^2} = R.$$

В этом случае напряжения на индуктивности U_L и емкости U_C равны и находятся в противофазе (рис. 196, б), поэтому при сложении они компенсируют друг друга. Если активное сопротивление цепи R невелико, ток в цепи резко возрастает, так как реактивное сопротивление цепи $X = X_L - X_C$ становится равным нулю. При этом ток I совпадает по фазе с напряжением U и $I = U/R$. Резкое возрастание тока в цепи при резонансе напряжений вызывает такое же возрастание напряжений U_L и U_C , причем их значения могут во много раз превышать напряжение U источника, питающего цепь.

Угловая частота ω_0 , при которой имеют место условия резонанса, определяется из равенства $\omega_0 L = 1/(\omega_0 C)$.

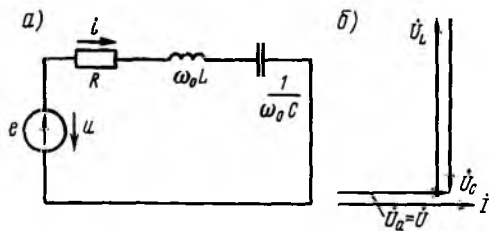


Рис. 196. Схема (а) и векторная диаграмма (б) электрической цепи, содержащей R , L и C , при резонансе напряжений

Отсюда имеем

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}. \quad (74)$$

Если плавно изменять угловую частоту ω источника, то полное сопротивление Z сначала начинает уменьшаться, достигает наименьшего значения при резонансе напряжений (при ω_0), а затем увеличивается (рис. 197, а). В соответствии с этим ток I в цепи сначала возрастает, достигает наибольшего значения при резонансе, а затем уменьшается.

Резонанс токов. Резонанс токов может возникнуть при параллельном соединении индуктивности и емкости (рис. 198, а). В идеальном случае, когда в параллельных ветвях отсутствует активное сопротивление ($R_1 = R_2 = 0$), условием резонанса токов является равенство реактивных сопротивлений ветвей, содержащих индуктивность и емкость, т. е. $\omega_0 L = 1/(\omega_0 C)$. Так как в рассматриваемом случае активная проводимость $G = 0$, ток в неразветвленной части

цепи при резонансе $I = U\sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = 0$. Значения токов в ветвях I_1 и I_2 будут равны (рис. 198, б), но токи будут сдвинуты по фазе на 180° (ток I_L в индуктивности отстает по фазе от напряжения U на 90° , а ток в емкости I_C опережает напряжение U на 90°). Следовательно, такой резонансный контур представляет собой для тока I бесконечно большое сопротивление и электрическая энергия в контур от источника не поступает. В то же время внутри контура протекают токи I_L и I_C , т. е. имеет место процесс непрерывного обмена энергией внутри контура. Эта энергия переходит из индуктивности в емкость и обратно.

Как следует из формулы (74), изменяя значения емкости C или индуктивности L , можно изменять частоту колебаний ω_0 электрической энергии и тока в контуре, т. е. осуществлять настройку контура на требуемую частоту. Если бы в ветвях, в которых включены индуктивность и емкость, не было активного сопротивления, этот процесс колебания энергии продолжался бы бесконечно долго, т. е. в контуре возникли бы незатухающие колебания энергии и токов I_L и I_C . Однако реальные катушки индуктивности и конденсаторы всегда поглощают электрическую энергию (из-за наличия в катушках активного сопротивления проводов и возникновения

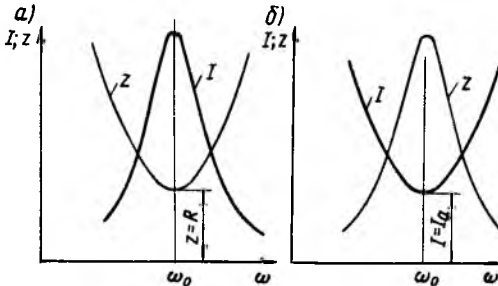


Рис. 197. Зависимости тока I и полного сопротивления Z от ω для последовательной (а) и параллельной (б) цепей переменного тока

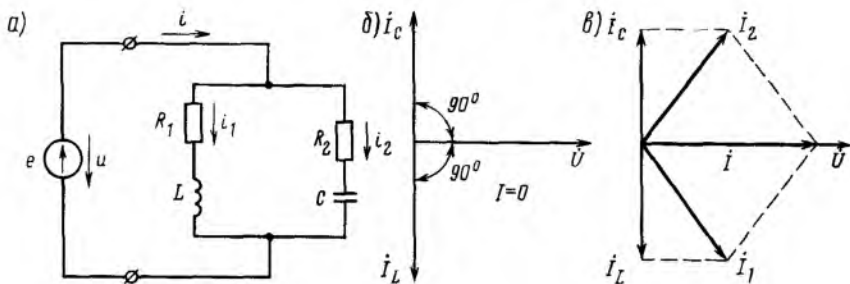


Рис. 198. Электрическая схема (а) и векторные диаграммы (б и в) при резонансе токов

в конденсаторах токов смещения, нагревающих диэлектрик), поэтому в реальный контур при резонансе токов поступает от источника некоторая электрическая энергия и по неразветвленной части цепи протекает некоторый ток I .

Условием резонанса в реальном резонансном контуре, содержащем активные сопротивления R_1 и R_2 , будет равенство реактивных проводимостей $B_L = B_C$ ветвей, в которые включены индуктивность и емкость.

Из рис. 198, в следует, что ток I в неразветвленной части цепи совпадает по фазе с напряжением U , так как реактивные токи I_L и I_C равны, но противоположны по фазе, вследствие чего их векторная сумма равна нулю.

Если в рассматриваемой параллельной цепи изменять частоту ω_0 источника переменного тока, то полное сопротивление цепи начинает увеличиваться, достигает наибольшего значения при резонансе, а затем уменьшается (см. рис. 197, б). В соответствии с этим ток I начинает уменьшаться, достигает наименьшего значения $I_{\min} = I_a$ при резонансе, а затем увеличивается.

В реальных колебательных контурах, содержащих активное сопротивление, каждое колебание тока сопровождается потерями энергии. В результате сообщенная контуру энергия довольно быстро расходуется и колебания тока постепенно затухают. Для получения незатухающих колебаний необходимо все время пополнять потери энергии в активном сопротивлении, т. е. такой контур должен быть подключен к источнику переменного тока соответствующей частоты ω_0 .

Явления резонанса напряжения и тока и колебательный контур получили весьма широкое применение в радиотехнике и высокочастотных установках. При помощи колебательных контуров мы получаем токи высокой частоты в различных радиоустройствах и высокочастотных генераторах. Колебательный контур — важнейший элемент любого радиоприемника. Он обеспечивает его избирательность, т. е. способность выделять из радиосигналов с различной длиной волны (т. е. с различной частотой), посланных различными радиостанциями, сигналы определенной радиостанции.

§ 57. Мощность переменного тока и коэффициент мощности

Мгновенное значение мощности. В цепи, содержащей активное, индуктивное и емкостное сопротивления, в которой ток i и напряжение u в общем случае сдвинуты по фазе на некоторый угол φ , мгновенное значение мощности p равно произведению мгновенных значений силы тока i и напряжения u . Кривую мгновенной мощности p можно получить перемножением мгновенных значений тока i и напряжения u при различных углах ωt (рис. 199, а). Из этого рисунка видно, что в некоторые моменты времени, когда ток и напряжение направлены навстречу друг другу, мощность имеет отрицательное значение. Возникновение в электрической цепи отрицательных значений мощности является вредным. Это означает, что в такие периоды времени приемник возвращает часть полученной электроэнергии обратно источнику; в результате уменьшается мощность, передаваемая от источника к приемнику. Очевидно, что чем больше угол сдвига фаз φ , тем больше время, в течение которого часть электроэнергии возвращается обратно к источнику, и тем больше возвращаемая обратно энергия и мощность.

Активная и реактивная мощности. Мгновенная мощность может быть представлена в виде суммы двух составляющих 1 и 2 (рис. 199, б). Составляющая 1 соответствует изменению мощности в цепи с активным сопротивлением (см. рис. 175, б).

Среднее ее значение, которое называют *активной мощностью*,

$$P = UI \cos \varphi. \quad (75)$$

Она представляет собой среднюю мощность, которая поступает от источника к электрическим установкам при переменном токе.

Составляющая 2 изменяется подобно изменению мощности в цепи с реактивным сопротивлением (индуктивным или емкостным, см. рис. 179, а и б). Среднее ее значение равно нулю, поэтому для оценки этой составляющей пользуются ее амплитудным значением, которое называют *реактивной мощностью*:

$$Q = UI \sin \varphi. \quad (76)$$

Рассматривая кривые мощности (см. рис. 199, б), можно установить, что *только активная мощность может обеспечить преобразование в приемнике электрической энергии в другие виды энергии*. Эта мощность в течение всего периода имеет положительный знак, т. е. соответствующая ей электрическая энергия 2, называемая активной, непрерывно переходит от источника 1 к приемнику 4 (рис. 200, а). *Реактивная мощность никакой полезной работы создать не может, так как среднее значение ее в течение одного периода равно нулю*. Как видно из рис. 199, б, эта мощность становится то положительной, то отрицательной, т. е. соответствующая ей электрическая энергия 3, называемая реактивной,

непрерывно циркулирует по электрической цепи от источника электрической энергии I к приемнику 4 и обратно (см. рис. 200, a).

Возникновение реактивной мощности в цепи переменного тока возможно только при включении в эту цепь накопителей энергии, таких как катушка индуктивности или конденсатор. В первом случае электрическая энергия, поступающая от источника, накапливается в электромагнитном поле катушки индуктивности, а затем отдается обратно; во втором случае она накапливается в электрическом поле конденсатора, а затем возвращается обратно к источнику. Постоянная циркуляция реактивной мощности от источника к приемникам загружает генераторы переменного тока и электрические сети реактивными токами, не создающими полезной работы, и тем самым не дает возможности использовать их по прямому назначению для выработки и передачи потребителям активной мощности. Поэтому в производственных условиях стараются по возможности уменьшить реактивную мощность, потребляемую электрическими установками.

Полная мощность. Источники электрической энергии переменного тока (генераторы и трансформаторы) рассчитаны на определенный номинальный ток $I_{ном}$ и определенное номинальное напряжение $U_{ном}$, которые зависят от конструкции машины, размеров ее основных частей и пр. Увеличить значительно номинальный ток или номинальное напряжение нельзя, так как это может привести к недопустимому нагреву обмоток машины или пробоем их изоляции. Поэтому каждый генератор

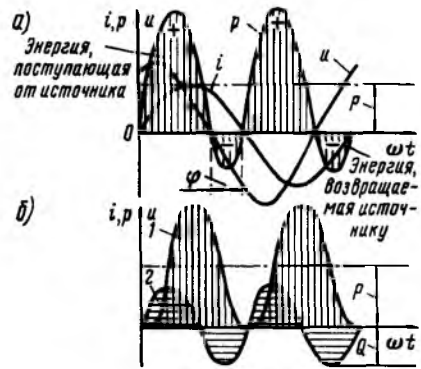


Рис. 199. Зависимость мгновенной мощности p (a) и ее составляющих (b) от угла ωt

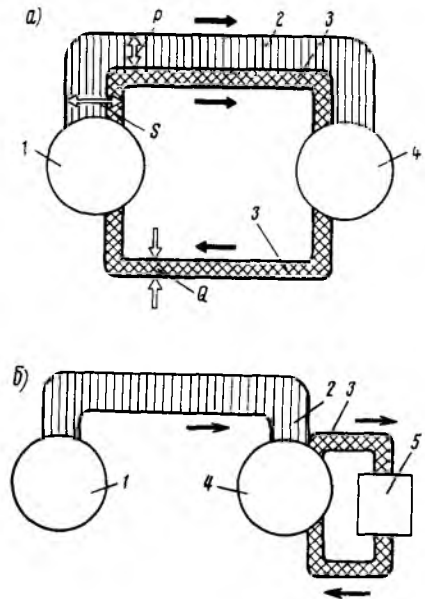
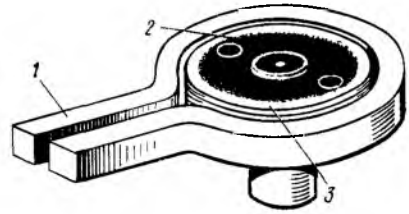


Рис. 200. Диаграмма, иллюстрирующая передачу электрической энергии между источником и приемником, содержащим активное и реактивное сопротивление, при отсутствии компенсатора (a) и при наличии его (b): 1 — источник; 2, 3 — условные изображения активной и реактивной энергии; 4 — приемник; 5 — компенсатор

Рис. 177. Схема термообработки деталей токами высокой частоты:

1 — высокочастотный индуктор; 2 — закаливаемая деталь; 3 — разогретый слой



тока, последний будет стремиться пройти там, где э. д. с. самоиндукции имеет наименьшее значение, т. е. пройдет преимущественно по поверхностным слоям проводника. В результате этого плотность тока J в поверхностных слоях будет больше, чем во внутренних. Чем больше частота тока, тем больше э. д. с. самоиндукции индуцируется во внутренних слоях проводника и тем в большей степени ток вытесняется на поверхность.

При частоте 50 Гц увеличение сопротивления медных и алюминиевых проводников при малом их диаметре практически ничтожно, и сопротивление таких проводников в цепях переменного и постоянного тока можно считать одинаковым. Но для медных и алюминиевых проводников диаметром свыше 10 мм, а для стальных проводников при еще меньших диаметрах необходимо при расчетах учитывать влияние поверхностного эффекта на их активное сопротивление.

При токах высокой частоты, принятых в радиотехнике, телевидении и различных высокочастотных установках, с целью лучшего использования металла проводников их обычно изготавливают полыми.

На свойстве переменного тока высокой частоты протекать, главным образом, по поверхности проводников основаны различные методы высокочастотной закалки и термообработки. Например, при высокочастотной термообработке деталей вихревыми токами (рис. 177) эти токи индуцируются в основном в поверхностном слое металла. Они быстро разогревают поверхностные слои обрабатываемой детали, раньше, чем ее внутренняя часть успеет заметно нагреться за счет теплопроводности металла.

Пример 34. В цепь переменного тока напряжением $U=220$ В (действующее значение) включена электрическая лампа сопротивлением $R=484$ Ом. Определить ток, проходящий по лампе, а также мощность, потребляемую лампой.

Решение. Действующее значение тока, проходящего по лампе,

$$I = U/R = 220/484 = 0,455 \text{ А.}$$

Амплитудное значение тока (в момент, когда напряжение имеет амплитудное значение $U_m = 1,41U = 310$ В)

$$I_m = 1,41I = 1,41 \cdot 0,455 = 0,64 \text{ А.}$$

Мощность, потребляемая лампой,

$$P = UI = 220 \cdot 0,455 = 100 \text{ Вт.}$$

или трансформатор может длительно отдавать без опасности аварии только вполне определенную мощность, равную произведению его номинального тока на номинальное напряжение. *Произведение действующих значений тока и напряжения называется полной мощностью,*

$$S = UI.$$

Следовательно, полная мощность представляет собой наибольшее значение активной мощности при заданных значениях тока и напряжения. Она характеризует ту наибольшую мощность, которую можно получить от источника переменного тока при условии, что между проходящим по нему током и напряжением отсутствует сдвиг фаз. Полную мощность измеряют в вольт-амперах (В·А) или киловольт-амперах (кВ·А).

Связь между мощностями P , Q и S можно определить из векторной диаграммы напряжений (рис. 201, а). Если умножить на ток I все стороны треугольника ABC , то получим треугольник мощностей $A'B'C'$ (рис. 201, б), стороны которого равны P , Q и S . Из треугольника мощностей имеем:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Из этого выражения следует, что при заданной полной мощности S (т. е. напряжении U и токе I) чем больше реактивная мощность Q , которая проходит через генератор переменного тока или трансформатор, тем меньше активная мощность P , которую он может отдать приемнику. Иными словами, реактивная мощность не позволяет полностью использовать всю расчетную мощность источников переменного тока для выработки полезно используемой электрической энергии. То же самое относится и к электрическим сетям. Ток $I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$, который можно безопасно пропускать по данной электрической сети, определяется, главным образом, поперечным сечением ее проводов. Поэтому если часть I_p проходящего по сети тока (см. рис. 194, б) идет на создание реактивной мощности, то должен быть уменьшен активный ток I_a , обеспечивающий создание активной мощности, которую можно пропустить по данной сети.

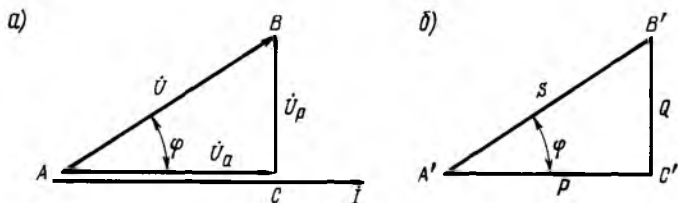


Рис. 201. Векторная диаграмма напряжений (а) и треугольник мощностей (б) для цепи переменного тока

Р е ш е н и е. Реактивное сопротивление цепи

$$X = X_L - X_C = 12 - 6 = 6 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \text{ Ом.}$$

Ток

$$I = U/Z = 220/10 = 22 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = R/Z = 8/10 = 0,8.$$

Активная мощность

$$P = UI \cos \varphi = 220 \cdot 22 \cdot 0,8 = 3872 \text{ Вт.}$$

Величина

$$\sin \varphi = X/Z = 6/10 = 0,6.$$

Реактивная мощность

$$Q = UI \sin \varphi = 220 \cdot 22 \cdot 0,6 = 2904 \text{ вар.}$$

Полная мощность

$$S = UI = 220 \cdot 22 = 4840 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

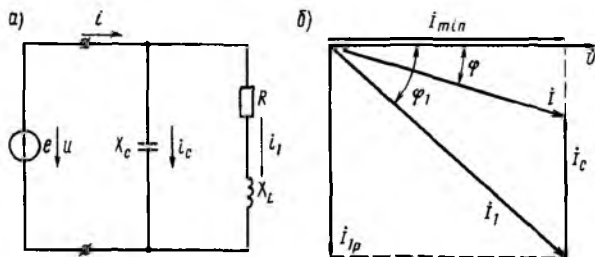
Повышение коэффициента мощности. $\cos \varphi$ повышают различными способами. Основной из них — включение параллельно приемникам электрической энергии специальных устройств, называемых *компенсаторами*. В качестве последних чаще всего используют батареи конденсаторов (статические компенсаторы), но могут быть применены также и синхронные электрические машины (вращающиеся компенсаторы).

Способ повышения $\cos \varphi$ с помощью статического компенсатора (рис. 202, а) называют *компенсацией сдвига фаз*, или *компенсацией реактивной мощности*. При отсутствии компенсатора от источника к приемнику, содержащему активное и индуктивное сопротивления, поступает ток i_1 , который отстает от напряжения u на некоторый угол сдвига фаз φ_1 . При включении компенсатора X_C по нему проходит ток i_C , опережающий напряжение u на 90° . Как видно из векторной диаграммы (рис. 202, б), при этом в цепи источника будет проходить ток $i < i_1$ и угол сдвига фаз его φ относительно напряжения также будет меньше φ_1 .

Для полной компенсации угла сдвига фаз φ , т. е. для получения $\cos \varphi = 1$ и минимального значения тока I_{\min} , необходимо, чтобы ток компенсатора I_C был равен реактивной составляющей $I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1$ тока I_1 .

При включении компенсатора 5 (см. рис. 200, б) источник 1 и электрическая сеть разгружаются от реактивной энергии \mathcal{Z} , так как она циркулирует уже по цепи «приемник — компенсатор». Благодаря этому достигаются существенное повышение использования генераторов переменного тока и электрических сетей и уменьшение потерь энергии, возникающих при бесполезной циркуляции реактивной энергии между источником 1 и приемником 4. Компен-

Рис. 202. Схема, иллюстрирующая способ повышения $\cos \varphi$ с помощью компенсатора (а), и векторная диаграмма (б)



сатор в этом случае выполняет роль генератора реактивной энергии, так как токи I_C в конденсаторе и I_{1p} в катушке индуктивности (см. рис. 202, б) направлены навстречу один другому (первый опережает по фазе напряжение на 90° , второй отстает от него на 90°), вследствие чего включение компенсатора уменьшает общий реактивный ток I_p и сдвиг фаз между током I и напряжением U . При надлежащем подборе реактивной мощности компенсатора можно добиться, что вся реактивная энергия \mathcal{E} (см. рис. 200, б), поступающая в приемник 4, будет циркулировать внутри контура «приемник — компенсатор», а генератор и сеть не будут участвовать в ее передаче. При этих условиях от источника 1 к приемнику 4 будет передаваться только активная мощность 2, т. е. $\cos \varphi$ будет равен единице.

В большинстве случаев по экономическим соображениям в электрических установках осуществляют неполную компенсацию угла сдвига фаз и ограничиваются значением $\cos \varphi = 0,95$.

§ 58. Передача электрической энергии по проводам при переменном токе

В линиях переменного тока (рис. 203, а) следует различать падение и потерю напряжения. *Потерей напряжения* называется алгебраическая разность между напряжениями в начале и в конце линии $U_1 - U_2$. По допустимой потере напряжения выбирают площадь поперечного сечения проводов линии (см. § 15). *Падением напряжения* называется векторная разность $\Delta \dot{U}_l = \dot{U}_1 - \dot{U}_2$ (рис. 203, б) между напряжениями в начале и в конце линий, численно равная произведению действующего значения тока I_l в линии на ее полное сопротивление Z_l .

Падение и потерю напряжения в линии можно определить по векторной диаграмме (см. рис. 203, б), построенной для активно-индуктивной нагрузки Z_n , при которой ток i_n отстает по фазе от напряжения u_2 на угол φ . При построении диаграммы исходят из следующего векторного уравнения:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \Delta \dot{U}_{ал} + \Delta \dot{U}_{рл},$$

где $\Delta \dot{U}_{ал}$ и $\Delta \dot{U}_{рл}$ — векторы падений и напряжений в активном и реактивном сопротивлениях линии.

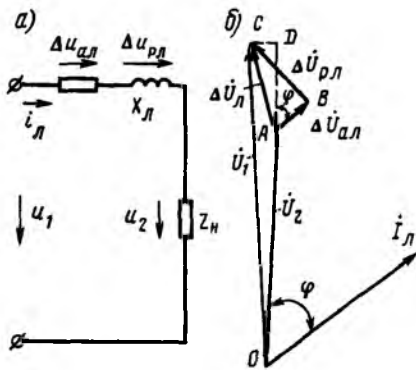


Рис. 203. Схема (а) и векторная диаграмма (б) электрической линии переменного тока

При этом $\Delta U_{al} = I_L R_L$ и $\Delta U_{rl} = I_L X_L$ (здесь R_L и X_L — активное и реактивное сопротивления линии).

При построении векторной диаграммы вначале откладывают вектор напряжения U_2 и вектор тока I_L , затем к вектору U_2 прибавляют вектор ΔU_{al} , параллельный I_L (совпадает с ним по фазе), и вектор ΔU_{rl} , опережающий I_L на угол 90° . При этом получают вектор U_1 .

Падение напряжения в линии $\Delta U_L = U_1 - U_2$ представляет собой вектор, соединяющий концы векторов U_1 и U_2 .

Его можно подсчитать по формуле

$$\Delta U_L = I_L Z_L = I_L \sqrt{R_L^2 + X_L^2}.$$

В качестве потери напряжения в линии обычно принимают отрезок AD (см. рис. 203, б). Из треугольника ABC получаем:

$$U_1 - U_2 = I_L (R_L \cos \varphi + X_L \sin \varphi).$$

Таким образом, падение напряжения в линии ΔU_L зависит от ее параметров R_L и X_L и тока I_L в линии, а потеря напряжения, кроме того, от угла φ между током I_L и напряжением U_2 .

При чисто активной нагрузке $\cos \varphi = 1$ и $\sin \varphi = 0$. Поэтому потеря напряжения в линии

$$U_1 - U_2 = I_L R_L.$$

При $X_L = 0$ разность $U_1 - U_2 = I_L R_L \cos \varphi$. Это условие можно принять при расчете внутренних проводок. При активно-емкостной нагрузке линии, когда ток I_L опережает напряжение U_2 , угол φ становится отрицательным и $\sin \varphi$ изменяет свой знак. Поэтому

$$U_1 - U_2 = I_L (R_L \cos \varphi - X_L \sin \varphi).$$

Из этой формулы следует, что при активно-емкостной нагрузке напряжение U_2 может стать больше U_1 .

§ 59. Трехфазный переменный ток

Трехфазная система переменного тока получила широкое распространение во всем мире благодаря тому, что она обеспечивает наиболее выгодную передачу электрической энергии и позволяет использовать надежные в работе и простые по устройству асин-

хронные электродвигатели. На всех электрических станциях Советского Союза электрическая энергия вырабатывается генераторами трехфазного переменного тока. Электрифицированные железные дороги также получают энергию по линиям трехфазного тока, который затем на тяговых подстанциях преобразуют в постоянный или однофазный переменный ток, подаваемый в контактную сеть.

Простейший генератор трехфазного тока (рис. 204) отличается от генератора однофазного тока тем, что на статоре его расположены три отдельные обмотки (фазные обмотки), оси которых сдвинуты одна относительно другой на угол 120° . Каждую из обмоток трехфазного генератора вместе с присоединенной к ней внешней цепью принято называть фазой. Согласно государственному стандарту фазы обозначаются буквами A , B и C .

Ротор генератора представляет собой постоянный магнит или электромагнит, который вращается каким-либо первичным двигателем с определенной частотой вращения. При вращении ротора в трех фазных обмотках статора индуцируются синусоидальные э. д. с. e_A , e_B и e_C одной и той же частоты и имеющие одинаковые амплитуды. Но так как магнитное поле вращающегося ротора пересекает эти обмотки не одновременно, то э. д. с. e_A , e_B и e_C будут сдвинуты по фазе по отношению друг к другу на $1/3$ периода (рис. 205, а), чему соответствует угол $\omega t = 120^\circ$ (рис. 205, б). Такая система трех фазных э. д. с. называется *симметричной*. Особенностью ее является то, что сумма э. д. с. всех трех фаз в любой момент времени равна нулю:

$$e_A + e_B + e_C = 0. \quad (77)$$

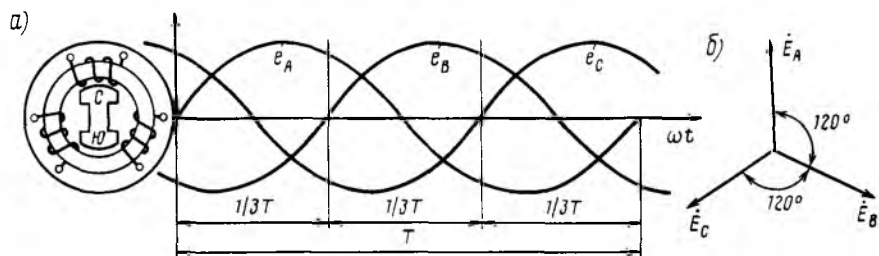


Рис. 205. Кривые изменения э. д. с. в фазных обмотках трехфазного генератора (а) и векторное изображение этих э. д. с. (б)

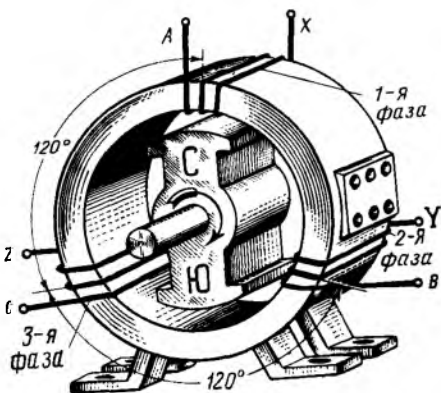


Рис. 204. Генератор трехфазного тока

Любая из фазных обмоток генератора трехфазного тока является самостоятельным источником электрической энергии и к ней может быть подключен свой приемник. В этом случае получается несвязанная трехфазная система, требующая для передачи электрической энергии шесть проводов. На практике такие системы не применяют. Обычно фазные обмотки трехфазных генераторов и трансформаторов и приемники электрической энергии соединяют по схеме «звезда» или «треугольник».

§ 60. Схема соединения «звездой»

Схема «звезда с нулевым проводом». При соединении фазных обмоток источника трехфазного тока (например, генератора) по схеме «звезда с нулевым проводом» концы его трех обмоток соединяют в общий узел O , который называется *нулевой точкой*, или *нейтралью источника* (рис. 206). Приемники электрической энергии объединяют в три группы Z_A , Z_B и Z_C (фазы нагрузки), концы которых также соединяют в общий узел O' (нулевая точка, или *нейтраль нагрузки*). Обмотки источника соединяют с фазами нагрузки четырьмя проводами. Провода 1, 2 и 3, присоединенные к началам фазных обмоток (A , B , C), называют *линейными*. Провод 4, соединяющий нулевые точки O и O' , называют *нулевым*, или *нейтральным*. Напряжения u_A , u_B и u_C между началами и концами обмоток отдельных фаз источника или фаз нагрузки Z_A , Z_B и Z_C называют *фазными*. Они равны также напряжениям между каждым из линейных проводов и нулевым проводом. При отсутствии потери напряжения в обмотках источника (при холостом ходе) фазные напряжения равны соответствующим э. д. с. в этих обмотках. Фазными токами i_A , i_B , i_C называют токи, протекающие по обмоткам источника или фазам нагрузки Z_A , Z_B и Z_C . Напряжения u_{AB} , u_{BC} , u_{CA} между линейными проводами и токи, проходящие по этим проводам, называют *линейными*.

Примем условно за положительное направление токов i_A , i_B и i_C в фазах источника — от конца соответствующей фазы к ее началу,

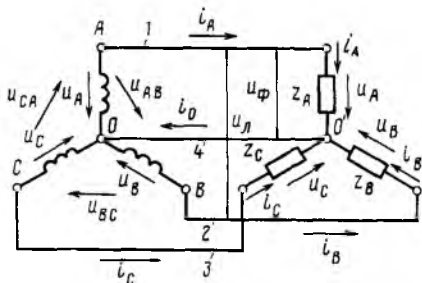


Рис. 206. Схема «звезда с нулевым проводом», направление в ней линейных и фазных токов и напряжений

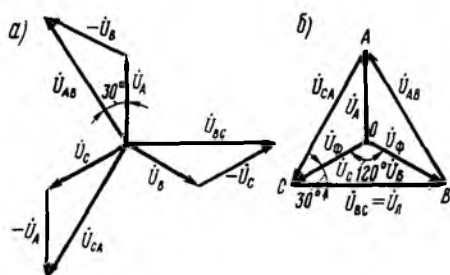


Рис. 207. Векторные диаграммы напряжений для схемы «звезда с нулевым проводом»

в фазах нагрузки — от начала к концу, а в линейных проводах — от источника к приемнику. Будем считать положительными напряжения u_A , u_B и u_C в фазах источника и нагрузки, если они направлены от начала фаз к концам, а линейные напряжения u_{AB} , u_{BC} , u_{CA} — если они направлены от предыдущей фазы к последующей.

Из рис. 206 следует, что в схеме «звезда» линейные токи равны фазным, т. е. $I_L = I_\phi$, так как при переходе от фазы источника или нагрузки к линейному проводу нет каких-либо ответвлений. Мгновенные значения напряжений согласно второму закону Кирхгофа:

$$u_{AB} = u_A - u_B; \quad u_{BC} = u_B - u_C; \quad u_{CA} = u_C - u_A.$$

Переходя от мгновенных значений напряжений к их векторам, имеем:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

Следовательно, линейное напряжение равно разности векторов соответствующих фазных напряжений. По полученным векторным уравнениям можно построить векторную диаграмму (рис. 207, а), которую можно преобразовать в диаграмму (рис. 207, б). Из этой диаграммы видно, что в симметричной трехфазной системе векторы линейных напряжений \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} образуют равносторонний треугольник ABC , внутри которого расположена симметричная трехлучевая звезда фазных напряжений \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C . В равнобедренных треугольниках AOB , BOC и COA основание равно U_λ , две другие стороны — U_ϕ и острый угол между этими сторонами и основанием составляет 30° . Следовательно,

$$U_\lambda = 2U_\phi \cos 30^\circ = 2U \sqrt{3}/2 = \sqrt{3} U_\phi.$$

Таким образом, в трехфазной системе, соединенной по схеме «звезда с нулевым проводом», линейное напряжение больше фазного в $\sqrt{3}$ раз. Величина $\sqrt{3} = 1,73$ положена в основу шкалы номинальных напряжений переменного тока: 127, 220, 380 и 660 В. В этом ряду каждое следующее значение напряжения больше предыдущего в 1,73 раза.

В нулевом проводе проходит ток i_0 , мгновенное значение которого равно алгебраической сумме мгновенных значений токов, проходящих в отдельных фазах: $i_0 = i_A + i_B + i_C$.

Переходя от мгновенных значений токов к их векторам, имеем: $\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$.

Векторы токов \dot{I}_A , \dot{I}_B и \dot{I}_C сдвинуты относительно векторов соответствующих напряжений \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C на углы φ_A , φ_B , φ_C (рис. 208, а). Значения этих углов зависят от соотношения между активным и реактивным сопротивлениями, включенными в данную фазу. На этой же диаграмме показано сложение векторов \dot{I}_A , \dot{I}_B и \dot{I}_C для определения вектора тока \dot{I}_0 . Обычно ток I_0 меньше токов

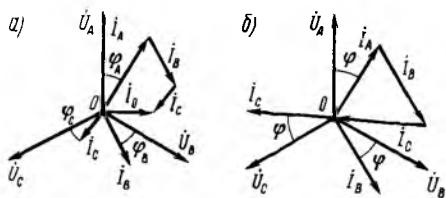


Рис. 208. Векторные диаграммы напряжений и токов в отдельных фазах для схемы «звезда с нулевым проводом» при неравномерной (а) и равномерной (б) нагрузках фаз

I_A , I_B и I_C в линейных проводах, поэтому нулевой провод имеет площадь поперечного сечения, равную или даже несколько меньшую площади сечения линейных проводов.

В схеме «звезда с нулевым проводом» приемники электрической энергии можно включать на два напряжения: линейное U_n (при подключении к двум линейным проводам) и фазное U_ϕ (при подключении к нулевому и одному из линейных проводов).

Схема «звезда без нулевого провода». При равномерной или симметричной нагрузке всех трех фаз, когда во всех фазах включены одинаковые активные и реактивные сопротивления ($R_A = R_B = R_C$ и $X_A = X_B = X_C$), фазные токи i_A , i_B и i_C будут равны по величине и сдвинуты от соответствующих фазных напряжений на равные углы. В этом случае получаем симметричную систему токов, при которой токи i_A , i_B , i_C будут сдвинуты по фазе друг относительно друга на угол 120° , а ток i_0 в нулевом проводе в любой момент времени равен нулю (рис. 208, б).

Очевидно, что при равномерной нагрузке можно удалить нулевой провод и передавать электрическую энергию источника к приемнику по трем линейным проводам 1, 2 и 3 (рис. 209). Такая схема называется «звезда без нулевого провода». При трехпроводной системе передачи электрической энергии в каждое мгновение ток по одному (или двум) проводу проходит от источника трехфазного тока к приемнику, а по двум другим (или одному) протекает обратно от приемника к источнику (рис. 210). Векторная диаграмма напряжений для схемы «звезда без нулевого провода» при равномерной нагрузке фаз будет такая же, как и для схемы «звезда с нулевым проводом» (см. рис. 207). Такими же будут и соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями:

$$I_n = I_\phi \quad \text{и} \quad U_n = \sqrt{3} U_\phi.$$

Следует отметить, что схема «звезда без нулевого провода» может быть применена только при равномерной нагрузке фаз. Практически это имеет место лишь при подключении к источникам трехфазного тока электрических двигателей, так как каждый трехфазный электродвигатель снабжен тремя одинаковыми обмотками, которые равномерно нагружают все три фазы. При неравномерной нагрузке напряжения на отдельных фазах нагрузки будут различными. На некоторых фазах (с меньшим сопротивлением) напряжение уменьшится, а на других увеличится по сравнению с нормальным, что является недопустимым.

Практически неравномерная нагрузка фаз возникает при питании трехфазным током электрических ламп, так как в этом случае распределение тока между всеми тремя фазами не может быть гарантировано (отдельные лампы могут включаться и выключаться в индивидуальном порядке). Особенно опасны в схеме «звезда без нулевого провода» обрыв или короткое замыкание в одной из фаз.

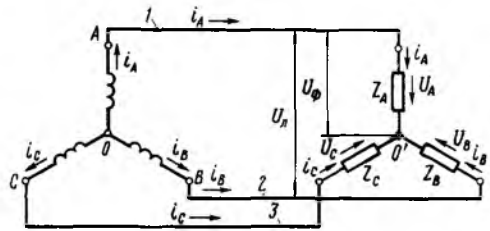


Рис. 209. Схема «звезда без нулевого провода»

Можно показать путем построения соответствующих векторных диаграмм, что при обрыве в одной из фаз напряжение в других двух фазах уменьшается до половины линейного, вследствие чего лампы, включенные в эти фазы, будут гореть с недокалом. При коротком замыкании в одной из фаз напряжение в других фазах увеличивается до линейного, т. е. в $\sqrt{3}$ раз, и все лампы, включенные в этих фазах, перегорят. Поэтому при схеме «звезда с нулевым проводом» во избежание разрыва цепи нулевого провода в ней не устанавливают предохранители и выключатели.

Пример 41. Генератор соединен по схеме «звезда без нулевого провода», так же соединены приемники электрической энергии. Фазное напряжение генератора $U_\phi = 220$ В; приемники имеют активное сопротивление $R = 10$ Ом. Определить линейное напряжение U_n , фазные и линейные токи.

Решение. Линейное напряжение

$$U_n = \sqrt{3} U_\phi = 1,73 \cdot 220 = 380 \text{ В.}$$

Линейные и фазные токи

$$I_n = I_\phi = U_\phi / R = 220 / 10 = 22 \text{ А.}$$

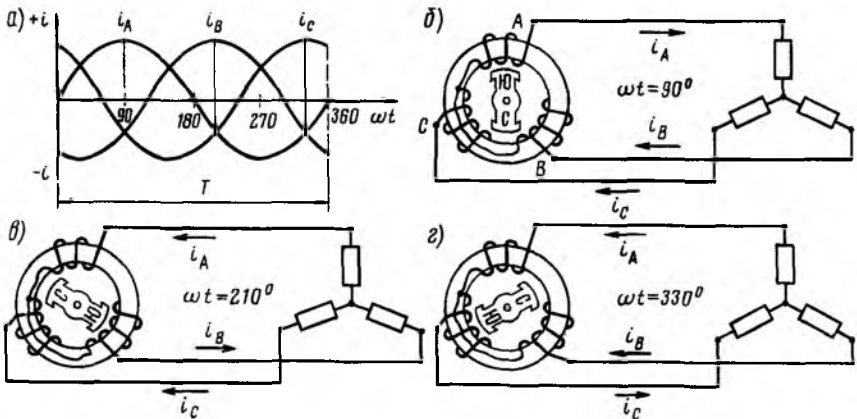


Рис. 210. Кривые изменения токов в линейных проводах (а) при трехпроводной системе и направление в них токов в различные моменты времени (б в, г)

§ 61. Схема соединения «треугольником»

При соединении фазных обмоток источника трехфазного тока «треугольником» (рис. 211, а) конец первой фазы AB соединяется с началом второй фазы BC , конец второй фазы соединяется с началом третьей фазы CA и конец третьей фазы — с началом первой AB . Три линейных провода 1, 2 и 3, идущих к приемникам электрической энергии, присоединяются к началам A , B и C этих фаз. Точно так же могут соединяться и отдельные группы приемников Z_{AB} , Z_{BC} , Z_{CA} (фазы нагрузки). При этом каждая фаза нагрузки присоединяется к двум линейным проводам, идущим от источника, т. е. включается на линейное напряжение, которое одновременно будет и фазным напряжением. Таким образом, в схеме «треугольник» фазные напряжения U_ϕ равны линейным U_Δ и не зависят от сопротивлений Z_{AB} , Z_{BC} , Z_{CA} фаз нагрузки.

Как следует из формулы (77), при соединении «треугольником» трех фазных обмоток генератора или другого источника переменного тока сумма э. д. с., действующая в замкнутом контуре, образованном этими обмотками, равна нулю. Поэтому в этом контуре при отсутствии нагрузки не возникает тока. Но каждая из фазных э. д. с. может создавать ток в цепи своей фазы.

Линейные токи в схеме «треугольник» согласно первому закону Кирхгофа для узлов A , B и C соответственно:

$$i_A = i_{AB} - i_{CA}; \quad i_B = i_{BC} - i_{AB}; \quad i_C = i_{CA} - i_{BC}.$$

Переходя от мгновенных значений токов к их векторам, получим:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}.$$

Следовательно, линейный ток равен векторной разности соответствующих фазных токов.

По полученным векторным уравнениям можно для равномерной нагрузки фаз построить векторную диаграмму (рис. 211, б), которую можно преобразовать в диаграмму (рис. 211, в), из которой

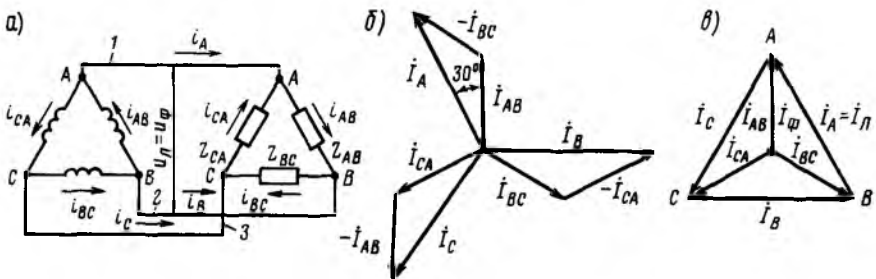


Рис. 211. Схема «треугольник» (а) и векторные диаграммы токов для этой схемы при равномерной нагрузке (б и в)

видно, что при равномерной нагрузке фаз векторы линейных токов $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ образуют равносторонний треугольник ABC , внутри которого расположена трехлучевая звезда векторов фазных токов $\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}$ и \dot{I}_{CA} . Отсюда по аналогии с диаграммой рис. 207, б следует, что

$$I_L = 2I_\phi \cos 30^\circ = 2I_\phi \sqrt{3}/2 = \sqrt{3} I_\phi,$$

т. е. при равномерной нагрузке фаз в схеме «треугольник» линейный ток больше фазного тока в $\sqrt{3}$ раз.

Пример 42. Приемники подключены к сети трехфазного тока напряжением $U_L = 220$ В и соединены по схеме «треугольник». Приемники имеют активное сопротивление $R = 10$ Ом. Определить фазные и линейные токи.

Решение. Фазные токи

$$I_\phi = U_\phi / R = U_L / R = 220 / 10 = 22 \text{ А.}$$

Линейные токи

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi = 1,73 \cdot 22 = 38 \text{ А.}$$

Пример 43. Сеть трехфазного тока имеет напряжение $U_L = 220$ В, а приемники — активное сопротивление 10 Ом. Определить фазные и линейные токи при соединении приемников по схемам «звезда» и «треугольник».

Решение. При соединении по схеме «звезда» фазное напряжение

$$U_\phi = U_L / \sqrt{3} = 220 / \sqrt{3} = 127 \text{ В.}$$

Фазные токи

$$I_\phi = U_\phi / R = 127 / 10 = 12,7 \text{ А.}$$

Линейные токи

$$I_L = I_\phi = 12,7 \text{ А.}$$

При соединении по схеме «треугольник» фазное напряжение

$$U_\phi = U_L = 220 \text{ В.}$$

Фазные токи

$$I_\phi = U_\phi / R = 220 / 10 = 22 \text{ А.}$$

Линейные токи

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi = \sqrt{3} \cdot 22 = 38 \text{ А.}$$

Следовательно, при переключении приемников со «звезды» на «треугольник» фазные токи возрастают в $\sqrt{3}$ раз, а линейные токи — в 3 раза. Возможность включения одних и тех же приемников по схеме «звезда» или «треугольник» расширяет область их применения. Например, если приемник рассчитан на фазное напряжение 220 В, то при соединении по схеме «треугольник» он может быть включен в сеть с линейным напряжением 220 В, а при соединении по схеме «звезда» — в сеть с линейным напряжением $220\sqrt{3} = 380$ В. Приемники, рассчитанные на фазное напряжение

127 В, могут работать в сетях с линейными напряжениями 127 и $127\sqrt{3}=220$ В.

Особенности подвода трехфазного тока к приемникам. В трехпроводной трехфазной сети (при схемах «звезда без нулевого провода» и «треугольник») алгебраическая сумма мгновенных значений линейных токов в любой момент времени равна нулю, поэтому такие токи совместно не создают магнитного поля. Это позволяет прокладывать три линейных провода в одной общей металлической трубе или в кабеле с металлической оболочкой без опасения образования вихревых токов. Не допускается прокладка линейных проводов по отдельности в металлических трубах, так как возникающие вихревые токи вызывали бы сильный нагрев металла. То же самое происходило бы при прокладке в кабеле с металлической оболочкой или в трубе трех линейных проводов при схеме «звезда с нулевым проводом», так как сумма токов в них не равна нулю.

§ 62. Мощность трехфазной системы

При неравномерной нагрузке фаз активная мощность P трехфазной системы равна сумме мощностей отдельных ее фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C.$$

При равномерной нагрузке трехфазной системы активные мощности P_ϕ всех трех фаз равны, поэтому активная мощность трехфазной системы

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi,$$

где φ — угол сдвига фаз между фазным током и фазным напряжением.

Активную мощность можно выразить также через линейные ток I_n и напряжение U_n . Учитывая зависимости между фазными и линейными токами и напряжениями для схем «звезда» и «треугольник» при равномерной нагрузке фаз, имеем:

$$P = \sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi.$$

Аналогично могут быть получены формулы для реактивной и полной мощностей при равномерной нагрузке фаз:

$$\begin{aligned} Q &= 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3} U_n I_n \sin \varphi; \\ S &= 3U_\phi I_\phi = \sqrt{3} U_n I_n. \end{aligned}$$

Пример 44. Сеть трехфазного тока имеет напряжение $U_n=220$ В, а приемники — активное сопротивление 10 Ом. Определить активную мощность, потребляемую тремя приемниками при соединении их по схемам «звезда» и «треугольник».

Решение. При соединении по схеме «звезда» фазное напряжение

$$U_\phi = U_n / \sqrt{3} = 220 / \sqrt{3} = 127 \text{ В.}$$

Фазные и линейные токи

$$I_{\phi} = I_{\lambda} = U_{\phi} / R = 127 / 10 = 12,7 \text{ А.}$$

Активная мощность

$$P = \sqrt{3} U_{\lambda} I_{\lambda} = 1,73 \cdot 220 \cdot 12,7 = 4840 \text{ Вт.}$$

При соединении по схеме «треугольник» фазное напряжение

$$U_{\phi} = U_{\lambda} = 220 \text{ В.}$$

Фазные токи

$$I_{\phi} = U_{\phi} / R = 220 / 10 = 22 \text{ А.}$$

Линейные токи

$$I_{\lambda} = \sqrt{3} I_{\phi} = 1,73 \cdot 22 = 38 \text{ А.}$$

Активная мощность

$$P = \sqrt{3} U_{\lambda} I_{\lambda} = 1,73 \cdot 220 \cdot 38 = 14\,520 \text{ Вт.}$$

Следовательно, при переключении приемников со «звезды» на «треугольник» их активная мощность возрастает в 3 раза.

Контрольные вопросы

1. Как получают переменный ток?
2. Какими параметрами характеризуется переменный ток и как они выражаются?
3. Поясните, каким образом изменяются ток, напряжение и электрическая мощность в цепи переменного тока с активным сопротивлением?
4. Как изменяются ток, напряжение и электрическая мощность при включении в цепь переменного тока индуктивности?
5. Как изменяются ток, напряжение и электрическая мощность при включении в цепь переменного тока емкости?
6. Какие параметры определяют полное сопротивление электрической цепи при переменном токе?
7. Чему равна полная проводимость электрической цепи при переменном токе?
8. Что такое активная, реактивная и полная мощности и какими формулами они выражаются?
9. Каким способом повышают коэффициент мощности?
10. Как определяются токи в параллельной цепи переменного тока?
11. Как соединяются обмотки трехфазного генератора и приемника при схеме «звезда с нулевым проводом»?
12. При каких условиях можно соединять приемники по схеме «звезда без нулевого провода»?
13. Каково соотношение между линейными и фазными токами и напряжениями в схеме «звезда» при равномерной нагрузке фаз?
14. Как соединяются обмотки трехфазного генератора и приемника по схеме «треугольник»?
15. Каково соотношение между линейными и фазными токами и напряжениями в схеме «треугольник» при равномерной нагрузке фаз?

§ 63. Назначение и принцип действия трансформатора

Назначение трансформатора. Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, преобразующий переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Трансформаторы позволяют значительно повысить напряжение, вырабатываемое источниками переменного тока, установленными на электрических станциях, и осуществить передачу электроэнергии на дальние расстояния при высоких напряжениях (110, 220, 500, 750 и 1150 кВ). Благодаря этому сильно уменьшаются потери энергии в проводах и обеспечивается возможность значительного уменьшения площади сечения проводов линий электропередачи.

В местах потребления электроэнергии высокое напряжение, подаваемое от высоковольтных линий электропередачи, снова понижается трансформаторами до сравнительно небольших значений (127, 220, 380 и 660 В), при которых работают электрические потребители, установленные на фабриках, заводах, в депо и жилых домах. На э. п. с. переменного тока трансформаторы применяют для уменьшения напряжения, подаваемого из контактной сети к тяговым двигателям и вспомогательным цепям.

Кроме трансформаторов, применяемых в системах передачи и распределения электроэнергии, промышленностью выпускаются трансформаторы: тяговые (для э. п. с.), для выпрямительных установок, лабораторные с регулированием напряжения, для питания радиоаппаратуры и др. Все эти трансформаторы называют силовыми.

Трансформаторы используют также для включения электроизмерительных приборов в цепи высокого напряжения (их называют измерительными), для электросварки и других целей. Транс-

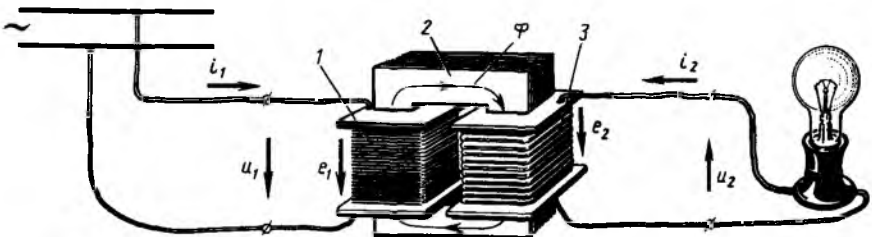


Рис. 212. Схема включения однофазного трансформатора

форматоры бывают однофазные и трехфазные, двух- и многообмоточные.

Принцип действия трансформатора. Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. Простейший трансформатор состоит из стального магнитопровода 2 (рис. 212) и двух расположенных на нем обмоток 1 и 3. Обмотки выполнены из изолированного провода и электрически не связаны. К одной из обмоток подается электрическая энергия от источника переменного тока. Эту обмотку называют *первичной*. К другой обмотке, называемой *вторичной*, подключают потребители (непосредственно или через выпрямитель).

При подключении трансформатора к источнику переменного тока (электрической сети) в витках его первичной обмотки протекает переменный ток i_1 , образуя переменный магнитный поток Φ . Этот поток проходит по магнитопроводу трансформатора и, пронизывая витки первичной и вторичной обмоток, индуцирует в них переменные э. д. с. e_1 и e_2 . Если к вторичной обмотке присоединен какой-либо приемник, то под действием э. д. с. e_2 по ее цепи проходит ток i_2 .

Э. д. с., индуцированная в каждом витке первичной и вторичной обмоток трансформатора, согласно закону электромагнитной индукции зависит от магнитного потока, пронизывающего виток, и скорости его изменения. Магнитный поток каждого трансформатора является определенной величиной, зависящей от напряжения и частоты изменения переменного тока в источнике, к которому подключен трансформатор. Постоянна также и скорость изменения магнитного потока, она определяется частотой изменения переменного тока. Следовательно, в каждом витке первичной и вторичной обмоток индуцируется одинаковая э. д. с. В результате этого *отношение действующих значений э. д. с. E_1 и E_2 , индуцированных в первичной и вторичной обмотках трансформатора, будет равно отношению чисел витков ω_1 и ω_2 этих обмоток, т. е.*

$$E_1/E_2 = \omega_1/\omega_2.$$

Отношение э. д. с. $E_{вн}$ обмотки высшего напряжения к э. д. с. $E_{ни}$ обмотки низшего напряжения (или отношение чисел их витков) называется *коэффициентом трансформации*,

$$n = E_{вн}/E_{ни} = \omega_{вн}/\omega_{ни}.$$

Коэффициент трансформации всегда больше единицы. Если пренебречь падениями напряжения в первичной и вторичной обмотках трансформатора (в трансформаторах средней и большой мощности они не превышают обычно 2—5 % номинальных значений напряжений U_1 и U_2), то можно считать, что *отношение напряжений U_1 первичной обмотки к напряжению U_2 вторичной обмотки приблизительно равно отношению чисел их витков, т. е.*

$$U_1/U_2 \approx \omega_1/\omega_2.$$

Таким образом, подбирая требуемое соотношение между числами витков первичной и вторичной обмоток, можно увеличивать или уменьшать напряжение на приемнике, подключенном к вторичной обмотке. Если необходимо на вторичной обмотке получить напряжение большее, чем подается на первичную, то применяют повышающие трансформаторы, у которых число витков во вторичной обмотке больше, чем в первичной.

В понижающих трансформаторах, наоборот, число витков вторичной обмотки меньше, чем в первичной.

Трансформатор не может осуществить преобразование напряжения постоянного тока. При подключении его первичной обмотки к сети постоянного тока в трансформаторе создается постоянный по величине и направлению магнитный поток, который не может индуцировать э. д. с. в первичной и вторичной обмотках. Поэтому не будет происходить передачи электрической энергии из первичной обмотки во вторичную.

При подключении первичной обмотки трансформатора к сети переменного тока через эту обмотку проходит некоторый ток, называемый *током холостого хода*. При включении нагрузки по вторичной обмотке трансформатора начинает проходить ток, при этом увеличивается и ток, проходящий по первичной обмотке. Чем больше нагрузка трансформатора, т. е. электрическая мощность и ток I_2 , отдаваемые его вторичной обмоткой подключенным к ней приемникам, тем больше электрическая мощность и ток I_1 , поступающие из сети в первичную обмотку.

Ввиду того что потери мощности в трансформаторе обычно малы, можно приближенно принять, что мощности в первичной и вторичной обмотках одинаковы. В этом случае можно считать, что токи в обмотках трансформатора приблизительно обратно пропорциональны напряжениям: $I_1/I_2 \approx U_2/U_1$ или что токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны числам витков первичной и вторичной обмоток: $I_1/I_2 \approx \omega_2/\omega_1$. Это означает, что в повышающем трансформаторе ток во вторичной обмотке меньше, чем в первичной (во столько раз, во сколько напряжение U_2 больше напряжения U_1), а в понижающем ток во вторичной обмотке больше, чем в первичной. Поэтому в трансформаторах обмотки высшего напряжения выполняются из более тонких проводов, чем обмотки низшего напряжения.

§ 64. Устройство трансформаторов

Магнитопровод. Трансформаторы в зависимости от конфигурации магнитопровода подразделяют на *стержневые*, *броневые* и *тороидальные*.

В стержневом трансформаторе (рис. 213, а) обмотки 2 охватывают стержни магнитопровода 1; в броневом (рис. 213, б), наоборот, магнитопровод 1 охватывает частично обмотки 2 и как бы

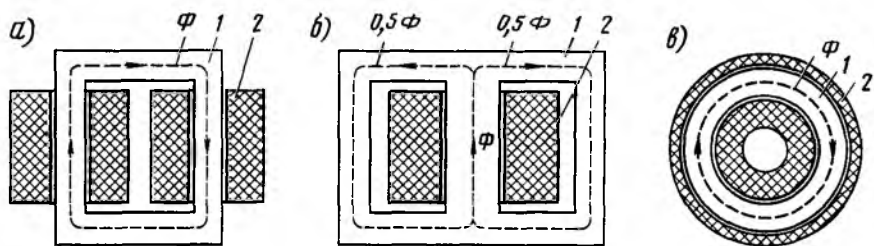


Рис. 213. Принципиальные схемы стержневого (а), броневое (б) и тороидального (в) трансформаторов

бронирует их; в тороидальном (рис. 213, в) обмотки 2 намотаны на магнитопровод 1 равномерно по всей окружности.

Трансформаторы большой и средней мощности обычно выполняют стержневыми. Их конструкция более простая и позволяет легче осуществлять изоляцию и ремонт обмоток. Достоинством их являются также лучшие условия охлаждения, поэтому они требуют меньшего расхода обмоточных проводов. Однофазные трансформаторы малой мощности чаще всего выполняют броневыми и тороидальными, так как они имеют меньшую массу и стоимость по сравнению со стержневыми трансформаторами из-за меньшего числа катушек и упрощения процесса сборки и изготовления. Тяговые трансформаторы с регулированием напряжения на стороне низшего напряжения — стержневого типа, а с регулированием на стороне высшего напряжения — броневое типа.

Магнитопроводы трансформаторов (рис. 214) для уменьшения потерь от вихревых токов собирают из листов электротехнической

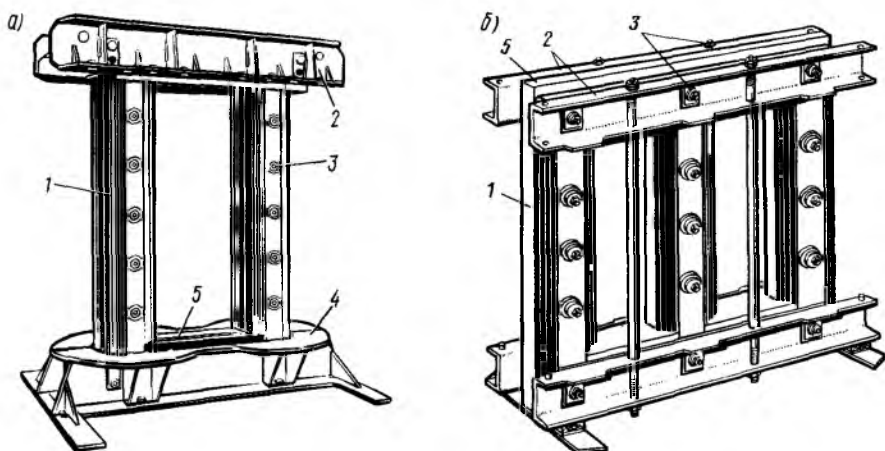


Рис. 214. Магнитопроводы однофазного тягового (а) и силового трехфазного (б) трансформаторов:

1 — стержень; 2 — ярмовые балки; 3 — стяжные шпильки; 4 — основание для установки катушек; 5 — ярмо

стали толщиной 0,35 или 0,5 мм. Обычно применяют горячекатаную сталь с высоким содержанием кремния или холоднокатаную сталь. Листы изолируют один от другого тонкой бумагой или лаком. Стержни магнитопровода трансформатора средней мощности имеют квадратное или крестовидное сечение, а у более мощных трансформаторов — ступенчатое, по форме приближающееся к кругу (рис. 215, а). При такой форме обеспечивается минимальный периметр стержня при заданной площади поперечного сечения, что позволяет уменьшить длину витков обмоток, а следовательно, и расход обмоточных проводов. В мощных трансформаторах между отдельными стальными пакетами из которых собираются стержни, устраивают каналы шириной 5—6 мм для циркуляции охлаждающего масла. Ярмо, соединяющее стержни, имеет обычно прямоугольное сечение, площадь которого на 10—15 % больше площади сечения стержней. Это уменьшает нагрев стали и потери мощности в ней.

В силовых трансформаторах магнитопровод собирают из прямоугольных листов. Сочленение стержней и ярма обычно выполняют с взаимным перекрытием их листов внахлестку. Для этого листы в двух смежных слоях сердечника располагают, как показано на рис. 215, б, г, т. е. листы стержней 1, 3 и ярма 2, 4 каждого последующего слоя перекрывают стык в соответствующих листах предыдущего слоя, существенно уменьшая магнитное сопротивление в месте сочленения. Окончательную сборку магнитопровода осуществляют после установки катушек на стержни (рис. 215, в).

В трансформаторах малой мощности магнитопроводы собирают из штампованных листов П- и Ш-образной формы или из штампованных колец (рис. 216, а—в).

Большое распространение получили также магнитопроводы (рис. 216, г—ж), навитые из узкой ленты электротехнической стали (обычно из холоднокатаной стали) или из специальных железо-никелевых сплавов.

Обмотки. Первичную и вторичную обмотки для лучшей магнитной связи располагают как можно ближе друг к другу: на каждом стержне 1 магнитопровода размещают либо обе обмотки 2 и 3

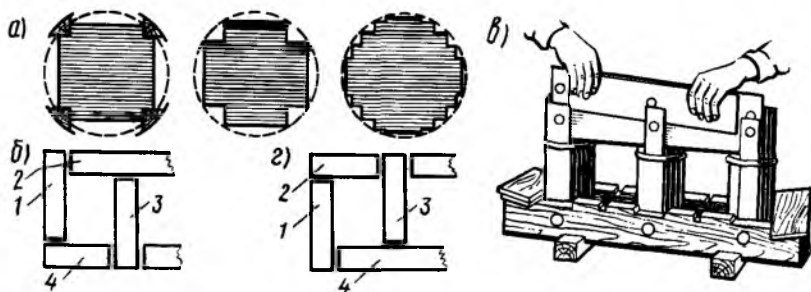


Рис. 215. Формы поперечного сечения (а) и последовательность сборки магнитопровода (б — г)

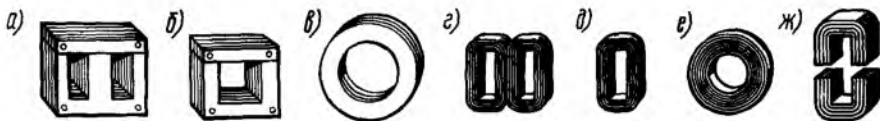


Рис. 216. Сердечники однофазных трансформаторов малой мощности, собранные из штампованных листов (а, б), колец (в) и стальной ленты (г—ж)

концентрически одну поверх другой (рис. 217, а), либо обмотки 2 и 3 выполняют в виде чередующихся дисковых секций — катушек (рис. 217, б). В первом случае обмотки называют *концентрическими*, во втором — *чередующимися*, или *дисковыми*. В силовых трансформаторах обычно применяют концентрические обмотки, причем ближе к стержням обычно располагают обмотку низшего напряжения, требующую меньшей изоляции относительно магнитопровода трансформатора, снаружи — обмотку высшего напряжения.

В трансформаторах бронзового типа иногда применяют дисковые обмотки. По краям стержня устанавливают катушки, принадлежащие обмотке низшего напряжения. Отдельные катушки соединяют последовательно или параллельно. В трансформаторах э. п. с., у которых вторичная обмотка имеет ряд выводов для изменения напряжения, подаваемого к тяговым двигателям, на каждом стержне располагают по три концентрических обмотки (рис. 217, в). Ближе к стержню размещают нерегулируемую часть 4 вторичной обмотки, в середине — первичную обмотку 5 высшего напряжения и поверх нее — регулируемую часть 6 вторичной обмотки. Размещение регулируемой части этой обмотки снаружи упрощает выполнение выводов от отдельных ее витков.

В трансформаторах малой мощности используют *многослойные* обмотки из провода круглого сечения с эмалевой или хлопчатобумажной изоляцией, который наматывают на каркас из электрокартона; между слоями проводов прокладывают изоляцию из специальной бумаги или ткани, пропитанной лаком.

В мощных трансформаторах, устанавливаемых на э. п. с., тяговых подстанциях и пр., применяют *непрерывные спиральные*

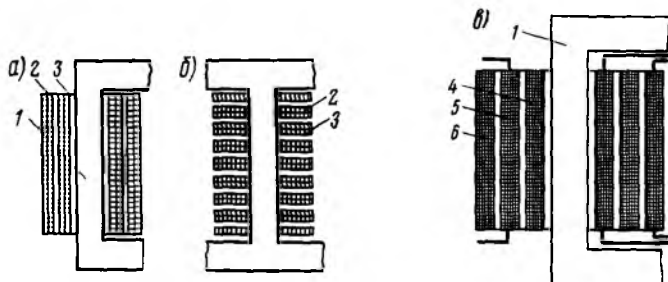


Рис. 217. Расположение концентрических (а), дисковых (б) и концентрических трехслойных (в) обмоток трансформатора

(рис. 218, а) и *винтовые параллельные* (рис. 218, б) обмотки, обладающие высокой механической прочностью и надежностью. Непрерывную спиральную обмотку используют в качестве первичной (высшего напряжения) и регулируемой части вторичной обмотки (низшего напряжения). Эта обмотка состоит из ряда последовательно соединенных плоских катушек, имеющих одинаковые размеры. Катушки расположены друг над другом. Между ними устанавливают прокладки и рейки из электрокартона, которые образуют горизонтальные и вертикальные каналы для прохода охлаждающей жидкости (масла).

Для повышения электрической прочности при воздействии атмосферных напряжений две первые и две последние катушки первичной (высоковольтной) обмотки обычно выполняют с усиленной изоляцией. Усиление изоляции ухудшает охлаждение, поэтому площадь сечения проводов этих катушек берут большей, чем для остальных катушек первичной обмотки.

Винтовую параллельную обмотку используют в качестве нерегулируемой части вторичной обмотки. Ее витки наматывают по винтовой линии в осевом направлении подобно резьбе винта. Обмотку выполняют из нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения, прилегающих друг к другу в радиальном направлении. Между отдельными витками и группами проводов располагают каналы для прохода охлаждающей жидкости.

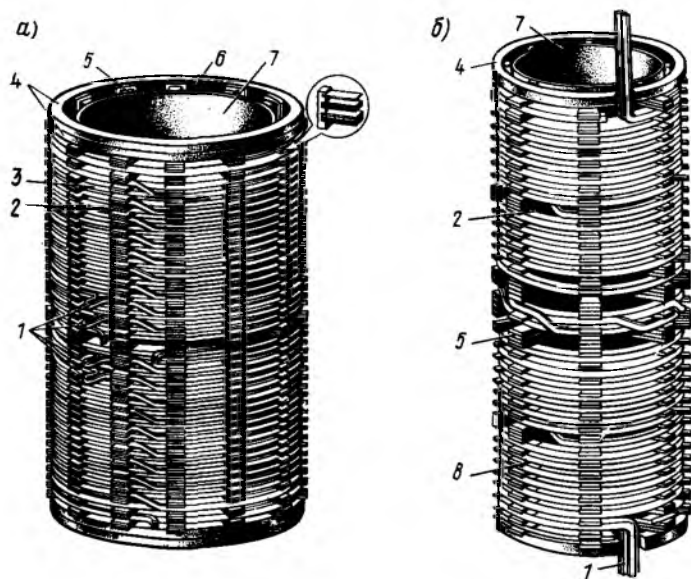


Рис. 218. Непрерывная спиральная (а) и винтовая (б) обмотки мощных трансформаторов электрического подвижного состава:

1 — выводы; 2, 6 — каналы для прохода охлаждающей жидкости; 3 — катушки; 4 — опорные кольца; 5 — рейки; 7 — бакелитовый цилиндр; 8 — проводники обмотки

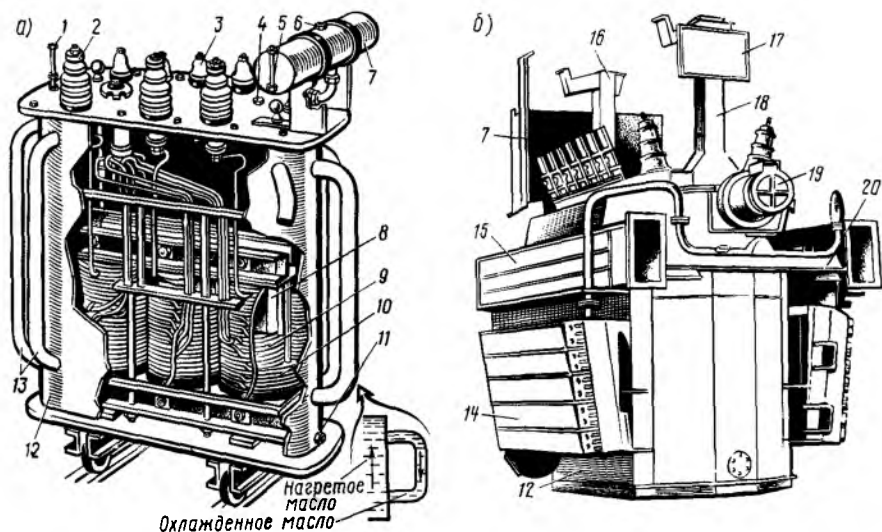


Рис. 219. Устройство трансформаторов общего назначения (а) и тягового (б) с масляным охлаждением:

1 — термометр; 2 — выводы обмотки высшего напряжения; 3 — выводы обмотки низшего напряжения; 4, 6 — пробки для заливки масла; 5 — маслостерное стекло; 7 — расширитель; 8 — сердечник; 9, 10 — обмотки высшего и низшего напряжений; 11 — пробка для спуска масла; 12 — бак для охлаждения масла; 13 — трубы для охлаждения масла; 14 — теплообменник; 15 — воздухопроводы; 16, 18 — стойки для установки переключателя выводов трансформатора; 17 — заводской щиток; 19 — насос для циркуляции масла; 20 — опорные балки

Число параллельных проводов определяется током, проходящим по обмотке.

Система охлаждения. Способ охлаждения трансформатора зависит от его номинальной мощности. При *увеличении мощности трансформатора необходимо увеличивать и интенсивность его охлаждения.*

Трансформаторы малой мощности обычно выполняют с естественным воздушным охлаждением и называют «сухими». Отвод тепла в них происходит путем непосредственной теплоотдачи от нагретых поверхностей обмотки и магнитопровода к окружающему воздуху. В некоторых случаях трансформаторы малой мощности помещают в корпус, залитый термореактивными компаундами на основе эпоксидных смол или других подобных материалов.

В трансформаторах средней и большой мощности сердечник с обмотками целиком погружают в бак, наполненный тщательно очищенным минеральным (трансформаторным) маслом (рис. 219, а). Такой способ отвода тепла называют естественным масляным охлаждением. Трансформаторное масло обладает более высокой теплопроводностью, чем воздух, и хорошо отводит тепло от обмоток и сердечника трансформатора к стенкам бака, имеющего большую площадь охлаждения, чем сам трансформатор. Погружение транс-

форматора в бак с маслом обеспечивает также повышение электрической прочности изоляции его обмоток и предотвращает ее старение под влиянием атмосферных воздействий. Баки трансформаторов мощностью 20—30 кВ·А имеют гладкие стенки. В более мощных трансформаторах (например, в трансформаторах, устанавливаемых на тяговых подстанциях) для повышения теплоотдачи поверхность охлаждения увеличивают, применяя баки с ребристыми стенками или трубчатые. Нагревающееся внутри бака масло поднимается кверху, а охлаждающееся в трубах опускается вниз, создавая, таким образом, естественную циркуляцию, способствующую охлаждению трансформатора.

На э. п. с. переменного тока применяют трансформаторы с масляным охлаждением и принудительной циркуляцией масла через теплообменник, охлаждаемый воздухом (рис. 219, б): Такая система охлаждения позволяет существенно повысить индукцию в сердечнике и плотность тока в обмотках, т. е. уменьшить массу и габаритные размеры трансформатора.

В систему охлаждения обычно вводят струйное реле, которое не допускает включения трансформатора, если через него не циркулирует масло.

Масло в трансформаторе во время работы нагревается и расширяется. При уменьшении нагрузки оно, охлаждаясь, возвращается к первоначальному объему. Поэтому масляные трансформаторы снабжают дополнительным баком — расширителем, соединенным с внутренней полостью бака. При нагревании трансформатора масло переходит в расширитель. Применение расширителя позволяет значительно сократить поверхность соприкосновения масла с воздухом, что уменьшает его загрязнение и увлажнение.

При работе трансформатора масло, нагреваясь, разлагается и загрязняется, поэтому его периодически очищают или заменяют. Масляные трансформаторы во избежание опасности пожара и взрыва устанавливают в специально огражденных помещениях. Наибольшая температура обмоток трансформатора не должна превышать 105 °С, сердечника — 110 °С, верхних слоев масла — 95 °С.

Для защиты от возможной аварии трансформаторы средней и большой мощности снабжают специальными газовыми реле. Газовое реле устанавливают в трубопроводе между основным баком и расширителем. При значительном выделении взрывоопасных газов, образующихся в результате разложения масла, газовое реле автоматически выключает трансформатор, предупреждая развитие аварии. В трансформаторах мощностью более 1000 кВ·А устанавливают также выхлопную трубу, закрытую стеклянной мембраной. При образовании большого количества газов они выдавливают мембрану и выходят в атмосферу — этим предотвращается деформация бака.

Многообмоточные трансформаторы. Наиболее распространены двухобмоточные однофазные трансформаторы (рис. 220, а). При необходимости получения от одного трансформатора нескольких

различных напряжений u_{21} , u_{22} , u_{23} (рис. 220, б) используют многообмоточные трансформаторы, у которых на магнитопроводе расположено несколько вторичных обмоток с различным числом витков. Например, тяговые трансформаторы электровазов имеют обычно четыре обмотки: первичную (высшего напряжения) и три вторичные (низшего напряжения). Одна из них (тяговая) служит для питания через выпрямитель цепи тяговых двигателей, вторая — для питания электрических потребителей собственных нужд (цепей вспомогательных машин, управления, освещения и пр.) и третья — для питания электрических печей отопления пассажирских вагонов. Если на электровазе предусмотрено рекуперативное торможение, то в ряде случаев применяют специальную вторичную обмотку для питания обмоток возбуждения тяговых двигателей в этом режиме. На некоторых электровазах каждый тяговый двигатель питается от собственного выпрямительного блока и в трансформаторе предусматривают соответствующее число вторичных обмоток.

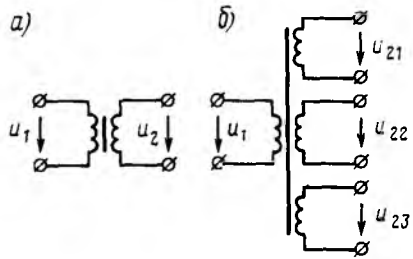


Рис. 220. Схемы двухобмоточного (а) и многообмоточного (б) трансформаторов

§ 65. Режимы работы трансформатора и его характеристики

Режим холостого хода. При разомкнутой вторичной обмотке трансформатор работает в режиме холостого хода. Ток холостого хода i_0 , проходящий по первичной обмотке, имеет две составляющие: активную i_{0a} и реактивную i_{0p} . При этом

$$i = i_{0a} + i_{0p}$$

Реактивная составляющая называется намагничивающим током, этот ток создает магнитный поток в магнитопроводе трансформатора. Активная составляющая обеспечивает поступление в трансформатор электрической энергии, необходимой для компенсации потерь энергии в стали магнитопровода. Она невелика, поэтому ток холостого хода практически можно считать равным намагничивающему току: $I_0 \approx I_{0p}$. При проектировании трансформаторов магнитное сопротивление магнитопровода стремятся сделать малым, чтобы ток холостого хода для мощных трансформаторов составлял 3—4 %, а трансформаторов средней мощности — 8—10 % номинального тока.

Э. д. с., индуцированные в первичной и вторичной обмотках, согласно закону электромагнитной индукции пропорциональны

скорости изменения магнитного потока. Следовательно, они пропорциональны максимальному значению магнитного потока Φ_m и частоте его изменения. В каждом витке первичной и вторичной обмоток индуцируется э. д. с., действующее значение которой $E_n = 4,44f\Phi_m$, где $4,44 = 2\pi\sqrt{2}$ — постоянная.

Соответственно:

$$E_1 = 4,44f\omega_1\Phi_m; \quad E_2 = 4,44f\omega_2\Phi_m.$$

При холостом ходе э. д. с. E_1 практически равна питающему напряжению U_1 , так как падение напряжения в первичной обмотке, создаваемое небольшим током холостого хода, мало. Если изменяется напряжение U_1 , то будут меняться э. д. с. E_1 , магнитный поток Φ_m и ток холостого хода I_0 . Зависимость э. д. с. E_1 от тока холостого хода называется *характеристикой холостого хода* (рис. 221, а). При малых напряжениях U_1 и э. д. с. E_1 магнитный поток трансформатора мал, и для его создания требуется небольшой ток холостого хода. В этом случае магнитная система трансформатора не насыщена и ток I_0 возрастает пропорционально U_1 (так же как и ток возбуждения в генераторе постоянного тока). При дальнейшем увеличении напряжения U_1 магнитная цепь трансформатора насыщается и ток I_0 начинает расти быстрее, чем э. д. с. E_1 . Значительное увеличение напряжения U_1 свыше номинального недопустимо, так как при этом резко увеличивается ток холостого хода.

Нагрузочный режим. При подключении нагрузки Z_n к вторичной обмотке трансформатора (рис. 222) он начинает отдавать нагрузке некоторую мощность. Соответственно увеличивается и мощность, получаемая первичной обмоткой из питающей сети. Следовательно, при увеличении тока i_2 во вторичной обмотке возрастает и ток i_1 в первичной обмотке.

Магнитный поток трансформатора определяется значением питающего напряжения U_1 и практически не зависит от нагрузки. Поэтому результирующая м. д. с., создаваемая при нагрузке то-

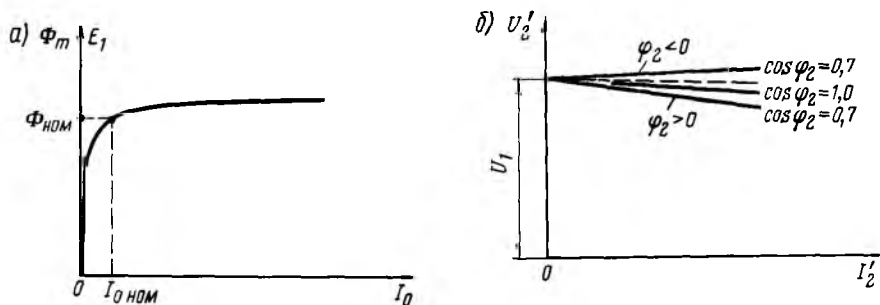
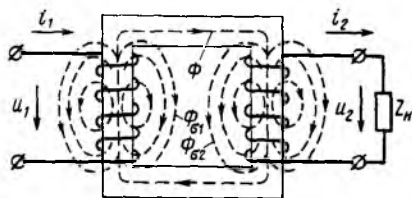


Рис. 221. Характеристики силовых и выпрямительных трансформаторов:

а — холостого хода; б — внешние ($\varphi_2 > 0$ — активно-индуктивная нагрузка, $\varphi_2 < 0$ — активно-емкостная)

Рис. 222. Схема магнитных потоков в трансформаторе при нагрузке



ками i_1 и i_2 , должна оставаться такой же, как и при холостом ходе:

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0, \quad (78)$$

где $F_1 = I_1 \omega_1$ — м. д. с. первичной обмотки при нагрузке;

$F_2 = I_2 \omega_2$ — м. д. с. вторичной обмотки при нагрузке;

$F_0 = I_0 \omega_0$ — м. д. с. первичной обмотки при холостом ходе.

Уравнение (78) называется *уравнением равновесия магнитодвижущих сил трансформатора*. Если поделить обе его части на ω_1 , то получим: $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \omega_2 / \omega_1$, откуда следует, что наличие тока I_2 во вторичной обмотке трансформатора вызывает автоматически увеличение тока I_1 в первичной обмотке. Обычно в трансформаторах большой и средней мощности ток I_0 составляет несколько процентов от номинального значения тока I_1 . Поэтому при нагрузках, близких к номинальной, можно считать, что $I_1 \approx I_2 \omega_2 / \omega_1$.

Токи i_1 и i_2 , проходя по обмоткам трансформатора, создают в них падения напряжения — активные и реактивные (индуктивные). Активные падения напряжения возникают в результате прохождения токов i_1 и i_2 по активным сопротивлениям R_1 и R_2 обмоток. Реактивные падения напряжения обуславливаются действием потоков рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$, создаваемых токами i_1 и i_2 . В отличие от основного потока Φ , который замыкается по сердечнику и сцеплен одновременно с обеими обмотками, потоки $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ сцеплены каждый только со своей собственной обмоткой и индуцируют в них э. д. с. самоиндукции e_{L1} и e_{L2} . Эти э. д. с., как было показано в § 51, создают индуктивные сопротивления X_1 и X_2 обмоток, в которых при прохождении токов i_1 и i_2 возникают падения напряжения.

Для определения изменения вторичного напряжения трансформатора при нагрузке напряжения U_2 обычно приводят к первичному, умножая его на коэффициент трансформации n , т. е. $U'_2 = U_2 n$. Точно так же приводят к первичной обмотке ток I_2 , умножая его на $1/n$, т. е. $I'_2 = I_2 / n$. Величины U'_2 и I'_2 называются приведенными вторичным напряжением и вторичным током.

Изменение вторичного напряжения можно определить по внешней характеристике трансформатора (см. рис. 221, б), которая представляет собой графическую зависимость приведенного вторичного напряжения U'_2 от приведенного вторичного тока I'_2 . При холостом ходе приведенное вторичное напряжение U'_2 будет равно

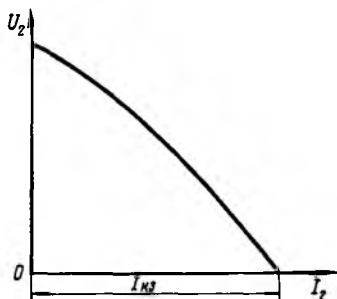


Рис. 223. Внешняя характеристика сварочного трансформатора

первичному U_1 , при нагрузке же из-за падений напряжений в сопротивлениях R_1 , R_2 , X_1 и X_2 первичной и вторичной обмоток оно будет меньше U_1 . В трансформаторах средней и большой мощности реактивное падение напряжения обычно в несколько раз превышает активное. Поэтому у активно-индуктивная нагрузка вызывает большее изменение напряжения, чем активная (изменение напряжения возрастает с уменьшением $\cos \varphi_2$ в цепи нагрузки). В трансформаторах малой мощности, наоборот, активное

падение напряжения обычно больше реактивного и изменение напряжения уменьшается с увеличением $\cos \varphi_2$.

Обычно изменение напряжения ΔU при работе трансформатора под нагрузкой определяют при номинальном значении первичного напряжения $U_{1\text{ном}}$ и выражают в процентах:

$$\Delta u \% = \frac{U_{1\text{ном}} - U_{2n}}{U_{1\text{ном}}} 100.$$

Величину Δu % иногда называют относительной потерей напряжения в трансформаторе. В силовых и выпрямительных трансформаторах изменение напряжения при номинальном токе обычно составляет 2—6 % (в зависимости от $\cos \varphi_2$).

Короткое замыкание. В паспорте трансформатора указывают не изменение напряжения, которое различно для разных $\cos \varphi_2$, а результирующее падение напряжения в его обмотках при номинальном нагрузочном токе. Это падение напряжения называют напряжением короткого замыкания, и его можно определить опытным путем, если питать трансформатор с замкнутой накоротко вторичной обмоткой пониженным напряжением U_k (опыт короткого замыкания). В этом случае напряжение U_k будет равно такому напряжению U_1 , при котором по обмоткам замкнутого накоротко трансформатора протекают номинальные токи.

Напряжение короткого замыкания является весьма важным эксплуатационным показателем, его выражают в процентах от $U_{1\text{ном}}$:

$$u_k \% = \frac{U_k}{U_{1\text{ном}}} 100.$$

Для трансформаторов средней мощности $u_k \% = 5 \div 7$ %, для мощных трансформаторов 6—12 %.

Если короткое замыкание происходит в процессе эксплуатации трансформатора при номинальном напряжении, то в обеих обмотках возникают большие токи, превышающие номинальное значе-

ние в 10—20 раз, при этом повышается температура обмоток и на них действуют большие электромагнитные силы. Такое замыкание является аварийным и требует специальной защиты, которая должна отключить трансформатор в течение долей секунды. Установившийся ток короткого замыкания трансформатора в общем случае

$$I_k = I_{\text{ном}} \frac{100}{u_k \%},$$

где $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток первичной обмотки.

Для ограничения токов короткого замыкания мощные трансформаторы выполняют с повышенными значениями $u_k \%$, т. е. с повышенным внутренним индуктивным сопротивлением обмоток.

Характеристики сварочных трансформаторов. В некоторых случаях желательно, чтобы трансформатор имел крутопадающую внешнюю характеристику (рис. 223). Такую характеристику обеспечивают устойчивое горение электрической дуги. Кроме того, при электросварке режим короткого замыкания является нормальным рабочим режимом и при крутопадающей характеристике ток $I_{\text{кз}} \approx I_{\text{ном}}$.

Для получения крутопадающей характеристики последовательно с вторичной обмоткой трансформатора включают реактор с большим индуктивным сопротивлением (рис. 224, а). В некоторых конструкциях сварочных трансформаторов магнитопровод добавочного реактора совмещают с магнитопроводом трансформатора (рис. 224, б). Регулирование тока I_2 электрической дуги осуществляется в таких трансформаторах двумя способами: ступенчатое — путем изменения числа витков вторичной обмотки и плавное — путем изменения воздушного зазора d . При изменении воздушного зазора изменяется индуктивность реактора и, следовательно, наклон внешней характеристики трансформатора.

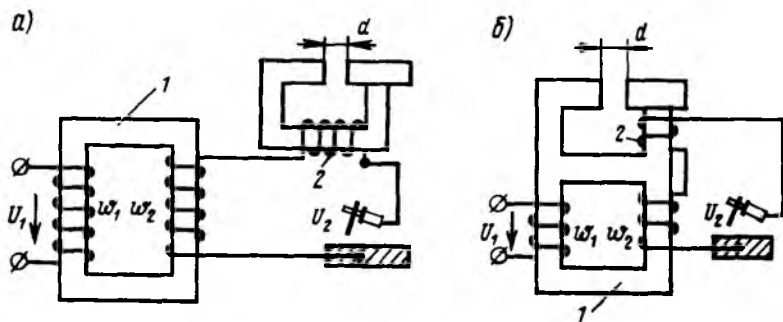


Рис. 224. Принципиальные схемы сварочных трансформаторов.

а — с внешней индуктивностью (реактором); б — с реактором на общем сердечнике; 1 — трансформатор; 2 — реактор

§ 66. Мощность, к. п. д. и коэффициент мощности трансформатора

Номинальная мощность. Номинальной мощностью трансформатора называется мощность, которую он может отдавать длительное время, не перегреваясь свыше допустимой температуры, определяемой теплостойкостью изоляции его обмоток. При этом срок службы силового трансформатора должен быть не менее 20 лет. Так как нагрев обмоток зависит от протекающего по ним тока, в паспорте трансформатора всегда указывают полную мощность $S_{ном}$ в вольт-амперах или киловольт-амперах. В зависимости от коэффициента мощности $\cos \varphi_2$, при котором работают потребители, от трансформатора можно получить большую или меньшую активную мощность. При $\cos \varphi_2 = 1$ мощность подключенных к нему потребителей может быть равна его номинальной мощности $S_{ном}$. При $\cos \varphi_2 < 1$ мощность потребителей не должна превышать величины $S_{ном} \cos \varphi_2$.

В паспорте трансформаторов э. п. с. переменного тока, которые имеют несколько вторичных обмоток, указывают так называемую типовую мощность. Она равна полусумме номинальных мощностей всех обмоток трансформатора, т. е. полусумме произведений наибольшего длительно допустимого в каждой обмотке тока на допустимое напряжение.

Перегрузочная способность трансформатора определяется интенсивностью отвода тепла от его обмоток и надежностью их крепления. Силовые трансформаторы с масляным охлаждением и трансформаторы, используемые в выпрямительных установках, допускают перегрузки на 30 % выше номинальной в течение 2 ч и 60 % в течение 45 мин.

Коэффициент мощности. Коэффициент мощности $\cos \varphi_1$ трансформатора определяется характером нагрузки, подключенной к его вторичной обмотке. При уменьшении нагрузки начинает сильно сказываться индуктивное сопротивление обмоток трансформатора, и коэффициент мощности его снижается. При отсутствии нагрузки (при холостом ходе) трансформатор имеет очень низкий коэффициент мощности, что оказывает вредное влияние на работу источников переменного тока и электрических сетей (см. главу V). В этом случае трансформатор необходимо отключить от сети переменного тока.

Потери мощности и к. п. д. При передаче энергии из первичной обмотки трансформатора во вторичную возникают потери мощности (рис. 225, а) в проводах обмоток (электрические потери $\Delta P_{эл1}$ и $\Delta P_{эл2}$) и в стали магнитопровода (магнитные потери ΔP_m).

При холостом ходе трансформатор не передает электрическую энергию потребителю и потребляемая им мощность тратится в основном на компенсацию магнитных потерь мощности в магнитопроводе (в результате вихревых токов и гистерезиса). Их часто называют потерями холостого хода. Чем меньше площадь поперечного сечения магнитопровода, тем больше в нем индукция, а сле-

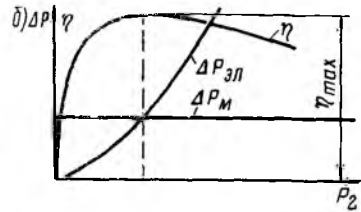
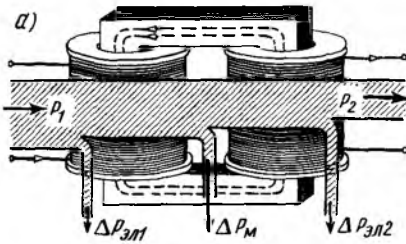


Рис. 225. Диаграмма энергетического баланса в трансформаторе (а) и зависимость его к.п.д. от нагрузки (б)

довательно, и магнитные потери. Они значительно возрастают также при увеличении напряжения, подводимого к первичной обмотке, свыше номинального значения. При работе мощных трансформаторов магнитные потери составляют 0,3—0,5 % номинальной мощности. Тем не менее их стремятся максимально уменьшить. Объясняется это тем, что магнитные потери не зависят от того, работает трансформатор холостую или под нагрузкой. А так как общее время работы трансформатора обычно довольно велико, то суммарные годовые потери холостого хода значительны.

При нагрузке к потерям холостого хода добавляются электрические потери в обмотках. Эти потери при номинальном токе численно равны мощности, потребляемой трансформатором при коротком замыкании, когда на его первичную обмотку подано напряжение U_k . Для мощных трансформаторов они обычно составляют 0,5—2 % номинальной мощности.

Уменьшение суммарных потерь достигается соответствующим выбором площади сечения проводов обмоток трансформаторов (снижение электрических потерь в проводах), применением электротехнической стали для изготовления магнитопровода (снижение потерь от перемагничивания) и расслоением магнитопровода на ряд изолированных друг от друга листов (снижение потерь от вихревых токов).

К. п. д. трансформатора

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + \Delta P_{эл} + \Delta P_m),$$

где P_1 и P_2 — потребляемая и отдаваемая мощности; $\Delta P_{эл} = \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2}$.

Благодаря отсутствию в трансформаторе вращающихся и трущихся деталей потери энергии в нем по сравнению с вращающимися машинами малы, а к. п. д. высок и достигает в трансформаторах большой мощности 0,98—0,99. В трансформаторах малой мощности к. п. д. составляет 0,5—0,7. При изменении нагрузки к. п. д. трансформатора изменяется, так как меняются полезная мощность P_2 и электрические потери $\Delta P_{эл}$ в проводниках обмоток. Однако он сохраняет большое значение в довольно широком диапазоне изменения нагрузки (рис. 225, б). При значительных недогрузках к. п. д. понижается, так как полезная мощность

уменьшается, а магнитные потери ΔP_m остаются неизменными. При перегрузках к. п. д. также снижается, так как резко возрастают электрические потери $\Delta P_{эл}$ (они пропорциональны квадрату тока нагрузки, в то время как полезная мощность — только току в первой степени).

Максимальное значение к. п. д. трансформатор имеет при такой нагрузке, когда электрические потери $\Delta P_{эл}$ равны магнитным потерям ΔP_m (см. рис. 225, б). При проектировании трансформаторов стремятся, чтобы максимальное значение к. п. д. достигалось при нагрузке 50—75 % номинальной; это соответствует наиболее вероятной средней нагрузке работающего трансформатора, называемой экономической.

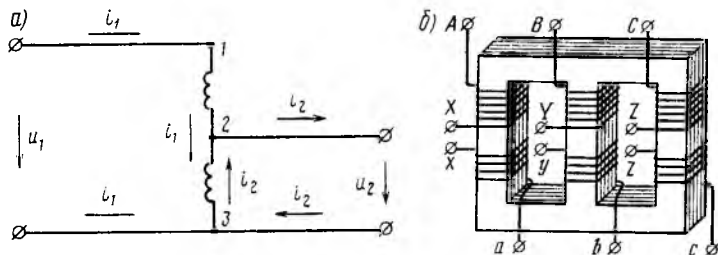
§ 67. Автотрансформатор и трехфазный трансформатор

Автотрансформатор. В случае когда вторичное напряжение не сильно отличается от первичного (при коэффициенте трансформации, близком к единице), вместо обычного двухобмоточного трансформатора выгодно применять автотрансформатор, отличающийся от обычного тем, что его обмотка низшего напряжения составляет часть обмотки высшего напряжения (рис. 226, а). Иными словами, он имеет вместо двух обмоток одну, разделенную на две части. Участок 1—3 образует обмотку высшего напряжения, участок 2—3 — обмотку низшего напряжения. По участку 2—3 протекает разность токов $i_2 - i_1$.

В автотрансформаторе потери мощности меньше, чем в двухобмоточном трансформаторе, при одинаковой номинальной мощности. Это объясняется тем, что в двухобмоточном трансформаторе вся мощность $S_2 = U_2 I_2$ передается из первичной цепи во вторичную электромагнитным путем, а в автотрансформаторе электромагнитным путем передается только часть этой мощности $S_2 (1 - 1/n)$ (здесь n — коэффициент трансформации). Остальная часть S_2/n передается непосредственно из первичной во вторичную цепь в результате электрической связи между ними, поэтому рассчитывать автотрансформатор на эту мощность не требуется. Чем ближе коэффициент трансформации к единице, тем меньше часть мощности S_2 передается электромагнитным путем, следовательно, тем меньше масса и габаритные размеры автотрансформатора. Например, при $n = 2$ электромагнитным путем во вторичную цепь передается половина мощности S_2 , а при $n = 3$ — уже $2/3$ этой мощности. Следовательно, преимущества автотрансформаторов проявляются только при небольших коэффициентах трансформации, когда разность токов $i_2 - i_1$ мала и участок 2—3 включает в себя значительную часть всех имеющихся в трансформаторе витков. При больших коэффициентах трансформации выгоды от применения автотрансформаторов практически нет.

Основным недостатком автотрансформаторов является то, что у них вторичная цепь электрически связана с первичной и должна

Рис. 226. Схемы автотрансформатора (а) и трехфазного трансформатора (б)



поэтому иметь одинаковую с ней изоляцию по отношению к земле. По этой причине, а также по условиям техники безопасности применение автотрансформаторов для связи цепей высокого и низкого напряжения недопустимо.

Трехфазный трансформатор. Схемы соединения обмоток. Трехфазное напряжение обычно преобразуют трехстержневыми трехфазными трансформаторами (рис. 226, б), в которых первичная и вторичная обмотки каждой фазы расположены на общем стержне. Только при очень больших мощностях (более 10 МВ·А в фазе) для этой цели применяют три однофазных трансформатора, так как для транспортирования и монтажа они более удобны. Первичная и вторичная обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены «звездой» (символ Υ), «звездой с выведенной нулевой точкой» (символ Υ_n) или «треугольником» (символ Δ).

В трансформаторах, предназначенных для выпрямительных установок, вторичную обмотку иногда соединяют по схеме «зигзаг с выведенной нулевой точкой».

Обычно обмотку высшего напряжения (ВН) соединяют по схеме «звезда», что позволяет при заданном линейном напряжении иметь меньшее число витков в фазе и снижает требования к изоляции обмоток, так как фазное напряжение в схеме «звезда» в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного. Зажимы обмоток ВН обозначают буквами: начала — А, В, С, концы — Х, Y, Z; зажимы обмоток низшего напряжения (НН); начала — а, b, с, концы — x, y, z.

При соединении обмоток трансформатора по схеме Υ/Υ и Δ/Δ отношение линейных напряжений $U_{л.вн}/U_{л.нн}$ при холостом ходе равно отношению $w_{вн}/w_{нн}=n$. При соединении по схеме Υ/Δ отношение этих напряжений будет $\sqrt{3}n$, а при Δ/Υ — $n/\sqrt{3}$.

В каждой фазе трехфазного трансформатора происходят те же процессы, что и в однофазном трансформаторе, поэтому в нем сохраняются те же соотношения между напряжениями, токами и числами витков обмоток.

Группы соединенный обмоток. В зависимости от схемы соединения первичной и вторичной обмоток, направления намотки и маркировки выводов трехфазного трансформатора его линейные первичные и вторичные напряжения могут быть сдвинуты по фазе на различный угол. Для облегчения практического включения трансформаторов на параллельную работу приходится разделять

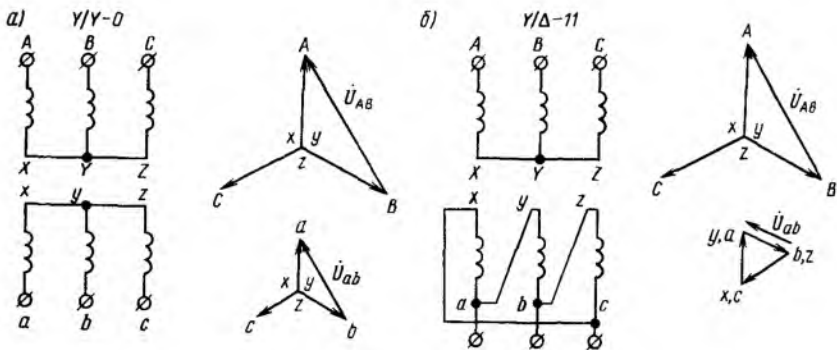


Рис. 227. Электрические схемы и векторные диаграммы напряжений трансформаторов с соединением обмоток по схемам Y/Y и Y/Δ

их на группы в зависимости от сдвига по фазе между линейными напряжениями, измеренными на одноименных зажимах. Группы соединений обозначают целыми числами от 0 до 11. Номер группы определяется углом между векторами первичного и вторичного линейных напряжений, поделенным на 30° , при этом угол отсчитывают от вектора линейного напряжения обмотки ВН по часовой стрелке (в сторону отставания векторов). В СССР выпускаются трехфазные силовые трансформаторы только двух групп.

Трансформаторы, соединенные по схеме «звезда — звезда», имеют нулевую группу и обозначаются $Y/Y-0$ или Y/Y_0-0 . При этом векторы линейных напряжений U_{AB} и U_{ab} совпадают по фазе, т. е. угол между ними равен нулю (рис. 227, а). Трансформаторы, соединенные по схеме «звезда — треугольник» или «треугольник — звезда», имеют одиннадцатую группу и обозначаются $Y/\Delta-11$ или $\Delta/Y-11$. В этом случае вектор U_{ab} обмотки НН отстает от вектора U_{AB} обмотки ВН на угол 330° (рис. 227, б).

Однофазные трансформаторы также разделяются на группы, но у них в зависимости от направления намотки и маркировки выводов напряжения первичной и вторичной обмоток при холостом ходе могут совпадать по фазе либо быть свинуты на 180° . В соответствии с этим они могут принадлежать к нулевой или шестой группе.

Трехфазные трансформаторы, также как и однофазные, бывают двухобмоточные и многообмоточные. На тяговых подстанциях иногда устанавливают трехобмоточные трансформаторы с двумя вторичными обмотками. Одна из них питает контактную сеть, а другая — электрические потребители близлежащих районов.

§ 68. Трансформаторы для вентильных преобразователей

При использовании трансформаторов в вентильных преобразовательных установках в их вторичные обмотки включают электрические вентили, пропускающие ток только в одном направлении.

Характерной особенностью этих трансформаторов является неодновременная нагрузка отдельных фаз, связанная с поочередным отпиранием вентилей, включенных в соответствующие фазы. Поэтому в каждый момент времени трансформатор нагружен несимметрично. Это обстоятельство вызывает ряд неблагоприятных последствий, основными из которых являются наличие в кривых первичного I_1 и вторичного I_2 токов значительных высших гармоник и дополнительное подмагничивание сердечника при некоторых схемах выпрямления.

Схемы соединения обмоток. В рассматриваемых трансформаторах различают сетевую обмотку, подключаемую к питающей сети, и вентильную обмотку, к которой подключаются вентили преобразователя.

В выпрямительных установках однофазного тока, применяемых на э. п. с., используют полупроводниковые вентили, включенные по мостовой схеме. В этих установках применяют двухобмоточные трансформаторы. В выпрямительных установках тяговых подстанций электрифицированных дорог постоянного тока используют трансформаторы, у которых вентильная обмотка включена по схеме «две обратные звезды с уравнительным реактором» (рис. 228, а). В этой схеме три фазы $a-0$; $b-0$ и $c-0$ вентильной обмотки образуют «прямую звезду», а другие три фазы $a1-01$; $b1-01$ и $c1-01$, расположенные на тех же стержнях трансформатора, — «обратную звезду». Обмотки фаз включены таким образом, что э. д. с., индуцируемые в фазах «прямой звезды», сдвинуты на 180° относительно э. д. с. соответствующих обмоток «обратной звезды». В результате обеспечивается преобразование трехфазного тока в шестифазный, так как напряжения $U_a, U_{c1}, U_b, U_{a1}, U_c$ и U_{b1} , индуцируемые в фазах $a-0, c1-01, b-0, a1-01, c-0, b1-01$, сдвинуты относительно друг друга на угол 60° (рис. 228, б). Уравнительный

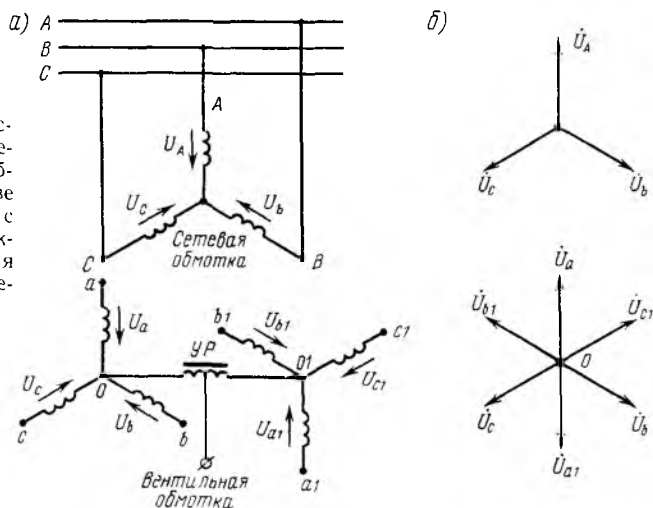


Рис. 228. Схема трансформатора с соединением вентильной обмотки по схеме «две обратные звезды с уравнительным реактором» (а) и векторная диаграмма напряжений (б)

реактор $УР$, включаемый между нулевыми точками 0 и 0_1 двух «звезд», обеспечивает возможность параллельной работы двух соседних фаз на общую выпрямительную нагрузку при сдвиге индуцируемых в них э. д. с. на угол 60° .

Условия работы трансформатора. В трансформаторах для вентиляльных преобразователей по первичной и вторичной обмоткам протекают несинусоидальные токи, содержащие ряд высших гармоник. Происходит это по следующим причинам:

вентили, включенные в цепи отдельных фаз вторичной обмотки, пропускают ток только в течение части периода;

на стороне постоянного тока преобразователя обычно включают сглаживающий реактор значительной индуктивности, при котором токи в обмотках трансформатора имеют форму, близкую к прямоугольной.

В общем случае токи i_1 и i_2 имеют разное действующее значение, вследствие чего габаритные размеры и масса таких трансформаторов всегда больше, чем у трансформаторов той же номинальной выходной мощности, но работающих при синусоидальном токе. Физически это объясняется тем, что нагрев обмоток трансформатора определяют действующие значения токов i_1 и i_2 , которые в данном случае содержат ряд высших гармоник. При работе же трансформатора в цепи синусоидального тока высших гармоник не будет, действующие значения токов i_1 и i_2 и нагрев трансформатора при той же выходной мощности будут меньшими, поэтому он может быть выполнен с меньшими габаритными размерами и массой.

В качестве номинальной мощности трансформаторов для вентиляльных преобразователей принято считать не выходную мощность $P_{d\text{ном}}$, отдаваемую преобразователем при номинальной нагрузке на стороне постоянного тока, а типовую мощность

$$S_T = (S_{1\text{ном}} + S_{2\text{ном}}) / 2,$$

где $S_{1\text{ном}}$ и $S_{2\text{ном}}$ — номинальные мощности первичной и вторичной обмоток.

Типовая мощность рассматриваемого трансформатора S_T больше его выходной мощности $P_{d\text{ном}}$. Например, при однофазной мостовой схеме выпрямления и идеально сглаженном токе $S_T = 1,11P_{d\text{ном}}$, при нулевой — $S_T = 1,34P_{d\text{ном}}$.

§ 69. Регулирование напряжения трансформаторов

Ступенчатое регулирование. Напряжение, снимаемое с вторичной обмотки трансформатора или автотрансформатора, можно регулировать, изменяя число витков первичной или вторичной обмотки. Регулирование напряжения при этом получается не плавным, а ступенчатым.

Число витков вторичной обмотки трансформатора можно изменять сравнительно просто, и такой способ широко применяют на э. п. с. переменного тока. Для этого вторичную обмотку разбивают

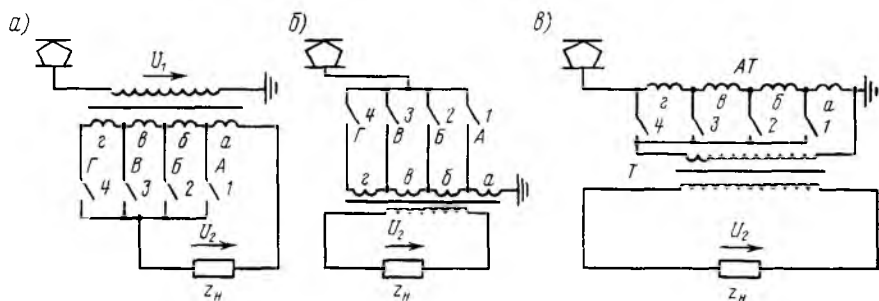


Рис. 229. Схемы ступенчатого регулирования выходного напряжения трансформатора на стороне низшего напряжения (а) и на стороне высшего напряжения (б и в)

на ряд ступеней (секций): а, б, в, г (рис. 229, а), к выводам которых А, Б, В и Г соответствующими переключателями 1, 2, 3 и 4 может подключаться приемник электрической энергии Z_n . При соединяя приемник к тому или иному выводу трансформатора, можно изменять число включенных во вторичную обмотку витков, т. е. напряжение U_2 , подводимое к приемнику. Такой способ называют *регулированием на стороне низшего напряжения трансформатора*.

Регулирование напряжения U_2 путем изменения числа витков первичной обмотки трансформатора практически можно осуществлять только в сравнительно узких пределах. Такой способ применяют на трансформаторах тяговых подстанций с целью компенсации колебаний напряжения в питающей подстанции сети (напряжение этих трансформаторов может изменяться от +5 до -10 % номинального значения). Использовать этот способ для регулирования напряжения в широких пределах не представляется возможным. В этом случае для увеличения напряжения потребовалось бы сильно уменьшать число витков w_1 первичной обмотки, т. е. переключать провод, подающий питание от сети, с вывода Г на выводы В, Б и А (рис. 229, б). При этом будет возрастать магнитный поток трансформатора, а следовательно, ток холостого хода и потери мощности в стали. Поэтому такой способ регулирования напряжения на э. п. с. не применяют.

Напряжение U_2 , снимаемое с вторичной обмотки трансформатора Т, можно также регулировать, если изменять каким-либо способом напряжение U_1 , подаваемое на его первичную обмотку. Для этой цели на э. п. с. используют регулировочный автотрансформатор АТ (рис. 229, в). Такой способ называют *регулированием на стороне высшего напряжения трансформатора (на первичной стороне)*. Его применяют на некоторых электровозах переменного тока (серии ЧС4 и др.). Автотрансформатор может быть выполнен на отдельном магнитоприводе или в виде дополнительной обмотки на магнитоприводе основного трансформатора.

Каждый из рассмотренных способов регулирования напряжения имеет свои преимущества и недостатки. При регулировании

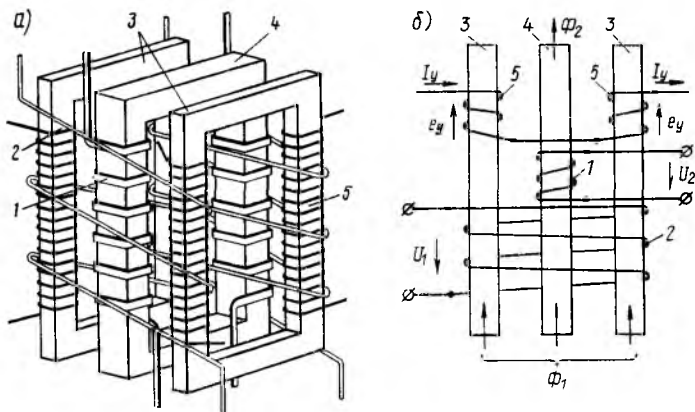
на стороне низшего напряжения переключающие аппараты приходится рассчитывать на большие токи, что сильно усложняет их конструкцию. При регулировании на стороне высшего напряжения удастся значительно упростить конструкцию переключающих аппаратов, так как токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны их напряжениям (практически токи в первичной обмотке трансформатора мощного электровоза составляют 200—300 А, а во вторичной достигают нескольких тысяч ампер). Однако масса и габаритные размеры трансформатора при этом возрастают, а его к. п. д. и коэффициент мощности уменьшаются. Кроме того, переключающую аппаратуру приходится выполнять с усиленной изоляцией и с высокой степенью точности, так как несогласованность работы отдельных выключателей на стороне высшего напряжения может привести к тяжелым авариям.

Регулирование напряжения путем подмагничивания сердечника. Регулировать напряжение трансформатора можно также изменением магнитного потока, проходящего по отдельным его стержням, с помощью магнитных шунтов. Для этой цели можно подмагничивать шунты постоянным током и менять таким образом их магнитное сопротивление для переменного потока, создаваемого первичной обмоткой.

Трансформаторы с подмагничиванием сердечника применяют на некоторых электровозах переменного тока для питания цепей управления и заряда аккумуляторных батарей. Такой трансформатор имеет основной магнитопровод 4 (рис. 230, а) и два магнитных шунта 3, отделенных друг от друга изолирующими прокладками. Первичная его обмотка 2 состоит из двух катушек, соединенных параллельно. Каждая из них охватывает три стержня: один из стержней основного магнитопровода и два стержня магнитных шунтов. Вторичная обмотка 1 также выполнена из двух параллельно включенных катушек, намотанных на стержни основного магнитопровода. На стержнях магнитных шунтов расположена обмотка управления 5, состоящая из четырех катушек. Они соединены последовательно так, чтобы магнитные потоки, созданные каждой парой катушек одного магнитного шунта, складывались, а э. д. с. e_v , индуцируемые в них переменным магнитным потоком первичной обмотки, взаимно компенсировались (рис. 230, б).

Трансформатор работает следующим образом. При отсутствии постоянного тока в обмотке управления 5 магнитный поток Φ_1 трансформатора, создаваемый первичной обмоткой 2, равномерно распределяется между основным магнитопроводом и магнитными шунтами (пропорционально площади их поперечных сечений). При этом во вторичной обмотке 1 индуцируется минимальное напряжение u_2 . При протекании по обмоткам управления постоянного тока i_3 сердечники магнитных шунтов насыщаются и их магнитное сопротивление возрастает. При этом магнитный поток Φ_1 первичной обмотки вытесняется в основной магнитопровод и проходящий по нему поток Φ_2 увеличивается. Это приводит к увеличению напряжения U_2 , индуцируемого во вторичной обмотке. Когда

Рис. 230. Трансформатор с регулированием напряжения путем подмагничивания его сердечника постоянным током (а) и схема включения его обмоток (б)



сердечники магнитных шунтов будут полностью насыщены, магнитный поток Φ_2 в основном магнитопроводе будет максимальным и с трансформатора снимается максимальное напряжение u_2 . Таким образом, *изменяя ток управления i_y , можно плавно регулировать вторичное напряжение.*

§ 70. Реакторы

Реактором называют статическое электромагнитное устройство, предназначенное для использования его индуктивности в электрической цепи. На э. п. с. переменного и постоянного тока и на тепловозах широко применяют реакторы: сглаживающие — для сглаживания пульсаций выпрямленного тока; переходные — для переключения выводов трансформатора; делительные — для равномерного распределения тока нагрузки между параллельно включенными вентилями; токоограничивающие — для ограничения тока короткого замыкания; помехоподавления — для подавления радиопомех, возникающих при работе электрических машин и аппаратов; индуктивные шунты — для распределения при переходных процессах тока между обмотками возбуждения тяговых двигателей и включенными параллельно им резисторами и пр.

Катушка с ферромагнитным сердечником в цепи переменного тока. При подключении катушки с ферромагнитным сердечником в цепь переменного тока (рис. 231, а) протекающий по ней ток определяется потоком, который необходимо создать, чтобы индуцируемая в катушке э. д. с. e_L была равна и противоположна по фазе приложенному к ней напряжению. Этот ток называют намагничивающим. Он зависит от числа витков катушки, магнитного сопротивления ее магнитопровода (т. е. от площади поперечного сечения, длины и материала магнитопровода), напряжения и частоты его изменения. При увеличении поданного на катушку напряжения u возрастает поток Φ , сердечник ее насыщается, что

вызывает резкое увеличение намагничивающего тока. Следовательно, такая катушка представляет собой нелинейное индуктивное сопротивление X_L , значение которого зависит от приложенного к ней напряжения. Вольт-амперная характеристика катушки с ферромагнитным сердечником (рис. 231, б) имеет вид, подобный кривой намагничивания. Как было показано в главе III, магнитное сопротивление магнитопровода определяется также размерами воздушных зазоров, имеющихся в магнитной цепи. Поэтому форма вольт-амперной характеристики катушки зависит от воздушного зазора δ в магнитной цепи. Чем больше этот зазор, тем больший ток i проходит через катушку при заданном напряжении u , следовательно, тем меньше индуктивное сопротивление X_L катушки. С другой стороны, чем больше магнитное сопротивление, создаваемое воздушным зазором, по сравнению с магнитным сопротивлением ферромагнитных участков магнитопровода, т. е. чем больше зазор δ , тем больше вольт-амперная характеристика катушки приближается к линейной.

Регулировать индуктивное сопротивление X_L катушки с ферромагнитным сердечником можно не только путем изменения воздушного зазора δ , но и путем подмагничивания ее сердечника постоянным током. Чем больше подмагничивающий ток, тем большее насыщение создается в магнитопроводе катушки и тем меньше ее индуктивное сопротивление X_L . Катушка с ферромагнитным сердечником, подмагничиваемым постоянным током, называется насыщающимся реактором.

Применение реакторов для регулирования и ограничения тока в электрических цепях переменного тока вместо резисторов обеспечивает значительную экономию электрической энергии, так как в реакторе в отличие от резистора потери мощности незначительны (они определяются малым активным сопротивлением проводов реактора).

При включении катушки с ферромагнитным сердечником в цепь переменного тока протекающий по ней ток не будет синусоидальным. Из-за насыщения сердечника катушки в кривой тока i получаются «пики» тем больше, чем больше насыщение магнитопровода (рис. 231, в).

Сглаживающие реакторы. На электровозах и электропоездах переменного тока с выпрямителями для сглаживания пульсаций выпрямленного тока в цепях тяговых двигателей применяют сглаживающие реакторы, выполненные в виде катушки со стальным сердечником. Активное сопротивление катушки весьма мало, поэтому она практически не влияет на постоянную составляющую выпрямленного тока. Для переменной же составляющей тока катушка создает индуктивное сопротивление $X_L = \omega L$ тем больше, чем выше частота ω соответствующей гармоники. В результате этого амплитуды гармонических составляющих выпрямленного тока резко уменьшаются и, следовательно, снижается пульсация тока. На э. п. с. переменного тока с выпрямителями, работающими от контактной сети с частотой 50 Гц, основной гармоникой выпрям-

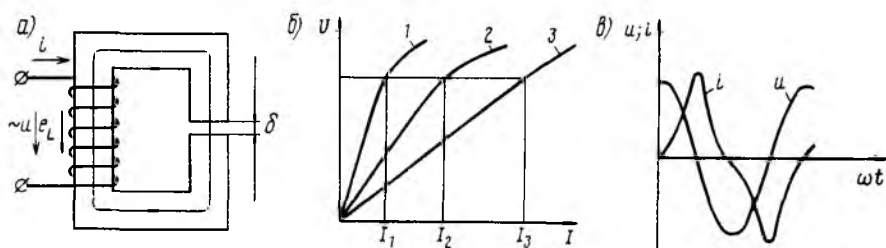


Рис. 231. Катушка с ферромагнитным сердечником в цепи переменного тока (а), ее вольт-амперные характеристики (б) и кривые тока и напряжения в цепи катушки (в):

1 — при $\delta = 0$; 2 — при некотором δ_1 ; 3 — при $\delta_2 > \delta_1$

ленного тока, которая имеет наибольшую амплитуду, является гармоника с частотой 100 Гц. Для эффективного ее подавления необходимо было бы включить сглаживающий реактор с большой индуктивностью, т. е. довольно значительных размеров. Поэтому практически эти реакторы рассчитывают так, чтобы снизить коэффициент пульсации тока до 25—30 %.

Индуктивность реактора, а следовательно, и его габаритные размеры зависят от наличия в нем ферромагнитного сердечника. При отсутствии сердечника для получения требуемой индуктивности реактор должен иметь катушку значительного диаметра и с большим числом витков. Реакторы без сердечника устанавливают на тяговых подстанциях для сглаживания пульсации тока, поступающего в контактную сеть от выпрямителей. Они имеют большие габаритные размеры и массу и требуют значительного расхода меди. На э. п. с. устанавливать подобные устройства не представляется возможным.

Однако выполнять реактор с замкнутым стальным сердечником, как у трансформатора, нецелесообразно, так как протекающая по его катушке постоянная составляющая тока вызвала бы при больших нагрузках сильное насыщение сердечника и снижение индуктивности реактора. Поэтому магнитную систему сглаживающего реактора должны рассчитывать так, чтобы она не насыщалась от постоянной составляющей тока. Для этой цели магнитопровод 1 реактора выполняют незамкнутым (рис. 232, а) так, чтобы его магнитный поток частично проходил по воздуху, либо замкнутым, но с большими воздушными зазорами (рис. 232, б). Чтобы уменьшить расход меди и снизить массу и габаритные размеры реактора, его обмотку 2 рассчитывают на повышенную плотность тока и интенсивно охлаждают. На электровозах и электро-

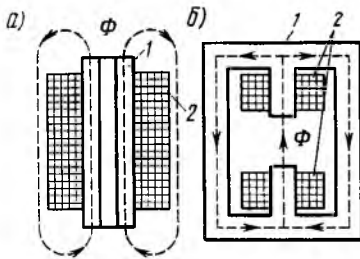


Рис. 232. Магнитная система сглаживающего реактора при разомкнутом (а) и замкнутом (б) магнитопроводах

поездах применяют реакторы с принудительным воздушным охлаждением. Такой реактор заключают в специальный цилиндрический кожух; охлаждающий воздух проходит по каналам между его сердечником и обмоткой. Имеются также конструкции реакторов, в которых сердечник с обмоткой установлен в баке с трансформаторным маслом. Для уменьшения вихревых токов, которые снижают индуктивность реактора, его сердечник собирают из изолированных листов электротехнической стали.

Подобную же конструкцию имеют индуктивные шунты, которые обеспечивают при переходных процессах требуемое распределение токов между обмоткой возбуждения тягового двигателя и шунтирующим резистором (при регулировании частоты вращения двигателей путем уменьшения магнитного потока).

Токоограничивающие реакторы. На э. п. с. переменного тока с полупроводниковыми выпрямителями в некоторых случаях последовательно с выпрямительной установкой включают токоограничивающие реакторы. Полупроводниковые вентили имеют малую переключательную способность и при больших токах быстро выходят из строя. Поэтому при использовании их необходимо принимать специальные меры для ограничения тока короткого замыкания и быстрого отключения выпрямительной установки от источника питания до того, как этот ток достигнет значения, опасного для вентилях. При коротком замыкании в цепи нагрузки и пробое вентилях индуктивность реактора ограничивает ток короткого замыкания (примерно в 4—5 раз по сравнению с током без реактора) и замедляет скорость его нарастания. В результате этого за период времени, необходимый для срабатывания защитной аппаратуры, ток короткого замыкания не успевает возрасти до опасного значения. В токоограничивающих реакторах иногда применяют дополнительную обмотку, выполняющую роль вторичной обмотки трансформатора. При возникновении короткого замыкания резко возрастает ток, проходящий по основной обмотке реактора, и увеличивающийся магнитный поток индуцирует в дополнительной обмотке импульс напряжения. Этот импульс служит сигналом для срабатывания устройства защиты, отключающего выпрямительную установку.

§ 71. Подключение трансформаторов и реакторов к источнику переменного тока

При подключении реактора без ферромагнитного сердечника к источнику переменного тока (электрической сети) возникает переходный процесс, при котором ток в цепи изменяется по периодической кривой i (рис. 233, *a*). Эту кривую можно представить в виде суммы двух составляющих: принужденного тока $i_{пр}$ (установившегося переменного тока после окончания переходного процесса) и аperiodически изменяющегося свободного тока $i_{св}$. По

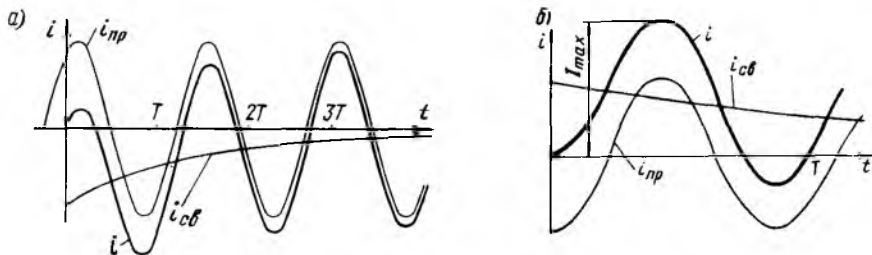


Рис. 233. Переходный процесс при подключении реактора к источнику переменного тока

истечении некоторого промежутка времени (в 3—4 раза большего постоянной времени цепи $T=L/R$) свободный ток практически затухает, и в цепи будет действовать только установившийся переменный ток.

В начальный момент переходного процесса свободный ток $i_{св}$ равен принужденному $i_{пр}$, но имеет обратное направление. Поэтому если цепь включена под напряжение в момент, когда принужденный ток проходит через нуль, свободный ток отсутствует и в цепи сразу возникает установившийся режим. Наибольшего значения свободный ток достигает тогда, когда цепь включена под напряжение в момент прохождения принужденного тока через свой максимум (рис. 233, б). В этом случае и суммарный ток i переходного процесса также достигает наибольшего значения (примерно через полпериода после включения, когда принужденный ток будет иметь одинаковое направление со свободным). Если постоянная времени цепи T значительно больше, чем период принужденного тока, то свободный ток затухает медленно и суммарный ток i переходного процесса может достигнуть почти удвоенной амплитуды принужденного тока. Если же свободный ток затухает в значительной степени уже в течение первого периода после включения, то сильного увеличения суммарного тока не происходит.

При включении трансформаторов, реакторов и других устройств, в которых имеются катушки со стальными сердечниками, магнитный поток Φ во время переходного процесса изменяется примерно так же, как и ток при включении цепи реактора без ферромагнитного сердечника (рис. 234, а), т. е. наряду с принужденным (установившимся потоком) $\Phi_{пр}$ возникает свободный поток $\Phi_{св}$. При этом амплитуда общего потока $\Phi = \Phi_{пр} + \Phi_{св}$ может увеличиться приблизительно вдвое по сравнению с амплитудой его установившегося значения. Такое увеличение магнитного потока вызывает гораздо большее увеличение тока, так как магнитная система подобных устройств сильно насыщается.

Еще более неблагоприятные условия возникают в случае, когда в момент включения поток остаточного магнетизма $\Phi_{ост}$ в сердечнике катушки противоположен принужденному току. Тогда наибольшее возможное увеличение потока при переходном процессе

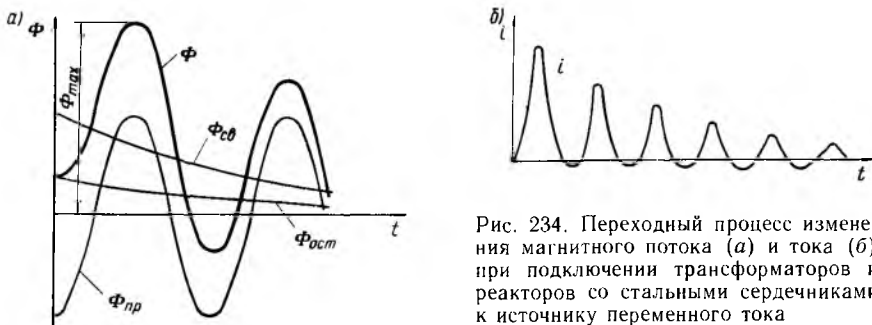


Рис. 234. Переходный процесс изменения магнитного потока (а) и тока (б) при подключении трансформаторов и реакторов со стальными сердечниками к источнику переменного тока

может превышать более чем в 2 раза амплитуду его установившегося значения.

При колебаниях магнитного потока во время переходного процесса ток колеблется в значительно большей степени, так как при наибольших и близких к ним значениях потока сердечник сильно насыщается. При этом возникает резкое увеличение тока в цепи катушки (рис. 234, б), который может превышать в десятки раз установившийся ток и даже быть больше тока короткого замыкания. Это обстоятельство учитывают при проектировании трансформаторов и реакторов (они не должны разрушаться под действием электромагнитных сил, возникающих при включении этих устройств) и при регулировке аппаратов для их защиты от перегрузок и коротких замыканий.

§ 72. Магнитные усилители

Магнитным усилителем называют электромагнитный аппарат, служащий для плавного регулирования переменного тока, поступающего к нагрузке, путем изменения индуктивного сопротивления X_L катушки с ферромагнитным сердечником, включенной последовательно с нагрузкой. Принцип действия магнитного усилителя основан на изменении индуктивности катушки с ферромагнитным сердечником при подмагничивании ее постоянным током. С помощью такого аппарата можно регулировать большие токи посредством сравнительно слабых электрических сигналов. Магнитные усилители широко применяют на тепловозах для автоматического регулирования возбуждения главного генератора и на э. п. с. для регулирования напряжения источника служебного тока при зарядке аккумуляторных батарей, в стабилизаторах напряжения и для других целей. Существуют магнитные усилители с насыщающимися реакторами и с самонасыщением (с самоподмагничиванием).

Магнитные усилители с насыщающимися реакторами. В таком магнитном усилителе используют два насыщающихся реактора $L1$ и $L2$ (рис. 235, а). Каждый из них выполнен в виде катушки I

(рабочей обмотки) с ферромагнитным сердечником 3 и подмагничивающей обмоткой 2, по которой проходит постоянный ток (ток управления I_y).

Рабочие обмотки 1 реакторов $L1$ и $L2$ включают согласованно, чтобы переменные э. д. с. e_{L1} и e_{L2} , индуцированные в них, складывались, а обмотки управления 2 включают встречно, чтобы э. д. с. e_{y1} и e_{y2} , индуцированные в них, были направлены навстречу друг другу и взаимно уничтожались.

Входом магнитного усилителя, на который подается управляющий сигнал U_y , являются зажимы a и b обмоток управления обоих реакторов. Выходом усилителя служат точки c и d , к которым подключают нагрузку R_n . Если нагрузка питается переменным током, то она включается последовательно с рабочими обмотками реакторов $L1$ и $L2$. Такой магнитный усилитель называют усилителем с выходом на переменном токе. Если нагрузка R_n рассчитана на питание постоянным током, то ее включают через выпрямитель B (рис. 235, б). Магнитный усилитель в этом случае называют усилителем с выходом на постоянном токе.

Источником питания магнитного усилителя служит сеть переменного тока или трансформатор, подключенный к питающей сети (когда напряжение питания отличается от напряжения сети).

Магнитный усилитель обладает способностью усиливать электрические сигналы. Это объясняется тем, что мощность, потребляемая обмоткой управления и расходуемая на ее нагрев, во много раз меньше мощности, передаваемой нагрузке R_n . Поэтому, затрачивая малую мощность в обмотке управления, можно регулировать значительно большую мощность, поступающую к нагрузке R_n . При работе усилителя не происходит какого-либо нарушения закона сохранения энергии. В данном случае передача мощности нагрузке производится не от цепи управления, а от источника

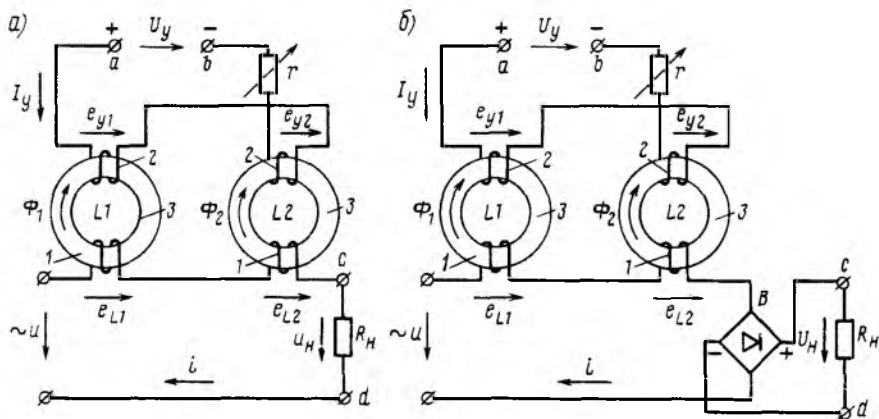


Рис. 235. Схемы магнитных усилителей с насыщающимися реакторами с выходом на переменном (а) и постоянном (б) токе

питания переменного тока. Управляющий сигнал U_y постоянного тока позволяет лишь изменять значение этой мощности.

Магнитный усилитель работает следующим образом. Когда на вход усилителя не подается управляющий сигнал (напряжение на входе усилителя U_y и ток управления I_y равны нулю), сердечники реакторов не насыщены и рабочие обмотки I имеют большое индуктивное сопротивление. Поэтому ток в цепи нагрузки будет мал. Его называют начальным, или током холостого хода усилителя. Напряжение на нагрузке U_n (выходное напряжение) будет также мало, так как большая часть напряжения питания U теряется в виде падения напряжения IX_L в рабочих обмотках. Следовательно, будет мала и мощность, поступающая к нагрузке от источника питания.

При подаче в обмотки управления 2 тока управления I_y сердечники реакторов подмагничиваются и индуктивное сопротивление X_L рабочих обмоток I уменьшается. При этом растут ток в цепи нагрузки и поступающая к ней мощность.

Для магнитного усилителя справедливо такое же уравнение магнитодвижущих сил, что и для трансформатора:

$$F_p = F_y,$$

где $F_p = I\omega_p$ — м. д. с. рабочей обмотки;

$F_y = I_y\omega_y$ — м. д. с. обмотки управления;

ω_p, ω_y — число витков рабочей обмотки и обмотки управления.

Отсюда получаем зависимость тока I в цепи рабочих обмоток от тока управления I_y :

$$I = (\omega_y/\omega_p) I_y. \quad (79)$$

Приведенное соотношение справедливо только до тех пор, пока ток I_y не достигает значения $I_{y\max}$, при котором сердечники реакторов будут насыщены в течение всего периода изменения питающего напряжения u . В этом случае индуктивное сопротивление рабочих обмоток станет равным нулю и магнитный усилитель теряет свои управляющие свойства.

Зависимость тока I в цепи рабочих обмоток от тока управления I_y при постоянном напряжении U источника питания называется *характеристикой управления магнитного усилителя*. Характеристика управления для идеализированного магнитного усилителя (рис. 236, а), построенная по формуле (79), симметрична относительно оси тока I , так как при изменении направления подмагничивающего тока I_y электромагнитные процессы в усилителе не изменяются.

У реального магнитного усилителя при $I_y = 0$ существует небольшой ток холостого хода I_0 (усилитель имеет некоторое конечное индуктивное сопротивление X_L) и характеристика управления (рис. 236, б) не имеет резкого перелома в точке, соответствующей $I_{y\max}$.

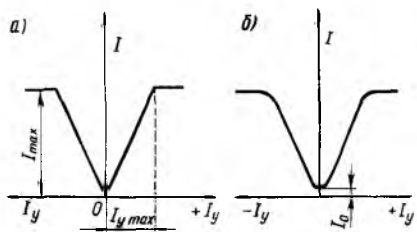


Рис. 236. Характеристики управления идеализированного (а) и реального (б) магнитного усилителя

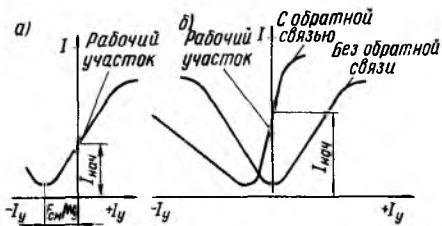


Рис. 237. Характеристики управления при наличии обмотки смещения (а) и положительной обратной связи (б)

Крутизна характеристики управления определяет коэффициенты усиления по току k_i и по мощности k_p . Коэффициент усиления по току представляет собой отношение тока I в цепи нагрузки к току I_y в цепи управления, коэффициент усиления по мощности — отношение мощности P_n , передаваемой нагрузке, к мощности P_y , потребляемой обмоткой управления.

Для того чтобы ток холостого хода был по возможности мал, а рабочие участки характеристики имели большую крутизну с целью увеличения коэффициентов усиления по току и по мощности, магнитную систему реакторов $L1$ и $L2$ выполняют на тороидальных сердечниках из пермаллоя. Часто применяют сердечники, навитые из холоднокатаной стальной ленты, так же как и в трансформаторах малой мощности. Усилители большой мощности изготавливают из листовой электротехнической стали на П- или Ш-образных сердечниках. Сердечники собирают весьма тщательно. Воздушные зазоры в стыках пластин должны быть по возможности малы. При возникновении зазоров свойства усилителя ухудшаются, так как его индуктивное сопротивление меньше зависит от тока управления. Следовательно, характеристика усилителя становится более полой — уменьшаются коэффициенты усиления по току и по мощности. Современные магнитные усилители позволяют получать коэффициенты усиления $k_i \approx 100$ и $k_p \approx 1000$.

Магнитный усилитель, выполненный по схемам рис. 235, имеет симметричную характеристику управления, т. е. одинаково реагирует на то или иное направление тока управления. В ряде случаев требуется, чтобы ток нагрузки изменялся различным образом в зависимости от полярности сигнала управления. Для этой цели в усилителе создают некоторое начальное подмагничивание при помощи специальной обмотки, обтекаемой постоянным током $I_{см}$. Она называется обмоткой смещения и располагается на сердечнике так же, как и обмотка управления (при наличии нескольких обмоток управления одну из них обычно используют в качестве обмотки смещения).

При включении обмотки смещения характеристика управления усилителя сдвигается влево (рис. 237, а) на величину $F_{см}/\omega_y$ (здесь $F_{см} = I_{см}\omega_{см}$ — м. д. с. обмотки смещения). В этом случае

при отсутствии тока в обмотке управления ток в цепи нагрузки имеет некоторое значение $I_{нач}$, которое будет увеличиваться или уменьшаться в зависимости от направления тока управления I_y . Введение начального подмагничивания одновременно повышает коэффициент усиления для малых токов I_y , поскольку при этом повышается крутизна характеристики управления.

В магнитном усилителе, составленном из двух отдельных реакторов (см. рис. 235), в каждой из обмоток управления могут индуцироваться значительные э. д. с. e_y , что заставляет выполнять их с усиленной изоляцией. Поэтому часто оба реактора конструктивно объединяют в один аппарат, который имеет обмотку управления 2, общую для двух реакторов (рис. 238, а). При таком выполнении результирующий магнитный поток, пронизывающий обмотку управления, будет мал и в ней практически не будет индуцироваться э. д. с. Сердечники разделяют немагнитной прокладкой 3, при этом по каждому из стержней, охватываемых обмоткой управления, проходит переменный магнитный поток, который интенсивно переманичивает сердечники (снимает остаточную индукцию, возникающую при изменении тока управления) и уменьшает тем самым влияние остаточного магнетизма на характеристику усилителя. В некоторых случаях магнитный усилитель выполняют на трехстержневом сердечнике (рис. 238, б).

Обычно магнитные усилители имеют не одну, а несколько обмоток управления, которые позволяют изменять выходное напряжение U_n и ток нагрузки I в зависимости от различных факторов. Например, магнитные усилители, устанавливаемые на некоторых тепловозах, имеют четыре обмотки управления.

Обратные связи в магнитных усилителях. Магнитные усилители обычно выполняют с обратными связями, которые обеспечивают увеличение стабильности работы усилителя и повышение его коэффициента усиления.

Обратной связью в усилителе называется воздействие выходного тока или напряжения на его вход. Она может быть внешней и внутренней. Для создания внешней обратной связи в усилителях предусматривают специальную обмотку (рис. 239), которая дополнительно подмагничивает или размагничивает сердечник. Она располагается на сердечнике так же, как и обмотки управления и смещения, и питается выпрямленным током, пропорциональным току нагрузки или напряжению на нагрузке. Обратная связь может быть положительной и отрицательной. Если при возрастании тока нагрузки или напряжения на нагрузке обмотка обратной связи усиливает действие входного сигнала, то обратная связь называется *положительной*. Ее используют для повышения коэффициента усиления. Если же при возрастании тока или напряжения на нагрузке обмотка обратной связи ослабляет действие входного сигнала, то связь называется *отрицательной*. Такую связь вводят в системы автоматического регулирования для повышения устойчивости их работы.

Обычно обмотку обратной связи включают через выпрямитель,

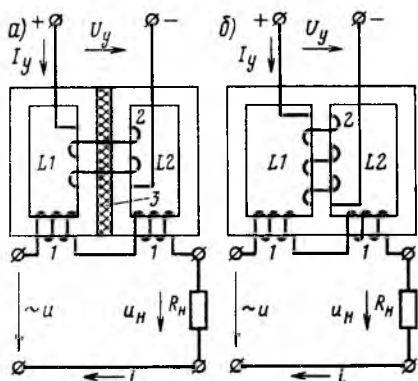


Рис. 238. Схемы магнитного усилителя с насыщающимися реакторами со сдвоенным (а) и с трехстержневым (б) сердечниками

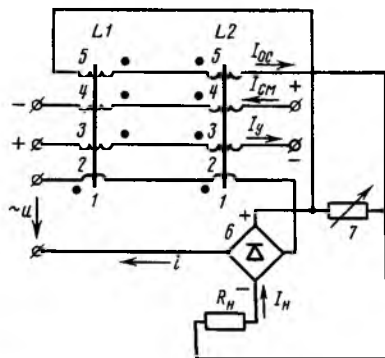


Рис. 239. Принципиальная схема магнитного усилителя с обмотками смещения и обратной связи

который присоединяют параллельно или последовательно нагрузке. В первом случае ток I_{oc} в обмотке обратной связи будет пропорционален выходному напряжению U_n (обратная связь по напряжению), во втором — току I_n в цепи нагрузки (обратная связь по току). Если нагрузка питается выпрямленным током, то можно использовать один общий выпрямитель для питания нагрузки и создания обратной связи.

В магнитном усилителе с выходом на постоянном токе (см. рис. 239) имеются два реактора $L1$ и $L2$ с сердечниками 1, на каждом из которых намотаны рабочие обмотки 2, обмотки управления 3, смещения 4 и положительной обратной связи по току 5. Нагрузка R_n и обмотки положительной обратной связи по току включены через выпрямитель 6. Параллельно обмоткам 5 присоединен резистор 7, посредством которого можно регулировать ток I_{oc} в этих обмотках. Обмотки 3, 4 и 5, расположенные на сердечниках двух реакторов $L1$ и $L2$, включены встречно, чтобы индуцируемые в них переменные э. д. с. взаимно уничтожались. Начала всех обмоток обозначены точками (при этом принимается, что все обмотки намотаны в одном направлении). Обмотки смещения 4 создают м. д. с., направленную против м. д. с. обмоток 3 и 5. Вместо двух обмоток обратной связи и смещения можно применить по одной, охватывающей стержни обоих реакторов, как это показано на рис. 238 для обмоток управления.

При наличии положительной обратной связи (когда ток I_{oc} направлен так же, как и ток I_y) характеристика управления будет иметь большую крутизну (см. рис. 237, б). Следовательно, при этом увеличиваются коэффициенты усиления по току k_i и по мощности k_p .

При изменении направления тока I_{oc} обратная связь становится отрицательной (обмотка обратной связи будет создавать м. д. с.,

направленную противоположно м. д. с. обмотки управления). Крутизна рабочего участка характеристики управления, а также коэффициенты усиления по току и мощности в этом случае уменьшаются.

Магнитные усилители с самонасыщением. Положительную обратную связь можно обеспечить и без специальной обмотки обратной связи. Для этого последовательно с каждой рабочей обмоткой 2 реактора включают полупроводниковые вентили 4 (рис. 240). При таком включении по рабочим обмоткам реакторов $L1$ и $L2$ протекает выпрямленный пульсирующий ток (в один полупериод — ток i_1 , в другой полупериод — ток i_2), постоянная составляющая которого обеспечивает дополнительное подмагничивание их сердечников 3. Следовательно в этом усилителе рабочие обмотки являются одновременно и подмагничивающими, т. е. имеет место внутренняя положительная обратная связь, при которой роль тока I_{oc} обратной связи выполняет постоянная составляющая тока нагрузки. Коэффициент усиления по мощности такого усилителя весьма высок, так как большая часть мощности, необходимой для подмагничивания сердечников, забирается из цепи переменного тока и ток I_y в обмотках управления 1 может быть существенно уменьшен.

В магнитном усилителе, показанном на рис. 241, а, в оба полупериода переменного питающего напряжения через рабочие обмотки реакторов $L1$ и $L2$ проходят попеременно пульсирующие токи i_1 и i_2 , вызывая переменное насыщение их сердечников. При этом к нагрузке R_n приложено переменное напряжение u_n и через нее проходит переменный ток i . В усилителе, показанном на рис. 241, б, через рабочие обмотки также проходят попеременно токи i_1 и i_2 , но через нагрузку R_n они проходят всегда в одном и том же направлении и к ней приложено постоянное напряжение U_n .

Магнитные усилители с самонасыщением используют в качестве регуляторов системы возбуждения генераторов на некоторых тепловозах. Если требуется регулировать электрические установки большой мощности, то применяют трехфазные магнитные усилители.

Трансформаторы постоянного тока и напряжения. С помощью магнитных усилителей можно создать трансформаторы постоянного тока и напряжения. Трансформатор постоянного тока представляет собой однофазный магнитный усилитель, состоящий из двух реакторов $L1$ и $L2$ (рис. 242, а), у которых рабочие обмотки 1 соединены последовательно. Обмотки подмагничивания также соединяют последо-

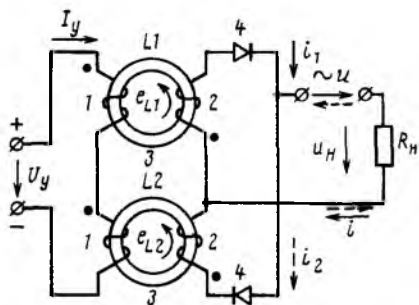


Рис. 240. Схема магнитного усилителя с самонасыщением

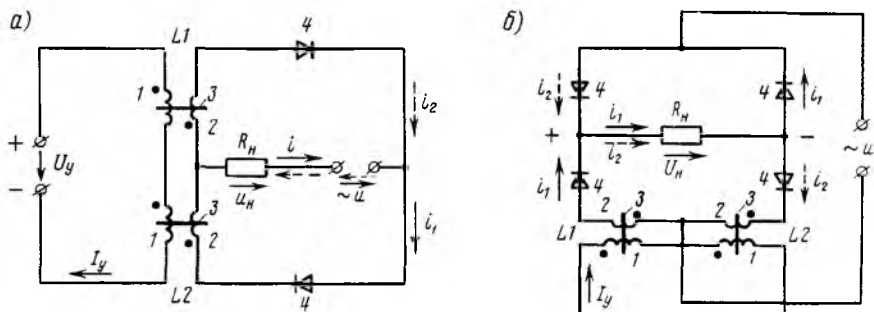


Рис. 241. Принципиальные схемы магнитных усилителей с самонасыщением с выходом на переменном (а) и постоянном (б) токе:

1 — обмотка управления; 2 — рабочая обмотка; 3 — сердечники; 4 — полупроводниковые вентили

вательно и встречно или их роль выполняет кабель 2, пропущенный через окна сердечников обоих реакторов. При изменении постоянного тока I_1 , проходящего по цепи подмагничивающей обмотки или по кабелю 2, изменяется насыщение сердечников, а следовательно, и переменный ток I_2 в цепи рабочих обмоток. При работе усилителя на прямолинейной части характеристики управления ток I_2 будет изменяться пропорционально току I_1 . С помощью выпрямителя 3 переменный ток I_2 можно преобразовать в постоянный I'_2 , который также будет пропорционален току I_1 .

Трансформатор постоянного напряжения (рис. 242, б) выполняется так же, как и трансформатор постоянного тока, но его подмагничивающие обмотки 2 подключают через добавочный резистор к двум точкам, между которыми действует напряжение U_1 постоянного тока. Рабочие обмотки 1 для повышения точности включают параллельно (в этом случае существенно снижаются

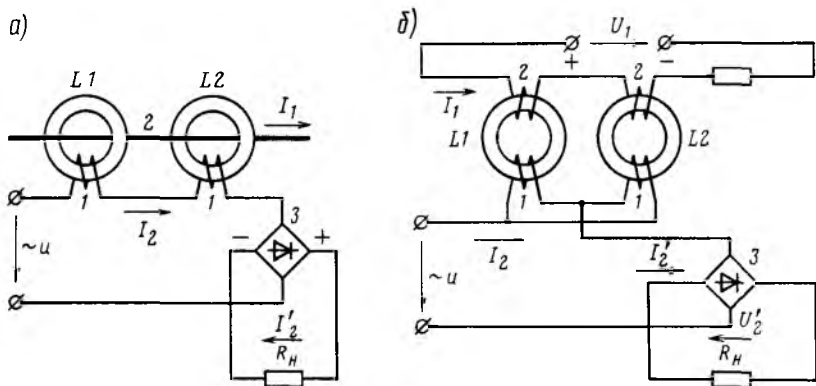


Рис. 242. Схемы трансформаторов постоянного тока (а) и постоянного напряжения (б)

э. д. с. четных гармоник, индуцируемых в обмотках 2). При изменении напряжения U_1 изменяется ток подмагничивания I_1 , а следовательно, и ток I_2 в цепи рабочих обмоток. При работе усилителя на линейной части характеристики токи I_2 , I_2 и выпрямленное напряжение U_2 будут пропорциональны напряжению U_1 .

§ 73. Стабилизаторы напряжения

В схемах стабилизации напряжения используют резисторы, полупроводниковые приборы или реакторы с линейной и нелинейной вольт-амперными характеристиками. Если включить линейный элемент, например реактор $L1$, последовательно с нагрузкой R_n , а нелинейный насыщающийся реактор $L2$ — параллельно ей (рис. 243), то при изменении входного напряжения $U_{вх}$ в некоторых пределах выходное напряжение $U_{вых}$ будет оставаться постоянным. Объясняется это тем что нелинейный реактор $L2$ работает в режиме насыщения и напряжение на его зажимах практически не изменяется при изменении проходящего по нему тока. Поэтому при изменении напряжения $U_{вх}$ происходит перераспределение напряжений между последовательно включенными реакторами $L1$ и $L2$ и весь прирост напряжения $U_{вх}$ приходится на линейный реактор $L1$.

Напряжение же на нелинейном реакторе, параллельно которому включена нагрузка R_n , будет стабилизированным в некоторых пределах, зависящих от вольт-амперной характеристики нелинейного реактора и пределов изменения напряжения $U_{вх}$. Такой стабилизатор напряжения называют *ферромагнитным*. Недостатками его являются низкий коэффициент мощности и значительные габаритные размеры стабилизатора.

Для уменьшения габаритных размеров стабилизатор выполняют с объединенной магнитной системой, а для повышения коэффициента мощности параллельно нелинейному реактору включают конденсатор C (рис. 244, а). Такой стабилизатор называют *ферро-резонансным*. Первичная обмотка 3 стабилизатора, на которую подается напряжение $U_{вх}$, расположена на участке 2 магнитопровода, по которому проходит магнитный поток Φ_2 . Этот участок имеет большое поперечное сечение, вследствие чего он находится в ненасыщенном состоянии. Вторичная обмотка 4, к которой подключается нагрузка R_n , расположена на участке 5 магнитопровода с малым поперечным сечением и, следовательно, находится в насыщенном состоянии. Поэтому при изменении напряжения $U_{вх}$ и магнитного потока Φ_2 магнитный поток Φ_3 и индуцируемая в обмотке 4 э. д. с. изменяются незначительно. Так же незначительно изменяется и выходное напряжение $U_{вых}$. При увеличении

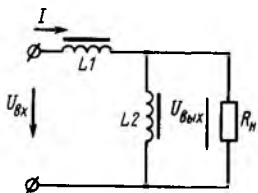


Рис. 243. Принципиальная схема стабилизатора напряжения на реакторах

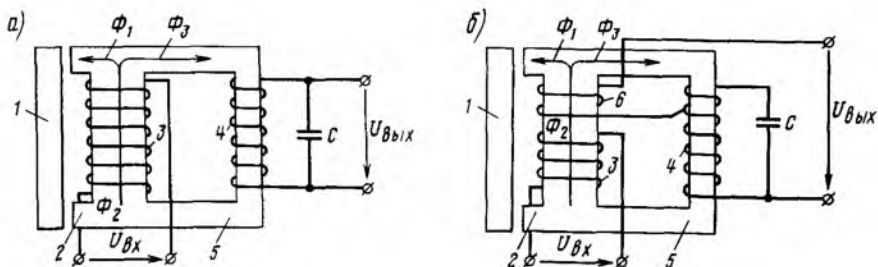


Рис. 244. Схемы феррорезонансного стабилизатора напряжения

потока Φ_2 та его часть, которая не может проходить по участку 5, замыкается в виде потока Φ_1 через магнитный шунт 1.

При подаче на обмотку 2 синусоидального напряжения $U_{вх}$ напряжение $U_{вых}$ будет несинусоидальным. Поток Φ_1 проходит через магнитный шунт только в те моменты времени, когда поток Φ_2 приближается к амплитудному значению и участок 5 переходит в режим насыщения. Чтобы повысить точность стабилизации напряжения, на части 2 магнитопровода стабилизатора размещают компенсационную обмотку 6 (рис. 244, б), включенную в цепь нагрузки последовательно с вторичной обмоткой 4, но так, чтобы индуцируемые в них э. д. с. были противоположны по фазе. В результате этого напряжение $U_{вых}$ определяется разностью э. д. с. во вторичной и компенсационной обмотках. При увеличении напряжения $U_{вх}$ и потока Φ_2 напряжение $U_{вых}$ поддерживается постоянным не только из-за малого изменения потока Φ_1 , как в стабилизаторе (см. рис. 244, а), а также благодаря возрастанию э. д. с. в компенсационной обмотке 6.

Промышленность выпускает феррорезонансные стабилизаторы напряжения мощностью от 100 Вт до 8 кВт. Эффективность стабилизации характеризуется коэффициентом стабилизации, показывающим, во сколько раз уменьшается относительное изменение выходного напряжения $\Delta U_{вых}/U_{вых}$ по сравнению с относительным изменением входного напряжения $\Delta U_{вх}/U_{вх}$.

Контрольные вопросы

1. Как устроен трансформатор и каков принцип его действия?
2. Какие известны режимы работы трансформатора?
3. Что называется внешней характеристикой трансформатора?
4. Что называется номинальной мощностью трансформатора и в каких единицах она измеряется?
5. Как подразделяются трансформаторы по конструктивным признакам и по способу охлаждения?
6. Когда применяют автотрансформатор и как он работает?
7. Из каких частей состоит трехфазный трансформатор и как соединяются его обмотки?
8. Как регулируют выходное напряжение трансформатора?
9. Как устроены реакторы и для каких целей они используются на локомотивах и электропоездах?
10. Как устроены и работают магнитные усилители?

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 74. Вращающееся магнитное поле

Электрические машины переменного тока подразделяются на два основных вида: асинхронные и синхронные. Принцип действия этих машин основан на использовании вращающегося магнитного поля.

Двухполюсное магнитное поле. В двухполюсной машине переменного тока вращающееся поле создается при питании трехфазным током трех катушек (фаз) *I*, *II*, *III*, оси которых сдвинуты одна относительно другой в пространстве на 120° (рис. 245, *a*). Эти катушки расположены на неподвижной части машины — статоре; их соединяют «звездой» или «треугольником» и подключают к сети трехфазного переменного тока.

Рассмотрим более подробно, как образуется вращающееся магнитное поле в двухполюсной машине. Для этого изобразим картины магнитных полей (рис. 246), которые создаются в различные моменты времени всеми тремя катушками *I*, *II* и *III* при прохождении по ним переменных токов i_1 , i_2 и i_3 . При этом условимся считать ток в любой катушке положительным, когда он направлен от начала к ее концу, и отрицательным, когда он направлен от конца к началу. Начала катушек обозначены на рис. 246 буквами *A*, *B*, *C*, а их концы — *X*, *Y* и *Z*; направления токов в сторонах катушки показаны точками и крестиками. Как видно из графика изменения токов в катушках (рис. 245, *b*), в момент времени, соответствующий $\omega t = 0$, $i_1 = 0$, i_2 отрицателен, i_3 положителен. Следовательно, по катушке *I* ток проходить не будет, в катушке *II* он будет направлен от конца *Y* к началу *B*, а в катушке *III* — от начала *C* к концу *Z*. Картина магнитного поля, образованного токами i_2 и i_3 (рис. 246, *a*), построена по правилу буравчика.

Если поместить внутри статора *I* с катушками постоянный магнит 2, то под действием магнитного поля, созданного катушками, он будет занимать горизонтальное положение. Направление результирующего поля внутри статора условно показано стрелкой.

Через $\frac{1}{6}$ периода ($\omega t = 60^\circ$) ток i_1 будет иметь некоторое положительное значение, ток i_2 будет еще отрицательным, а ток i_3 станет равным нулю. Следовательно, в катушке *I* ток будет направлен от начала *A* к концу *X*, в катушке *II* — от конца *Y* к началу *B*, а в катушке *III* тока нет. Направление результирующего магнит-

ного поля, созданного катушками, при этом изменится, и магнит 2 повернется на угол 60° (рис. 246, б). Еще через $\frac{1}{6}$ периода ($\omega t = 120^\circ$) ток i_1 будет все еще иметь положительное направление (см. рис. 245, б), ток i_2 станет равным нулю, а ток i_3 — отрицательным. При этом в катушке I ток будет направлен от начала A к концу X, в катушке II тока не будет, а в катушке III он будет направлен от конца Z к началу C. Созданное катушками магнитное поле снова изменит свое направление и магнит 2 опять повернется на угол 60° (рис. 246, в).

Продолжая рассматривать процесс прохождения токов i_1, i_2, i_3 по катушкам обмотки статора машины и определяя направление

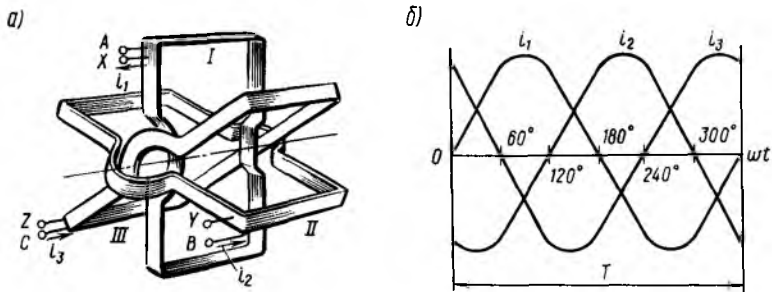


Рис. 245. Схема пространственного расположения катушек на статоре двухполюсного асинхронного двигателя (а) и график изменения в них тока (б)

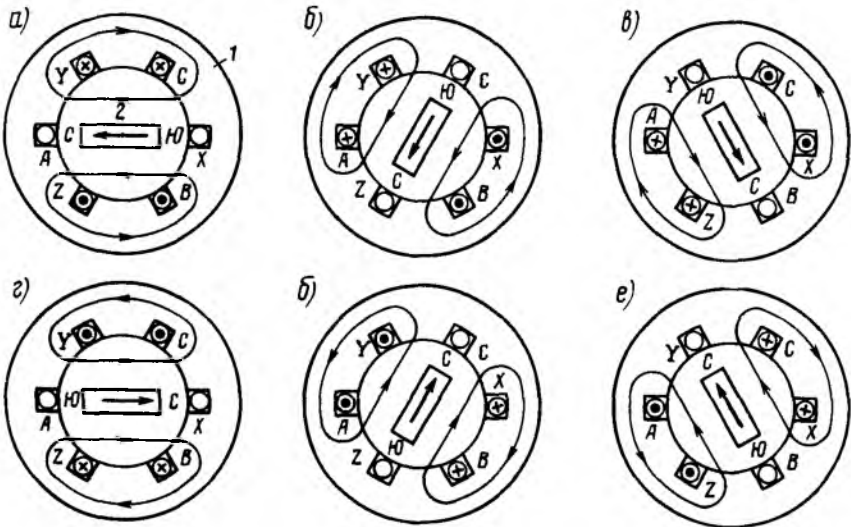


Рис. 246. Упрощенные картины магнитных полей, создаваемых токами i_1, i_2 и i_3 в фазах обмотки статора двухполюсного двигателя в различные моменты времени

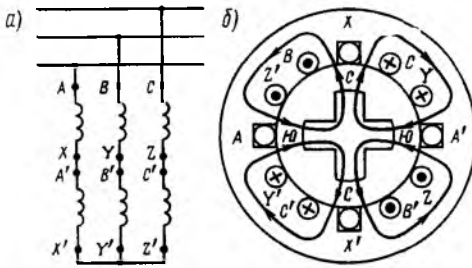


Рис. 247. Схема включения катушек обмотки статора четырехполюсного двигателя (а) и картина возникающего магнитного поля (б)

созданного им магнитного поля (рис. 246, *г, д, е*), можно легко доказать, что в течение одного периода изменения тока магнитный поток машины, а следовательно, и находящийся в ее поле магнит повернется на один оборот. Таким образом, при питании трехфазным током трех катушек, сдвинутых одна относительно другой на угол 120° , возникает магнитное поле, вращающееся в пространстве с постоянной частотой вращения $n_1 = 60f_1$ (здесь f_1 — частота изменения питающего напряжения), которую называют *синхронной*. Амплитуда результирующего потока, создаваемого всеми тремя катушками, в 1,5 раза больше максимального значения потока одной катушки. Полученное вращающееся поле имеет два полюса.

Магнитная индукция результирующего поля распределяется вдоль окружности статора и ротора по закону, близкому к синусоидальному. Это обеспечивается путем соответствующего выполнения обмотки статора: укладки проводников каждой фазы в нескольких рядом расположенных пазах, укорочения шага обмотки и скоса пазов.

Многополюсное магнитное поле. При размещении на статоре шести катушек $A-X$; $B-Y$; $C-Z$; $A'-X'$; $B'-Y'$ и $C'-Z'$, оси которых сдвинуты на угол 60° , и включении их, например, по схеме рис. 247, *а* возникает четырехполюсное вращающееся поле. Рис. 247, *б* иллюстрирует картину создаваемого катушками магнитного поля в момент времени $\omega t = 0$ (см. рис. 245, *б*). Четырехполюсный постоянный магнит в рассматриваемый момент времени устанавливается, как показано на рис. 247, *б*. Частота вращения четырехполюсного магнитного поля будет в 2 раза меньше, чем двухполюсного, так как за один период изменения тока оно поворачивается на угол, равный 180° *. В общем случае, когда каждая фаза асинхронного двигателя состоит из p катушек, оси которых сдвинуты друг от друга по окружности статора на угол $(360/p)^\circ$, а оси катушек разных фаз расположены под углами $(120/p)^\circ$, возникает $2p$ -полюсное поле, частота вращения которого

$$n_1 = 60f_1/p. \quad (80)$$

* Это можно легко показать путем построения картин магнитных полей, аналогичных представленным на рис. 246.

При $f=50$ Гц синхронная частота вращения n_1 для трехфазных машин с различным числом полюсов $2p$ будет равна:

$2p$	n_1 об/мин	$2p$	n_1 об/мин
2	3000	8	750
4	1500	10	600
6	1000	12	500

Вращающееся магнитное поле можно получить также с помощью двух обмоток, сдвинутых по окружности на 90° , если пропускать по ним токи, сдвинутые по фазе на четверть периода, т. е. на 90° (двухфазный ток). Такое вращающееся магнитное поле используют в двухфазных электродвигателях.

§ 75. Принцип действия асинхронного двигателя

Трехфазные асинхронные двигатели являются самыми распространенными электрическими двигателями и применяются для привода различных станков, насосов, вентиляторов, компрессоров, грузоподъемных механизмов, а также на э. п. с. переменного тока в качестве двигателей вспомогательных машин.

Асинхронный двигатель состоит из неподвижной части статора 1 (рис. 248, а), на котором расположены обмотка 2 статора, и вращающейся части — ротора 3 с обмоткой 4. Между ротором и статором имеется воздушный зазор, который для улучшения магнитной связи между обмотками делают по возможности малым. Обмотка 2 статора представляет собой трехфазную или в общем случае многофазную обмотку, катушки которой размещают равномерно вдоль окружности статора. Фазы этой обмотки А-Х, В-У и С-З размещены равномерно по окружности статора; они соединяются «звездой» (рис. 248, б) или «треугольником» и подключаются к сети трехфазного тока. Обмотку 4 размещают равно-

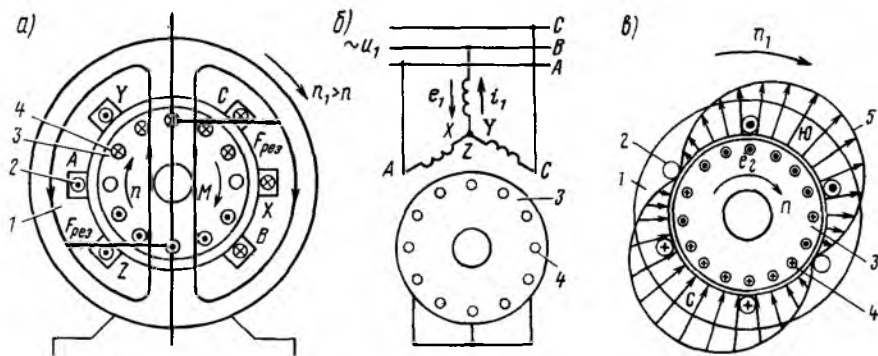


Рис. 248. Электромагнитная схема асинхронного двигателя (а), схема включения его обмоток (б) и пространственное распределение вращающегося магнитного поля (в) в двухполюсной машине

мерно вдоль окружности ротора. При работе двигателя она замкнута накоротко.

При подключении обмотки статора к сети создается синусоидально распределенное вращающееся магнитное поле \vec{b} (рис. 248, в). Оно индуцирует в обмотках статора и ротора э. д. с. e_1 и e_2 . Под действием э. д. с. e_2 по проводникам ротора будет проходить электрический ток i_2 . На рис. 248, а показано согласно правилу правой руки направление э. д. с. e_2 , индуцированной в проводниках ротора при вращении магнитного потока Φ , по часовой стрелке (при этом проводники ротора перемещаются относительно потока Φ против часовой стрелки). Если ротор неподвижен или частота его вращения n меньше синхронной частоты n_1 , активная составляющая тока ротора совпадает по фазе с индуцированной э. д. с. e_2 , при этом условные обозначения (крестики и точки) показывают одновременно и направление активной составляющей тока i_2 .

На проводники с током, расположенные в магнитном поле, действуют электромагнитные силы, направление которых определяется правилом левой руки. Суммарная сила $F_{\text{рез}}$, приложенная ко всем проводникам ротора, образует электромагнитный момент M , увлекающий ротор за вращающимся магнитным полем. Если этот момент достаточно велик, то ротор приходит во вращение и его установившаяся частота вращения соответствует равенству электромагнитного момента M тормозному, приложенному к валу от приводимого во вращение механизма и внутренних сил трения.

Э. д. с., индуцированная в проводниках обмотки ротора, зависит от частоты их пересечения вращающимся полем, т. е. от разности частот вращения магнитного поля n_1 и ротора n . Чем больше разность $n_1 - n$, тем больше э. д. с. e_2 . Следовательно, *необходимым условием для возникновения в асинхронной машине электромагнитного вращающего момента является неравенство частот вращения n_1 и n* . Только при этом условии в обмотке ротора индуцируется э. д. с. и возникает ток i_2 и электромагнитный момент M . По этой причине машина называется *асинхронной* (ротор ее вращается несинхронно с полем). Иногда ее называют индукционной ввиду того, что ток в роторе возникает индуктивным путем, а не подается от какого-либо внешнего источника.

Для характеристики отставания частоты вращения ротора двигателя от частоты вращения магнитного поля служит *скольжение*, его выражают в относительных единицах или процентах:

$$s = (n_1 - n) / n_1, \quad \text{или} \quad s = [(n_1 - n) / n_1] 100 \%. \quad (81)$$

Если, например, четырехполюсный двигатель имеет $s = 4 \%$, то частота вращения его ротора равна 1440 об/мин (частота вращения поля при частоте 50 Гц составляет 1500 об/мин, а отставание ротора от частоты поля равно 4% от 1500 об/мин, т. е. 60 об/мин). В двухполюсном двигателе при $s = 4 \%$ частота вращения ротора составляет 2880 об/мин ($3000 - 0,04 \times 3000 = 2880$).

Частота вращения ротора, выраженная через скольжение,

$$n = n_1 (1 - s). \quad (82)$$

По своей конструкции различают двигатели с фазным ротором (с контактными кольцами) и с короткозамкнутым ротором. Они имеют одинаковую конструкцию статора и отличаются выполнением ротора. Пусковые свойства этих двигателей различны.

§ 76. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

Двигатель с короткозамкнутым ротором (рис. 249 и 250) состоит из следующих основных частей: статор с трехфазной обмоткой, ротор с короткозамкнутой обмоткой и остов. Обмотка ротора выполнена бесконтактной (она не соединена ни с какой внешней цепью), что определяет высокую надежность такого двигателя.

Магнитная система. Асинхронная машина в отличие от машины постоянного тока не имеет явно выраженных полюсов. Такую магнитную систему называют *невянополюсной*. Число полюсов в машине определяется числом катушек в обмотке статора и схемой их соединения. В четырехполюсной машине (рис. 251) магнитная система состоит из четырех одинаковых ветвей, по каждой из которых проходит половина магнитного потока Φ_p одного полюса, в двухполюсной машине таких ветвей две, в шестиполюсной — шесть и т. д. Так как через все элементы магнитной системы проходит переменный магнитный поток, то не только ротор 1, но

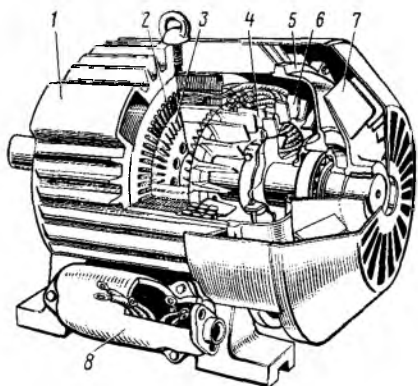


Рис. 249. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором:

1 — остов; 2 — статор; 3 — ротор; 4 — стержни обмотки ротора; 5 — подшипниковый щит; 6 — вентиляционные лопатки ротора; 7 — вентилятор; 8 — коробка выводов

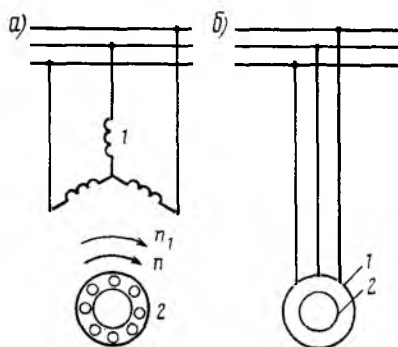


Рис. 250. Электрическая схема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (а) и его условное графическое изображение (б):

1 — статор; 2 — ротор

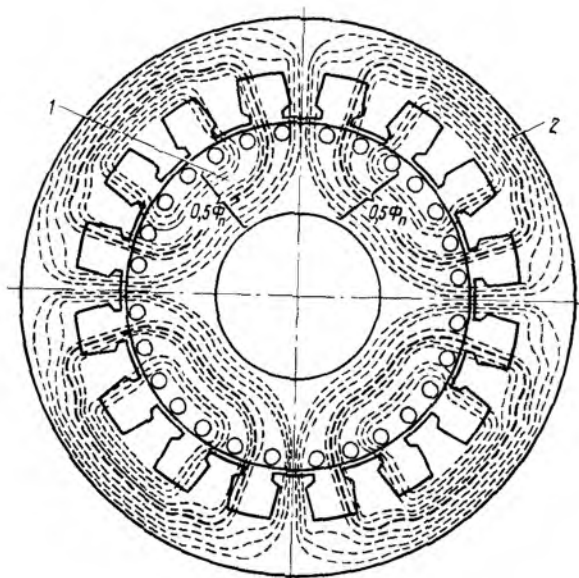


Рис. 251. Магнитное поле четырехполюсной асинхронной машины

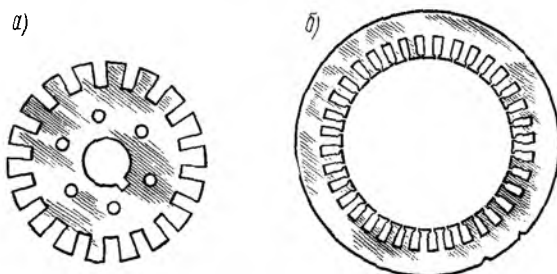


Рис. 252. Листы ротора (а) и статора (б)

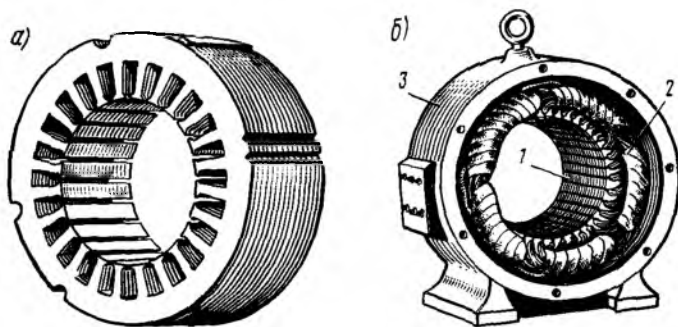


Рис. 253. Пакет собранного статора (а) и статор с обмоткой (б)

и статор 2 выполняют из листов электротехнической стали (рис. 252), изолированных один от другого изоляционной лаковой пленкой, окалиной и пр. В результате этого уменьшается вредное действие вихревых токов, возникающих в стали статора и ротора при вращении магнитного поля. Листы статора и ротора имеют пазы открытой, полузакрытой или закрытой формы, в которых располагаются проводники соответствующих обмоток. В статоре чаще всего применяют полузакрытые пазы прямоугольной или овальной формы, в машинах большой мощности — открытые пазы прямоугольной формы.

Сердечник статора 1 (рис. 253, а) запрессовывают в литой остов 3 и укрепляют стопорными винтами. Сердечник ротора напрессовывают на вал ротора, который вращается в шариковых подшипниках, установленных в двух подшипниковых щитах. Воздушный зазор между статором и ротором имеет минимальный размер, допускаемый с точки зрения точности сборки и механической жесткости конструкции. В двигателях малой и средней мощности воздушный зазор обычно составляет несколько десятых миллиметра. Такой зазор обеспечивает уменьшение магнитного сопротивления магнитной цепи машины, а следовательно, и уменьшение намагничивающего тока, требуемого для создания в двигателе магнитного потока. Снижение намагничивающего тока позволяет повысить коэффициент мощности двигателя.

Обмотка статора. Она выполнена в виде ряда катушек из проволоки круглого или прямоугольного сечения. Проводники, находящиеся в пазах, соединяются, образуя ряд катушек 2 (рис. 253, б). Катушки разбивают на одинаковые группы по числу фаз, которые располагают симметрично вдоль окружности статора (рис. 254, а) или ротора. В каждой такой группе все катушки электрически соединяются, образуя одну фазу обмотки, т. е. отдельную электрическую цепь. При больших значениях фазного тока или при необходимости переключения отдельных катушек фазы могут иметь несколько параллельных ветвей. Простейшим элементом обмотки является виток (рис. 254, б), состоящий из двух проводников 1 и 2, размещенных в пазах, находящихся друг от друга на неко-

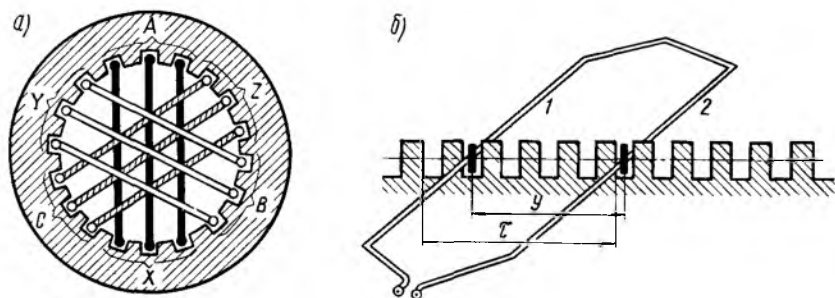


Рис. 254. Расположение катушек трехфазной обмотки на статоре асинхронного двигателя (а) и виток из двух проводников (б)

тором расстоянии y . Это расстояние приблизительно равно одному полюсному делению τ , под которым понимают длину дуги, соответствующую одному полюсу.

Обычно витки, образованные проводниками, лежащими в одних и тех же пазах, объединяют в одну или две катушки. Иногда их называют секциями. Их укладывают таким образом, что в каждом пазу размещается одна сторона катушки или две стороны — одна над другой. В соответствии с этим различают одно- и двухслойные обмотки. Основным параметром, определяющим распределение обмотки по пазам, является число пазов q на полюс и фазу.

В обмотке статора двухполюсного двигателя (см. рис. 254, а) каждая фаза ($A-X$; $B-Y$; $C-Z$) состоит из трех катушек, стороны которых расположены в трех смежных пазах, т. е. $q=3$. Обычно $q>1$, такая обмотка называется *распределенной*.

Наибольшее распространение получили двухслойные распределенные обмотки. Их секции 1 (рис. 255, а) укладывают в пазы 2 статора в два слоя. Проводники обмотки статора укрепляют в пазах текстолитовыми клиньями 5 (рис. 255, б), которые закладывают в угловых зубцов.

Стенки паза покрывают листовым изоляционным материалом 4 (электрокартоном, лакотканью и пр.). Проводники, лежащие в пазах, соединяют друг с другом соответствующим образом с торцовых сторон машины. Соединяющие их провода называют *лобовыми частями*. Так как лобовые части не принимают участия в индуцировании э. д. с., их выполняют как можно короче.

Отдельные катушки обмотки статора могут соединяться «звездой» или «треугольником». Начала и концы обмоток каждой фазы выводят к шести зажимам двигателя.

Обмотка ротора. Обмотка ротора выполнена в виде беличьей клетки (рис. 256, а). Она сделана из медных или алюминиевых стержней, замкнутых накоротко с торцов двумя кольцами (рис. 256, б). Стержни этой обмотки вставляют в пазы ротора без какой-либо изоляции, так как напряжение в короткозамкну-

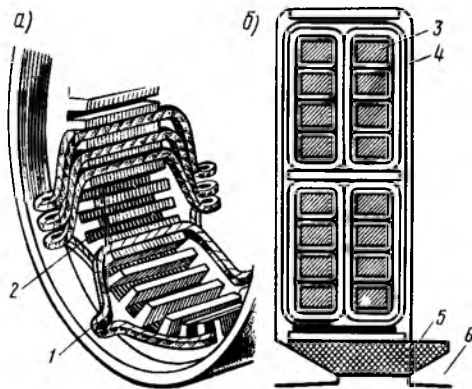


Рис. 255. Двухслойная обмотка статора асинхронного двигателя: 1 — секция; 2 — паз; 3 — проводник; 4 — изоляционный материал; 5 — клин; 6 — зубец

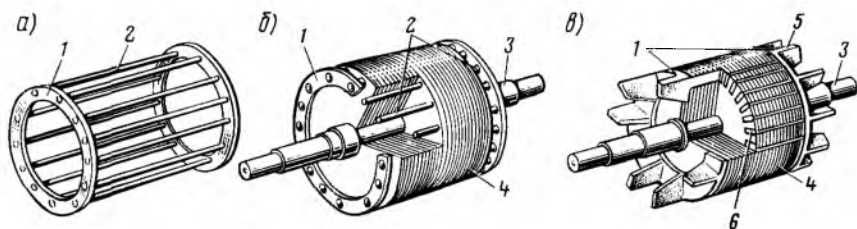


Рис. 256. Короткозамкнутый ротор:

а — беличья клетка; *б* — ротор с беличьей клеткой из стержней; *в* — ротор с литой беличьей клеткой; *1* — короткозамыкающие кольца; *2* — стержни; *3* — вал; *4* — сердечник ротора; *5* — вентиляционные лопасти; *6* — стержни литой клетки

той обмотке ротора равно нулю. Паза короткозамкнутого ротора обычно выполняют полузакрытыми, а в машинах малой мощности — закрытыми (паз имеет стальной ободок, отделяющий его от воздушного зазора). Такая форма паза позволяет хорошо укрепить проводники обмотки ротора, хотя и несколько увеличивает ее индуктивное сопротивление.

В двигателях мощностью до 100 кВт стержни беличьей клетки обычно получают путем заливки расплавленного алюминия в паза сердечника ротора (рис. 256, *в*). Вместе со стержнями беличьей клетки отливают и соединяющие их торцовые короткозамыкающие кольца.

Для этой цели пригоден алюминий, так как он обладает малой плотностью, достаточно высокой электропроводностью и легко плавится.

Обычно двигатели имеют вентиляторы, насаженные на вал ротора. Они осуществляют принудительную вентиляцию нагретых частей машины (обмоток и стали статора и ротора), позволяя получить от двигателя большую мощность. В двигателях с короткозамкнутым ротором лопасти вентилятора часто отливают совместно с боковыми кольцами беличьей клетки (см. рис. 256, *в*).

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором просты по конструкции, надежны в эксплуатации. Их широко применяют для привода металлообрабатывающих станков и других устройств, которые начинают работать без нагрузки. Однако сравнительно малый пусковой момент у этих двигателей и большой пусковой ток не позволяют использовать их для привода таких машин и механизмов, которые должны пускаться в ход сразу под большой нагрузкой (с большим пусковым моментом). К таким машинам относятся грузоподъемные устройства, компрессоры и др.

Увеличить пусковой момент и уменьшить пусковой ток можно при выполнении беличьей клетки с повышенным активным сопротивлением. При этом двигатель будет иметь увеличенное скольжение и большие потери мощности в обмотке ротора. Такие двигатели называют двигателями с повышенным скольжением (обозначаются АС). Их можно использовать для привода машин, работающих сравнительно небольшое время. На э. п. с. переменного

тока эти двигатели (со скольжением до 10 %) применяют для привода компрессоров, которые работают периодически в течение коротких промежутков времени при уменьшении давления в воздушных резервуарах ниже определенного предела.

Двигатели с повышенным пусковым моментом. Короткозамкнутые асинхронные двигатели с повышенным пусковым моментом имеют специальную конструкцию ротора (обозначаются АП). К ним относятся двигатели с двойной беличьей клеткой и двигатели с глубокими пазами.

Ротор 3 (рис. 257, а) двигателя с двойной беличьей клеткой имеет две короткозамкнутые обмотки. Наружная клетка 1 является пусковой. Она обладает большим активным и малым реактивным сопротивлениями. Внутренняя клетка 2 является основной обмоткой ротора; она, наоборот, обладает незначительным активным и большим реактивным сопротивлениями. В начальный момент пуска ток проходит, главным образом, по наружной клетке, которая создает значительный вращающий момент. По мере увеличения частоты вращения ток переходит во внутреннюю клетку, и по окончании процесса пуска машина работает как обычный короткозамкнутый двигатель с одной (внутренней) клеткой. Вытеснение тока в наружную клетку в начальный момент пуска объясняется действием э. д. с. самоиндукции, индуцируемой в проводниках ротора. Чем ниже расположен в пазу проводник, тем большим магнитным потоком рассеяния δ он охватывается и тем большая э. д. с. самоиндукции в нем индуцируется (рис. 257, в), следовательно, тем большее он будет иметь индуктивное сопротивление.

Вытеснение тока в верхние проводники ротора сильно сказывается при неподвижном роторе, когда частота тока, индуцируемого в обеих клетках ротора, велика. При этом индуктивные

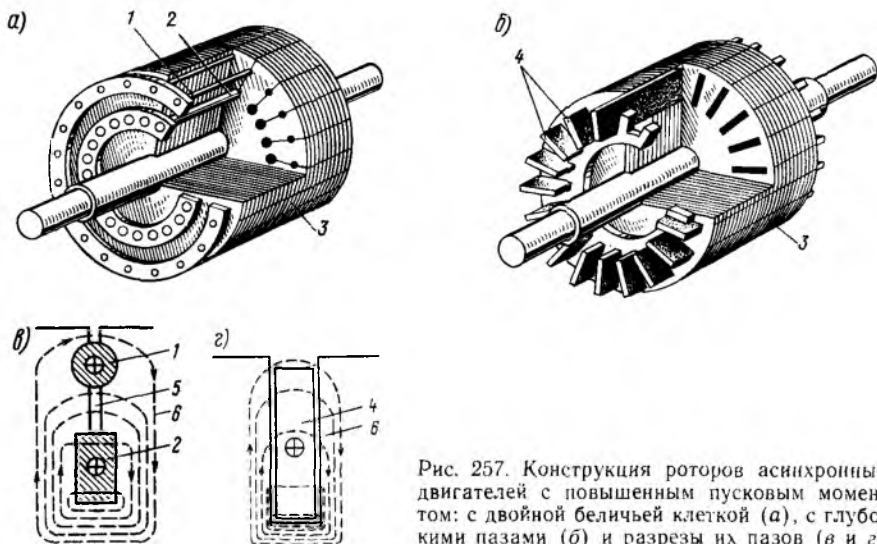


Рис. 257. Конструкция роторов асинхронных двигателей с повышенным пусковым моментом: с двойной беличьей клеткой (а), с глубокими пазами (б) и разрезы их пазов (в и з)

сопротивления обеих клеток значительно больше активных и ток распределяется между ними обратно пропорционально их индуктивным сопротивлениям, т. е. проходит в основном по наружной клетке с большим активным сопротивлением. По мере возрастания частоты вращения ротора частота тока в нем будет уменьшаться (вращающееся магнитное поле будет пересекать проводники ротора с меньшей частотой), и ток начнет проходить по обеим клеткам в соответствии с их активными сопротивлениями, т. е., главным образом, через внутреннюю клетку.

Таким образом, процесс пуска двигателя с двойной беличьей клеткой имеет сходство с процессом пуска асинхронного двигателя с фазным ротором, когда в начале пуска в цепь обмотки ротора вводится добавочное активное сопротивление (пусковой реостат), а по мере разгона это сопротивление выводится. Точно так же и в рассматриваемом двигателе ток в начале пуска проходит по наружной клетке с большим активным сопротивлением, а затем по мере разгона постепенно переходит во внутреннюю клетку с малым активным сопротивлением.

Для повышения активного сопротивления пусковой клетки стержни ее изготавливают из маргацовистой латуни или бронзы. Стержни рабочей клетки выполняют из меди, обладающей малым удельным сопротивлением, причем площадь поперечного сечения их больше, чем у пусковой клетки. В результате этого активное сопротивление пусковой клетки увеличивается в 4—5 раз по сравнению с рабочей. Между стержнями обеих клеток имеется узкая щель 5, размеры которой определяют индуктивность рабочей клетки. Двухклеточный двигатель на 20—30 % дороже короткозамкнутого двигателя обычной конструкции. Для упрощения технологии изготовления ротора двухклеточные двигатели небольшой и средней мощности выполняют с литой алюминиевой клеткой.

Действие двигателей с глубокими пазами (рис. 257, б) также основано на использовании явления вытеснения тока. В этих двигателях стержни 4 беличьей клетки выполнены в виде узких медных шин, заложенных в глубокие пазы ротора 3 (высота паза в 10—12 раз больше его ширины). Нижние слои стержней, расположенные дальше от поверхности ротора, охватываются значительно большим числом магнитных линий потока рассеяния б, чем верхние (рис. 257, г), поэтому они имеют во много раз большую индуктивность. В начале пуска в результате увеличенного индуктивного сопротивления нижних частей стержней ток проходит, главным образом, по их верхним частям. При этом используется только небольшая часть поперечного сечения каждого стержня, что приводит к увеличению его активного сопротивления, а следовательно, и к возрастанию активного сопротивления всей обмотки ротора.

При увеличении частоты вращения ротора вытеснение тока в верхние части стержней уменьшается (по той же причине, что и в двигателе с двойной беличьей клеткой), и после окончания пуска ток равномерно распределяется по площади их поперечного сечения.

§ 77. Асинхронный двигатель с фазным ротором

Асинхронные двигатели с фазным ротором (рис. 258 и 259) применяют для привода таких машин и механизмов, которые пускаются в ход под нагрузкой (краны, лифты и пр.). В подобных приводах двигатель должен развивать при пуске максимальный момент, что достигается с помощью пускового реостата (см. § 80).

В двигателе с фазным ротором статор выполнен так же, как и в двигателе с короткозамкнутым ротором. На роторе же расположена трехфазная обмотка, состоящая из трех, шести, девяти и т. д. катушек (в зависимости от числа полюсов машины), сдвинутых одна относительно другой на 120° (в двухполюсной машине), 60° (в четырехполюсной) и т. д. Числа полюсов обмоток статора и ротора берутся одинаковыми.

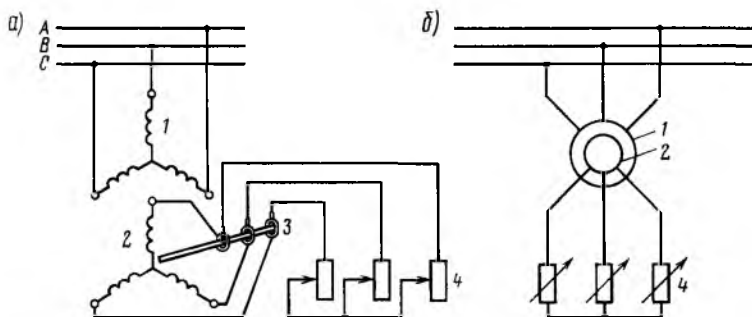


Рис. 258. Электрическая схема асинхронного двигателя с фазным ротором (а) и его условное графическое изображение (б):

1 — статор; 2 — ротор; 3 — контактные кольца со щетками; 4 — пусковой реостат

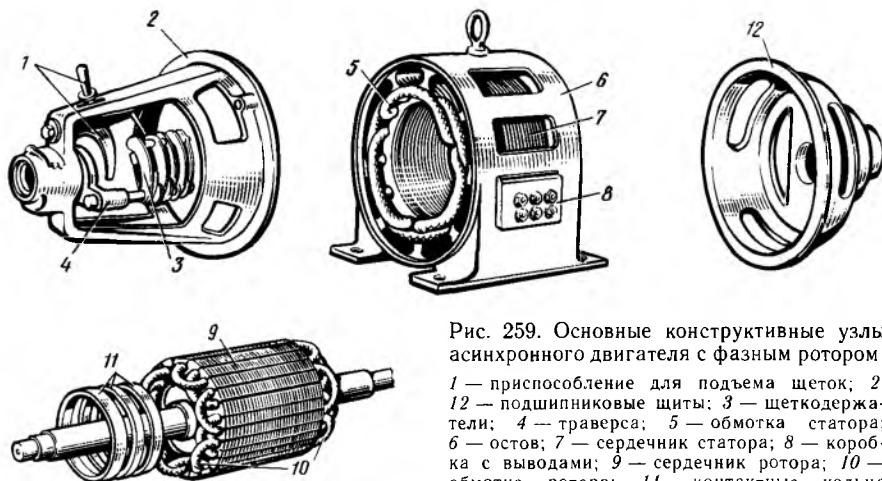


Рис. 259. Основные конструктивные узлы асинхронного двигателя с фазным ротором:

1 — приспособление для подъема щеток; 2, 12 — подшипниковые щиты; 3 — щеткодержатели; 4 — траверса; 5 — обмотка статора; 6 — остов; 7 — сердечник статора; 8 — коробка с выводами; 9 — сердечник ротора; 10 — обмотка ротора; 11 — контактные кольца

Обмотку фазного ротора обычно соединяют «звездой». Концы ее присоединяют к трем контактным кольцам, к которым посредством щеток подключают трехфазный пусковой реостат, т. е. в каждую фазу ротора в момент пуска вводят дополнительное активное сопротивление.

Для уменьшения износа контактных колец и щеток двигателя с фазным ротором иногда снабжают приспособлениями *I* (см. рис. 259) для подъема щеток и замыкания колец накоротко после выключения реостата.

§ 78. Режимы работы асинхронных двигателей

Холостой ход. Если пренебречь трением и магнитными потерями в стали (идеализированная машина), то ротор асинхронного двигателя при холостом ходе вращался бы с синхронной частотой $n = n_1$ в ту же сторону, что и поле статора; следовательно, скольжение было бы равно нулю. Однако в реальной машине частота вращения ротора n при холостом ходе никогда не может стать равной частоте вращения n_1 , так как в этом случае магнитное поле перестанет пересекать проводники обмотки ротора и в них не возникнет электрический ток. Поэтому двигатель в этом режиме не может развить вращающего момента и ротор его под влиянием противодействующего момента сил трения начнет замедляться. Замедление ротора будет происходить до тех пор, пока вращающий момент, возникший при уменьшенной частоте вращения, не станет равным моменту, создаваемому силами трения. Обычно при холостом ходе двигатель работает со скольжением $s = 0,2 \div 0,5 \%$.

При холостом ходе в асинхронном двигателе имеют место те же электромагнитные процессы, что и в трансформаторе (обмотка статора аналогична первичной обмотке трансформатора, а обмотка ротора — вторичной обмотке). По обмотке статора проходит ток холостого хода I_0 , однако его значение в асинхронном двигателе из-за наличия воздушного зазора между ротором и статором значительно больше, чем в трансформаторе (20—40 % номинального тока по сравнению с 3—10 % у трансформатора). Для уменьшения тока I_0 в асинхронных двигателях стремятся выполнить минимально возможные по соображениям конструкции и технологии зазоры. Например, у двигателя мощностью 5 кВт зазор между статором и ротором обычно равен 0,2—0,3 мм. Ток холостого хода, так же как и в трансформаторе, имеет реактивную и активную составляющие. Реактивная составляющая тока холостого хода (намагничивающий ток) обеспечивает создание в двигателе требуемого магнитного потока, а активная составляющая — передачу в обмотку статора из сети энергии, необходимой для компенсации потерь мощности в машине в этом режиме.

Нагрузочный режим. Чем больше нагрузочный момент на валу, тем больше скольжение и тем меньше частота вращения ротора. Увеличение скольжения при возрастании момента объясняется

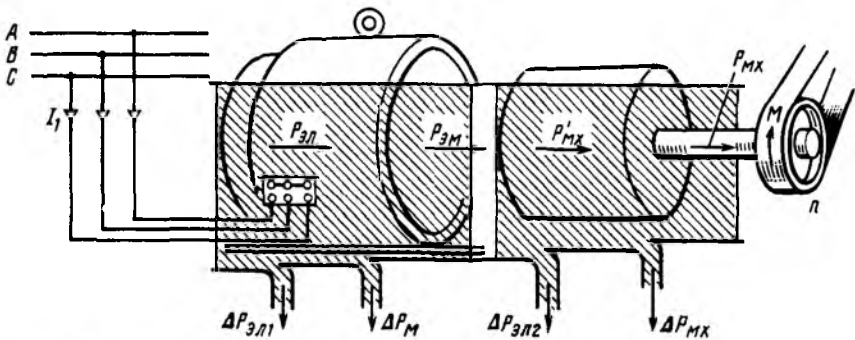


Рис. 260. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

следующим образом. При увеличении нагрузки на валу ротора он начинает тормозиться и частота его вращения n уменьшается. Но одновременно увеличивается частота $n_1 - n$ пересечения вращающимся полем проводников обмотки ротора, а следовательно, э. д. с. E_2 , индуцированная в этой обмотке, ток в роторе I_2 и образованный им электромагнитный вращающий момент M . Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока электромагнитный момент двигателя M не сравняется с нагрузочным моментом $M_{\text{вн}}$. При достижении равенства моментов $M = M_{\text{вн}}$ торможение прекратится и двигатель будет снова вращаться с постоянной частотой вращения, но меньшей, чем до увеличения нагрузки. При уменьшении нагрузочного момента $M_{\text{вн}}$ частота вращения ротора по той же причине будет увеличиваться. Обычно при номинальной нагрузке скольжение для двигателей средней и большой мощности составляет 2—4 %, а для двигателей малой мощности от 5 до 7,5 %.

При работе двигателя под нагрузкой по обмоткам его статора и ротора проходят токи i_1 и i_2 . Частота тока в обмотках статора f_1 и ротора f_2 определяется частотой пересечения вращающимся магнитным полем проводников соответствующей обмотки. Обмотка статора пересекается магнитным полем с частотой n_1 , а обмотка вращающегося ротора — с частотой $n_1 - n$. Следовательно,

$$\boxed{f_2/f_1 = (n_1 - n)/n_1 = s} \quad \text{или} \quad \boxed{f_2 = f_1 s}. \quad (83)$$

Передача электрической энергии из статора в ротор происходит так же, как и в трансформаторе. Двигатель потребляет из сети электрическую мощность $P_{\text{эл}} = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1$ и отдает приводимому им во вращение механизму механическую мощность $P_{\text{мх}}$ (рис. 260). В процессе преобразования энергии в машине имеют место потери мощности: электрические в обмотках статора $\Delta P_{\text{эл1}}$ и ротора $\Delta P_{\text{эл2}}$, магнитные $\Delta P_{\text{м}}$ от гистерезиса и вихревых токов в ферромагнитных частях машины и механические $\Delta P_{\text{мх}}$ от трения в подшипниках и вращающихся частях о воздух. Из статора в ротор вращающимся электромагнитным полем передается электромагнитная

мощность $P_{эв}$. В роторе она превращается в механическую мощность ротора $P'_{мх}$. Полезная механическая мощность на валу двигателя $P_{мх}$ меньше мощности $P'_{мх}$ на значение потерь мощности на трение $\Delta P_{мх}$.

При возрастании механической нагрузки на валу двигателя увеличивается ток I_2 . В соответствии с этим возрастает и ток I_1 в обмотке статора.

Электромагнитный момент M создается в асинхронном двигателе в результате взаимодействия вращающегося магнитного поля с током I_2 , индуцируемым им в проводниках обмотки статора. Однако в создании его участвует не весь ток I_2 , а только его активная составляющая $I_2 \cos \psi_2$ (здесь ψ_2 — угол сдвига фаз между током I_2 и э. д. с. E_2 в обмотке ротора). Поэтому

$$M = c_m \Phi_m I_2 \cos \psi_2, \quad (84)$$

где Φ_m — амплитуда магнитного потока, созданного обмоткой статора; c_m — постоянная, определяемая конструктивными параметрами данной машины и не зависящая от режима ее работы.

Поясним физический смысл формулы (84). На рис. 261 изображен ротор двухполюсного асинхронного двигателя в развернутом виде, на котором кружками показаны поперечные сечения проводников. Крестики и точки внутри проводников обозначают направление в них тока i_2 , а под проводниками — направление индуцированных э. д. с. e_2 , которые пропорциональны индукции B в данной точке воздушного зазора между статором и ротором. Кривая B показывает распределение вдоль окружности ротора индукции, создаваемой вращающимся магнитным полем, кривая i_2 — распределение тока в проводниках, а кривая f — распределение электромагнитных сил, возникающих в результате взаимодействия тока i_2 с вращающимся магнитным полем. Электромагнитный вращающий момент M , создаваемый в результате совместного действия всех сил f , будет пропорционален среднему значению электромагнитной силы $f_{ср}$. Легко заметить, что к проводникам, лежащим на дуге, равной $180^\circ - \psi_2$, приложены силы f , увлекающие ротор за вращающимся магнитным полем, а на дуге ψ_2 — тормозящие силы. Поэтому при неизменном токе I_2 среднее значение электромагнитной силы $f_{ср}$, а следовательно, и электромагнитный момент M будут тем больше, чем меньше угол ψ_2 . Электромагнитный момент M зависит от скольжения s .

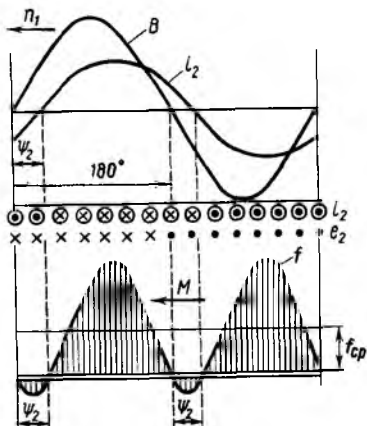


Рис. 261. Распределение индукции B , тока i_2 и электромагнитных сил f , действующих на проводники асинхронного двигателя

Так, при увеличении скольжения возрастает э. д. с. E_2 в обмотке ротора и ток I_2 . Однако одновременно уменьшается $\cos \psi_2$, так как активное сопротивление обмотки ротора R_2 остается неизменным, а реактивное X_2 увеличивается (возрастает частота тока f_2 в обмотке ротора).

При $s < 10 \div 20 \%$ увеличение скольжения приводит к незначительному уменьшению $\cos \psi_2$, вследствие чего активная составляющая тока в обмотке ротора $I_2 \cos \psi_2$ и электромагнитный момент M возрастают.

При некотором *критическом* скольжении $s_{кр}$ двигатель развивает наибольший момент M_{\max} , который определяет его перегрузочную способность. При дальнейшем увеличении скольжения (большем $s_{кр}$) происходит резкое уменьшение $\cos \psi_2$, поэтому активная составляющая тока $I_2 \cos \psi_2$ и электромагнитный момент M уменьшаются.

Номинальный вращающий момент $M_{ном}$ двигателя средней и большой мощности развивают при скольжении $s_{ном} = 2 \div 4 \%$.

Согласно государственным стандартам на асинхронные двигатели отношение $M_{\max}/M_{ном} = 1,8 \div 2,5$. Критическое скольжение $s_{кр}$ для мощных двигателей составляет 5—10 %, для двигателей средней и малой мощности — от 10 до 20 %.

Асинхронный двигатель, как и любая электрическая машина, может работать в генераторном режиме, создавая тормозной момент. Этот режим используется для электрического торможения приводов.

Режим пуска. В начальный момент пуска ротор двигателя неподвижен: скольжение $s = 1$, магнитное поле пересекает ротор с максимальной частотой, индуцируя в нем наибольшую э. д. с. E_2 . Так как ток в роторе I_2 определяется значением э. д. с. E_2 , то в начальный момент пуска он будет наибольшим. Наибольшим будет и ток в статоре. Обычно пусковой ток двигателя в 5—7 раз больше номинального. Вращающий момент $M_{п}$ при пуске называется *пусковым*. Он обычно меньше наибольшего момента, который может развить двигатель. Для двигателей различных типов и мощностей отношение $M_{п}/M_{ном} = 0,7 \div 1,8$.

§ 79. Характеристики асинхронных двигателей

Для правильной эксплуатации асинхронного двигателя необходимо знать его характеристики: механическую и рабочие.

Механическая характеристика. Зависимость частоты вращения ротора от нагрузки (вращающегося момента на валу) называется механической характеристикой асинхронного двигателя (рис. 262, а). При номинальной нагрузке частота вращения для различных двигателей обычно составляет 98—92,5 % частоты вращения n_1 (скольжение $s_{ном} = 2 \div 7,5 \%$). Чем больше нагрузка, т. е. вращающий момент, который должен развивать двигатель, тем меньше частота вращения ротора. Как показывает кривая

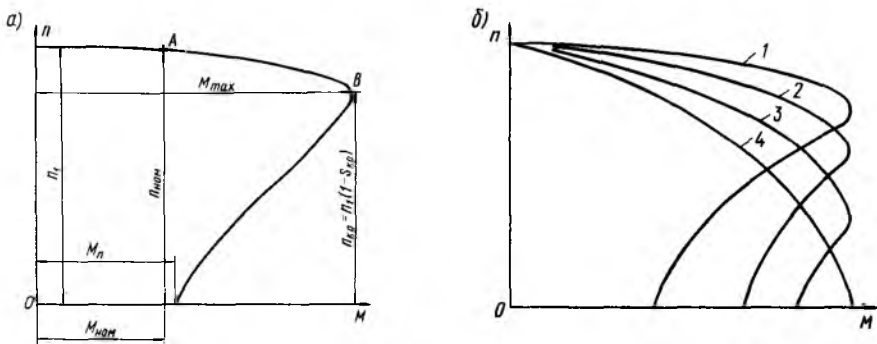


Рис. 262. Механические характеристики асинхронного двигателя: а — естественная; б — при включении пускового реостата

на рис. 262, а, частота вращения асинхронного двигателя лишь незначительно снижается при увеличении нагрузки в диапазоне от нуля до наибольшего ее значения. Поэтому говорят, что такой двигатель обладает жесткой механической характеристикой.

Наибольший вращающий момент M_{\max} двигатель развивает при некотором скольжении $s_{\text{кр}}$, составляющем 10—20%. Отношение $M_{\max}/M_{\text{ном}}$ определяет перегрузочную способность двигателя, а отношение $M_n/M_{\text{ном}}$ — его пусковые свойства.

Двигатель может устойчиво работать только при обеспечении саморегулирования, т. е. автоматическом установлении равновесия между приложенным к валу моментом нагрузки $M_{\text{вн}}$ и моментом M , развиваемым двигателем. Этому условию соответствует верхняя часть характеристики до достижения M_{\max} (до точки В). Если нагрузочный момент $M_{\text{вн}}$ превысит момент M_{\max} , то двигатель теряет устойчивость и останавливается, при этом по обмоткам машины будет длительно проходить ток в 5—7 раз больше номинального, и они могут сгореть.

При включении в цепь обмоток ротора пускового реостата получаем семейство механических характеристик (рис. 262, б). Характеристика 1 при работе двигателя без пускового реостата называется *естественной*. Характеристики 2, 3 и 4, получаемые при подключении к обмотке ротора двигателя реостата с сопротивлениями $R_{1п}$ (кривая 2), $R_{2п}$ (кривая 3) и $R_{3п}$ (кривая 4), называют *реостатными механическими характеристиками*. При включении пускового реостата механическая характеристика становится более мягкой (более крутопадающей), так как увеличивается активное сопротивление цепи ротора R_2 и возрастает $s_{\text{кр}}$. При этом уменьшается пусковой ток. Пусковой момент M_n также зависит от R_2 . Можно так подобрать сопротивление реостата, чтобы пусковой момент M_n был равен наибольшему M_{\max} .

В двигателе с повышенным пусковым моментом естественная механическая характеристика приближается по своей форме к характеристике двигателя с включенным пусковым реостатом. Вра-

шающий момент двигателя с двойной беличьей клеткой равен сумме двух моментов, создаваемых рабочей и пусковой клетками. Поэтому характеристику I (рис. 263) можно получить путем суммирования характеристик 2 и 3 , создаваемых этими клетками. Пусковой момент M_n такого двигателя значительно больше, чем момент M'_n обычного короткозамкнутого двигателя. Механическая характеристика двигателя с глубокими пазами такая же, как и у двигателя с двойной беличьей клеткой.

Рабочие характеристики. Рабочими характеристиками асинхронного двигателя называются зависимости частоты вращения n (или скольжения s), момента на валу M_2 , тока статора I_1 , коэффициента полезного действия η и $\cos \varphi_1$ от полезной мощности $P_2 = P_{\text{вх}}$ при номинальных значениях напряжения U_1 и частоты f_1 (рис. 264). Они строятся только для зоны практической устойчивой работы двигателя, т. е. от скольжения, равного нулю, до скольжения, превышающего номинальное на 10—20%. Частота вращения n с ростом отдаваемой мощности P_2 изменяется мало, так же как и в механической характеристике; вращающий момент на валу M_2 пропорционален мощности P_2 , он меньше электромагнитного момента M на значение тормозящего момента $M_{\text{тр}}$, создаваемого силами трения.

Ток статора I_1 возрастает с увеличением отдаваемой мощности, но при $P_2=0$ имеется некоторый ток холостого хода I_0 . К. п. д. изменяется примерно так же, как и в трансформаторе, сохраняя достаточно большое значение в сравнительно широком диапазоне нагрузки.

Наибольшее значение к. п. д. для асинхронных двигателей средней и большой мощности составляет 0,75—0,95 (машины большой мощности имеют соответственно больший к. п. д.). Коэффициент мощности $\cos \varphi_1$ асинхронных двигателей средней и большой мощности при полной нагрузке равен 0,7—0,9. Следовательно, они загружают электрические станции и сети значительными реактивными токами (от 70 до 40% номинального тока), что является существенным недостатком этих двигателей.

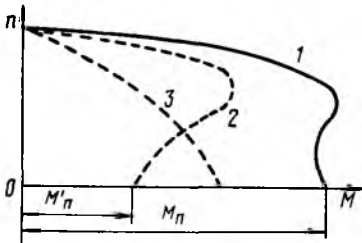


Рис. 263. Механическая характеристика асинхронного двигателя с повышенным пусковым моментом (с двойной беличьей клеткой)

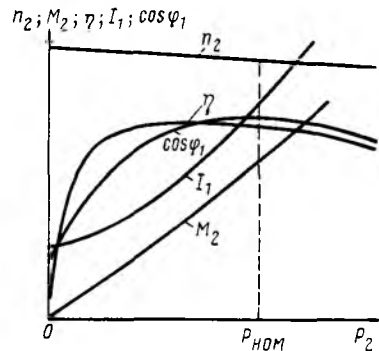


Рис. 264. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

При нагрузках 25—50 % номинальной, которые часто встречаются при эксплуатации различных механизмов, коэффициент мощности уменьшается до неудовлетворительных с энергетической точки зрения значений (0,5—0,75).

При снятии нагрузки с двигателя коэффициент мощности уменьшается до значений 0,25—0,3, поэтому *нельзя допускать работу асинхронных двигателей при холостом ходе и значительных недозагрузках.*

Работа при пониженном напряжении и обрыве одной из фаз. Понижение напряжения сети не оказывает существенного влияния на частоту вращения ротора асинхронного двигателя. Однако в этом случае сильно уменьшается наибольший вращающий момент, который может развить асинхронный двигатель (при понижении напряжения на 30 % он уменьшается примерно в 2 раза). Поэтому при значительном падении напряжения двигатель может остановиться, а при низком напряжении — не включиться в работу.

На э. п. с. переменного тока при уменьшении напряжения в контактной сети соответственно уменьшается и напряжение в трехфазной сети, от которой питаются асинхронные двигатели, приводящие во вращение вспомогательные машины (вентиляторы, компрессоры, насосы). Для того чтобы обеспечить нормальную работу асинхронных двигателей при пониженном напряжении (они должны нормально работать при уменьшении напряжения до $0,75U_{ном}$), мощность всех двигателей вспомогательных машин на э. п. с. берется примерно в 1,5—1,6 раза большей, чем это необходимо для привода их при номинальном напряжении. Такой запас по мощности необходим также из-за некоторой несимметрии фазных напряжений, так как на э. п. с. асинхронные двигатели питаются не от трехфазного генератора, а от расщепителя фаз. При несимметрии напряжений фазные токи двигателя будут неодинаковы и сдвиг между ними по фазе не будет равен 120° . В результате по одной из фаз будет протекать больший ток, вызывающий увеличенный нагрев обмоток данной фазы. Это заставляет ограничивать нагрузку двигателя по сравнению с работой его при симметричном напряжении. Кроме того, при несимметрии напряжений возникает не круговое, а эллиптическое вращающееся магнитное поле и несколько изменяется форма механической характеристики двигателя. При этом уменьшаются его наибольший и пусковой моменты. Несимметрию напряжений характеризуют коэффициентом несимметрии, который равен среднему относительному (в процентах) отклонению напряжений в отдельных фазах от среднего (симметричного) напряжения. Систему трехфазных напряжений принято считать практически симметричной, если этот коэффициент меньше 5 %.

При обрыве одной из фаз двигатель продолжает работать, но по неповрежденным фазам будут протекать повышенные токи, вызывающие увеличенный нагрев обмоток; такой режим не должен допускаться. Пуск двигателя с оборванной фазой

невозможен, так как при этом не создается вращающееся магнитное поле, вследствие чего ротор двигателя не будет вращаться.

Использование асинхронных двигателей для привода вспомогательных машин э. п. с. обеспечивает значительные преимущества по сравнению с двигателями постоянного тока. При уменьшении напряжения в контактной сети частота вращения асинхронных двигателей, а следовательно, и подача компрессоров, вентиляторов, насосов практически не изменяются. В двигателях же постоянного тока частота вращения пропорциональна питающему напряжению, поэтому подача этих машин существенно уменьшается.

§ 80. Пуск в ход асинхронных двигателей

При пуске двигателя в ход должны по возможности удовлетворяться следующие основные требования: процесс пуска должен быть простым и осуществляться без сложных пусковых устройств, пусковой момент должен быть достаточно большим, а пусковые токи — по возможности малыми. Иногда к этим требованиям добавляются и другие, обусловленные особенностями конкретных приводов, в которых используются двигатели: необходимость плавного пуска, наибольшего пускового момента и пр. Практически используются следующие способы пуска: непосредственное подключение обмотки статора к сети (прямой пуск); понижение напряжения, подводимого к обмотке статора при пуске; подключение к обмотке ротора пускового реостата.

Прямой пуск применяется для пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Двигатели этого типа малой и средней мощности обычно проектируют так, чтобы при непосредственном подключении обмотки статора к сети возникающие пусковые токи не создавали чрезмерных электродинамических усилий и превышений температуры, опасных с точки зрения механической и термической прочности основных элементов машины. Однако при прямом пуске двигателей большой мощности, особенно при подключении их к недостаточно мощным электрическим сетям, могут возникать чрезмерно большие падения напряжения (свыше 10—15%). В этом случае прямой пуск для двигателей с короткозамкнутым ротором не применяют и пускают их при пониженном напряжении.

Прямой пуск асинхронного двигателя широко применяют в технике. Недостатками его являются большой пусковой ток и сравнительно небольшой пусковой момент.

Пуск при пониженном напряжении применяется для пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором большой мощности, а также для двигателей средней мощности при недостаточно мощных электрических сетях. Понижение напряжения осуществляется следующими способами:

переключением обмотки статора при пуске с рабочей схемы «треугольник» на пусковую схему «звезда». В этом случае фазное напряжение, подаваемое на обмотку статора, уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, что обуславливает уменьшение фазных токов в $\sqrt{3}$ раз и линейных токов в 3 раза. По окончании процесса пуска и разгона двигателя до номинальной частоты вращения обмотку статора переключают обратно на схему «треугольник»;

включением в цепь обмотки статора на период пуска добавочных резисторов или реакторов. При этом на указанных аппаратах создаются некоторые падения напряжения ΔU , пропорциональные пусковому току, вследствие чего к обмотке статора будет приложено пониженное напряжение $U_1 - \Delta U$. По мере увеличения частоты вращения ротора двигателя уменьшается э. д. с., индуцированная в обмотке ротора, а следовательно, и пусковой ток. В результате этого уменьшается падение напряжения ΔU и автоматически возрастает приложенное к двигателю напряжение;

подключением двигателя к сети через понижающий автотрансформатор. Последний может иметь несколько ступеней, которые в процессе пуска двигателя переключаются соответствующей аппаратурой.

Недостатком всех указанных способов является значительное уменьшение пускового и наибольшего моментов двигателя, которые пропорциональны квадрату приложенного напряжения. Поэтому они могут применяться только при пуске двигателя без нагрузки.

Пуск с помощью пускового реостата применяется для двигателей *I* с фазным ротором (рис. 265, *a*). Пусковым реостатом *2* обычно имеет четыре — шесть ступеней, что позволяет в процессе пуска постепенно уменьшать пусковое сопротивление R_n , поддерживая высокое значение пускового момента на все время разгона двигателя. При пуске предварительно устанавливают пусковой реостат в положение, при котором он имеет максимальное

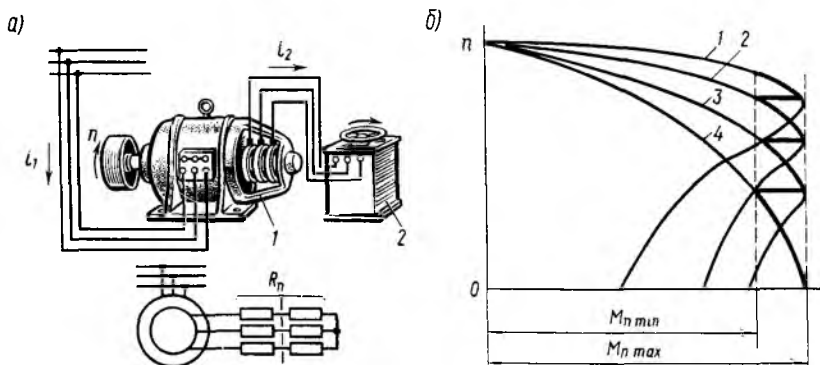


Рис. 265. Схема включения асинхронного двигателя с пусковым реостатом (*a*) и механические характеристики двигателя при пуске (*б*)

сопротивление $R_{п4} = R_{пmax}$, после чего подключают обмотку статора к сети трехфазного тока. При этом двигатель пускается по характеристике 4 (рис. 265, б) и развивает в начале пуска вращающий момент $M_{пmax}$.

По мере увеличения частоты вращения ротора вращающий момент двигателя, как видно из его механической характеристики, уменьшается и может стать меньше некоторого момента $M_{пmin}$. Поэтому при уменьшении вращающего момента до $M_{пmin}$ часть сопротивления пускового реостата выводят. При этом вращающий момент двигателя возрастает до $M_{пmax}$, а затем с увеличением частоты вращения будет изменяться по характеристике 3, полученной при сопротивлении пускового реостата $R_{п3} < R_{п4}$. При дальнейшем уменьшении вращающего момента до $M_{пmin}$ часть сопротивления реостата снова выключается, и двигатель переходит на работу по характеристике 2, соответствующей сопротивлению $R_{п2} < R_{п3}$.

Таким образом, в процессе пуска двигателя сопротивление пускового реостата постепенно (ступенями) уменьшают и вращающий момент двигателя изменяется в пределах от $M_{пmax}$ до $M_{пmin}$ по ломаной кривой, показанной на рис. 265, б жирной линией. В конце пуска пусковой реостат полностью выводят, обмотка ротора двигателя замыкается накоротко и двигатель переходит на работу по естественной характеристике 1. Отдельные ступени пускового реостата в процессе разгона двигателя могут выключаться вручную или автоматически. Таким образом, путем включения реостата в цепь обмотки ротора можно осуществить пуск двигателя при $M_{п} \approx M_{пmax}$ и резко уменьшить пусковой ток.

Недостатком этого способа является относительная сложность пуска, возникновение потерь энергии в пусковом реостате и необходимость применения более сложных и дорогих двигателей с фазным ротором. Кроме того, эти двигатели имеют несколько худшие рабочие характеристики, чем двигатели с короткозамкнутым ротором такой же мощности (кривые η и $\cos \varphi_1$ идут у них ниже). В связи с этим двигатели с фазным ротором применяют только при тяжелых условиях пуска (когда необходимо развивать максимально возможный пусковой момент), при малой мощности электрической сети или при необходимости плавного регулирования частоты вращения.

§ 81. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

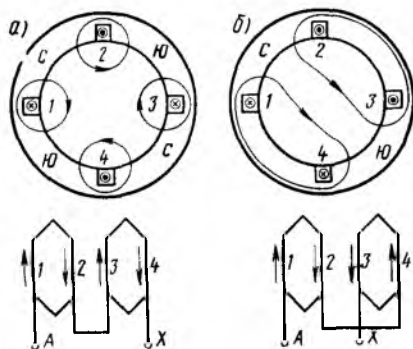
Частота вращения асинхронного двигателя

$$n = n_1 (1 - s) = \frac{60f_1}{p} (1 - s). \quad (85)$$

Из этого выражения видно, что ее можно регулировать, изменяя частоту f_1 питающего напряжения, число пар полюсов p и

Рис. 266. Схема переключения катушек обмотки статора (одной фазы) для изменения числа полюсов:

a — при четырех полюсах; *б* — при двух полюсах



скольжение s . Последнее при заданных значениях момента на валу $M_{вн}$ и частоты f_1 можно изменять путем включения в цепь обмотки ротора реостата.

Регулирование путем изменения частоты питающего напряжения. Этот способ требует наличия преобразователя частоты, к которому должен быть подключен асинхронный двигатель. На основе управляемых полупроводниковых вентилей (тиристоров) созданы статические преобразователи частоты и построен ряд опытных электровозов и тепловозов с асинхронными двигателями, частота вращения которых регулируется путем изменения частоты питающего напряжения. Такой способ регулирования частоты вращения ротора асинхронного двигателя является весьма перспективным.

Регулирование путем изменения числа пар полюсов. Этот способ позволяет получить ступенчатое изменение частоты вращения. Для этой цели отдельные катушки 1, 2 и 3, 4, составляющие одну фазу (рис. 266), переключаются так, чтобы изменялось соответствующим образом направление тока в них (например, с последовательного согласного соединения на встречное). При согласном включении катушек (рис. 266, *a*) число полюсов равно четырем, при встречном включении (рис. 266, *б*) — двум. Катушки двух других фаз, сдвинутые в пространстве на 120° , соединяются таким же образом. Такое же уменьшение числа полюсов можно осуществить при переключении катушек с последовательного на параллельное соединение. При изменении числа полюсов изменяется частота вращения n_1 магнитного поля двигателя, а следовательно, и частота вращения n его ротора. Если нужно иметь три или четыре частоты вращения n_1 , то на статоре располагают еще одну обмотку, при переключении которой можно получить еще две частоты. Существуют двигатели, которые обеспечивают изменение частоты вращения n_1 при постоянном наибольшем моменте или при приблизительно постоянной мощности (рис. 267).

В асинхронном двигателе число полюсов ротора должно быть равно числу полюсов статора. В короткозамкнутом роторе это условие выполняется автоматически и при переключении обмотки статора никаких изменений в обмотке ротора выполнять не требуется.

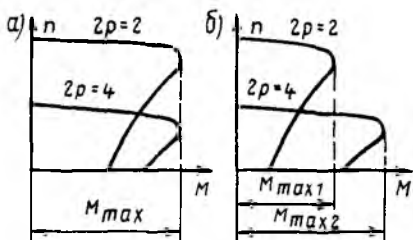


Рис. 267. Механические характеристики двухскоростных асинхронных двигателей с постоянным наибольшим моментом (а) и постоянной мощностью (б)

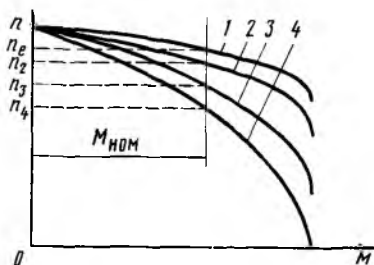


Рис. 268. Механические характеристики асинхронного двигателя при регулировании частоты вращения путем включения реостата в цепь обмотки ротора

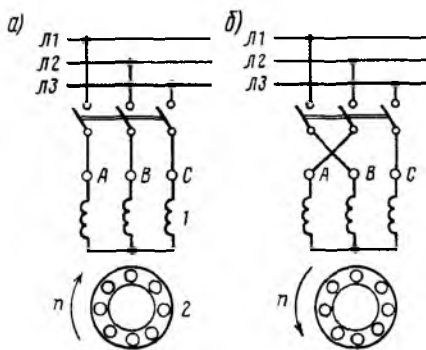


Рис. 269. Схемы подключения асинхронного двигателя к сети при изменении направления его вращения

В двигателе же с фазным ротором в этом случае надо было бы изменять число полюсов обмотки ротора, что сильно усложнило бы его конструкцию, поэтому такой способ регулирования частоты вращения используется только в двигателях с короткозамкнутым ротором. Такие двигатели имеют большие габаритные размеры и массу по сравнению с двигателями общего применения, а следовательно, и большую стоимость. Кроме того, регулирование осуществляется большими ступенями; при частоте $f_1 = 50$ Гц частота вращения поля n_1 при переключениях изменяется в отношении 3000:1500:1000:750.

Регулирование путем включения в цепь ротора реостата. При включении в цепь обмотки ротора реостата с различным сопротивлением ($R_{п4}$, $R_{п3}$, $R_{п2}$ и т. д.) получаем ряд реостатных механических характеристик 4, 3 и 2 двигателя. При этом некоторому нагрузочному моменту $M_{ном}$ (рис. 268) будут соответствовать меньшие частоты вращения n_4 , n_3 , n_2 и т. д., чем частота n_1 при работе двигателя на естественной характеристике 1 (при $R_{п} = 0$). Это способ регулирования может быть использован только для двигателей с фазным ротором. Он позволяет плавно изменять частоту вращения в широких пределах. Недостатками его являются большие потери энергии в регулировочном реостате, поэтому его используют только при кратковременных режимах работы двигателя (при пуске и пр.).

Изменение направления вращения. Для изменения направления вращения двигателя нужно изменить направление вращения магнитного поля, создаваемого

обмотками статора. Это достигается изменением порядка чередования тока в фазах обмотки статора. Например, если максимумы токов поступают в фазы обмотки статора 1 (рис. 269, а) в следующем порядке: фаза А — фаза В — фаза С, то ротор 2 двигателя будет вращаться по часовой стрелке. Если же подавать их в такой последовательности: фаза В — фаза А — фаза С, то ротор начнет вращаться против часовой стрелки. Для этой цели необходимо изменить схему соединения обмоток статора с сетью, переключив две любые фазы (провода). Например, зажим А обмотки статора, который ранее был соединен с линейным проводом Л1, нужно переключить на провод Л2, а зажим В этой обмотки, соединенный ранее с Л2, переключить на провод Л1 (рис. 269, б). Такое переключение можно осуществить обычным переключателем.

§ 82. Однофазные и двухфазные асинхронные двигатели

Принцип действия однофазного двигателя. В однофазном асинхронном двигателе обмотка статора расположена в пазах, занимающих примерно $\frac{2}{3}$ окружности, соответствующей паре полюсов (рис. 270, а). По этой причине мощность однофазного двигателя также составляет около $\frac{2}{3}$ мощности трехфазного двигателя с теми же габаритными размерами.

Однофазная обмотка статора 2 создает пульсирующее магнитное поле, которое можно представить в виде двух полей, вращающихся в разные стороны с частотой n_1 (рис. 270, б). Поле 5, которое вращается в том же направлении, что и ротор 3, называется *прямым полем*; поле 6, вращающееся в противоположном направлении, — *обратным полем*. Эти поля, воздействуя на ротор, создают два противоположно направленных электромагнитных момента $M_{пр}$ и $M_{обр}$. Следовательно однофазный асинхронный

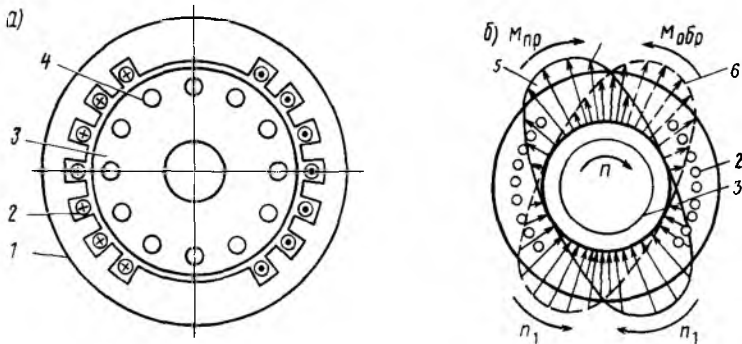


Рис. 270. Разрез однофазного асинхронного двигателя (а), прямое и обратное вращающиеся магнитные поля (б)

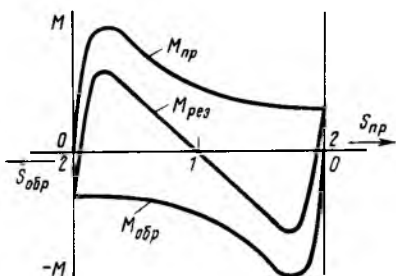


Рис. 271. Зависимости $M(s)$ однофазного двигателя от прямого и обратного вращающихся полей

который результирующий момент $M_{рез}$, который обеспечит его дальнейшее вращение в заданном направлении. Объясняется это тем, что ток в обмотке ротора, созданный обратным полем, оказывает сильное размагничивающее действие и существенно ослабляет обратное поле.

Из анализа кривых $M(s)$, показанных на рис. 271, следует, что:

однофазный двигатель не имеет начального пускового момента так как при $s=1$, т. е. при неподвижном роторе, результирующий момент $M_{рез}=0$;

частота вращения однофазного двигателя при холостом ходе меньше, чем у трехфазного двигателя, из-за наличия тормозящего момента $M_{обр}$. По этой же причине однофазный двигатель имеет худшие рабочие характеристики: меньший к. п. д., меньшую перегрузочную способность, повышенное скольжение при номинальной нагрузке.

Пусковые устройства. Чтобы получить пусковой момент, однофазные двигатели снабжают пусковой обмоткой P , расположенной со сдвигом на 90° по отношению к основной рабочей обмотке R (рис. 272, а и б). На период пуска пусковую обмотку присоединяют к сети через фазосдвигающие элементы — конденсатор или резистор. После окончания разгона двигателя пусковую обмотку отключают, и двигатель продолжает работать как однофазный. Поскольку пусковая обмотка работает лишь короткое время, ее изготавливают из провода меньшего сечения по сравнению с рабочей обмоткой и укладывают в меньшее число пазов.

Если использовать в качестве фазосдвигающего элемента конденсатор C (рис. 273, а), то можно получить режим работы при пуске, близкий к симметричному, т. е. получить круговое вращающееся поле.

При легких условиях пуска (небольшой нагрузочный момент в пусковой период) применяют двигатели с пусковым резистором R (рис. 273, б). Наличие резистора в цепи пусковой обмотки обеспечивает меньший сдвиг фаз φ_1 между напряжением и током в этой обмотке, чем сдвиг фаз φ_2 в рабочей обмотке. В связи с этим

двигатель может быть представлен в виде двух совершенно одинаковых трехфазных двигателей, роторы которых тесно связаны друг с другом, а обмотки подключены к трехфазной сети так, что их магнитные поля вращаются в противоположных направлениях.

Однако если ротор раскрутить в каком-либо направлении, то моменты $M_{пр}$ и $M_{обр}$ не будут равны. В этом случае на вал двигателя будет действовать неко-

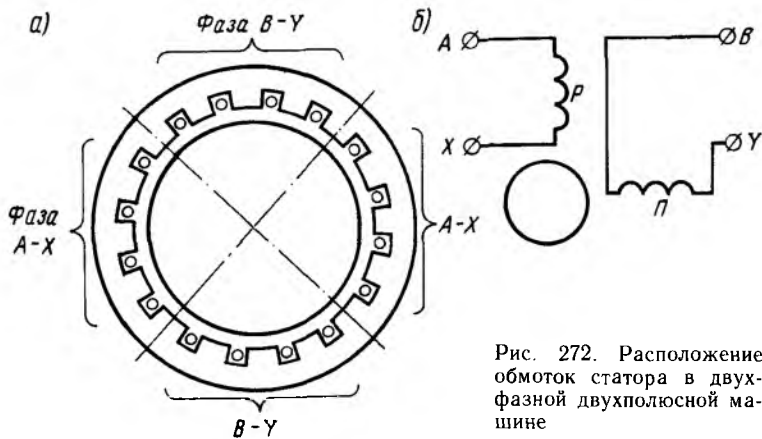


Рис. 272. Расположение обмоток статора в двухфазной двухполюсной машине

токи в рабочей и пусковой обмотках оказываются сдвинутыми по фазе на угол $\varphi_1 - \varphi_2$ и образуют несимметричное (эллиптическое) вращающееся поле, благодаря чему и возникает пусковой момент. Однофазные двигатели с конденсаторным пуском и двигатели с пусковым резистором имеют высокую эксплуатационную надежность.

Поскольку включение второй обмотки существенно улучшает характеристики двигателя, в некоторых случаях применяют двухфазные двигатели, в которых обе обмотки включены постоянно. Если сдвиг по фазе 90° между токами в фазах A и B (рис. 274) осуществляется путем включения в одну из них конденсаторов, то такие двигатели называются *конденсаторными*.

В двухфазных двигателях обе обмотки A и B занимают, как правило, одинаковое число пазов и имеют равную мощность. При пуске конденсаторного двигателя рационально иметь увеличенную емкость $C_p + C_n$. После разгона двигателя и уменьшения тока часть конденсаторов C_n отключают, чтобы увеличить емкостное сопротивление и при номинальном режиме (когда ток двигателя становится меньшим, чем при пуске) обеспечить режим работы дви-

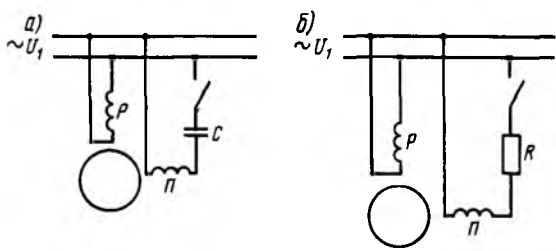


Рис. 273. Схемы пуска однофазного асинхронного двигателя при использовании конденсатора (а) и резистора (б)

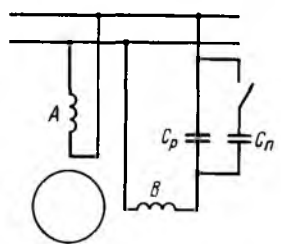


Рис. 274. Схема конденсаторного асинхронного двигателя

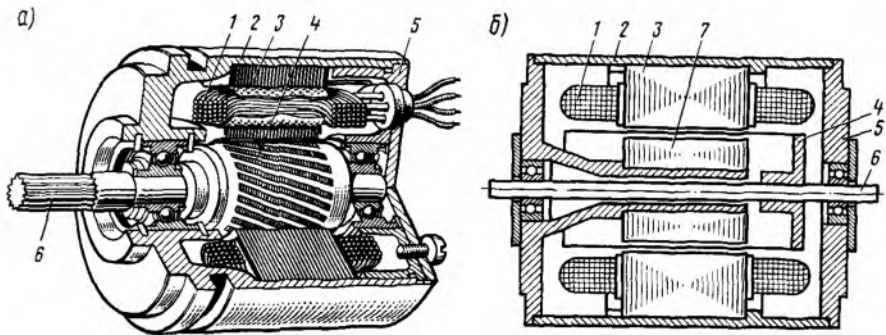


Рис. 275. Устройство однофазного асинхронного двигателя с беличьей клеткой на роторе (а) и с полым немагнитным ротором (б):

1 — обмотка статора; 2 — корпус; 3 — внешний статор; 4 — ротор; 5 — подшипниковый щит; 6 — вал; 7 — внутренний статор

гателя в условиях, близких условиям работы при круговом вращающемся поле.

Устройство. Однофазные и двухфазные асинхронные двигатели устроены также, как и трехфазные: в них имеются однофазные или двухфазные обмотки статора и короткозамкнутый ротор с беличьей клеткой (рис. 275, а). Широкое распространение получили однофазные двигатели с полым немагнитным ротором (рис. 275, б) и внешним статором, на котором расположены две обмотки, сдвинутые в пространстве на 90° . Ротор выполнен в виде тонкостенного полого цилиндра из алюминия. Для уменьшения магнитного сопротивления магнитопровода двигателя имеется внутренний статор, набираемый из листов электротехнической стали, так же, как и внешний статор.

Полый ротор можно представить в виде совокупности элементарных проводников. Вращающееся магнитное поле, создаваемое обмоткой статора, индуцирует в каждом элементарном проводнике полого ротора э. д. с., под действием которой по ним протекают вихревые токи. В результате взаимодействия этих токов с вращающимся полем возникают электромагнитные силы и вращающий момент.

§ 83. Асинхронный расщепитель фаз

На э. п. с. переменного тока преобразование однофазного тока в трехфазный для питания асинхронных двигателей привода вспомогательных машин осуществляют с помощью асинхронных расщепителей фаз. Асинхронный расщепитель фаз представляет собой асинхронную машину с трехфазной обмоткой статора и короткозамкнутым ротором.

Принцип действия. В расщепителе фаз преобразование однофазного тока в трехфазный производится посредством вращаю-

щегося магнитного поля. Это поле индуцирует в обмотке статора э. д. с., сдвинутые относительно друг друга по фазе на определенные углы, равные углам между осями соответствующих катушек. В расщепителе фаз обмотка статора выполнена в виде несимметричной «звезды» (рис. 276, а). Две фазы ее $C1—O$ и $C2—O1$ образуют так называемую *двигательную обмотку 2*. Третья фаза $C3—C4$ называется *генераторной обмоткой 3*. Ее используют также для пуска расщепителя фаз. Обмотка ротора *1* выполнена в виде беличьей клетки.

Двигательную обмотку подключают к источнику однофазного тока, т. е. к вторичной обмотке тягового трансформатора. Она служит также для приведения во вращение расщепителя фаз. Генераторная обмотка *3* сдвинута относительно частей $C1—O$ и $C2—O1$ двигательной обмотки приблизительно на угол 120° . Ее присоединяют к двигательной обмотке *2* в точке $O1$, которая выбирается так, чтобы обеспечить наилучшую симметрию линейных напряжений U_L при номинальной нагрузке. Из этого исходят также при выборе числа витков обмоток (генераторная обмотка имеет несколько большее число витков, чем каждая из двух частей двигательной обмотки).

Однофазная двигательная обмотка *2* расщепителя фаз создает пульсирующее магнитное поле, которое, как было показано в § 82, можно представить в виде двух вращающихся в разных направлениях полей, создающих электромагнитные моменты $M_{вр}$ и $M_{обр}$ (см. рис. 270, б). По этой причине расщепитель фаз не имеет начального пускового момента.

Для пуска расщепителя используют в качестве вспомогательной фазы генераторную обмотку $C3—C4$, подключаемую к одному из проводов однофазной сети (см. рис. 276, а). В этом случае в машине образуется система из трех фаз, сдвинутых относительно друг друга в пространстве приблизительно на 120° , т. е. так же, как и в трехфазном асинхронном электродвигателе. Для создания

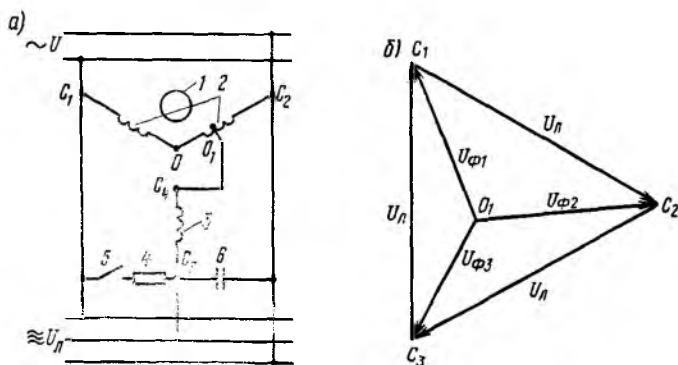


Рис. 276. Схема включения обмоток расщепителя фаз (а) и диаграмма векторов напряжений, индуцируемых в этих обмотках (б)

необходимого сдвига по фазе тока в обмотке $C3—C4$ относительно токов в двух других фазах в цепь генераторной обмотки включают при пуске пусковой резистор 4. В дальнейшем после разгона ротора этот резистор отключается от сети контактом 5. Емкость 6 служит для устранения несимметрии напряжений, возникающих при изменении нагрузки расщепителя фаз. Эту емкость распределяют в виде отдельных конденсаторов по различным двигателям так, чтобы при отключении какого-либо двигателя отключалась и соответствующая часть конденсаторов. При этом автоматически изменяется и общая емкость 6, подключенная к расщепителю фаз.

При вращении ротора обратное поле резко уменьшается, поэтому можно считать, что в машине практически действует лишь прямое поле. Это поле индуцирует в генераторной обмотке э. д. с., которая сдвинута приблизительно на 120° относительно э. д. с., индуцируемых в двух частях двигателей обмотки. В результате образуется трехфазная система линейных напряжений U_3 (рис. 276, б), которые подаются на асинхронные двигатели привода вспомогательных машин. При симметричной нагрузке от генераторной обмотки $C3—C4$ расщепителя подается только $1/3$ мощности потребителей. Остальные $2/3$ необходимой мощности поступают непосредственно от однофазной сети.

Конструктивное выполнение. Расщепители фаз имеют конструкцию, подобную обычному асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором. Для эффективного ослабления обратного поля беличья клетка ротора выполняется из меди и имеет минимальное активное сопротивление. Чтобы снизить падения напряжения в обмотках статора и уменьшить таким путем несимметрию трехфазных напряжений при изменении нагрузки и напряжения питающей сети, двигательная и генераторная обмотки должны иметь малое реактивное сопротивление. Для этого их выполняют с небольшим числом витков и уменьшенными потоками рассеяния. Это обеспечивают рациональным выбором конфигурации пазов и увеличением воздушного зазора между ротором и статором.

§ 84. Асинхронный тахогенератор

Тахогенераторы применяют для преобразования механического вращения в электрический сигнал. На выходе тахогенератора возникает напряжение, пропорциональное частоте вращения вала какой-либо машины. Шкала прибора, включенного на выходе тахогенератора, градуируется непосредственно в оборотах в минуту (об/мин) или километрах в час (км/ч).

Асинхронный тахогенератор (рис. 277) устроен так же, как двухфазный асинхронный двигатель с полым немагнитным ротором (см. рис. 275, б). На статоре в пазах уложены две обмотки, сдвинутые в пространстве на 90° . Одна из обмоток B (возбуждения) постоянно включена в сеть переменного тока, другая обмотка Γ

(генераторная) присоединена к нагрузке (электроизмерительному прибору V), т. е. является выходной.

По обмотке возбуждения B проходит переменный ток, благодаря чему создается магнитный поток Φ_d , пульсирующий с частотой сети. Этот поток распределен в пространстве практически синусоидально, и ось его совпадает с осью обмотки возбуждения рис. 278, а), называемой продольной осью. Полюс ротора можно представить в виде совокупности ряда элементарных проводников. В каждом таком проводнике поток Φ_d индуцирует э. д. с. e_r , называемую трансформаторной. Так как активное сопротивление полого ротора во много раз больше индуктивного, то э. д. с. e_r и вызываемый ею в роторе ток i_r практически совпадают по фазе. На рис. 278, а показано направление э. д. с. e_r и тока i_r в момент времени, когда поток Φ_d уменьшается. Создаваемая током i_r м. д. с. действует по продольной оси машины против м. д. с. обмотки возбуждения, т. е. при неподвижном роторе в машине имеют место те же процессы, что и в трансформаторе с вторичной обмоткой (ротором), замкнутой накоротко.

При вращении ротора каким-либо посторонним механизмом в его элементарных проводниках, помимо трансформаторной э. д. с., индуцируется еще и э. д. с. вращения $e_{вр}$, пропорциональная частоте вращения ротора n и изменяющаяся во времени с частотой сети. На рис. 278, б) показаны мгновенные направления э. д. с. вращения $e_{вр}$ и создаваемого ею тока $i_{вр}$ в элементарных проводниках полого ротора. При любой частоте вращения направ-

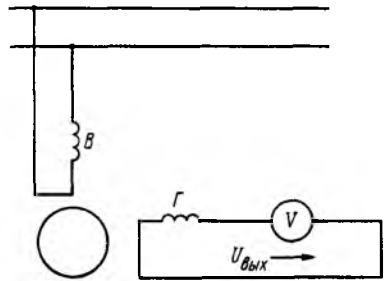


Рис. 277. Схема асинхронного тахогенератора

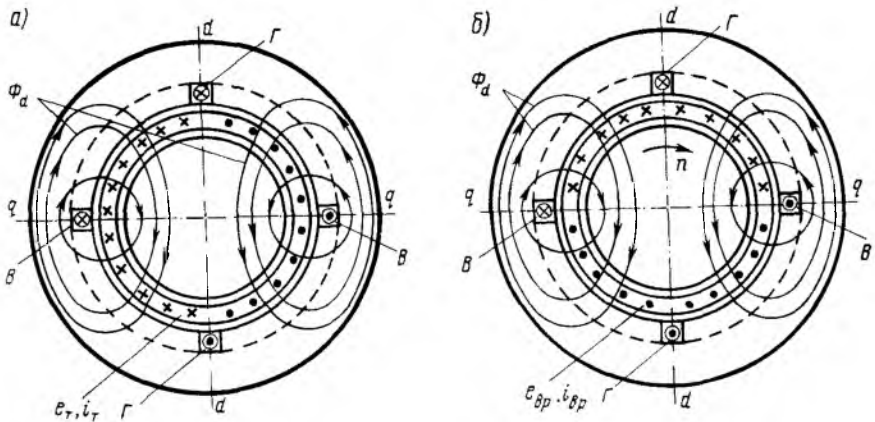


Рис. 278. Распределение э.д.с. и токов в полом роторе, индуцируемых в результате пульсации потока Φ_d (а) и вращения ротора (б)

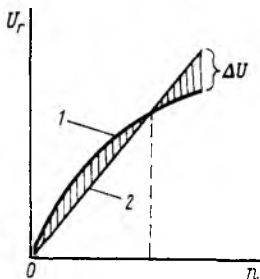


Рис. 279. Выходные характеристики асинхронного тахогенератора

порциональна частоте вращения ротора n , то и э. д. с. E_r в выходной обмотке, приблизительно равная напряжению $U_{\text{вых}}$, будет пропорциональна n .

Иными словами, выходная характеристика 2 (рис. 279) тахогенератора является линейной. В реальных условиях работы тахогенератора указанная характеристика несколько отклоняется от линейной зависимости 1, т. е. появляется амплитудная погрешность ΔU . Очевидно, что частота изменения э. д. с. E_r в выходной обмотке не зависит от частоты вращения ротора и при любых условиях равна частоте изменения э. д. с. $e_{\text{вр}}$ в роторе, т. е. частоте сети, питающей обмотку возбуждения. Неизменность частоты выходного напряжения является ценным свойством асинхронного тахогенератора.

§ 85. Сельсины

Принцип действия. Сельсины¹ служат для синхронного поворота или вращения двух или нескольких осей, механически не связанных друг с другом. Одну из этих машин, механически соединенную с ведущей осью, называют *датчиком*, а другую, соединенную с ведомой осью (непосредственно или с помощью промежуточного двигателя), — *приемником*. При повороте ротора сельсина датчика на какой-либо угол θ_d ротор сельсина-приемника поворачивается на такой же точно угол θ_n . Следовательно, система из двух сельсинов стремится ликвидировать рассогласование между положениями роторов датчика и приемника и в идеальном случае свести его к нулю.

Сельсины имеют две обмотки: первичную, или обмотку возбуждения, и вторичную, или обмотку синхронизации. В зависимости от числа фаз обмотки возбуждения различают одно- и трехфазные сельсины. Обмотку синхронизации сельсинов обычно выполняют по типу трехфазной.

¹ Сокращение, происшедшее от английского слова *selfsynchronizing* — самосинхронизирующийся.

Принцип действия сельсина не зависит от места расположения каждой из обмоток. Однако чаще всего в сельсинах обмотку синхронизации размещают на статоре, а обмотку возбуждения — на роторе (для уменьшения числа контактных колец и повышения надежности работы).

Режимы работы. Различают два основных режима работы сельсинов — индикаторный и трансформаторный.

При *индикаторном режиме* (рис. 280, а) ротор сельсина-приемника Π соединяют непосредственно с ведомой осью O_2 . Этот режим применяют при малом значении тормозного момента на ведомой оси, обычно в тех случаях, когда на оси укреплена хорошо уравновешенная стрелка индикатора (отсюда название — индикаторный). Обмотки возбуждения B датчика D и приемника Π включены в общую сеть переменного тока, а обмотки синхронизации соединены линией связи $ЛС$. Пульсирующие магнитные потоки, создаваемые обмотками возбуждения датчика и приемника, индуцируют в трех фазах обмоток синхронизации э. д. с.

Если между роторами датчика и приемника имеется некоторый угол $\theta = \theta_d - \theta_n$ рассогласования, то по обмоткам синхронизации будут протекать токи, которые, взаимодействуя с потоком возбуждения, создают в датчике и приемнике синхронизирующие моменты. Эти моменты имеют противоположные направления и стремятся свести угол рассогласования к нулю. Обычно ротор датчика заторможен, поэтому его синхронизирующий момент воспринимается механизмом, поворачивающим ведущую ось O_1 ; синхронизирующий же момент приемника поворачивает его ротор в ту же сторону, что и ротор датчика, и на тот же угол.

При *трансформаторном режиме* сигнал о наличии рассогласования между положениями роторов датчика и приемника подается через усилитель на исполнительный двигатель, который поворачивает ведомую ось и ротор сельсина-приемника, ликвидируя рассогласование.

Трансформаторный режим применяют в тех случаях, когда к ведомой оси приложен значительный тормозной момент, т. е. когда приходится поворачивать какой-либо механизм. При работе сельсинов в трансформаторном режиме (рис. 280, б) обмотка возбужде-

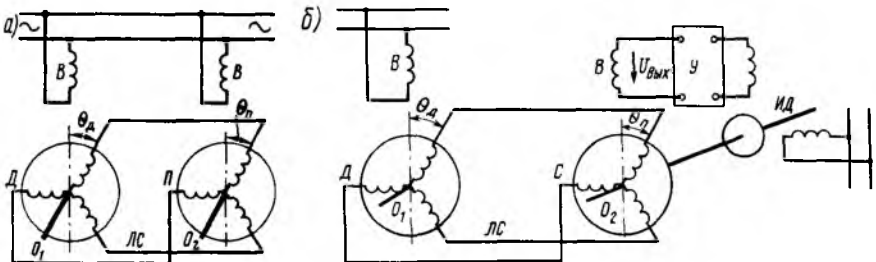


Рис. 280. Схемы включения сельсинов при работе их в индикаторном (а) и трансформаторном (б) режимах

ния B датчика D , механически связанного с ведущей осью θ_1 , подключается к сети однофазного тока, а обмотка возбуждения B приемника P — к усилителю $У$, подающему питание на обмотку управления двухфазного исполнительного двигателя $ИД$. Обмотки синхронизации обоих сельсинов соединены линией связи $ЛС$.

Переменный ток, проходящий по обмотке возбуждения датчика, создает в нем пульсирующий магнитный поток, который индуцирует э. д. с. в трех фазах обмотки синхронизации.

Так как обмотки синхронизации датчика и приемника соединены линией связи, по ним будет протекать ток, вследствие чего в приемнике создается свой пульсирующий магнитный поток. Если имеет место рассогласование положений роторов датчика и приемника, то этот поток индуцирует в обмотке возбуждения некоторую э. д. с., и на зажимах ее появляется выходное напряжение $U_{\text{вых}}$. Это напряжение через усилитель $У$ подается на одну из обмоток статора исполнительного двигателя $ИД$, который поворачивает ведомую ось θ_2 совместно с ротором приемника. Когда рассогласование ликвидируется, выходное напряжение станет равным нулю и вращение ведомой оси прекратится.

Устройство. По конструкции сельсины разделяют на контактные, у которых обмотка ротора соединена с внешней цепью через контактные кольца и щетки, и бесконтактные. *Контактные сельсины* (рис. 281) устроены так же, как асинхронные двигатели с фазным ротором малой мощности. Статор 1 и ротор 2 такого сельсина неявнополюсные, поэтому обе обмотки 3 и 4 — распределенные. Обмотка возбуждения расположена на роторе; ток к ней подводится через два контактных кольца 5 . В некоторых конструкциях статор и ротор имеют явно выраженные полюсы, что обеспечивает повышение синхронизирующего момента. Основным недостатком контактных сельсинов — наличие контактных колец.

В *бесконтактных сельсинах* (рис. 282) обе обмотки расположены на статоре. Ротор бесконтактного сельсина представляет собой цилиндр 6 из ферромагнитного материала, разделенный немагнитной алюминиевой прослойкой 7 на две магнитно изолированные части — полюсы.

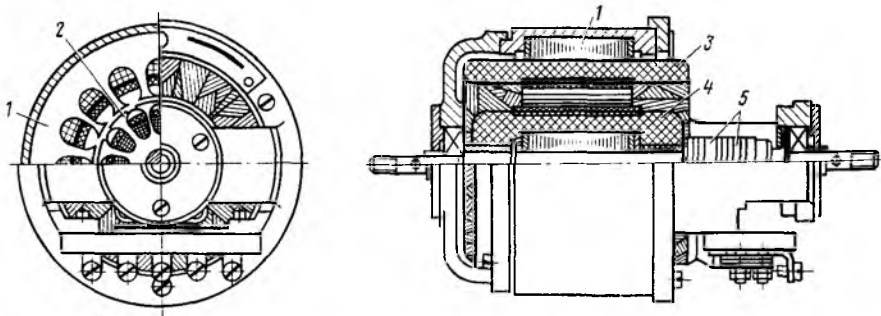


Рис. 281. Устройство контактного сельсина

С торцовых сторон сельсина расположены тороидальные сердечники 1, выполненные из листовой электротехнической стали. Внутренняя поверхность этих сердечников расположена над ротором, а к их внешней поверхности примыкают стержни внешнего магнитопровода 4. Однофазную обмотку возбуждения сельсина выполняют в виде двух дисковых катушек 2, расположенных с противоположных сторон статора 3 по оси сельсина между обмоткой синхронизации 5 и тороидальными сердечниками. В процессе работы сельсина пульсирующий магнитный поток возбуждения замыкается в его магнитной системе, сцепляясь с трехфазной обмоткой синхронизации на статоре. Путь, по которому происходит замыкание потока, показан на рис. 282 штриховой линией.

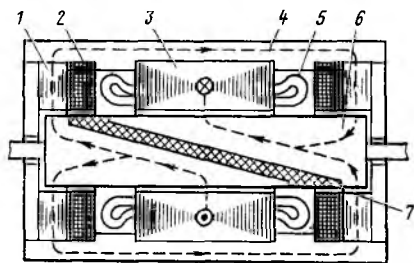


Рис. 282. Устройство бесконтактного сельсина

При повороте ротора изменяется положение оси потока относительно обмоток синхронизации, поэтому э. д. с., индуцируемая в фазах обмотки синхронизации, будет зависеть от угла поворота ротора так же, как и в контактных сельсинах.

§ 86. Назначение и принцип действия синхронной машины

Назначение. Синхронные машины используют в качестве генераторов и двигателей. Синхронные генераторы вырабатывают электрическую энергию трехфазного тока. Почти все генераторы переменного тока, устанавливаемые на больших и малых электрических станциях, являются синхронными. Мощность этих генераторов может быть самая различная, начиная от нескольких киловольт-ампер (на передвижных электростанциях) и кончая несколькими сотнями тысяч киловольт-ампер (на мощных центральных электростанциях). В Советском Союзе создан самый большой в мире синхронный генератор мощностью 1200 тыс. кВт·А. Синхронные двигатели используют, главным образом, для мощных электрических приводов. Синхронные генераторы применяют на тепловозах с электрической передачей переменного-постоянного тока. На этих тепловозах напряжение, полученное от синхронного генератора, выпрямляется полупроводниковыми преобразователями и подается на тяговые двигатели постоянного тока.

Принцип действия. На статоре 2 синхронной машины располагается трехфазная обмотка 1 (рис. 283, а), а на роторе 4 — полюсы (электромагниты) с обмоткой, питаемой постоянным током через контактные кольца 3 и щетки. Обмотка 5 полюсов, создающая магнитный поток возбуждения машины, называется обмоткой

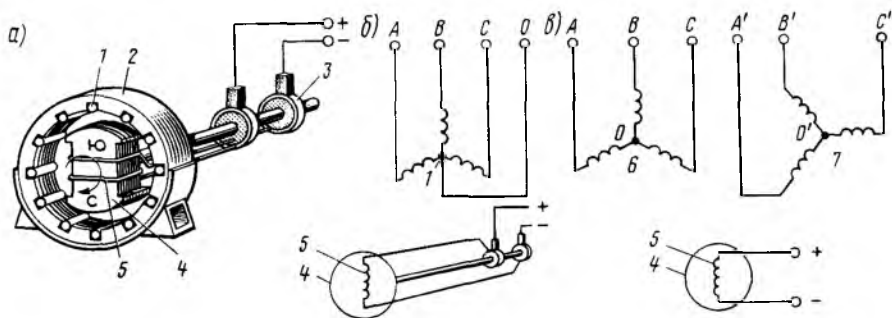


Рис. 283. Электромагнитная схема синхронной машины (а), и схемы ее включения (б и в):

1 — трехфазная обмотка статора; 2 — ротор; 3 — обмотка возбуждения; 4, 5 — обмотки якоря

возбуждения. Статор синхронной машины ничем не отличается от статора асинхронной машины; его обмотка имеет три (в двухполюсной машине), шесть (в четырехполюсной) или большее число катушек, сдвинутых одна относительно другой на соответствующие углы (120° или 60° и т. д.). При вращении ротора 4 с некоторой частотой n поток возбуждения пересекает проводники обмотки статора и индуцирует в ее фазах переменную э. д. с. E_1 , изменяющуюся с частотой

$$f_1 = pn/60.$$

Благодаря тому что обмотки трех фаз синхронного генератора сдвинуты в пространстве на угол 120° , индуцируемые в них э. д. с. будут сдвинуты одна относительно другой по фазе на $1/3$ периода. Если к обмотке статора подключить какую-либо нагрузку, то протекающий по этой обмотке трехфазный ток создает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого

$$n_1 = 60f_1/p. \quad (87)$$

Из формул (86) и (87) следует, что $n = n_1$, т. е. ротор вращается с той же частотой, что и магнитное поле статора. По этой причине рассматриваемая машина называется синхронной. В такой машине результирующий магнитный поток $\Phi_{рез}$ создается совместным действием магнитодвижущих сил обмотки возбуждения и обмотки статора и вращается в пространстве с той же частотой вращения, что и ротор.

В синхронной машине обмотка 1 (рис. 283, б), в которой индуцируется э. д. с. и протекает ток нагрузки, называется *обмоткой якоря*, а часть машины, на которой расположена обмотка возбуждения, — *индуктором*. Следовательно, в машине, выполненной по схеме, показанной на рис. 283, статор является якорем, а ро-

тор — индуктором. С точки зрения принципа действия и теории работы машины безразлично — вращается якорь или индуктор, поэтому в некоторых случаях применяют синхронные машины с обращенной электромагнитной схемой: у них обмотка якоря, к которой подключается нагрузка, располагается на роторе, а обмотка возбуждения, питаемая постоянным током, — на статоре.

Обмотка якоря обычно имеет семь выводов: от начал A, B, C и концов X, Y, Z фаз и от нулевой точки O . Это дает возможность соединять фазы и подключать к ним нагрузку по различным схемам: «звезда», «звезда с нулевым проводом» и «треугольник».

Таким образом, синхронная машина имеет следующие особенности: ротор машины, работающей как в двигательном, так и в генераторном режимах, вращается с постоянной частотой вращения, равной частоте вращения вращающегося магнитного поля, т. е. $n = n_1$; в обмотке ротора э. д. с. не индуцируется, а магнитное поле создается постоянным током, подводимым от внешнего источника, или постоянными магнитами.

Синхронные генераторы тепловозов с электропередачей переменного тока имеют две обмотки якоря 6 и 7 (рис. 283, в), фазы которых OA и $O'A'$, OB и $O'B'$ и OC и $O'C'$ сдвинуты на 30° . Выводы обмоток якоря подключены к полупроводниковому выпрямителю. В результате сдвига фаз обмоток якоря существенно уменьшается пульсация напряжения и тока на выходе выпрямителя, что улучшает работу тяговых двигателей постоянного тока (см. главу III).

Возбуждение синхронной машины. В качестве источника постоянного тока для питания обмотки возбуждения 1 синхронной машины может служить генератор постоянного тока 4 (возбудитель), установленный на валу ротора синхронной машины (рис. 284, а), или полупроводниковый выпрямитель 5, присоединенный к обмотке якоря 2 (рис. 284, б). Питание обмотки возбуждения от полупроводникового выпрямителя все более широко применяется как в двигателях и генераторах небольшой и средней мощности, так и в мощных турбо- и гидрогенераторах. Регули-

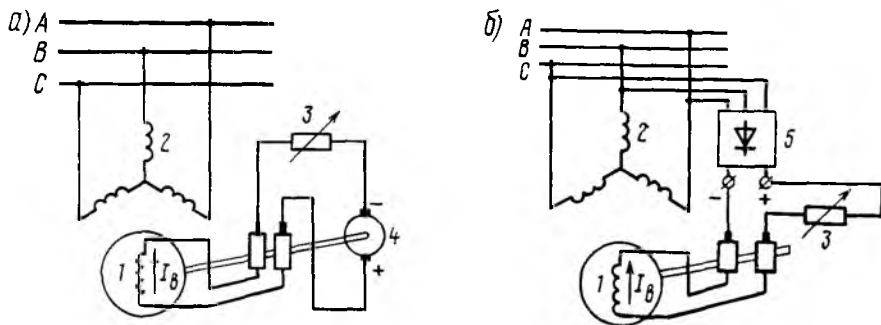


Рис. 284. Схемы питания обмотки возбуждения от возбудителя (а) и от полупроводникового выпрямителя (б)

рование тока возбуждения осуществляется вручную регулировочным реостатом 3, включенным в цепь обмотки возбуждения, или автоматически специальными регуляторами. Мощность, необходимая для возбуждения, составляет 0,3—3 % мощности синхронной машины, поэтому возбудитель или выпрямитель имеет малые размеры по сравнению с синхронной машиной.

§ 87. Устройство синхронной машины

Конструктивная схема машины. В зависимости от расположения якоря синхронные машины выполняют с *неподвижным или вращающимся якорем*. Машины большой и средней мощности (рис. 285) выполняют с неподвижным якорем для удобства отвода электрической энергии от обмотки якоря или ее подвода к ней. Поскольку мощность возбуждения невелика, подвод постоянного тока к расположенной на роторе обмотке возбуждения с помощью двух колец не вызывает особых затруднений. В синхронных машинах с неподвижным якорем якорь 3 выполнен так же, как и статор асинхронной машины. На нем имеются пазы, в которых уложена трехфазная обмотка. Сердечник якоря запрессован в остов 2, для крепления машины на остовах имеются лапы 6. Возможно также крепление с помощью фланца или другими способами. На валу ротора 4 установлен вентилятор 5, обеспечивающий охлаждение машины. Возбуждение синхронной машины осуществляется в данном случае от возбудителя 1.

Конструкция ротора. В машинах с неподвижным якорем применяют две различные конструкции ротора: *явнополюсную* (рис. 286, а) и *неявнополюсную* (рис. 286, б). Явнополюсный (с явновыраженными полюсами) ротор обычно используют в машинах с четырьмя и большим числом полюсов. Обмотку возбуждения выполняют в этом случае в виде цилиндрических катушек 2 прямоугольного сечения, которые размещают на сердечниках 3 полюсов и укрепляют полюсными наконечниками 1. Ротор, сердечники полюсов и полюсные наконечники изготавливают из листовой

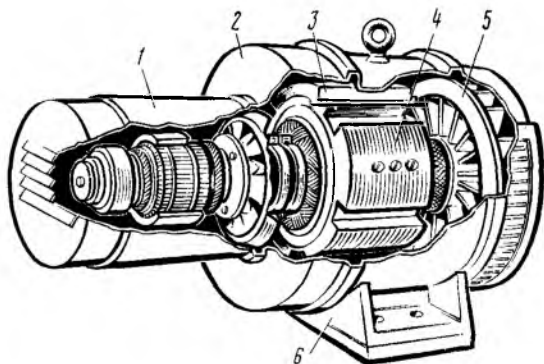
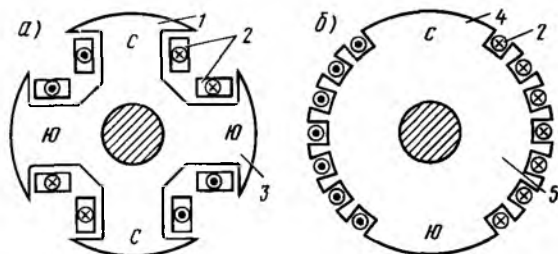


Рис. 285. Общий вид синхронной машины с возбудителем

Рис. 286. Расположение обмотки возбуждения на роторе синхронной явнополюсной (а) и неявнополюсной (б) машины



стали. Двухполюсные и четырехполюсные машины большой мощности, работающие при частоте вращения ротора 1500 и 3000 об/мин, выполняют, как правило, с неявнополюсным ротором. Применение в них явнополюсного ротора невозможно, так как не обеспечивается необходимая механическая прочность крепления полюсов и обмотки возбуждения. Обмотка возбуждения 2 в такой машине размещается в пазах сердечника 5 ротора, изготовленного из массивной стальной поковки, и укрепляется в них немагнитными металлическими клиньями. Лобовые части обмотки, на которые воздействуют значительные центробежные силы, крепят стальными массивными бандажами. Примерно $\frac{1}{3}$ каждого полюсного деления ротора не имеет пазов; эти части образуют так называемые «большие зубцы» 4, через которые входит и выходит поток возбуждения.

По своему назначению синхронные машины подразделяют на турбогенераторы, гидрогенераторы, дизель-генераторы и синхронные двигатели. Назначение машины в значительной степени определяет и ее конструкцию. Турбогенераторы, приводимые во вращение быстроходными паровыми или газовыми турбинами, выполняют неявнополюсными. Для получения стандартной частоты 50 Гц они должны иметь при двух полюсах частоту вращения 3000 об/мин, а при четырех полюсах — 1500 об/мин. Гидрогенераторы приводятся во вращение тихоходными турбинами, частота вращения которых составляет несколько десятков или сотен оборотов в минуту, поэтому они выполняются с большим числом полюсов (16—96) и имеют явнополюсные роторы. Дизель-генераторы, работающие от двигателей внутреннего сгорания, и синхронные двигатели небольшой и средней мощности выполняют обычно явнополюсными, мощные же двигатели — неявнополюсными.

Дизель-генераторы и синхронные двигатели выполняют, как правило, с горизонтальным расположением вала (рис. 287, а). В дизель-генераторе обычно имеется один подшипник; в качестве второй опоры ротора используется подшипник самого дизеля, вал которого жестко соединяется с валом ротора генератора. В синхронных машинах с явнополюсным ротором в полюсных наконечниках (рис. 287, б) размещаются стержни беличьей клетки, выполненной из меди или латуни. С торцовых сторон ротора стержни соединяются с короткозамыкающими кольцами. В генераторах эту клетку называют *демпферной обмоткой*; она обеспечивает

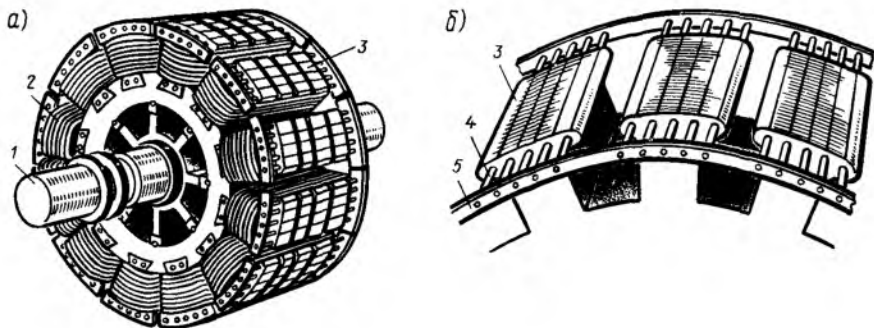


Рис. 287. Роторы дизель-генератора:

1 — вал; 2 — обмотка возбуждения; 3 — полюс ротора; 4 — стержни беличьей клетки; 5 — короткозамыкающие кольца

быстрое затухание колебаний ротора, возникающих при резких изменениях режима работы машины. В синхронных двигателях беличья клетка служит в качестве пусковой обмотки.

§ 88. Режимы работы синхронного генератора и его характеристики

Холостой ход. Э. д. с., индуцированная в каждой фазе обмотки якоря синхронного генератора, при холостом ходе

$$E_0 = c_E \Phi_v n, \quad (88)$$

где c_E — постоянная величина, зависящая от конструкции машины (числа витков обмотки якоря, числа полюсов и др.);

Φ_v — магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения.

Регулирование напряжения и частоты. Из формулы (88) следует, что регулировать э. д. с. (напряжение генератора) можно двумя способами: изменением частоты вращения n или изменением магнитного потока возбуждения Φ_v . Для изменения потока возбуждения в цепь обмотки возбуждения включают регулировочный реостат (см. рис. 284) или автоматически действующий регулятор напряжения, которые позволяют изменить ток возбуждения, поступающий в эту обмотку, а следовательно, и создаваемый ею поток. Регуляторы напряжения широко применяют для регулирования возбуждения генераторов, работающих при переменной частоте вращения, т. е. генераторов, приводимых во вращение от дизеля (на тепловозах) или от колесной пары (на пассажирских вагонах). При изменении частоты вращения n и нагрузки машины они автоматически изменяют ток возбуждения I_v , т. е. поток Φ_v , так, чтобы напряжение генератора было стабильным или изменялось по заданному закону.

Регулирование частоты f_1 , как следует из формулы (86), осуществляется изменением частоты вращения ротора.

Работа машины при нагрузке. При увеличении нагрузки синхронного генератора напряжение его изменяется. Это изменение происходит по двум причинам. При протекании тока нагрузки по обмотке якоря создается так же, как и в асинхронной машине, вращающееся магнитное поле, т. е. свой магнитный поток якоря $\Phi_{\text{я}}$. Поток якоря $\Phi_{\text{я}}$ и поток возбуждения $\Phi_{\text{в}}$ вращаются с одинаковой частотой и создают, следовательно, некоторый результирующий поток $\Phi_{\text{рез}} = \Phi_{\text{я}} + \Phi_{\text{в}}$. В результате э. д. с. машины $E = c_E \Phi_{\text{рез}} n$, т. е. будет отличаться от э. д. с. E_0 при холостом ходе.

Воздействие потока якоря на результирующий поток синхронной машины называется реакцией якоря. Так как под действием реакции якоря изменяется результирующий поток в машине, то и напряжение генератора будет зависеть от тока, проходящего по обмотке якоря, и его сдвига фаз относительно напряжения. Когда ток в обмотке якоря совпадает по фазе с э. д. с. холостого хода E_0 (рис. 288, а), поток $\Phi_{\text{я}}$ действует по поперечной оси машины $q-q$; он размагничивает одну половину каждого полюса и подмагничивает другую. Результирующий поток $\Phi_{\text{рез}}$ в этом случае из-за насыщения магнитной цепи машины несколько уменьшается по сравнению с $\Phi_{\text{в}}$.

В случае когда ток в обмотке якоря отстает от E_0 на 90° (рис. 288, б), поток якоря $\Phi_{\text{я}}$ действует по продольной оси машины против $\Phi_{\text{в}}$, т. е. уменьшает результирующий поток (размагничивает машину); если ток в обмотке якоря опережает E_0 на 90° (рис. 288, в), поток $\Phi_{\text{я}}$ совпадает по направлению с $\Phi_{\text{в}}$, т. е. увеличивает поток $\Phi_{\text{рез}}$ (подмагничивает машину). Если ток якоря отстает или опережает э. д. с. E_0 на угол, меньший 90° , то это можно рассматривать как сочетание рассмотренных случаев. В общем случае *если ток якоря отстает от напряжения, то реакция якоря действует размагничивающим образом. Она уменьшает результирующий поток и напряжение генератора. Когда ток опережает напряжение, то реакция якоря увеличивает результирующий поток и напряжение генератора.*

Второй причиной изменения напряжения генератора при его нагрузке являются внутренние падения напряжения в обмотке

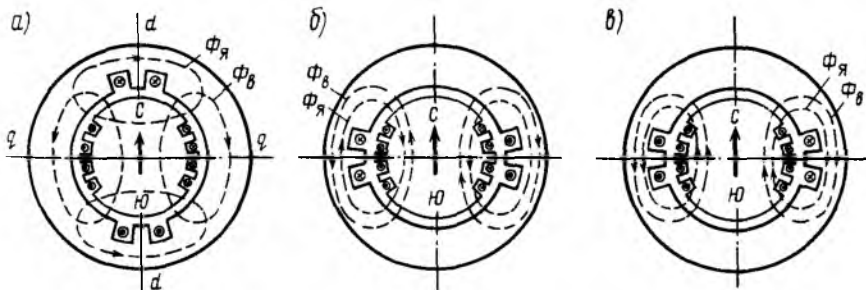


Рис. 288. Реакция якоря синхронной машины при различном характере нагрузки

якоря — активное и реактивное. Эти падения напряжения возникают в синхронной машине по тем же причинам, что и в асинхронном двигателе и трансформаторе.

Внешние характеристики синхронного генератора (рис. 289) представляют собой зависимости изменения напряжения генератора U от тока нагрузки I_n при постоянных значениях n , I_b и $\cos \varphi$. Коэффициент мощности $\cos \varphi$, при котором работает генератор, определяется характером его нагрузки (соотношением между активным и реактивным сопротивлениями потребителей). При активной нагрузке напряжение генератора с ростом тока нагрузки уменьшается по кривой 2, а при активно-индуктивной — по кривой 1; чем больше угол сдвига фаз φ между током I_n и напряжением U , тем сильнее размагничивающее действие реакции якоря и тем ниже идет кривая напряжения. При активно-емкостной нагрузке, когда ток I_n опережает по фазе напряжение U , реакция якоря подмагничивает машину и напряжение U может даже возрастать по сравнению с $U_0 = E_0$ при холостом ходе (кривая 3).

В синхронных генераторах из-за значительной реакции якоря изменение напряжения во много раз больше, чем в трансформаторах. Обычно генераторы работают при $\cos \varphi = 0,85 \div 0,9$ при отстающем токе, при этом $\Delta U = 35 \div 25 \%$ от $U_{ном}$. При столь большом изменении напряжения для нормальной работы подключенных к генератору потребителей требуется применять специальные устройства для стабилизации его выходного напряжения, например быстродействующие регуляторы возбуждения.

Отдаваемая генератором мощность при одних и тех же значениях тока зависит от коэффициента мощности $\cos \varphi$, при котором работает генератор, т. е. от характера его нагрузки. Однако проводники генератора рассчитываются на определенный ток, а его изоляция и магнитная система — на определенное напряжение и магнитный поток независимо от $\cos \varphi$ нагрузки. По этой причине номинальной мощностью генератора считается его полная мощность S в киловольт-амперах (кВ·А), на которую рассчитана машина по условиям нагревания и длительной безаварийной работы. Регулировать активную мощность синхронного генератора при работе его на какую-либо нагрузку можно путем изменения сопротивления нагрузки или напряжения машины.

При передаче энергии от вала ротора синхронного генератора в обмотку статора в различных элементах машины возникают потери мощности (рис. 290). Потери имеют место в обмотках статора и ротора — электрические потери $\Delta P_{эл}$, в стали их сердечников — магнитные потери ΔP_m и в трущихся элементах (подшипники, вентиляторы и пр.) — механические потери $\Delta P_{мх}$. К. п. д. синхронных машин находится в пределах от 0,85 до 0,95, т. е. имеет примерно те же значения, как и у асинхронных машин.

Короткое замыкание. При коротком замыкании синхронного генератора ток короткого замыкания I_k ограничивается внутренним сопротивлением обмотки якоря, которое имеет в основном индуктивный характер. Поэтому ток I_k отстает от напряжения

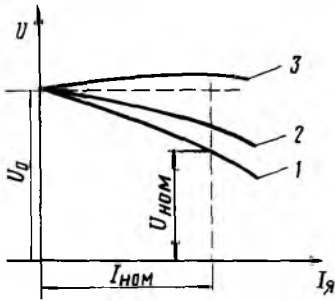


Рис. 289. Внешние характеристики синхронного генератора при различной нагрузке

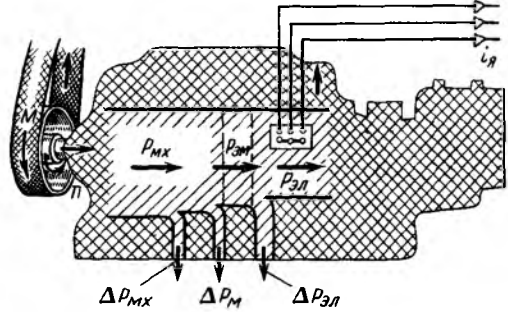


Рис. 290. Энергетическая диаграмма синхронного генератора

на угол, близкий к 90° , и реакция якоря сильно размагничивает машину и резко уменьшает поток $\Phi_{рез}$ и э. д. с. генератора E . В результате установившийся ток короткого замыкания в синхронных машинах сравнительно невелик (в некоторых машинах он меньше номинального), но из этого нельзя делать вывод, что короткое замыкание не опасно для генератора.

При внезапном коротком замыкании и уменьшении результирующего потока машины $\Phi_{рез}$ в обмотках возбуждения и демпферной индуцируются э. д. с. и возникают токи, которые согласно правилу Ленца препятствуют изменению потока $\Phi_{рез}$. Поэтому этот поток и э. д. с. генератора уменьшаются сравнительно медленно, хотя машина уже замкнута накоротко. В результате ток в обмотке якоря в начальный момент короткого замыкания резко возрастает, а затем постепенно уменьшается. Наибольший ток I_k в начальный момент короткого замыкания называется *ударным*; он может превышать амплитуду номинального тока якоря в 10—15 раз.

Для ограничения ударного тока в цепь обмотки якоря иногда вводят дополнительную индуктивность (реактор).

§ 89. Синхронный двигатель

Принцип действия и устройство. Синхронная машина может работать в качестве генератора и двигателя. Синхронный двигатель выполнен так же, как и синхронный генератор. Его обмотка якоря 1 (рис. 291, а) подключена к источнику трехфазного переменного тока; в обмотку возбуждения 2 подается от постороннего источника постоянный ток. Благодаря взаимодействию вращающегося магнитного поля 4, созданного трехфазной обмоткой якоря, и поля, созданного обмоткой возбуждения, возникает электромагнитный момент M (рис. 291, б), приводящий ротор 3 во вращение. Однако в синхронном двигателе в отличие от асинхронного ротор будет разгоняться до частоты вращения $n = n_1$, с которой вращается магнитное поле (до синхронной частоты вращения). Объяс-

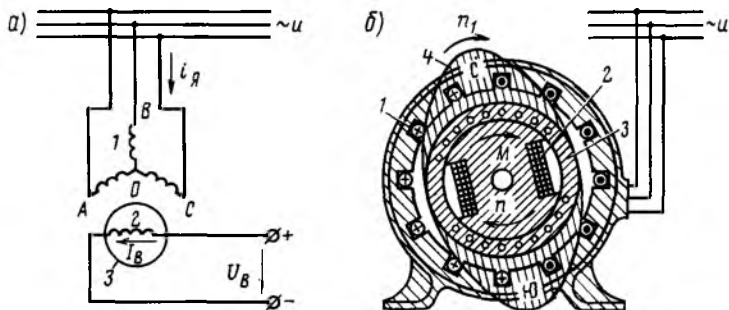


Рис. 291. Электрическая (а) и электромагнитная (б) схемы синхронного электродвигателя

няется это тем, что ток в обмотку ротора подается от постороннего источника, а не индуцируется в нем магнитным полем статора и, следовательно, не зависит от частоты вращения вала двигателя. Характерной особенностью синхронного двигателя является постоянная частота вращения его ротора независимо от нагрузки.

Электромагнитный момент. Электромагнитный момент в синхронном двигателе возникает в результате взаимодействия магнитного потока ротора (потока возбуждения Φ_B) с вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазным током, протекающим по обмотке якоря (потоком якоря Φ_A). При холостом ходе машины оси магнитных полей статора и ротора совпадают (рис. 292, а). Поэтому электромагнитные силы f , возникающие между «полюсами» статора и полюсами ротора, направлены радиально (рис. 292, б) и электромагнитный момент машины равен нулю. При работе машины в двигательном режиме (рис. 292, в и г) ее ротор под действием приложенного к валу внешнего нагрузочного момента $M_{вн}$ смещается на некоторый угол θ против направления вращения. В этом случае в результате электромагнитного взаимодействия между ротором и статором создаются электромагнитные силы f , направленные по направлению вращения, т. е. образуется вращающий электромагнитный момент M , который стремится преодолеть действие внешнего момента $M_{вн}$. Максимум момента M_{max} соответствует углу $\theta = 90^\circ$, когда оси полюсов ротора расположены между осями «полюсов» статора.

Если нагрузочный момент $M_{вн}$, приложенный к валу электродвигателя, станет больше M_{max} , то двигатель под действием внешнего момента $M_{вн}$ останавливается; при этом по обмотке якоря неподвижного двигателя будет протекать очень большой ток. Этот режим называется *выпаданием из синхронизма*, он является аварийным и не должен допускаться.

При работе машины в генераторном режиме (рис. 292, д и е) ротор под действием приложенного к валу внешнего момента $M_{вн}$ смещается на угол θ по направлению вращения. При этом создаются электромагнитные силы, направленные против вращения,

т. е. образуется тормозной электромагнитный момент M . Таким образом, при изменении значения и направления внешнего момента на валу ротора $M_{вн}$ изменяется лишь угол θ между осями полей статора и ротора, в то время как в асинхронной машине в этом случае изменяется частота вращения ротора.

Пуск в ход и регулирование частоты вращения. *Синхронный двигатель не имеет начального пускового момента.* Если подключить обмотку якоря к сети переменного тока, когда ротор неподвижен, а по обмотке возбуждения проходит постоянный ток, то за один период изменения тока электромагнитный момент будет дважды менять свое направление, т. е. средний момент за период будет равен нулю. Следовательно, для пуска в ход синхронного двигателя необходимо разогнать его ротор с помощью внешнего момента до частоты вращения, близкой к синхронной. Для этой цели применяют *метод асинхронного пуска*. Синхронный двигатель пускают в ход как асинхронный, для чего его снабжают специальной короткозамкнутой пусковой обмоткой 3 (рис. 293). В полюсные наконечники ротора 2 синхронного двигателя закладывают медные или латунные стержни, замкнутые накоротко двумя торцовыми кольцами. Пусковая обмотка выполнена подобно беличьей клетке асинхронной машины, но занимает лишь часть окружности ротора. В некоторых двигателях специальная короткозамкнутая обмотка

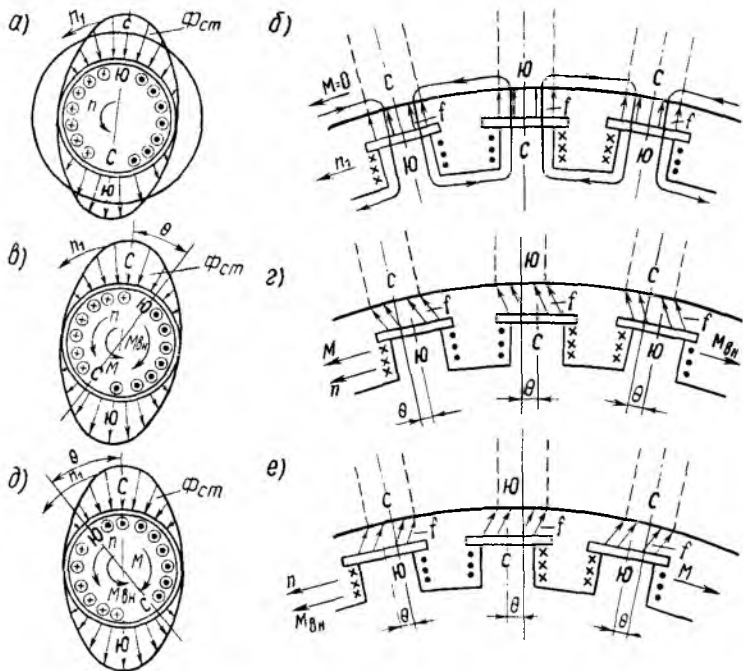


Рис. 292. Электромагнитный момент в синхронной машине, образующийся в различных режимах

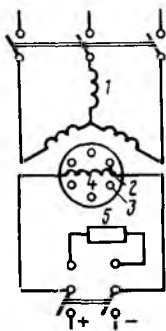


Рис. 293

Рис. 293. Схема асинхронного пуска синхронного двигателя

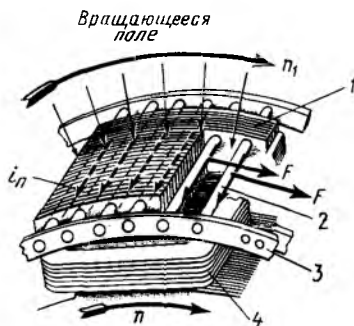


Рис. 294

Рис. 294. Устройство пусковой обмотки синхронного двигателя:

1 — ротор; 2 — стержни; 3 — кольцо; 4 — обмотка возбуждения

в ротор не закладывается, а роль ее выполняют массивный сердечник ротора и металлические клинья, закрывающие пазы ротора.

При включении трехфазной обмотки якоря 1 в сеть образуется вращающееся магнитное поле, которое, взаимодействуя с током i_n в пусковой обмотке, создает электромагнитные силы F (рис. 294) и увлекает за собой ротор. После разгона ротора до частоты вращения, близкой к синхронной, обмотка возбуждения 4 (см. рис. 293) подключается к источнику постоянного тока, и образующийся электромагнитный момент втягивает ротор в синхронизм. Во время разгона двигателя в обмотке возбуждения индуцируется вращающимся магнитным полем э. д. с., пропорциональная скольжению s ротора. В начальный момент пуска эта э. д. с. может иметь большее значение. Поэтому во избежание пробоя изоляции обмотки возбуждения ее замыкают на резистор 5, сопротивление которого в 8—12 раз превышает активное сопротивление обмотки. Регулирование частоты вращения синхронного двигателя возможно изменением частоты питающего напряжения.

Коэффициент мощности синхронного двигателя. Коэффициент мощности синхронного двигателя зависит от нагрузки и тока в обмотке возбуждения. Путем регулирования тока возбуждения можно при любой нагрузке синхронной машины изменять ее $\cos \varphi$, т. е. ее реактивную мощность и добиваться того, чтобы при различных нагрузках она работала с $\cos \varphi = 1$ или с опережающим током I_n . Это является одним из ее больших преимуществ по сравнению с асинхронной машиной, которая при всех возможных режимах работает при отстающем токе.

Достоинства и недостатки синхронных двигателей. Синхронные двигатели имеют следующие достоинства: строгое постоянство частоты вращения независимо от механической нагрузки на валу; меньшая, чем у асинхронных двигателей чувствительность к коле-

баниям напряжения; возможность работы при $\cos \varphi = 1$. Это приводит к улучшению $\cos \varphi$ сети, а также к сокращению размеров самого двигателя, так как его ток меньше тока асинхронного двигателя той же мощности. При работе с опережающим током синхронные двигатели служат генераторами реактивной мощности, поступающей в асинхронные двигатели, что снижает потребление этой мощности от генераторов электростанций.

Недостатками синхронных двигателей являются: сложность конструкции по сравнению с асинхронными; сравнительная сложность пуска в ход; трудности с регулированием частоты вращения, которое возможно только путем изменения частоты питающего напряжения.

Указанные недостатки синхронных двигателей делают их менее выгодными, чем асинхронные двигатели, при ограниченных мощностях примерно до 100 кВт. Однако при более высоких мощностях, когда особенно важно иметь высокий $\cos \varphi$ и уменьшенные габаритные размеры машины, синхронные двигатели предпочтительнее асинхронных.

Контрольные вопросы

1. Как устроен и работает асинхронный двигатель?
2. Что такое скольжение и как оно определяется?
3. На какие типы подразделяют асинхронные двигатели? Каковы их характеристики?
4. Расскажите о конструкции асинхронного двигателя с фазным ротором.
5. Каковы особенности устройств асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?
6. Как осуществляется пуск в ход асинхронных двигателей?
7. Какими способами регулируют частоту вращения ротора асинхронного двигателя?
8. Как достигают изменения направления вращения ротора асинхронного двигателя?
9. Какова конструкция синхронного генератора?
10. Какими способами регулируют напряжение и частоту синхронного генератора?
11. Какие особенности устройства синхронного двигателя?
12. Как осуществляют пуск в ход синхронного двигателя?

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

§ 90. Назначение и классификация электрических аппаратов

Электрическим аппаратом называют электротехническое устройство, предназначенное для регулирования, контроля и защиты источников электрической энергии и электрических приемников, а также для контроля и регулирования различных электрических процессов. По назначению их подразделяют на аппараты оперативного отключения (включения), защитные — аварийного отключения (включения), пускорегулирующие и контролирующие.

Оперативные аппараты служат для подключения или отключения определенной установки обслуживающим ее персоналом. Такие аппараты часто называют *коммутирующими*. К ним относят различные рубильники, выключатели, контакторы и т. д. Защитные аппараты аварийного отключения служат для ограничения амплитуды аварийных токов и длительности их протекания. В результате воздействия таких токов перегреваются обмотки электрических машин, шины, кабели и другие токопроводы, нарушается электрическая изоляция, обгорают и плавятся контактные поверхности электрических аппаратов. Динамические удары вызывают повреждение шин, изоляторов, обмоток электрических машин, реакторов, трансформаторов. К защитным аппаратам относят различные автоматические выключатели и плавкие предохранители. Выключатели снабжены необходимым приводом (ручным или электрическим) и дугогасительным устройством, обеспечивающим гашение электрической дуги, возникающей между контактами при их размыкании. Пускорегулирующие аппараты предназначены для осуществления пуска, регулирования частоты вращения, напряжения и тока электрических машин. К ним относятся контакторы, пускатели, командоконтроллеры.

Контакторы представляют собой оперативные аппараты с дистанционным управлением, предназначенные для частых включений и отключений электрических цепей как без тока, так и при номинальных токах нагрузки. Они в отличие от автоматических выключателей не имеют устройств для контроля значения тока.

Командоконтроллеры имеют сравнительно большое число контактов, замыкаемых и размыкаемых в определенной последовательности при повороте вала. Привод вала может быть дистанционный или ручной.

Контролирующие аппараты служат для контроля за работой электрических устройств. В случае нарушения установленного ре-

жима работы они подают электрические сигналы или воздействуют на органы, управляющие данным устройством. К ним относятся различные регуляторы и реле (защитные реле, реле тока, напряжения, времени, тепловые реле и т. д.). Они имеют дистанционное управление и не имеют системы дугогашения.

Защитные реле срабатывают при возникновении аварийных режимов и подают сигнал на отключение силовой цепи соответствующим выключателям или на систему сигнализации.

Токовые реле срабатывают при определенном значении тока, превышающем заданный ток трогания, и приходят в исходное состояние при токах, меньших тока отпускания. В таких реле предусматривается возможность регулирования токов срабатывания и отпускания. Токовые реле могут быть электромагнитные и тепловые. Тепловые реле реагируют на температуру нагрева биметаллического элемента, обтекаемого током контролируемой цепи. Такие реле часто встраивают в автоматические выключатели и аппараты, предназначенные для оперативного дистанционного управления работой электродвигателей и других электрических потребителей.

Реле напряжения контролируют уровень напряжения в сети. Они срабатывают и возвращаются в исходное состояние при определенных значениях напряжения.

Реле времени представляют собой аппараты, позволяющие создать регулируемую выдержку времени между моментом подачи напряжения на катушку реле и моментом замыкания (размыкания) контактов. Основным отличием таких реле является наличие механизма выдержки времени (электромагнитного, теплового или часового).

В системах управления часто применяют промежуточные реле. Эти реле имеют одну катушку управления и несколько пар контактов, разомкнутых или замкнутых в исходном состоянии. Такие реле осуществляют логические операции управления включением и отключением различных электрических аппаратов, находящихся в разных цепях.

Разъединители являются аппаратами оперативного отключения, предназначенными для видимого разрыва электрической цепи при отсутствии тока. Они включаются, как правило, последовательно с основным оперативным аппаратом и выполняют вспомогательные функции, в частности обеспечения безопасной работы обслуживающего персонала на обесточенных цепях. Разъединители рассчитываются на полный номинальный ток цепи и не имеют дугогасительных устройств.

Все контактные аппараты имеют следующие основные части: контактную систему и привод. Во многих таких аппаратах имеется также система дугогашения.

В бесконтактных электрических аппаратах эти элементы могут полностью или частично отсутствовать, поскольку в них используется иной принцип ограничения и отключения тока (без механического разрыва).

§ 91. Контакты электрических аппаратов

Типы контактных соединений. *Электрическим контактом* называют место перехода тока из одной токоведущей части аппарата или иного токопровода в другую часть. В аппаратах контактом также называют конструктивный элемент, с помощью которого в процессе работы аппарата осуществляется периодическое замыкание и размыкание электрической цепи.

Контактная система электрического аппарата состоит в большинстве случаев из пары или нескольких пар подвижных и неподвижных элементов, при замыкании которых образуется электрическая цепь.

Различают две группы контактных соединений: неподвижные и подвижные. Неподвижные контактные соединения служат для жесткого присоединения внутренних токоведущих частей и внешнего присоединения соединительных проводов к аппарату. Во время работы аппарата такие соединения не разъединяются. Подвижные контактные соединения имеют один или несколько подвижных контактов, которые в процессе работы, соприкасаясь с неподвижными контактами, создают электрическую цепь. В зависимости от характера соприкосновения элементов контактного соединения контакты подразделяют на поверхностные (плоскостные), линейные и точечные. В поверхностных контактах электрический контакт осуществляется по плоскости $ABCD$ (рис. 295, *а*), в линейных — по линии AB (рис. 295, *б*), в точечных — в точке A (рис. 295, *в*).

Условия работы контактов. Полное сопротивление контактного соединения включает в себя сопротивления собственного материала контактных элементов и переходного сопротивления в месте их соприкосновения. Переходное сопротивление зависит от материала контактов, силы прижатия их друг к другу, площади контактной поверхности, ее состояния и температуры. При соприкосновении двух контактных поверхностей 1 и 2 (рис. 296) электрическое соединение происходит не по всей поверхности, а по точкам соприкосновения, которые образуются из-за неточностей обработки поверхностей и их износа в результате воздействия электрической дуги. При нажатии контактов происходит частичное смятие материала контакта в точках соприкосновения. Чем больше контактное нажатие F и мягче материал контакта, тем больше площадь реального соединения и меньше переходное сопротивление R_n (рис. 297, *а*).

Каждый контактный материал характеризуется некоторым пре-

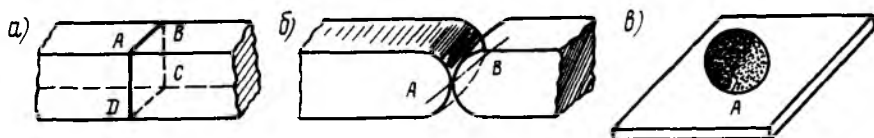


Рис. 295. Формы контактных поверхностей

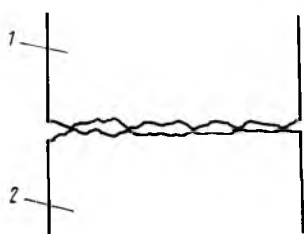


Рис. 296. Соприкасающиеся контактные поверхности

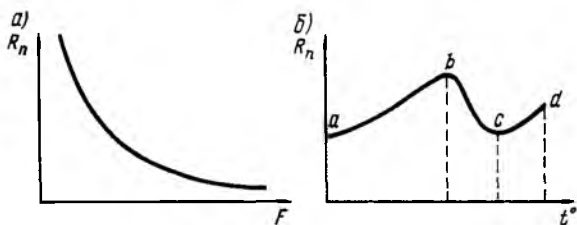


Рис. 297. Зависимости переходного сопротивления от нажатия (а) и от температуры (б)

дельным значением нажатия, свыше которого переходное сопротивление практически не снижается. Очень резкую зависимость переходного сопротивления от нажатия имеют угольные контакты. Это свойство угольного контакта широко используют в угольных регуляторах напряжения, осуществляющих регулирование тока возбуждения электрических машин.

Чрезмерное нагревание контактов приводит к их окислению, а окисные пленки большинства металлов не проводят электрический ток и резко повышают переходное сопротивление (рис. 297, б). На участке $a-b$ переходное сопротивление растет вследствие все более интенсивного возникновения окисной пленки. На участке $b-c$ сопротивление падает вследствие нарушения прочности материала и его размягчения, что приводит к увеличению площади соприкосновения. На участке $c-d$ сопротивление вновь начинает расти вследствие резкого увеличения удельного сопротивления материала. Этот рост будет продолжаться до полного расплавления материала.

Особенно значительные повышения температуры контактов могут иметь место при прохождении через них тока короткого замыкания. Предельно допустимая температура при токах короткого замыкания для контактов из меди составляет $200-300^{\circ}\text{C}$, а для алюминиевых — $150-200^{\circ}\text{C}$. В случаях превышения предельной допустимой температуры механическая прочность материала контактов резко уменьшается.

Нагревание контактов проходящим током может привести к расплавлению и привариванию контактов друг к другу.

Свойства аппаратов выдерживать определенные значения аварийных токов без повреждения характеризуются его электродинамической стойкостью. Она определяется наибольшим значением тока, который может выдержать аппарат во включенном состоянии, не повреждаясь и не отключаясь самопроизвольно.

Размеры контактной поверхности мало влияют на контактное сопротивление, поскольку с увеличением поверхности и соответственно числа точек соприкосновения снижаются нажатие на единицу площади и смятие. Однако от поверхности контакта зависят условия его нагрева и при том же сопротивлении большие по размеру контакты допускают большую нагрузку током.

Материал контакта должен обладать высокой механической прочностью, хорошей электропроводностью, теплостойкостью и антикоррозионной стойкостью. Широкое распространение получили контакты из меди и ее сплавов (латунь, бронза) для изготовления как подвижных, так и неподвижных контактных соединений. При длительной непрерывной работе во избежание окисления медные контакты покрывают слоем олова или выполняют с серебряными накладками.

Алюминий и сталь применяют, главным образом, для неподвижных контактных соединений. Для защиты от коррозии алюминиевые контакты иногда оцинковывают, а стальные покрывают слоем кадмия. Большой теплостойкостью и твердостью обладают вольфрамовые контакты.

Никель, платину и серебро используют для контактов мало-мощных аппаратов, где требуется точность и надежность срабатывания.

Серебряные контакты имеют проводящую окисную пленку с такой же электропроводностью, как и сам металл, а платиновые практически не покрываются окисной пленкой.

Широкое применение в электрических аппаратах получили металлокерамические контакты, выполненные путем прессования смеси порошков различных металлов.

На контакты электрических аппаратов в моменты их включения и отключения действуют возникающие электродинамические и механические силы, которые влияют на переходное сопротивление и приводят к механическому износу контактов. В первый момент включения аппарата, когда на контакты еще полностью не действует нажатие, соприкосновение происходит по отдельным точкам, через которые устремляется весь ток (рис. 298, *а*). При этом линии тока в месте контактного перехода искривляются, располагаются параллельно и имеют в нижнем и верхнем контактных элементах противоположное направление (рис. 298, *б*). Магнитные поля этих токов, взаимодействуя друг с другом, создают электродинамические усилия взаимного отталкивания F , которые стремятся разомкнуть контакты и вызывают их вибрацию.

Кроме электродинамических усилий, отталкиванию контактов способствуют механические силы, возникающие в момент упругого удара одного контакта о другой. Упругий удар при соприкосновении контактов вызывает ряд повторных отскоков и совместных перемещений обоих контактных элементов под действием нажатия и инерции. Такие вибрации приводят к расплыванию и механическому разрушению контактов.

В момент размыкания контактов переходное сопротивление резко увеличивается, возрастает температура и возникает электрическая дуга, что приводит к электрическому износу контактов (их выгоранию и эрозии).

Механический и электрический износ контактов в основном определяет срок службы аппарата (выражаемый числом его срабатываний) и максимально допустимую частоту его включений.

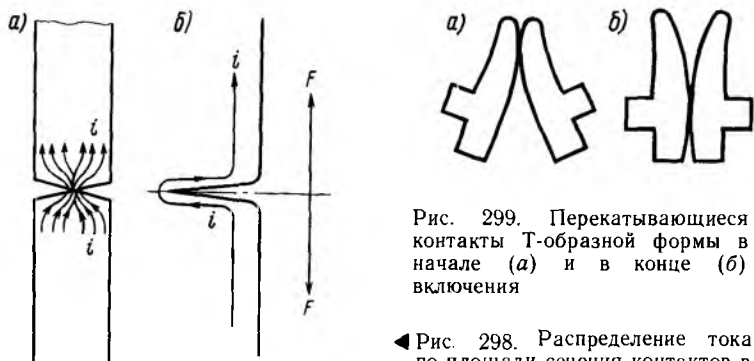


Рис. 299. Перекатывающиеся контакты Г-образной формы в начале (а) и в конце (б) включения

◀ Рис. 298. Распределение тока по площади сечения контактов в момент включения

Способы уменьшения износа контактов. В аппаратах, рассчитанных на большое число включений и отключений (выключатели, контакторы, контроллеры), применяют конструкции контактов с перекатывающимися поверхностями. Такие контакты замыкаются и размыкаются, соприкасаясь одним участком поверхности, где происходит горение электрической дуги и наблюдается повышенный механический износ, а затем в процессе работы передвигаются друг относительно друга, и в дальнейшем электрический контакт поддерживается между чистыми поверхностями (рис. 299). Эти контакты бывают Г- или Т-образной формы и изготавливаются из профильной твердой меди.

Перекатывающиеся контакты износостойки, поскольку при их работе трение скольжения невелико. При перекатывании контактных элементов происходит их самоочистка от окисных пленок.

Другим методом защиты контактной поверхности от обгорания является использование дополнительных дугогасительных контактов 1, которые включены параллельно главным контактам 2 (рис. 300). Главные контакты рассчитывают на длительное протекание рабочего тока, а дугогасительные — на меньший ток, но их контактные поверхности выполняют из тугоплавкого материала. При включении сначала замыкаются дугогасительные контакты, и электрическая дуга, возникающая при отскоках этих контактов, может вызывать некоторый их подгар. Затем включаются главные контакты, шунтируя дугогасительные.

При отключении сначала размыкаются главные контакты, но цепь остается замкнутой через дугогасительные контакты, и только после полного отключения главных контактов начинают размыкаться дугогасительные, разрывая электрическую цепь. Таким образом, при включении и при отключении аппарата электрическая цепь создается и разрывается дугогасительными контактами, на которых возникает электрическая дуга и образуются подгар и окисные пленки. Во всех случаях электрической дуги между главными контактами не возникает, и они соприкасаются чистыми поверхностями.

В электрических аппаратах высокого напряжения широкое применение получили торцовые контакты, образуемые при соприкосновении плоских контактных элементов. Подвижный контакт представляет собой полую трубу 1 (рис. 301, а) с плоским торцом. Неподвижный контакт 2 выполнен в виде цилиндра с плоским основанием. Для надежного прижатия контактных элементов друг к другу неподвижный контакт 2 имеет возможность незначительного перемещения из-за сжатия пружины 3. Благодаря этому перемещению компенсируются перекосы контактов и их износ в процессе эксплуатации.

Щеточные контакты (рис. 301, б) применяются в реостатах, различных командоконтроллерах, переключателях и относятся к линейным соединениям. Подвижной контакт 4 (щетка) состоит из набора пластин из твердой меди или специальной бронзы, срезаемого под определенным углом. Он соприкасается с основанием неподвижного контакта 2. Для усиления механической прочности набора верхнюю пластинку выполняют более толстой. Такой контакт имеет большую поверхность соприкосновения, чем аналогичный сплошной.

В аппаратах барабанного типа — контроллерах часто используют пальцевые контакты (рис. 302, а). Неподвижный контакт 2 (палец) прижимается к барабану, вращающемуся на оси 4, с помощью привода, пружиной 1. Подвижные контакты 3, 5, 6 укреплены на барабане в виде полос или сегментов, обычно выполненных из меди.

В зависимости от значения тока параллельно может устанавливаться несколько пальцев.

В различных рубильниках, разъединителях, плавких предохранителях применяют рубящие контакты (рис. 302, б), состоящие из плоского медного или латунного ножа 7 (подвижного контакта) и неподвижного контакта 8 в виде стоек из упругого металла. При больших токах стойки усиливаются дополнительными стальными пружинами 9.

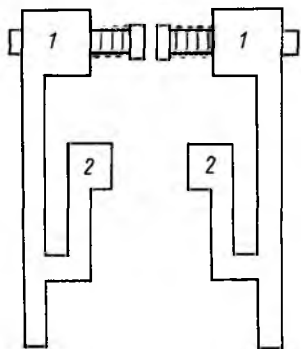


Рис. 300. Главные и дугогасительные контакты аппарата

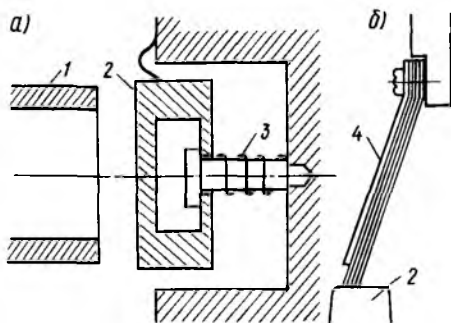


Рис. 301. Торцовые (а) и щеточные (б) контакты

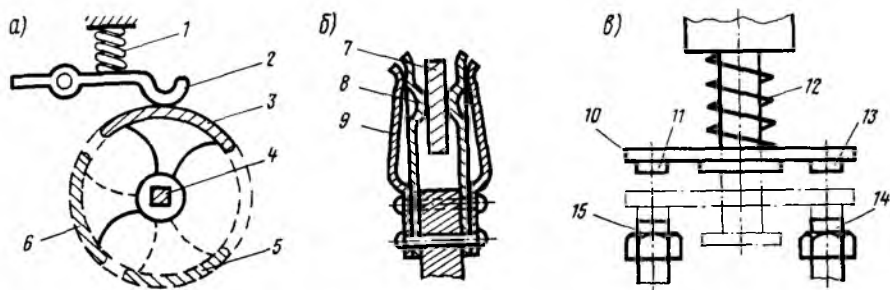


Рис. 302. Пальцевый (а), рубящий (б) и мостиковый (в) контакты

В кнопках управления, реле, путевых выключателях применяют мостиковые контакты (рис. 302, в). Контактный мостик 10 с припаянными к нему контактами 11 и 13 устанавливается на подвижной части аппарата. При включении такой мостиковый контакт замыкает неподвижные контакты 14 и 15, создавая между ними электрическую цепь. Нажатие контактов зависит от пружины 12.

На одной подвижной части может быть установлено несколько замыкающих и размыкающих контактов, каждый из которых включает или отключает свою электрическую цепь.

§ 92. Электрическая дуга и методы ее гашения

Физические основы горения дуги. При размыкании контактов электрического аппарата вследствие ионизации пространства между ними возникает электрическая дуга. Промежуток между контактами при этом остается проводящим и прохождение тока по цепи не прекращается.

Для ионизации и образования дуги необходимо, чтобы напряжение между контактами было примерно 15—30 В и ток цепи 80—100 мА.

При ионизации пространства между контактами заполняющие его атомы газа (воздуха) распадаются на заряженные частицы — электроны и положительные ионы. Поток электронов, излучаемых с поверхности контакта, находящегося под отрицательным потенциалом (катода), движется по направлению к положительно заряженному контакту (аноду); поток же положительных ионов движется к катоду (рис. 303, а).

Главными носителями тока в дуге являются электроны, так как положительные ионы, имея большую массу, движутся значительно медленнее электронов и переносят поэтому в единицу времени гораздо меньше электрических зарядов. Однако положительные ионы играют большую роль в процессе горения дуги. Подходя к катоду, они создают вблизи него сильное электрическое поле, которое воздействует на электроны, имеющиеся в металлическом катоду, и вырывают их с его поверхности. Это явление

называется автоэлектронной эмиссией (рис. 303, б). Кроме того, положительные ионы непрерывно бомбардируют катод и отдают ему свою энергию, которая переходит в тепло; при этом температура катода достигает 3000—5000 °С.

При увеличении температуры движение электронов в металле катода ускоряется, они приобретают большую энергию и начинают покидать катод, вылетая в окружающую среду. Это явление носит название *термоэлектронной эмиссии*. Таким образом, под действием авто- и термоэлектронной эмиссии в электрическую дугу поступают с катода все новые и новые электроны.

При своем перемещении от катода к аноду электроны, сталкиваясь на своем пути с нейтральными атомами газа, расщепляют их на электроны и положительные ионы (рис. 303, в). Этот процесс называется *ударной ионизацией*. Появившиеся в результате ударной ионизации новые, так называемые вторичные электроны начинают двигаться к аноду и при своем движении расщепляют все новые атомы газа. Рассмотренный процесс ионизации газа носит лавинообразный характер подобно тому, как один камень, брошенный с горы, захватывает на своем пути все новые и новые камни, порождая лавину. В результате промежутки между двумя контактами заполняются большим количеством электронов и положительных ионов. Эта смесь электронов и положительных ионов называется *плазмой*. В образовании плазмы значительную роль играет термическая ионизация, которая происходит в результате повышения температуры, вызывающей увеличение скорости движения заряженных частиц газа.

Электроны, ионы и нейтральные атомы, образующие плазму, непрерывно сталкиваются друг с другом и обмениваются энергией; при этом некоторые атомы под ударами электронов приходят в возбужденное состояние и испускают избыток энергии в виде светового излучения. Однако электрическое поле, действующее между контактами, заставляет основную массу положительных ионов двигаться к катоду, а основную массу электронов — к аноду.

В электрической дуге постоянного тока в установившемся режиме определяющей является термическая ионизация. В дуге переменного тока при переходе тока через нуль существенную роль играет ударная ионизация, а в течение остального времени горения дуги — термическая ионизация.

При горении дуги одновременно с ионизацией промежутка между контактами происходит обратный процесс. Положительные ионы и электроны, взаимодействуя друг с другом в межконтактном пространстве или при попадании на стенки камеры, в которой горит дуга, образуют нейтральные атомы. Этот процесс называется *рекомбинацией*; при прекращении ионизации рекомбинация приводит к исчезновению электронов и ионов из межэлектродного пространства — происходит его деионизация. Если рекомбинация осуществляется на стенке камеры, то она сопровождается выделением энергии в виде тепла; при рекомбинации в межэлектродном пространстве энергия выделяется в виде излучения.

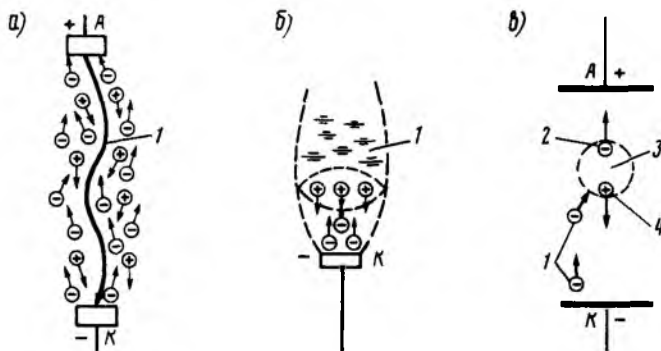


Рис. 303. Направление движения электронов и положительных ионов в электрической дуге (а), возникновение автоэлектронной эмиссии из катода (б) и ударной ионизации атомов газа в пространстве между контактами (в):

1, 2 — первичные и вторичный электроны; 3 — атом газа; 4 — положительный ион

При соприкосновении со стенками камеры, в которой находятся контакты, дуга охлаждается, что приводит к усилению деионизации. Деионизация происходит также в результате движения заряженных частиц из центральных областей дуги с более высокой концентрацией в периферийные области с низкой концентрацией. Этот процесс называется *диффузией электронов и положительных ионов*.

Зону горения дуги условно делят на три участка: катодную зону, ствол дуги и анодную зону. В катодной зоне происходит интенсивная эмиссия электронов из отрицательного контакта, падение напряжения в этой зоне составляет около 10 В.

В стволе дуги образуется плазма с приблизительно одинаковой концентрацией электронов и положительных ионов. Поэтому в каждый момент времени суммарный заряд положительных ионов плазмы компенсирует суммарный отрицательный заряд ее электронов. Большая концентрация заряженных частиц в плазме и отсутствие в ней электрического заряда обуславливают высокую электропроводность ствола дуги, которая близка к электропроводности металлов. Падение напряжения в стволе дуги приблизительно пропорционально ее длине. Анодная зона заполнена, главным образом, электронами, подходящими из ствола дуги к положительному контакту. Падение напряжения в этой зоне зависит от тока в дуге и размеров положительного контакта. Суммарное падение напряжения в дуге составляет 15—30 В.

Зависимость падения напряжения $U_{дг}$, действующего между контактами, от тока I , проходящего через электрическую дугу, называется вольт-амперной характеристикой дуги (рис. 304, а). Напряжение $U_з$, при котором возможно зажигание дуги при токе $I=0$, называется *напряжением зажигания*. Значение напряжения зажигания определяется материалом контактов, расстоянием между ними, температурой и окружающей средой. После возникновения

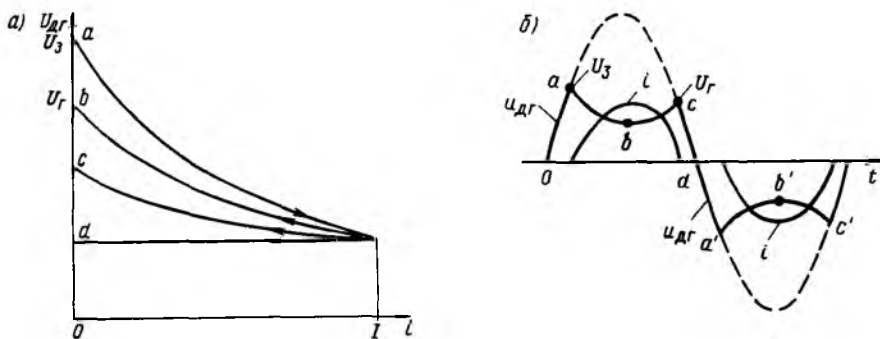


Рис. 304. Вольт-амперные характеристики дуги постоянного тока (а) и кривые изменения напряжения и тока (б) при горении дуги переменного тока

электрической дуги ее ток увеличивается до значения, близкого к току нагрузки, который протекал через контакты до отключения. При этом сопротивление межконтактного промежутка падает быстрее, чем увеличивается ток, что приводит к уменьшению падения напряжения $U_{дг}$. Режим горения дуги, соответствующий кривой a , называется *статическим*.

При снижении тока до нуля процесс соответствует кривой b и дуга прекращается при меньшем падении напряжения, чем напряжение зажигания. Напряжение U_r , при котором дуга гаснет, называют *напряжением гашения*. Оно всегда меньше напряжения зажигания вследствие повышения температуры контактов и увеличения проводимости межконтактного промежутка. Чем больше скорость снижения тока, тем меньше напряжение гашения дуги в момент прекращения тока. Вольт-амперные характеристики b и c соответствуют снижению тока с различной скоростью (для кривой c больше, чем для кривой b), а прямая d соответствует практически мгновенному снижению тока. Такой характер вольт-амперных характеристик объясняется тем, что при быстром изменении тока ионизационное состояние межконтактного промежутка не успевает следовать за изменением тока. Для деионизации промежутка требуется определенное время, и поэтому, несмотря на то, что ток в дуге упал, проводимость промежутка осталась прежней, соответствующей большому току.

Вольт-амперные характеристики $b-d$, полученные при быстром изменении тока до нуля, называются *динамическими*. Для каждого межконтактного промежутка, материала электродов и среды имеются одна статическая характеристика дуги и множество динамических, заключенных между кривыми a и d .

При горении дуги переменного тока в течение каждого полупериода имеют место такие же физические процессы, что и в дуге постоянного тока. В начале полупериода напряжение на дуге возрастает по синусоидальному закону до значения напряжения зажигания U_3 — участок $0-a$ (рис. 304, б), а затем после возникнове-

ния дуги падает по мере возрастания тока — участок $a-b$. Во вторую часть полупериода, когда ток начинает снижаться, напряжение на дуге вновь возрастает до значения напряжения гашения U_g при спаде тока до нуля — участок $b-c$.

В течение следующего полупериода напряжение меняет знак и по синусоидальному закону возрастает до значения напряжения зажигания, соответствующего точке a' вольт-амперной характеристики. По мере роста тока напряжение снижается, а затем вновь повышается при снижении тока. Кривая напряжения дуги, как видно из рис. 304, б, имеет форму срезанной синусоиды. Процесс деионизации заряженных частиц в промежутке между контактами продолжается лишь незначительную долю периода (участки $0-a$ и $c-a'$) и, как правило, за это время не заканчивается, в результате чего дуга возникает снова. Окончательное гашение дуги будет иметь место только после ряда повторных зажиганияй во время одного из последующих переходов тока через нуль.

Возобновление дуги после перехода тока через нуль объясняется тем, что после спада тока к нулевому значению ионизация, существующая в стволе дуги, исчезнет не сразу, так как она зависит от температуры плазмы в остаточном стволе дуги. По мере уменьшения температуры возрастает электрическая прочность межконтактного промежутка. Однако если в какой-то момент времени мгновенное значение приложенного напряжения будет больше пробивного напряжения промежутка, то произойдет его пробой, возникнет дуга и потечет ток другой полярности.

Условия гашения дуги. Условия гашения дуги постоянного тока зависят не только от ее вольт-амперной характеристики, но и от параметров электрической цепи (напряжение, ток, сопротивление и индуктивность), которую включают и отключают контакты аппарата. На рис. 305, а показана вольт-амперная характеристика дуги

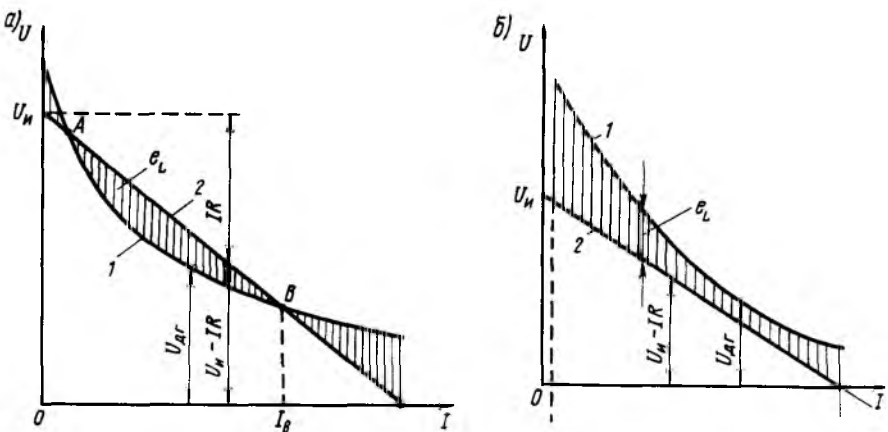


Рис. 305. Вольт-амперные характеристики дуги при устойчивом горении (а) и гашении (б)

(кривая 1) и зависимость падения напряжения на резисторе R , включенном в данную цепь (прямая 2). В установившемся режиме напряжение $U_{и}$ источника тока равно сумме падений напряжения в дуге $U_{дг}$ и IR на резисторе R . При изменении тока в цепи к ним добавляется э. д. с. самоиндукции $\pm e_L$ (изображена заштрихованными ординатами). Длительное горение дуги возможно только в режимах, соответствующих точкам A и B , когда напряжение $U_{и} - IR$, приложенное к промежутку между контактами, равно падению напряжения $U_{дг}$. При этом в режиме, соответствующем точке A , горение дуги неустойчиво. Если при горении дуги в этой точке характеристики ток по каким-то причинам увеличился, то напряжение $U_{дг}$ станет меньше приложенного напряжения $U_{и} - IR$. Избыток приложенного напряжения вызовет увеличение тока, который будет расти до тех пор, пока не достигнет значения I_B .

Если в режиме, соответствующем точке A , ток уменьшится, приложенное напряжение $U_{и} - IR$ станет меньше $U_{дг}$ и ток будет продолжать уменьшаться, пока дуга не погаснет. В режиме, соответствующем точке B , дуга горит устойчиво. При увеличении тока свыше I_B падение напряжения в дуге $U_{дг}$ станет больше приложенного напряжения $U_{и} - IR$ и ток начнет уменьшаться. Когда ток в цепи станет меньше I_B , приложенное напряжение $U_{и} - IR$ станет больше $U_{дг}$ и ток начнет увеличиваться.

Очевидно, чтобы обеспечить гашение дуги во всем заданном диапазоне изменения тока I от наибольшего значения до нуля при отключении цепи, нужно, чтобы вольт-амперная характеристика 1 располагалась выше прямой 2 для отключаемой цепи (рис. 305, б). При этом условии падение напряжения в дуге $U_{дг}$ будет всегда больше приложенного к ней напряжения $U_{и} - IR$ и ток в цепи будет уменьшаться.

Основным средством повышения падения напряжения в дуге является увеличение длины дуги. При размыкании цепей низкого напряжения со сравнительно небольшими токами гашение обеспечивается соответствующим выбором раствора контактов, между которыми возникает дуга. В этом случае дуга гаснет без каких-либо дополнительных устройств.

Для контактов, разрывающих силовые цепи, необходимая для гашения длина дуги настолько велика, что практически осуществить такой раствор контактов уже не представляется возможным. В таких электрических аппаратах устанавливают специальные дугогасительные устройства.

Дугогасительные устройства. Способы гашения дуги могут быть различные, но все они основываются на следующих принципах: принудительное удлинение дуги; охлаждение межконтактного промежутка посредством воздуха, паров или газов; разделенные дуги на ряд отдельных коротких дуг.

При удлинении дуги и удалении ее от контактов происходит увеличение падения напряжения в столбе дуги и напряжение, приложенное к контактам, становится недостаточным для поддержания дуги.

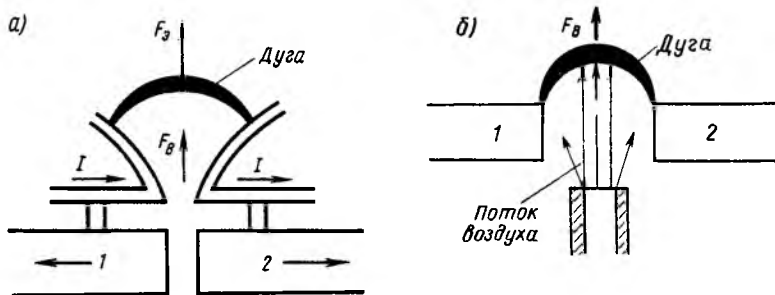


Рис. 306. Дугогасительное устройство с защитными рогами (а) и гашение дуги (б)

Охлаждение межконтактного промежутка вызывает повышенную теплоотдачу столба дуги в окружающее пространство, вследствие чего заряженные частицы, перемещаясь из внутренней части дуги на ее поверхность, ускоряют процесс деионизации.

Разделение дуги на ряд отдельных коротких дуг приводит к повышению суммарного падения напряжения в них и приложенное к контактам напряжение становится недостаточным для устойчивого поддержания дуги, поэтому происходит ее гашение.

Принцип гашения путем удлинения дуги используется в аппаратах с защитными рогами и в рубильниках. Электрическая дуга, возникающая между контактами 1 и 2 (рис. 306, а) при их размыкании, поднимается вверх под действием силы F_B , создаваемой потоком нагретого ею воздуха, растягивается и удлиняется на расходящихся неподвижных рогах, что приводит к ее гашению. Удлинению и гашению дуги способствует также электродинамическое усилие F_3 , создаваемое в результате взаимодействия тока дуги с возникающим вокруг нее магнитным полем. При этом дуга ведет себя как проводник с током, находящийся в магнитном поле (рис. 307, а), которое, как было показано в главе III, стремится вытолкнуть его из пределов поля.

Для увеличения электродинамического усилия F_3 , действующего на дугу, в цепь одного из контактов 1 в ряде случаев включают специальную дугогасительную катушку 2 (рис. 307, б), создающую в зоне дугообразования сильное магнитное поле, маг-

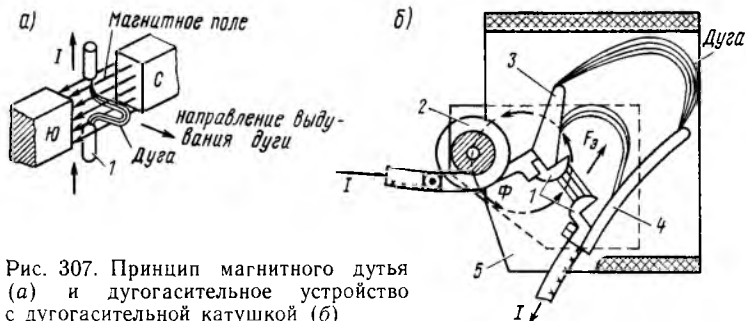


Рис. 307. Принцип магнитного дутья (а) и дугогасительное устройство с дугогасительной катушкой (б)

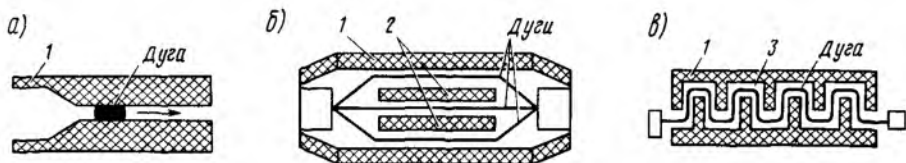


Рис. 308. Дугогасительные камеры

нитный поток которого Φ , взаимодействуя с током I дуги, обеспечивает интенсивное выдувание и гашение дуги. Быстрое перемещение дуги по рогам 3, 4 вызывает ее интенсивное охлаждение, что также способствует ее деионизации в камере 5 и гашению.

В некоторых аппаратах применяют методы принудительного охлаждения и растягивания дуги сжатым воздухом или другим газом.

При размыкании контактов 1 и 2 (см. рис. 306, б) возникшая дуга охлаждается и выдувается из зоны контактов струей сжатого воздуха или газа с силой F_b .

Эффективным средством охлаждения электрической дуги с последующим ее гашением являются дугогасительные камеры различной конструкции (рис. 308). Электрическая дуга под действием магнитного поля, потока воздуха или иными средствами загоняется в узкие щели или лабиринт камеры (рис. 308, а и б), где она тесно соприкасается с ее стенками 1, перегородками 2, отдает им тепло и гаснет. Широко применение в электрических аппаратах э. п. с. находят лабиринтно-щелевые камеры, где дуга удлиняется не только путем растягивания между контактами, но и путем ее зигзагообразного искривления между перегородками камеры (рис. 308, в). Узкая щель 3 между стенками камеры способствует охлаждению и деионизации дуги.

К дугогасительным устройствам, действие которых основано на разделении дуги на ряд коротких дуг, относят деионную решетку (рис. 309, а), встроенную внутрь дугогасительной камеры.

Деионная решетка представляет собой набор ряда отдельных стальных пластин 3, изолированных друг относительно друга. Электрическая дуга, возникшая между размыкающимися контактами 1 и 2, разделяется решеткой на ряд более коротких дуг, соединенных последовательно. Для поддержания горения дуги без ее разделения требуется напряжение U , равное сумме околоэлектродного (анодного и катодного) падения напряжения U_3 и падения напряжения в столбе дуги $U_{ст}$.

При разделении одной дуги на n коротких дуг суммарное падение напряжения в столбе всех коротких дуг по-прежнему будет равно $U_{ст}$, как и у одной общей дуги, но суммарное околоэлектродное падение напряжения во всех дугах будет равно nU_3 . Поэтому для поддержания горения дуги в этом случае потребуется напряжение

$$U = nU_3 + U_{ст}.$$

Число дуг n равно числу пластин решетки и может быть выбрано таким, чтобы возможность устойчивого горения дуги при данном напряжении U была полностью исключена. Действие такого принципа гашения эффективно как при постоянном, так и при переменном токе. При переходе переменного тока через нулевое значение для поддержания дуги требуется напряжение 150—250 В. В связи с этим число пластин может быть выбрано значительно меньшим, чем при постоянном токе.

В плавках предохранителях с заполнителем при плавлении вставки и возникновении электрической дуги вследствие повышенного давления газов в патроне ионизированные частицы перемещаются в поперечном направлении. При этом они попадают между зернами заполнителя, остывают и деионизируются. Зерна заполнителя, передвигаясь под действием избыточного давления, разбивают дугу на большое число микродуг, чем и обеспечивается их гашение.

В предохранителях без заполнителя нередко корпус делают из материала, обильно выделяющего газ при нагревании. К таким материалам относится, например, фибра. При соприкосновении с дугой корпус нагревается и выделяет газ, способствующий гашению дуги. Аналогично гасится дуга в масляных выключателях переменного тока (рис. 309, б) с той лишь разницей, что вместо сухого заполнителя здесь используется негорючее масло. При возникновении дуги в момент размыкания подвижных 1, 3 и неподвижного 2 контактов ее гашение происходит под действием двух факторов: выделения большого количества водорода, не поддерживающего горение (в применяемом для этой цели масле содержание водорода 70—75%), и интенсивного охлаждения дуги маслом вследствие его высокой теплоемкости. Дуга гаснет в момент, когда ток равен нулю. Масло не только способствует ускоренному гашению дуги, но и служит изоляцией токоведущих и заземленных частей конструкции. Для гашения дуги в цепи постоянного тока масло не применяют, так как под действием дуги оно быстро разлагается и теряет свои изоляционные качества.

В современных электрических аппаратах гашение дуги часто осуществляется путем сочетания двух или нескольких рассмотрен-

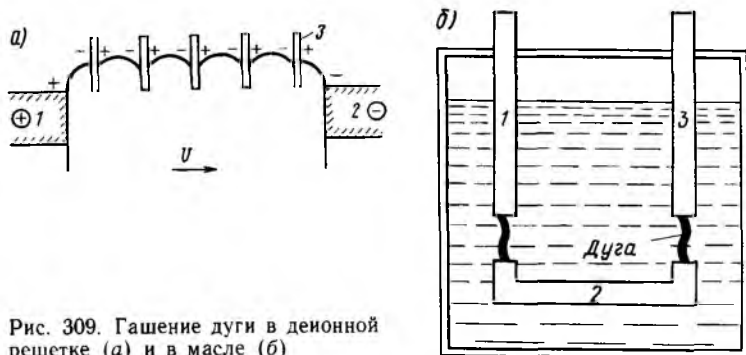


Рис. 309. Гашение дуги в деионной решетке (а) и в масле (б)

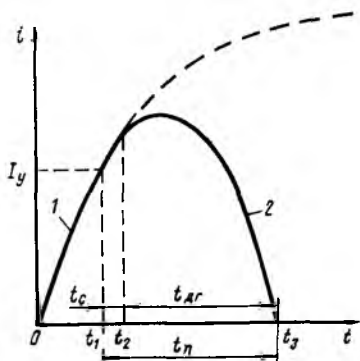


Рис. 310. Кривая изменения тока при отключении аварийного тока автоматическим выключателем

отрегулирован защитный аппарат (тока уставки I_y), аппарат срабатывает и отключает защищаемую цепь, вследствие чего ток уменьшается по кривой 2.

Время, отсчитываемое от момента подачи сигнала на отключение (или включение) аппарата до момента начала размыкания (или замыкания) контактов, называют собственным временем срабатывания аппарата t_c . При отключении момент начала размыкания контактов соответствует возникновению дуги между расходящимися контактами. В автоматических выключателях это время измеряется от момента достижения тока значения уставки t_1 до момента появления дуги между контактами t_2 . *Временем горения дуги* $t_{др}$ называется время от момента появления дуги t_2 до момента прекращения прохождения тока t_3 . Полное время отключения t_n представляет собой сумму собственного времени и времени горения дуги.

§ 93. Приводы электрических аппаратов

Для замыкания и размыкания контактов электрических аппаратов применяют различные приводы. В ручном приводе усилие передается от руки человека через систему механических передач к контактам. Ручной привод применяют в некоторых разъединителях, рубильниках, выключателях и контроллерах. Чаще всего ручной привод используют в неавтоматических аппаратах, хотя в некоторых защитных аппаратах включение осуществляется вручную, а отключение — автоматически под действием сжатой пружины. К дистанционным приводам относят электромагнитный, электропневматический, электродвигательный и тепловой приводы.

Электромагнитный привод. Наиболее широко применяется в электрических аппаратах электромагнитный привод, в котором используется сила притяжения якоря к сердечнику электромагнита или сила втягивания якоря в катушку соленоида. Любой

ных выше способов (например, с помощью дугогасительной катушки, защитных рогов и деионной решетки).

Условия гашения электрической дуги определяют отключающую способность защитных аппаратов. Она характеризуется наибольшим током, который может отключить аппарат с определенным временем гашения дуги.

При коротком замыкании электрической цепи, подключенной к источнику электрической энергии, ток в цепи возрастает по кривой 1 (рис. 310). В момент t_1 , когда он достигает значения, на которое

ферромагнитный материал, помещенный в магнитное поле, приобретает свойства магнита. Поэтому магнит или электромагнит будет притягивать к себе ферромагнитные тела. На этом свойстве основано устройство разного рода подъемных втягивающих и поворотных электромагнитов.

Сила F , с которой электромагнит или постоянный магнит притягивает к себе ферромагнитное тело — якорь (рис. 311, а),

$$F = B^2 S / (2\mu_0) = 4B^2 S \cdot 10^5, \quad (89)$$

где B — магнитная индукция в воздушном зазоре;

S — площадь сечения полюсов.

Магнитный поток Φ , создаваемый катушкой электромагнита, а следовательно, и магнитная индукция B в воздушном зазоре, как было указано выше, зависят от магнитодвижущей силы катушки, т. е. от числа витков w и тока I , протекающего по ней. Поэтому силу F (тяговое усилие электромагнита) можно регулировать, изменяя ток в его катушке.

Свойства электромагнитного привода характеризуются зависимостью силы F от положения якоря. Эта зависимость называется *тяговой характеристикой электромагнитного привода*. На ход тяговой характеристики оказывает существенное влияние форма магнитной системы.

Широкое распространение в электрических аппаратах получила магнитная система, состоящая из П-образного сердечника 1 (рис. 311, б) с катушкой 2 и поворотного якоря 4, который соединен с подвижным контактом 3 аппарата.

Примерный вид тяговых характеристик приведен на рис. 312. При полностью разомкнутых контактах воздушный зазор x между якорем и сердечником относительно велик и магнитное сопротивление системы будет наибольшим. Поэтому магнитный поток Φ в воздушном зазоре электромагнита, индукция B и тяговое усилие F будут наименьшими. Однако при правильно рассчитанном приводе это усилие должно обеспечить притяжение якоря к сердечнику.

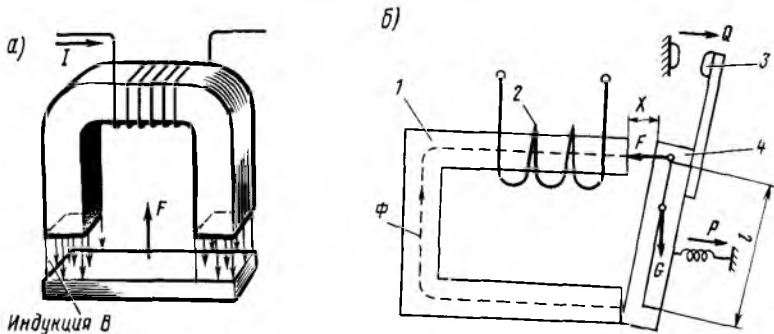


Рис. 311. Принципиальная схема электромагнита (а) и схема электромагнитного привода с П-образным магнитопроводом (б)

По мере приближения якоря к сердечнику и уменьшения воздушного зазора магнитный поток в зазоре увеличивается и соответственно возрастает тяговое усилие.

Тяговое усилие F , создаваемое приводом, должно быть достаточным для преодоления сил сопротивления подвижной системы аппарата. К ним относятся сила тяжести подвижной системы G , контактное нажатие Q и сила P , создаваемая возвратной пружиной (см. рис. 311, б). Изменение результирующей силы при перемещении якоря показано на диаграмме (см. рис. 312) ломаной линией 1—2—3—4. При движении якоря и уменьшении воздушного зазора x до момента соприкосновения контактов привод должен преодолевать только сопротивление, обусловленное массой подвижной системы и действием возвратной пружины (участок 1—2). Далее усилие возрастает скачком на величину начального нажатия контактов (2—3) и растет по мере дальнейшего их перемещения (3—4).

Сопоставление характеристик, показанных на рис. 312, позволяет судить о действии аппарата. Так, если ток в катушке управления создаст м. д. с. $I_2\omega$, то наибольший зазор x , при котором может включиться аппарат, составляет x_2 (точка А), а при меньшей м. д. с. $I_1\omega$ тягового усилия будет недостаточно, и аппарат может включиться только при снижении зазора до x_1 (точка В).

При размыкании электрической цепи катушки привода подвижная система возвращается в исходное положение под действием пружины и силы тяжести. При малых значениях воздушного зазора и возвращающих усилий якорь может удерживаться в промежуточном положении остаточным магнитным потоком. Это явление устраняется установкой фиксированного наименьшего воздушного зазора и регулировкой пружин.

В автоматических выключателях применяют системы с удерживающим электромагнитом (рис. 313, а). Якорь 1 удерживается в притянутом положении к ярму сердечника 5 под действием магнитного потока Φ , создаваемого удерживающей катушкой 4, которая питается от цепи управления. При необходимости отключения подается ток в отключающую катушку 3, создающую магнитный поток Φ_0 , направленный навстречу магнитному потоку Φ , ка-

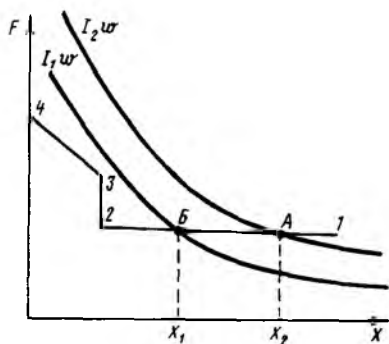


Рис. 312. Тяговые характеристики электромагнитного привода и диаграмма усилий

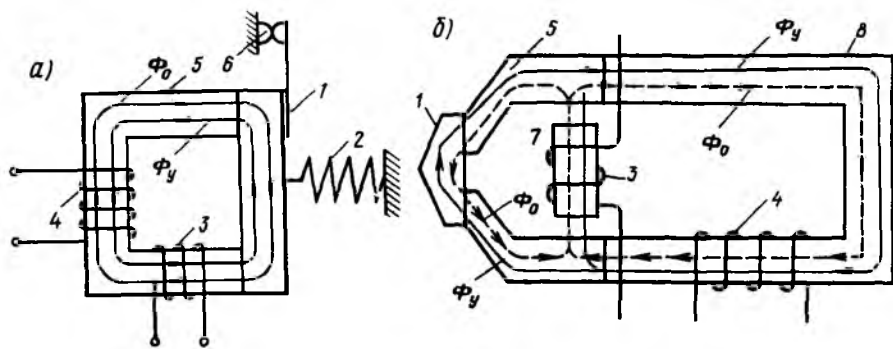


Рис. 313. Электромагнитный привод с удерживающим электромагнитом (а) и с магнитным шунтом (б)

тушки 4, который размагничивает якорь и сердечник. В результате якорь под действием отключающей пружины 2 отходит от сердечника, и контакты 6 аппарата размыкаются. Быстродействие отключения достигается благодаря тому, что в начале движения подвижной системы действуют наибольшие усилия натянутой пружины, тогда как в обычном электромагнитном приводе, рассмотренном ранее, движение якоря начинается при большом зазоре и малом тяговом усилии. В качестве отключающей катушки 3 в автоматических выключателях иногда используют шины или размагничивающие витки, по которым проходит ток силовой цепи, защищаемой аппаратом.

При достижении тока в катушке 3 некоторого значения, определяемого уставкой аппарата, результирующий магнитный поток $\Phi_y - \Phi_0$, проходящий через якорь, снижается до такого значения, что больше не может удерживать якорь в притянутом состоянии, и аппарат отключается.

В быстродействующих выключателях (рис. 313, б) катушки управления и отключения устанавливают в различных частях магнитопровода, чтобы избежать их взаимного индуктивного влияния, которое замедляет размагничивание сердечника и повышает собственное время выключения, особенно при высоких скоростях нарастания аварийного тока в защищаемой цепи.

Отключающую катушку 3 устанавливают на сердечнике 7, который отделен от основного магнитопровода воздушными зазорами.

Якорь 1, сердечники 5 и 7 выполняют в виде пакетов из листовой стали, а поэтому изменение в них магнитного потока будет точно соответствовать изменению тока в защищаемой цепи. Поток Φ_0 , создаваемый отключающей катушкой 3, замыкается двумя путями: через якорь 1 и по нешхитованному магнитопроводу 8 с катушкой управления 4.

Распределение потока Φ_0 по магнитным цепям зависит от скорости его изменения. При больших скоростях нарастания аварийного тока, который в данном случае создает размагничивающий

поток Φ_0 , весь этот поток начинает протекать через якорь, поскольку быстрому изменению части потока Φ_0 , проходящей по сердечнику с катушкой 4, препятствует э. д. с., индуцируемая в удерживающей катушке при быстром изменении проходящего через нее потока. Эта э. д. с. согласно правилу Ленца создает ток, замедляющий нарастание этой части потока Φ_0 . В результате скорость отключения быстродействующего выключателя будет зависеть от скорости нарастания тока, проходящего через отключающую катушку 3. Чем быстрее нарастает ток, тем при меньшем токе начинается выключение аппарата. Это свойство быстродействующего выключателя весьма ценно, поскольку наибольшую скорость ток имеет в режимах короткого замыкания, и чем раньше выключатель начнет разрывать цепь, тем меньше будет ограничиваемый им ток.

В отдельных случаях требуется замедление работы электрического аппарата. Это выполняется с помощью устройства для получения выдержки времени, под которой понимается время от момента подачи или снятия напряжения с катушки привода аппарата до начала движения контактов. Выдержка времени на отключение электрических аппаратов, управляемых постоянным током, осуществляется с помощью дополнительной короткозамкнутой обмотки, находящейся на одном магнитопроводе с катушкой управления.

При снятии питания с катушки управления магнитный поток, создаваемый этой катушкой, изменяется от своего рабочего значения до нуля.

При изменении этого потока в короткозамкнутой катушке наводится ток такого направления, что его магнитный поток препятствует спаду магнитного потока катушки управления и удерживает якорь электромагнитного привода аппарата в притянутом положении.

Вместо короткозамкнутой катушки может быть установлена на магнитопроводе медная гильза. Действие ее аналогично действию короткозамкнутой катушки. Этого же эффекта можно достичь при замыкании накоротко цепи катушки управления в момент отключения ее от сети.

Для получения выдержки на включение электрического аппарата используют различные механические механизмы времени, принцип действия которых аналогичен часовому механизму.

Электромагнитные приводы аппаратов характеризуются током (или напряжением) срабатывания и возврата. Током (напряжением) срабатывания называется наименьшее значение тока (напряжения), при котором обеспечивается четкое и надежное срабатывание аппарата. Для тяговых аппаратов напряжение срабатывания составляет 75 % номинального напряжения. Если постепенно плавно снижать ток в катушке, то при определенном его значении аппарат отключится. Наибольшее значение тока (напряжения), при котором аппарат уже отключается, называется током (напряжением) возврата. Ток возврата I_v всегда меньше тока

срабатывания $I_{ср}$, поскольку при включении подвижной системе аппарата необходимо преодолеть силы трения, а также повышенные воздушные зазоры между якорем и ярмом электромагнитной системы.

Отношение тока возврата к току срабатывания называют *коэффициентом возврата*:

$$\kappa_B = I_B / I_{ср} \quad (90)$$

Этот коэффициент всегда меньше единицы.

Электропневматический привод. В простейшем случае пневматический привод состоит из цилиндра 1 (рис. 314) и поршня 2, который связан с подвижным контактом б. При открытии крана 3 цилиндр соединяется с магистралью сжатого воздуха 4, который поднимает поршень 2 в крайнее верхнее положение и замыкает контакты. При последующем закрытии крана объем цилиндра под поршнем соединяется с атмосферой и поршень под действием возвратной пружины 5 возвращается в исходное состояние, размыкая контакты. Такой привод можно назвать пневматическим приводом с ручным управлением.

Для возможности дистанционного управления подачей сжатого воздуха вместо крана применяют электромагнитные вентили. Электромагнитный вентиль (рис. 315) представляет собой систему двух клапанов (впускного и выпускного) с электромагнитным приводом малой мощности (5—25 Вт). Они подразделяются на включающие и выключающие в зависимости от характера выполняемых ими операций при возбуждении катушки.

Включающий вентиль при возбужденной катушке соединяет цилиндр привода с источником сжатого воздуха, а при невозбужденной катушке сообщает цилиндр с атмосферой, одновременно перекрывая доступ в цилиндр сжатого воздуха. Воздух из резервуара поступает через отверстие В (рис. 315, а) к нижнему клапану 2, который в исходном положении закрыт. Цилиндр пневма-

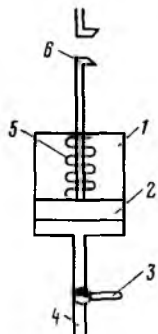


Рис. 314. Пневматический привод

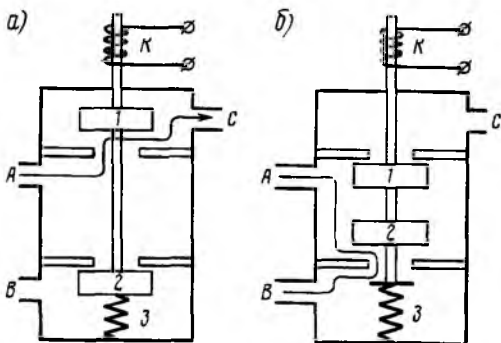


Рис. 315. Включающий (а) и выключающий (б) электромагнитные вентили

тического привода, присоединенный к отверстию *A*, соединяется через открытый клапан *1* с атмосферой через отверстие *C*. При возбуждении катушки *K* шток электромагнита давит на верхний клапан *1* и, преодолевая усилие пружины *3*, закрывает клапан *1* и открывает клапан *2*. При этом сжатый воздух из отверстия *B* через клапан *2* и отверстие *A* поступает в цилиндр пневматического привода.

Выключающий вентиль, наоборот, при невозбужденной катушке соединяет цилиндр со сжатым воздухом, а при возбужденной — с атмосферой. В исходном состоянии клапан *1* (рис. 315, б) закрыт, а клапан *2* открыт, создавая путь сжатому воздуху от отверстия *B* до отверстия *A* через клапан *2*. При возбужденной катушке клапан *1* открывается, соединяя цилиндр с атмосферой, а подача воздуха прекращается клапаном *2*.

Электродвигательный привод. Для привода ряда электрических аппаратов применяют электрические двигатели с механическими системами, преобразующими вращательное движение вала двигателя в поступательное движение контактной системы. Основным преимуществом электродвигательных электроприводов по сравнению с пневматическими является постоянство их характеристик и возможность их регулирования. По принципу действия эти приводы можно разделить на две группы: с постоянным соединением вала двигателя с электрическим аппаратом и с периодическим сцеплением.

В электрическом аппарате с электродвигательным приводом (рис. 316) вращение от электродвигателя *1* передается через зубчатую передачу *2* к кулачковому валу *3*. В определенном положении кулачок вала *4* поднимает шток *5* и замыкает связанный с ним подвижной контакт с неподвижным контактом *6*.

В систему привода групповых электрических аппаратов иногда вводятся устройства, обеспечивающие шаговое вращение вала электрического аппарата с остановкой его на каждой позиции. Во время остановки электродвигатель выключается. Такая система обеспечивает точную фиксацию вала электрического аппарата на позициях.

В качестве примера на рис. 317 схематически изображен привод с так называемым мальтийским крестом, который применяется

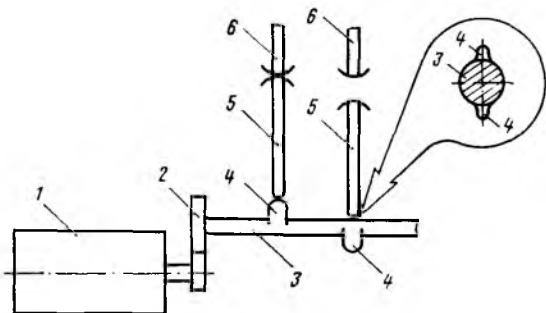


Рис. 316. Электродвигательный привод с постоянным соединением валов двигателя и электрического аппарата

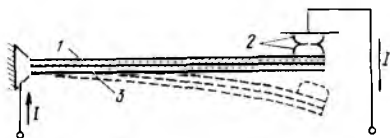
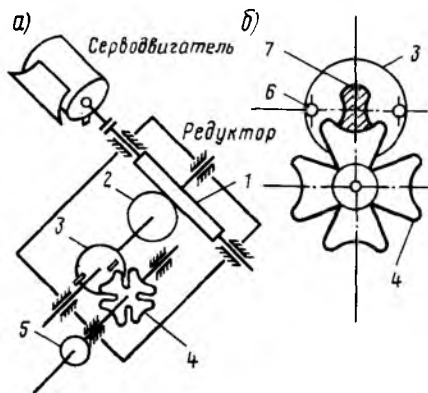


Рис. 318. Тепловой привод с биметаллической пластиной

Рис. 317. Электродвигательный привод группового контроллера

в групповых контроллерах. Привод состоит из серводвигателя и червячного редуктора с фиксацией позиций с помощью мальтийского креста. Червяк 1 связан с серводвигателем и передает вращение на вал червячного колеса 2, приводя в движение диск 3 с пальцами и фиксатором (рис. 317, а). Вал мальтийского креста 4 не вращается до тех пор, пока палец диска 6 (рис. 317, б) не войдет в паз мальтийского креста. При дальнейшем вращении палец повернет крест, а следовательно, и вал, на котором он сидит, на 60° , после чего палец выйдет из зацепления, а фиксирующий сектор 7 точно зафиксирует положение вала. При повороте вала червячного колеса на один оборот вал мальтийского креста повернется на $1/3$ оборота.

На валу мальтийского креста насажена шестерня 5, которая передает вращение на главный кулачковый вал группового контроллера.

Тепловой привод. Основным элементом этого привода является биметаллическая пластина, которая состоит из двух слоев различных металлов, жестко связанных по всей поверхности соприкосновения. Эти металлы имеют разные температурные коэффициенты линейного расширения. Слой металла с большим коэффициентом линейного расширения 1 (рис. 318) называется *термоактивным слоем* в отличие от слоя с меньшим коэффициентом линейного расширения 3, называемого *термопассивным*. При нагревании пластины проходящим через нее током или нагревательным элементом (косвенный подогрев) происходит различное удлинение обоих слоев, и пластина изгибается в сторону термопассивного слоя. При таком изгибе могут непосредственно замыкаться или размыкаться контакты 2, соединенные с пластиной, что используется в тепловых реле.

Изгиб пластины может также освобождать защелку рычага электрического аппарата, который затем отключается пружинами. Ток уставки привода регулируют подбором нагревательных элементов (при косвенном подогреве) или изменением раствора кон-

тактов (при прямом подогреве). Время возврата биметаллической пластины в исходное положение после срабатывания и охлаждения ее колеблется от 15 с до 1,5 мин.

§ 94. Основы работы плавких предохранителей

Плавкие предохранители широко применяют в электротехнических установках для защиты электрооборудования от токов перегрузки и коротких замыканий. Это аппараты однократного действия, требующие замены плавкого элемента после каждого срабатывания. При токах, несущественно превышающих номинальное значение, нагрев вставки имеет установившийся характер, при котором все выделяемое в ней тепло отдается в окружающую среду. При этом, кроме вставки, приблизительно до этой же температуры нагреваются все элементы предохранителя. Температура нагрева при этом такова, что плавкая вставка не расплавляется.

В аварийном режиме при быстром и значительном увеличении тока, проходящего через плавкий элемент, последний плавится, разрывая электрическую цепь.

Плавление вставки и разрыв тока должны произойти за возможно более короткое время и при небольших кратностях аварийного тока относительно номинального значения. Резкое сокращение времени плавления достигается применением специальной формы плавкой вставки либо использованием металлургического эффекта.

Плавкую вставку выполняют в виде пластины с вырезами, уменьшающими площадь ее сечения (рис. 319) на отдельных участках. На этих суженных перешейках выделяется больше тепла, чем на широких частях, из-за повышения сопротивления. В нормальном режиме работы избыточное тепло вследствие теплопроводности материала вставки успевает распространиться к более широким частям и вся вставка имеет практически одну температуру. При перегрузках нагрев суженных участков идет быстрее и тепло не успевает отводиться к широким участкам. В результате температура перешейков быстро достигает значения температуры плавления, что приводит к разрыву цепи.

Быстродействующие плавкие предохранители имеют несколько перешейков, чередующихся с широкими частями, а вставка состоит из нескольких лент фольги, включенных параллельно. При коротких замыканиях нагрев перешейков происходит настолько интенсивно, что практически отводом тепла от них можно пренебречь, и одновременно перегорают все или несколько перешейков.

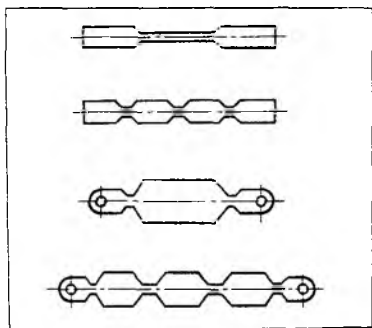


Рис. 319. Формы плавких вставок

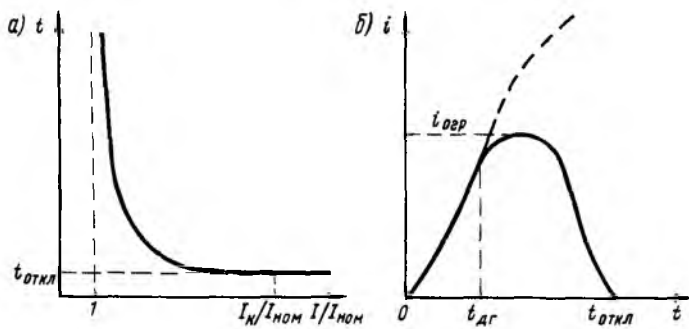


Рис. 320. Время-токовая характеристика плавкого предохранителя (а) и кривая изменения тока при отключении аварийного тока плавким предохранителем (б)

Металлургический эффект заключается в том, что многие легкоплавкие металлы (олово, свинец и др.) способны в расплавленном состоянии растворять некоторые тугоплавкие металлы (медь, серебро и др.). Указанное явление используется в предохранителях на небольшие токи со вставками из ряда параллельных проволок, на которые напаяны небольшие оловянные шарики. При токах перегрузки, когда температура проволок вставки достигает температуры плавления олова, шарик расплавляется и растворяет часть металла, на который он напаян. Вставка перегорает в этом месте, причем температура всей вставки оказывается намного ниже температуры плавления металла, из которого она выполнена. В нормальном режиме шарик практически не влияет на температуру нагрева вставки. Такой способ применяют при тонких проводниках вставки и малых диаметрах шариков.

При возрастании диаметра вставки влияние металлургического эффекта резко снижается.

Работа предохранителя характеризуется его время-токовой характеристикой и уровнем ограничения тока $i_{огр}$.

Время-токовая характеристика (рис. 320, а) показывает, за какое время отключит ток плавкий предохранитель при данной кратности проходящего через него тока по отношению к номинальному значению, т. е. характеризует его быстродействие в определенных условиях. Так, при номинальных значениях тока ($I/I_{ном} = 1$) предохранитель не срабатывает, а при больших кратностях тока $I_n/I_{ном}$ отключает цепь за малое время $t_{откл}$.

Действие плавкого предохранителя поясняется рис. 320, б. Ток в защищаемой цепи ограничивается значительно меньшим значением $i_{огр}$, чем без предохранителя (показано на рисунке штриховой линией).

Отключение аварийного тока плавким предохранителем характеризуется двумя зонами: плавления и гашения дуги. Зона плавления представляет собой отрезок времени от начала нарастания аварийного тока до образования электрической дуги (интервал

времени $0 - t_{\text{дг}}$). Образование электрической дуги определяет начало ограничения аварийного тока.

По мере горения электрической дуги и увеличения напряжения на ней аварийный ток ограничивается, а затем и снижается до нуля. Время горения дуги зависит от параметров аварийного контура таких, как напряжение, ток, $\cos \varphi$, а также от конструкции предохранителя.

Предохранители выбирают в зависимости от напряжения установки, где они должны эксплуатироваться. Номинальный ток плавкой вставки выбирают по наибольшему току нагрузки с учетом перегрузок, которые допускает предохранитель без плавления.

Контрольные вопросы

1. От чего зависит переходное сопротивление между контактами электрического аппарата?
2. Какие меры принимают для уменьшения электрического износа контактов?
3. При каких условиях возникает электрическая дуга между контактами аппарата?
4. Какие меры принимают для ускорения гашения электрической дуги?
5. Какие существуют приводы электрических аппаратов?
6. Что такое тяговая характеристика электромагнитного привода?
7. Что такое коэффициент возврата электромагнитного привода?
8. Как осуществляется выдержка времени в аппарате с электромагнитным приводом?

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

§ 95. Назначение и типы электроизмерительных приборов

Назначение. Электроизмерительные приборы служат для контроля режима работы электрических установок, их испытания и учета расходуемой электрической энергии. В зависимости от назначения электроизмерительные приборы подразделяют на амперметры (измерители тока), вольтметры (измерители напряжения), ваттметры (измерители мощности), омметры (измерители сопротивления), частотомеры (измерители частоты переменного тока), счетчики электрической энергии и др. Различают две категории электроизмерительных приборов: рабочие — для контроля режима работы электрических установок в производственных условиях и образцовые — для градуировки и периодической проверки рабочих приборов. На железнодорожном транспорте электрические измерения получили широкое распространение при эксплуатации и ремонте э. п. с., тепловозов и устройств энергоснабжения железных дорог.

Типы приборов. В зависимости от способа отсчета электроизмерительные приборы разделяют на приборы непосредственной оценки и приборы сравнения.

Приборами непосредственной оценки, или показывающими, называются такие, которые позволяют производить отсчет измеряемой величины непосредственно на шкале. К ним относятся амперметры, вольтметры, ваттметры и др. Основной частью каждого такого прибора является измерительный механизм. При воздействии измеряемой электрической величины (тока, напряжения, мощности и др.) на измерительный механизм прибора подается соответствующий сигнал на отсчетное устройство, по которому определяют значение измеряемой величины.

По конструкции отсчетного устройства показывающие приборы делятся на приборы с механическим указателем (стрелочные), со световым указателем (зеркальные), с пишущим устройством (самопишущие) и электронные приборы со стрелочным или цифровым указателем отсчета. В стрелочных приборах измерительный механизм поворачивает стрелку на некоторый угол, который определяет значение измеряемой величины (шкала прибора проградуирована в соответствующих единицах: амперах, вольтах, ваттах и пр.).

В электроизмерительных приборах сравнения измерения осуществляются путем сравнения измеряемой величины с какой-либо образцовой мерой или эталоном. К ним относятся различные мосты

для измерения сопротивлений и компенсационные измерительные устройства (потенциометры). Последние измеряют разность между измеряемым напряжением или э. д. с. и компенсирующим образцовым напряжением (э. д. с.). В качестве сравнивающего прибора обычно используют гальванометр.

Действие электроизмерительных приборов непосредственной оценки основано на различных проявлениях электрического тока (магнитном, тепловом, электродинамическом и пр.), используя которые можно при помощи различных измерительных механизмов вызвать перемещение стрелки.

В зависимости от принципа действия, положенного в основу устройства измерительного механизма, электроизмерительные приборы относятся к различным системам: магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической, тепловой, индукционной и др. Приборы каждой из этих систем имеют свои условные обозначения (табл. 4).

Приборы могут выполняться с противодействующей возвратной пружиной и без пружины. В последнем случае они называются *логометрами*.

Точность приборов. Каждый электроизмерительный прибор имеет некоторую погрешность, которая определяется трением в его осях, технологическими допусками отдельных его деталей, гистерезисом в магнитной системе и т. д. Для оценки точности измерений используют понятие *относительная погрешность* Δx %. Она представляет собой отношение абсолютной погрешности Δx , которая имеет место при измерениях (разность между измеренной величиной $x_{из}$ и ее действительным значением x_d), к действительному значению измеряемой величины в процентах:

$$\Delta x \% = \frac{x_{из} - x_d}{x_d} 100. \quad (91)$$

Эта погрешность различна при разных значениях измеряемой величины, т. е. для различных делений шкалы прибора. Поэтому точность электроизмерительных приборов оценивают по *основной приведенной погрешности* γ , которая равна отношению наибольшей абсолютной погрешности Δx_{max} для данного прибора к наибольшему (номинальному) значению $x_{ном}$ той величины (тока, напряжения, мощности и пр.), которую может измерять прибор:

$$\gamma \% = \frac{\Delta x_{max}}{x_{ном}} 100. \quad (92)$$

Основной приведенной погрешностью считается погрешность прибора при нормальных условиях его работы. При отклонении от этих условий возникают дополнительные погрешности: температурная (от изменения окружающей температуры), от влияния внешних магнитных полей, от изменения частоты переменного

Таблица 4

Прибор	Условное обозначение
Магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
Магнитоэлектрический с подвижным магнитом	
Электродинамический	
Электромагнитный	
Ферродинамический	
Индукционный	
Электростатический	
Вибрационный (язычковый)	
Тепловой (с нагреваемой проволокой)	
Биметаллический	
Термоэлектрический с магнитоэлектрическим измерительным механизмом	
Выпрямительный с магнитоэлектрическим измерительным механизмом	

тока и пр. По степени точности электроизмерительные приборы непосредственной оценки подразделяются на восемь классов:

Класс прибора	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,5	4,0
Основная приведенная погрешность, %	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	$\pm 4,0$

К первым трем классам относят точные лабораторные приборы. Приборы классов 0,5; 1,0 и 1,5 используют для различных технических измерений. Они обычно переносные, подключаемые к электрическим установкам только во время измерений.

Приборы классов 2,5 и 4,0 устанавливают постоянно на щитах и панелях управления электрическими установками.

Ошибка в показаниях прибора определяется его классом точности. Например, амперметр класса 1,5 со шкалой на 100 А может дать погрешность $(100 \cdot 1,5) / 100 = 1,5$ А.

Погрешность прибора не следует смешивать с погрешностью измерений. Так как погрешность для рассматриваемого прибора, равная 1,5 А, задается независимо от измеряемого им тока, то при токе 50 А погрешность измерений будет составлять 3 %, а при токе 5 А — 30 %. Поэтому при измерениях рекомендуется так выбирать приборы, чтобы значения измеряемой величины не были существенно меньшими наибольшего ее значения, указанного на шкале прибора.

Обозначения на шкале. На шкале каждого прибора проставляют соответствующие условные обозначения, характеризующие назначение прибора (амперметр, вольтметр и т. д.), его класс точности, род тока, при котором он может применяться, систему прибора, нормальное его положение при измерениях, испытательное напряжение, при котором проверялась изоляция прибора, и пр. Для указания назначения прибора в его условное обозначение вписывают буквенные символы измеряемых величин, например А (амперметр), V (вольтметр), W (ваттметр).

§ 96. Магнитоэлектрические приборы

Устройство и принцип действия. Магнитоэлектрический измерительный механизм (рис. 321, а) выполнен в виде постоянного магнита 1, снабженного полюсными наконечниками 2, между которыми укреплен стальной сердечник 3. В кольцеобразном воздушном зазоре, образованном полюсными наконечниками и сердечником, помещена подвижная катушка 5, намотанная на алюминиевый каркас 6 (рис. 321, б). Катушка выполнена из очень тонкого провода и укреплена на оси, связанной со стрелкой спиральными пружинами 4 или растяжками. Через эти же пружины или растяжки осуществляется подвод тока к катушке.

При прохождении тока I по катушке на каждый из ее проводников будет действовать электромагнитная сила. Суммарное действие всех электромагнитных сил создает вращающий момент M , стремящийся повернуть катушку и связанную с ней стрелку при-

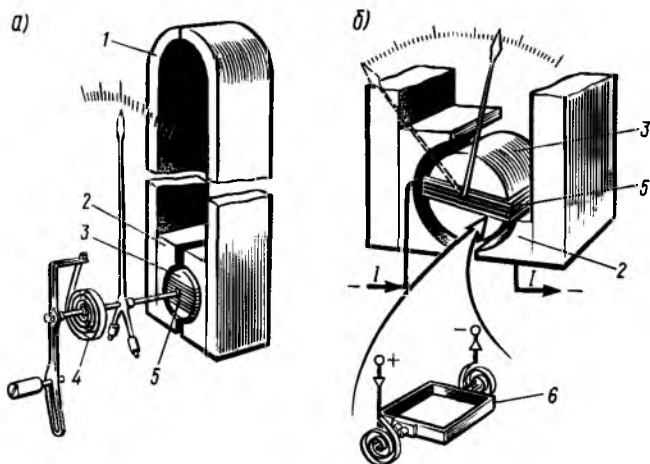


Рис. 321. Устройство магнитоэлектрического измерительного механизма

бора на некоторый угол α . Так как индукция B магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом, неизменна и не зависит от тока I , то

$$M = c_1 I, \quad (93)$$

где c_1 — постоянная величина, зависящая от конструктивных параметров данного прибора (числа витков катушки, ее размеров, индукции B в воздушном зазоре).

Повороту подвижной части измерительного механизма препятствует противодействующий момент $M_{\text{пр}}$, создаваемый спиральными пружинами или растяжками. Этот момент пропорционален углу закручивания, т. е. углу поворота α подвижной части; при этом

$$M_{\text{пр}} = c_2 \alpha, \quad (94)$$

где c_2 — постоянная величина, зависящая от жесткости спиральных пружин или растяжек.

Поворот подвижной части измерительного механизма и стрелки будет продолжаться до тех пор, пока вращающий момент M , создаваемый током I , не уравновесится противодействующим моментом $M_{\text{пр}}$. В момент равновесия $M = M_{\text{пр}}$, откуда получим:

$$\alpha = (c_1/c_2) I = \kappa I. \quad (95)$$

Следовательно, угол поворота α подвижной части пропорционален измеряемому току I . Поэтому магнитоэлектрические приборы имеют равномерную шкалу.

Постоянная величина κ называется *чувствительностью прибора*, она характеризуется углом поворота стрелки в градусах или в деле-

ниях шкалы, приходящимся на единицу изменения измеряемой величины.

Величина, обратная чувствительности, $c=1/k$ называется *постоянной прибора*, или *ценой деления*. Если умножить отсчет по шкале на цену деления прибора c , то можно определить значение измеряемой величины. Для устранения колебаний подвижной системы прибора при переходе стрелки из одного положения в другое электроизмерительные приборы снабжают воздушными или магнитно-индукционными демпферами.

Воздушный демпфер (рис. 322, *а*) выполнен в виде цилиндрической камеры, внутри которой перемещается крыло 1 в виде поршня, связанного с подвижной системой. При перемещении подвижной части происходит торможение движущегося в камере 2 крыла, и колебания подвижной части быстро затухают.

Магнитно-индукционный демпфер (рис. 322, *б*) выполнен в виде неподвижного постоянного магнита 3 , который при повороте подвижной системы прибора индуцирует вихревые токи в металлическом (алюминиевом) секторе 4 , установленном на оси прибора.

Взаимодействие этих токов с магнитом создает согласно правилу Ленца силу, тормозящую подвижную систему и обеспечивающую быстрое затухание колебаний стрелки. В магнитоэлектрических приборах роль демпфера выполняет алюминиевый каркас $б$ катушки (см. рис. 321, *б*). При повороте подвижной части прибора изменяется магнитный поток, пронизывающий каркас катушки. Благодаря этому в каркасе индуцируются вихревые токи, взаимодействие которых с магнитным полем магнита создает тормозной момент, обеспечивающий быстрое успокоение подвижной части.

Для того чтобы любой электроизмерительный прибор обеспечил требуемую точность измерений, необходимо, чтобы отклонение подвижной системы прибора определялось только вращающим моментом, создаваемым катушкой, и противодействующим усилием пружины. Для устранения влияния силы тяжести, создающей погрешности при измерениях, подвижную систему прибора (рис. 323) уравнивают противовесами 5 (рис. 323, *а*), представляющими собой стержни с перемещающимися по ним грузиками. Для умень-

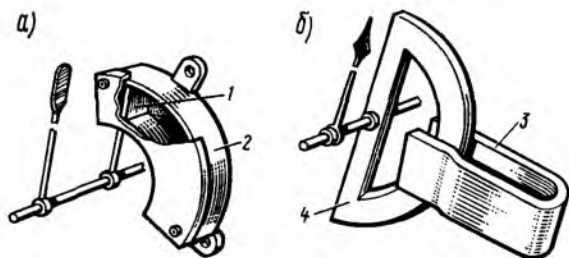


Рис. 322. Воздушный (*а*) и магнитно-индукционный (*б*) демпферы

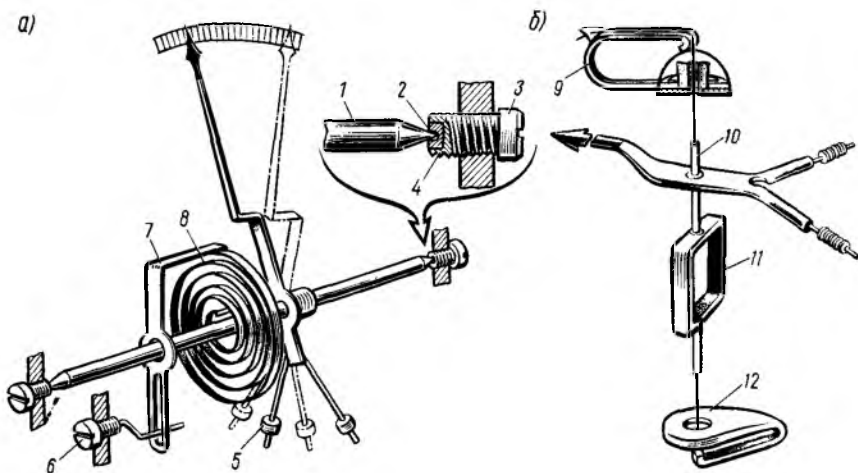


Рис. 323. Устройство подвижной части электроизмерительного прибора

шения влияния трения оси приборов снабжают тщательно отполированными стальными наконечниками 1, выполненными из материала с высокой износостойкостью (закаленная сталь, вольфрамомолибденовый сплав и пр.). Наконечники вращаются в подпятниках 4, выполняемых с вкладышами 2 из корунда, агата, рубина и т. п. Зазоры между наконечниками и подпятником регулируются стопорным винтом 3.

Электроизмерительные приборы обычно снабжают *корректором* — приспособлением, позволяющим устанавливать стрелку в нулевое положение. Корректор состоит из винта 6, выходящего из корпуса, и поводка 7, при помощи которых можно смещать на некоторое расстояние точку закрепления спиральной пружины 8, создающей противодействующее усилие. В большинстве современных электроизмерительных приборов подвижная часть 11 подвешивается на двух растяжках 10 — упругих металлических лентах, которые служат для подвода тока к катушке прибора и одновременно создают противодействующий момент (рис. 323, б). Растяжки прикреплены к двум плоским пружинам 9 и 12, расположенным во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Кроме рассмотренного выше измерительного механизма с внешним (по отношению к катушке) постоянным П-образным магнитом, существуют механизмы с магнитами другой формы (цилиндрической, в виде призмы, а также с внутрирамочными неподвижными и подвижными магнитами).

Применение прибора. Приборы магнитоэлектрической системы применяют для измерения тока и напряжения в электрических цепях постоянного тока. В частности, на э. п. с. и тепловозах их используют в качестве амперметров и вольтметров. В амперметрах и вольтметрах катушка прибора имеет различное сопротивление и включается по различным схемам (см. § 101).

Для уменьшения проходящего по катушке тока и компенсации влияния температуры на показания прибора в вольтметрах последовательно с катушкой включают добавочный резистор, который обычно встраивается в корпус прибора. Сопротивление этого резистора значительно больше сопротивления катушки, и он выполнен из материала, электрическое сопротивление которого весьма мало зависит от температуры (константан, манганин и пр.). В амперметрах параллельно катушке прибора часто включают образцовый резистор, называемый *шунтом*.

Сопротивление шунта значительно меньше сопротивления катушки прибора, вследствие чего измеряемый ток в основном проходит по шунту. Шунты и добавочные резисторы служат для расширения пределов измерения приборов.

Из принципа действия магнитоэлектрического прибора следует, что направление отклонения его стрелки зависит от направления тока I , проходящего по катушке. Следовательно, при включении этих приборов в цепь постоянного тока должна быть соблюдена правильная полярность, при которой стрелка отклоняется в требуемую сторону. Для переменного тока магнитоэлектрические приборы непригодны, так как при питании катушки переменным током среднее значение создаваемого ею вращающего момента равно нулю и стрелка прибора будет стоять на нуле, испытывая чуть заметные колебания.

Достоинством приборов магнитоэлектрической системы являются равномерность шкалы, высокая точность и независимость показаний от посторонних магнитных полей. К недостаткам их относятся непригодность для измерения переменного тока, необходимость соблюдения полярности при включении и чувствительность к перегрузкам (при перегрузке тонкая проволока катушки и спиральные пружины, подводящие к ней ток, могут сгореть).

§ 97. Электромагнитные приборы

Устройство. Принцип работы приборов этой системы основан на взаимодействии магнитного поля, создаваемого катушкой I со стальным сердечником 3 , помещенным в поле этой катушки. Электромагнитный измерительный механизм выполняют с плоской (рис. 324, а) или круглой (рис. 324, б) катушкой.

В приборах с плоской катушкой сердечник установлен на оси, несущей стрелку. При прохождении тока по катушке I сердечник 3 будет намагничиваться и втягиваться в катушку, поворачивая ось и стрелку. Повороту оси препятствует спиральная пружина 2 . Когда усилие, создаваемое пружиной, уравновесит усилие, созданное катушкой, подвижная система прибора остановится и стрелка зафиксирует на шкале определенный ток.

Вращающий момент, действующий на подвижную часть прибора, пропорционален силе притяжения F электромагнита, под действием которой сердечник втягивается в катушку. Сила притя-

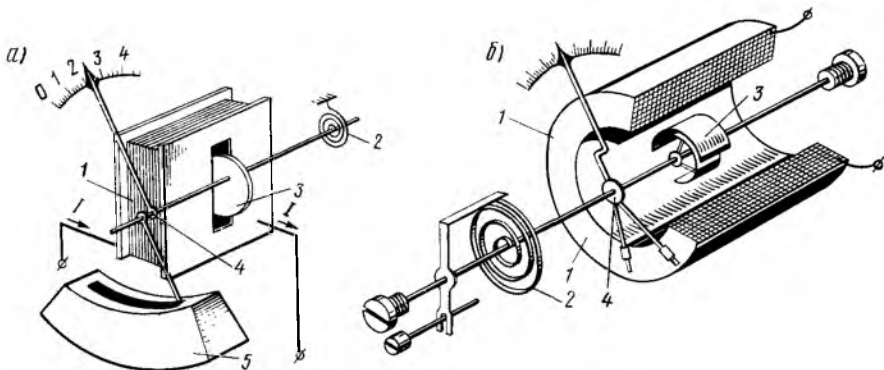


Рис. 324. Устройство электромагнитных измерительных механизмов с плоской (а) и круглой (б) катушками

жения F , как было показано в § 93, пропорциональна квадрату индукции B , создаваемой магнитным полем катушки; следовательно, она пропорциональна квадрату тока I в катушке. Поэтому вращающий момент

$$M = c_1 I^2, \quad (96)$$

где c_1 — постоянная величина, зависящая от конструктивных параметров прибора (числа витков и размеров катушки, материала и формы сердечника) и положения сердечника относительно катушки.

При втягивании сердечника в катушку вращающий момент M изменяется пропорционально I^2 .

Под действием момента M подвижная часть прибора будет поворачиваться до тех пор, пока этот момент не будет уравновешен противодействующим моментом $M_{\text{пр}} = c_2 \alpha$, созданным пружинами или растяжками. В момент равновесия $M = M_{\text{пр}}$, откуда

$$\alpha = (c_1/c_2) I^2 = \kappa I^2, \quad (97)$$

где κ — постоянная величина.

Следовательно, в приборах с электромагнитным измерительным механизмом угол поворота α подвижной части и стрелки пропорционален квадрату тока, проходящего по катушке. Поэтому такой прибор имеет неравномерную (квадратичную) шкалу. Для сглаживания этой неравномерности сердечнику придается особая лепесткообразная форма, вследствие чего форма магнитного поля и усилие, создаваемое катушкой, изменяются по мере втягивания сердечника.

Устранение колебаний подвижной системы прибора при переходе стрелки из одного положения в другое осуществляется демпфером 5.

В приборах с круглой катушкой подвижная система поворачивается в результате взаимодействия двух стальных намагничиваю-

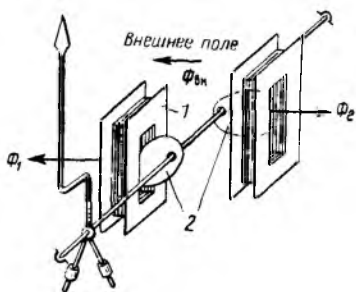


Рис. 325. Устройство астатического измерительного механизма

щихся пластинок 3, расположенных внутри катушки 1. Одна из них укреплена на оси прибора, а другая — на внутренней поверхности каркаса катушки. При прохождении тока по катушке пластины намагничиваются, и их одноименные полюсы оказываются расположенными друг против друга. Между ними возникают силы отталкивания и создается вращающий момент, поворачивающий ось со стрелкой 4.

Применение. Электромагнитные приборы используют, главным образом, для измерения тока и напряжения в промышленных установках переменного тока. При периодическом изменении тока, проходящего через прибор, усилие, создаваемое его катушкой, не будет изменяться по направлению, так как оно пропорционально квадрату тока. Угол отклонения стрелки определяется некоторым средним усилием F , значение которого пропорционально среднему квадратичному значению тока или напряжения. Следовательно, электромагнитные приборы в цепях переменного тока измеряют действующие значения тока или напряжения.

Катушка при измерениях может быть включена в электрическую цепь последовательно или параллельно двум точкам, между которыми действует некоторое напряжение. В первом случае прибор будет работать в качестве амперметра, во втором — в качестве вольтметра.

Достоинством приборов электромагнитной системы являются простота и надежность конструкции, невысокая стоимость, стойкость к перегрузкам и пригодность для измерений в цепях переменного и постоянного тока. К недостаткам относятся невысокая точность, малая чувствительность, неравномерность шкалы и зависимость показаний от внешних магнитных полей и частоты переменного тока.

Астатические приборы. Катушки электромагнитных приборов создают относительно слабое магнитное поле, так как силовые линии этого поля проходят в основном по воздуху. Поэтому такие приборы весьма чувствительны к влиянию внешних магнитных полей. Для защиты от этих влияний электромагнитные приборы окружают стальными экранами или выполняют астатическими.

В астатическом приборе имеются две плоские катушки 1 и два сердечника 2, расположенные на общей оси (рис. 325). Обмотки катушек включают так, чтобы направления их магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 были противоположны. Вращающие моменты действуют на подвижную систему прибора в одинаковом направлении. Поэтому внешний магнитный поток $\Phi_{вн}$ будет усиливать поле одной катушки и ослаблять поле другой; создаваемый же ими суммарный вращающий момент будет оставаться неизменным.

§ 98. Электродинамические и ферродинамические приборы

Устройство и применение электродинамического прибора. Работа электродинамического прибора основана на взаимодействии двух катушек, обтекаемых электрическим током. Электродинамический измерительный механизм (рис. 326, а) состоит из двух катушек: неподвижной 2 и расположенной внутри нее подвижной 1. Подвижная катушка 1 связана с осью прибора со стрелкой и с двумя спиральными пружинами 4 (или растяжками), которые служат для создания противодействующего момента и подвода тока к подвижной катушке 1. В приборе применяется демпфер 3, аналогичный ранее рассмотренному.

При прохождении по катушкам токов I_1 и I_2 возникают электродинамические силы F (рис. 326, б), которые стремятся повернуть подвижную катушку относительно неподвижной на некоторый угол. Вращающий момент, действующий на подвижную катушку,

$$M = c_1 I_1 I_2, \quad (98)$$

где c_1 — постоянная величина, зависящая от параметров катушек (числа витков и размеров), их формы и взаимного расположения.

Повороту подвижной катушки противодействует момент $M_{\text{пр}} = c_2 \alpha$. В момент равновесия $M = M_{\text{пр}}$, откуда

$$\alpha = (c_1/c_2) I_1 I_2 = \kappa I_1 I_2, \quad (99)$$

где κ — постоянная величина.

При переменном токе мгновенное значение вращающего момента M пропорционально произведению мгновенных значений токов i_1 и i_2 , проходящих по катушкам. Средний же за период вращающий момент

$$M_{\text{ср}} = c_1 I_1 I_2 \cos \psi, \quad (100)$$

где I_1 и I_2 — действующие значения токов i_1 и i_2 ;
 ψ — угол сдвига фаз между ними.

Поэтому при переменном токе

$$\alpha = \kappa I_1 I_2 \cos \psi.$$

Значение вращающего момента M , созданного катушками электродинамического прибора, а следовательно, и угол поворота стрелки α пропорциональны произведению проходящих по катушкам токов I_1 и I_2 . Поэтому в зависимости от схемы включения катушек прибор может быть использован в качестве амперметра, вольтметра и ваттметра.

При включении обеих катушек прибора последовательно в цепь измеряемого тока (рис. 327, а) прибор будет работать в качестве амперметра; при подключении катушек к двум точкам (рис. 327, б), между которыми действует подлежащее измерению напряжение,

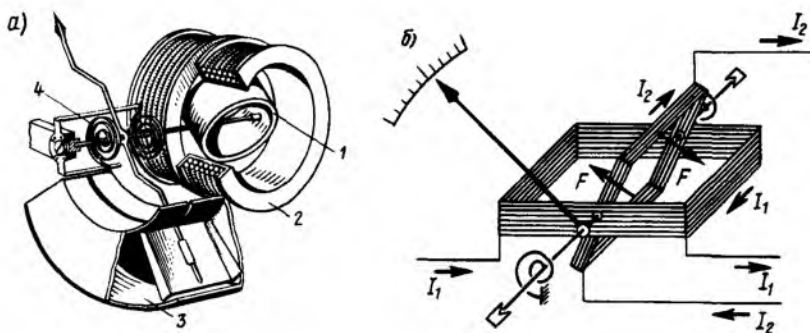


Рис. 326. Устройство (а) и принципиальная схема (б) электродинамического измерительного механизма

прибор будет работать в качестве вольтметра. При подключении же одной катушки последовательно, а другой параллельно приемной электроэнергии (рис. 327, в) угол отклонения стрелки будет пропорционален произведению тока I и напряжения U , т. е. мощности $P = UI$ и, следовательно, прибор будет работать в качестве ваттметра и измерять мощность, получаемую приемником. При переменном токе и включении катушек по схеме (см. рис. 327, в) угол сдвига фаз ψ между токами I_1 и I_2 равен углу сдвига фаз φ между током I и напряжением U . Поэтому

$$\alpha = \kappa UI \cos \varphi = \kappa P, \quad (101)$$

т. е. угол поворота стрелки пропорционален измеряемой мощности.

Достоинствами электродинамических приборов являются пригодность для измерения постоянного и переменного тока, равномерность шкалы у ваттметров и относительно высокая точность по сравнению с другими приборами, предназначенными для измерений в цепях переменного тока. К недостаткам относится сильное влияние внешних магнитных полей на точность измерений, чувствительность к перегрузкам и относительно высокая стоимость.

Электродинамические приборы применяют обычно в качестве точных лабораторных приборов, а также в качестве ваттметров и счетчиков электрической энергии в цепях постоянного тока.

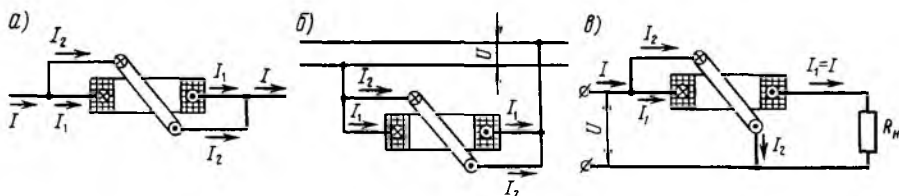


Рис. 327. Схемы включения электродинамического прибора в качестве амперметра (а), вольтметра (б) и ваттметра (в)

Устройство и применение ферродинамических приборов. Работа ферродинамических приборов основана на том же принципе, что и приборов электродинамической системы. Для усиления магнитного поля в ферродинамическом измерительном механизме применен магнитопрод из ферромагнитного материала. Неподвижная катушка 2 (рис. 328) размещается на полюсах ферромагнитного сердечника 4, а подвижная 3 поворачивается так же, как и в приборах магнитоэлектрической системы, — в воздушном зазоре между полюсами 1 и неподвижным цилиндрическим сердечником 5.

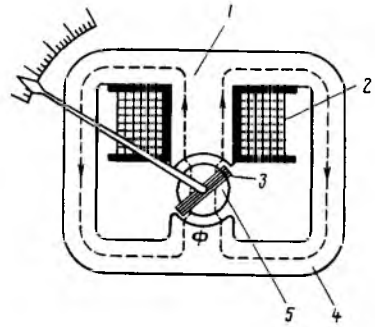


Рис. 328. Принципиальная схема ферродинамического измерительного механизма

При такой конструкции приборы защищены от влияния внешних магнитных полей. Кроме того, увеличиваются магнитные потоки, создаваемые катушками, и возрастает вращающий момент, действующий на подвижную систему.

Ферродинамические приборы используют в качестве щитовых амперметров, ваттметров и вольтметров, работающих в условиях тряски и вибраций (например, на э. п. с. переменного тока). Кроме того, их применяют в качестве самопишущих приборов, так как они имеют значительный вращающий момент, преодолевающий трение в записывающих устройствах.

§ 99. Индукционные приборы

Устройство. Индукционный прибор состоит из двух неподвижных электромагнитов 2 и 3 (рис. 329) и подвижного алюминиевого диска 4, укрепленного на одной оси со стрелкой.

При прохождении переменных токов I_1 и I_2 по катушкам электромагнитов создаются два магнитных потока Φ_1 и Φ_2 , сдвинутых один относительно другого по фазе, которые пронизывают диск. Эти потоки при своем изменении индуцируют в диске вихревые токи $I_{в1}$ и $I_{в2}$. В результате взаимодействия вихревых токов с магнитными полями обоих электромагнитов (тока $I_{в1}$ с потоком Φ_2 и тока $I_{в2}$ с потоком Φ_1) возникает вращающий момент M , под влиянием которого происходит поворот подвижной части прибора. Противодействующий момент в вольтметрах, амперметрах и ваттметрах создается спиральной пружиной 1 или растяжками.

Среднее за период значение вращающего момента M пропорционально произведению действующих значений магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 и синусу угла сдвига фаз ψ между этими потоками:

$$M = c_1 \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi, \quad (102)$$

где c_1 — постоянная для прибора величина.

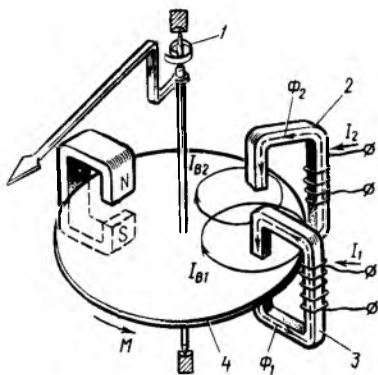


Рис. 329. Устройство индукционного измерительного механизма

Чтобы получить наибольшее значение вращающего момента, угол сдвига фаз между потоками устанавливают 90° путем включения в цепи катушек дополнительных активных и реактивных сопротивлений. При этом условии средний вращающий момент в вольтметрах и амперметрах будет пропорционален произведению действующих значений токов I_1 и I_2 , протекающих по катушкам электромагнитов. Этой величиной будет определяться также и угол поворота стрелки:

$$\alpha = \kappa I_1 I_2. \quad (103)$$

В ваттметрах $\alpha = \kappa UI \cos \varphi = \kappa P$, так как ток I_1 пропорционален току I в цепи, I_2 — напряжению U , а угол φ равен углу $90^\circ - \varphi$.

Применение. Индукционные приборы, так же как и электродинамические, могут быть использованы в качестве амперметра, вольтметра и ваттметра. Катушки электромагнитов включаются в этих случаях так же, как и катушки электродинамического прибора (см. рис. 327).

Достоинством индукционных приборов являются высокая стойкость к перегрузкам, большой вращающий момент и малая чувствительность к внешним магнитным полям. К недостаткам относятся сравнительно невысокая точность и зависимость показаний от частоты переменного тока и температурных влияний.

Индукционные приборы используют, главным образом, в качестве ваттметров и счетчиков электрической энергии и в промышленных установках и на электровозах переменного тока.

§ 100. Логометры и электронные приборы

Логометры. В рассмотренных измерительных механизмах угол поворота α подвижной части определяется значением тока, проходящего по их катушкам. Как следует из закона Ома, ток I зависит от напряжения U , питающего измерительную цепь. Однако при измерениях сопротивления, частоты переменного тока, температуры, давления и др. необходимо, чтобы угол α зависел только от измеряемой величины, а изменение напряжения не оказывало влияния на результаты измерения. Поэтому для измерений указанных величин применяют логометры — показывающие электроизмерительные приборы, имеющие два измерительных механизма без противодействующих пружин, создающие два противоположно направленных момента. В результате этого угол поворота α подвижной части логометра определяется только отношением токов в ка-

тушках этих механизмов. А так как изменение напряжения оказывает одинаковое влияние на эти токи, то угол α в этом случае изменяться не будет.

Логометры могут быть выполнены с измерительными механизмами любой системы. Характерной особенностью их является отсутствие механических свойств, создающих противодействующий момент, вследствие чего их подвижная часть при отсутствии тока в катушках находится в состоянии безразличного равновесия.

На рис. 330 в качестве примера показана принципиальная схема магнитоэлектрического логометра, который применяется в мегаомметрах. Он состоит из двух катушек 1 и 2, расположенных под некоторым углом и жестко укрепленных на общей оси. К этим катушкам подводятся токи I_1 и I_2 через три эластичные спирали 5, не создающие при закручивании механического момента.

Постоянный магнит 3 имеет форму эллипса, поэтому в воздушном зазоре между магнитом и наружным кольцом 4 образуется неравномерное магнитное поле.

В результате взаимодействия токов I_1 и I_2 с магнитным полем возникают два противоположно направленных момента M_1 и M_2 , которые пропорциональны токам I_1 и I_2 и индукциям B_1 и B_2 в воздушном зазоре в тех местах, где находятся катушки.

При повороте подвижной части под действием разности $M_1 - M_2$ значения индукций B_1 и B_2 изменяются, так как одна из катушек перемещается в область с увеличенным (или уменьшенным) воздушным зазором, а другая — в область с уменьшенным (или увеличенным) зазором. При этом изменяются моменты M_1 и M_2 . При некотором положении подвижной части моменты M_1 и M_2 уравниваются, в этом случае

$$I_1/I_2 = B_2/B_1. \quad (104)$$

Таким образом, каждому определенному положению подвижной части логометра, характеризуемому отношением B_2/B_1 , соответствуют определенные значения токов I_1 и I_2 , проходящих по его катушкам. При изменении этого отношения будет изменяться угол α .

Если обе измерительные цепи, в которые включены катушки прибора, питаются одним и тем же напряжением U , то показания прибора не будут зависеть от U , так как при его изменении изменяются пропорционально токи I_1 и I_2 .

Электронные приборы. Для измерения малых сигналов, а также для измерений в слаботочных цепях широкое распространение получили электронные приборы, представляющие собой сочетание электронного усилителя и магнитоэлектрического милливольтметра или системы цифровой индикации.

При измерении электронным прибором со стрелочной индикацией (рис. 331, а) измеряемая электрическая величина усиливается или ослабляется усилителем U и преобразуется в сигнал постоян-

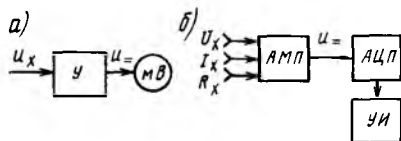
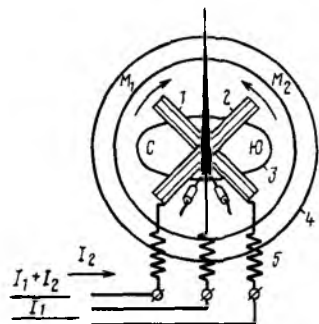


Рис. 331. Структурные схемы приборов со стрелочной (а) и цифровой (б) индикацией

◀ Рис. 330. Принципиальная схема магнитоэлектрического логометра

ного знака $U_{=}$, который подается на милливольтметр, отградуированный с учетом коэффициента усиления усилителя.

Усилитель имеет очень большое входное сопротивление, т. е. потребляет небольшой ток из измеряемой сети.

При измерении электронным прибором с цифровой индикацией (рис. 331, б) измеряемая величина (напряжение постоянного тока U_x , постоянный ток I_x или сопротивление R_x) подается на вход аналогового масштабного преобразователя (АМП), который преобразует ее в напряжение постоянного тока $U_{=}$. Сигнал $U_{=}$ поступает на вход аналого-цифрового преобразователя АЦП, где происходит его измерение. Результат измерения с выхода АЦП выдается на устройство индикации УИ, где высвечивается измеряемая величина в цифровом значении.

Электронные приборы благодаря большому входному сопротивлению и малому потребляемому току находят широкое применение прежде всего для измерений в цепях различных электронных устройств управления, где использование обычных приборов может повлиять на режим работы измеряемой цепи. К таким цепям относятся системы управления тиристорами на тепловозах, электро-возах и тяговых подстанциях, устройства радиосвязи и др.

Приборы с цифровой индикацией, кроме того, дают более точный отсчет измерений, независимый от человека, проводящего измерения.

§ 101. Измерение тока и напряжения

Измерение тока. Для измерения тока в цепи амперметр 2 (рис. 332, а) или миллиамперметр включают в электрическую цепь последовательно с приемником 3 электрической энергии.

Для того чтобы включение амперметра не оказывало влияния на работу электрических установок и он не создавал больших потерь энергии, амперметры выполняют с малым внутренним сопротивлением. Поэтому практически сопротивление его можно считать равным нулю и пренебрегать вызываемым им падением напряжения. Амперметр можно включать в цепь только последовательно с нагрузкой. Если амперметр подключить непосредственно

к источнику I , то через катушку прибора пойдет очень большой ток (сопротивление амперметра мало) и она сгорит.

Для расширения пределов измерения амперметров, предназначенных для работы в цепях постоянного тока, их включают в цепь параллельно шунту 4 (рис. 332, б). При этом через прибор проходит только часть I_A измеряемого тока I , обратно пропорциональная его сопротивлению R_A . Большая часть $I_{ш}$ этого тока проходит через шунт. Прибор измеряет падение напряжения на шунте, зависящее от проходящего через шунт тока, т. е. используется в качестве милливольтметра. Шкала прибора градуируется в амперах. Зная сопротивления прибора R_A и шунта $R_{ш}$, можно по току I_A , фиксируемому прибором, определить измеряемый ток:

$$I = I_A (R_A + R_{ш}) / R_{ш} = I_A n, \quad (105)$$

где $n = I / I_A = (R_A + R_{ш}) / R_{ш}$ — коэффициент шунтирования. Его обычно выбирают равным или кратным 10.

Сопротивление шунта, необходимое для измерения тока I , в n раз большего, чем ток прибора I_A ,

$$R_{ш} = R_A / (n - 1). \quad (106)$$

Конструктивно шунты либо монтируют в корпус прибора (шунты на токи до 50 А), либо устанавливают вне его и соединяют с прибором проводами. Если прибор предназначен для постоянной работы с шунтом, то шкала его градуируется сразу в значениях измеряемого тока с учетом коэффициента шунтирования и никаких расчетов для определения тока выполнять не требуется. В случае применения наружных (отдельных от приборов) шунтов на них указывают номинальный ток, на который они рассчитаны, и номинальное напряжение на зажимах (калиброванные шунты). Согласно стандартам это напряжение может быть равно 45, 75, 100 и 150 мВ. Шунты подбирают к приборам так, чтобы при номинальном напряжении на зажимах шунта стрелка прибора отклонялась на всю шкалу. Следовательно, номинальные напряжения прибора и шунта должны быть одинаковыми. Имеются также индивидуальные шунты, предназначенные для работы с определенным прибором. Шунты делят на пять классов точности (0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5). Обозначение класса соответствует допустимой погрешности в процентах.

Для того чтобы повышение температуры шунта при прохождении по нему тока не оказывало влияния на показания прибора, шунты изготавливают из материалов с большим удельным сопротивлением и малым температурным коэффициентом (константан, манганин, никелин и пр.). Для уменьшения влияния температуры на показания амперметра последовательно с катушкой прибора в некоторых случаях включают добавочный резистор из константана или другого подобного материала.

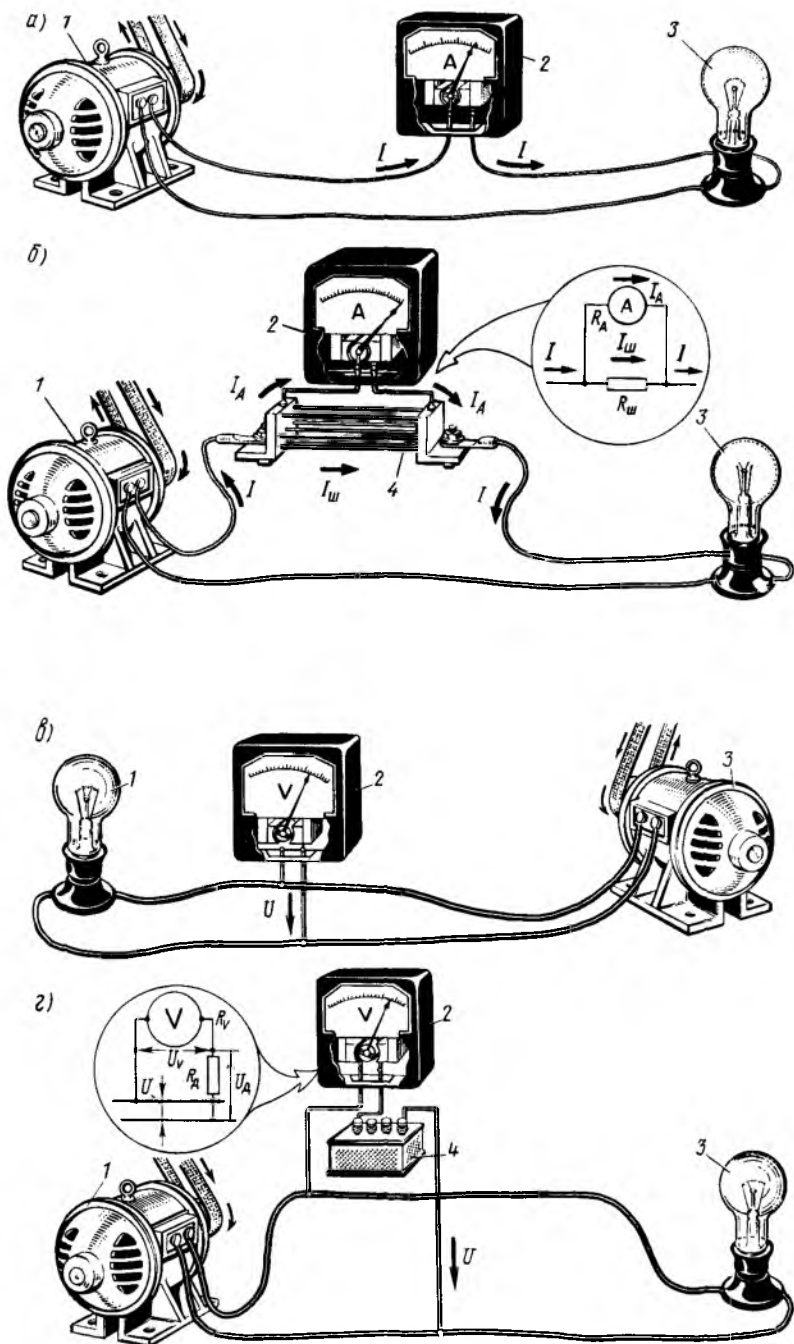


Рис. 332. Схемы для измерения тока (а, б) и напряжения (в, г)

Измерение напряжения. Для измерения напряжения U , действующего между какими-либо двумя точками электрической цепи, вольтметр 2 (рис. 332, в) присоединяют к этим точкам, т. е. параллельно источнику 1 электрической энергии или приемнику 3.

Для того чтобы включение вольтметра не оказывало влияния на работу электрических установок и он не создавал больших потерь энергии, вольтметры выполняют с большим сопротивлением. Поэтому практически можно пренебрегать проходящим по вольтметру током.

Для расширения пределов измерения вольтметров последовательно с обмоткой прибора включают добавочный резистор 4 (R_d) (рис. 332, г). При этом на прибор приходится лишь часть U_V измеряемого напряжения U , пропорциональная сопротивлению прибора R_V .

Зная сопротивление добавочного резистора и вольтметра, можно по значению напряжения U_V , фиксируемого вольтметром, определить напряжение, действующее в цепи:

$$U = \frac{R_V + R_d}{R_V} U_V = n U_V. \quad (107)$$

Величина $n = U/U_V = (R_V + R_d)/R_V$ показывает, во сколько раз измеряемое напряжение U больше напряжения U_V , приходящегося на прибор, т. е. во сколько раз увеличивается предел измерения напряжения вольтметром при применении добавочного резистора.

Сопротивление добавочного резистора, необходимое для измерения напряжения U , в n раз большего напряжения прибора U_V , определяется по формуле $R_d = (n - 1) R_V$.

Добавочный резистор может встраиваться в прибор и одновременно использоваться для уменьшения влияния температуры окружающей среды на показания прибора. Для этой цели резистор выполняется из материала, имеющего малый температурный коэффициент, и его сопротивление значительно превышает сопротивление катушки, вследствие чего общее сопротивление прибора становится почти независимым от изменения температуры. По точности добавочные резисторы подразделяются на те же классы точности, что и шунты.

Делители напряжения. Для расширения пределов измерения вольтметров применяют также делители напряжения. Они позволяют уменьшить подлежащее измерению напряжение до значения, соответствующего номинальному напряжению данного вольтметра (предельного делителя на его шкале). Отношение входного напряжения делителя U_1 к выходному U_2 (рис. 333, а) называется коэффициентом деления. При холостом ходе $U_1/U_2 = (R_1 + R_2)/R_2 = = 1 + R_1/R_2$. В делителях напряжения это отношение может быть выбрано равным 10, 100, 500 и т. д. в зависимости от того, к каким

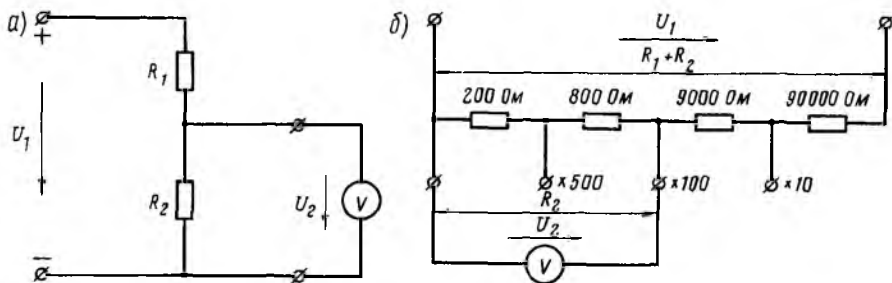


Рис. 333. Схемы включения делителей напряжения

выводам делителя подключен вольтметр (рис. 333, б). Делитель напряжения вносит малую погрешность в измерения только в том случае, если сопротивление вольтметра R_V достаточно велико (ток, проходящий через делитель, мал), а сопротивление источника, к которому подключен делитель, мало.

Измерительные трансформаторы. Для включения электроизмерительных приборов в цепи переменного тока служат измерительные трансформаторы, обеспечивающие безопасность обслуживающего персонала при выполнении электрических измерений в цепях высокого напряжения. Включение электроизмерительных приборов в эти цепи без таких трансформаторов запрещается правилами техники безопасности. Кроме того, измерительные трансформаторы расширяют пределы измерения приборов, т. е. позволяют измерять большие токи и напряжения с помощью несложных приборов, рассчитанных для измерения малых токов и напряжений.

Измерительные трансформаторы подразделяют на трансформаторы напряжения и трансформаторы тока. *Трансформатор напряжения 1* (рис. 334, а) служит для подключения вольтметров и других приборов, которые должны реагировать на напряжение. Его выполняют, как обычный двухобмоточный понижающий трансформатор: первичную обмотку подключают к двум точкам, между которыми требуется измерить напряжение, а вторичную — к вольтметру 2.

На схемах измерительный трансформатор напряжения изображают как обычный трансформатор (на рис. 334, а показано в круге).

Так как сопротивление обмотки вольтметра, подключаемого к трансформатору напряжения, велико, трансформатор практически работает в режиме холостого хода, и можно с достаточной степенью точности считать, что напряжения U_1 и U_2 на первичной и вторичной обмотках будут прямо пропорциональны числу витков ω_1 и ω_2 обеих обмоток трансформатора, т. е.

$$U_1/U_2 = \omega_1/\omega_2 = n. \quad (108)$$

Таким образом, подобрав соответствующее число витков ω_1 и ω_2 обмоток трансформатора, можно измерять высокие напряже-

ния, подавая на электроизмерительный прибор небольшие напряжения.

Напряжение U_1 может быть определено умножением измеренного вторичного напряжения U_2 на коэффициент трансформации трансформатора n .

Вольтметры, предназначенные для постоянной работы с трансформаторами напряжения, градуируют на заводе с учетом коэффициента трансформации, и значения измеряемого напряжения могут быть непосредственно отсчитаны по шкале прибора.

Для предотвращения опасности поражения обслуживающего персонала электрическим током в случае повреждения изоляции трансформатора один вывод его вторичной обмотки и стальной кожух трансформатора должны быть заземлены.

Трансформатор тока 3 (рис. 334, б) служит для подключения амперметров и других приборов, которые должны реагировать на протекающий по цепи переменный ток. Его выполняют в виде

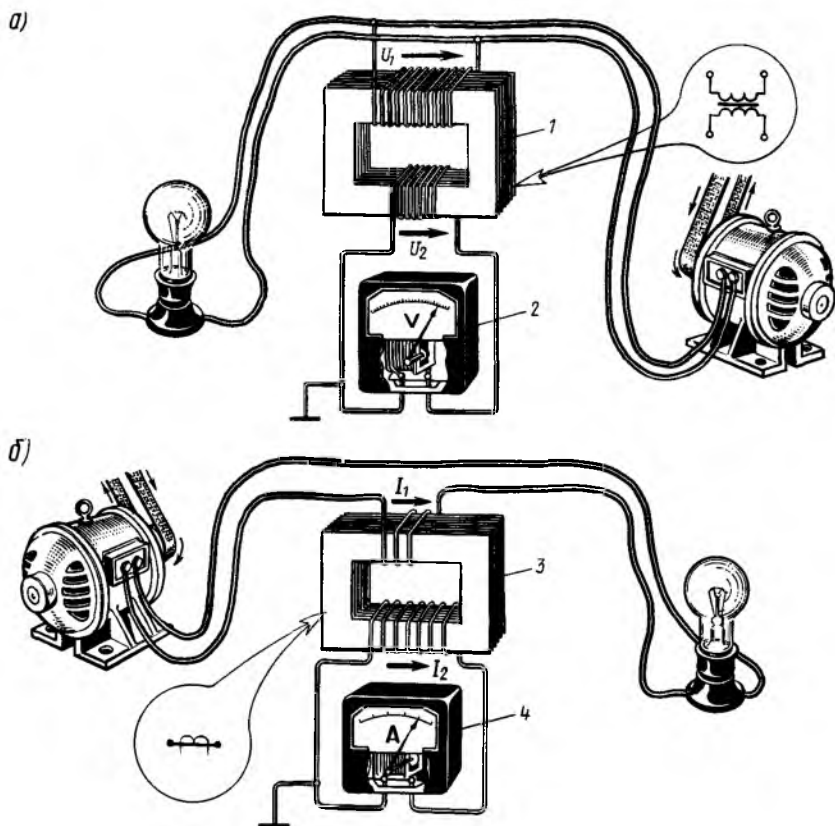


Рис. 334. Включение электроизмерительных приборов посредством измерительных трансформаторов напряжения (а) и тока (б)

обычного двухобмоточного повышающего трансформатора; первичную обмотку включают последовательно в цепь измеряемого тока, к вторичной обмотке подключают амперметр 4.

Схемное обозначение измерительных трансформаторов тока показано на рис. 334, б в круге.

Так как сопротивление обмотки амперметра, подключаемого к трансформатору тока, обычно мало, трансформатор практически работает в режиме короткого замыкания, и с достаточной степенью точности можно считать, что токи I_1 и I_2 , проходящие по его обмоткам, будут обратны пропорциональны числу витков ω_1 и ω_2 этих обмоток, т. е.

$$I_1 I_2 = \omega_2 / \omega_1 = n. \quad (109)$$

Следовательно, подобрав соответствующим образом число витков ω_1 и ω_2 обмоток трансформатора, можно измерять большие токи I_1 , пропуская через электроизмерительный прибор малые токи I_2 . Ток I_1 может быть при этом определен умножением измеренного вторичного тока I_2 на величину n .

Амперметры, предназначенные для постоянной работы совместно с трансформаторами тока, градуируют на заводе с учетом коэффициента трансформации, и значения измеряемого тока I_1 могут быть непосредственно отсчитаны по шкале прибора.

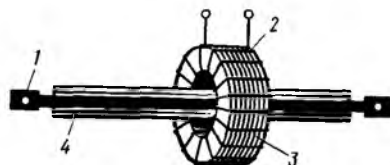
Для предотвращения опасности поражения обслуживающего персонала электрическим током в случае повреждения изоляции трансформатора один из зажимов вторичной обмотки и кожух трансформатора заземляют.

На э. п. с. применяют так называемые проходные трансформаторы тока (рис. 335). В таком трансформаторе магнитопровод 3 и вторичная обмотка 2 смонтированы на проходном изоляторе 4, служащем для ввода высокого напряжения в кузов, а роль первичной обмотки трансформатора выполняет медный стержень 1, проходящий внутри изолятора.

Условия работы трансформаторов тока отличаются от обычных. Например, размыкание вторичной обмотки трансформатора тока при включенной первичной обмотке недопустимо, так как это вызовет значительное увеличение магнитного потока и, как следствие, температуры сердечника и обмотки трансформатора, т. е. выход его из строя. Кроме того, в разомкнутой вторичной обмотке трансформатора может индуцироваться большая э. д. с., опасная для персонала, производящего измерение.

При включении приборов посредством измерительных трансформаторов возникают погрешности двух видов: погрешность в коэффициенте трансформации и угловая погрешность (при изменении напряжения или тока отношения U_1/U_2 и I_1/I_2 несколько изменяются и угол сдвига фаз между первичным и вторичным напряжениями и токами отклоняется от 180°). Эти погрешности возрастают при нагрузке трансформатора свыше номинальной. Угловая погрешность оказывает влияние на результаты измере-

Рис. 335. Проходной измерительный трансформатор тока



ний приборами, показания которых зависят от угла сдвига фаз между напряжением и током (например, ваттметров, счетчиков электрической энергии и пр.). В зависимости от допускаемых погрешностей измерительные трансформаторы подразделяют по классам точности. Класс точности (0,2; 0,5; 1 и т. д.) соответствует наибольшей допускаемой погрешности в коэффициенте трансформации в процентах от его номинального значения.

§ 102. Измерение мощности и электрической энергии

Измерение мощности. В цепях постоянного тока мощность измеряют электро- или ферродинамическим ваттметром. Мощность может быть также подсчитана перемножением значений тока и напряжения, измеренных амперметром и вольтметром.

В цепях однофазного тока измерение мощности может быть осуществлено электродинамическим, ферродинамическим или индукционным ваттметром. Ваттметр 4 (рис. 336) имеет две катушки: токовую 2, которая включается в цепь последовательно, и напряжения 3, которая включается в цепь параллельно.

Ваттметр является прибором, требующим при включении соблюдения правильной полярности, поэтому его генераторные зажимы (зажимы, к которым присоединяют проводники, идущие со стороны источника 1) обозначают звездочками.

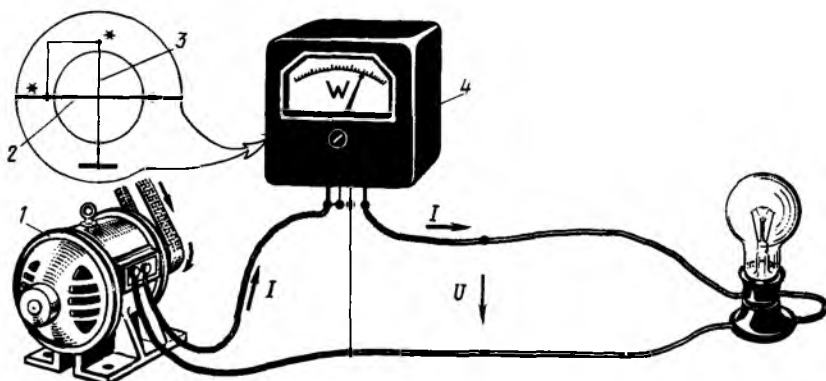


Рис. 336. Схема для измерения мощности

Для расширения пределов измерения ваттметров их токовые катушки включают в цепь при помощи шунтов или измерительных трансформаторов тока, а катушки напряжения — через добавочные резисторы или измерительные трансформаторы напряжения.

Измерение электрической энергии. Способ измерения. Для учета электрической энергии, получаемой потребителями или отдаваемой источниками тока, применяют счетчики электрической энергии. Счетчик электрической энергии по принципу своего действия аналогичен ваттметру. Однако в отличие от ваттметров вместо спиральной пружины, создающей противодействующий момент, в счетчиках предусматривают устройство, подобное электромагнитному демпферу, создающее тормозящее усилие, пропорциональное частоте вращения подвижной системы. Поэтому при включении прибора в электрическую цепь возникающий вращающий момент будет вызывать не отклонение подвижной системы на некоторый угол, а вращение ее с определенной частотой.

Число оборотов подвижной части прибора будет пропорционально произведению мощности электрического тока на время, в течение которого он действует, т. е. количеству электрической энергии, проходящей через прибор. Число оборотов счетчика фиксируется счетным механизмом. Передаточное число этого механизма выбирают так, чтобы по показаниям счетчика можно было отсчитывать не обороты, а непосредственно электрическую энергию в киловатт-часах.

Наибольшее распространение получили ферродинамические и индукционные счетчики; первые применяют в цепях постоянного тока, вторые — в цепях переменного тока. Счетчики электрической энергии включают в электрические цепи постоянного и переменного тока так же, как и ваттметры.

Ферродинамический счетчик (рис. 337) устанавливают на э. п. с. постоянного тока. Он имеет две катушки: неподвижную 4 и подвижную 6. Неподвижная токовая катушка 4 разделена на две части, которые охватывают ферромагнитный сердечник 5 (обычно из пермаллоя). Последний позволяет создать в приборе сильное магнитное поле и значительный вращающий момент, обеспечивающий нормальную работу счетчика в условиях тряски и вибраций. Применение пермаллоя способствует уменьшению погрешности счетного механизма 2 от гистерезиса магнитной системы (он имеет весьма узкую петлю гистерезиса).

Чтобы уменьшить влияние внешних магнитных полей на показания счетчика, магнитные потоки отдельных частей токовой катушки имеют взаимно противоположное направление (аstaticкая система). При этом внешнее поле, ослабляя поток одной части, соответственно усиливает поток другой части и оказывает в целом небольшое влияние на результирующий вращающий момент, создаваемый прибором. Подвижная катушка 6 счетчика (катушка напряжения) расположена на якоре, выполненном в виде диска из изоляционного материала или в виде алюминиевой чаши. Катушка состоит из отдельных секций, соединенных с пласти-

нами коллектора 7 (эти соединения на рис. 337 не показаны), по которому скользят щетки из тонких серебряных пластин.

Ферродинамический счетчик работает принципиально как двигатель постоянного тока, обмотка якоря которого подключена параллельно, а обмотка возбуждения — последовательно с потребителем электроэнергии. Якорь вращается в воздушном зазоре между полюсами сердечника. Тормозной момент создается в результате взаимодействия потока постоянного магнита I с вихревыми токами, возникающими в алюминиевом диске $З$ при его вращении.

Для компенсации влияния момента трения и уменьшения благодаря этому погрешности прибора в ферродинамических счетчиках устанавливают компенсационную катушку или в магнитном поле неподвижной (токовой) катушки помещают лепесток из пермаллоя, который имеет высокую магнитную проницаемость при малой напряженности поля. При небольших нагрузках этот лепесток усиливает магнитный поток токовой катушки, что приводит к увеличению вращающего момента и компенсации трения. При увеличении нагрузки индукция магнитного поля катушки увеличивается, лепесток насыщается и его компенсирующее действие перестает возрастать.

При работе счетчика на э. п. с. возможны сильные толчки и удары, при которых щетки могут отскакивать от коллекторных пластин. При этом под щетками будет возникать искрение. Для его предотвращения между щетками включают конденсатор C и резистор $R1$. Компенсация температурной погрешности осуществляется с помощью термистора R_t (полупроводникового прибора, сопротивление которого зависит от температуры). Он включается совместно с добавочным резистором $R2$ параллельно подвижной катушке. Чтобы уменьшить влияние тряски и вибраций на работу счетчиков, их устанавливают на э. п. с. на резинометаллических амортизаторах.

Индукционный счетчик имеет два электромагнита (рис. 338, а), между которыми расположен алюминиевый диск 7. Вращающий момент в приборе создается в результате взаимодействия переменных магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 , созданных катушками электромагнитов, с вихревыми токами I_{a1} и I_{a2} , индуцируемыми ими в алюминиевом диске (так же, как и в обычном индукционном измерительном механизме, см. § 99).

В индукционном счетчике вращающий момент M должен быть пропорционален мощности $P = UI \cos \varphi$. Для этого катушку 6 одного из электромагнитов (токовую) включают последовательно с нагрузкой 5, а катушку 2 другого (катушку напряжения) — параллельно нагрузке. В этом случае магнитный поток Φ_1 будет пропорционален току I в цепи нагрузки, а поток Φ_2 — напряжению U , приложенному к нагрузке. Для обеспечения требуемого угла сдвига фаз ψ между потоками Φ_1 и Φ_2 (чтобы $\sin \psi = \cos \varphi$) в электромагните катушки напряжения предусмотрен магнитный шунт 3, через который часть потока Φ_2 замыкается

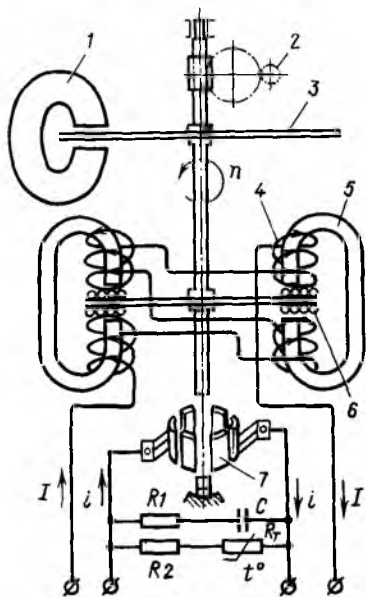


Рис. 337. Ферродинамический счетчик электрической энергии

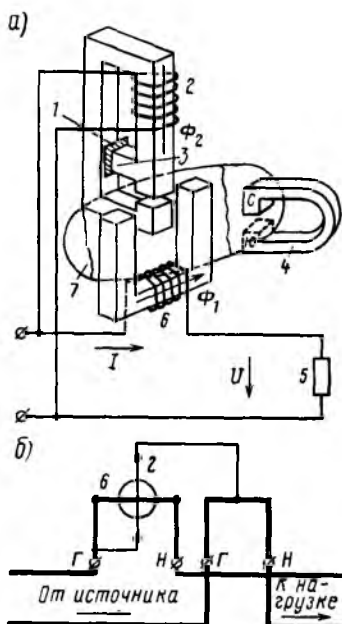


Рис. 338. Индукционный счетчик электрической энергии

помимо диска 7. Угол сдвига фаз между потоками Φ_1 и Φ_2 точно регулируется изменением положения металлического экрана 1, расположенного на пути потока, отводящегося через магнитный шунт 3.

Тормозной момент создается так же, как в ферродинамическом счетчике. Компенсация момента трения осуществляется путем создания небольшой несимметрии в магнитной цепи одного из электромагнитов с помощью стального винта.

Для предотвращения вращения якоря при отсутствии нагрузки под действием усилия, созданного устройством, компенсирующим трение, на оси счетчика укрепляется стальной тормозной крючок. Этот крючок притягивается к тормозному магниту 4, благодаря чему предотвращается возможность вращения подвижной системы без нагрузки.

При работе же счетчика под нагрузкой тормозной крючок практически не влияет на его показания.

Чтобы диск счетчика вращался в требуемом направлении, необходимо соблюдать определенный порядок подключения проводов к его клеммам. Нагрузочные зажимы прибора, к которым подключают провода, идущие от потребителя, обозначают буквами *Н* (рис. 338, б), генераторные зажимы, к которым подключают провода от источника тока или от сети переменного тока, — буквами *Г*.

§ 103. Измерение электрического сопротивления

Измерение методом амперметра и вольтметра. Сопротивление какой-либо электрической установки или участка электрической цепи можно определить с помощью амперметра и вольтметра, пользуясь законом Ома. При включении приборов по схеме рис. 339, *а* через амперметр проходит не только измеряемый ток I_x , но и ток I_V , протекающий через вольтметр. Поэтому сопротивление

$$R_x = \frac{U}{I - U/R_V}, \quad (110)$$

где R_V — сопротивление вольтметра.

При включении приборов по схеме рис. 339, *б* вольтметр будет измерять не только падение напряжения U_x на определенном сопротивлении, но и падение напряжения в обмотке амперметра $U_A = IR_A$. Поэтому

$$R_x = U/I - R_A, \quad (111)$$

где R_A — сопротивление амперметра.

В тех случаях, когда сопротивления приборов неизвестны и, следовательно, не могут быть учтены, нужно при измерении малых сопротивлений пользоваться схемой рис. 339, *а*, а при измерении больших сопротивлений — схемой рис. 339, *б*. При этом погрешность измерений, определяемая в первой схеме током I_V , а во второй — падением напряжения U_A , будет невелика по сравнению с током I_x и напряжением U_x .

Измерение сопротивлений электрическими мостами. Мостовая схема (рис. 340, *а*) состоит из источника питания, чувствительного прибора (гальванометра Γ) и четырех резисторов, включаемых в плечи моста; с неизвестным сопротивлением R_V (R_4) и известными сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 , которые могут при измерениях изменяться. Прибор включают в одну из диагоналей моста (измерительную), а источник питания — в другую (питающую).

Сопротивления R_1 , R_2 и R_3 можно подобрать такими, что при замыкании контакта B показания прибора будут равны нулю (в та-

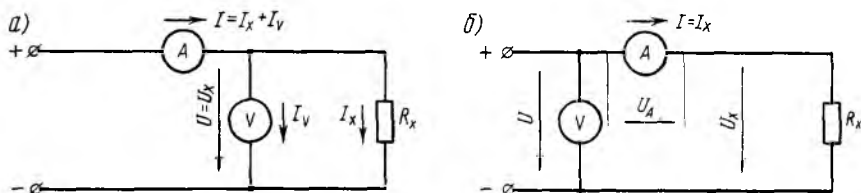


Рис. 339. Схемы для измерения сопротивления методом амперметра и вольтметра

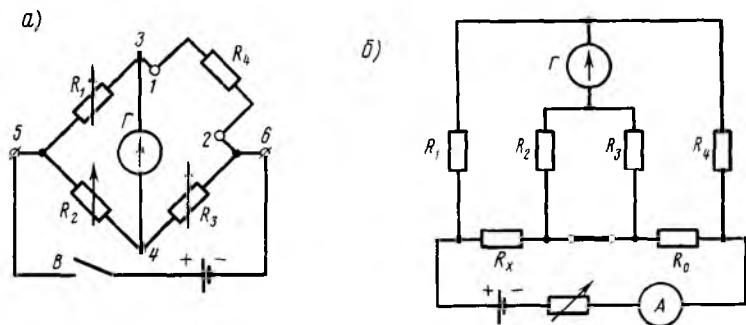


Рис. 340. Мостовые схемы постоянного тока, применяемые для измерения сопротивлений

ком случае принято говорить, что мост уравновешен). При этом неизвестное сопротивление

$$R_x = (R_1/R_2) R_3. \quad (112)$$

В некоторых мостах отношение плеч R_1/R_2 установлено постоянным, а равновесие моста достигается только подбором сопротивления R_3 . В других, наоборот, сопротивление R_3 постоянно, а равновесие достигается подбором сопротивлений R_1 и R_2 .

Измерение сопротивления мостом постоянного тока осуществляется следующим образом. К зажимам 1 и 2 присоединяют неизвестное сопротивление R_x (например, обмотку электрической машины или аппарата), к зажимам 3 и 4 — гальванометр, а к зажимам 5 и 6 — источник питания (сухой гальванический элемент или аккумулятор). Затем, изменяя сопротивления R_1 , R_2 и R_3 (в качестве которых используют магазины сопротивлений, переключаемые соответствующими контактами), добиваются равновесия моста, которое определяется по нулевому показанию гальванометра (при замкнутом контакте В).

Существуют различные конструкции мостов постоянного тока, при использовании которых не требуется выполнять вычисления, так как неизвестное сопротивление R_x отсчитывают по шкале прибора. Смонтированные в них магазины сопротивлений позволяют измерять сопротивления от 10 до 100 000 Ом.

При измерении малых сопротивлений обычными мостами сопротивления соединительных проводов и контактных соединений вносят большие погрешности в результаты измерения. Для их устранения применяют двойные мосты постоянного тока (рис. 340, б). В этих мостах провода, соединяющие резистор с измеряемым сопротивлением R_x и некоторый образцовый резистор с сопротивлением R_0 с другими резисторами моста, и их контактные соединения оказываются включенными последовательно с резисторами соответствующих плеч, сопротивление которых устанавливается не менее 10 Ом. Поэтому они практически не влияют на результаты

измерений. Провода же, соединяющие резисторы с сопротивлениями R_x и R_0 , входят в цепь питания и не влияют на условия равновесия моста. Поэтому точность измерения малых сопротивлений довольно высокая. Мост выполняют так, чтобы при регулировках его соблюдались следующие условия: $R_1 = R_2$ и $R_3 = R_4$. В этом случае

$$R_x = R_0 R_1 / R_4. \quad (113)$$

Двойные мосты позволяют измерить сопротивления от 10 до 0,000001 Ом.

Если мост не уравновешен, то стрелка в гальванометре будет отклоняться от нулевого положения, так как ток измерительной диагонали при неизменных значениях сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 и э. д. с. источника тока будет зависеть только от изменения сопротивления R_x . Это позволяет проградуировать шкалу гальванометра в единицах сопротивления R_x или каких-либо других единицах (температура, давление и пр.), от которых зависит это сопротивление. Поэтому неуравновешенный мост постоянного тока широко используют в различных устройствах для измерения неэлектрических величин электрическими методами.

Применяют также различные мосты переменного тока, которые дают возможность измерить с большой точностью индуктивности и емкости.

Измерение омметром. Омметр представляет собой миллиамперметр I с магнитоэлектрическим измерительным механизмом и включается последовательно с измеряемым сопротивлением R_x (рис. 341) и добавочным резистором R_d в цепь постоянного тока. При неизменных э. д. с. источника и сопротивления резистора R_d ток в цепи зависит только от сопротивления R_x . Это позволяет отградуировать шкалу прибора непосредственно в омах. Если выходные зажимы прибора 2 и 3 замкнуты накоротко (см. штриховую линию), то ток I в цепи максимален и стрелка прибора отклоняется вправо на наибольший угол; на шкале этому соответствует сопротивление, равное нулю. Если цепь прибора разомкнута, то $I = 0$ и стрелка находится в начале шкалы; этому положению соответствует сопротивление, равное бесконечности.

Питание прибора осуществляется от сухого гальванического элемента 4, который устанавливается в корпусе прибора. Прибор будет давать правильные показания только в том случае, если источник тока имеет неизменную э. д. с. (такую же, как и при градуировке шкалы прибора). В некоторых омметрах имеются два или несколько пределов измерения, например от 0 до 100 Ом и от 0 до 10 000 Ом. В зависимости от этого резистор с измеряемым сопротивлением R_x подключают к различным зажимам.

Измерение больших сопротивлений мегаомметрами. Для измерения сопротивления изоляции чаще всего применяют мегаомметры магнитоэлектрической системы. В качестве измерительного механизма в них использован логометр 2 (рис. 342), показания кото-

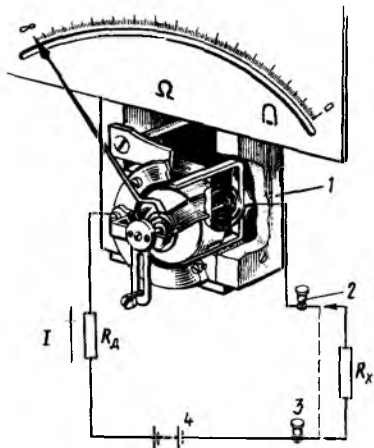


Рис. 341. Схема включения омметра

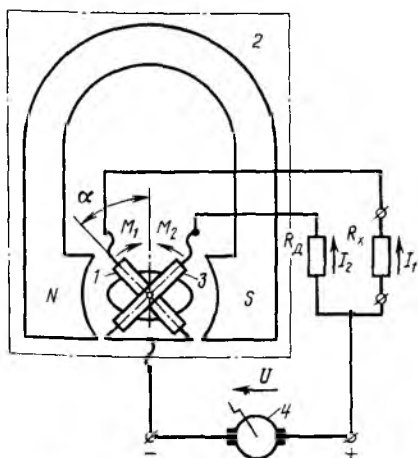


Рис. 342. Устройство мегаомметра

рого не зависят от напряжения источника тока, питающего измерительные цепи. Катушки 1 и 3 прибора находятся в магнитном поле постоянного магнита и подключены к общему источнику питания 4.

Последовательно с одной катушкой включают добавочный резистор R_d , в цепь другой катушки — резистор сопротивлением R_x .

В качестве источника тока обычно используют небольшой генератор 4 постоянного тока, называемый индуктором; якорь генератора приводят во вращение рукояткой, соединенной с ним через редуктор. Индукторы имеют значительные напряжения от 250 до 2500 В, благодаря чему мегаомметром можно измерять большие сопротивления.

При взаимодействии протекающих по катушкам токов I_1 и I_2 с магнитным полем постоянного магнита создаются два противоположно направленных момента M_1 и M_2 , под влиянием которых подвижная часть прибора и стрелка будут занимать определенное положение. Как было показано в § 100, положение подвижной

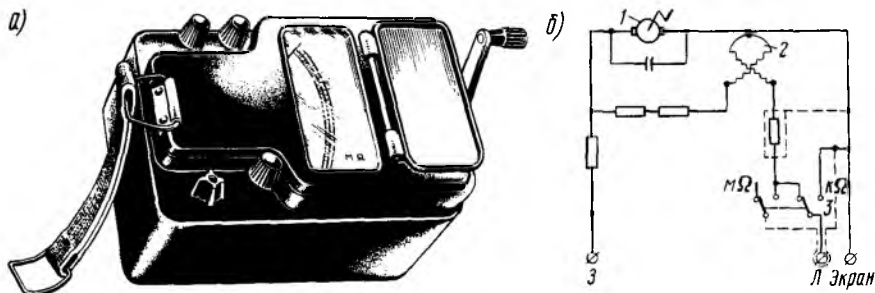


Рис. 343. Общий вид мегаомметра (а) и его упрощенная схема (б)

части логометра зависит от отношения I_1/I_2 . Следовательно, при изменении R_x будет изменяться угол α отклонения стрелки. Шкала мегаомметра градуируется непосредственно в килоомах или мегаомах (рис. 343, а).

Чтобы измерить сопротивление изоляции между проводами, необходимо отключить их от источника тока (от сети) и присоединить один провод к зажиму L (линия) (рис. 343, б), а другой — к зажиму Z (земля). Затем, вращая рукоятку индуктора I мегаомметра, определяют по шкале логометра 2 сопротивление изоляции. Имеющийся в приборе переключатель 3 позволяет изменять пределы измерения. Напряжение индуктора, а следовательно, частота вращения его рукоятки теоретически не оказывают влияние на результаты измерений, но практически рекомендуется вращать ее более или менее равномерно.

При измерении сопротивления изоляции между обмотками электрической машины отсоединяют их друг от друга и соединяют одну из них с зажимом L , а другую с зажимом Z , после чего, вращая рукоятку индуктора, определяют сопротивление изоляции. При измерении сопротивления изоляции обмотки относительно корпуса его соединяют с зажимом Z , а обмотку — с зажимом L .

§ 104. Измерение частоты переменного тока

Частоту переменного тока измеряют частотомерами. Обычно применяют резонансные электромагнитные или ферродинамические приборы.

Электромагнитный резонансный частотомер имеет электромагнит 2 (рис. 344, а), в поле которого расположены стальной якорь 1 и соединенный с ним стальной брусок 5 . Этот брусок укреплен на упругих пружинах 4 и на нем размещен ряд гибких стальных пластинок 3 , площадь поперечного сечения которых подобрана таким образом, что каждая следующая пластинка имеет частоту собственных колебаний на 0,5 Гц больше, чем предыдущая. Сво-

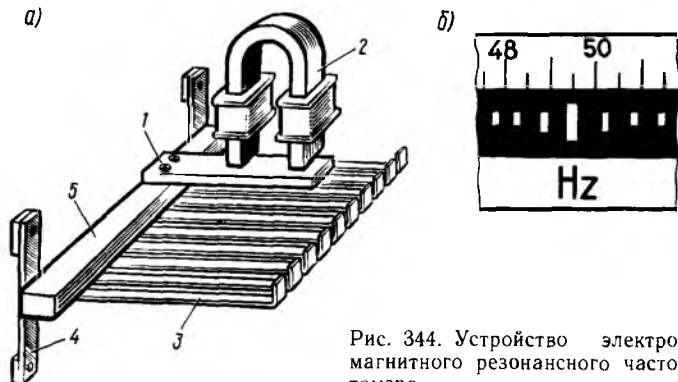


Рис. 344. Устройство электромагнитного резонансного частотомера

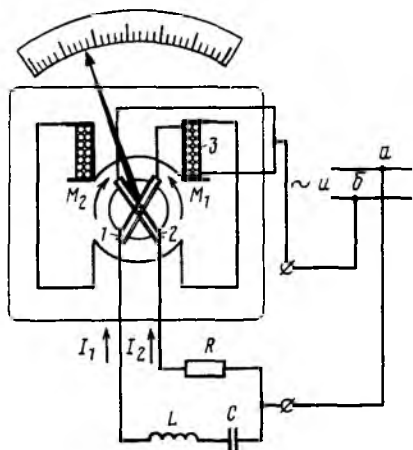


Рис. 345. Принципиальная схема ферродинамического частотомера

бодные концы пластинок введены в прорезь, имеющуюся на шкале прибора. Катушка электромагнита присоединена к сети переменного тока так же, как и катушка вольтметра.

При прохождении по катушке переменного тока электромагнит создает магнитное поле, пульсирующее с частотой изменения тока. Находящийся в этом поле якорь *1* также начнет совершать колебательные движения и вызывать колебания связанных с ним пластинок *3*.

Колебания пластинок обычно бывают настолько незначительными, что они не могут быть замечены глазом. Однако если частота собственных колебаний

какой-либо пластинки совпадает с частотой изменения переменного тока, т. е. с частотой колебаний якоря, то наступит явление механического резонанса, при котором эта пластинка начнет колебаться с большой амплитудой. Белый квадратик на ее конце превращается при этом в белую полоску (рис. 344, б), против которой по шкале можно отсчитывать измеряемую частоту. Значительно слабее колеблются две пластинки, колебания же всех остальных пластинок обычно совершенно незаметны для глаза.

Ферродинамический частотомер (рис. 345) представляет собой логометр ферродинамической системы. Катушки логометра соединяются в две параллельные цепи, которые подключаются к двум точкам *a* и *b*, между которыми действует напряжение переменного тока *U* (так же, как и вольтметры). Последовательно с неподвижной *3* и одной из подвижных *1* катушек включены катушка индуктивности *L* и конденсатор *C*, а последовательно с другой подвижной катушкой *2* — резистор с сопротивлением *R* (могут быть и другие комбинации *R*, *L* и *C*). Поэтому ток *I*₁ в первой параллельной ветви зависит от частоты *f*, а ток *I*₂ во второй цепи не зависит от *f*.

В результате при изменении частоты *f* будут изменяться ток *I*₁ и положение подвижной части логометра до тех пор, пока не наступит равновесие моментов *M*₁ и *M*₂, создаваемых его катушками. Показания такого прибора будут зависеть от частоты *f*.

§ 105. Измерение электрическими методами неэлектрических величин

Принципы измерения неэлектрических величин. В современной технике широко применяются измерения неэлектрических величин (температуры, давления, усилий и пр.) электрическими методами.

В большинстве случаев такие измерения сводятся к тому, что неэлектрическая величина преобразуется в зависимую от нее электрическую величину (например, сопротивление, ток, напряжение, индуктивность, емкость и пр.), измеряя которую, получают возможность определить искомую неэлектрическую величину.

Устройство, осуществляющее преобразование неэлектрической величины в электрическую, называется *датчиком*. Датчики делятся на две основные группы: параметрические и генераторные. В параметрических датчиках неэлектрическая величина вызывает изменение какого-либо электрического или магнитного параметра: сопротивления, индуктивности, емкости, магнитной проницаемости и пр. В зависимости от принципа действия эти датчики подразделяются на датчики сопротивления, индуктивные, емкостные и др.

В генераторных датчиках неэлектрическая величина вызывает появление э. д. с. К этим датчикам относятся индукционные, термоэлектрические, пьезоэлектрические и пр.

Устройства для измерения различных неэлектрических величин электрическими методами широко применяют на э. п. с. и тепловозах. Такие устройства состоят из датчиков, какого-либо электроизмерительного прибора (гальванометра, милливольтметра, миллиамперметра, логометра и т. д.) и промежуточного звена, которое может включать в себя электрический мост, усилитель, выпрямитель, стабилизатор и др.

Электрические термометры сопротивления. Для контроля температуры воды, охлаждающей дизель, применяют электрические термометры, датчиком 3 которых (рис. 346) служат терморезисторы (термисторы). Термисторы выполняют из полупроводниковых материалов. Для предохранения от внешних воздействий датчик заключен в защитную арматуру. Указателем 1 служит логометр. Датчик 3 (R_1) включается в одно из плеч неуравновешенного моста 2, три остальных плеча моста образуют резисторы сопротивлениями R_1 , R_2 и R_3 . Катушки логометра включаются в измерительную диагональ моста последовательно с резистором сопротивлением R_4 .

Терморезисторы имеют значительный разброс в характеристике зависимости сопротивления от температуры. Поэтому для получения требуемой градуировки шкалы прибора приходится применять дополнительные добавочные и подгоночные резисторы сопротивлениями R_8 и R_9 . С помощью этих резисторов осуществ-

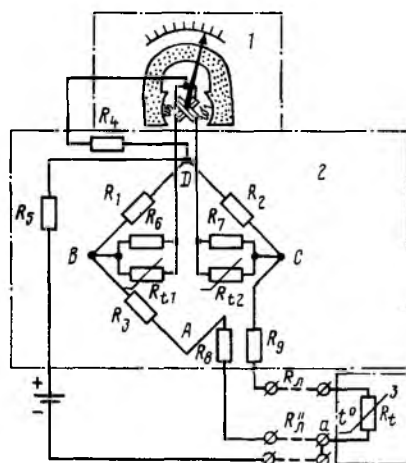


Рис. 346. Принципиальная схема электрического термометра с терморезисторным датчиком

вляют уравновешивание моста при начальной измеряемой температуре (градуируют нулевую точку шкалы).

Применение логометра в качестве указателя обеспечивает независимость показаний прибора при колебаниях питающего напряжения. Для уменьшения погрешности, обусловленной влиянием сопротивления проводов, соединяющих датчик с указателем, применено соединение их тремя проводами. Если бы они соединялись двумя проводами, подключенными к точкам A и C моста, то сопротивления этих проводов складывались бы сопротивлением датчика R_d и это создавало бы погрешность измерения. При наличии же трех соединительных проводов питание подается в точки a и C , в результате чего сопротивление R'_d одного из проводов складывается с сопротивлением датчика, а сопротивление R''_d другого провода — с сопротивлением R_8 . При этом в два плеча моста добавляются одинаковые сопротивления R'_d и R''_d , и ток в измерительной диагонали практически не будет зависеть от изменения сопротивления соединительных проводов. Резистор с сопротивлением R_5 обеспечивает уменьшение напряжения, подаваемого на измерительный мост, до установленного для данного прибора значения.

Для компенсации температурной погрешности, которую вносит изменение сопротивления катушек логометра при изменении окружающей температуры, последовательно с катушками включены терморезисторы R_{11} и R_{12} . При увеличении температуры сопротивление медного провода катушек увеличивается, а терморезисторов R_{11} и R_{12} — уменьшается, в результате чего суммарное сопротивление катушки и терморезисторов остается приблизительно постоянным. Для более точной подгонки суммарного сопротивления параллельно терморезисторам включают резисторы сопротивлениями R_6 и R_7 . Резисторы сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 , R_4 и R_5 изготовляют из манганина, электрическое сопротивление которого мало меняется при изменении температуры, поэтому вводить температурную компенсацию изменения сопротивления этих резисторов не требуется.

Датчик помещают в среду, где требуется измерить температуру (например, в воду, циркулирующую в системе охлаждения дизеля). При повышении температуры воды нарушается равновесие моста и изменяется ток в его измерительной диагонали, куда включен указатель. Шкала указателя градуируется непосредственно в $^{\circ}C$.

В логометрах подвижная часть при выключенном питании занимает произвольное положение. Поэтому в данном приборе применено принудительное возвращение стрелки в нулевое положение при выключенном питании с помощью так называемых безмоментных пружин. Создаваемый ими вращающий момент значительно меньше моментов, создаваемых катушками логометра, и не оказывает заметного влияния на показания прибора.

Электрические термометры с термоэлектрическими датчиками устанавливают на тепловозах для контроля температуры газов в цилиндрах дизеля. В комплект термометра входит термоэлектрический датчик (термопара) и милливольтметр, служащий указате-

лем. Термоэлектрический датчик выполнен из двух сваренных вместе проволок или пластин из разнородных металлов или сплавов. Когда два таких проводника *A* и *B* (рис. 347) соединяются в какой-либо точке и включаются в замкнутую электрическую цепь, при изменении температуры места их соединения в цепи возникает электродвижущая сила, называемая термо-э. д. с. Спай *I* двух разнородных металлов термопары называют горячим спаем, концы *2* и *3* — свободными или холодными спаями.

Значение термо-э. д. с. зависит только от разности температур t_1 нагретого *I* и t_2 холодных *2* и *3* концов проводников *A* и *B* и от природы материалов, применяемых в качестве электродов. Если температуру свободных концов поддерживать постоянной и одинаковой, то термо-э. д. с. будет пропорциональна температуре горячего спая. Термопары развивают сравнительно небольшую термо-э. д. с., поэтому милливольтметры, используемые для ее измерения, должны иметь точную температурную компенсацию. Шкала такого прибора градуируется в °С.

На тепловозах применяют термоэлектрические датчики, составленные из следующих сплавов: хромель (89% Ni + 10% Cr + 1% Fe) — копель (56% Cu + 44% Ni); хромель — алюмель (95% Ni + 2% Al + 2% Mn + 1% Si). Термопара из этих сплавов создает термо-э. д. с. 4—7 мВ. Если электроизмерительный прибор подключить к термопаре медными проводами, то возникнет большая погрешность измерения, так как при электрическом контакте свободных концов *2* и *3* термопары с соединительными проводами из-за разности температур t_2 и t_0 (в месте установки прибора) появятся добавочные термо-э. д. с. Для устранения этой погрешности соединительные провода *C* и *D* (их называют *компенсационными*) изготовляют из материалов, обладающих теми же термоэлектрическими характеристиками, что и электроды термопары. Следовательно, возникающие в месте контактов *2* и *3* термо-э. д. с. будут иметь такие же значения, как и в основной термопаре. Компенсационные провода изготовляют из тех же материалов, что и электроды термопары, но они имеют меньшую площадь сечения. В этом случае температура концов *2* и *3* может быть различной.

Электрические уровнемеры. Для измерения объема или уровня жидкости в баках и резервуарах применяют различного рода электрические уровнемеры. В качестве примера рассмотрим схему электрического уровнемера с реостатным датчиком (рис. 348, а). В баке с измеряемой жидкостью помещен поплавков *I*, положение которого определяется объемом или уровнем жидкости. Изменение положения поплавка вызывает изменение сопротивлений R_1 и R_2 реостатного датчика *3*, включенных в два плеча моста постоян-

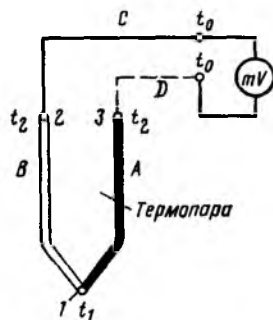


Рис. 347. Принципиальная схема электрического термометра с термоэлектрическим датчиком

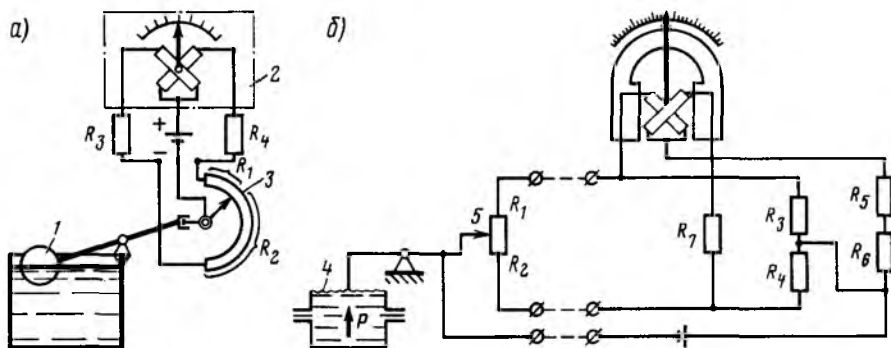


Рис. 348. Принципиальные схемы электрических уровнемера (а) и манометра (б) с реостатными датчиками

ного тока, два других плеча которого образованы резисторами сопротивлений R_3 и R_4 . Изменение сопротивлений R_1 и R_2 изменяет ток в измерительной диагонали моста, в которую включены катушки логометра 2, служащего указателем. Шкала логометра градуируется в единицах объема, занимаемого жидкостью, или единицах уровня жидкости.

Электрические манометры. Для измерения давления масла в системе смазки дизеля на тепловозах устанавливают электрические манометры. Такой манометр имеет реостатный датчик 5 (рис. 348, б), движок которого связан с гофрированной мембраной 4. Указателем служит логометр, шкала которого градуирована непосредственно в единицах давления. Логометр включен в диагональ электрического моста постоянного тока, плечи которого образованы сопротивлениями R_1 и R_2

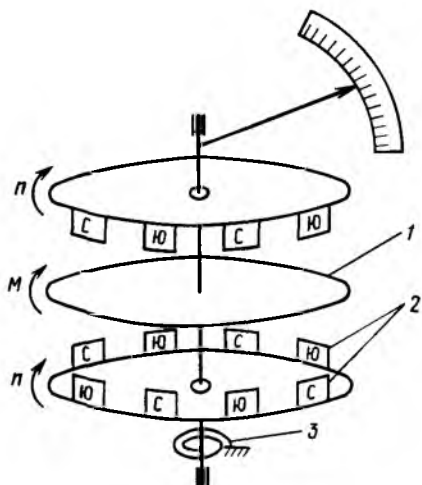


Рис. 349. Принципиальная схема магнитно-индукционного тахометра

реостатного датчика и резисторами сопротивлений R_3 и R_4 . Резисторы сопротивлений R_5 и R_6 предназначены для получения требуемой градуировки шкалы прибора и температурной компенсации, а резистор сопротивлением R_7 — для выравнивания сопротивлений катушек логометра (одна из них имеет большие размеры, чем другая). При изменении давления в корпусе датчика мембрана прогибается и перемещает движок реостата. При этом изменяются сопротивления R_1 и R_2 датчика и ток в измерительной диагонали моста. Следовательно, стрелка указателя изменяет свое положение.

Электрические тахометры. Частоту вращения валов различных машин (электродвигателей, дизелей и пр.) измеряют приборами, называемыми *тахометрами*. Наибольшее распространение получили электрические тахометры с асинхронным тахогенератором, принцип действия которого рассмотрен в § 84. На тепловозах применяют магнитно-индукционные тахометры (рис. 349), измеряющие частоту вращения вала дизеля. Вал тахометра связывают непосредственно или посредством гибкого вала с валом дизеля.

При вращении вала тахометра приводится во вращение магнитный узел, состоящий из двух дисков, на которых укреплены постоянные магниты 2. При вращении дисков создается вращающееся магнитное поле, которое индуцирует вихревые токи в расположенном между магнитами токопроводящем диске 1. В результате взаимодействия вращающегося магнитного поля с вихревыми токами возникает вращающий момент M (как и в индукционных приборах), стремящийся повернуть диск в направлении вращения электромагнитов. Этот момент пропорционален частоте пересечения магнитным полем токопроводящего диска, т. е. частоте вращения n вала дизеля: $M = c_1 n$.

Валик, на котором укреплен токопроводящий диск 1, связан со стрелкой прибора и спиральной пружиной 3, создающей противодействующий момент $M_{пр} = c_2 \alpha$. При равновесии этих моментов $M = M_{пр}$, т. е.

$$\alpha = (c_1/c_2) n = cn. \quad (114)$$

Следовательно, угол отклонения стрелки α пропорционален частоте вращения n , т. е. прибор имеет равномерную шкалу.

Контрольные вопросы

1. Для чего служат измерительные приборы и на какие классы они делятся по степени точности?
2. Как устроены магнитозлектрические приборы и где они используются?
3. Каково устройство электромагнитных приборов и где их применяют?
4. Расскажите о конструкции электродинамических и ферродинамических приборов и объясните, для чего они служат.
5. Как измеряют ток и напряжение?
6. Как измеряют электрическую мощность и частоту переменного тока?
7. Для чего служат счетчики электрической энергии и как они устроены?
8. Какими методами измеряют электрическое сопротивление?
9. Как производится измерение электрическими методами неэлектрических величин и какие существуют для этого приборы?

§ 106. Назначение и классификация электротехнических материалов

Для производства электрических машин, аппаратов и другого электрооборудования используют специальные материалы, обладающие определенными электрическими или магнитными свойствами. В зависимости от этого электротехнические материалы разделяют на четыре группы: проводниковые, полупроводниковые¹, магнитные и электроизоляционные.

Проводниковые материалы отличаются большой удельной электрической проводимостью и используются в электрических устройствах в качестве проводников электрического тока: обмотки и контакты в электрических машинах, аппаратах и приборах, провода и кабели для передачи и распределения электрической энергии.

Полупроводниковые материалы занимают по удельной проводимости промежуточное место между проводниками и диэлектриками.

Магнитные материалы отличаются способностью усиливать магнитное поле, в которое их помещают, т. е. обладают большой магнитной проводимостью. Они используются для изготовления магнитопроводов в электрических машинах и трансформаторах, для экранирования магнитного поля и других целей.

Электроизоляционные материалы (диэлектрики) отличаются очень малой удельной электрической проводимостью. В диэлектриках преобладают электростатические явления, характеризующиеся наличием электрического поля.

Диэлектрики служат для изоляции друг от друга различных токопроводящих деталей, находящихся под разными потенциалами.

§ 107. Проводниковые материалы

Проводниковые материалы можно разделить на две группы: с высокой удельной электрической проводимостью и с высоким удельным сопротивлением.

Материалы с высокой проводимостью. К проводниковым материалам с высокой проводимостью относятся медь, алюминий и некоторые сплавы (латунь, фосфористая бронза и др.). Они широко используются для изготовления катушек электрических машин, аппаратов и приборов. К таким материалам предъявляются требования возможно меньшего удельного сопротивления и возможно большей механической прочности. Для различных случаев применения эти требования в той или иной степени уточняются. Например, для катушек машин и аппаратов выгоднее иметь меньшее удельное сопротивление даже за счет некоторого снижения механической прочности. Для воздушных же проводов контактной сети и линий электропередачи важно иметь определенную механическую прочность на разрыв.

Наименьшим удельным сопротивлением обладает чистый металл. Любые примеси повышают удельное сопротивление. Примесь другого металла, имеющего меньшее удельное сопротивление, чем основной, повышает его сопротивление. Это объясняется искажением кристаллической решетки основного металла даже небольшим количеством примеси. Кристаллическая решетка металлов искажается не только

¹ Особенности свойств полупроводников и их применение рассмотрены в книге А. Е. Зороховича, С. С. Крылова «Основы электроники для локомотивных бригад» (М., Транспорт, 1983).

введением примесей, но и в результате механических деформаций. В связи с этим обработка металла, приводящая к пластической деформации, вызывает увеличение его удельного сопротивления. В частности, это имеет место в процессе изготовления проводов при прокатке и волочении.

Медь и латунь применяют для изготовления проводов и различных токопроводящих деталей электрических машин и аппаратов. Медные провода и шины получают прокаткой и протяжкой, при этом медь приобретает высокую механическую прочность и твердость (медь марки МП). Такую твердотянутую медь используют для изготовления коллекторных пластин, неизолированных проводов, распределительных шин и пр. При термической обработке твердотянутой меди (отжиге при температуре 330—350 °С) получают мягкую медь марки ММ, обладающую большой гибкостью и способностью сильно вытягиваться; электропроводность ее также увеличивается. Мягкую медь используют для изготовления изолированных проводов, кабелей и пр.

В качестве проводниковых материалов применяют также различные бронзы, представляющие собой сплавы меди с другими металлами. Все бронзы имеют не только более высокую механическую прочность, чем медь, но и большее удельное сопротивление. Для изготовления контактных проводов и коллекторных пластин применяют преимущественно кадмиевые бронзы, для пружин, щеткодержателей, скользящих контактов, ножей рубильников — бериллиевые бронзы. Латунь (сплав меди с цинком) имеет также по сравнению с медью высокую механическую прочность, прочность против истирания, но вместе с тем и значительно более высокое удельное сопротивление. Латунь хорошо штампуются, вытягивается, паяется и сваривается.

Вторым по значению в электротехнике проводниковым материалом является алюминий. Из него изготавливают провода, некоторые детали электрических машин и аппаратов. Так же, как и медь, он при протяжке и других видах холодной обработки получается довольно твердым, а после отжига становится мягким. Плотность алюминия около 2,6 г/см³, примерно в 3,5 раза меньше меди (ее плотность 8,9 г/см³). Для увеличения прочности и улучшения механических свойств к алюминию иногда прибавляют медь, магний, марганец и кремний. Таким путем получают различные алюминиевые сплавы — силумин, дуралюминий и пр.

По твердости различают две марки алюминия: АТ — алюминий твердый неотожженный и АМ — алюминий мягкий отожженный. Соединение алюминиевых проводов и других деталей производят обычно сваркой или заклепками, так как из-за высокой температуры плавления окиси алюминия, покрывающей поверхность алюминиевых деталей (примерно 2000 °С), и быстрого окисления зачищенной поверхности пайка алюминия обычным способом затруднена.

Материалы с высоким удельным сопротивлением. Проводниковые материалы с высоким сопротивлением бывают металлические, получившие наибольшее распространение, и неметаллические. Металлические проводниковые материалы можно разделить на три группы: 1 — для точных электронизмерительных приборов и образцовых резисторов; 2 — для резисторов и реостатов; 3 — имеющие высокую рабочую температуру и предназначенные для нагревательных приборов и нагружаемых реостатов.

Основным материалом 1-й группы является медно-марганцевый сплав — манганин. Манганин изготавливается двух марок: МНМцЗ-12 (3 % Ni, 12 % Мп, 85 % Cu) и МНМцАЖЗ-12-0,3-0,3 (3 % Ni, 12 % Мп, 0,3 % Al, 0,3 % Fe, 84,4 % Cu). Из первого сплава изготавливают твердую и мягкую (отожженную) проволоку, из второго — только мягкую.

К материалам 2-й группы относится константан (40 % Ni, 60 % Cu). Удельное сопротивление мягкой константановой проволоки $0,465 \cdot 10^{-6}$, а твердой $0,49 \times 10^{-6}$ См·м. Его температурный коэффициент сопротивления близок к нулю.

К материалам 3-й группы относятся сплавы никеля, хрома и железа (нихром); хрома, алюминия и железа (фехраль). Проволока из этих сплавов делится по применению на марки Н (для нагревательных приборов) и С (для реостатов).

В электронной аппаратуре широко применяют металлопленочные резисторы МЛТ, С2-22 и др. Токопроводящим элементом этих резисторов является тонкий слой сплава с высоким удельным сопротивлением, нанесенный на поверхность керамического стержня и покрытый защитным слоем эмали.

Угльно-графитные проводники по проводимости немногим уступают металлам и их сплавам и используются как проводящие элементы.

В основе угльных проводниковых материалов лежит графит и уголь. Важнейшими видами электротехнических угльных изделий являются щетки для электрических машин и непроволочные резисторы. В процессе производства большинства угльных изделий углеродистое сырье (графит, уголь) измельчают, смешивают со связующими компонентами, формуют и обжигают. Обожженные щетки покрывают медью по поверхности щеткодержателя и армируют соединительными проводниками.

Щетки, применяемые для электрических машин, подразделяют на четыре основные группы: угольно-графитные, графитные, электрографитированные и металлографитные. Угольно-графитные щетки (УГ) изготавливают из материалов, богатых углеродом (нефтекокк, кокс, антрацит и др.). Эти материалы превращают в порошок, добавляют к ним связующие вещества и из полученной таким образом массы прессуют щетки различных размеров.

Для улучшения электрических и механических свойств щетки подвергают обжигу. Угольно-графитные щетки допускают сравнительно небольшую плотность тока (6—8 А/см²).

Их применяют в коллекторных машинах постоянного и переменного тока напряжением 110—220 В.

Графитные щетки (Г) изготавливают из натурального графита. Просеянный графитный порошок прессуют под большим давлением со связующими материалами или без них и полученные изделия обжигают. Такие щетки применяют для коллекторных машин постоянного тока напряжением 110 В.

Электрографитированные щетки (ЭГ) изготавливают из различных углеродистых материалов (сажа, нефтекокк, кокс, антрацит), которые превращаются в искусственный графит при нагреве в электрической печи при температуре 2000—3000 °С. Такая термическая обработка повышает электрическую и тепловую прочность угля и понижает коэффициент трения, что способствует уменьшению износа коллекторов электрических машин. Электрографитированные щетки обладают хорошими коммутационными свойствами (повышенным сопротивлением), значительной механической прочностью и способностью выдерживать большие перегрузки. Их применяют для коллекторных машин постоянного и переменного тока, работающих в тяжелых условиях, в частности для тяговых двигателей и вспомогательных машин э. п. с. и тепловозов. Плотность тока для щеток допускают 9—11 А/см².

Металлографитные щетки изготавливают из смеси графита и медного порошка (медно-графитные щетки МГ). Для некоторых марок щеток добавляют в небольшом количестве цинковый, оловянный или свинцовый порошок (бронзово-графитные щетки БГ). Отличительной особенностью металлографитных щеток являются высокая допустимая плотность тока (до 20 А/см²) и малое сопротивление. Их применяют в извлекательных машинах постоянного тока, в синхронных двигателях и синхронных машинах.

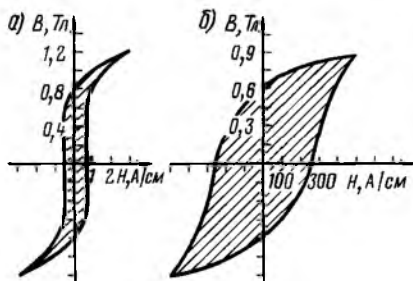
В электронной аппаратуре широко используют непроволочные углеродистые резисторы, которые бывают поверхностные и объемные. В первых сопротивлением служит тонкий углеродистый слой — пленка на электроизоляционном основании (их называют тонкопленочными); объемные резисторы представляют собой стержни из массы, состоящей из смеси углерода с органической и неорганической связкой. Углеродистые резисторы бывают постоянные и переменные; сопротивление последних изменяется в заданных пределах. Пленочные резисторы ВС выполняются в виде керамических цилиндрических стержней или трубок, на поверхность которых нанесен слой углерода, покрытый лаковой пленкой.

§ 108. Магнитные материалы

Классификация магнитных материалов. В электротехнических устройствах применяют, главным образом, ферромагнитные материалы — железо, никель, кобальт и их сплавы.

В зависимости от ширины петли гистерезиса ферромагнитные материалы разделяются на магнитно-мягкие и магнитно-твердые. Магнитно-мягкие материалы обычно используют для работы в переменном магнитном поле, так как малая ширина петли гистерезиса (рис. 350, а) обуславливает сравнительно малые потери энергии при

Рис. 350. Петли гистерезиса магнитно-мягких (а) и магнитно-твердых (б) материалов



перемагничивании. К магнитно-мягким материалам относится электротехническая сталь, которая имеет малую коэрцитивную силу и высокую магнитную проницаемость. Поэтому ее применяют для изготовления магнитопроводов в электрических машинах и аппаратах. Еще большую магнитную проницаемость и меньшую коэрцитивную силу имеют сплавы железа и никеля — пермаллой; железа, алюминия и кремния — альсифер и др., которые применяют в устройствах радиотехники и автоматики.

Магнитно-твердые материалы (рис. 350, б) служат для изготовления постоянных магнитов, используемых в электроизмерительных приборах, телефонах, некоторых реле и пр. К ним относятся закаленная углеродистая сталь, кобальтовая сталь и различные сплавы из алюминия, никеля, железа, кобальта: магнито, алнико и др.

Как видно из кривых намагничивания (рис. 351, а), обычная сталь или стальное литье (кривая 3) достигает магнитного насыщения при более высоких индукциях, чем чугун (кривая 1). Электротехническая сталь (кривая 4) достигает насыщения при еще больших индукциях. Некоторые ферромагнитные материалы, например пермаллой разных марок, имеют прямоугольную петлю гистерезиса (кривая 2). Их широко применяют для изготовления магнитных усилителей, в качестве элементов памяти в счетно-решающих устройствах и пр. Чем выше располагается кривая намагничивания, тем меньший намагничивающий ток требуется для создания в ферромагнитном материале требуемой индукции и тем лучше он пропускает магнитный поток.

Если последовательно изменять наибольшие значения напряженности поля H , можно получить семейство симметричных гистерезисных петель 1, 2, 3, 4 (рис. 351, б). Наибольшая петля, которая может быть получена для данного материала, называется предельной петлей гистерезиса, а кривая $O—A$, проходящая через вершины

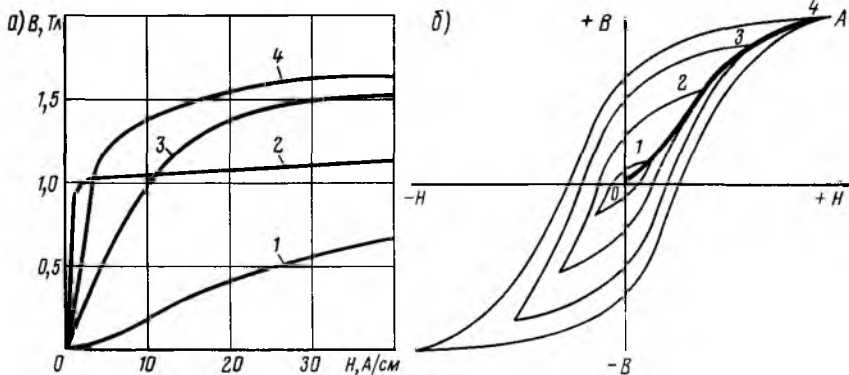


Рис. 351. Кривые намагничивания различных материалов (а) и петли гистерезиса при различных значениях наибольшей индукции (б)

симметричных гистерезисных петель,— основной кривой намагничивания. Ее используют при расчете магнитных цепей электрических устройств.

Физически возникновение остаточного магнетизма и насыщения объясняется тем, что в ферромагнитных материалах группы атомов и молекул образуют элементарные магнетики (домены), самопроизвольно намагниченные в определенном направлении. При отсутствии внешнего магнитного поля домены ориентированы в различных направлениях (рис. 352, а). При намагничивании вначале происходит процесс смещения границ, разделяющих соседние домены. При этом те домены, у которых магнитные поля атомов близки по направлению к внешнему полю (т. е. составляя с ним острый угол), увеличиваются, поглощая смежные домены (рис. 352, б). Этот процесс происходит скачкообразно и имеет место на прямой части кривой намагничивания.

При достаточно большой напряженности внешнего поля домены, в которых магнитные поля атомов ориентированы против внешнего поля (т. е. составляют с ним тупой угол), полностью исчезают (рис. 352, в). При дальнейшем возрастании напряженности осуществляется поворот магнитных полей атомов во всех доменах в направлении внешнего поля (рис. 352, г). Когда эти поля во всех доменах окажутся ориентированными в направлении внешнего поля, практически достигается магнитное насыщение.

При размагничивании ферромагнитного вещества в нем происходят такие же процессы, как и при намагничивании, но в обратном порядке. Однако на характер их протекания оказывает существенное влияние кристаллическая структура ферромагнитных материалов. Все ферромагнитные вещества в магнитном отношении являются анизотропными, т. е. намагничивание происходит у них различным образом в зависимости от направления внешнего магнитного поля относительно осей кристалла. Например, в кристалле железа намагничивание вдоль ребра куба (рис. 353, а) можно осуществить при меньшей напряженности (т. е. оно требует меньшей затраты энергии), чем намагничивание вдоль пространственной диагонали. Эти направления называются соответственно *направлениями легкого и трудного намагничивания*. Если начать размагничивать ферромагнитное вещество, то магнитные поля атомов во всех доменах будут постепенно отходить все дальше и дальше от положения, показанного на рис. 352, г, поворачиваясь по направлению к ближайшей оси легкого намагничивания. Когда напряженность внешнего поля станет равной нулю, магнитные поля всех атомов не возвратятся в первоначальное состояние, а окажутся ориентированными вдоль оси легкого намагничивания, ближайшей к направлению поля. В результате индукция собственного магнитного поля в ферромагнитном веществе не будет равной нулю, т. е. в нем возникает остаточный магнетизм.

Электротехническая сталь. Она является магнитно-мягким материалом, широко применяемым в электротехнических изделиях. В сталь вводят 0,8—4,8 % кремния, что резко повышает удельное электрическое сопротивление. В результате этого в электротехнической стали резко снижаются потери мощности от вихревых токов. Вместе с тем введение кремния снижает потери на гистерезис и увеличивает магнитную проницаемость в слабых и средних полях.

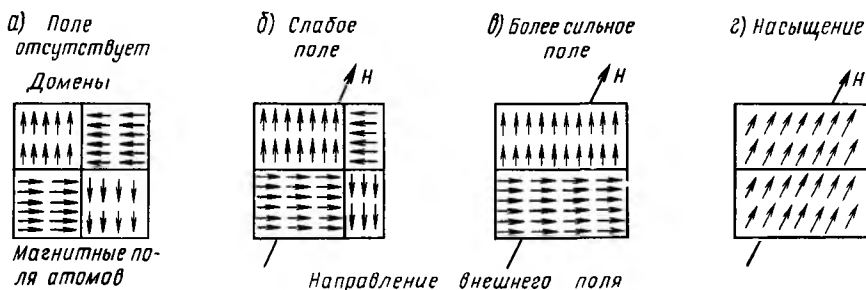
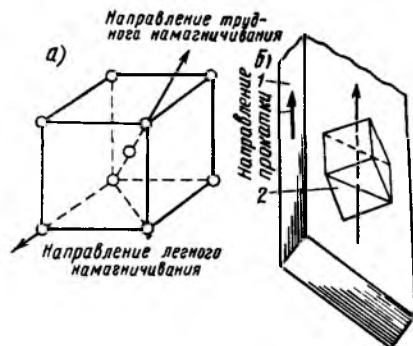


Рис. 352. Процесс изменения доменов при намагничивании ферромагнитного материала

Рис. 353. Направления легкого и трудного намагничивания в кристалле ферромагнитного материала (а) и их расположение в холоднокатаной стали (б)



Электротехническая сталь обладает малой коэрцитивной силой и имеет высокую магнитную проницаемость, что делает ее основным материалом, используемым для изготовления различных магнитопроводов в электрических машинах и аппаратах. Электротехническую сталь изготавливают в виде листов толщиной 0,1—0,5 мм горячей или холодной прокатки. Эта сталь в зависимости от состава разделяется на ряд марок: 1111, 1112, 1311, 1411, 3411 и др. Первая цифра в обозначении марки электротехнической стали характеризует класс по структурному составу и виду прокатки: 1 — горячекатаная изотропная; 2 — холоднокатаная изотропная; 3 — холоднокатаная анизотропная. Вторая цифра характеризует содержание кремния: 0 — до 0,4 %; 1 — от 0,4 до 0,8 %; 2 — от 0,8 до 1,8 %; 3 — от 1,8 до 2,8 %; 4 — от 2,8 до 3,8 %; 5 — от 3,8 до 4,8 %. Третья цифра характеризует группу по основной нормируемой характеристике: 0 — удельные потери при магнитной индукции $B=1,7$ Тл и частоте $f=50$ Гц ($p_{1,7/50}$); 1 — удельные потери при $B=1,5$ Тл и $f=50$ Гц ($p_{1,5/50}$); 2 — удельные потери при $B=1,0$ Тл и $f=400$ Гц ($p_{1,0/400}$); 6 — магнитная индукция в слабых магнитных полях при $H=0,4$ А/М ($B_{0,4}$); 7 — магнитная индукция в средних магнитных полях при $H=10$ А/М ($B_{1,0}$). Четвертая цифра указывает порядковый номер типа стали.

Различие горячекатаной и холоднокатаной сталей объясняется в значительной степени их кристаллической структурой. Крупнокристаллические материалы обладают большей магнитной проницаемостью и меньшей коэрцитивной силой, чем мелкокристаллические. Механическая же и термическая обработка позволяют, как известно, изменять размеры кристаллов, а следовательно, и магнитные свойства ферромагнитных материалов. При механической обработке и закалке стали в металле возникают внутренние напряжения, которые препятствуют при намагничивании свободной ориентации элементарных магнетиков в направлении поля. Это вызывает уменьшение магнитной проницаемости и увеличение коэрцитивной силы.

Отжиг стали (нагрев с последующим медленным остыванием), наоборот, вызывает уменьшение внутренних напряжений и возрастание размеров кристаллов. В результате повышается магнитная проницаемость и уменьшается коэрцитивная сила. При горячей прокатке электротехнической стали происходит лишь слабая ориентация зерен стали в направлении прокатки. Такая изотропная сталь имеет приблизительно одинаковые магнитные свойства в различных направлениях.

Путем повторной холодной прокатки стали и особой термической обработки (отжигом) изготавливают так называемую текстурованную сталь крупнокристаллического строения. В листе текстурованной стали I (рис. 353, б) отдельные кристаллы 2 расположены не беспорядочно, а имеют определенную пространственную ориентацию; ребрами куба они устанавливаются в направлении прокатки, вследствие чего направление прокатки совпадает с осью легкого намагничивания этой стали. Такая сталь называется анизотропной и при правильном ее использовании (если направление магнитного потока, проходящего через сердечник, составленный из стальных листов, совпадает с направлением их прокатки) имеет значительно большую магнитную проницаемость и меньшую коэрцитивную силу, чем нетекстурованная. Снижение толщины листа электротехнической стали благоприятно сказывается на снижении потерь от вихревых токов.

Из листовой электротехнической стали 1-го класса изготовляют магнитопроводы различных контакторов реле и регуляторов, из стали 2-го класса — сердечники роторов и статоров электрических машин переменного тока и якорей машин постоянного тока, из стали 3-го класса — магнитопроводы силовых трансформаторов и статоры крупных синхронных машин.

Для изготовления остонов электрических машин постоянного тока применяют стальное литье с содержанием углерода до 1 %. Отлитые из такой стали изделия подвергают медленному отжигу. Сварные детали электрических машин изготовляют из конструкционной углеродистой или слаболегированной стали. Из листов этой же стали выполняют главные полюсы машин постоянного тока.

Ответственные детали электрических машин — валы якорей и роторов, стяжные шпильки, пружины — изготовляют из стали с повышенными механическими свойствами — легированной, содержащей в своем составе хром, никель, вольфрам и молибден.

В некоторых электротехнических устройствах возникает необходимость применения немагнитных материалов и, в частности, немагнитных стали или чугуна. Из них выполняют, например, крышки, кожуха и крепежные детали силовых трансформаторов. Для получения такой стали и чугуна в их состав вводят значительные добавки никеля (20—25 % для стали и 9—12 % для чугуна), которые способствуют созданию особой кристаллической структуры, препятствующей образованию областей самопроизвольного намагничивания. Немагнитная сталь и чугун являются парамагнитными материалами. Относительная магнитная проницаемость их составляет 1,05—1,2.

Пермаллой. Для получения больших индукций в слабых магнитных полях применяют железоникелевые сплавы. Из них наибольшее распространение получил пермаллой (79 % никеля, 10—18 % железа, остальное — медь, молибден, марганец, хром). По содержанию никеля пермаллой делится на две группы: высоконикелевый и низконикелевый. Высоконикелевый пермаллой содержит никеля до 80 %; его применяют для изготовления сердечников магнитных усилителей, катушек индуктивности, реле и пр. К этой группе относятся марки 79НМ (легированный молибденом с медью) и 80НХС (легированный молибденом с хромом). Высокая магнитная проницаемость и большое удельное сопротивление этих сплавов обеспечивают пониженные потери при высоких частотах перемагничивания вплоть до диапазона радиочастот.

Низконикелевый легированный пермаллой марки 50НХС содержит 38—50 % никеля с добавкой марганца, кремния и хрома. Такой пермаллой имеет меньшее значение относительной магнитной проницаемости, чем легированный высоконикелевый, но более высокое значение удельного сопротивления; его применяют для изготовления сердечников трансформаторов, катушек индуктивностей и пр. Низконикелевый пермаллой марок 65НП и 50НП имеет петлю гистерезиса прямоугольной формы.

Все пермаллои выпускаются в виде холоднокатаных лент или горячекатаных листов (или прутков).

Железоникелевые сплавы весьма чувствительны к механической обработке и удару. Поэтому готовые ленты или листы должны подвергаться отжигу для снятия внутреннего напряжения. Если после отжига изделия подвергаются механическим воздействиям (удару, изгибу и т. д.), то это приводит к снижению магнитной проницаемости. Электрическую изоляцию между листами или витками пермаллоя получают путем нанесения огнеупорных оксидов алюминия, магния, хрома или кремния.

Ферриты и магнитодиэлектрики. По своему составу ферриты представляют собой сложные соединения оксидов железа с окислами других металлов. Их изготовляют из соответствующих порошков в виде требуемых деталей (измельчают исходные материалы до стадии порошка, формируют детали и обжигают их). Ферриты имеют сравнительно малое значение индукции и большое удельное электрическое сопротивление. Последнее обстоятельство и определяет их широкое применение в высокочастотной технике.

Магнитодиэлектрики получают путем прессования порошков ферромагнитного материала (например, сплава альсифер) со связывающими компонентами, в качестве которых применяются смолы. Смола, окружающая частицы ферромагнитного материала, является хорошим изолятором, что обеспечивает значительное сопротивление магнитодиэлектрика при высокой магнитной проницаемости.

§ 109. Электроизоляционные материалы

Основные характеристики электроизоляционных материалов. В электрических машинах и аппаратах токоведущие части надежно изолируют одну от другой и от окружающих деталей. Например, проводники обмотки якоря должны быть изолированы друг от друга и от сердечника якоря, витки обмоток возбуждения — один от другого, а также от полюсов и остова машины и т. д. Для изоляции токоведущих деталей между ними и соседними деталями прокладывают материалы, практически не проводящие электрического тока (диэлектрики). Такие материалы называют *электроизоляционными*. В их основе лежат как органические, так и неорганические вещества с соответствующими добавками для пропитки и склеивания. Кроме твердых диэлектриков, широкое применение в трансформаторах, выключателях и других электротехнических установках получили жидкие диэлектрики: различные трансформаторные масла и др. Довольно часто в различных электротехнических установках и устройствах в качестве диэлектрика используются воздух или определенные газы.

В современном электромашиностроении и аппаратостроении широко применяют разнообразные изоляционные материалы. Все они отличаются друг от друга электрическими, механическими и химическими свойствами. Важнейшими электрическими характеристиками электроизоляционных материалов являются электрическая прочность, удельное электрическое сопротивление (объемное и поверхностное), диэлектрическая проницаемость и значение диэлектрических потерь. Однако для практических целей немаловажное значение имеют и другие характеристики этих материалов: механическая прочность, гибкость и эластичность, нагревостойкость, морозостойкость, гигроскопичность, химическая стойкость и т. п.

Электрическая прочность диэлектриков. При повышении напряжения, приложенного к диэлектрику, может наступить *пробой* — потеря диэлектриком его электроизоляционных свойств с образованием токопроводящего канала высокой проводимости. Напряжение $U_{пр}$, при котором наступает пробой, называется *пробивным*. Напряженность электрического поля $E_{пр}$, при которой произошел пробой, характеризует электрическую прочность диэлектрика,

$$E_{пр} = U_{пр}/h,$$

где h — кратчайшее расстояние по диэлектрику между точками приложения напряжения.

Электрическая прочность для сухого незапыленного воздуха составляет примерно 30 кВ/см, пропитанной лаком хлопчатобумажной ленты 40—50 кВ/см, электрокартона 80—100 кВ/см, фарфора 60—150 кВ/см, слюды 300—2000 кВ/см.

Напряженность электрического поля E , которая допускается в изолирующем материале электротехнической установки в процессе эксплуатации, обычно в несколько раз ниже электрической прочности $E_{пр}$ примененного диэлектрика. Следовательно, и пробивное напряжение изоляции в несколько раз больше номинального (рабочего) напряжения установки. Отношение пробивного напряжения к номинальному определяет запас прочности изоляции.

При выходе электротехнических изделий с завода-изготовителя или после их ремонта они подвергаются испытаниям на электрическую прочность изоляции путем приложения определенного напряжения между токоведущими частями (например, между различными обмотками трансформатора) и между токоведущими частями и корпусом. Напряжение, которым испытываются установки, обычно несколько ниже пробивного, но в несколько раз превышает номинальное рабочее. Это напряжение называется *испытательным*, и при его приложении не должен наступать пробой изоляции.

Кроме электрооборудования, испытательным напряжением проверяют изоляцию всех защитных средств: диэлектрические перчатки, коврики, штанги, инструмент с изолированными ручками и т. д.

Пробивное напряжение зависит не только от изоляционного материала, но и от конфигурации проводников, между которыми проложена изоляция. Дело в том, что от формы проводников зависит равномерность электрического поля. В неравномерном электрическом поле пробой образуется в тех местах диэлектрика, где имеет

место наибольшая напряженность поля (выше $E_{пр}$), например вблизи выступающих углов токоведущих частей электрических установок.

Через токопроводящий канал при пробое происходит концентрированный электрический разряд с образованием дуги и частичным сгоранием материала диэлектрика. Процесс и развитие пробоя в газообразных, жидких и твердых диэлектриках имеют свои особенности.

Пробой воздуха, как и других газов, происходит вследствие развития процесса ударной ионизации. При приложении электрического поля свободные ионы и электроны, которые всегда в небольшом количестве имеются в газе, начинают перемещаться в направлении поля. При этом каждая заряженная частица приобретает определенную энергию. Если эта энергия достаточно велика, то при столкновении электронов с молекулами газа происходит ионизация молекул, т. е. их расщепление на электроны и положительные ионы. В результате ионизации создаются новые пары положительных ионов и электронов. Каждый из электронов может в свою очередь ионизировать молекулы и создавать новые электроны и положительные ионы. Тем самым создается лавинный процесс. Электрическая прочность воздуха или газа зависит от расстояния между электродами, давления газа, температуры и степени неоднородности электрического поля. При малых расстояниях между электродами наблюдается значительное увеличение пробивной напряженности. Так, при нормальных атмосферных условиях электрическая прочность воздуха при расстоянии между электродами 1 см составляет около 32 кВ/см, а при расстоянии 0,0005 см — 700 кВ/см.

При больших давлениях газа расстояние между отдельными молекулами становится меньше и тем самым уменьшается длина свободного пробега электрона, а следовательно, снижается его энергия. Для создания условий начала ударной ионизации потребуется большая напряженность.

Электрическая прочность жидких диэлектриков в значительной степени зависит от наличия в них примесей воды, газа, мельчайших механических частиц. Очистка жидких диэлектриков, в частности масел, от примесей заметно повышает электрическую прочность. Например, неочищенное трансформаторное масло имеет $E_{пр} \approx 40$ кВ/см, а после очистки — $E_{пр} \approx 200 \div 250$ кВ/см. Электрическая прочность очищенного трансформаторного масла практически не зависит от температуры до 80 °С, а затем начинает несколько понижаться.

Пробой твердых диэлектриков может происходить по различным физическим причинам. Различают тепловой и электрический пробой. *Тепловым пробоем* (рис. 354, а) может произойти в твердом диэлектрике 1 при длительном приложении к нему напряжения (например, в точках 2). При этом через диэлектрик проходит некоторый ток утечки, вызывающий его разогрев. При достаточно высокой напряженности E происходит сильный разогрев диэлектрика, а так как все твердые диэлектрики являются плохими проводниками тепла, то их нагрев сопровождается быстрым увеличением тока утечки. В результате происходит лавинообразный процесс нарастания температуры диэлектрика и его разрушения: он обугливается или расплавляется. Вследствие неоднородности электрического поля и структуры диэлектрика разрушение может произойти не по всей поверхности, а в одной или нескольких точках.

Причиной электрического пробоя твердых диэлектриков является ударная ионизация молекул. В месте прохождения электрического тока происходит местный

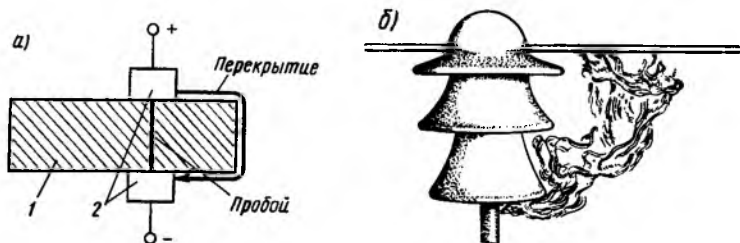
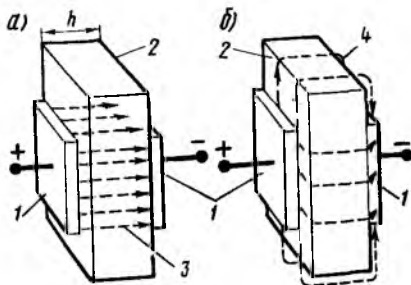


Рис. 354. Пробой и перекрытие твердого диэлектрика

Рис. 355. Пути прохождения токов утечки:

а — через толщу диэлектрика; б — по его поверхности



разогрев и разрушение диэлектрика. По сравнению с тепловым электрический пробой развивается за очень короткий промежуток времени (10^{-7} — 10^{-8} с) после того, как напряженность поля достигла критического значения. Электрический пробой возникает при значительно больших значениях напряжения, чем тепловой. Поэтому для твердых и жидких диэлектриков различают электрическую прочность при кратковременном и длительном приложении напряжения, причем электрическая прочность в последнем случае ниже.

Потеря диэлектриком изоляционных свойств может наступить также вследствие его перекрытия по поверхности. Это явление называется *перекрытием изоляции*, или *поверхностным разрядом* (см. рис. 354, а). Обычно перекрытие наступает при значительно меньшей напряженности, чем пробой. Напряжение, при котором наступает перекрытие, в значительной степени зависит от расстояния между токоведущими частями и состояния поверхности диэлектрика (влажность, загрязненность, шероховатость). Поэтому поверхности фарфоровых изоляторов и других изоляционных деталей делают полированной и волнистой (для увеличения пути возможного перекрытия). Конструкция изоляторов, предназначенных для наружной установки, предусматривает также ребра (рис. 354, б), чтобы их поверхность хотя бы частично оставалась сухой во время дождя, чем достигается необходимая стойкость к перекрытию.

При перекрытии твердая изоляция непосредственно не повреждается, если она не будет оплавлена или обожжена электрической дугой, возникшей при мощном поверхностном разряде. Во многих случаях последствия перекрытия легко устраняют зачисткой поврежденной поверхности и покрытием ее изоляционным лаком. Поэтому изоляторы и другие изоляционные изделия проектируют таким образом, чтобы их пробивное напряжение было выше напряжения перекрытия по поверхности.

Удельное сопротивление. В реальном диэлектрике всегда имеется некоторое количество свободных электронов и ионов. Под действием электрического поля эти электроны и ионы перемещаются внутри диэлектрика, образуя так называемый ток утечки. Ток утечки при нормальных условиях работы электрической установки должен быть очень малым по сравнению с рабочими токами, протекающими по ее токоведущим частям (проводам, шинам, кабелям). В случае приложения к токоведущим частям 1 (рис. 355) напряжения токи утечки 3 и 4 могут проходить через диэлектрик двумя путями: через толщу диэлектрика 2 по всему его объему (рис. 355, а) и по поверхности (рис. 355, б). В соответствии с этим различают *объемные* и *поверхностные токи утечки*, а также *удельное объемное сопротивление диэлектрика* ρ_v и его *удельное поверхностное сопротивление* ρ_s . Удельное объемное сопротивление измеряют, как и у проводниковых материалов, в омметрах ($\text{Ом} \cdot \text{м}$); оно равно сопротивлению куба из данного материала с ребром 1 м при прохождении тока от одной его грани к противоположной. Удельное поверхностное сопротивление измеряют в омах, оно представляет собой сопротивление квадрата, вырезанного из поверхности изоляции данного материала, при прохождении тока от одной его стороны к противоположной.

Таким образом, общее сопротивление изоляции $R_{из}$ определяется объемным и поверхностным сопротивлениями данного изоляционного материала. Сопротивление изоляции определяет значение общего тока утечки в данной электротехнической установке.

Изоляционные материалы — под влиянием атмосферных воздействий и света изменяют свои изоляционные свойства в результате электрохимических процессов и механического повреждения изоляции. Это явление называется *старением изоляции*. Влага, пропитывая изоляционные материалы, сильно уменьшает их сопротивление. Некоторые материалы (*гигроскопичные*) легко отсыревают даже от соприкосновения с воздухом, поглощая находящуюся в нем влагу. После просушки отсыревшие материалы вновь восстанавливают свои изоляционные качества (сопротивление их значительно возрастает). При механическом разрушении изоляционного материала (разрыве, пробое, растрескивании, изломе) он полностью или частично теряет свои изоляционные свойства.

Поверхностное сопротивление диэлектрика определяется в основном состоянием его поверхности, степенью ее загрязнения и влажностью окружающей среды. При повышенной влажности на поверхности изоляционных материалов образуются тонкие пленки влаги, через которые проходят токи утечки. Особенно сильно понижается в этом случае сопротивление у гигроскопичных материалов (непротитанные ткани, ленты, бумага и др.). Смолы же и лаки негигроскопичны; и на их поверхности не так легко образуется пленка влаги. Поэтому гигроскопичные материалы пропитывают смолами и лаками.

Фарфоровые изоляторы для повышения поверхностного сопротивления покрывают стекловидной глазурью. Без этого шероховатая поверхность фарфора легко бы загрязнялась и на ней образовывался бы слой пыли, через который проходили бы большие токи утечки. С гладкой поверхности изоляторов дожди смывают оседающую пыль, и они восстанавливают свое высокое поверхностное сопротивление.

Несмотря на эти меры, при работе во влажной среде сопротивление изоляции электротехнических установок понижается, что представляет опасность для обслуживающего персонала. Во избежание этого сопротивление изоляции необходимо поддерживать на определенном уровне (согласно имеющимся нормам).

Изоляция электрического оборудования, установленного на э.п.с. и тепловозах, работает в особо тяжелых условиях. В зимнее время изоляция электрических машин и аппаратов часто увлажняется, особенно при постановке холодного локомотива в теплое помещение (депо). Влага также может попадать на изоляцию с охлаждающим воздухом. Во всех этих случаях следует просушить отсыревшую изоляцию электрической машины или аппарата в печи или под током.

Сопротивление изоляции электрических машин снижается также в результате загрязнения угольной пылью от щеток. Скапливающаяся и увлажненная пыль создает на деталях электрических машин токопроводящие мостики, поэтому надо периодически очищать изоляцию и продувать электрические машины и аппараты сжатым воздухом. При длительной работе и сильных превышениях температуры токоведущих частей изоляция обмоток машин и аппаратов усыхает. Механическая прочность пленки лака нарушается и образуются трещины, сквозь которые внутрь изоляции проникает пыль, влага и грязь. При этом сопротивление изоляции понижается и может возникнуть электрический пробой. Для предотвращения этого усохшую изоляцию следует периодически вновь пропитывать или покрывать изоляционными лаками. При эксплуатации электрических установок необходимо систематически контролировать состояние изоляции путем измерения ее сопротивления при плановых осмотрах и ремонтах электрооборудования.

Диэлектрическая проницаемость. При внесении диэлектрика в электрическое поле, например между двумя разноименно заряженными пластинами *A* и *B* (рис. 356, *a*), происходит смещение положительно заряженных ядер *I* атомов в сторону действия силовых линий поля (по направлению к отрицательной пластине *B*), а электронных оболочек *2* — в противоположную сторону. В результате этого электрически нейтральные молекулы диэлектрика поляризуются, т. е. все положительные заряды, входящие в состав молекул, смещаются в направлении действия поля, а все отрицательные заряды — в противоположном направлении (рис. 356, *b*).

В таком поляризованном состоянии молекулы *3* находятся все время, пока диэлектрик расположен в электрическом поле. Если напряженность электрического поля не слишком велика, то положительные и отрицательные заряды молекул полностью разойтись не могут, так как электроны будут удерживаться в атомах молекулах диэлектрика внутриатомными и внутримолекулярными силами. В момент смещения электрических зарядов в молекулах диэлектрика в нем возникает ток смещения. Однако в отличие от тока в проводнике он образуется не в результате

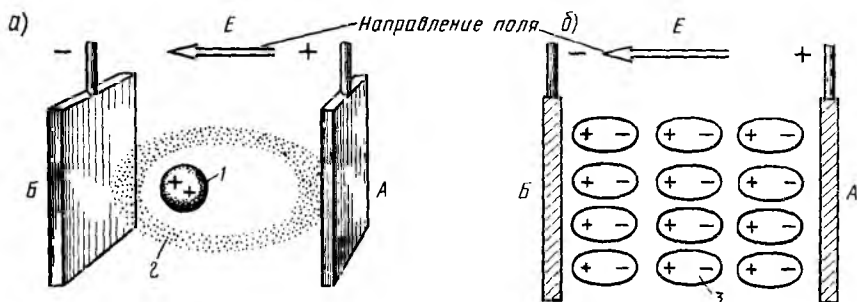


Рис. 356. Смещение ядер атомов диэлектрика и их электронных оболочек в электрическом поле (а) и поляризация молекул диэлектрика (б)

перемещения свободных электронов от одного атома к другому, а благодаря смещению электронов внутри атомов. Ток смещения появляется при внесении диэлектрика в электрическое поле и удалении его из зоны действия поля или при изменении напряженности поля.

При поляризации диэлектриков поляризованные молекулы создают свое собственное поле, направление которого противоположно направлению внешнего поля, поэтому напряженность результирующего поля уменьшается. Способность диэлектрика поляризоваться определяется его диэлектрической проницаемостью ϵ . Чем больше диэлектрическая проницаемость данного диэлектрика, тем сильнее уменьшается напряженность созданного в нем поля.

Таким образом, диэлектрическая проницаемость характеризует степень поляризации диэлектрика, а следовательно, и влияние поля его поляризованных молекул на результирующую напряженность.

Диэлектрическая проницаемость изоляционных материалов существенно влияет на емкость конденсаторов (см. § 52). Поэтому при изготовлении конденсаторов желательно применять изоляцию с большой диэлектрической проницаемостью, позволяющей легче получить требуемую емкость при малых размерах конденсатора. В электрических кабелях, наоборот, большая емкость во многих случаях является нежелательной и изоляция их должна иметь возможно меньшую диэлектрическую проницаемость. Абсолютную диэлектрическую проницаемость измеряют в фарадах на метр (Ф/м).

Абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума (пустоты) ϵ_0 равна $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ее называют также *электрической постоянной*. Абсолютную диэлектрическую проницаемость ϵ_a удобно выражать через электрическую постоянную ϵ_0 в виде $\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon$, где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость.

Относительная диэлектрическая проницаемость пустоты (вакуума) принята за единицу. Для всех других веществ она больше единицы. Например, диэлектрическая проницаемость резины больше, чем вакуума, почти в 3 раза, фарфора — в 6 раз, слюды — в 4—8, стекла — в 7—8, а дистиллированной воды — в 80 раз. Следовательно, относительная диэлектрическая проницаемость среды показывает, во сколько раз уменьшается напряженность электрического поля в какой-либо реальной среде (воздухе, фарфоре, стекле и пр.) по сравнению с вакуумом.

Угол диэлектрических потерь. При использовании изоляционных материалов в электрических установках переменного тока на диэлектрики воздействует переменное электрическое поле. В этом случае процесс поляризации будет происходить периодически то в одном, то в другом направлении и по материалу диэлектрика будет непрерывно проходить переменный ток смещения. Кроме этого, возникает и переменный ток утечки, обусловленный перемещением имеющихся в диэлектрике свободных электронов и ионов. Эти токи нагревают диэлектрик и вызывают потери электрической энергии.

В идеальном диэлектрике (без потерь электрической энергии) переменный ток опережал бы напряжение на четверть периода, т. е. на угол 90° . В реальном

диэлектрике этот ток из-за наличия потерь энергии опережает напряжение на несколько меньший угол. Разность между 90° и этим углом называется *углом диэлектрических потерь* и обозначается δ . Чем больше потери энергии при прохождении переменного тока через диэлектрик, тем больше угол δ .

Обычно качество электроизоляционных материалов характеризуется не углом потерь, а тангенсом этого угла $\operatorname{tg} \delta$. У изоляционных материалов, предназначенных для работы при высоких напряжениях и высокой частоте (трансформаторное масло, слюда, керамика и пр.), $\operatorname{tg} \delta$ составляет 0,01—0,0001. У материалов, применяемых в менее ответственных установках (картон, бумага, пластмасса), $\operatorname{tg} \delta$ составляет 0,1—0,01. При увлажнении изоляции $\operatorname{tg} \delta$ возрастает. Недопустимо большие диэлектрические потери в изоляционном материале вызывают сильный нагрев изготовленных из него изделий и могут привести к их тепловому разрушению.

Классы изоляции по нагревостойкости. Нагревостойкость — одно из самых важных качеств электроизоляционных материалов, так как она определяет допустимую нагрузку электрических машин и аппаратов. При повышении температуры многие из этих материалов начинают обугливаться и становятся проводниками. Все материалы от длительного воздействия повышенных температур задолго до обугливания приобретают хрупкость, легко разрушаются и теряют свои изолирующие свойства. Этот процесс называется *тепловым старением*. Способность электроизоляционных материалов выдержать без вреда для них воздействие повышенной температуры, а также резкие смены температуры называется *нагревостойкостью*.

Нагревостойкость изоляции является основным требованием, определяющим надежность работы и срок службы электрической машины, который нормально составляет 15—20 лет. Электроизоляционные материалы по нагревостойкости делят на семь классов:

Класс изоляции	У	А	Е	В	Ф	Н	С
Предельная температура при длительной работе, $^\circ\text{C}$	90	105	120	130	155	180	Более 180

Ниже перечислены материалы, относящиеся к каждому из этих классов:

класс У — текстильные и бумажные материалы, изготовленные из хлопка, натурального шелка, целлюлозы и полиамидов (ленты, бумага, картон, фибра), древесина и пластмассы с органическими наполнителями;

класс А — материалы класса У, пропитанные изоляционным составом или погруженные в жидкие диэлектрики (натуральные смолы, масляные, асфальтовые, эфирцеллюлозные лаки, трансформаторное масло, термопластичные компаунды); лакоткани, изоляционные ленты, лакобумаги, электрокартон, гетинакс, текстолит, пропитанное дерево, древесные слоистые пластики, некоторые синтетические пленки, изоляция проводов (ПБД, ПЭВЛО, ПЭЛШО и др.) из хлопчатобумажной ткани, шелка и лавсана, эмалевая изоляция проводов (ПЭЛ, ПЭМ, ПЭЛР и ПЭВД и др.);

класс Е — синтетические пленки и волокна, некоторые лакоткани на основе синтетических лаков, термореактивные синтетические смолы и компаунды (эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые, изоляция проводов типов ПЛД, ПЭПЛО из лавсана, эмалевая изоляция проводов типов ПЭВТЛ, ПЭТВ и др. на основе полиуретановых и полиамидных смол);

класс В — материалы на основе слюды (миканиты, микаленты, слюдиниты, слюдопласты), стекловолокна (стеклоткани, стеклолакоткани), асбестовых волокон (пряжа, бумага, ткани) с бумажной, тканевой или органической подложкой; пленкостеклопласт «Изофлекс»; пластмассы с неорганическим наполнителем; слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов; термореактивные синтетические компаунды; эмалевая изоляция проводов типов ПЭТВ, ПЭТВП и др. на основе полиэфирных лаков и термопластических смол. Пропитывающими составами служат битумно-масляно-смоляные лаки на основе природных и синтетических смол;

класс F — материалы, указанные в классе В, из слюды, стекловолокна, асбеста, но без подложки или с неорганической подложкой; пленкостеклопласт «Имидофлекс», стекловолокнистая и асбестовая изоляция проводов типов ПСД, ПСДТ, а также эма-

левая изоляция проводов типов ПЭТ-155, ПЭТП-155 на основе капрона. Пропитывающими составами служат термостойкие синтетические лаки и смолы;

класс Н — указанные в классе В материалы из слюды, стекловолокна и асбеста без подложки или с неорганической подложкой, кремнийорганические эластомеры, стекловолокнистая и асбестовая изоляция проводов типов ПСДК, ПСДКТ, эмалевая изоляция проводов типов ПЭТ-200, ПЭТП-200 и др. на основе кремнийорганических лаков; пропитывающими составами служат кремнийорганические лаки и смолы;

класс С — слюда, стекло, стекловолокнистые материалы, электротехническая керамика, кварц, шифер, асбестоцемент, материалы из слюды без подложки или со стекловолокнистой подложкой, полиимидные и полифторэтиленовые пленки. Связующим составом служат кремнийорганические и элементоорганические лаки и смолы.

Электрические машины с изоляцией класса А практически не изготавливаются, а класса Е — находят ограниченное применение в машинах малой мощности. Применяют в основном изоляцию классов В и F, а в специальных машинах, работающих в тяжелых условиях (металлургия, горное оборудование, транспорт), — класса Н. В результате использования более нагревостойких материалов, улучшения свойств электротехнических сталей и улучшения конструкций за последние 60—70 лет удалось уменьшить массу электрических машин в 2,5—3 раза.

Наибольшей нагревостойкостью обладают стекловолокнистые и слюдяные материалы, содержащие кремнийорганические связующие и пропитывающие составы, эмалевая изоляция проводов на основе кремнийорганических лаков и синтетические пленки «Изофлекс», «Имидофлекс» и др.

Приведенные на с. 402 предельные температуры нагрева для отдельных классов изоляции не могут быть полностью использованы в практике, так как в условиях эксплуатации электрических машин и аппаратов не представляется возможным установить точный контроль за температурой изоляции наиболее нагретых деталей. Поэтому существующие стандарты на электрические машины устанавливают более низкие пределы допускаемых температур отдельных деталей машин в зависимости от конструкции этих деталей и расположения их в машине. Нормируют не сами температуры, а максимально допустимые превышения температур Θ_{\max} , так как от нагрузки машины зависит только превышение температуры.

В табл. 5 приведены в качестве примера предельно допускаемые превышения температуры Θ_{\max} для отдельных частей электрических машин общего применения (О) и тяговых (Т) при продолжительном режиме работы при измерении температуры обмотки по методу сопротивления (т. е. по измерению сопротивления соответствующей обмотки в результате нагрева), а температуры коллектора и контактных колец —

Таблица 5

Части машин	Предельно допустимые превышения температуры, °С, при классе изоляции				
	А	Е	В	F	Н
Обмотка якоря машин постоянного тока и обмотки синхронных машин переменного тока	60/85	75/105	80/120	100/140	125/160
Многослойные обмотки возбуждения машин постоянного и переменного тока, компенсационные обмотки	60/85	75/115	80/130	100/155	125/180
Однорядные обмотки возбуждения с неизолированными поверхностями	65/85	80/115	90/130	110/155	135/180
Коллекторы и контактные кольца	60/95	70/95	80/95	90/95	100/105

Примечание. В числителе — для машин О, в знаменателе — для машин Т.

с помощью термометров. Эти данные соответствуют температуре окружающей среды $+40^{\circ}\text{C}$ для машин О и $+25^{\circ}\text{C}$ для машин Т.

Если температура окружающей среды больше или меньше $+40$ или $+25^{\circ}\text{C}$, то стандарт разрешает определенные изменения допустимых превышений температур. При работе машины в горных местностях, где из-за понижения атмосферного давления ухудшается теплоотдача, стандарт предусматривает некоторое уменьшение допустимых превышений температуры.

Волокнистые электроизоляционные материалы. Для изоляции электрических машин и аппаратов широко применяют различные волокнистые материалы растительного происхождения (бумагу, картон, хлопчатобумажные и шелковые волокна, ткани и ленты), а также некоторые синтетические текстильные материалы, получаемые химической переработкой отдельных веществ: искусственный шелк, синтетические волокна (капрон, нейлон), материалы из полистирола, полихлорвинила, полиамидные и триацетатные пленки. Органические волокнистые изоляционные материалы отличаются невысокой нагревостойкостью и в естественном виде без специальной обработки относятся к классу У. Их недостаток — высокая гигроскопичность. Между их волокнами и нитями остаются воздушные промежутки (поры), легко поглощающие влагу.

Бумага и картон. Бумага и картон — листовые материалы коротковолокнистого строения, состоящие из целлюлозы. Бумагу изготавливают из измельченного хлопчатобумажного тряпья и волокон дресвины, которые подвергают специальной химической обработке. Все сорта бумаги обладают хорошими изоляционными свойствами, однако в электромашиностроении применяют только следующие специальные сорта: кабельную (толщиной 0,08—0,17 мм), телефонную (0,05 мм), конденсаторную (7—30 мм), оклеечную (0,33 мм), пропиточную (0,12 мм), наматочную (0,05—0,07 мм) и микалентную (20 мм).

Указанные сорта бумаги используют для изоляции обмоточных проводов и кабелей различного типа, изготовления конденсаторов, оклейки листов электротехнической стали, а также для изготовления микаленты (см. ниже) и различных слоистых пластических материалов (листового и фасонного гетинакса, бакелитовых трубок и пр.).

Картон изготавливают из того же сырья, что и бумагу, но он имеет значительно большую толщину. В электромашиностроении применяют следующие сорта картона: электрокартон, фибру и литероид.

Электрокартон имеет толщину от 0,2 до 3 мм и обладает высокими изоляционными свойствами. Диэлектрическая прочность его достигает 25 кВ на 1 мм толщины. Он очень эластичен, что позволяет изгибать его под нужными углами. Применяется для изготовления прокладок, корпусов катушек, шайб, пазовой изоляции электрических машин и пр.

Фибра — картон, обработанный слабыми кислотами. Обладает большой твердостью, прочностью и может подвергаться обработке на металлорежущих станках (сверлильном, токарном, фрезерном и пр.). Изготавливается в виде листов различной толщины или в виде стержней и трубок. Имеет хорошие изоляционные свойства, но повышенную гигроскопичность.

Текстильные материалы. Электроизоляционные текстильные материалы изготавливают, главным образом, из растительных волокон, представляющих собой в основном целлюлозу (хлопок, ребе — лен, пенька, джут). Иногда применяют шелк, из которого получают тонкую и одновременно механически прочную изоляцию.

Из различных видов искусственных волокон наибольшее распространение получили искусственный шелк (вискозный и ацетатный), вырабатываемый путем химической переработки целлюлозы, а также капрон и нейлон. Полученные из целлюлозы искусственные вещества (эферы целлюлозы) обладают хорошей растворимостью, что дает возможность изготавливать из них тонкие нити путем продавливания этих веществ через отверстия малого диаметра.

Капрон и нейлон, изготавливаемые на основе искусственных полиамидных смол, механически прочны, негигроскопичны и нагревостойки.

Текстильные материалы из искусственных волокон находят применение в различных отраслях электроизоляционной техники (для изготовления обмоточных проводов, лакотканей и пр.). В электромашиностроении применяют различные виды текстильных изделий: нити, пряжу, ткани, ленты и пр. Главное преимущество тканей — очень высокая механическая прочность, позволяющая применять их для

крепления токопроводящих и изоляционных деталей, а также в качестве основы для изготовления других изоляционных материалов (лакотканей, текстолита и др.).

Для изоляции обмоток электрических машин и при ремонтных работах широко используют тканые (с кромками) хлопчатобумажные ленты: тафтяную (толщиной 0,18—0,20 мм), киперную с диагональным (киперным — «елочкой») переплетением нитей (0,30—0,35 мм) и батистовую (0,10—0,12 мм). Пряжу (нити, скрученные из отдельных волокон) применяют для изоляции проводов и шнуров путем обмотки и оплетки.

В электроизоляционной технике используют в большей степени механические свойства непропитанных тканей и лент, чем их электрические свойства. Объясняется это тем, что без специальной обработки ткани не могут служить изоляторами, так как между их нитями остаются поры, поглощающие влагу.

Для улучшения изоляционных свойств волокнистых материалов их поры заполняют различными твердеющими влагонепроницаемыми веществами: естественными и искусственными смолами, битумами и пленками, образующимися при высыхании некоторых масел. Смолы и масла растворяют в различных легколетучих жидкостях, получая лаки и эмали. При сушке лака, нанесенного тонким слоем на твердую поверхность и проникшего в поры изоляции, растворитель улетучивается, а лаковая основа переходит в твердое состояние. При этом образуется пленка, плотно пристающая к твердой поверхности и обладающая высокими электроизоляционными свойствами и малой гигроскопичностью. Процесс заполнения воздушных пор волокнистых материалов твердеющими электроизоляционными веществами называется пропиткой. Для пропитки применяют природные лаки (шеллачные, копаловые, битумные, масляные и их смеси) и синтетические, получаемые химической переработкой различных органических веществ (бакелитовые, глифталевые, полихлорвиниловые, нитроцеллюлозные и пр.).

В зависимости от режима сушки различают лаки и эмали холодной (воздушной) и горячей (печной) сушки. Температура горячей сушки не должна превышать 110 °С во избежание пересушивания, при котором лаковая пленка становится хрупкой и растрескивается.

Для пропитки изоляции обмоток электрических машин и аппаратов наибольшее распространение получили пропиточные лаки горячей сушки. Пропитку волокнистых изоляционных материалов этим лаком осуществляют следующим образом. Изделия предварительно просушивают в печи в течение 5—10 ч при температуре 100—110 °С и в горячем состоянии (при температуре 60—70 °С) погружают в ванну с лаком. Через 15—30 мин пропитанные изделия вынимают из ванны, дают избытку лака стечь и подвергают сушке в печи при температуре 100—110 °С (в соответствии с режимом сушки, рекомендуемым для данного лака). После такой пропитки с последующей сушкой на поверхность изделия наносят покровную эмаль и осуществляют окончательную сушку.

Эмаль после высыхания образует твердое блестящее покрытие, предохраняющее от влияния влаги и механических воздействий.

Современная техника применяет лаки и эмали, различающиеся и по составу, и по назначению. Каждый из них имеет свою технологию применения. Эти подробности детально указываются в стандартах и технических условиях на соответствующие лаки.

Наибольшее распространение получили следующие сорта лаков:

светлые масляные лаки; имеют в качестве основы высыхающие масла, а в качестве растворителя — бензин, обычный или лаковый керосин или же их смеси. Изготавливают как воздушный, так и печной сушки; применяют для покрытия листов электротехнической стали и проволоки с эмалевой изоляцией, для изготовления светлых лакотканей и пр. Имеют высокие изолирующие и защитные свойства, но не маслостойки;

черные битумные лаки холодной сушки; изготавливают из асфальтов и нефтяных битумов, растворенных в бензоле, толуоле или скипидаре или же в смеси их с бензином и лаковым керосином. Применяют в качестве антикоррозионных покрытий стальных деталей;

черные масляно-битумные лаки; применяются в качестве пропиточных и покровных лаков при производстве и ремонте электрических машин;

шеллачный лак — раствор шеллака в спирте; применяется как клеящий лак при изготовлении миканитов и при различных электромонтажных и ремонтных

работах. Требуется горячей сушки, но может быть использован и как лак холодной сушки;

глифталевые лаки, содержащиеся в качестве основы глифталевые синтетические смолы, а в качестве растворителя — ацетон, смесь толуола и бензина и др. Маслостойки обладают хорошими изоляционными и защитными свойствами и являются лаками печной сушки. Применяют в качестве пропиточных и покровных лаков и для изготовления серых эмалей, используемых для покрытия деталей электрических машин и аппаратов;

бакелитовые лаки — растворы синтетической смолы бакелита в спирте. Пропиточные и клеющие лаки горячей сушки, дающие механически прочную, но малозластичную и склонную к тепловому старению пленку;

нитроцеллюлозные лаки (нитролаки); представляющие собой раствор целлюлозы в различных растворителях. Дают хорошую быстросохнущую защитную, но не теплоустойкую пленку.

Для пропитки неподвижных катушек и заливки различных токопроводящих деталей (для заполнения воздушных промежутков вокруг катушек электрических аппаратов, пустот в кабельных муфтах, заливки крышек аккумуляторов и пр.) применяют компаунды. Они обеспечивают более влагостойкую и влагонепроницаемую пропитку, чем лаки, и при охлаждении затвердевают полностью. В них не остается пор от испарившегося растворителя, что наблюдается при пропитке лаками. В качестве основы для изготовления компаундов служат битумы. Для придания компаундам большей эластичности, нагревостойкости и маслостойкости к ним добавляют высыхающие масла, смолы и воск. Процесс пропитки компаундами может вестись при повышенной температуре (выше температуры их плавления). Подлежащие пропитке изделия погружают на определенное время в расплавленный компаунд и вынимают, не дожидаясь полного его застывания.

Более совершенной является вакуумная пропитка компаундами. Она заключается в том, что подлежащее пропитке изделие сначала подвергают сушке в герметически закрытом котле (автоклаве) в вакууме, а затем пропитывают в этом же котле под давлением в несколько атмосфер. В некоторых случаях пропитку производят за несколько циклов с периодической подачей давления в автоклавы.

Лаки, смолы и эмали используют не только для пропитки волокнистых материалов, но и для изготовления эмалированной проволоки, пластмассовой изоляции проводов, покрытия листов электротехнической стали, склеивания различных твердых электроизоляционных материалов и изделий из пр.

В последнее время для изоляции электрических машин и аппаратов широко применяют различные волокнистые материалы неорганического происхождения: стеклянное волокно и асбест. Основным преимуществом этих материалов перед органическими является их более высокая нагревостойкость. Стеклянное волокно изготавливают путем пропускания расплавленной стеклянной массы сквозь отверстия малого диаметра. В толстом слое стекло является хрупким и ломким материалом. Однако весьма тонкие волокна (диаметром 3—7 мк) имеют настолько большую гибкость, что могут обрабатываться приемами текстильной технологии. Из стеклянных нитей, скрученных из отдельных волокон, ткнут стеклянные ткани и ленты. Эти же нити используют для изоляции обмоточных проводов.

Для склеивания и пропитки материалов из стекловолокна применяют органические лаки и смолы повышенной нагреваемости или кремнийорганические лаки и смолы. Таким путем получают различные стеклолакоткани, стеклоленту, стеклотекстолит и пр.

Кремнийорганические смолы, как показывает их название, содержат, кроме углерода, характерного для органических веществ, также и кремний, являющийся одним из важнейших составных частей многих неорганических диэлектриков. Такие смолы обладают значительной нагревостойкостью, хорошими электроизолирующими свойствами и малой гигроскопичностью.

Для изоляции катушек тяговых двигателей применяют монолитную кремнийорганическую изоляцию. Катушку заливают кремнийорганическим компаундом. После затвердевания она представляет собой единую монолитную конструкцию.

Асбестовое волокно также может обрабатываться методами текстильной и бумажной технологии: из него изготавливают ткани, ленту, бумагу и картон. В некоторых случаях в асбестовую пряжу для повышения прочности добавляют хлопчатобумажные волокна. Асбестовые изделия гигроскопичны и обладают невысокими изоляцион-

ными свойствами. Поэтому в изоляционной технике асбест применяется как вспомогательный теплостойкий материал и требует дополнительной обработки лаками или битумами.

Полимерные материалы. К полимерным материалам, получаемым синтетическим (химическим) путем, относятся синтетические смолы, каучуки и резины, волокна и пластические массы, некоторые клеи, лаки, краски, замазки и герметики. Название свое полимерные материалы получили от исходного химического соединения (мономера), используемого для синтеза полимера, с приставкой «поли». Например, из этилена (мономера) образуется полиэтилен, из стирола — полистирол, из хлорвинила — полихлорвинил и т. д.

Полимерные материалы в основном подразделяют на три группы: термoplastы, слоистые пластики и пластические массы.

Термопласты. Структура термопластов не изменяется при нагревании, вызывающем переход из твердого состояния в пластическое, поэтому их можно неоднократно перерабатывать. К этой группе относят полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид, полистирол, полиформальдегид, полиакрилаты, полиамиды, фторосодержащие (фторопласт 3 и фторопласт 4) и др. За исключением фторопластов, все другие термопласты поддаются сварке и склейке. Термопласты — это полимеры, которые под действием температуры сначала переходят в пластическое, а затем в твердое неплавкое и нерастворимое состояние. При повторном нагревании такие полимеры не переходят в пластическое состояние, а остаются твердыми и при дальнейшем повышении температуры разлагаются. К этой группе относятся фенопласты, аминопласты, анилинпласты, эпоксидопласты, силиконопласты, уретаноласты и др.

Слоистые пластики. В эту группу входит большое число материалов, состоящих из листовых волокнистых наполнителей и полимеров, пропитывающих наполнителей и составов, склеивающих отдельные листы в многослойные пластики. Слоистые пластики используют, главным образом, для производства листовых электроизоляционных материалов различных размеров и толщины, а также изделий со сложной конфигурацией поверхности. К этой группе относят гетинакс, текстолит, асбестотекстолит, древеснослоистые пластинки и др.

Гетинакс изготавливают из бумаги и бакелита. Бумагу покрывают слоем бакелитового лака, складывают в несколько слоев и прессуют под высоким давлением при повышенной температуре. Под влиянием нагрева бакелит переходит в неплавкое и нерастворимое состояние. При этом получают твердый и прочный листовой материал с высокими изоляционными свойствами, который хорошо подвергается механической обработке (режется, пилится и сверлится). Гетинакс находит широкое применение при изготовлении деталей электрических аппаратов, требующих надежной изоляции и прочности (изоляционных стоек и пр.).

Текстолит изготавливают подобно гетинаксу, но основанием служит не бумага, а ткань. Текстолит еще более прочен, чем гетинакс. Некоторые его показатели (например, износостойчивость при трении) выше, чем у металлов, поэтому в ряде случаев текстолит применяют для изготовления таких деталей, как шестерни, вкладыши и т. д.

Особо высокими нагревостойкостью и изоляционными свойствами обладает стеклотекстолит, изготовленный на основе стеклянной ткани.

Для изготовления печатных плат электронной аппаратуры применяют фольгированный гетинакс и стеклотекстолит. Это слоистые пластики, облицованные с одной или двух сторон медной оксидированной фольгой, наносимой при прессовании собранных пакетов пропитанной бумаги или стеклоткани с применением клея. В некоторых случаях используется хромированная фольга или никелевая фольга.

Пластические массы. Материалы, изготавливаемые на основе синтетических и природных полимеров, называют пластическими массами, причем полимер определяет их основные свойства. В состав пластмассы, кроме полимеров, входят наполнители, пластификаторы, красители и стабилизаторы.

Наполнители существенно влияют на диэлектрические свойства, водопоглощение и теплостойкость пластмассы. Они бывают органического и минерального происхождения. По своей структуре наполнители могут быть порошкообразные (древесная мука, кварцевая мука, слюда, каолин, тальк, графит, металлические порошки, сажа и пр.), волокнистые (асбест, древесная крошка, мелкокрошенная бумага, очесы хлопка, стеклянное волокно и др.) и листовые или слоистые (бумага, древесный шпон, хлопчатобумажная ткань, стеклянные и асбестовые ткани).

Пластификаторы придают большую эластичность пластмассам, увеличивают их относительное удлинение и снижают временное сопротивление разрыву. Красители дают возможность получить необходимую окраску пластмассы и декоративный вид. Стабилизаторы сохраняют требуемые свойства пластмассы в процессе эксплуатации, предохраняя ее от разложения под влиянием тепла и солнца.

В ряде случаев пластмасса изготавливается из чистого полимера без каких-либо наполнителей. К числу их принадлежат: органическое небьющееся стекло (полиметилметакрилат), винилпласт (листовой материал из хлорвинила), полиэтилен, полистирол, полнамиды и пр. В этих случаях понятия пластмассы и полимера одинаковы. Пластмассы изготавливают в особых формах путем прессования при большом давлении и высокой температуре. При этом получают совершенно готовые, не требующие дальнейшей обработки изделия. Если в пластмассовых изделиях должны быть укреплены детали из других материалов (например, металлические шпильки, втулки и т. д.), то их запрессовывают при изготовлении деталей.

Из изоляционных пластмасс наиболее распространенные получили винилпласт (пластмасса из хлорвинила), гетинакс (спрессованная бумага, пропитанная фенопластовыми смолами) и стеклотекстолит (стеклянная ткань, пропитанная синтетическими смолами) и пр. Их изготавливают в виде листов, цилиндров и фасонных изделий.

Гибкие пленки. Гибкие пленки изготавливают из синтетических смол (полиамида, полиуретана, полистирола, полихлорвинила, эфира, целлюлозы и пр.) в виде листов и рулонов. Их применяют для изоляции электрических машин, обмоточных проводов, конденсаторов и др.

Широкое распространение получили так называемые триацетатные электроизолирующие пленки, обладающие значительной электрической прочностью.

Каучуковые материалы. Их изготавливают из естественного или искусственного каучука. Первый добывается из сока каучуконосных, преимущественно тропических, растений, второй получается химическим путем из спирта и других продуктов. Каучук легко растворяется в бензине, бензоле и других растворителях, давая липкую массу (резиновый клей), используемую при склеивании резиновых деталей. Из каучуковых материалов в электромашиностроении широкое применение нашли резина и эбонит.

Резина — смесь каучука с серой, обработанная при повышенной температуре. Чрезвычайно гибкий, эластичный, совершенно водонепроницаемый материал, обладающий высокими изоляционными свойствами. Изготавливается в виде листов различной толщины и широко используется для изоляции проводов. Отрицательные качества — малые теплостойкость и маслостойкость. При электромонтажных работах широко применяется изоляционная лента, представляющая собой обычную миткалевую ленту, покрытую с одной стороны каучуковой клеевой массой.

Эбонит — смесь каучука с большим количеством серы (выше 25 %) и некоторыми минеральными наполнителями. Твердый материал с хорошими изоляционными свойствами. Хорошо режется, сверлится и полируется. Изготавливается в виде листов, стержней и трубок. Эбонитовый порошок используют для изготовления пластмассы, из которой прессуют различные изоляционные детали, аккумуляторные сосуды и пр.

Минеральная изоляция. Продукты минерального происхождения являются значительно более нагрелостойкими, чем органические волокнистые изоляционные материалы, лаки и смолы. Однако большинство из минералов непригодно для использования в электромашиностроении, так как они не обладают нужными изоляционными и технологическими качествами. Широкое применение в изоляционной технике нашли только слюдяные, асбестовые, стеклянные и керамические изделия.

Изделия из слюды. Слюда является хорошим изолятором. Электрическая прочность ее достигает 100—200 кВ/мм, теплостойкость 500—800 °С. Кроме того, слюда отличается высокой влагостойкостью, маслостойкостью и значительной кислотопорностью. Все эти качества сделали слюду ценнейшим материалом в электромашиностроении. Однако добывается слюда в виде небольших тонких пластинок (лепестков площадью 0,5—50 см² и толщиной 0,01—0,05 мм). Поэтому ее не применяют непосредственно, а используют, главным образом, в виде клееных слюдяных изделий, называемых миканитами. Миканиты представляют собой листовые и рулонные материалы, склеенные из отдельных лепестков слюды клеящими лаками или смолами. Иногда при изготовлении миканитов используют волокнистую подложку из бумаги или ткани, которую наклеивают с одной или с обеих сторон. Подложка

увеличивает механическую прочность материала и затрудняет отставание лепестков слюды при изгибе. В электромашиностроении применяют различные сорта миканита: коллекторный, прокладочный, формовочный, гибкий, микаленту и микафоллий (тонкую бумагу, на которую наклеены пластинки слюды).

Коллекторный и прокладочный миканиты изготовляют в виде листов толщиной 0,4—2 мм путем склеивания пластинок слюды в несколько слоев, прессования их при высоком давлении и высокой температуре. Клеем служит шеллачный лак или глифталевые смолы. Содержание их в коллекторном миканите не превышает 4 %, что обеспечивает малую усадку при работе коллектора. В прокладочном миканите содержание клея доходит до 25 %. Эти сорта миканита хорошо режутся и штампуются. Применяют их, главным образом, в качестве изоляции между коллекторными пластинами и для изготовления различных электроизоляционных прокладок, шайб и пр.

Формовочный миканит при нормальной температуре обладает значительной твердостью, но при нагреве приобретает способность принимать ту или иную форму. Содержание клея (шеллака, глифталевой смолы) в формовочном миканите доходит до 30 %, поэтому из листов такого миканита можно формовать различные фасонные изделия, в частности конусы и цилиндры для коллекторов.

Особая разновидность формовочного миканита называется микафолием; он имеет с одной стороны подложку из бумаги толщиной 0,05—0,06 мм и применяется для изготовления твердой изоляции стержней якорных обмоток высоковольтных электрических машин. Стекломикафоллий имеет подложку не из бумаги, а из стеклянной ткани. Выпускается в рулонах и в листах.

Гибкий миканит изготовляют в листах толщиной 0,15—0,6 мм путем наклеивания пластинок слюды в один или несколько слоев на тонкую бумагу. В качестве клея используют масляно-битумный или глифталевый лак. Этот вид миканита обладает значительной гибкостью и применяется в электрических машинах для изоляции секций, обмоток якоря, катушек и других деталей. Разновидностью гибкого миканита является микалента; ее выпускают в виде рулонов толщиной 0,13—0,17 мм, которые разрезают на ленты шириной 12—25 мм. Имеются различные марки микалент с подложками из бумаги, тонкого шелка и стеклоткани.

Листовые и рулонные миканитовые материалы, в которых в качестве подложки использованы стеклоткани или стеклоленты, называются стекломиканитом, стекломикалентой и стекломикафолием.

Кроме указанных слюдяных изделий, в электромашиностроении применяют также материалы, изготовленные из размельченной слюды, пропитанной нагревостойкими смолами и лаками. Они носят название слюдинитов. Существуют различные сорта слюдинитов: коллекторный, прокладочный, формовочный, гибкий, слюдинитовая лента, слюдинитофоллий.

Асбестовые изделия. В электромашиностроении, кроме асбестовой бумаги, ткани и картона, широко применяют изделия из асбодомента. Асбодомент представляет собой прессованный пластинчатый материал, изготовляемый из асбестового волокна (наполнителя) и цемента (связующего), и выпускается в виде досок и труб. Он имеет высокие механические свойства, высокую нагревостойкость и хорошо сопротивляется действию электрической дуги и искр. Поэтому из асбодомента изготовляют распределительные доски и щиты, стенки дугогасительных камер и перегородок и пр.

Стекланные изделия. В электромашиностроении стекло применяют, главным образом, для изготовления стекловолокна и стеклоэмалей. Стеклоэмаль представляет собой расплавленное стекло, наносимое тонким слоем на поверхность металлических или других деталей. Основная область применения стеклоэмалей — покрытие поверхностей трубчатых резисторов с целью изоляции и защиты их обмотки от проникновения влаги, коррозии, загрязнения и окисления.

Керамические изделия. Из керамических материалов в электротехнических установках применяют фарфор, стеатит (керамический материал, изготовляемый из талька), различные титанаты (химические соединения титана) и др. Из фарфора изготовляют всевозможные изоляторы; из титанатов, обладающих высокой диэлектрической проницаемостью, — изоляционные прослойки конденсаторов.

Нефтяные масла. Наибольшее распространение получило в установках высокого напряжения трансформаторное масло, являющееся продуктом очистки

нефти. Трансформаторное масло получают в результате очистки первых масляных фракций, полученных при перегонке мазута.

Трансформаторное масло — светло-желтая слабвязкая, практически нейтральная жидкость. Температура его застывания лежит в пределах от -45 до -35 °С, а температура вспышки паров в смеси с воздухом — не ниже $+135$ °С. Трансформаторное масло, находясь в соприкосновении с окружающим воздухом, активно поглощает из него влагу, снижая при этом свою электрическую прочность. В связи с этим в эксплуатации проводят периодическую сушку и замену масла.

В производстве кабелей и конденсаторов применяют специальные масла, называемые кабельными и конденсаторными. От трансформаторного масла они отличаются вязкостью и повышенными электрическими свойствами.

Контрольные вопросы

1. По каким признакам классифицируются электротехнические материалы?
2. Какие существуют проводниковые материалы и где их применяют в электромашиностроении?
3. Какие существуют магнитные материалы и для каких частей электрических машин и трансформаторов их применяют?
4. Чем определяется различная магнитная проницаемость горячекатаной и холоднокатаной электротехнической стали?
5. Какие основные характеристики имеют электроизоляционные материалы?
6. Что такое пробой изоляционных материалов и по каким причинам он происходит?
7. Как подразделяются электроизоляционные материалы в зависимости от нагревостойкости?
8. Для чего осуществляют пропитку лаками и компаундирование электроизоляционных материалов?

Введение	3
--------------------	---

Глава I

Электрическая цепь и ее основные законы

§ 1. Основные сведения о строении вещества и физической природе электричества	6
§ 2. Электрическое поле. Напряженность поля, электрический потенциал и напряжение	9
§ 3. Электрический ток и электропроводность вещества	13
§ 4. Электрическое сопротивление и проводимость	15
§ 5. Электродвижущая сила и напряжение источника электрической энергии	19
§ 6. Электрическая цепь и ее элементы	20
§ 7. Закон Ома	24
§ 8. Использование резисторов для регулирования тока в электрической цепи	27
§ 9. Режимы работы электрической цепи	29
§ 10. Законы Кирхгофа	33
§ 11. Последовательное, параллельное и смешанное соединения резисторов (приемников электрической энергии)	36
§ 12. Мостовая схема соединения резисторов и ее применение	43
§ 13. Работа и мощность электрического тока	44
§ 14. Тепловое действие тока	48
§ 15. Передача электрической энергии по проводам	50

Глава II

Электромагнетизм и электромагнитная индукция

§ 16. Магнитное поле и его основные характеристики	55
§ 17. Магнитное поле проводника с током и способы его усиления	59
§ 18. Магнитные свойства различных веществ	62
§ 19. Магнитная цепь	64
§ 20. Электромагнитные силы, создаваемые магнитным полем	68
§ 21. Электромагнитная индукция	70
§ 22. Вихревые токи	75
§ 23. Самоиндукция	77
§ 24. Взаимоиндукция	82

Глава III
Электрические машины постоянного тока

§ 25. Процесс преобразования энергии в электрических машинах. Режимы их работы	84
§ 26. Принцип действия	88
§ 27. Основные части электрических машин и их назначение	94
§ 28. Обмотки якоря	107
§ 29. Реакция якоря	115
§ 30. Коммутация	121
§ 31. Основы работы генераторов	132
§ 32. Схемы генераторов и их характеристики	133
§ 33. Основы работы электродвигателей	140
§ 34. Схемы электродвигателей и их характеристики	141
§ 35. Пуск в ход электродвигателей постоянного тока	147
§ 36. Регулирование частоты вращения якоря электродвигателя	150
§ 37. Электрическое торможение	156
§ 38. Мощность и коэффициент полезного действия электрических машин	161
§ 39. Особенности работы машин постоянного тока при пульсирующем напряжении	168

Глава IV
Химические источники тока

§ 40. Электрический ток в жидких проводниках	172
§ 41. Понятие о гальванических элементах	173
§ 42. Кислотные аккумуляторы	175
§ 43. Щелочные аккумуляторы	181
§ 44. Электрические характеристики аккумуляторов	186
§ 45. Способы соединения аккумуляторов в батареи	186

Глава V
Переменный ток

§ 46. Получение переменного тока	190
§ 47. Основные параметры переменного тока	192
§ 48. Векторные диаграммы	194
§ 49. Виды сопротивлений в электрической цепи переменного тока	197
§ 50. Активное сопротивление в цепи переменного тока	198
§ 51. Индуктивность в цепи переменного тока	202
§ 52. Конденсаторы, их назначение и устройство	206
§ 53. Емкость в цепи переменного тока	212

§ 54. Последовательное соединение активного сопротивления, индуктивности и емкости	214
§ 55. Параллельное соединение сопротивлений в цепи переменного тока	217
§ 56. Резонанс напряжений и резонанс токов	221
§ 57. Мощность переменного тока и коэффициент мощности	224
§ 58. Передача электрической энергии по проводам при переменном токе	229
§ 59. Трехфазный переменный ток	230
§ 60. Схема соединения «звездой»	232
§ 61. Схема соединения «треугольником»	236
§ 62. Мощность трехфазной системы	238

Глава VI

Трансформаторы и реакторы

§ 63. Назначение и принцип действия трансформатора	240
§ 64. Устройство трансформаторов	242
§ 65. Режимы работы трансформатора и его характеристики	249
§ 66. Мощность, к. п. д. и коэффициент мощности трансформатора	254
§ 67. Автотрансформатор и трехфазный трансформатор	256
§ 68. Трансформаторы для вентильных преобразователей	258
§ 69. Регулирование напряжения трансформаторов	260
§ 70. Реакторы	263
§ 71. Подключение трансформаторов и реакторов к источнику переменного тока	266
§ 72. Магнитные усилители	268
§ 73. Стабилизаторы напряжения	276

Глава VII

Электрические машины переменного тока

§ 74. Вращающееся магнитное поле	278
§ 75. Принцип действия асинхронного двигателя	281
§ 76. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором	283
§ 77. Асинхронный двигатель с фазным ротором	290
§ 78. Режимы работы асинхронных двигателей	291
§ 79. Характеристики асинхронных двигателей	294
§ 80. Пуск в ход асинхронных двигателей	298
§ 81. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей	300
§ 82. Однофазные и двухфазные асинхронные двигатели	303
§ 83. Асинхронный расщепитель фаз	306
§ 84. Асинхронный тахогенератор	308
§ 85. Сельсины	310
§ 86. Назначение и принцип действия синхронной машины	313

§ 87. Устройство синхронной машины	316
§ 88. Режимы работы синхронного генератора и его характеристики	318
§ 89. Синхронный двигатель	321

Глава VIII

Физические основы работы электрических аппаратов

§ 90. Назначение и классификация электрических аппаратов	326
§ 91. Контакты электрических аппаратов	328
§ 92. Электрическая дуга и методы ее гашения	333
§ 93. Приводы электрических аппаратов	342
§ 94. Основы работы плавких предохранителей	350

Глава IX

Электроизмерительные приборы и методы измерений

§ 95. Назначение и типы электроизмерительных приборов	353
§ 96. Магнитоэлектрические приборы	356
§ 97. Электромагнитные приборы	360
§ 98. Электродинамические и ферродинамические приборы	363
§ 99. Индукционные приборы	365
§ 100. Логометры и электронные приборы	366
§ 101. Измерение тока и напряжения	368
§ 102. Измерение мощности и электрической энергии	375
§ 103. Измерение электрического сопротивления	379
§ 104. Измерение частоты переменного тока	383
§ 105. Измерение электрическими методами неэлектрических величин	384

Глава X

Электротехнические материалы

§ 106. Назначение и классификация электротехнических материалов	390
§ 107. Проводниковые материалы	390
§ 108. Магнитные материалы	392
§ 109. Электроизоляционные материалы	397

Учебник

*Александр Ефимович Зорохович,
Сергей Сергеевич Крылов*

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
ДЛЯ ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД

Обложка художника *Е. Н. Волкова*
Технический редактор *Н. Д. Муравьева*
Корректор *В. Я. Кинареевская*
Корректор-вычитчик *Л. В. Аняньева*

ИБ № 3528

Сдано в набор 15.04.86. Подписано в печать 29.04.87. Т-08156. Формат 60×90¹/₁₆. Бум. офсетная № 2. Гарнитура литературная. Офсетная печать. Усл. печ. л. 26. Усл. кр.-отт. 26. Уч.-изд. л. 29,58. Тираж 62 000 экз. Заказ 155. Цена 1 руб. Изд. № 1-1—3/5 № 3726.

Ордена «Знак Почета» издательство «ТРАНСПОРТ», 103064, Москва, Басманный туп., 6а

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.

198052, г. Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29.

Отпечатано с диапозитивов в Ленинградской типографии № 6 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 193144, г. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

**Государственный комитет СССР
по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли**

**ОРДЕНА «ЗНАК ПОЧЕТА»
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТРАНСПОРТ»**

Готовятся к изданию книги и плакаты:

ВИЛЬКЕВИЧ Б. И. Автоматическое управление электрической передачей и электросхемы тепловозов.— М.: Транспорт, 1987.— 17 л.— (В пер.): 1 р. 40 к. 30 000 экз.

Рассмотрены системы автоматического управления тяговым генератором, дизель-генератором, электродвигателями, а также цепи электрических схем тепловозов. Книга поможет читателю самостоятельно изучать сложные системы электрооборудования дизель-электрических локомотивов.

Рассчитана на локомотивные и ремонтные бригады, может быть полезна учащимся технических школ железнодорожного транспорта и ПТУ.

ПРИСЯЖНЮК С. И., МОТОРИН Н. И., КРУПЕНЯ С. А. Управление тепловозом и дизель-поездом: Учебник для ПТУ и школ машинистов.— М.: Транспорт, 1987.— 32 л.— (В пер.): 1 р. 20 к. 10 000 экз.

В книге наибольшее внимание уделено управлению и обслуживанию тепловозов с электрической передачей и дизель-поездов, их техническому обслуживанию, основам тяги и торможения, экономии дизельного топлива, технике безопасности. Рассмотрены причины неисправностей и меры их предупреждения.

Для учащихся ПТУ и технических школ машинистов локомотивов и дизель-поездов.

КОВАЛЕНКО А. П. Техника безопасности при экипировке локомотивов: Комплект из 3 плакатов.— М.: Транспорт, 1987.— 45×60 см.— 60 к. за комплект. 3000 комплектов.

Плакаты рассчитаны на работников локомотивного хозяйства.

Заказы принимаются
отделениями издательства «Транспорт», центральным магазином «Транспортная книга» (107078, Москва, Садовая Спасская ул., д. 21).
Отдел «Книга — почтой» указанного магазина (113114, Москва, 1-й Павелецкий пр., д. 1/4, корп. 2) и отделения издательства высылают литературу наложенным платежом.