МИНИСТЕРСТВО ВЫШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ЭССР
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КАБИНЕТ

В. Ю. ВАЛЬДМЕТС

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Таллин 1969

XI
А-17968

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ЭССР
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КАБИНЕТ

В. Ю. ВАЛЬДМЕТС

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ТАЛЛИН 1969

Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
236921

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее издание представляет собой пособие по первому разделу программы предмета «Общая электротехника с основами электроники» для средних специальных учебных заведений.

Пособие составлено в строгом соответствии с программой и методическими указаниями к ней и имеет целью облегчить учащимся техникумов усвоение изучаемого материала..

При составлении пособия учтены чрезвычайная насыщенность программы и весьма ограниченное число часов для её прохождения. Поэтому все второстепенные и дополнительные (сверх программы) сведения, имеющиеся в обычных учебниках, в данном издании отсутствуют.

Материал пособия расположен в строгой и логической последовательности, что должно облегчить его усвоение. Сжатость изложения позволяет заострить внимание учащихся на основных формулировках, а также облегчает составление учебных пособий для программированного обучения.

В конце каждой темы даются вопросы для самопроверки.

Пособие может быть использовано как учащимися дневных, вечерних и заочных отделений, так и преподавателями.

ВВЕДЕНИЕ

Электротехника — наука о производстве, передаче и применении электрической энергии.

Электрическая энергия получила самое широкое распространение во всех областях современной техники, производства, культуры и быта, так как представляет собой одну из универсальных форм энергии, обладающую рядом ценных свойств:

— легко преобразуется в другие виды энергии: механическую, тепловую, световую, химическую и звуковую;

— легко передается на дальние расстояния;

— позволяет осуществлять комплексную механизацию и автоматизацию производства;

— удобно распределяется между потребителями, различными по мощности и характеру потребления;

— обеспечивает наилучшие санитарно-гигиенические условия на промышленных предприятиях.

В. И. Ленин указывал, что важнейшим условием победы социализма является электрификация страны: «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны» (VIII съезд Советов, 1920 г.).

Основные положения, выдвинутые В. И. Лениным:

Техническое перевооружение всех отраслей народного хозяйства на базе использования электрической энергии.

Строительство крупных электростанций для снабжения энергией целых районов.

Использование для этих станций местных топливных ресурсов.

Строительство высоковольтных линий электропередач.

Рациональное размещение электроэнергетического хозяйства на территории страны.

По докладу Ленина VIII Всероссийский съезд Советов в 1920 г. утвердил план ГОЭЛРО, составленный комиссией специалистов, руководствовавшейся указаниями В. И. Ленина.

Планом ГОЭЛРО, рассчитанным на 15 лет, предусматривалось построить 30 электростанций общей мощностью 1,5 млн. *квт* и реконструировать старые электростанции, увеличив их

мощность на 250 тыс. *квт*. План ГОЭЛРО был перевыполнен к 1935 г. почти в 3 раза.

В годы довоенных пятилеток построены десятки мощных тепло- и гидроэлектростанций, проведены тысячи километров линий электропередач высокого напряжения, созданы заводы по производству электрооборудования.

В 1940 г. мощность электростанций СССР достигала 11,2 млн. *квт*.

Огромный ущерб, причиненный войной, был быстро восстановлен, и уже в 1946 г. производство электроэнергии достигло уровня 1940 г.

Мощность электростанций составляла:

в 1913 г.	1,1	млн. *квт*
в 1928 г.	1,9	млн. *квт*
в 1940 г.	11,2	млн. *квт*
в 1960 г.	66,7	млн. *квт*
в 1966 г.	123	млн. *квт*

Общая выработка электроэнергии была:

в 1913 г.	1,94	млрд. *квт.ч*
в 1940 г.	48,3	млрд. *квт.ч*
в 1966 г.	545	млрд. *квт.ч*

В настоящее время СССР по производству электрической энергии и установленной мощности электростанций занимает второе место в мире и первое в Европе.

Директивы XXIII съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства на 1966—1970 гг. предусматривают довести выработку электроэнергии в 1970 г. до 830—850 млрд. *квт.ч*.

Самыми мощными гидроэлектростанциями в мире являются Братская ГЭС имени 50-летия Великого Октября (4,1 млн. *квт*), Волжская ГЭС имени XXII съезда КПСС (2,53 млн. *квт*) и Волжская ГЭС имени В. И. Ленина (2,3 млн. *квт*). Строится Красноярская ГЭС (5 млн. *квт*).

Огромный размах приняло строительство крупных тепловых и атомных электростанций. Самой мощной тепловой электростанцией в мире является Приднепровская ГРЭС (2,4 млн. *квт*).

Создается Единая энергетическая система СССР (ЕЭС), в которую будут включены все электростанции страны. Это позволит повысить коэффициент использования оборудования электростанций и их коэффициент полезного действия, даст возможность перебрасывать большое количество электроэнергии из одного района в другой.

Электроника изучает принцип действия, устройство и применение приборов, работа которых основана на использовании явлений, сопровождающих прохождение электрического тока через вакуум, разреженные газы и полупроводники.

Приборы электроники первоначально развивались применительно к потребностям радиотехники. Однако вскоре они стали использоваться уже во всех областях техники.

Электроника, имеющая решающее значение в автоматизации производственных процессов, все шире внедряется в любой области народного хозяйства.

С помощью электроники создана сложнейшая аппаратура: осциллографы, электронные микроскопы, счетно-вычислительные машины, ускорители элементарных частиц, высокочастотные установки для плавки и закалки металлов, сушки древесины, обработки пищевых продуктов, выпрямительные установки для преобразования переменного тока в постоянный и т. д. и т. п.

На базе электроники возникли радиолокация и телевидение.

Бурное развитие электроники и ее интенсивное внедрение в народное хозяйство является ценным вкладом в создание материально-технической базы коммунизма.

Таким образом, современная электроника стала незаменимым помощником человека, и изучение её основ необходимо инженерам и техникам любого профиля.

ТЕМА I

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Источники электрического тока

Источник электрической энергии представляет собой прибор, преобразующий какой-либо вид энергии в электрическую.

В настоящее время известны следующие, наиболее распространенные источники электрической энергии:

механические — генераторы. В них механическая энергия преобразуется в электрическую;

химические — гальванические элементы и аккумуляторы. В них химическая энергия преобразуется в электрическую;

тепловые — термоэлементы. В них тепловая энергия преобразуется в электрическую;

лучистые — фотоэлементы. В них световая энергия преобразуется в электрическую.

Гальванические элементы являются маломощными источниками тока. Они имеют два электрода из разных веществ (обычно металлы и уголь), погруженные в электролит. В процессе работы один из электродов растворяется в электролите. При этом образуются ионы, а электроды приобретают различный потенциал по отношению к электролиту.

Аккумуляторы отличаются от гальванических элементов тем, что после изготовления их требуется предварительно зарядить, т. е. пропустить через них ток. Аккумулятор запасает (накапливает) электрическую энергию при зарядке и отдает её при разрядке.

Различают кислотные и щелочные аккумуляторы.

Кислотный аккумулятор состоит из стеклянного или эбонитового сосуда, наполненного 25% раствором серной кислоты, в который погружены два электрода — решетки из свинца, заполненные активной массой.

У заряженного аккумулятора активной массой является:

у положительного электрода — перекись свинца;

у отрицательного электрода — губчатый свинец.

При разрядке за счет химической реакции на обоих электродах образуется сернокислый свинец, а концентрация электролита уменьшается.

Э. д. с. заряженного аккумулятора в среднем равна 2,2 *в*, а в конце разрядки 1,8 *в*.

Когда э. д. с. аккумулятора упадет до 1,8 *в*, его необходимо вновь зарядить, т. е. пропустить через него ток от постороннего источника постоянного тока.

Щелочной аккумулятор представляет собой стальной никелированный сосуд с 21% раствором едкого кали, в котором находятся электроды в виде железных решеток, заполненных у заряженного аккумулятора гидратом окиси никеля (положительная пластина) и губчатым железом или кадмием (отрицательная пластина).

Э. д. с. заряженного аккумулятора равна 1,4 *в*, в конце разрядки она снижается до 1,15 *в*.

Отдача щелочных аккумуляторов меньше, чем у кислотных: щелочные отдают при разрядке 65—70% количества электричества, сообщенного им во время зарядки, а кислотные 85—90%.

Электрические данные химических источников тока характеризуются двумя основными величинами — э. д. с. и емкостью.

Емкостью аккумулятора называется количество электричества, которое источник отдает при разрядке. Её принято выражать произведением тока в амперах на время работы в часах, т. е. в ампер-часах.

2. Электрический ток

Свободные электроны в металлическом проводнике или ионы в электролите находятся в состоянии беспорядочного движения. Если же на свободные заряженные частицы действуют в определенном направлении силы (например, силы электрического поля), то в проводнике возникает электрический ток.

Электрический ток, постоянный по величине и направлению, называется постоянным током.

Величина тока, или просто ток (I), измеряется количеством электричества, проходящего через поперечное сечение проводника в одну секунду:

$$I = \frac{q}{t},$$

где q — заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за время t.

Примечание. Единицей измерения электрического заряда служит кулон (*к*), представляющий собой суммарный заряд $6{,}3 \cdot 10^{18}$ электронов. Если бы удалось накопить электронов на 1 кулон и начать снимать их по 1 млн. в секунду, на это потребовалось бы 200 тыс. лет.

Единица тока называется ампером (*а*).

$$1\,а = \frac{1\,к}{1\,сек}.$$

Ток в проводнике равен 1 *а*, если через поперечное сечение проводника проходит 1 *к* электричества в секунду.

Часто применяют вспомогательные единицы, являющиеся долями ампера: миллиампер (*ма*) и микроампер (*мка*).

$$1\,ма = 1/1000\,а = 10^{-3}\,а;$$
$$1\,мка = 1/1\,000\,000 = 10^{-6}\,а.$$

За направление тока принимают направление, в котором перемещаются положительно заряженные частицы, т. е. направление, противоположное перемещению электронов.

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

$$\delta = \frac{I}{S}\ а/мм^2.$$

3. Электродвижущая сила и напряжение

Под электродвижущей силой (э. д. с.) понимают способность источника электрической энергии создавать и поддерживать на своих зажимах определенную разность потенциалов.

Э. д. с. (E) численно равна работе, совершаемой источником электрической энергии при переносе единицы заряда по всей замкнутой цепи:

$$E = \frac{A}{q},$$

где E — э. д. с.;
A — работа (*дж*);
q — величина заряда (*к*).

Единицей измерения э. д. с. считается один вольт (*в*). Поскольку

$$1\,в = \frac{1\,дж}{1\,к},$$

то источник электрической энергии обладает э. д. с в 1 вольт, если при перемещении по всей замкнутой цепи заряда в 1 кулон совершается работа, равная 1 джоулю.

Кроме основной, применяются более мелкие и крупные единицы измерения э. д. с., например:

1 милливольт (*мв*) $= 10^{-3}$ *в*;
1 микровольт (*мкв*) $= 10^{-6}$ *в*;
1 киловольт (*кв*) $= 10^{3}$ *в*.

Когда электрическая цепь замкнута и в ней течет ток, то э. д. с. источника вся расходуется в цепи, причем часть э. д. с. затрачивается внутри источника тока и часть — во внешней цепи. Та часть э. д. с., которая тратится внутри источника тока, называется внутренним падением напряжения (U_0), другая часть, расходуемая во внешней цепи, — внешним падением напряжения, или напряжением источника (U).

$$E = U + U_0,$$

откуда

$$U = E - U_0,$$

т. е. напряжение на зажимах источника тока меньше его электродвижущей силы на величину падения напряжения во внутреннем участке цепи.

Поскольку напряжение представляет собой часть э. д. с., оно также измеряется в вольтах.

В случае, когда цепь разомкнута, напряжение на зажимах источника равно его э. д. с.:

$$E = U.$$

Таким образом, если вольтметр подключить непосредственно к полюсам источника тока, при разомкнутой электрической цепи он покажет э. д. с. источника, а при замкнутой — напряжение на его зажимах.

4. Работа и мощность постоянного тока

При прохождении электрического тока по проводнику в последнем выделяется тепло, являющееся одним из видов энергии. Тепло выделяется тогда, когда затрачивается энергия, т. е. совершается определенная работа. Следовательно, при прохождении электрического тока по проводнику совершается работа.

Поскольку напряжение численно равно работе, производимой при перемещении единицы заряда по внешней цепи (или по данному участку цепи), то при перемещении заряда q будет совершена работа:

$$A = qU;$$

Заменив

$$q = It,$$

получим

$$A = UIt.$$

Работа электрического тока на участке цепи пропорциональна напряжению на этом участке, величине тока и времени действия этого тока.

Единицей работы служит джоуль (*дж*).

Мощностью электрического тока (P) принято считать работу, совершаемую им в течение одной секунды:

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

Таким образом, мощность — это скорость, с которой происходит преобразование энергии.

Скорость преобразования какой-либо энергии в электрическую в источнике тока называется мощностью источника (генератора):

$$P_{и} = \frac{A}{t} = \frac{EIt}{t} = EI.$$

Скорость, с которой электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии в приемнике, называется мощностью приемника или потребителя:

$$P_{п} = \frac{UIt}{t} = UI.$$

Скорость непроизводительного расхода электрической энергии внутри источника тока расценивается как мощность потерь:

$$P_0 = U_0 I.$$

По закону сохранения энергии:

$$P_{и} = P_{п} + P_0$$

— это выражение принято называть балансом мощностей.

Единицей мощности служит ватт (*вт*), равный мощности генератора, ежесекундно производящего 1 *дж* электрической энергии:

$$1\ вт = \frac{1\ дж}{1\ сек}.$$

Более крупными единицами мощности являются:

1 киловатт (*квт*) = 1000 *вт*;
1 мегаватт (*Мвт*) = 1 000 000 *вт*

и мелкими:

1 милливатт (*мвт*) = 10^{-3} *вт*;

$$1\ дж = 1\ вт \times 1\ сек,$$

поэтому джоуль иногда называют ватт-секундой (*вт.сек*).

В практике обычно используются крупные вспомогательные единицы электрической энергии:

1 ватт. час (*вт.ч*) = 3600 *вт.сек* = $3{,}6 \cdot 10^3$ *дж*;
1 киловатт.час (*квт.ч*) = 1000 *вт.ч* = $3{,}6 \cdot 10^6$ *дж*.

5. Преобразование электрической энергии в тепловую

Электрический ток (направленное движение электронов), проходя по проводнику, в результате столкновений электронов с молекулами вещества усиливает беспорядочное (тепловое) движение молекул.

Препятствие, оказываемое проводником прохождению электрического тока, называется электрическим сопротивлением. Электрическое сопротивление обозначается буквой R и измеряется в омах.

Мощность, т. е. скорость преобразования электрической энергии в тепловую, в проводнике равна:

$$P = UI \text{ вт}.$$

Зная, что по закону Ома для участка цепи

$$I = \frac{U}{R} a \quad \text{и} \quad U = IR \text{ в},$$

имеем

$$P = I^2R \text{ вт},$$

а количество энергии, которое переходит в тепловую за время t:

$$A = Q = I^2Rt \text{ дж},$$

где A — работа (энергия), *дж*;
Q — количество тепла, *дж*;
I — величина тока, *а*;
t — время, *сек*.

Приведенная формула выражает закон Джоуля—Ленца:

Q количество тепла (в джоулях), выделяемого током в проводнике, пропорционально квадрату тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.

Выразив R, получим:

$$R = \frac{A}{I^2t} \text{ ом}.$$

Поскольку

$$1 \text{ ом} = \frac{1 \text{ дж}}{(1a)^2 1 \text{ сек}},$$

то сопротивлением 1 *ом* обладает такой проводник, в котором при токе 1 *а* происходит преобразование электрической энергии в тепловую со скоростью 1 джоуль в секунду, т. е. при мощности 1 ватт.

Если температура провода поднимается выше определенного предела, изоляция начинает разрушаться — обугливаться и

даже гореть, теряя свои изолирующие свойства, что очень легко может стать причиной пожара.

Количество выделяемого в проводе тепла зависит от сечения провода и величины тока. Чем больше величина тока, тем большее сечение должен иметь провод, т. к. с увеличением сечения уменьшается сопротивление, а следовательно, уменьшается количество выделяемого тепла и одновременно увеличивается поверхность охлаждения.

Выбор сечения проводов по нагреву производится по таблицам, где указано, какой величины ток может проходить по проводу, не вызывая недопустимого перегрева.

Таблица 1

Таблица допускаемых нагрузок

Сечение провода, *мм²*	Допускаемый ток, *а*					
	медные провода			алюминиевые провода		
	проложены открыто	проложены в трубе		проложены открыто	проложены в трубе	
		два одножильных	три одножильных		два одножильных	три одножильных
1	17	16	15	—	—	—
1,5	23	19	17	—	—	—
2,5	30	27	25	24	20	19
4	41	38	35	32	28	28
6	50	46	42	39	36	32
10	80	70	60	55	50	47
16	100	85	80	80	60	60
25	140	115	100	105	85	80
35	170	135	125	130	100	95
50	215	185	170	165	140	130
70	270	225	210	210	275	165
95	330	275	255	255	215	200
120	385	315	290	295	245	220

6. Работа источника тока на цепь с переменным сопротивлением

Напряжение на зажимах источника тока при подключенной внешней цепи равно:

$$U = E - U_0 = E - IR_0 \ в,$$

где E — э. д. с. источника, *в*;

U_0 — внутреннее падение напряжения, *в*;

I — ток в цепи, *а*;

R_0 — внутреннее сопротивление источника тока, *ом*.

Величины E и R_0 — постоянные. Поэтому графически зависимость напряжения от тока нагрузки представляет собой наклонную прямую линию:

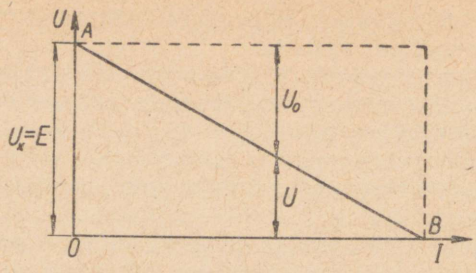


Рис. 1.

Отрезок OA соответствует холостому ходу ($I=0$). При этом $U_x=E$, а $U_0=0$.

По мере увеличения тока падение напряжения внутри источника (IR_0) увеличивается и напряжение на зажимах уменьшается. В точке B напряжение на зажимах источника равно нулю. Эта точка соответствует короткому замыканию цепи.

Пользуясь данным графиком, можно для любого значения тока нагрузки определить соответствующее напряжение на зажимах и падение напряжения внутри источника тока.

Э. д. с. источника:

$$E = U + U_0 \ в.$$

По закону Ома для участка цепи:

$$U = IR \ в \quad \text{и} \quad U_0 = IR_0 \ в,$$

где R — сопротивление внешней цепи;

R_0 — внутреннее сопротивление источника тока.

$$E = IR + IR_0 = I(R + R_0) \ в,$$

откуда ток в цепи

$$I = \frac{E}{R + R_0} \ а$$ — закон Ома для всей цепи.

7. Защита проводов цепи от коротких замыканий

Коротким замыканием называется соединение проводов, находящихся под напряжением, через малое сопротивление. При этом возникает ток короткого замыкания, во много раз превосходящий номинальный ток.

Наиболее распространенными устройствами для защиты электрических цепей от токов короткого замыкания являются плавкие предохранители.

Действие предохранителя, включаемого последовательно в

цепь, состоит в разрыве ее при расплавлении пластинки или вставки предохранителя током цепи.

Плавкая вставка выполняется из свинца, сплава свинца с оловом, цинка, алюминия, меди и серебра.

Конструктивно плавкие предохранители делятся на пробочные и трубчатые.

Пробочный предохранитель применяется при напряжениях до 380 *в* и токах до 60 *а*.

Пробочный предохранитель состоит из фарфоровой пробки, внутри которой помещается плавкая вставка (тонкая проволочка), и патрона с двумя зажимами, металлической пластиной и контактом для пробки.

Трубчатый предохранитель представляет собой фибровую или фарфоровую трубку (иногда заполненную кварцевым песком), внутри которой помещается плавкая вставка.

Трубчатые предохранители типа ПР-2 применяются при напряжениях до 500 *в* и номинальных токах до 1000 *а*.

Устройство предохранителя типа ПР-2:

а) фибровая трубка с латунными колпачками;

б) фасонная цинковая плавкая вставка;

в) ножи (соединены болтами со вставкой), входящие в контактные стойки.

При перегрузках плавкая вставка предохранителя плавится в узких местах. Под влиянием электрической дуги часть фибры переходит в газ, состоящий из водорода, углекислоты и водяных паров. Внутри трубки развивается давление до 100 *ат*, и дуга резко гасится.

Предохранители типа ПР являются разборными. При перегорании плавкой вставки заменяется не весь предохранитель, а только вставка.

Трубчатый предохранитель типа ПН-2 применяется при напряжении до 500 *в* на токи:

100—600 *а* — с разборным патроном;
15—60 *в* — с неразборным патроном.

Он состоит из следующих частей:

а) фарфоровой трубки с крышками, заполненной кварцевым песком;

б) плавкой вставки, штампованной из тонкой медной ленты. На средней части вставки наплавлена перемычка из олова;

в) ножей, с помощью которых предохранитель зажимается в контактных стойках.

При перегрузках, когда вставка нагревается, олово начинает плавиться и постепенно растворяет медь. Вставка разрушается и перегорает. При коротких замыканиях вставки плавятся в узких местах.

Для напряжений 1000 *в* — 35 *кв* и номинальных токов до

400 *а* используются трубчатые предохранители типа ПК, также заполненные кварцевым песком.

При выборе плавких вставок предохранителей следует руководствоваться определенным требованием:

номинальные токи плавких вставок должны быть не менее нагрузочных токов и не превышать утроенной величины тока, допускаемого для проводов данной линии:

$$I_{\text{нагр}} \leqslant I_{\text{вст}} \leqslant 3I_{\text{доп}}.$$

Стандартом предусматриваются следующие значения номинального тока предохранителей:

6, 10, 15, 20, 25, 35, 60, 80, 100,
125, 160, 200, 225, 260, 300, 350, 430, 500,
600, 700, 850, 1000 *а*.

8. Потеря напряжения в проводах

При передаче энергии, в результате падения напряжения в проводах, напряжение в начале линии U_1 будет больше напряжения в конце линии U_2.

Разность между U_1 и U_2 называется потерей напряжения в проводах (ΔU).

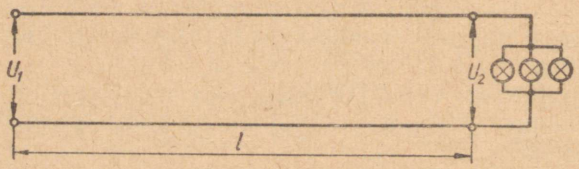


Рис. 2.

$$U_1 - U_2 = \Delta U = IR_{\text{пр}},$$

где $R_{\text{пр}}$ — сопротивление проводов в обоих направлениях.

При изменении нагрузки (тока) от нуля до номинальной пропорционально току изменяется и потеря напряжения.

Таким образом, допускаемая потеря напряжения равна допускаемому колебанию напряжения на приемниках, которое (в % от номинального напряжения потребителя) составляет:

для ламп накаливания 1—2%;
для электродвигателей 2—5%.

Зная, что

$$R_{\text{пр}} = \varrho \frac{2l}{S} = \frac{2l}{\gamma S} \text{ ом},$$

где l — длина провода в одном направлении, *м*;

ϱ — удельное сопротивление материала провода, $\frac{ом \cdot мм^2}{м}$;

γ — удельная проводимость материала провода, $\frac{м}{ом \cdot мм^2}$;

S — сечение проводов, $мм^2$,

можно написать:

$$\Delta U = IR_{пр} = I\frac{2l}{\gamma S}\ в,$$

откуда необходимое сечение провода по заданной потере напряжения

$$S \geqslant \frac{2Il}{\gamma \Delta U}\ мм^2.$$

В случае, когда нагрузка задана в виде мощностей, а потеря напряжения в процентах, можно заменить:

$$I = \frac{P}{U}\ а \quad \text{и} \quad \Delta U = \frac{\Delta U\% U}{100}\ в,$$

тогда

$$S \geqslant \frac{2\frac{Pl}{U}}{\gamma\frac{\Delta U\% U}{100}}\ мм^2 \quad \text{или} \quad S \geqslant \frac{200Pl}{\gamma \Delta U\% U^2}\ мм^2.$$

Умножив потерю напряжения в проводах на ток, получим мощность потерь в линии:

$$\Delta P = I\Delta U = I^2R_{пр}\ вт.$$

Таким образом, с увеличением нагрузки (тока) увеличивается мощность потерь в линии.

Из формулы $S = \frac{2Il}{\gamma \Delta U}\ мм^2$ видно, что, чем больше ток в проводах, тем больше должно быть сечение. Поэтому, в целях экономии металла, передачу энергии на дальние расстояния необходимо осуществлять при высоком напряжении и возможно малом токе.

Определение необходимого сечения провода производится по:

— допускаемому нагреву (см. таблицу допускаемых нагрузок);

— допускаемой потере напряжения.

Из двух сечений, полученных по этим двум условиям, принимают большее (стандартное).

9. Первый закон Кирхгофа

Сумма токов, направленных к точке разветвления, равна сумме токов, направленных от неё. Это условие называется первым законом Кирхгофа.

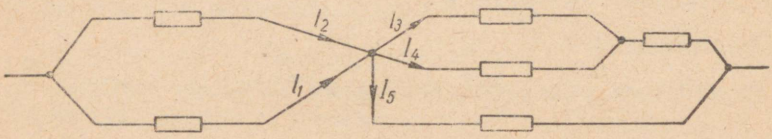


Рис. 3. Точка разветвления.

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5.$$

Перенеся токи в одну часть равенства, получим:

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

или в общем виде:

$$\sum I = 0,$$

т. е. алгебраическая сумма токов в точке разветвления равна нулю.

10. Смешанное соединение сопротивлений

Электрические цепи, в которых одна часть потребителей соединена последовательно, а другая параллельно, называются цепями со смешанным соединением потребителей.

Для определения общего или эквивалентного сопротивления цепи необходимо:

а) вычислить эквивалентные сопротивления параллельно соединенных ветвей, пользуясь формулой:

$$\frac{1}{R_{экв}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

Примечания.

1. Если в этих ветвях имеются потребители, соединенные последовательно, то их сопротивления складываются.

2. При n одинаковых сопротивлениях R, соединенных параллельно:

$$R_{экв} = \frac{R}{n} \text{ ом};$$

б) сложить все последовательно соединенные сопротивления с эквивалентными сопротивлениями параллельных ветвей.

Расчет цепи заключается в определении токов, протекающих через каждое сопротивление (при данном напряжении на зажимах цепи).

Порядок расчета:

1) определить общее сопротивление цепи;
2) определить ток в неразветвленной части цепи;
3) определить напряжения на зажимах разветвленных цепей:

$$U_{\text{разв}} = IR_{\text{экв}} \ в;$$

4) определить токи в каждой ветви разветвленной цепи:

$$I_1 = \frac{U_{\text{разв}}}{R_1} \ a, \qquad I_2 = \frac{U_{\text{разв}}}{R_2} \ a$$

и т. д.

11. Электрическая цепь с несколькими источниками э. д. с.

Ток в цепи с двумя источниками э. д. с. можно определить методом наложения как алгебраическую сумму токов, создаваемых каждым из источников, действующих независимо друг от друга, при неизменных сопротивлениях цепи.

Предположим, что действует только E_1:

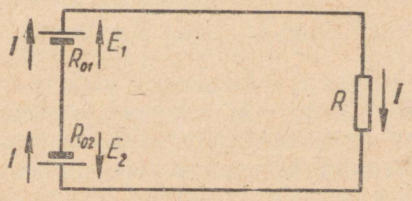


Рис. 4.

$$I_1 = \frac{E_1}{R_{01} + R_{02} + R} \ a.$$

Этот ток совпадает по направлению с E_1.

Предположим, что действует только E_2:

$$I_2 = \frac{E_2}{R_{01} + R_{02} + R} \ a.$$

Этот ток совпадает по направлению с E_2.

Действительный ток в цепи:

а) при одинаковых направлениях э. д. с. (согласное соединение источников):

$$I = I_1 + I_2 = \frac{E_1 + E_2}{R_{01} + R_{02} + R} \ a;$$

б) при встречных направлениях э. д. с. (встречное соединение источников):

$$I = I_1 - I_2 = \frac{E_1 - E_2}{R_{01} + R_{02} + R} \text{ а};$$

При встречном соединении источников ток в цепи возможен только при $E_1 \neq E_2$.

При $E_1 > E_2$ ток в цепи совпадает по направлению с E_1 и направлен навстречу E_2. Электродвижущая сила E_2, направленная противоположно току, является встречной э. д. с., или противо-э. д. с. В этом случае источник E_1 работает в режиме генератора, а источник E_2 — в режиме потребителя.

Если источник э. д. с. работает генератором, то напряжение на его зажимах:

$$U = E - IR_0 \text{ в (т. е. } U < E).$$

Если источник э. д. с. работает потребителем, то напряжение на его зажимах:

$$U = E + IR_0 \text{ в (т. е. } U > E).$$

12. Второй закон Кирхгофа

Второй закон Кирхгофа связывает между собой э. д. с., действующие в любом замкнутом контуре, и падения напряжений на сопротивлениях, входящих в данный контур.

Исходя из принципа электрического равновесия можно сделать вывод, что, когда токи в контуре не изменяются, все э. д. с. уравновешиваются падениями напряжений. Иначе ток в цепи должен бы измениться:

а) возрасти — если э. д. с. превышает сумму падений напряжений;

б) уменьшиться — если э. д. с. меньше суммы падений напряжений.

Таким образом, алгебраическая сумма э. д. с., действующих в любом замкнутом контуре, равна алгебраической сумме падений напряжения на всех участках этого контура:

$$\Sigma E = \Sigma IR \text{ — второй закон Кирхгофа.}$$

Примечание. При составлении уравнений э. д. с. и падения напряжений считаются положительными, если направления э. д. с. и соответствующих токов совпадают с произвольно выбранным направлением обхода.

Так, например, обходя контур $ABCDA$ (рис. 5) по часовой стрелке, условно примем E_1 и I_1R_1 положительными, а E_2 и I_2R_2 отрицательными. Тогда уравнение второго закона Кирхгофа для этого контура будет выглядеть так:

$$E_1 - E_2 = I_1R_1 - I_2R_2.$$

Сложная электрическая цепь — это разветвленная цепь с несколькими произвольно расположенными источниками, в которой распределение токов по закону Ома определить невозможно.

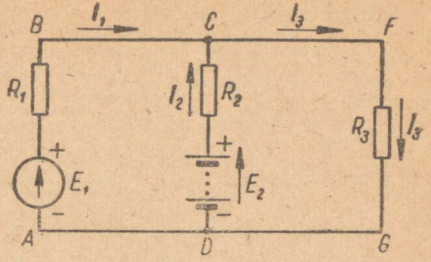


Рис. 5. Сложная электрическая цепь.

13. Расчет сложной цепи

В результате расчета необходимо найти величины и направления токов во всех участках цепи.

Порядок расчета:

произвольно наметить положительные направления токов во всех участках цепи;

составить столько уравнений, сколько в цепи неизвестных токов:

а) по первому закону Кирхгофа $(n-1)$ уравнение, где n — число узлов в цепи;

б) по второму закону Кирхгофа — недостающие уравнения. При этом нужно выбирать наиболее простые контуры, но так, чтобы в каждом из контуров содержалось хотя бы одна новая ветвь.

Пример:

$E_1 = 123$ *в*; $R_1 = 0{,}15$ *ом*; $R_3 = 12$ *ом*.

$E_2 = 115$ *в*; $R_2 = 0{,}5$ *ом*;

$I_1 = ?$ $I_2 = ?$ $I_3 = ?$

Возьмем произвольно направления токов во всех участках (см. схему) и составим три уравнения: одно по первому закону Кирхгофа и два — по второму закону Кирхгофа.

1) $I_1 + I_2 = I_3$
(для точки C);

2) $E_1 = I_1R_1 + I_3R_3$
(для контура $ABCFGA$);

3) $E_2 = I_2R_2 + I_3R_3$
(для контура $DCFGD$).

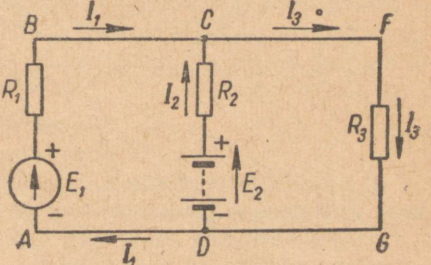


Рис. 6.

Подставим в два последних уравнения числовые значения:

$$\left.\begin{aligned} 2)\ 123 &= 0{,}15\ I_1 + 12\ I_3 \\ 3)\ 115 &= 0{,}5\ \ I_2 + 12\ I_3 \end{aligned}\right\}.$$

Заменив в последнем уравнении $I_2 = I_3 - I_1$, получим:

$$115 = 0{,}5\ I_3 - 0{,}5\ I_1 + 12\ I_3 = -0{,}5\ I_1 + 12{,}5\ I_3.$$

$$\left.\begin{aligned} 2)\ 123 &= \ \ 0{,}15\ I_1 + 12\ I_3 \\ 3)\ 115 &= -0{,}5\ I_1 + 12{,}5\ I_3 \end{aligned}\right\} \times 0{,}3;$$

$$\begin{aligned} 2)\ 123 &= \ \ 0{,}15\ I_1 + 12\ I_3 \\ +\ 3)\ 34{,}5 &= -0{,}15\ I_1 + 3{,}75\ I_3 \\ \hline 157{,}5 &= 15{,}75\ I_3 \end{aligned}$$

$$I_3 = \frac{157{,}5}{15{,}75} = 10\ a.$$

Напряжение между точками F и G:

$$U_{FG} = 10 \cdot 12 = 120\ в.$$

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{FG}}{R_1} = \frac{123 - 120}{0{,}15} = 20\ a;$$

$$I_2 = \frac{E_2 - U_{FG}}{R_2} = \frac{115 - 120}{0{,}5} = -10\ a.$$

Знак минус у тока I_2 показывает, что действительное направление этого тока противоположно выбранному. Следовательно, источник E_2 работает в режиме потребителя.

14. Соединение источников э. д. с.

С целью повышения мощности первичные элементы и аккумуляторы соединяются в батарею.

Допускается соединение только однородных элементов, имеющих одинаковые э. д. с. и внутренние сопротивления.

Способы соединения элементов в батарею:

1. Последовательный.
2. Параллельный.
3. Групповой.

Последовательное соединение применяется при условии, что напряжение потребителя U больше э. д. с. отдельного элемента E_0, а номинальный ток потребителя не превышает разрядного тока элемента. В этом случае число элементов

$$n \geqslant \frac{U}{E_0}.$$

У всех элементов э. д. с. должны иметь одинаковые направления, для чего отрицательный зажим первого элемента соединяют с положительным зажимом второго, и т. д.

Э. д. с. батареи $E = E_0 . n$.

Внутреннее сопротивление батареи $R = R_0 . n$.

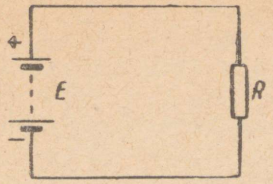


Рис. 7. Последовательное соединение аккумуляторов.

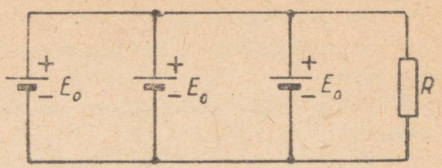


Рис. 8. Параллельное соединение аккумуляторов.

Разрядный ток батареи равен разрядному току одного элемента.

Параллельное соединение элементов применяется в том случае, если ток потребителя I больше разрядного тока элемента I_p, а напряжение потребителя равно напряжению элемента. Тогда число элементов

$$n \geqslant \frac{I}{I_p}.$$

При параллельном соединении положительные зажимы всех источников соединяются в один узел, а отрицательные — в другой.

Э. д. с. батареи равна э. д. с. элемента:

$$E = E_0.$$

Внутреннее сопротивление батареи:

$$R = \frac{R_0}{n}.$$

Разрядный ток батареи равен разрядному току элемента, умноженному на число элементов:

$$I = I_p n.$$

Групповое соединение представляет собой комбинацию последовательного и параллельного соединения элементов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ТЕМЕ I

1. Какие источники электрической энергии получили наибольшее распространение в технике?
2. Как устроен простейший гальванический элемент?
3. Как устроены и работают аккумуляторы?
4. Какой электрический ток называется постоянным?
5. Что называется величиной тока и в каких единицах величина тока измеряется?
6. Через поперечное сечение проводника за 10 *сек.* проходит заряд 20 *к.* Чему равен ток в проводнике?

7. Какое принято направление электрического тока?

8. Что называется плотностью электрического тока?

9. Что называется электродвижущей силой и в каких единицах она измеряется?

10. Укажите различие между электродвижущей силой и напряжением на зажимах.

11. В каких единицах измеряется работа электрического тока?

12. Что называется мощностью электрического тока и в каких единицах она измеряется?

13. Что называется электрическим сопротивлением и в каких единицах оно измеряется?

14. Как читается закон Джоуля—Ленца и какова его формула?

15. Как определяется предельно допускаемая нагрузка на проводник?

16. Начертите графическую зависимость напряжения от тока нагрузки.

17. Какова формула закона Ома для всей цепи?

18. Что называется коротким замыканием?

19. На чем основано действие плавкого предохранителя и как он включается в цепь?

20. Из каких материалов выполняются плавкие вставки предохранителя?

21. Как подразделяются плавкие предохранители?

22. Расскажите, как устроен пробочный плавкий предохранитель.

23. Расскажите, как устроен трубчатый плавкий предохранитель.

24. Как производится выбор плавких предохранителей?

25. Как производится выбор сечения проводов по допускаемой потере напряжения?

26. Чему равна допускаемая потеря напряжения в силовых и осветительных сетях?

27. Как формулируется первый закон Кирхгофа?

28. Как определить общее или эквивалентное сопротивление цепи со смешанным соединением потребителей?

29. В чем заключается метод наложения при расчете цепи с несколькими источниками э. д. с.?

30. Как формулируется второй закон Кирхгофа?

31. Изложите порядок расчета сложной цепи.

32. Какое соединение первичных элементов и аккумуляторов называется последовательным и в каких случаях оно применяется?

33. Какое соединение первичных элементов и аккумуляторов называется параллельным и в каких случаях оно применяется?

ТЕМА II

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

1. Магнитная индукция. Магнитный поток

Если в магнитное поле поместить проводник с током, то проводник в результате взаимодействия с магнитным полем придет в движение.

Причиной движения явится сложение магнитных полей магнита и проводника. Произойдет усиление результирующего магнитного поля с одной стороны проводника и ослабление — с другой. Это приведет к искривлению магнитных линий, и они, стремясь выпрямиться, будут выталкивать проводник.

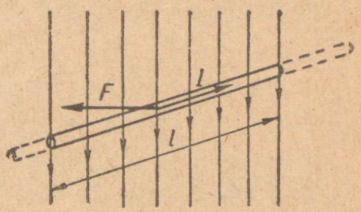


Рис. 9.

Направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле, можно определить по правилу левой руки. Если ладонь левой руки повернуть так, чтобы магнитные линии входили в неё, а четыре вытянутых пальца совпадали с направлением тока, то отогнутый большой палец укажет направление силы, действующей на провод.

Величина силы, действующей на прямолинейный проводник с током, помещенный перпендикулярно к направлению магнитного поля:

$$F = BIl \text{ н},$$

где I — ток, проходящий по проводнику, *а*;
l — длина активной части проводника (части, расположенной в магнитном поле), *м*;
B — величина, характеризующая интенсивность магнитного поля, называется магнитной индукцией.

$$B = \frac{F}{I \cdot l}.$$

Магнитная индукция численно равна силе, с которой поле действует на проводник длиной 1 *м* при токе в нем = 1 *а*.

$$[B]=\left[\frac{F}{l\cdot I}\right]=\frac{н}{а\cdot м}=\frac{дж}{а\cdot м^2}=\frac{в\cdot сек}{м^2}.$$

Единица *в·сек* названа вебер (*вб*).

Единица $в\cdot сек/м^2 = вб/м^2$ — тесла (*тл*).

Таким образом,

$$[B]=\frac{вб}{м^2}=тл.$$

Магнитная индукция B характеризуется числом магнитных линий, проходящих через 1 $м^2$ поверхности, расположенной перпендикулярно их направлению.

Если магнитная индукция поля во всех его точках одинакова, то магнитное поле является однородным.

Магнитным потоком принято считать общее количество силовых магнитных линий, проходящих через какую-либо поверхность, расположенную перпендикулярно их направлению:

$$\Phi = B\cdot S$$

$$[\Phi]=тл\cdot м^2=\frac{вб}{м^2}\cdot м^2=вб.$$

Магнитная индукция B и магнитный поток Φ представляют векторные величины.

2. Магнитное поле тока

Проводник с электрическим током окружен магнитным полем. Магнитные линии вокруг проводника с током обладают следующими свойствами:

1) магнитные линии прямолинейного проводника имеют форму концентрических окружностей;

2) магнитные линии располагаются тем гуще, чем ближе они к проводнику;

3) интенсивность поля (магнитная индукция) зависит от величины тока в проводнике;

4) направление поля зависит от направления тока в проводнике.

Для определения направления поля применяется правило буравчика:

Если буравчик ввинчивать по направлению прохождения тока в проводнике, то вращение его рукоятки покажет направление магнитного поля (рис. 10).

У свернутого спиралью проводника магнитные поля витков

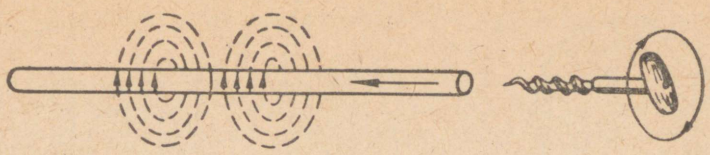


Рис. 10.

складываются, образуя суммарное магнитное поле. В этом случае направление вращения рукоятки буравчика должно совпадать с направлением тока в спирали (катушке), тогда поступательное движение его укажет направление магнитных линий, пронизывающих катушку (рис. 11).



Рис. 11.

Магнитная индукция во всех точках, расположенных на расстоянии a от оси прямолинейного проводника с током, имеет одинаковые значения: она пропорциональна току в проводнике, обратно пропорциональна расстоянию a (длине магнитной линии, находящейся на расстоянии a) и зависит от среды:

$$B = \mu_a \frac{I}{2\pi a} \text{ тл},$$

где I — величина тока в проводнике, $а$;
a — расстояние от оси проводника до линии магнитного поля, $м$;
μ_a — коэффициент, зависящий от среды, называемый абсолютной магнитной проницаемостью.

Магнитная индукция внутри кольцевой катушки с током, (рис. 12) пропорциональна произведению тока на число ее витков, обратно пропорциональна длине средней магнитной линии и зависит от среды (материала сердечника):

$$B = \mu_a \frac{Iw}{2\pi R} \text{ тл}.$$

Магнитная индукция внутри цилиндрической катушки с током (рис. 13) пропорциональна произведению тока на число витков, обратно пропорциональна длине катушки и зависит от среды (материала сердечника):

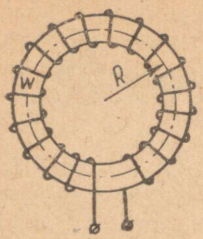


Рис. 12.

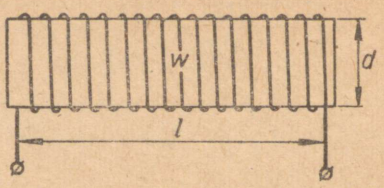


Рис. 13.

$$B = \mu_a \frac{Iw}{l} \text{ тл.}$$

Примечание. Величина Iw именуется намагничивающей силой и обозначается $F_м$.

3. Магнитная проницаемость

Абсолютная магнитная проницаемость μ_a служит величиной (коэффициентом пропорциональности), характеризующей магнитные свойства среды.

$$[\mu_a] = \left[\frac{B \cdot 2\pi a}{I}\right] = \frac{в \cdot сек \cdot м}{м^2 \cdot а} = \frac{в \cdot сек}{м \cdot а} = \frac{ом \cdot сек}{м}.$$

Единица *ом·сек* называется генри (*гн*).

$$[\mu_a] = \frac{гн}{м}.$$

Абсолютной магнитной проницаемости вакуума присвоен термин магнитной постоянной (μ_0):

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{гн}{м}.$$

Материалы или среды, в которых поле создается сильнее, чем в вакууме, называются парамагнитными, а материалы и среды, в которых поле слабее, — диамагнитными.

Отвлеченное число, показывающее, во сколько раз абсолютная проницаемость вещества больше магнитной постоянной, называется относительной магнитной проницаемостью вещества (μ).

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0},$$

откуда

$$\mu_a = \mu \cdot \mu_0 \frac{гн}{м}.$$

Для диамагнитных материалов $\mu < 1$, для парамагнитных — $\mu > 1$.

Пример диамагнитного вещества: медь — $\mu = 0{,}999995$.

Пример парамагнитного вещества: воздух — $\mu = 1{,}0000031$.

Для технических расчетов μ диамагнитных и парамагнитных тел принимается равной единице.

Особую группу составляют так называемые ферромагнитные материалы, относительная магнитная проницаемость которых может достигать десятков тысяч.

4. Напряженность магнитного поля

Напряженностью магнитного поля (H) принято считать величину, характеризующую интенсивность поля без учета влияния среды:

$$H = \frac{B}{\mu_a}$$

$$[H] = \frac{в \cdot сек}{м^2} \cdot \frac{м}{ом \cdot сек} = \frac{а}{м}.$$

Отсюда напряженность магнитного поля для тока в прямом проводе (на расстоянии a от оси провода):

$$H = \frac{I}{2\pi a} \; а/м;$$

в кольцевой катушке:

$$H = \frac{Iw}{2\pi R} \; а/м;$$

в цилиндрической катушке:

$$H = \frac{Iw}{l} \; а/м.$$

5. Ферромагнитные вещества и их намагничивание

Материалы, обладающие свойством намагничиваться, называют ферромагнитными.

К ферромагнитным материалам относятся: железо, сталь, чугун, кобальт, никель и ряд сплавов (железо с никелем, алюминий с никелем и др.).

Магнитные свойства ферромагнитных материалов объясняются наличием в них намагниченных микроскопических областей, которые можно рассматривать как элементарные магнитики. Последние при отсутствии внешнего магнитного поля расположены беспорядочно. Под действием внешнего магнитного поля, создаваемого, например, током в катушке, намотанной на

стальной сердечник, магниты поворачиваются в направлении поля и вызывают усиление магнитной индукции. Поэтому при внесении ферромагнитного тела в слабое магнитное поле интенсивность последнего возрастает в десятки и сотни раз.

График, выражающий зависимость магнитной индукции ферромагнитного вещества (B) от напряженности намагничивающего поля (H), называется кривой намагничивания.

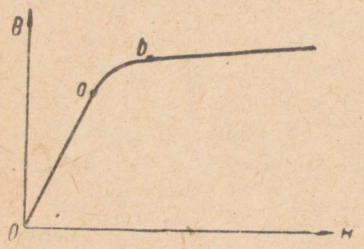


Рис. 14. Кривая намагничивания стали.

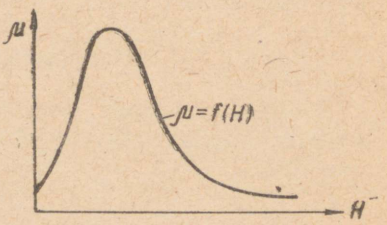


Рис. 15. Кривая зависимости μ от H.

Кривую намагничивания (рис. 14) можно разделить на три участка:

1) прямолинейный участок Oa, на котором видно, что вначале магнитная индукция возрастает очень резко;

2) участок ab, характеризующий замедление роста магнитной индукции;

3) участок за точкой b, где рост магнитной индукции значительно замедлен. Этот участок соответствует магнитному насыщению материала, когда все элементарные магнитики уже ориентированы вдоль направления внешнего поля.

Из рассмотренного графика следует, что абсолютная магнитная проницаемость $\mu_a = \frac{B}{H}$ у ферромагнитных материалов непостоянна и зависит от напряженности поля, а значит, и тока намагничивающей катушки. При насыщении B почти не увеличивается при значительном увеличении H. Следовательно, μ_a уменьшается.

Значения относительной магнитной проницаемости μ при очень малых величинах H, а также в области насыщения близки к единице (рис. 15).

При перемагничивании ферромагнитного материала (когда ток в намагничивающей катушке меняется по величине и направлению) получается следующая графическая зависимость (рис. 16):

1) При увеличении тока (напряженности поля) магнитная индукция достигает значения $+B_м$ (участок OA). В точке A наступает магнитное насыщение.

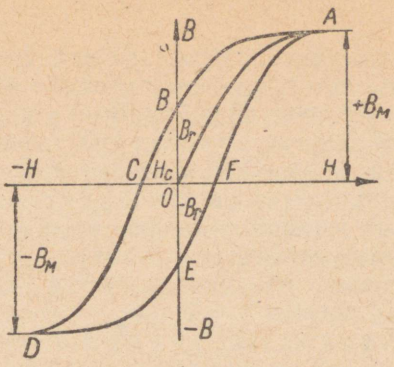


Рис. 16.

2) При уменьшении тока (напряженности поля) магнитная индукция в сердечнике также уменьшается. Однако кривая размагничивания *ABC* не совпадает с кривой намагничивания *OA*. Это объясняется тем, что между элементарными магнитиками действуют задерживающие силы, вследствие чего они частично сохраняют ориентацию, которую получили при намагничивании.

При нулевой напряженности поля магнитная индукция будет иметь значение B_r, называемое остаточной индукцией, или остаточным магнетизмом (отрезок *OB*).

3) При изменении направления намагничивающего тока (напряженности поля) магнитная индукция продолжает уменьшаться. Напряженность поля обратного направления, которую нужно создать для полного размагничивания сердечника, называется задерживающей, или коэрцитивной, силой (H_c).

4) При дальнейшем увеличении тока обратного направления магнитная индукция достигает значения $-B_M$.

5) При уменьшении величины обратного тока магнитная индукция вновь уменьшается. Отрезок *OE* характеризует остаточную индукцию $-B_r$.

6) При следующем изменении направления тока будет вновь получена нулевая, а затем и максимальная индукция.

Таким образом, процесс перемагничивания ферромагнитного сердечника описывается замкнутой кривой *ABCDEFA*, выражающей зависимость

$$B = f(H).$$

В процессе перемагничивания имеет место отставание изменений магнитной индукции в сердечнике от изменений напряженности намагничивающего поля — магнитный гистерезис (гистерезис по-гречески — отставание).

Кривая перемагничивания соответственно называется петлей гистерезиса.

Перемагничивание стали связано с затратой энергии, которая, превращаясь в тепло, вызывает нагревание стали.

Чем больше величина задерживающей силы, тем бо́льшую энергию необходимо затратить на перемагничивание и тем сильнее нагревается сердечник. Площадь петли гистерезиса пропорциональна потерям энергии на тепло при перемагничивании.

Потери энергии, связанные с процессом перемагничивания стали, именуются потерями от гистерезиса.

Ферромагнитные материалы делятся на две группы — магнитно-мягкие и магнитно-твердые.

У магнитно-мягких материалов ветви петли гистерезиса почти сливаются, у магнитно-твердых — резко расходятся.

Магнитно-мягкие материалы применяются в качестве магнитопроводов постоянного и переменного магнитных потоков. К ним относятся:

чистое железо и малоуглеродистые стали;

электротехнические стали (сплавы железа и кремния);

пермаллои (сплавы железа и никеля);

ферриты (получаются путем спекания окислов железа с окислами цинка, кадмия, марганца, меди, никеля).

Магнитно-твердые материалы предназначены для изготовления постоянных магнитов. К ним относятся:

углеродистые, вольфрамовые, хромистые и кобальтовые стали;

сплавы железа, алюминия и никеля (ални) или тех же плюс кремний (алниси).

6. Магнитная цепь

Магнитная цепь состоит из катушки с током и магнитопровода.

Основное расчетное уравнение для магнитной цепи называется законом полного тока:

$$F_м = Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + \ldots,$$

где $F_м$ — намагничивающая сила, *а*;
I — ток в намагничивающей катушке, *а*;
w — число витков намагничивающей катушки;
$H_1, H_2 H_3$ — напряженности магнитного поля в соответствующих участках цепи, *а/м*;
l_1, l_2, l_3 — длины участков цепи, *м* (по средней магнитной линии).

Намагничивающая сила магнитной цепи равна сумме произведений напряженностей магнитного поля в участках цепи на длину этих участков.

Участки цепи выбираются так, чтобы в пределах участка магнитный поток и сечение магнитопровода не менялись.

Расчет магнитной цепи заключается в определении намагничивающей силы катушки ($F_м = Iw$), необходимой для получения заданного магнитного потока Φ.

Порядок расчета:

1) разбить магнитную цепь на участки (длиной по средней магнитной линии — l_1, l_2, l_3 и т. д.), имеющие одинаковые поперечные сечения и однородный материал;

2) для каждого участка найти величину магнитной индукции по формуле:

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad тл;$$

3) по кривым намагничивания для данного материала найти для каждого значения магнитной индукции величину H;

Примечание. Если в магнитной цепи встречаются воздушные зазоры, то напряженность поля в воздушном зазоре определяется по формуле:

$$H_0 = 80 \cdot 10^4 \cdot B_0 \quad а/м,$$

где B_0 — магнитная индукция в воздушном зазоре, *тл*.

4) определить величину намагничивающей силы по закону полного тока:

$$Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + \ldots$$

Расчет магнитной цепи удобно выполнять в виде таблицы.

Пример.

Определить намагничивающую силу обмотки электромагнита, если необходимо создать магнитный поток $\Phi = 0{,}00432$ *вб*.

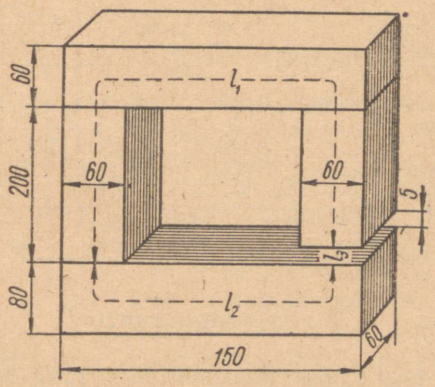


Рис. 17.

Материал сердечника:

а) верхняя часть (включая оба вертикальных стержня) — электротехническая сталь;

б) нижняя часть — стальное литье.

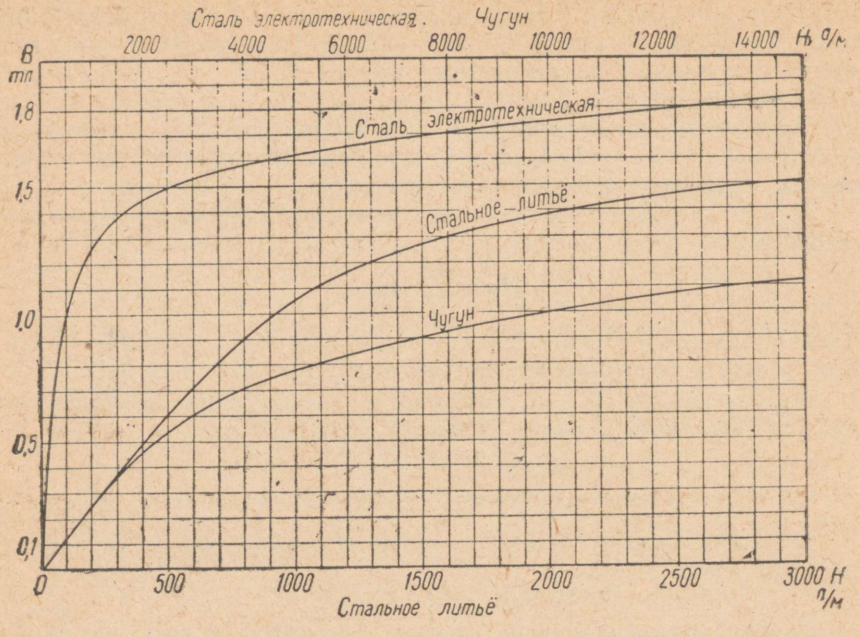


Рис. 18. Кривые намагничивания.

Расчет:

№ участка	Материал	l, м	S, м²	B, тл	H, а/м	$H \cdot l$, а
1	Сталь электротехническая	0,545	0,0036	1,2	700	380
2	Стальное литье	0,170	0,0048	0,9	820	140
3	Воздушный зазор	0,005	0,0036	1,2	960000	4800
						$\Sigma H \cdot l = 5320$ а

7. Электромагниты

Электромагнитом называется устройство, состоящее из сердечника, выполненного из ферромагнитного магнитно-мягкого материала, и намагничивающей катушки.

При наличии тока в катушке создается магнитный поток, замыкающийся через воздушный промежуток. Тот конец сердечника, из которого магнитный поток выходит, называется северным полюсом (N), другой — южным (S).

При внесении ферромагнитного предмета (так называемого

якоря) в поле электромагнита, первый намагничивается и притягивается к полюсам электромагнита.

Электромагниты получили самое широкое распространение в технике. Они применяются в различных подъемных кранах и устройствах; в автоматах и реле; в тормозных и блокирующих устройствах; на транспорте и в электрических машинах; для крепления деталей на станках; в телефонных и телеграфных аппаратах; в электроизмерительных приборах, и т. д. и т. п.

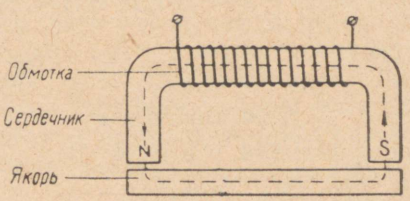


Рис. 19. Электромагнит с подковообразным сердечником.

Сила, с которой якорь притягивается к одному полюсу электромагнита (подъемная или отрывная сила), может быть вычислена по формуле

$$F = \frac{B^2 \cdot S}{8\pi} \cdot 10^7 \text{ н},$$

где B — магнитная индукция, *тл*;
S — площадь торца сердечника, $м^2$.

8. Электромагнитная индукция

Во всяком проводе, который, двигаясь в магнитном поле, пересекает магнитные линии, возбуждается э. д. с. Это явление называется электромагнитной индукцией.

Возникновение э. д. с. электромагнитной индукции объясняется следующим. При движении проводника вместе с ним движутся свободные электроны, создающие вокруг себя элементарные магнитные поля, которые взаимодействуют с основным магнитным полем. В результате на свободные электроны действует сила, заставляющая их передвигаться вдоль проводника, причем на одном конце его создается излишек электронов, на другом — недостаток, т. е. образуются э. д. с. (рис. 20).

Величина индуктированной э. д. с. будет тем больше, чем больше величина магнитной индукции, скорость движения и активная длина проводника, т. е.

$$E = Blv \text{ в}.$$

Если проводник пересекает магнитные линии не под прямым углом, а под углом α (рис. 21), то

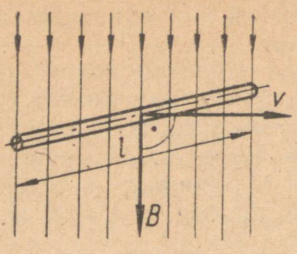


Рис. 20.

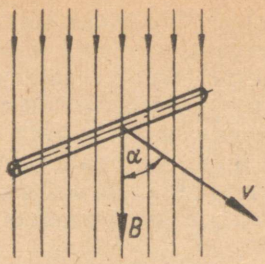


Рис. 21.

$$E = Blv \sin \alpha \ в,$$

где E — индуктированная э. д. с., *в*;
B — магнитная индукция, *тл*;
l — активная длина проводника, *м*;
v — скорость движения проводника, *м/сек*.

Направление индуктированной э. д. с. определяется по правилу правой руки: если ладонь правой руки расположить так, чтобы магнитные линии входили в нее, а отогнутый большой палец указывал направление движения проводника, то четыре вытянутых пальца укажут направление индуктированной э. д. с.

9. Принцип работы электрического генератора

При движении провода перпендикулярно направлению магнитных линий со скоростью v в нем будет индуктироваться э. д. с.

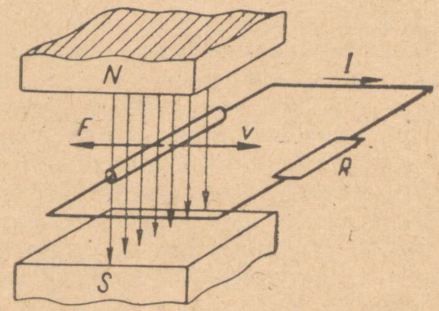


Рис. 22.

Если провод замкнуть на сопротивление R, то в цепи возникнет ток I. На провод с током будет действовать электромагнитная сила $F = BIl$ *н*, направленная (по правилу левой руки) противоположно движению провода и, следовательно, являю-

щаяся тормозной силой. Поэтому для движения провода требуется внешняя сила, равная по величине тормозной силе и направленная противоположно ей, т. е. необходим первичный двигатель, развивающий механическую мощность

$$P_м = Fv \text{ вт},$$

или

$$P_м = Fv = BIlv = EI = P \text{ вт}.$$

Из этого выражения видно, что в процессе движения проводника в магнитном поле развиваемая первичным двигателем механическая мощность преобразуется в мощность электрического тока в замкнутой цепи. Следовательно, провод в магнитном поле можно рассматривать как простейший электрический генератор, в котором происходит преобразование механической энергии в электрическую.

$$P_м = P = EI = (U + U_0)I = I^2R + I^2R_0 = P_п + P_0 \text{ вт},$$

где $P_п$ — мощность потребителя;
P_0 — мощность потерь.

Таким образом, механическая мощность $P_м$ равна электрической мощности P. Последняя распадается на мощность потребителя $P_п$ и мощность потерь в генераторе P_0.

10. Правило Ленца

На основании правила Ленца можно определить направление индуктированной э. д. с.:

индуктированная э. д. с. имеет такое направление, при котором созданный ею ток противодействует причине, вызвавшей э. д. с.

Это универсальное правило вытекает из закона сохранения энергии.

Примеры, подтверждающие правило Ленца:

1)

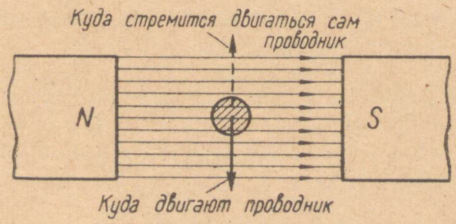


Рис. 23.

Направление индуктированной э. д. с. и тока (рис. 23) определяем по правилу правой руки.

Направление выталкивания определяем по правилу левой руки.

2)

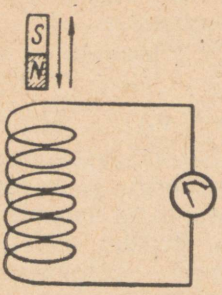


Рис. 24.

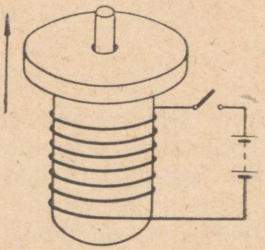


Рис. 25.

а) При опускании постоянного магнита в катушку (рис. 24) направление индуктированного тока создает вверху катушки северный и внизу — южный магнитный полюс, что будет мешать движению магнита;

б) при выдвижении магнита направление индуктированного тока будет обратным, что также будет мешать движению магнита.

3) В момент замыкания цепи (рис. 25) линии магнитного поля катушки пересекают кольцо и индуктируют в нем ток, направленный обратно току в витках катушки. Проводники с разными направлениями токов оттолкнутся, и алюминиевое кольцо подскочит вверх.

11. Принцип работы электродвигателя

Если по проводу, расположенному в однородном магнитном поле, проходит ток от постороннего источника тока, то на провод будет действовать электромагнитная сила

$$F = BIl \text{ н.}$$

Направление этой силы определяется по правилу левой руки.

При перемещении провода на расстояние b в плоскости, перпендикулярной магнитным линиям, совершенная им механическая работа равна:

$$A_м = Fb = BIlb \text{ дж.}$$

За то же время будет израсходована энергия на нагревание провода:

$$W_т = I^2R_0t \text{ дж,}$$

где R_0 — сопротивление провода.

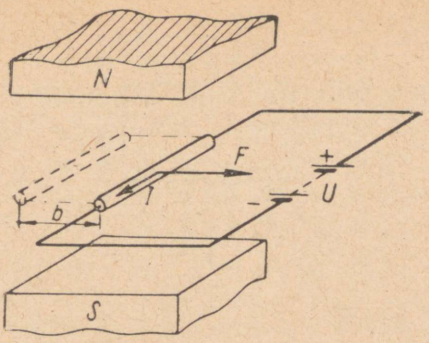


Рис. 26.

Израсходованная источником питания за время t энергия:

$$W = UIt = A_м + W_т = BIlb + I^2R_0t \text{ дж}.$$

Разделив правую и левую части последнего уравнения на произведение It, получим:

$$U = Bl\frac{b}{t} + IR_0 = Blv + IR_0 = E + IR_0$$

$$U = E + IR_0 \text{ в},$$

откуда ток в цепи

$$I = \frac{U - E}{R_0} \text{ а}.$$

Электродвижущая сила E, индуктированная в проводе при его движении в магнитном поле, имеет направление, противоположное току и называется обратной э. д. с.

Умножив выражение напряжения на ток I, получим:

$$UI = EI + I^2R_0 \quad \text{или} \quad P = P_м + P_0,$$

т. е. электрическая мощность источника тока преобразуется в механическую и, частично, в тепловую. Следовательно, проводник в магнитном поле, питаемый током от постороннего источника, можно рассматривать как простейший электродвигатель.

12. Индуктирование э. д. с. в контуре

При движении замкнутого контура в однородном магнитном поле проводники *1* и *2* (рис. 27) не пересекают магнитных силовых линий, и э. д. с. в них не индуктируются. В проводниках *3* и *4* индуктируются равные по величине и направлению э. д. с. Значит, результирующая э. д. с., индуктируемая в контуре, равна

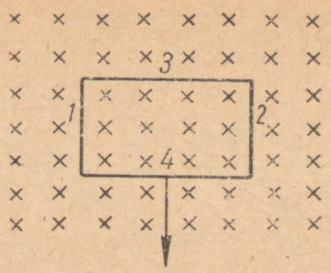


Рис. 27.

нулю. Результат не изменится, если в однородном магнитном поле поступательно перемещается замкнутый контур любой формы (например, кольцевой). Если же замкнутый контур движется в неоднородном поле, то результирующая э. д. с. в контуре не равна нулю.

Следовательно, закон электромагнитной индукции можно сформулировать так: в контуре индуктируется э. д. с. при всяком изменении магнитного потока, охватываемого этим контуром.

Если за время Δt магнитный поток изменится на величину $\Delta\Phi$, то э. д. с., индуктированная в контуре,

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ в}.$$

Величина э. д. с., индуктированной в контуре, численно равна скорости изменения магнитного потока, охватываемого этим контуром.

Знак минус в формуле является выражением правила Ленца: индуктированная в контуре э. д. с. имеет такое направление, при котором созданный ею ток противодействует изменениям магнитного потока, охватываемого контуром.

Выражение $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ представляет собой среднюю скорость изменения магнитного потока, охватываемого контуром. В любой произвольный момент времени надо найти приращение потока $d\Phi$ за бесконечно малый промежуток времени dt и написать:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \text{ в}.$$

Если контур состоит не из одного витка, а из w витков, соединенных последовательно, и представляет собой катушку, то индуктированная в катушке э. д. с. будет в w раз больше, чем в одном витке, т. е.

$$e = -w\frac{d\Phi}{dt} \text{ в}.$$

Произведение числа витков на пронизывающий их магнитный поток называется потокосцеплением и обозначается буквой Ψ (пси):

$$\Psi = w\Phi \text{ вб}.$$

Следовательно,

$$e = -w\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt} \text{ в},$$

т. е. индуктированная в катушке э. д. с. равна скорости изменения потокосцепления.

Самоиндукция — явление возникновения э. д. с. в контуре вследствие изменения тока в этом же контуре. Такую э. д. с. называют электродвижущей силой самоиндукции и обозначают e_L.

$$e_L = -\frac{d\Psi_L}{dt} \text{ в},$$

где Ψ_L — потокосцепление самоиндукции.

Индуктивность катушки (L) — это величина, равная отношению потокосцепления самоиндукции Ψ_L к току, протекающему по катушке:

$$L = \frac{\Psi_L}{I} \text{ гн}.$$

L измеряется в генри (*гн*) и зависит от:

а) числа витков катушки;

б) формы и размеров катушки;

в) магнитной проницаемости сердечника катушки.

Для цилиндрической катушки:

$$\Psi_L = w\Phi = wBS = \mu_a\frac{Iw^2}{l}S \text{ вб}$$

и

$$L = \frac{\Psi_L}{I} = \mu_a\frac{w^2S}{l} \text{ гн}.$$

Учитывая, что

$$\Psi_L = L \cdot I \text{ вб},$$

получим

$$e_L = -L\frac{di}{dt} \text{ в},$$

откуда следует, что э. д. с. самоиндукции пропорциональна индуктивности L и скорости изменения тока в контуре (катушке).

13. Вихревые токи

Явление электромагнитной индукции служит причиной возникновения внутри металлов паразитных токов, называемых вихревыми.

Вихревые токи появляются в массивных проводниках, находящихся в изменяющемся магнитном поле (железные сердечники катушек, якорей генераторов и электродвигателей и т. д.). Следствием появления вихревых токов является сильное нагревание металла, что вызывает бесполезную трату энергии и может привести к порче изоляции обмотки.

Для уменьшения потерь на вихревые токи якори генераторов, электродвигателей и сердечники трансформаторов собираются из отдельных тонких, изолированных друг от друга, пластин.

Однако вихревые токи нашли полезное применение. Так, в металлургии они используются для плавки металлов. В измерительных приборах часто устраивают магнитно-индукционные тормозы, принцип действия которых основан на взаимодействии магнитного поля, создаваемого вихревыми токами, и основного магнитного поля. Появление вихревых токов также используется в работе счетчиков электрической энергии в цепях переменного тока.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ТЕМЕ II

1. В чем заключается взаимодействие между магнитным полем и проводником с током?
2. Как определить направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле?
3. Какой формулой определяется сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, и в каких единицах измеряются все величины в этой формуле?
4. В магнитном поле с индукцией 1,0 *тл* помещен проводник длиной 50 *см*, по которому проходит ток 20 *а*. С какой силой действует на этот проводник магнитное поле?
5. Что называется магнитной индукцией и в каких единицах она измеряется?
6. Какое магнитное поле называется однородным?
7. Что называется магнитным потоком и в каких единицах он измеряется?
8. Каковы свойства магнитных линий вокруг проводника с током?
9. Как определить направление магнитных линий?
10. Какой формулой определяется магнитная индукция для тока:
    а) в прямом проводе;
    б) в кольцевой катушке;
    в) в цилиндрической катушке?

11. Что характеризует абсолютная магнитная проницаемость и в каких единицах она измеряется?

12. Что называется магнитной постоянной?

13. Что показывает относительная магнитная проницаемость и имеет ли она размерность?

14. Какие тела называются парамагнитными, диамагнитными и ферромагнитными?

15. Что называется напряженностью магнитного поля и в каких единицах напряженность поля измеряется?

16. Какие материалы относятся к ферромагнитным?

17. Что выражает кривая намагничивания стали?

18. Что такое магнитное насыщение и чем оно объясняется?

19. Определите по кривым намагничивания напряженность магнитного поля в сердечнике из электротехнической стали для магнитной индукции 1,4 *тл*.

20. В чем заключается явление гистерезиса?

21. Что называется остаточной индукцией и задерживающей силой?

22. Почему из-за гистерезиса происходит потеря энергии в стали и от чего зависит величина этой потери?

23. Из каких частей состоит магнитная цепь?

24. Изложите порядок расчета магнитной цепи.

25. По какой формуле вычисляют подъемную (отрывную) силу электромагнита?

26. Что называется электромагнитной индукцией?

27. Как можно вычислить величину э. д. с. электромагнитной индукции?

28. Как определить направление э. д. с. электромагнитной индукции?

29. В магнитном поле перемещается проводник длиной 0,5 *м* со скоростью 4 *м/сек*. В проводнике индуктируется э. д. с. 2 *в*. Чему равна магнитная индукция поля?

30. Почему при движении провода, замкнутого на сопротивление и находящегося в магнитном поле, появляется тормозная сила?

31. Как происходит преобразование механической мощности в электрическую в простейшем генераторе?

32. Как читается правило Ленца, устанавливающее направление индуктированной э. д. с.?

33. На что расходуется (во что преобразуется) энергия источника тока в простейшем электродвигателе?

34. Укажите условие, необходимое для возникновения э. д. с. индукции в контуре.

35. Чему численно равна величина э. д. с., индуктированной в контуре, и что означает знак минус в выражении для э. д. с.?

36. Что называется потокосцеплением и в каких единицах оно измеряется?

37. С катушкой, имеющей 500 витков, сцеплен магнитный поток 0,2 *вб*. Определите величину потокосцепления.

38. Чему равна индуктированная в катушке э. д. с.?

39. Что называется вихревыми токами и во всех ли случаях они являются паразитными?

ТЕМА III

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Назначение машин постоянного тока

Электрическими машинами называются устройства, предназначенные для преобразования:

механической энергии в электрическую — генераторы;

электрической энергии в механическую — электродвигатели.

Электрические машины постоянного тока применяются:

в установках для электролиза;

в установках, требующих создания больших вращающих моментов и широкого регулирования скорости, таких, как электрическая тяга; шахтные подъемники; прокатные станы;

в автоматике: измерители скорости вращения; исполнители передаваемых сигналов; преобразователи сигналов;

в качестве автомобильных генераторов и стартеров.

2. Устройство машины постоянного тока

Машина постоянного тока состоит из следующих основных частей:

— станины с выступающими магнитными полюсами, на которые наложена обмотка возбуждения;

— якоря;

— подшипниковых щитов с подшипниками;

— щеткодержателей со щетками.

Станина представляет собой замкнутый стальной магнитопровод, к внутренней части которого прикреплены магнитные полюсы с обмоткой возбуждения, предназначенные для создания магнитного потока. С обоих торцов к станине крепятся подшипниковые щиты; на одном из щитов находятся щеткодержатели со щетками.

Якорь — вращающаяся часть машины — состоит из:

— вала;

— сердечника, набранного из изолированных друг от друга (лаком, бумагой или окалиной) листов электротехнической стали, укрепленного на валу;

— обмотки, уложенной в пазы сердечника, закрытой в пазах деревянными клиньями и укрепленной проволочными бандажами, намотанными поверх якоря;

— коллектора, состоящего из медных пластин (ламелей), изолированных миканитовыми (слюдяными) прокладками. К пластинам коллектора припаяны провода обмотки якоря.

Установленные в щеткодержателях угольно-графитовые щетки прижимаются к коллектору пружинами.

3. Принцип действия машины постоянного тока

При вращении обмотки ее проводники пересекают магнитные линии поля статора, и в них индуктируется э. д. с.

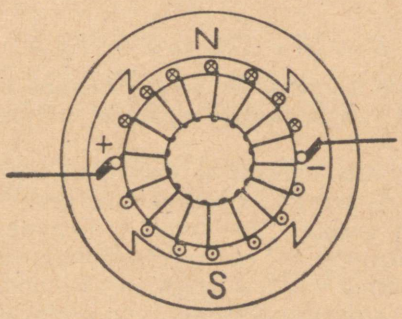


Рис. 28. Простейшая модель машины.

Наложенные на якорь щетки делят его обмотку на две части — параллельные ветви. Несмотря на то, что э. д. с. в каждом проводнике вращающейся обмотки будет переменной, на щетках машины установится постоянное напряжение. Это объясняется тем, что направление э. д. с. в проводниках, образующих параллельную ветвь, сохраняется неизменным.

В рассмотренной модели при прямом контакте щеток с проводниками последние будут быстро изнашиваться. Поэтому практически в машинах соединение щеток с обмоткой якоря осуществляется посредством коллектора. Щетки накладываются на коллектор в местах стыка параллельных ветвей.

Если якорь вращать с помощью первичного двигателя (двигатель внутреннего сгорания, турбина и др.), то машина будет работать в режиме генератора (рис. 29). В обмотке якоря появится э. д. с. E, под действием которой во внешней цепи R и обмотке якоря $R_я$ пойдет постоянный ток I:

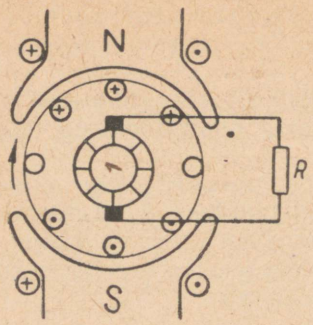


Рис. 29.

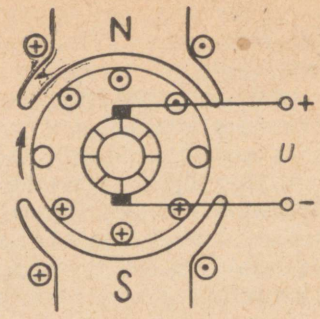


Рис. 30.

$$I = I_я = \frac{E}{R + R_я} \ а,$$

откуда

$$E = IR + IR_я = U + IR_я \ в,$$

т. е. при работе машины в режиме генератора э. д. с. E больше напряжения U на величину падения напряжения в обмотке якоря $IR_я$.

Если подсоединить щетки к постороннему источнику тока, то машина будет работать в режиме электродвигателя (рис. 30). В обмотку якоря пойдет ток $I = I_я$, направление его будет обратно тому, которое было в генераторе. Электромагнитные силы, созданные этим током и магнитным полем, заставят якорь вращаться в прежнем направлении (по правилу левой руки).

Пользуясь правилом правой руки, легко убедиться, что индуктируемая в проводах якоря э. д. с. направлена навстречу току $I_я$ и является встречной, или противо-э. д. с. Тогда, согласно второму закону Кирхгофа:

$$U - E = I_я R_я \quad \text{или} \quad E = U - I_я R_я \ в,$$

а ток

$$I_я = \frac{U - E}{R_я} \ а.$$

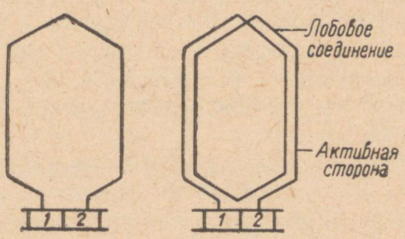
При работе машины электродвигателем э. д. с. E меньше напряжения на зажимах U на величину падения напряжения в обмотке якоря $I_я R_я$.

Для изменения направления вращения электродвигателя достаточно изменить направление тока в обмотке якоря или в обмотке возбуждения. При одновременном изменении направления тока в обеих обмотках направление вращения не изменится.

Таким образом, электрическая машина постоянного тока может работать и генератором и электродвигателем. Это свойство называется о б р а т и м о с т ь ю электрической машины.

4. Понятие об обмотках якоря

Обмотка якоря состоит из секций. Секция — по существу часть обмотки, состоящая из нескольких витков и находящаяся между коллекторными пластинами, следующими одна за другой по схеме обмотки.



Секция из одного витка. Секция из двух витков.

Рис. 31.

Каждая секция имеет две активные стороны, уложенные в пазы якоря и соединенные между собой лобовыми соединениями.

Стороны секции располагают так, чтобы одна из них лежала под северным полюсом, а другая под южным, тогда э. д. с. в проводах секции складываются. Активные стороны секций лежат в пазах в два слоя. Начало каждой секции и конец предыдущей припаиваются к одной коллекторной пластине, за счет чего образуется замкнутая обмотка.

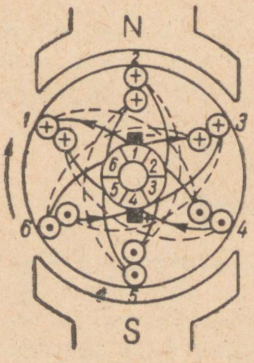


Рис. 32. Схема обмотки якоря.

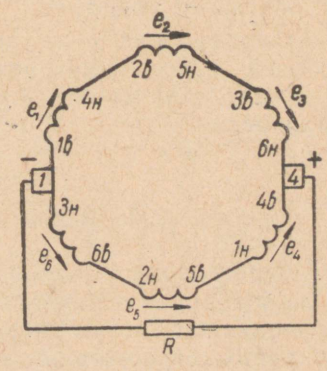


Рис. 33. Упрощенное изображение обмотки якоря.

На схеме (рис. 32) активные стороны секций изображены кружками, а лобовые части — сплошными линиями (на переднем торце якоря) и пунктиром (на заднем торце якоря).

Если начать обход обмотки якоря с коллекторной пластины № 1, то после полного обхода обмотка замыкается на себя на той же пластине.

При вращении якоря в активных сторонах секций индуктируется э. д. с., которая в одной части проводов имеет одно направление, а в другой части — обратное. Это указывает на наличие двух параллельных ветвей обмотки:

На схеме (рис. 33) цифры обозначают номер паза, а буквы рядом — слой (верхний — *в*, нижний — *н*).

Щетки ставятся на коллекторные пластины в местах стыка параллельных ветвей.

При подключенной внешней цепи ток пойдет в ней от щетки + к щетке —. В каждой ветви обмотки якоря будет проходить ток, равный половине тока внешней цепи.

При вращении якоря каждая щетка периодически соприкасается то с одной, то с двумя коллекторными пластинами. В последнем случае каждая щетка замыкает накоротко одну из секций обмотки якоря, которая выключается из параллельной ветви и не принимает участия в создании э. д. с машины.

Таким образом, при вращении машины ее напряжение непрерывно колеблется в некоторых пределах:

$$U_{\text{макс}} \geqslant U \geqslant U_{\text{мин}}.$$

Чем больше секций включено в параллельную ветвь, тем меньше величина пульсации напряжения U.

Геометрической нейтралью машины называется плоскость, проходящая через ось вала и делящая расстояние между полюсами пополам.

Электродвижущая сила, индуктируемая в секции обмотки, проходящей через геометрическую нейтраль, равна нулю или очень мала. В этот момент и происходит замыкание секции щеткой накоротко.

5. Э. д. с. обмотки якоря

Для определения э. д. с. машины достаточно найти значение э. д. с. любой параллельной ветви. Э. д. с., индуктируемая в одном проводнике обмотки якоря, численно равна количеству магнитных линий, пересеченных этим проводником в течение 1 *сек*.

$$E_{\text{пр}} = 2p\Phi\frac{n}{60}\ в,$$

где p — число пар полюсов машины;
Φ — магнитный поток одного полюса, *вб*;
n — скорость вращения якоря, *об/мин*.

Если обозначить:

число проводов якоря N,

число параллельных ветвей $2a$,

то э. д. с машины

$$E = E_{пр}\frac{N}{2a} = 2p\Phi\frac{n}{60}\cdot\frac{N}{2a},$$

или

$$E = \frac{pN}{60a}\Phi n \ в.$$

Обозначим постоянную для данной машины величину $\frac{pN}{60a}$ через C_E.

Тогда

$$E = C_E\Phi n \ в,$$

т. е. э. д. с. машины зависит от магнитного потока (или от тока возбуждения $I_в$ в обмотках полюсов) и от скорости вращения якоря.

6. Реакция якоря

При работе электрической машины под нагрузкой в ней создаются два магнитных поля:

а) поле полюсов;

б) поле якоря.

Эти два поля складываются, образуя результирующее магнитное поле.

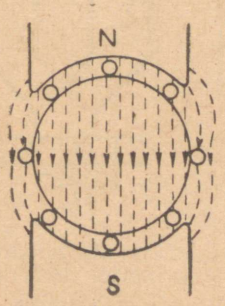


Рис. 34. Магнитное поле полюсов.

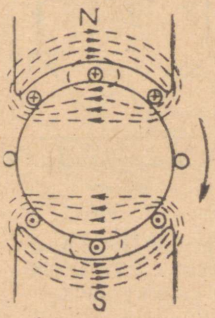


Рис. 35. Магнитное поле якоря.

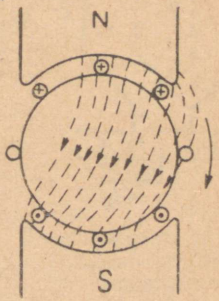


Рис. 36. Результирующее магнитное поле.

Воздействие магнитного поля якоря на поле полюсов называется реакцией якоря.

Если машина работает генератором, то магнитные линии смещаются по направлению движения якоря. Поэтому нейтраль машины смещается в ту же сторону и в данном случае именуется физической нейтралью.

Если машина работает электродвигателем, магнитное поле смещается против направления вращения якоря.

Реакция якоря вызывает искрение под щетками, так как щетки оказываются не на нейтральной линии. Кроме того, машина несколько размагничивается вследствие насыщения сердечников полюсов.

Положение щеток на коллекторе определяется нагрузкой машины. Чем больше нагрузка, тем на больший угол от геометрической нейтрали нужно сдвигать щетки. Практически положение щеток на коллекторе определяют по наименьшему искрению.

7. Коммутация тока

При вращении якоря каждая секция обмотки переключается коллектором из одной параллельной ветви в другую, оставаясь некоторое время замкнутой накоротко.

Коммутацией принято называть процесс переключения секции из одной параллельной ветви в другую и все явления, возникающие при этом в короткозамкнутых секциях.

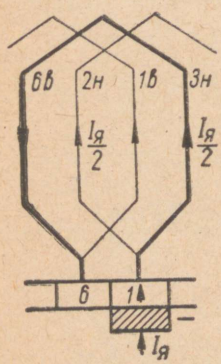


Рис. 37. Положение секции до начала коммутации.

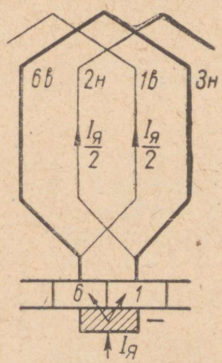


Рис. 38. Положение секции в середине коммутации.

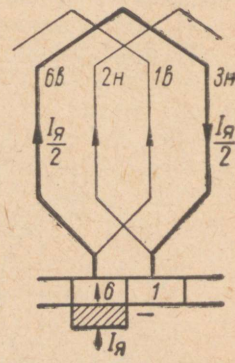


Рис. 39. Положение секции после коммутации.

1) При положении секции до начала коммутации ток $I_я$ переходит из щетки в коллекторную пластину 1, а затем разделяется на два равные тока $I = 0{,}5\,I_я$, идущие в обе параллельные ветви обмотки. В рассматриваемой секции ток идет от провода 3*н* к проводу 6*в*.

2) При положении секции в середине коммутации, когда щетка находится на двух коллекторных пластинах, так что изоляционная прослойка между ними приходится посередине щетки, ток в короткозамкнутой секции равен нулю.

3) При положении секции после коммутации ток в ней изменит свое направление на противоположное.

Таким образом, за время коммутации ток в короткозамкнутой секции изменяется от $+0{,}5\,I_я$ до нуля и затем до $-0{,}5\,I_я$. Вследствие быстрого изменения тока в этой секции возникает э. д. с. самоиндукции, которая препятствует изменению тока и вызывает искру в момент схода щетки с пластины коллектора.

Работа машины допустима, если при номинальном режиме работы искрение не превышает следующих степеней:

степень 1 — отсутствие искр (темная коммутация);

степень $1^1/_4$ — слабое точечное искрение под небольшой частью щетки;

степень $1^1/_2$ — слабое искрение под большой частью щетки. При этом появляются следы почернения на коллекторе, легко устраняемые протиранием тряпкой, смоченной в бензине, а также следы нагара на щетках.

В современных машинах для улучшения коммутации часто применяют дополнительные полюсы. Их делают меньшего сечения и помещают между главными полюсами. Обмотки дополнительных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря, и через них проходит весь ток нагрузки.

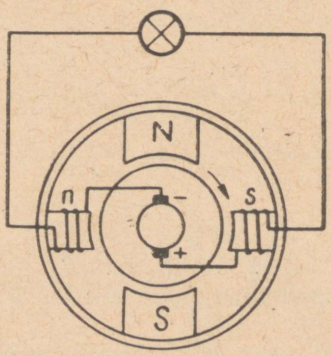


Рис. 40. Схема включения дополнительных полюсов.

Дополнительные полюсы располагаются на геометрической нейтрали и создают в короткозамкнутой секции дополнительную э. д. с соответственного направления для компенсации э. д. с. самоиндукции. Полярность дополнительных полюсов должна быть такая, чтобы их магнитный поток действовал навстречу магнитному полю якоря.

TRÜ Raamatukogu

Порядок чередования полярности главных и дополнительных полюсов по направлению вращения якоря машины:

у генератора: N — s — S — n;

у двигателя: N — n — S — s.

8. Момент на валу машины

На каждый провод якоря, независимо от того, работает ли машина генератором или электродвигателем, действует электромагнитная сила

$$F_{пр} = B_{ср} Il = \frac{\Phi 2p}{\pi dl} Il \ н,$$

где $B_{ср}$ — среднее значение магнитной индукции, *тл*;

d и l — диаметр и длина якоря, *м*;

$\Phi \cdot 2p$ — полный магнитный поток многополюсной машины, *вб*.

Величина тока в одном проводе

$$I = \frac{I_я}{2a} \ a,$$

где $2a$ — число параллельных ветвей обмотки якоря.

Полная сила, действующая на N проводов якоря по касательной к окружности якоря

$$F = F_{пр} \cdot N = \frac{\Phi \cdot 2p}{\pi d} \cdot \frac{I_я}{2a} \cdot N = \frac{p}{\pi da} \cdot N \Phi I_я \ н.$$

Момент машины

$$M = F \cdot \frac{d}{2} = \frac{p}{2\pi a} N \Phi I_я \ н \cdot м.$$

Обозначим постоянную для каждой машины величину $\frac{p}{2\pi a} N$ через $C_м$:

$$M = C_м \Phi I_я \ н \cdot м.$$

Момент пропорционален току якоря и магнитному потоку машины.

Если машина работает генератором, момент будет тормозным, если электродвигателем — вращающим.

9. Типы генераторов постоянного тока

В зависимости от способа создания магнитного поля генераторы разделяются на:

генераторы с независимым возбуждением, где питание обмотки возбуждения производится от постороннего источника тока;

генераторы с самовозбуждением, где питание обмотки возбуждения осуществляется от самого генератора.

Генераторы с самовозбуждением по способу соединения обмоток возбуждения делятся на:

а) генераторы с параллельным возбуждением, или шунтовые;

б) генераторы с последовательным возбуждением, или сериесные;

в) генераторы со смешанным возбуждением, или компаундные.

Эксплуатационные свойства электрических машин характеризуются кривыми (графиками), или характеристиками. Они представляют зависимость между двумя величинами, характеризующими работу машины, при всех остальных величинах, сохраняющих постоянные значения.

Номинальными значениями называются обозначенные на щитке машины или в ее паспорте величины, при которых обеспечена нормальная эксплуатация машины:

1) мощность ($P_н$);
2) напряжение ($U_н$);
3) ток ($I_н$);
4) скорость вращения ($n_н$) и т. д.

10. Генератор с независимым возбуждением

К обмотке возбуждения подводится ток возбуждения $I_в$ от независимого источника энергии.

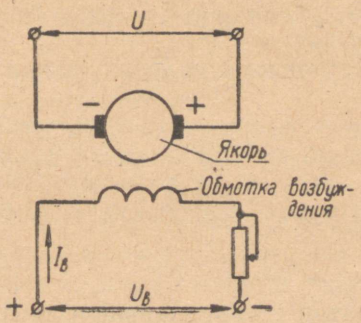


Рис. 41.

Характеристика холостого хода (рис. 42) — зависимость э. д. с. якоря E от тока возбуждения $I_я$ при постоянной скорости вращения генератора n и разомкнутой внешней цепи, т. е.

$$E = f(I_в)$$

при $n = \text{const}$ и $I = 0$.

Отрезок Oa называется остаточной э. д. с. $E_{ост}$, которая возбуждается за счет остаточного магнетизма.

Точка, соответствующая номинальному напряжению $U_н$, обычно лежит на колене кривой — при токе $I_{вх}$, называемом током возбуждения при холостом ходе и номинальном напряжении.

Внешняя характеристика генератора (рис. 43) — зависимость напряжения U генератора от тока нагрузки при неизменных скорости вращения и токе возбуждения:

$$U = f(I)$$

при $n = \text{const}$; $I_в = \text{const}$.

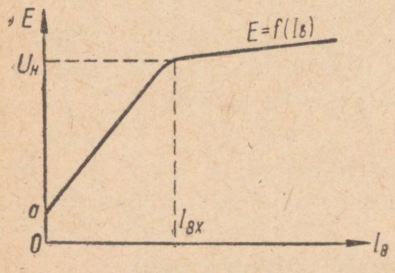


Рис. 42. Характеристика холостого хода.

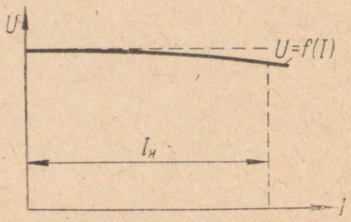


Рис. 43. Внешняя характеристика генератора.

Уменьшение напряжения на зажимах генератора с увеличением нагрузки вызывается:

увеличением внутреннего падения напряжения в обмотке якоря;

усилением реакции якоря, вследствие чего уменьшаются магнитный поток и индуктируемая в якоре э. д. с.

При изменении нагрузки от холостого хода до номинальной напряжение генератора с независимым возбуждением изменяется на 5—10%.

11. Генератор с параллельным возбуждением

Здесь цепь возбуждения подключена к зажимам якоря генератора. При номинальном напряжении ток возбуждения в ней составляет 2—3% номинального тока якоря.

Самовозбуждение генераторов основано на явлении остаточного магнетизма. При вращении якоря в поле остаточного магнетизма в его обмотке индуктируется небольшая э. д. с., которая в обмотке возбуждения создает слабый ток, усиливающий маг-

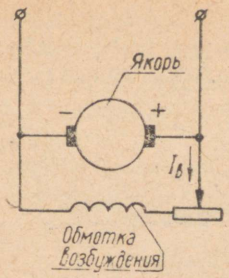


Рис. 44.

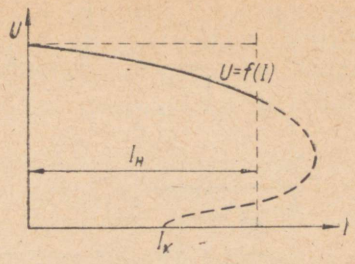


Рис. 45. Внешняя характеристика генератора.

нитное поле, что, в свою очередь, увеличивает индуктируемую в якоре э. д. с., снова усиливает ток в обмотке возбуждения и т. д., пока магнитный поток полюсов не будет доведен до насыщения. При этом э. д. с. достигает величины, соответствующей данным оборотам генератора.

Условия самовозбуждения:

магнитный поток, создаваемый током возбуждения, должен совпадать по направлению с потоком остаточного магнетизма;

внешняя цепь должна быть разомкнута, так как при малом сопротивлении внешней цепи ток в обмотку возбуждения практически не пойдет.

Внешняя характеристика генератора ($U = f(I)$ при $n = \text{const}$; $I_в = \text{const}$) идет круче, чем генератора с независимым возбуждением, поскольку в данном случае уменьшение напряжения при увеличении нагрузки вызывается:

а) увеличением падения напряжения в обмотке якоря;

б) уменьшением э. д. с. за счет усиления реакции якоря;

в) уменьшением тока возбуждения вследствие уменьшения напряжения на зажимах генератора.

При изменении нагрузки от нуля до номинальной напряжение генератора с параллельным возбуждением уменьшается до 30%.

Примечание. Генератор с параллельным возбуждением не боится кратковременных коротких замыканий, т. к. при этом ток в обмотку возбуждения практически не идет и э. д. с. в якоре индуктируется лишь за счет остаточного магнетизма.

12. Генератор со смешанным возбуждением

В генераторе со смешанным возбуждением на одних и тех же полюсных сердечниках находятся две обмотки возбуждения:

параллельная, или шунтовая (ШО);
последовательная, или сериесная (СО).

Параллельная обмотка ШО служит для создания основного магнитного поля машины, а последовательная СО — для поддержания постоянного напряжения генератора при изменении нагрузки.

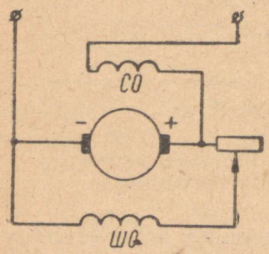


Рис. 46. Генератор со смешанным возбуждением.

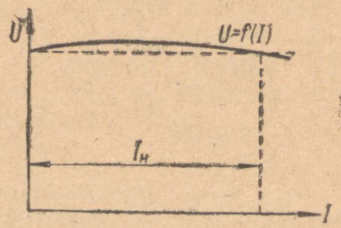


Рис. 47. Внешняя характеристика генератора.

При увеличении нагрузки возрастает ток в последовательной обмотке, в результате чего усиливается магнитное поле генератора и, следовательно, компенсируется уменьшение напряжения, вызванное увеличением тока якоря.

Напряжение на зажимах генератора при изменении нагрузки от нуля до номинальной остается почти неизменным.

Рассмотренный способ соединения обмоток, когда их магнитные потоки складываются, называется согласным, или компаундным.

Если генератор работает в условиях частых перегрузок или коротких замыканий (например, сварочная машина), применяется встречное, или противокомпаундное, соедине-

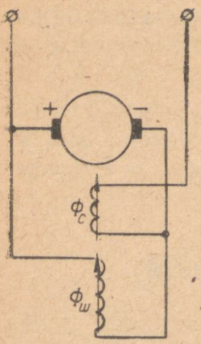


Рис. 48. Согласное включение обмоток.

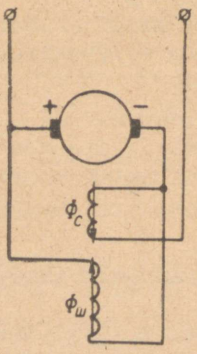


Рис. 49. Встречное включение обмоток.

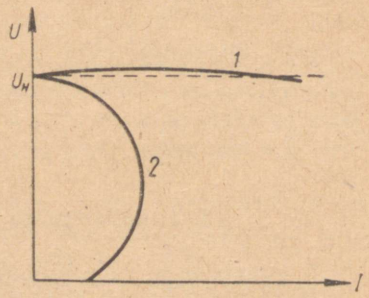


Рис. 50. Внешние характеристики:
1 — при согласном включении;
2 — при встречном включении.

ние, при котором магнитный поток последовательной обмотки ослабляет поток, создаваемый параллельной обмоткой. В этих случаях последовательная обмотка почти размагничивает машину и понижает ток до значения безопасного для целости генератора.

Генератор со встречным соединением обмоток возбуждения имеет круто падающую внешнюю характеристику.

13. Электродвигатели постоянного тока

По способу возбуждения двигатели постоянного тока делятся на:

двигатели с независимым возбуждением;
двигатели с параллельным возбуждением (шунтовые);
двигатели с последовательным возбуждением (сериесные);
двигатели со смешанным возбуждением (компаундные).

При пуске электродвигателя последовательно с обмоткой якоря включают пусковой реостат.

В момент пуска противо-э.д.с. в обмотке якоря равна нулю, и при отсутствии пускового реостата ток якоря был бы равен

$$I_{\text{п}} = \frac{U}{R_{\text{я}}} \ a.$$

Этот ток в 10—25 раз больше номинального тока электродвигателя, т. к. $R_{\text{я}}$ очень мало́, порядка десятых долей ома.

При включении реостата

$$I_{\text{п}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{р}}} \ a,$$

где $R_{\text{р}}$ — сопротивление пускового реостата, которое подбирается так, чтобы $I_{\text{п}} = (1{,}5 \div 2) I_{\text{н}}$.

Когда якорь приходит во вращение, то в его обмотке постепенно нарастает противо-э.д.с. Ток в этом случае

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}} + R_{\text{р}}} \ a.$$

К концу пуска реостат выключают, и ток якоря

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}} \ a.$$

Скорость вращения электродвигателя можно определить из уравнения его противо-э.д.с.:

$$E = C_{\text{Е}} \Phi n \ в,$$

откуда

$$n = \frac{1}{C_{\text{Е}}} \cdot \frac{E}{\Phi} \ об/мин.$$

Подставив $E = U - I_я R_я$ *в*,
получим

$$n = \frac{1}{C_E} \cdot \frac{U - I_я R_я}{\Phi} \text{ об/мин.}$$

т. е. скорость вращения двигателя прямо пропорциональна напряжению, приложенному к зажимам якоря, и обратно пропорциональна основному магнитному потоку машины.

Следовательно, число оборотов электродвигателя можно регулировать двумя способами:

а) изменением напряжения, приложенного к зажимам якоря;

б) изменением основного магнитного потока, т. е. изменением тока возбуждения двигателя.

Вращающий момент электродвигателя равен

$$M = C_м I_я \Phi \text{ н} \cdot \text{м}.$$

При увеличении нагрузки (т. е. тормозного момента) на валу число обротов двигателя уменьшается. Это вызывает уменьшение противо-э.д.с. в обмотке якоря и, значит, увеличение тока якоря $I_я$. С возрастанием $I_я$ увеличивается и вращающий момент двигателя.

При уменьшении нагрузки на валу двигателя обороты увеличиваются, возрастает противо-э.д.с. и уменьшаются ток якоря и вращающий момент машины.

Таким образом, противо-э.д.с. является регулятором работы двигателя. При каждой нагрузке двигателя устанавливается соответствующая ей скорость вращения.

14. Электродвигатель с параллельным возбуждением

Перед включением электродвигателя (рис. 51) ручка пускового реостата должна стоять на холостом контакте; шунтовой реостат должен быть выведен.

После замыкания рубильника пусковой реостат плавно выводят. Обороты регулируют шунтовым реостатом.

Схема соединения двигателя должна полностью исключать возможность размыкания цепи обмотки возбуждения. Если этого не предусмотреть, то при разрыве цепи:

в момент, когда двигатель находится под нагрузкой, противо-э.д.с. станет равной нулю, и (при отсутствии предохранителей) якорь сгорит;

в момент, когда двигатель работает вхолостую, число оборотов значительно возрастет (двигатель пойдет «вразнос»).

Для отключения электродвигателя сначала переводят ручку пускового реостата на холостой контакт, а затем размыкают рубильник.

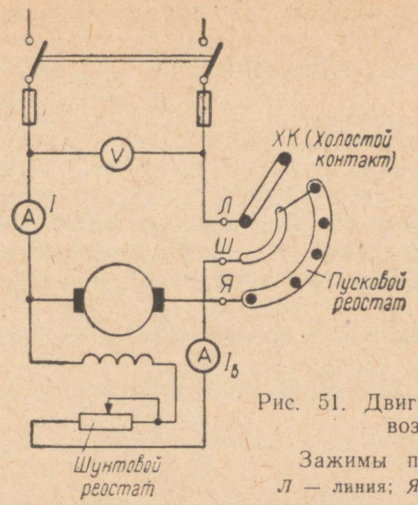


Рис. 51. Двигатель с параллельным возбуждением.

Зажимы пускового реостата:
Л — линия; *Я* — якорь; *Ш* — шунт.

Характеристики электродвигателей представляют главным образом графики изменения механических свойств машин.

Рабочие характеристики представляют собой зависимость:

а) скорости вращения n,

б) вращающего момента M,

в) величины тока I,

г) коэффициента полезного действия η от мощности на валу двигателя P_2:

$$n, M, I, \eta = f(P_2)$$

при $U = \text{const}$ и $I_в = \text{const}$

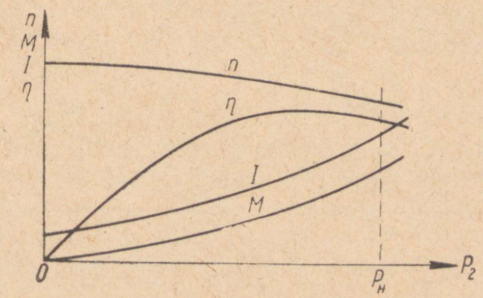


Рис. 52. Рабочие характеристики двигателя с параллельным возбуждением.

Обороты двигателя n с увеличением нагрузки изменяются незначительно. Уменьшение оборотов происходит вследствие увеличения падения напряжения в обмотке якоря $I_я R_я$.

Ток двигателя и вращающий момент M с увеличением нагрузки возрастают почти прямо пропорционально нагрузке. Так как обороты двигателя при увеличении нагрузки несколько снижаются, то кривая момента $\left(M = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2}{2\pi n}\right)$ слегка загибается вверх.

Коэффициент полезного действия η с увеличением нагрузки возрастает и достигает своего максимального значения примерно при половине номинальной мощности, затем остается почти постоянным, но при перегрузке двигателя уменьшается.

15. Электродвигатель с последовательным возбуждением

Ток, потребляемый электродвигателем при работе, равен:

$$I = I_я = I_в = \frac{U - E}{R_я + R_в} \ a.$$

При малых токах (25 ... 50% $I_н$) магнитный поток машины пропорционален току

$$\Phi \equiv I_я,$$

но так как вращающий момент двигателя $M = C_м \Phi I_я$, можно считать, что M пропорционален квадрату тока в якоре:

$$M \equiv I_я^2.$$

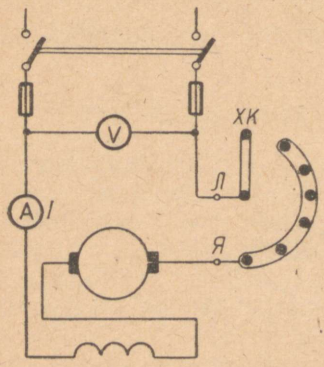


Рис. 53.

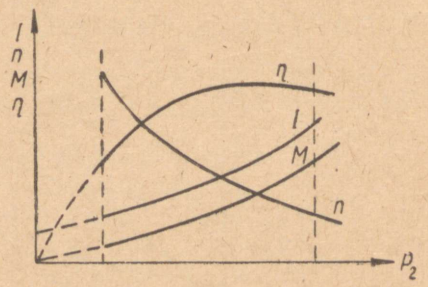


Рис. 54. Рабочие характеристики двигателя с последовательным возбуждением.

Это обеспечивает хорошие тяговые свойства двигателя, способность выдерживать большие перегрузки. Поэтому двигатели с последовательным возбуждением применяют на электротранспорте, в электроподъемниках, в качестве автомобильных стартеров и т. п.

Скорость электродвигателя

$$n = \frac{1}{C_E} \frac{U - I(R_я + R_в)}{\Phi} \text{ об/мин.},$$

откуда следует, что с увеличением нагрузки скорость вращения электродвигателя резко уменьшается, поскольку увеличивается Φ и падение напряжения $I(R_я + R_в)$.

При уменьшении нагрузки обороты двигателя значительно возрастают вследствие уменьшения магнитного потока. Поэтому при нагрузке меньше 25% номинальной двигатель пускать в ход нельзя, т. к. он пойдет «вразнос».

16. Потери и коэффициент полезного действия

Работа электрической машины сопровождается потерями мощности:

— потери в стали $P_{ст}$, возникающие при перемагничивании тела якоря и магнитных полюсов, — от гистерезиса и вихревых токов. Мощность потерь зависит от частоты перемагничивания и максимального значения магнитной индукции;

— потери механические $P_{мех}$, возникающие от трения: в подшипниках, вращающихся частей о воздух, щеток о коллектор.

Мощность потерь пропорциональна скорости вращения машины.

Потери $P_{ст} + P_{мех}$ постоянны при постоянной скорости вращения, неизменном токе возбуждения и не зависят от нагрузки машины;

— потери электрические $P_э$, возникающие при прохождении тока по обмотке якоря и переходному контакту между щетками и коллектором, а также во всех обмотках возбуждения и дополнительных полюсов:

$$P_э = I_я^2 R_я + P_щ + I_я^2 R_{дп} + I_в^2 R_в.$$

Потери в щеточном контакте $P_щ = 2\Delta U_щ I_я$ определяют по падению напряжения $\Delta U_щ$, которое принимают:

а) для угольных и графитовых щеток 2 *в*;

б) для металло-угольных щеток 0,6 *в*;

$P_э$ зависят от нагрузки машины;

— потери добавочные $P_{доб}$ в обмотке и стали якоря, вызываемые искажением магнитного потока реакцией якоря и полями, возникающими вокруг секций, в которых происходит коммутация. Эти потери оцениваются от 0,01 . . . 0,005 $U_н I_н$ и считаются пропорциональными $I_я^2$.

Коэффициентом полезного действия машины называется отношение полезной мощности P_2, отдаваемой ма-

шиной, к подводимой мощности P_1

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Для генератора

$$\eta_г = \frac{UI}{UI + (P_{ст} + P_{мех} + P_э + P_{доб})} \cdot 100\%.$$

Для электродвигателя

$$\eta_{дв} = \frac{UI - (P_{ст} + P_{мех} + P_э + P_{доб})}{UI} \cdot 100\%.$$

К. п. д. машин постоянного тока мощностью до 100 *квт* равен 75...92%, причем машины большей мощности имеют более высокий к. п. д.

17. Технические данные машин постоянного тока

В ремонтных мастерских и в электроустановках встречаются машины постоянного тока серии ПН. Выполняют их как двигатели и как генераторы.

Генераторы серии ПН изготовляют на напряжения: 115, 230 и 460 *в*.

Для зарядки аккумуляторных батарей и других целей имеются генераторы с регулированием напряжения изменением тока возбуждения в пределах от 115 до 160 *в* или от 230 до 320 *в*.

Генераторы имеют шкалу мощностей от 0,37 до 130 *квт* при скоростях вращения от 1420 до 2860 *об/мин*.

В последнее время серия машин ПН заменена новой серией П мощностью от 0,3 до 200 *квт*. Эта серия включает в себя:

электродвигатели на напряжения 110 и 220 *в* при скоростях вращения 3000, 1500, 1000, 750 и 600 *об/мин*;

генераторы на напряжения 115 и 230 *в* при скоростях вращения 2850 и 1450 *об/мин*.

Электродвигатели серии П предназначены для использования в электрических приводах, требующих широкого и плавного регулирования скорости вращения, а генераторы — для питания цепей постоянного тока.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ТЕМЕ III

1. Что называется электрической машиной?
2. Где применяются машины постоянного тока?
3. Опишите устройство машины постоянного тока.
4. Объясните принцип действия генератора постоянного тока.
5. Объясните принцип действия двигателя постоянного тока.

6. В чем заключается обратимость машины постоянного тока?

7. Что такое секция и геометрическая нейтраль? Какие секции при вращении якоря замыкаются щетками накоротко и где они должны находиться в этот момент?

8. От каких величин зависит э. д. с. обмотки якоря машины постоянного тока?

9. Четырехполюсная машина постоянного тока имеет на якоре обмотку, состоящую из 200 проводников, образующих две параллельные ветви. Машина развивает э. д. с. 230 *в* при числе оборотов якоря в минуту 1450. Определите магнитный поток машины (Ответ: 0,0238 *вб*).

10. Что называется реакцией якоря машины постоянного тока и каковы ее вредные последствия для генератора и двигателя?

11. Что называется коммутацией?

12. Что происходит в короткозамкнутой секции за период коммутации?

13. Для чего предназначены дополнительные полюсы, как они расположены и как включены их обмотки?

14. От каких величин зависит вращающий (тормозной) момент машины постоянного тока?

15. Как разделяются генераторы постоянного тока по способу возбуждения?

16. Какой вид имеет характеристика холостого хода генератора с независимым возбуждением?

17. Какой вид имеет внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением?

18. Чем вызывается уменьшение напряжения на зажимах генератора с независимым возбуждением при увеличении нагрузки? Какова величина этого уменьшения?

19. Начертите схему генератора с параллельным возбуждением.

20. В чем заключается принцип самовозбуждения машины постоянного тока? Какие условия необходимы для этого?

21. Какой вид имеет внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением?

22. Чем вызывается уменьшение напряжения на зажимах генератора с параллельным возбуждением при увеличении нагрузки? Какова величина этого уменьшения?

23. Начертите схему генератора со смешанным возбуждением.

24. Какой вид имеет внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждением при:

а) согласном включении обмоток;

б) встречном включении обмоток?

25. Объясните назначение пускового реостата электродвигателя постоянного тока.

26. Какой ток будет потреблять двигатель при пуске без пускового реостата, если напряжение сети 110 *в*, а сопротивление цепи якоря 0,25 *ома*? (Ответ: 440 *а*).

27. Какое сопротивление реостата надо включить в цепь двигателя, чтобы ограничить пусковой ток до двойного номинального? Номинальный ток дви-

гателя 40 *а*, сопротивление обмотки якоря 0,4 *ом*. Напряжение сети 220 *в*. (Ответ: 2,35 *ома*).

28. Как можно регулировать скорость вращения электродвигателя постоянного тока?

29. Почему при увеличении нагрузки на валу электродвигателя увеличивается потребляемый им ток?

30. Почему нельзя размыкать цепь возбуждения двигателей с параллельным возбуждением?

31. Начертите рабочие характеристики двигателя с параллельным возбуждением.

32. Двигатель с параллельным возбуждением присоединен к сети напряжением 220 *в*. Сопротивление цепи якоря 0,2 *ома*, ток в цепи якоря 50 *а*. Определите противо-э. д. с., индуктируемую в обмотке якоря. (Ответ: $E = 210$ *в*).

33. Почему двигатели с последовательным возбуждением находят применение в тяговых установках?

34. Начертите рабочие характеристики двигателя с последовательным возбуждением.

35 Почему двигатель с последовательным возбуждением нельзя пускать в ход при нагрузке меньше 25% номинальной?

36. Какие потери мощности имеют место в машине постоянного тока?

37. По какой формуле можно вычислить к. п. д. генератора и электродвигателя?

38. Номинальная мощность двигателя 20 *квт*. Суммарные потери мощности в двигателе составляют при номинальной нагрузке 2,5 *квт*. Определите к. п. д. двигателя при номинальной нагрузке. (Ответ: $\eta_{дв} = 0{,}89$, или 89%).

ТЕМА IV

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Общие сведения и определения

Электрический ток, периодически изменяющийся по величине и направлению, называется переменным током.

Преимущества переменного тока:

— возможность трансформирования, т. е. получать переменный ток различного напряжения;

— возможность его выпрямления, т. е. преобразования в постоянный.

Ток, изменяющийся по закону синуса, является синусоидальным переменным током.

Синусоидальный переменный ток характеризуют следующие величины:

а) период;

б) частота;

в) мгновенное значение;

г) амплитуда;

д) действующее значение.

Периодом переменного тока (э. д. с., напряжения) принято считать промежуток времени, в течение которого ток совершает полный цикл своего изменения. Период обозначают буквой T и измеряют в секундах.

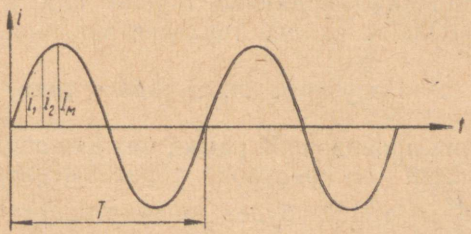


Рис. 55. Кривая изменения синусоидального переменного тока.

Частота переменного тока — число периодов в секунду. Частота обозначается буквой f и измеряется в герцах (*гц*). Один герц равен одному периоду в секунду.

1 килогерц (*кгц*) $= 10^3$ *гц*;
1 мегагерц (*Мгц*) $= 10^6$ *гц*.

Частота и период представляют обратные величины:

$$f = \frac{1}{T} \text{ гц} \quad \text{и} \quad T = \frac{1}{f} \text{ сек.}$$

Стандартной промышленной частотой является частота 50 *гц*.

Мгновенным значением переменного тока (напряжения или э. д. с.) принято считать его значение в какой-либо момент времени. Мгновенные значения обозначают малыми буквами (i, u, e). Мгновенные значения непрерывно изменяются по величине.

Амплитудой переменного тока называют наибольшее мгновенное значение тока за период. Амплитуды тока, напряжения и э. д. с. обозначаются соответственно $I_м$, $U_м$, $E_м$.

Действующим (эффективным) значением переменного тока является величина, равная величине постоянного тока, выделяющего в проводнике такое же количество тепла, какое выделяет данный переменный ток за одно и то же время. Действующие значения обозначаются буквами I, U, E.

Действующее значение переменного тока меньше максимального (амплитудного) в 1,41 раза, т. е. в $\sqrt{2}$ раз:

$$I = \frac{I_м}{\sqrt{2}} = 0{,}707 I_м$$

аналогично:

$$U = \frac{U_м}{\sqrt{2}} = 0{,}707 U_м.$$

Электроизмерительные приборы, включенные в цепь переменного тока, измеряют обычно действующее значение. Когда говорят о величинах переменного тока или напряжения, то всегда подразумевают их действующее значение.

2. Получение переменного тока

При вращении проволочной рамки между неподвижными магнитными полюсами (см. рисунок) с равномерной угловой скоростью $\omega = \frac{\alpha}{t}$ в ней будет индуктироваться переменная э. д. с.:

$$e = E_м \sin \alpha \ в,$$

где $E_м$ — амплитудное значение э. д. с. в рамке;

α — угол между направлением магнитного потока и направлением движения активных проводников рамки (угол поворота рамки).

При $\alpha = 0$ рамка не пересекает магнитных линий, т. к. ее активные проводники движутся вдоль линий, и $e = E_м \sin 0° = 0$.

При $\alpha = 90°$ рамка пересекает наибольшее количество магнитных линий, т. к. ее активные проводники движутся перпендикулярно магнитным линиям, и $e = E_м \sin 90° = E_м$.

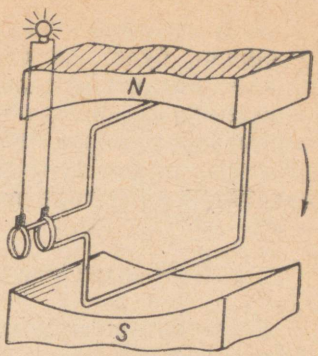


Рис. 56.

Заменив $\alpha = \omega t$,

получим

$$e = E_м \sin \omega t \quad в.$$

Если вместо одной рамки на роторе укреплена катушка, имеющая w витков, то э. д. с. будет в w раз больше, однако закон ее изменения останется тем же.

При вращении рамки за один оборот ($\alpha = 2\pi$) э. д. с. проходит полный цикл изменений, соответствующий одному периоду ($t = T$). Поэтому угловая скорость вращения рамки

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad 1/сек.$$

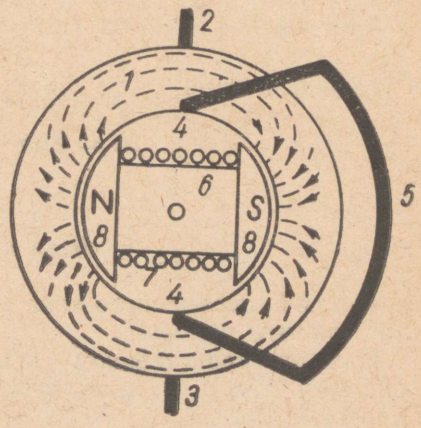


Рис. 57. Двухполюсный генератор переменного тока с неподвижной проволочной рамкой, расположенной на статоре:

1 — статор; *2, 3* — начало и конец рамки; *4* — активные стороны рамки; *5* — лобовая часть рамки; *6* — ротор; *7* — обмотка возбуждения; *8* — полюсные наконечники.

Для получения индуктированной э. д. с. в генераторах безразлично, будет ли движущийся проводник пересекать неподвижное магнитное поле или движущееся поле будет пересекать неподвижный проводник. Поэтому, чтобы поставить обмотку переменного тока в более благоприятные условия, ее чаще располагают на статоре (неподвижной части), полюсы же магнитов находятся на роторе (вращающейся части).

3. Многополюсные генераторы переменного тока

У генераторов с p парами полюсов за один оборот рамки ее активные проводники пройдут p раз под северным и p раз под южным полюсом. Поэтому один оборот рамки будет соответствовать p полным изменениям э. д. с. При повороте же рамки на угол α э. д. с. в ней изменится на $p\alpha$ электрических градусов, и ее мгновенное значение будет выражаться формулой

$$e = E_м \sin p\alpha.$$

Величина $p\alpha$ называется электрическим углом.

Отношение электрического угла ко времени именуется электрической угловой скоростью, или угловой частотой:

$$\omega = \frac{p\alpha}{t} \quad 1/сек.$$

При $t = T$ — $p\alpha = 2\pi$ *рад* и угловая частота

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad 1/сек.$$

Если скорость вращения ротора — n *об/мин*, то число циклов э. д. с. в секунду будет равно:

$$f = p\frac{n}{60} \quad гц$$

и угловая частота

$$\omega = 2\pi p\frac{n}{60} \quad 1/сек.$$

4. Фаза и сдвиг фаз

Фазой переменного тока называют его состояние в отдельные моменты времени.

При пространственном сдвиге вращающихся витков *1* и *2* (рис. 58) э. д. с. в них достигают амплитудных значений не одновременно.

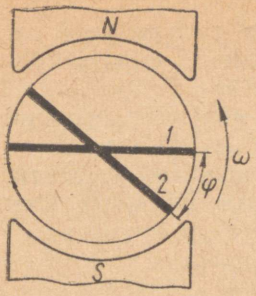


Рис. 58.

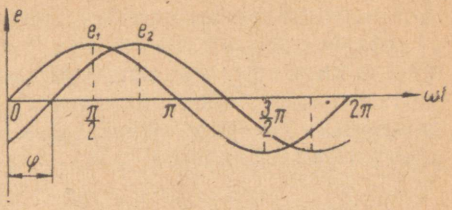


Рис. 59. Кривые изменения e_1 и e_2.

Мгновенные значения э. д. с. в витках равны:

$$e_1 = E_м \sin \omega t \quad в;$$
$$e_2 = E_м \sin (\omega t - \varphi) \quad в.$$

Сдвигом по фазе называют несовпадение начальных моментов периодов двух синусоидальных величин одинаковой частоты.

Угол φ, на который одна синусоидальная величина смещена относительно другой, именуется углом сдвига фаз.

В приведенном случае e_1 опережает e_2 по фазе или e_2 отстает по фазе от e_1 на угол φ. Если угол $\varphi = 0$, то e_1 и e_2 совпадают по фазе, т. е. изменяются одновременно, проходя нулевые и амплитудные значения (одного направления) в одни и те же моменты времени.

5. Графическое изображение синусоидальных величин

В любой момент времени, когда вращающийся против часовой стрелки радиус-вектор э. д. с. $E_м$ образует с горизонталью угол ωt, его проекция на вертикаль изображает мгновенное значение э. д. с.:

$$e = E_м \sin \omega t.$$

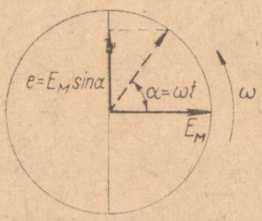


Рис. 60. Вращающийся вектор $E_м$.

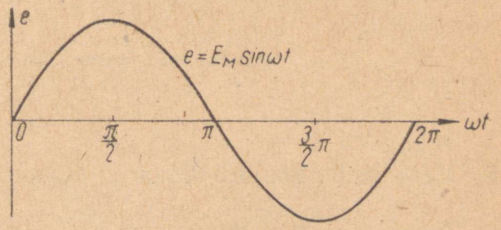


Рис. 61. График e.

Поэтому ось x графика представляет собой развернутую окружность, в различных точках которой отложены соответствующие вертикальные проекции радиус-вектора.

Таким образом, синусоидальные величины можно графически изображать синусоидами, или вращающимися векторами.

Несколько синусоидальных величин одинаковой частоты, едвинутых по фазе, изображают в виде векторной диаграммы следующим образом:

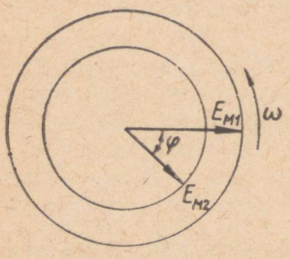


Рис. 62. Векторная диаграмма.

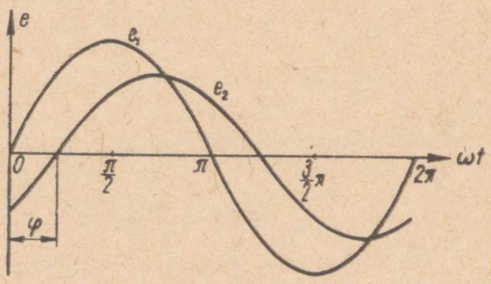


Рис. 63. Графики e_1 и e_2.

При вращении векторов взаимное расположение их остается неизменным, и угол φ определяет сдвиг фаз между e_1 и e_2.

Примечания.

1. На практике применяют векторные диаграммы, где вместо векторов $I_м$, $U_м$ и $E_м$ изображают векторы I, U, E, т. е. действующих значений тока, напряжения и э. д. с.

2. Если даны числовые значения токов и напряжений, то векторы необходимо вычерчивать строго в масштабе, причем масштабы для токов и напряжений принимаются обычно разные.

Пример: Ток $I = 5$ *а* и напряжение $U = 100$ *в* совпадают по фазе. Выбрать подходящие масштабы и начертить векторную диаграмму.

Выбираем масштабы: $м_I = 2$ *а/см*; $м_U = 20$ *в/см*.

Длина векторов: $\overline{I} = \frac{5}{2} = 2{,}5$ *см*; $\overline{U} = \frac{100}{20} = 5$ *см*.

Векторная диаграмма:



Рис. 64.

6. Цепь переменного тока с одним активным сопротивлением

Активное сопротивление (r) — это сопротивление переменному току, в котором электрическая энергия превращается в тепловую (или механическую).

Активным сопротивлением обладают: лампы накаливания, реостаты, электронагревательные устройства; провода.

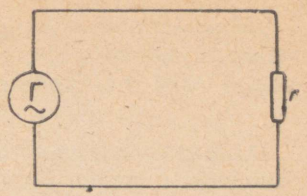


Рис. 65.

В приведенных примерах электрическая энергия превращается в тепловую. В проволочной же рамке с током, находящейся в магнитном поле, электрическая энергия превращается в тепловую и механическую.

Активное сопротивление зависит от материала и размеров проводников, но, в отличие от сопротивления проводников постоянному току (омического сопротивления), может быть больше последнего, т. к. переменный ток стремится проходить главным образом по поверхности проводника, не проникая в его середину. Поэтому полезное сечение проводника как бы уменьшается и сопротивление его увеличивается. Явление это носит название поверхностного эффекта. При небольших частотах (50 *гц*) увеличение сопротивления проводников за счет поверхностного эффекта не учитывается.

В цепи с активным сопротивлением (рис. 65) напряжение и ток совпадают по фазе.

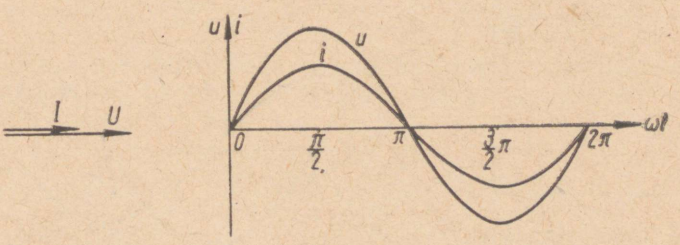


Рис. 66. Векторная диаграмма и графики *u* и *i*.

Значение тока в такой цепи определяется по закону Ома:

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

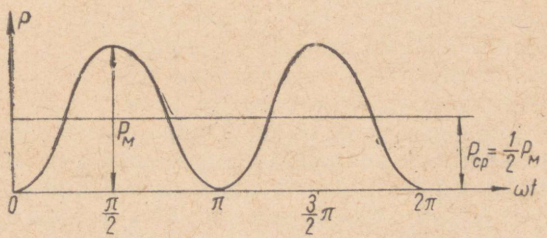


Рис. 67. График мгновенной мощности.

Мгновенная мощность цепи с активным сопротивлением в каждый момент времени равна произведению мгновенных значений тока и напряжения:

$$p = ui.$$

Среднее значение мощности, потребляемой активным сопротивлением, равно половине максимальной мощности $P_м$ и выражается произведением действующих значений напряжения и тока:

$$P = UI = I^2r \text{ вт}.$$

Мощность P называется активной. Единицей ее измерения служит ватт (*вт*).

7. Цепь переменного тока с одной индуктивностью

При прохождении переменного тока через катушку образуется переменное магнитное поле, которое индуктирует в витках катушки противо-э. д. с. (e_L).

Величина e_L зависит от индуктивности катушки и скорости изменения тока в ней.

Скорость изменения тока будет:

наибольшей — около нулевых значений;

наименьшей — около максимальных значений.

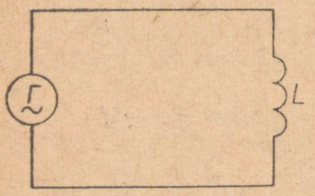


Рис. 68. Цепь с «идеальной катушкой», не имеющей активного сопротивления

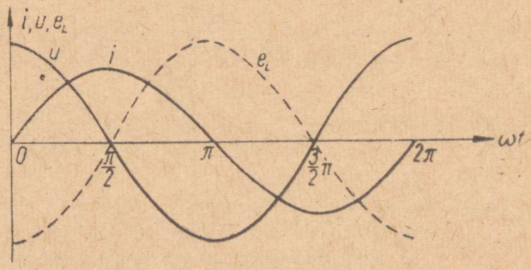


Рис. 69. Графики i, u и e_L.

Следовательно, противо-э. д. с. будет иметь максимальное значение в моменты нулевых значений тока и минимальное (равное нулю) — при максимальных значениях тока.

Направление e_L (по правилу Ленца):

при возрастании тока — обратное току;

при убывании тока — в сторону тока.

При прохождении тока по цепи напряжение источника в любой момент времени должно преодолевать противо-э. д. с. Значит, оно должно быть равно и противоположно по знаку e_L.

Из графиков (рис. 69) видно, что ток в цепи, содержащей только индуктивность, отстает по фазе от напряжения на $^1/_4$ периода, или на 90° ($\pi/2$ *рад*).

Векторная диаграмма для цепи с одной индуктивностью имеет следующий вид:

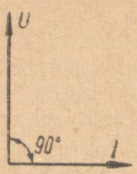


Рис. 70.

Сопротивление, которое катушка оказывает переменному току за счет возникающей противо-э. д. с., — индуктивное сопротивление (обозначается x_L; измеряется в омах).

Индуктивное сопротивление, как и противо-э. д. с., зависит от скорости изменения тока в катушке (от угловой частоты) и от индуктивности катушки L:

$$x_L = \omega L = 2\pi f L \quad ом.$$

Закон Ома для цепи с индуктивностью имеет следующий вид:

$$I = \frac{U}{x_L} \quad a \qquad \text{или} \qquad I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{2\pi f L} \quad a.$$

Мгновенная мощность цепи с индуктивным сопротивлением в каждый момент времени равна произведению мгновенных значений напряжения и тока:

$$p = u \cdot i.$$

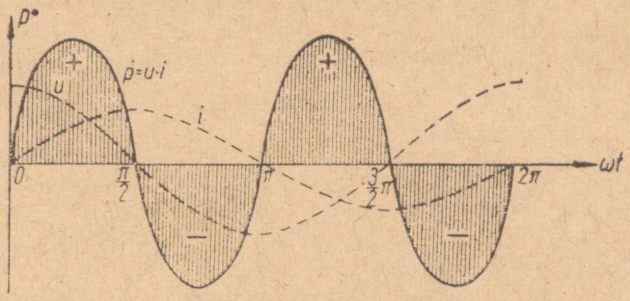


Рис. 71. График мощности в цепи с индуктивным сопротивлением.

Из графика видно, что когда u и i имеют одинаковые знаки, то кривая p положительна. Когда u и i имеют разные знаки, то кривая p отрицательна.

Энергия, поступающая в катушку из источника, в течение первой и третьей четвертей периода (когда мощность положительна) идет на образование магнитного поля катушки. В течение второй и четвертой четвертей периода (когда мощность отрицательна) магнитное поле катушки полностью отдает эту энергию обратно в цепь источника тока.

Таким образом, между источником переменного тока и катушкой, содержащей индуктивность, происходит обмен мощностью. В течение первой и третьей четвертей периода мощность поглощается катушкой, в течение второй и четвертой четвертей периода мощность возвращается источнику. Поэтому в данном случае средняя (активная) мощность равна нулю.

Из сказанного следует, что индуктивная нагрузка, в отличие от активной, не потребляет энергию, которую вырабатывает генератор, а в цепи с индуктивностью происходит «перекачивание» энергии от генератора в катушку и обратно. По этой причине индуктивное сопротивление названо реактивным.

Колебания энергии между генератором и магнитным полем катушки характеризуются реактивной мощностью катушки, обозначаемой буквой Q:

$$Q = U \cdot I = I^2 x_L.$$

Единицей измерения реактивной мощности служит вольт-ампер реактивный (*вар*).

8. Цепь переменного тока с активным сопротивлением и индуктивностью

Реальную катушку, включенную в цепь переменного тока, можно рассматривать как приемник энергии, где активное и индуктивное сопротивления соединены последовательно.

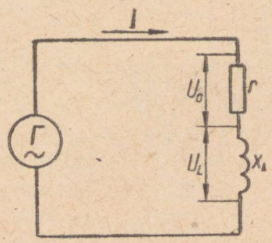


Рис. 72. Цепь с реальной катушкой.

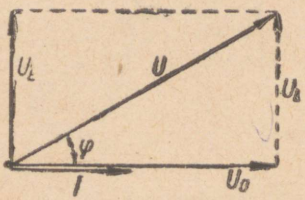


Рис. 73. Треугольник напряжений.

Напряжение на активном сопротивлении:

$U_a = Ir$ *в* — совпадает по фазе с током;

Напряжение на индуктивном сопротивлении:

$U_L = Ix_L$ *в* — опережает по фазе ток на 90° ($\frac{\pi}{2}$ *рад*).

Векторную диаграмму вычерчивают начиная с тока I, общего для всей цепи, который откладывают горизонтально (предпочтительное направление для начального вектора).

На рис. 73 векторы U_a, U_L и U образуют прямоугольный треугольник напряжений. Из последнего следует, что полное напряжение находится сложением векторов U_a и U_L:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2} \text{ в}.$$

Полное напряжение опережает по фазе ток на угол φ.

Заменив U_a и U_L их значениями, получим:

$$U = I\sqrt{r^2 + x_L^2},$$

откуда

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_L^2}} \text{ а}$$

— закон Ома для цепи с последовательным соединением активного и индуктивного сопротивлений.

Выражение $\sqrt{r^2 + x_L^2}$ определяется как полное сопротивление активно-индуктивной цепи и обозначается буквой z.

Если стороны треугольника напряжений разделить на величину тока I, то получится треугольник сопротивлений, т. к. $\frac{\text{напряжение}}{\text{ток}}$ = сопротивление.

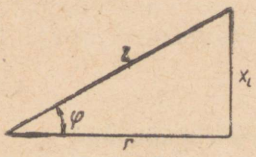


Рис. 74. Треугольник сопротивлений.

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} \text{ ом}.$$

Полную мощность, затрачиваемую в цепи, можно рассматривать, как состоящую из двух частей: активной и реактивной.

Активная мощность — $P = U_a I$ *вт*.

Реактивная мощность — $Q = U_L I$ *вар*.

Полная мощность цепи $S = UI$.

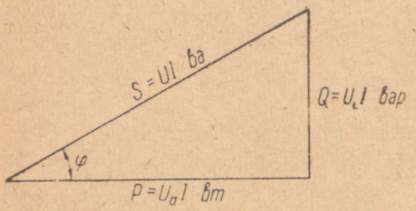
Полная (или кажущаяся) мощность измеряется в вольтамперах (*ва*).

Вспомогательные единицы мощности:

реактивной: 1 киловольт-ампер реактивный (*квар*) = = 1000 *вар*;

полной: 1 киловольт-ампер (*ква*) = 1000 *ва*.

Если величины сторон треугольника напряжений умножить на ток I, то получим треугольник мощностей, т. к. напряжение × ток = мощность.



$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad ва.$$

Рис. 75. Треугольник мощностей.

Отношение активной мощности цепи к полной (кажущейся) мощности называется коэффициентом мощности.

Коэффициент мощности легко вычислить по следующей формуле:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{r}{z}.$$

Таким образом, активную, реактивную и полную мощности можно определить из выражений:

$$P = UI\cos\varphi = I^2 r \quad вт.$$
$$Q = UI\sin\varphi = I^2 x_L \quad вар.$$

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2} = I^2 z \quad ва.$$

В практике активно-индуктивным сопротивлением обладают: катушки, дроссели, обмотки машин переменного тока, обмотки трансформаторов и т. п.

9. Общий случай последовательного соединения активно-индуктивных сопротивлений

1. Напряжения на активных сопротивлениях катушек (рис. 76):

$$\left.\begin{aligned} U_{a1} &= Ir_1 \\ U_{a2} &= Ir_2 \end{aligned}\right\}$$ совпадают по фазе с током.

2. Напряжения на реактивных сопротивлениях:

$$\left.\begin{aligned} U_{L1} &= Ix_{L1} \\ U_{L2} &= Ix_{L2} \end{aligned}\right\}$$ опережают по фазе ток на 90° (или $^1/_4$ периода).

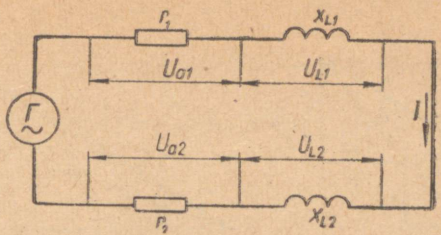


Рис. 76. Цепь с двумя последовательно соединенными реальными катушками.

3. Напряжения на зажимах катушек:

$$U_1 = \sqrt{U_{a1}^2 + U_{L1}^2};$$

$$U_2 = \sqrt{U_{a2}^2 + U_{L2}^2}.$$

4. Напряжение на зажимах цепи:

$$U = \sqrt{(U_{a1} + U_{a2})^2 + (U_{L1} + U_{L2})^2} \ в.$$

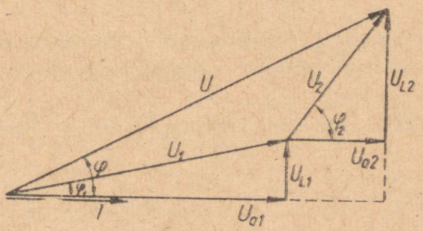


Рис. 77. Векторная диаграмма для неразветвленной цепи с двумя катушками.

Выражая составляющие напряжений через ток и сопротивления, получим:

$$U = I\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_{L1} + x_{L2})^2} = I\sqrt{r^2 + x_L^2} \ в,$$

где $r = r_1 + r_2$ — активное сопротивление цепи;
$x_L = x_{L1} + x_{L2}$ — реактивное сопротивление цепи.

Полное сопротивление цепи

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} \ ом.$$

Если каждую из сторон векторной диаграммы уменьшить в I раз, получим треугольники сопротивлений, а если увеличить в I раз— треугольники мощностей.

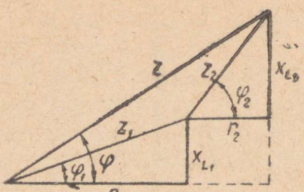


Рис. 78. Треугольники сопротивлений.

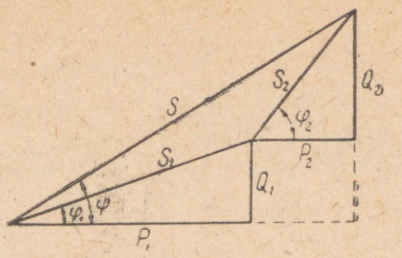


Рис. 79. Треугольники мощностей.

Средняя, или активная, мощность цепи двух катушек:

$$P = P_1 + P_2 = UI\cos\varphi \quad вт.$$

Реактивная мощность этой цепи:

$$Q = Q_1 + Q_2 = UI\sin\varphi \quad вар.$$

Полная мощность цепи:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI \quad ва.$$

10. Общий случай параллельного соединения активно-индуктивных сопротивлений

Если обозначить полное сопротивление каждой из ветвей (рис. 80):

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_{L1}^2} \quad \text{и} \quad z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_{L2}^2} \; ом,$$

то токи в ветвях:

$I_1 = \dfrac{U}{z_1} a$ — отстает по фазе от напряжения на угол φ_1;

$I_2 = \dfrac{U}{z_2} a$ — отстает по фазе от напряжения на угол φ_2.

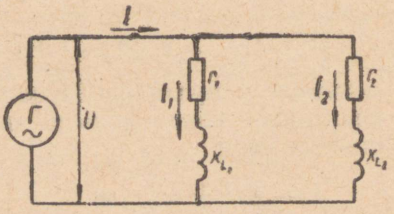


Рис. 80. Цепь с двумя параллельно соединенными реальными катушками.

Для упрощения расчетов ток каждой ветви раскладывают на две составляющие:

а) активную составляющую (I_a) — совпадает по фазе с напряжением;

б) реактивную составляющую (I_p) — отстает по фазе от напряжения на 90°.

Тогда:

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1, \quad \text{где} \quad \cos \varphi_1 = \frac{r_1}{z_1};$$

$$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2, \quad \text{где} \quad \cos \varphi_2 = \frac{r_2}{z_2};$$

$$I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1, \quad \text{где} \quad \sin \varphi_1 = \frac{x_{L1}}{z_1};$$

$$I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2, \quad \text{где} \quad \sin \varphi_2 = \frac{x_{L2}}{z_2}.$$

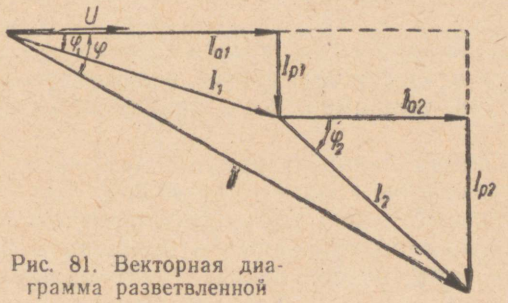


Рис. 81. Векторная диаграмма разветвленной цепи.

Из векторной диаграммы имеем:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2}; \quad I_p = I_{p1} + I_{p2},$$

$$I = \sqrt{(I_{a1} + I_{a2})^2 + (I_{p1} + I_{p2})^2} = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} \ a.$$

Активная мощность цепи:

$$P = P_1 + P_2 = UI_1 \cos \varphi_1 + UI_2 \cos \varphi_2 = UI \cos \varphi \ вт.$$

Реактивная мощность цепи:

$$Q = Q_1 + Q_2 = UI_1 \sin \varphi_1 + UI_2 \sin \varphi_2 = UI \sin \varphi \ вар.$$

Полная мощность цепи:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI \ ва.$$

11. Коэффициент мощности

Коэффициент мощности — $\cos \varphi = \frac{P}{S}$ — показывает, какую долю полной (кажущейся) мощности составляет активная мощность. Чем выше $\cos \varphi$, тем меньше потребляемая нагрузкой ре-

активная мощность, загружающая линию от генератора к нагрузке.

Обычно в энергетике принимают все меры к тому, чтобы $\cos\varphi$ был ближе к единице.

Низкий $\cos\varphi$ потребителя приводит:

— к необходимости увеличения полной мощности электростанций и трансформаторов, т. к.

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} \text{ ва};$$

— к увеличению потерь мощности и напряжения в проводах и увеличению сечения проводов, т. к.

$$I = \frac{P}{U\cos\varphi} \text{ а};$$

— к понижению к. п. д. генераторов, трансформаторов и линий передач, т. к. при той же активной мощности увеличивается ток нагрузки и повышаются потери мощности на нагрев проводов обмоток.

Причинами низкого $\cos\varphi$ обычно бывают:

1) недогрузка электродвигателей переменного тока и трансформаторов. Так, например, $\cos\varphi$ асинхронных двигателей составляет:

а) при номинальной нагрузке — 0,8 — 0,9;

б) при холостом ходе — 0,1 — 0,3;

2) неправильный выбор типа электродвигателя:

а) двигатели быстроходные и большой мощности имеют более высокий $\cos\varphi$ по сравнению с тихоходными и маломощными;

б) двигатели открытого типа имеют $\cos\varphi$ выше, чем двигатели закрытого типа;

3) неправильный ремонт двигателей: увеличение воздушного зазора между ротором и статором или между проводниками и пазами машины уменьшает $\cos\varphi$ двигателя.

Способы увеличения $\cos\varphi$:

— правильный выбор типа, мощности и скорости двигателей;

— увеличение загрузки двигателей и трансформаторов;

— недопущение длительной работы двигателей и трансформаторов вхолостую;

— правильный и качественный ремонт двигателей;

— применение конденсаторов, включаемых параллельно двигателям переменного тока.

12. Цепь переменного тока с ёмкостью

Если к цепи (рис. 82) приложено переменное напряжение, конденсатор будет все время заряжаться и разряжаться. Следовательно, в цепи будет протекать переменный ток.

Когда напряжение возрастает (в любом направлении) — конденсатор заряжается, когда убывает — конденсатор разряжается.

Величина зарядного и разрядного тока зависит от скорости изменения напряжения, которая будет:

наибольшей — около нулевых значений напряжения;

наименьшей — около максимальных значений напряжения.

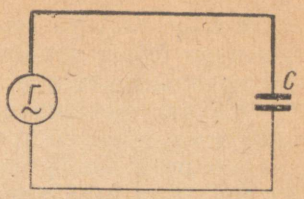


Рис. 82. Цепь с конденсатором.

Поэтому ток в цепи будет максимальным при нулевых значениях напряжения и равным нулю при максимальных значениях напряжения.

Направление тока в цепи:

при зарядке (в любом направлении) — совпадает с напряжением;

при разрядке — противоположно напряжению.

Из сказанного следует, что ток в цепи с ёмкостью опережает по фазе напряжение на $^1/_4$ периода, или на угол 90° ($\pi/2$ *рад*).

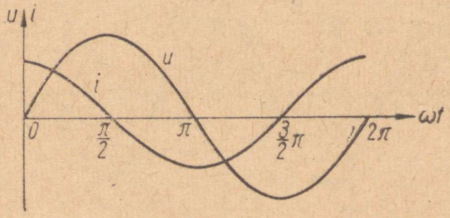


Рис. 83. Графики *u* и *i*.

Векторная диаграмма для цепи с ёмкостью имеет следующий вид:

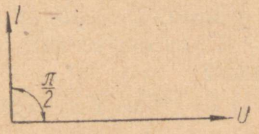


Рис. 84.

Ток в цепи конденсатора при постоянном напряжении будет тем больше, чем:

больше его ёмкость, т. к. тем большее количество электрических зарядов поступает в него при заряде;

больше частота переменного тока, т. к. чем больше раз конденсатор будет заряжаться и разряжаться, тем большее количество электричества пройдет в цепи конденсатора в секунду.

Значит, сопротивление, оказываемое конденсатором переменному току, обратно пропорционально его ёмкости и частоте тока. Это сопротивление называется ёмкостным сопротивлением (или реактивным сопротивлением емкости) и обозначается x_c:

$$x_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \text{ ом.}$$

Примечание.

В последней формуле C должна быть выражена в фарадах, хотя на практике применяют более мелкие (вспомогательные) единицы:

1 микрофарада (*мкф*) $= 10^{-6}$ *ф*;

1 пикофарада (*пф*) $= 10^{-12}$ *ф*.

Закон Ома для цепи с ёмкостью:

$$I = \frac{U}{x_c} \text{ а.}$$

Ниже представлен график мгновенной мощности $p = u \cdot i$.

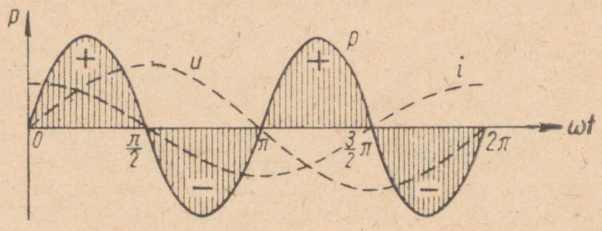


Рис. 85. График мгновенной мощности.

Из графика видно, что в первую четверть периода цепь забирает из сети энергию, которая запасается в электрическом поле конденсатора. В следующую четверть периода конденсатор разряжается на сеть, отдавая ей ранее запасенную энергию. В среднем за период мощность конденсатора (т. е. активная мощность) равна нулю. Следовательно, мощность цепи с ёмкостью является реактивной:

$$Q = UI = I^2 x_c \text{ вар.}$$

13. Последовательное соединение активного сопротивления, индуктивности и ёмкости

Напряжение на зажимах цепи (рис. 86) состоит из:

активного напряжения U_a, совпадающего по фазе с током;

индуктивного напряжения U_L, опережающего по фазе ток на 90°;

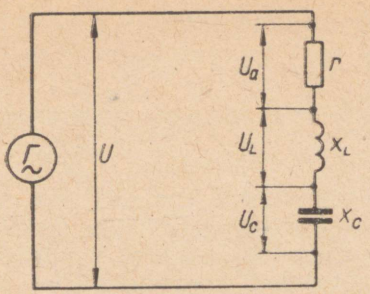


Рис. 86. Цепь с последовательно соединенными реальной катушкой и конденсатором.

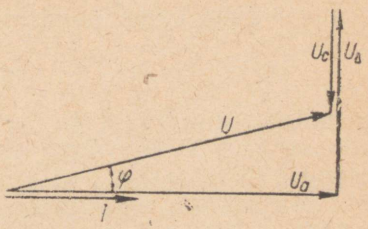


Рис. 87. Векторная диаграмма цепи.

ёмкостного напряжения U_c, отстающего по фазе от тока на 90°.

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_c)^2} \text{ в}.$$

Полное сопротивление цепи:

$$z = \frac{U}{I} = \sqrt{\left(\frac{U_a}{I}\right)^2 + \left(\frac{U_L}{I} - \frac{U_c}{I}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{r^2 + (x_L - x_c)^2} \text{ ом}.$$

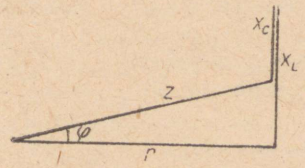


Рис. 88. Треугольник сопротивлений.

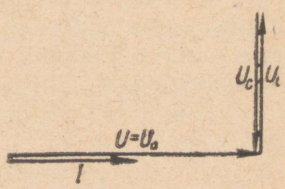


Рис. 89. Векторная диаграмма при резонансе напряжений.

При $x_L > x_c$ — $U_L > U_c$ — полное напряжение опережает по фазе ток;

при $x_L < x_c$ — $U_L < U_c$ — полное напряжение отстает по фазе от тока;

при $x_L = x_c$ — $U_L = U_c$ — наступает **резонанс напряжений.**

При резонансе напряжений:

полное напряжение цепи равно активному напряжению:

$$U = U_a;$$

полное сопротивление цепи будет наименьшим:

$$z = r \text{ ом};$$

ток в цепи будет наибольшим:

$$I = \frac{U}{r} \text{ а};$$

напряжения U_L и U_C будут больше U_a во столько раз, во сколько x_L и x_C больше r. Следовательно, при резонансе напряжений на отдельных участках цепи могут возникнуть напряжения, значительно превышающие напряжение источника $U = U_a$.

Опасные последствия резонанса напряжений:

— повышение напряжений на отдельных участках цепи при больших реактивных сопротивлениях опасно для жизни и может привести к пробою изоляции приборов;

— увеличение тока в цепи (из-за уменьшения полного сопротивления) может повредить приборы (например, измерительные), включенные в цепь.

14. Параллельное соединение активно-индуктивного и ёмкостного сопротивлений

1) Ток в первой ветви (в катушке):

$I = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_L^2}}$ а — отстает по фазе от напряжения на угол φ_1; этот ток можно разложить на две составляющие:

а) активную составляющую — $I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1$ а — совпадает по фазе с напряжением;

б) реактивную (индуктивную) составляющую — $I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1$ а — отстает по фазе от напряжения на 90°;

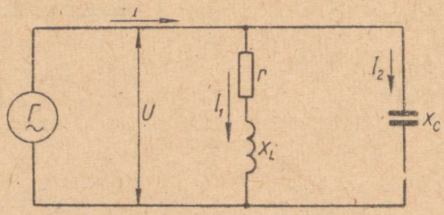
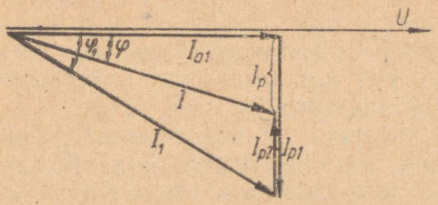


Рис. 90. Цепь с параллельно соединенными реальной катушкой и конденсатором.

2) ток во второй ветви (в конденсаторе):

$I_2 = \frac{U}{x_C}$ а — опережает по фазе напряжение на угол 90°, т. к. является реактивным (ёмкостным) током.

Общий ток I (в неразветвленной части цепи) находится как геометрическая сумма I_1 и I_2:



$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}\ a.$$

Рис. 91. Векторная диаграмма разветвленной цепи.

При $I_{p1} > I_{p2}$ — ток отстает по фазе от напряжения U на угол φ;

при $I_{p1} < I_{p2}$ — ток опережает напряжение U на угол φ;

при $I_{p1} = I_{p2}$ — угол $\varphi = 0$. При этом в цепи наступает резонанс токов.

Следовательно, включив параллельно катушке конденсатор и изменяя его ёмкость, пока ток в конденсаторе не станет равным реактивной составляющей тока катушки (I_p), получим:

$$\cos\varphi = 1.$$

При резонансе токов:

а) $I_p = 0$; $I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = I_a$ (наименьший);

б) $S = P$.

В этом случае генератор и питающая линия полностью разгружены от реактивного тока.

При параллельном соединении только индуктивного и ёмкостного сопротивлений, если подобрать $x_L = x_C$, в ветвях будут протекать равные токи $I_1 = I_2$, сдвинутые по фазе относительно друг друга на 180° (π *рад*), т. е. находящиеся в противофазе, и наступит резонанс токов.

В этом случае общий ток I равен нулю. Следовательно, подводящие провода можно отключить, а в замкнутом контуре, об-

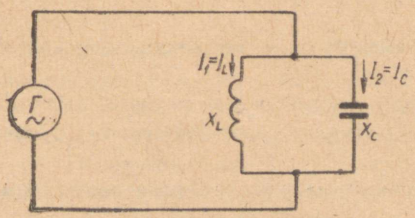


Рис. 92.

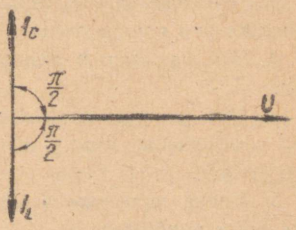


Рис. 93. Векторная диаграмма резонанса токов.

разованном идеальной катушкой и конденсатором, будет протекать переменный ток:

1) заряженный конденсатор разряжается на катушку, создавая магнитное поле катушки;

2) когда конденсатор полностью разрядится (его электрическая энергия станет равной нулю), катушка будет обладать максимальным запасом магнитной энергии;

3) сделавшись генератором, катушка начнет отдавать ток конденсатору под действием э. д. с. самоиндукции (при убывании магнитного поля), стремящейся поддержать ток в прежнем направлении;

4) когда магнитная энергия катушки станет равной нулю, обкладки конденсатора окажутся перезаряженными;

5) конденсатор вновь начнет разряжаться, создавая в цепи ток обратного направления, и процесс будет повторяться.

Цепь, состоящая из емкости и индуктивности, в которой происходит процесс электромагнитных колебаний, называется колебательным контуром.

Частота тока при резонансе, или собственная частота колебания контура, определяется из условия:

$$x_L = x_c \quad \text{или} \quad 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC},$$

откуда

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \text{ гц}.$$

Примечание. Подключение конденсаторов параллельно индуктивной нагрузке в цепях переменного тока применяется для искусственного улучшения $\cos\varphi$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ТЕМЕ IV

1. Что называется переменным электрическим током?
2. Что называется периодом и частотой переменного тока и в каких единицах они измеряются?
3. Что называется мгновенным и амплитудным значениями переменного тока?
4. Что понимается под действующим значением переменного тока? Каково соотношение между действующим и амплитудным значениями переменного тока?
5. Какие значения переменного тока и напряжения показывают измерительные приборы?
6. Как выражается зависимость частоты переменного тока от числа пар полюсов и скорости вращения генератора?

7. Что называется углом сдвига фаз?

8. Как изображается сдвиг фаз на развернутой и векторной диаграммах?

9. В электрической цепи ток меняется по закону $i = 20 \sin (314t - 40°)$. Определите амплитудное и действующее значения тока, его частоту и сдвиг фаз.

10. Какое сопротивление переменному току называют активным? Приведите примеры активных сопротивлений.

11. Напишите закон Ома для цепи с активным сопротивлением.

12. Начертите векторную диаграмму и графики тока, напряжения и мощности для цепи с активным сопротивлением.

13. Объясните природу индуктивного сопротивления в цепи переменного тока.

14. Что называется индуктивным сопротивлением и как его выразить, если известна индуктивность катушки L?

15. Начертите векторную диаграмму для цепи с индуктивностью.

16. Напишите закон Ома для цепи с индуктивностью.

17. Начертите график мощности для цепи с индуктивностью.

18. Как объяснить физическую сущность положительной и отрицательной мощностей в цепи с индуктивностью?

19. Напишите закон Ома для цепи с активным сопротивлением и индуктивностью.

20. Начертите треугольники напряжений, сопротивлений и мощностей для цепи с активным и индуктивным сопротивлениями.

21. В каких единицах измеряются полная, активная и реактивная мощности?

22. К цепи, состоящей из активного сопротивления 4 *ом* и индуктивного 3 *ом*, приложено напряжение 100 *в*. Определите ток в цепи; активную, реактивную и полную мощности и коэффициент мощности цепи.

23. Начертите векторную диаграмму и треугольники сопротивлений и мощностей для неразветвленной цепи с несколькими активными и индуктивными сопротивлениями.

24. Начертите векторную диаграмму для общего случая параллельного соединения активно-индуктивных сопротивлений.

25. Укажите вредные последствия низкого коэффициента мощности.

26. Каковы могут быть причины низкого коэффициента мощности?

27. Какие способы применяются для повышения коэффициента мощности предприятия?

28. Начертите векторную диаграмму и графики тока, напряжения и мощности для цепи переменного тока с емкостью.

29. Начертите векторную диаграмму неразветвленной цепи с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями.

30. Напишите закон Ома для неразветвленной цепи с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями.

31. Укажите условия возникновения резонанса напряжений.

32. Начертите векторную диаграмму цепи при резонансе напряжений.

33. Напишите закон Ома при резонансе напряжений.

34. Укажите опасные последствия резонанса напряжений.

35. В цепи включены последовательно катушка с индуктивностью 0,2 *гн* и конденсатор. Частота тока 50 *гц*. При какой емкости конденсатора в цепи наступит резонанс напряжений?

36. Начертите векторную диаграмму для параллельного соединения активно-индуктивного и емкостного сопротивлений.

37. Укажите условия возникновения резонанса токов.

38. Начертите векторную диаграмму цепи при резонансе токов.

ТЕМА V

ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

1. Получение трехфазного тока

Трехфазным током называется система из трех однофазных токов одинаковой частоты, сдвинутых по фазе на одну треть периода относительно друг друга.

Примечание. Поскольку период T (*сек*) соответствует электрическому углу 360° (или 2π *рад*), то $^1/_3$ периода соответствует 120° или $\frac{2}{3}\pi$ *рад*.

Преимущества трехфазной системы по сравнению с однофазной:

— обеспечение передачи энергии с меньшими потерями и меньшим расходом материала проводов;

— возможность применения простых, экономных и надежных в работе трехфазных электродвигателей, генераторов и трансформаторов;

— возможность получения электроэнергии как трехфазного, так и однофазного тока;

— наличие возможности получения двух различных напряжений (при четырехпроводной системе).

Устройство простейшего генератора трехфазного тока:

статор (неподвижная часть) — сердечник с расположенными на нем тремя обмотками (фазные обмотки или фазы), сдвинутыми по окружности на 120°;

ротор (вращающаяся часть) — электромагнит с обмоткой возбуждения, соединяемой с источником постоянного тока (через контактные кольца, надетые на вал, и щетки).

При вращении ротора его магнитное поле поочередно пересекает фазные обмотки статора и индуктирует в них три синусоидальные э. д. с., которые:

а) равны по величине, т. к. все три фазные обмотки генератора одинаковы и пересекаются одним и тем же магнитным потоком;

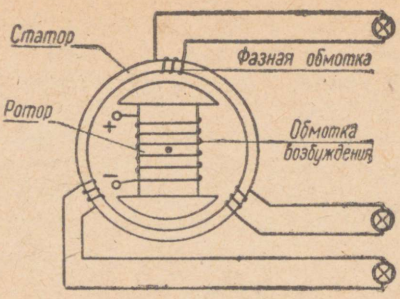


Рис. 94. Простейший генератор трехфазного тока.

б) имеют одинаковую частоту, т. к. магнитные полюсы чередуются под каждой обмоткой с одинаковой скоростью;

в) сдвинуты по фазе относительно друг друга на $^1/_3$ периода (120°), т. к. фазные обмотки сдвинуты в пространстве на 120° и магнитные полюсы при вращении ротора приходят к каждой следующей обмотке с запозданием.

Если амплитуды э. д. с. всех фаз генератора равны между собой, то такая система называется симметричной.

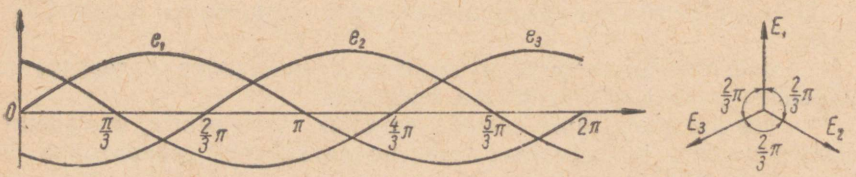


Рис. 95. Графики и векторная диаграмма симметричных э. д. с.

Уравнения э. д. с. для каждой из фаз:

$e_1 = E_м \sin \omega t;$

$e_2 = E_м \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right);$

$e_3 = E_м \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) = E_м \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right).$

Примечание. Здесь понятие «фаза» (фазная обмотка) обозначает одну обмотку(катушку) статора генератора, что не следует путать с ранее встречавшимися понятиями «фаза» и «сдвиг фаз».

Начала фаз генератора обозначают буквами A, B и C.

Концы фаз генератора обозначают соответственно X, Y и Z.

Направления э. д. с. от концов фаз генератора к их началам принимают условно за положительные.

Описанный генератор носит название синхронного.

Мощные генераторы приводятся в движение от турбин и устанавливаются на специальных предприятиях — электростанциях.

В зависимости от вида природной энергии, преобразуемой в электрическую, электростанции подразделяются на тепловые, гидравлические, атомные и др.

Основным типом тепловых электростанций, оборудованных паровыми турбинами и котлами, являются паротурбинные электростанции.

Крупные паротурбинные электростанции называются государственными районными электростанциями (ГРЭС).

Электростанции сравнительно небольшой мощности, которые одновременно с электрической энергией снабжают потребителей паром и горячей водой, называются теплоэлектроцентралями (ТЭЦ).

В качестве топлива для паротурбинных электростанций используются:

каменный уголь, горючие сланцы, природный газ и жидкое топливо — мазут.

Технологический процесс работы паротурбинной электростанции (на твердом топливе):

топливный тракт: топливоприемник — транспортер (элеваторного типа) — дробильное устройство — транспортер — бункер — угольные мельницы (сушка и превращение в пыль) — бункер парового котла — пылеугольные горелки — топка парового котла;

паровой тракт: паровой котел — трубопровод — паровая турбина.

Паровая турбина вращает ротор трехфазного генератора. Энергия, вырабатываемая электрическими генераторами, передается к потребителям через главное распределительное устройство и повысительную подстанцию.

Трехфазные генераторы, соединенные с паровыми турбинами, именуются турбогенераторами. Роторы турбогенераторов вращаются с постоянной скоростью 3000 или 1500 *об/мин.*

Гидравлические электростанции (ГЭС) преобразуют в электрическую энергию падающей воды. Для этого на реках сооружают плотины. Гидротурбину устанавливают в нижней части здания электростанции. Электрический генератор помещается над турбиной и имеет с ней общий вал. Вода на лопасти турбины поступает через специальную камеру и направляющий аппарат. Из турбины воду отводят через отсасывающую трубу.

Генераторы, приводимые во вращение гидравлическими турбинами, называются гидрогенераторами. Их скорость вращения 60—750 *об/мин.*

2. Соединение обмоток трехфазного генератора

Если каждая из обмоток генератора замыкается на свой приёмник энергии, то получается несвязанная трехфазная система. При таком включении для передачи энергии требуется шесть проводов.

Обычно применяются связанные трехфазные системы, в которых обмотки генератора соединяются друг с другом, за счет чего уменьшается расход проводов.

Соединение обмоток генератора может осуществляться: звездой или треугольником.

При соединении звездой концы обмоток соединяются в одну общую точку, называемую нулевой точкой.

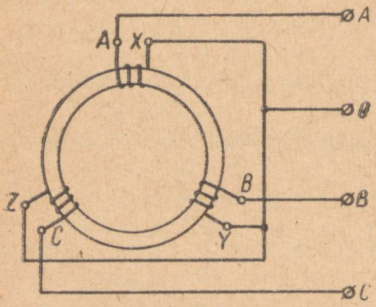


Рис. 96.

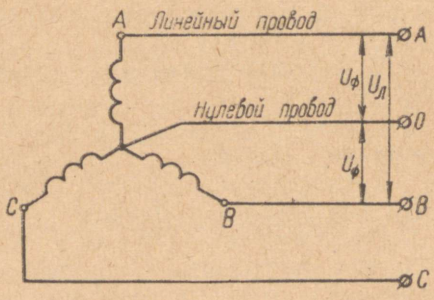


Рис. 97.

Соединение звездой.

Три провода, идущие от обмоток генератора к потребителям, называются линейными проводами. Напряжение между любыми двумя линейными проводами (или между двумя началами обмоток генератора) считается линейным напряжением $U_л$.

Провод, идущий от нулевой точки, является нулевым, или нейтральным, проводом.

Напряжение между любым из линейных проводов и нейтральным проводом — фазное напряжение $U_ф$ — равно напряжению обмотки соответствующей фазы генератора.

Мгновенные значения линейных напряжений определяются из схемы (рис. 98), откуда следует, что фазные напряжения действуют навстречу друг другу. Поэтому:

$$u_{AB} = u_A - u_B;$$
$$u_{BC} = u_B - u_C;$$
$$u_{CA} = u_C - u_a.$$

Поскольку фазные напряжения сдвинуты по фазе относительно друг друга на $^1/_3$ периода, действующие значения линей-

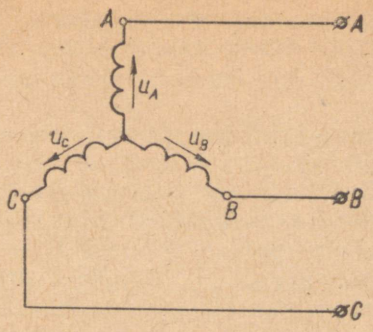


Рис. 98.

ных напряжений можно определить из векторной диаграммы, где

$$\bar{U}_{ab} = \bar{U}_a - \bar{U}_b;$$
$$\bar{U}_{bc} = \bar{U}_b - \bar{U}_c;$$
$$\bar{U}_{ca} = \bar{U}_c - \bar{U}_a.$$

Примечание. Для вычитания векторов необходимо прибавлять отрицательные векторы, т. е. векторы той же длины, но направленные в противоположную сторону.

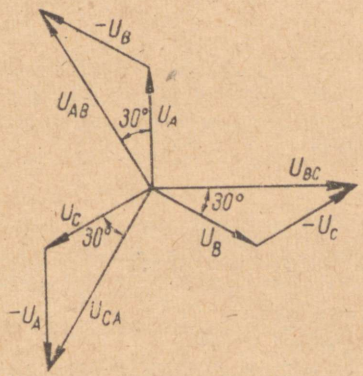


Рис. 99.

или

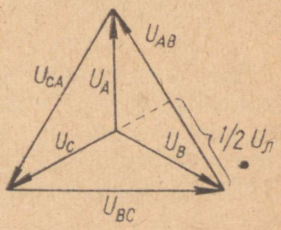


Рис. 100.

Векторная диаграмма напряжений.

Из диаграммы следует, что:

$$\tfrac{1}{2} U_л = U_ф \cos 30° = U_ф \frac{\sqrt{3}}{2}$$

или

$$U_л = \sqrt{3}\, U_ф \qquad (\sqrt{3} = 1{,}73).$$

Таким образом, при соединении звездой при симметричной системе фазных напряжений действующее значение линейного напряжения в $\sqrt{3}$ раз больше действующего значения фазного напряжения.

Как видно из векторной диаграммы, $U_л$ опережает по фазе $U_ф$ на 30° ($\pi/6$ *рад*).

При соединении треугольником конец первой обмотки X соединяется с началом второй обмотки B, конец второй обмотки Y — с началом третьей обмотки C и конец третьей обмотки Z — с началом первой A. Линейные провода присоединяются к началам фаз A, B и C.

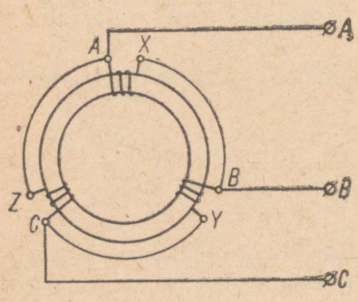


Рис. 101.

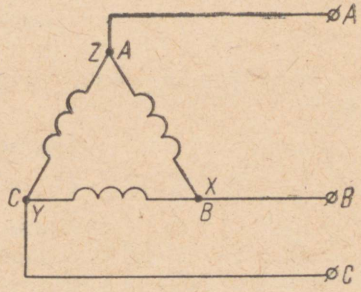


Рис. 102.

Соединение треугольником

Из схемы видно, что напряжение между двумя линейными проводами равно напряжению соответствующей обмотки генератора. Следовательно, при соединении треугольником линейное напряжение равно фазному напряжению:

$$U_л = U_ф.$$

При соединении треугольником фазы генератора образуют замкнутый контур с малым сопротивлением. Следовательно, для предупреждения больших токов в контуре сумма э. д. с., действующих в контуре, должна быть равна нулю.

Сумма трех симметричных э. д. с. равна нулю.

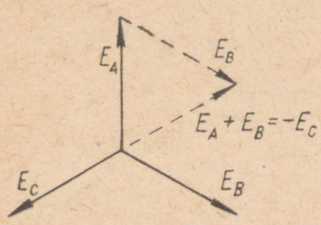


Рис. 103.

При сложении любых двух векторов получается вектор, равный по величине и обратный по знаку третьему вектору.

При неправильном соединении начал и концов обмоток генератора сумма трех э. д. с. не равна нулю, и обмотки могут сгореть.

Соединение обмоток генератора треугольником встречается редко.

3. Включение потребителей в сеть трехфазного тока

При соединении потребителей звездой трехфазная система может быть:

четырехпроводной — при осветительной нагрузке;

трехпроводной — при силовой нагрузке.

При четырехпроводной системе лампы включаются между каждым из линейных проводов и нулевым проводом.

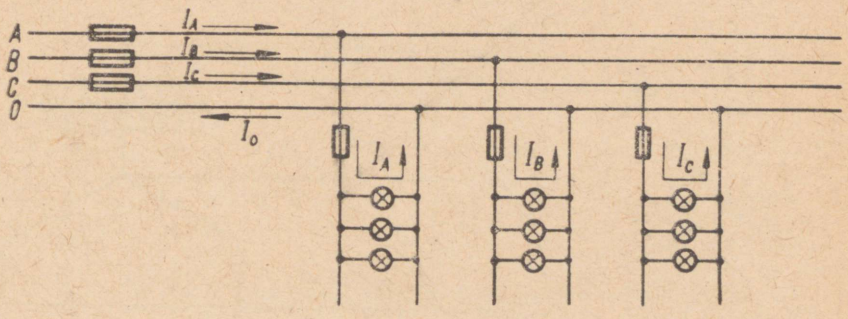


Рис. 104. Соединение ламп звездой.

Примечания.

1. На схеме указаны условно принятые положительные направления токов.

2. Аналогично приведенному на схеме включению ламп осуществляется включение всех однофазных потребителей (нагревательные приборы, радиоприемники, телевизоры и т. п.).

3. Соединять однофазные потребители звездой можно лишь в том случае, если линейное напряжение больше номинального напряжения потребителей в $\sqrt{3}$ раз.

Нулевой провод обеспечивает равенство напряжений на отдельных фазах потребителей.

При этом соединении токи в линейных проводах равны токам в соответствующих фазах потребителей и генератора:

$$I_ф = I_л.$$

Фазные токи вычисляются по формулам:

$$I_A = \frac{U_A}{z_A} a; \quad I_B = \frac{U_B}{z_B} a; \quad I_C = \frac{U_C}{z_C} a.$$

Коэффициенты мощности фаз:

$$\cos \varphi_A = \frac{r_A}{z_A}; \quad \cos \varphi_B = \frac{r_B}{z_B}; \quad \cos \varphi_C = \frac{r_C}{z_C},$$

где r_A, r_B, r_C, z_A, z_B, z_C — активные и полные сопротивления фаз потребителей.

Поскольку нулевой провод выполняет роль «обратного провода», то по нему протекает ток, равный геометрической сумме трех токов:

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C.$$

Величину тока I_0 (рис. 105) получим, умножив длину вектора I_0 на его масштаб $м_I$:

$$I_0(а) = \bar{I}_0(см) \cdot м_I(а/см).$$

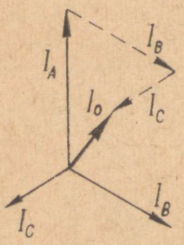


Рис. 105. Определение тока в нулевом проводе графическим методом (коэффициенты мощности и характер нагрузок по фазам одинаковы).

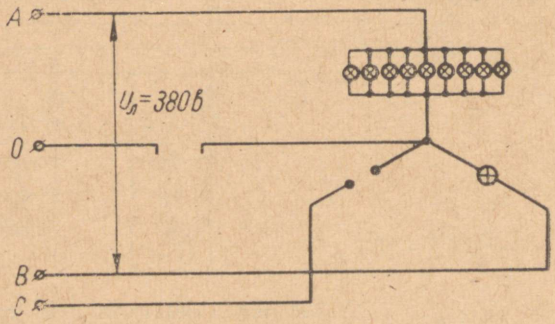


Рис. 106.

При неодинаковых сопротивлениях фаз потребителей обрыв нулевого провода влечет за собой перераспределение токов и напряжений. Это можно показать на следующем примере (рис. 106).

Предположим, что при линейном напряжении 380 *в* и лампах одинаковой мощности:

в фазе *A* включены 9 ламп;
в фазе *B* включена 1 лампа;
в фазе *C* все лампы выключены.

При обрыве нулевого провода лампы фаз *A* и *B* окажутся включенными последовательно на линейное напряжение 380 *в*.

Напряжение на лампах фазы *A* станет в 9 раз меньше, чем на лампе фазы *B* (соответственно сопротивлениям фаз):

$$U_A = \frac{380 \cdot 1}{10} = 38 \ в;$$

$$U_B = \frac{380 \cdot 9}{10} = 342 \ в.$$

Лампа фазы *B* перегорит.

Таким образом, отключение нулевого провода при неравномерной нагрузке недопустимо. Во

избежание разрыва в нулевом проводе не устанавливают предохранителей и выключателей.

При равномерной нагрузке фаз (например, трехфазные асинхронные и синхронные двигатели) ток в нулевом проводе равен нулю, и в этом случае нулевой провод не нужен.

Расчет трехфазной цепи при симметричной нагрузке фаз сводится к расчету одной фазы.

Активная мощность фазы:

$$P_ф = U_ф I_ф \cos \varphi_ф \quad вт.$$

Активная мощность трех фаз:

$$P = 3P_ф = 3U_ф I_ф \cos \varphi_ф \quad вт.$$

Учитывая, что

$$I_ф = I_л \quad и \quad U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}},$$

получим:

$$P = 3U_ф I_ф \cos \varphi_ф = 3 \frac{U_л I_л}{\sqrt{3}} \cos \varphi_ф = \sqrt{3}\, UI \cos \varphi \quad вт,$$

где U и I — линейные величины;

φ — угол сдвига фаз между фазным напряжением и фазным током.

Реактивная мощность трехфазной системы:

$$Q = \sqrt{3}\, UI \sin \varphi \quad вар.$$

Полная (кажущаяся) мощность:

$$S = \sqrt{3}\, UI \quad ва.$$

При неравномерной нагрузке фаз мощность трехфазной системы определяется как сумма мощностей трех фаз.

При соединении потребителей треугольником каждая

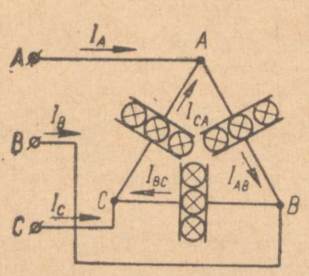


Рис. 107.

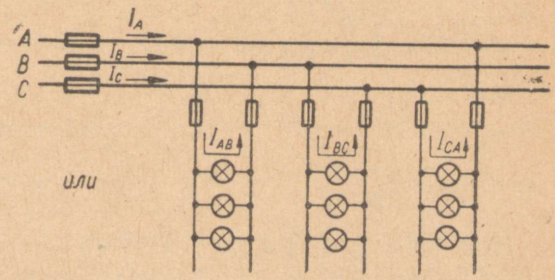


Рис. 108.

Соединение потребителей (ламп) треугольником.

фаза потребителей присоединяется к линейным проводам, т. е. включается на линейное напряжение, которое одновременно будет и фазным напряжением потребителей:

$$U_л = U_ф.$$

Таким образом, изменение сопротивления фаз не влияет на фазные напряжения.

Выберем положительные направления токов:

в линейных проводах (линейные токи) — от источника к потребителям (обозначаются I_A, I_B и I_C);

в фазах потребителей (фазные токи) — от начала к концу фаз (обозначаются I_{AB}, I_{BC} и I_{CA}) и составим уравнения по первому закону Кирхгофа для мгновенных значений токов в точках A, B и C (рис. 107):

для точки A: $i_A + i_{CA} = i_{AB}$;
для точки B: $i_B + i_{AB} = i_{BC}$;
для точки C: $i_C + i_{BC} = i_{CA}$.

Отсюда:

$$i_A = i_{AB} - i_{CA};$$
$$i_B = i_{BC} - i_{AB};$$
$$i_C = i_{CA} - i_{BC}.$$

Действующие значения линейных токов находятся как геометрические разности (разности векторов) соответствующих фазных токов:

$$\overline{I}_A = \overline{I}_{AB} - \overline{I}_{CA};$$
$$\overline{I}_B = \overline{I}_{BC} - \overline{I}_{AB};$$
$$\overline{I}_C = \overline{I}_{CA} - \overline{I}_{BC}.$$

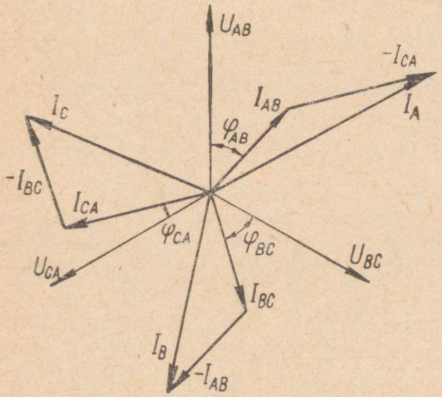


Рис. 109. Векторная диаграмма при соединении потребителей треугольником.

При равномерной нагрузке фаз действующие значения фазных токов равны между собой и сдвинуты по фазе на одинаковые углы $\varphi_ф$ относительно напряжений и на 120° ($2\pi/3$) относительно друг друга.

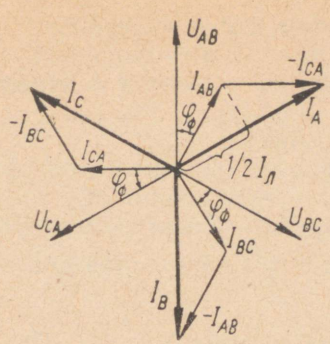


Рис. 110.

или

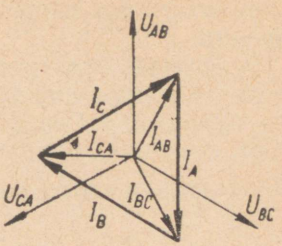


Рис. 111.

Векторная диаграмма при равномерной нагрузке фаз.

Из диаграммы имеем:

$$\tfrac{1}{2} I_л = I_\Phi \cos 30° = I_\Phi \frac{\sqrt{3}}{2},$$

откуда

$$I_л = \sqrt{3}\, I_\Phi \quad a,$$

т. е. при соединении потребителей треугольником и при равномерной нагрузке фаз линейные токи больше фазных в $\sqrt{3}$ раз.

Активная мощность одной фазы:

$$P_\Phi = U_\Phi I_\Phi \cos \varphi_\Phi.$$

Мощность трех фаз при равномерной нагрузке:

активная: $P = 3P_\Phi = 3U_\Phi I_\Phi \cos \varphi_\Phi = \sqrt{3}\, UI \cos \varphi$ *вт*;

реактивная: $Q = 3Q_\Phi = 3U_\Phi I_\Phi \sin \varphi_\Phi = \sqrt{3}\, UI \sin \varphi$ *вар*;

полная: $S = 3S_\Phi = 3U_\Phi I_\Phi = \sqrt{3}\, UI$ *ва*.

При неравномерной нагрузке фаз мощность трехфазной цепи определяют как сумму мощностей отдельных фаз.

4. Включение электрических ламп и электродвигателей в сеть трехфазного тока

Электрические лампы изготовляются на номинальные напряжения 127 и 220 *в*.

Трехфазные электродвигатели изготовляются на номинальные напряжения: 127, 220, 380 *в* и выше.

Лампы с номинальным напряжением 127 *в* включают:

при линейном напряжении сети 127 *в* — треугольником;

при линейном напряжении сети 220 *в* — звездой с нулевым проводом.

Лампы с номинальным напряжением 220 *в* включают:

при линейном напряжении сети 220 *в* — треугольником;

при линейном напряжении сети 380 *в* — звездой с нулевым проводом.

Трехфазные электродвигатели включают:

при линейном напряжении сети, равном номинальному фазному напряжению электродвигателя, — треугольником;

при линейном напряжении сети, превышающем номинальное фазное напряжение электродвигателя в $\sqrt{3}$ раз, — звездой.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ТЕМЕ V

1. Что такое трехфазный переменный ток?
2. Как устроен генератор трехфазного тока?
3. Как получается трехфазный ток?
4. Как подразделяются электростанции в зависимости от вида природной энергии, преобразуемой в электрическую?
5. Что называется турбогенератором и гидрогенератором?
6. В чем заключается соединение фаз генератора звездой?
7. Какое напряжение называется фазным и какое линейным?
8. Каково соотношение между фазными и линейными напряжениями при соединении фаз генератора звездой?
9. В чем заключается соединение фаз генератора треугольником?
10. Каково соотношение между фазными и линейными напряжениями при соединении фаз генератора треугольником?
11. В каких случаях применяется четырехпроводная и трехпроводная системы при соединении потребителей звездой и как включаются при этом потребители?
12. Каково соотношение между линейными и фазными токами при соединении потребителей звездой?
13. Какова роль нулевого провода и в каких случаях нулевой провод необходим?
14. Каково соотношение между линейными и фазными токами при соединении потребителей треугольником и при равномерной нагрузке фаз?
15. Напишите выражения для активной, реактивной и полной мощности трехфазной системы при равномерной нагрузке фаз.

ТЕМА VI

ТРАНСФОРМАТОРЫ

1. Назначение трансформаторов и их применение

Трансформатором называется устройство, которое служит для повышения или понижения напряжения в цепи переменного тока.

По назначению трансформаторы делятся на:

силовые — для преобразования электроэнергии при питании силовой и осветительной нагрузки;

специальные — для питания потребителей специального назначения (электропечи, электросварка, выпрямители и др.);

измерительные — для подключения измерительных приборов;

автотрансформаторы — для преобразования напряжения в небольших пределах:

а) в лабораториях;

б) при пуске двигателей переменного тока;

в) для бытовых нужд и др.

2. Устройство трансформатора

Простейший трансформатор состоит из стального сердечника (магнитопровода) и двух обмоток.

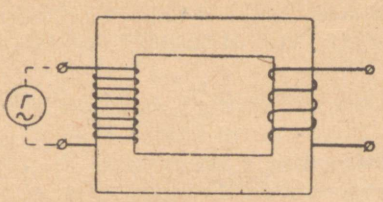


Рис. 112. Схема простейшего трансформатора.

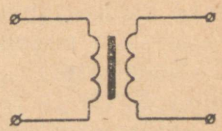


Рис. 113. Условное изображение трансформатора.

Обмотка, к которой подводят энергию переменного тока, называется первичной, а от которой отводят — вторичной.

Трансформаторы, предназначенные для повышения напряжения, соответственно называются повышающими, для понижения напряжения — понижающими.

Стальной магнитопровод (сердечник) является магнитной цепью, по которой замыкается переменный магнитный поток трансформатора, пронизывающий его обмотки. Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод собирается из тонких листов электротехнической стали (0,35—0,50 *мм*), изолированных друг от друга лаком или бумагой.

Части магнитопровода, на которых располагаются обмотки, именуются стержнями, а части, замыкающие их, — ярмом.

По конструкции магнитопровода трансформаторы делятся на стержневые и броневые.

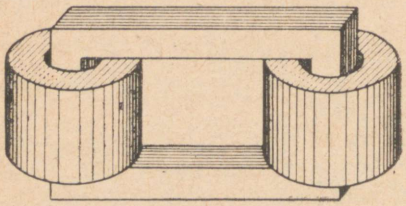


Рис. 113. Стержневой трансформатор.

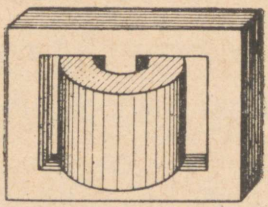


Рис. 115. Броневой трансформатор.

У стержневого трансформатора каждая обмотка помещается на двух стержнях. Обе половины одной и той же обмотки соединяются так, чтобы их магнитные потоки складывались.

У броневого трансформатора обмотки располагаются на одном стержне.

Обмотки выполняют из изолированной круглой или прямоугольной меди (в последнее время и из алюминия). Обмотка низшего напряжения располагается ближе к стержню (на изолирующем цилиндре), т. к. ее легче изолировать от стального стержня. Обмотка высшего напряжения располагается снаружи (также на изолирующем цилиндре), что облегчает доступ для её осмотра и ремонта.

У однофазного трансформатора начала и концы обмоток обозначаются:

у обмотки высшего напряжения — A и X;

у обмотки низшего напряжения — a и x.

В зависимости от способа охлаждения трансформаторы делятся на трансформаторы с воздушным охлаждением (маломощные) и трансформаторы с масляным охлаждением.

В трансформаторах с масляным охлаждением сердечник вместе с обмотками находится в баке, заполненном специальным минеральным маслом (трансформаторным).

Назначение масла:

— способствовать лучшему отводу тепла от обмоток и сердечника;

— улучшить изоляцию токоведущих частей между собой и от бака.

Для улучшения условий охлаждения масла стенки бака делают ребристыми или к ним приваривают трубы, которые способствуют естественной циркуляции масла. В мощных трансформаторах применяют искусственную циркуляцию масла. Чтобы дать возможность маслу расширяться, на крышке устанавливают дополнительный бачок — расширитель с масломерной стеклянной трубкой.

Основными частями трансформатора с масляным охлаждением являются:

— магнитопровод (сердечник);
— обмотки высшего и низшего напряжения;
— бак с крышкой;
— расширитель;
— фарфоровые выводы (проходные изоляторы);
— вспомогательная аппаратура и арматура.

3. Принцип действия однофазного трансформатора

Принцип действия трансформатора основан на электромагнитной индукции.

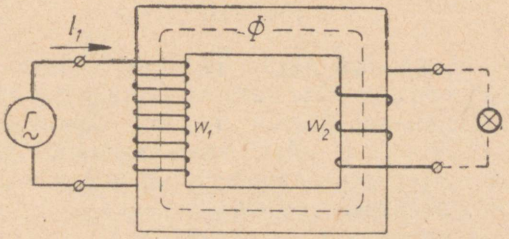


Рис. 116.

Переменный ток I_1, протекающий в первичной обмотке, создает в сердечнике переменный магнитный поток Φ. Магнитный поток Φ, пронизывая первичную и вторичную обмотки, индуктирует в каждом витке одинаковую э. д. с. Таким образом, суммарные э. д. с. в обмотках зависят от количества их витков, а отношение э. д. с., индуктируемых в обмотках, равно отношению чисел их витков:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Различают три характерных режима работы трансформатора.

1. Режим холостого хода, когда цепь вторичной обмотки разомкнута ($I_2 = 0$).

2. Режим работы под нагрузкой, когда вторичная обмотка нагружена на сопротивление потребителя.

3. Режим короткого замыкания, когда вторичная обмотка замкнута накоротко (аварийный режим).

4. Режим холостого хода трансформатора

При подключении к первичной обмотке трансформатора напряжения U_1 в ней потечет переменный ток холостого хода I_{1x}. Этот ток создаст намагничивающую силу трансформатора:

$$F_{1x} = I_{1x} \cdot w_1,$$

где w_1 — число витков первичной обмотки.

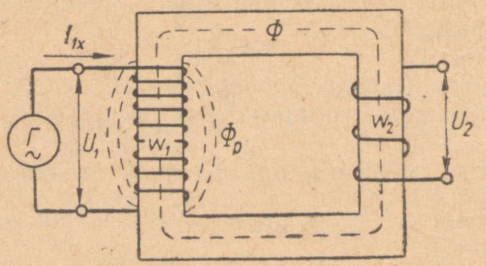


Рис. 117.

F_{1x} создает магнитный поток, который делится на:

основной поток (Φ), замыкающийся по стальному сердечнику и составляющий бóльшую часть магнитного потока;

поток рассеяния (Φ_p), замыкающийся по воздуху и сцепляющийся только с первичной обмоткой. Он составляет небольшую часть магнитного потока.

Основной магнитный поток индуктирует:

в первичной обмотке — э. д. с. E_1;

во вторичной обмотке — э. д. с. E_2.

Поток рассеяния индуктирует в первичной обмотке э. д. с. рассеяния, создающую индуктивное сопротивление обмотки x_1.

Таким образом, приложенное к первичной обмотке напряжение должно преодолевать:

— э. д. с. самоиндукции E_1;

— напряжение на индуктивном сопротивлении первичной обмотки:

$$U_{1L} = I_{1x} \cdot x_1 \quad в;$$

— напряжение на активном сопротивлении первичной обмотки:

$$U_{1a} = I_{1x} \cdot r_1.$$

Построение векторной диаграммы холостого хода осуществляется следующим порядком:

1) вектор магнитного потока $\Phi_м$ откладывают вправо;

2) вектор тока I_{1x} опережает по фазе $\Phi_м$ на угол α $(5 \div 7°)$, определяемый потерями в стали (в идеальном трансформаторе I_{1x} совпадал бы по фазе с $\Phi_м$);

3) вектор э. д. с. E_1 отстает по фазе от $\Phi_м$ на 90°;

4) вектор э. д. с. E_2 совпадает по фазе с E_1;

5) вектор U_1 получается как геометрическая сумма векторов:

а) $-\overline{E}_1$;

б) $\overline{U}_{1a} = I_{1x} \cdot r_1$, совпадающего по фазе с током;

в) $\overline{U}_{1L} = I_{1x} \cdot x_1$, опережающего по фазе ток на 90°.

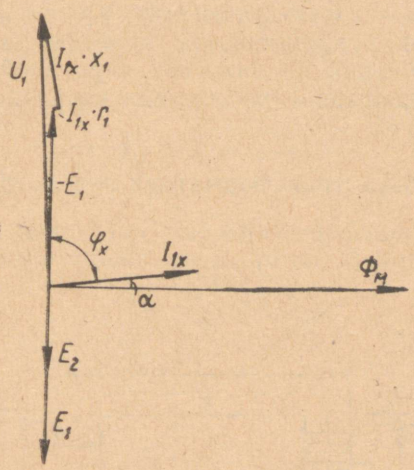


Рис. 118. Векторная диаграмма холостого хода трансформатора.

Из диаграммы следует, что ток холостого хода отстает от напряжения на угол φ_x, близкий к 90°, а $\cos\varphi_x$ составляет около 0,1. Ток холостого хода составляет $3 \div 10\%$ от номинального тока. Так как при холостом ходе $I_{1x} \cdot r_1$ и $I_{1x} \cdot x_1$ имеют очень малые значения, то можно считать, что напряжение U_1 практически уравновешивается только э. д. с. E_1:

$$U_1 \approx E_1.$$

Величины э. д. с., индуктируемых в обмотках основным магнитным потоком Φ, можно определить по формулам:

$$E_1 = 4{,}44 f w_1 \Phi_м \ в;$$
$$E_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_м \ в,$$

где f — частота тока в сети ($гц$);
w_1 и w_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток;
$\Phi_м$ — наибольшее значение основного магнитного потока ($вб$).

Разделив E_1 на E_2, получим:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4{,}44 f w_1 \Phi_м}{4{,}44 f w_2 \Phi_м} = \frac{w_1}{w_2}.$$

При холостом ходе:

$$E_1 \approx U_1$$
$$E_2 = U_2,$$

поэтому

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Отношение k — коэффициент трансформации.

Следовательно, коэффициентом трансформации называется отношение напряжений на зажимах первичной обмотки трансформатора к напряжению на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе.

5. Работа трансформатора под нагрузкой

При работе трансформатора под нагрузкой по вторичной обмотке проходит ток I_2, который по закону Ома равен:

$$I_2 = \frac{U_2}{z} \ a.$$

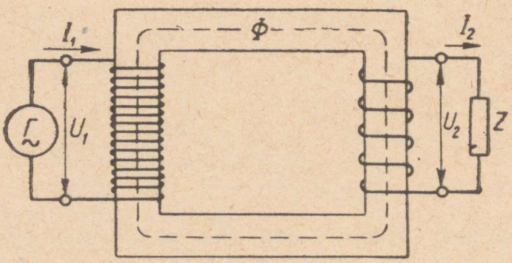


Рис. 119.

В этом случае сердечник намагничивается двумя токами: I_1 и I_2.

По правилу Ленца I_2 оказывает размагничивающее действие на сердечник. Магнитный поток в сердечнике Φ будет создаваться теперь совместным действием намагничивающих сил (ам-

первитков) обеих катушек: $F_1 = I_1 w_1$ и $F_2 = I_2 w_2$, действующих навстречу друг другу.

Однако магнитный поток в сердечнике, по сравнению с потоком при холостом ходе, практически не уменьшается. Это объясняется следующим. Когда под действием F_2 магнитный поток в сердечнике уменьшается, то уменьшается э. д. с. E_1, индуктируемая в первичной обмотке. Но при этом E_1 перестает уравновешивать напряжение сети, что вызывает увеличение тока в первичной обмотке, т. е. увеличение $F_1 = I_1 w_1$. Увеличение тока первичной обмотки происходит до тех пор, пока магнитный поток не примет первоначального значения.

Таким образом, сумма F_1 и F_2 всегда будет равна намагничивающей силе трансформатора F_{1x}:

$\overline{F}_1 + \overline{F}_2 = \overline{F}_{1x}$ — баланс намагничивающих сил.

В трансформаторе ток первичной обмотки всегда увеличивается настолько, чтобы скомпенсировать размагничивающее действие тока вторичной обмотки. Поэтому увеличение мощности нагрузки сопровождается увеличением мощности, потребляемой от сети.

Из баланса намагничивающих сил имеем:

$$\overline{F}_1 = \overline{F}_{1x} - \overline{F}_2,$$

что можно представить в виде векторной диаграммы:

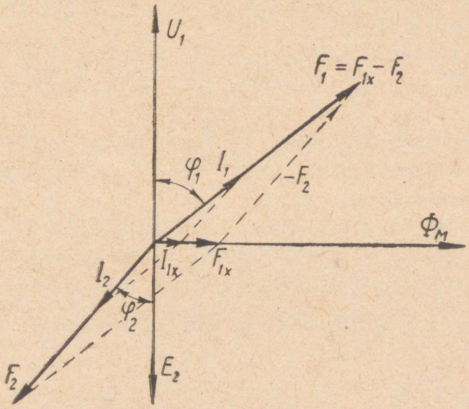


Рис. 120. Векторная диаграмма намагничивающих сил (упрощенная).

Из диаграммы следует, что с увеличением тока I_2:

ток I_1 растет;

угол φ_1 уменьшается, а коэффициент мощности трансформатора увеличивается.

Так как ток вторичной обмотки создает $F_2 = I_2 w_2$, для восстановления равновесия первичный ток должен увеличиться на такую величину I_2', чтобы созданная этим приростом тока намагничивающая сила $I_2' w_1$ уравновесила F_2, т. е.:

$$I_2 \cdot w_2 = I'_2 \cdot w_1,$$

отсюда

$$I'_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1} = \frac{I_2}{k}.$$

Величину I_2', на которую увеличивается первичный ток при нагрузке трансформатора, называют приведенным вторичным током.

Намагничивающая сила F_{1x} по сравнению с F_1 и F_2 мала, поэтому ею можно пренебречь.

Тогда:

$$F_1 = F_2 \quad \text{или} \quad I_1 w_1 = I_2 w_2,$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}.$$

Токи первичной и вторичной обмоток обратно пропорциональны числам витков обмоток.

Построение векторной диаграммы нагруженного трансформатора (при активно-индуктивной нагрузке) осуществляется так:

1) вектор магнитного потока $\Phi_м$ откладывают вправо;

2) векторы I_{1x} и E_2 наносят, как и в диаграмме холостого хода;

3) вектор вторичного тока I_2 отстает по фазе от E_2 на угол ψ_2, зависящий от величины реактивного сопротивления вторичной обмотки и нагрузки;

4) вектор вторичного напряжения опережает по фазе ток на угол φ_2, зависящий от индуктивного сопротивления нагрузки.

Величину этого вектора определяют как разность вектора E_2 и вектора падения напряжения во вторичной обмотке $\Delta \bar{U} = \bar{U}_{a2} - \bar{U}_{L2}$,

где $U_{a2} = I_2 \cdot r_2$ в — совпадает по фазе с током;

$U_{L2} = I_2 \cdot x_2$ в — опережает по фазе ток на 90°;

5) вектор первичного тока I_1 определяют сложением вектора I_{1x} и вектора приведенного вторичного тока

$$I'_2 = \frac{I_2}{k};$$

6) вектор первичного напряжения определяют как сумму:

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{U}_{a1} + \bar{U}_{L1}.$$

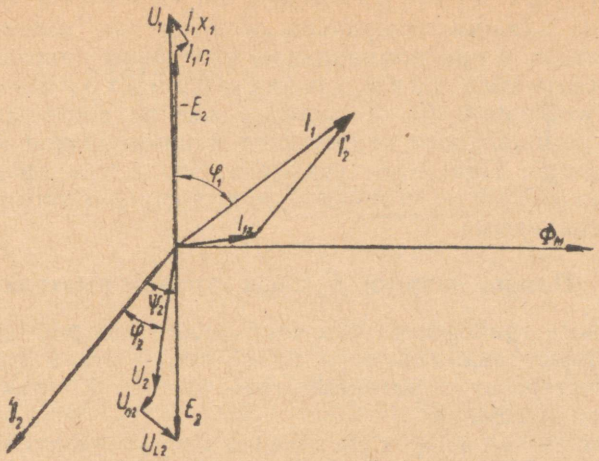


Рис. 121. Векторная диаграмма нагруженного трансформатора.

С увеличением тока I_2 увеличивается падение напряжения во вторичной обмотке трансформатора. Поэтому напряжение на зажимах вторичной обмотки уменьшается.

Если обозначить напряжение на зажимах вторичной обмотки:
U_2 — при нагрузке;
U_{2x} — при холостом ходе,
то величина

$$\Delta U\% = \frac{U_{2x} - U_2}{U_{2x}} \cdot 100\%$$

называется процентным изменением напряжения трансформатора.

$\Delta U\%$ зависит не только от величины тока нагрузки, но и от $\cos\varphi_2$.

В современных трансформаторах $\Delta U\%$ составляет 2—3% (при $I_2 = I_{2н}$ и $\cos\varphi_2 = 1$).

6. Номинальные параметры трансформатора

Номинальные величины трансформатора указываются на заводском щитке трансформатора.

Номинальная мощность $S_н$ — мощность на зажимах вторичной обмотки, выражается в киловольт-амперах (*ква*).

Номинальное первичное напряжение трансформатора $U_{1н}$ — напряжение, подводимое к трансформатору из сети.

Номинальное вторичное напряжение $U_{2н}$ — напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе трансформатора и при номинальном первичном напряжении.

Номинальные токи трансформатора — первичный $I_{1н}$ и вторичный $I_{2н}$ — вычисленные по соответствующим значениям номинального напряжения и номинальной мощности трансформатора. При этом, учитывая, что к. п. д. трансформатора высок, мощности первичной и вторичной обмоток принимаются одинаковыми.

7. Потери энергии и к. п. д. трансформатора

При работе трансформатора часть мощности расходуется на потери, которые складываются из потерь в стали сердечника ($P_{ст}$) на гистерезис и вихревые токи; потерь в меди обмоток ($P_м$) на их нагревание.

Потери в стали сердечника при постоянной частоте зависят от величины магнитной индукции. Магнитная индукция, так же как и магнитный поток в сердечнике, при любой нагрузке остается постоянной. Значит, $P_{ст}$ не зависят от нагрузки.

Потери в меди обмоток создаются токами первичной и вторичной обмоток I_1 и I_2. Следовательно:

$$P_м = I_1^2 \cdot r_1 + I_2^2 \cdot r_2,$$

где r_1 и r_2 — активные сопротивления первичной и вторичной обмоток.

$P_м$ зависят от нагрузки.

Потери $P_м$ и $P_{ст}$ легко определяются двумя опытами:

а) холостого хода;

б) короткого замыкания.

а) Опыт холостого хода

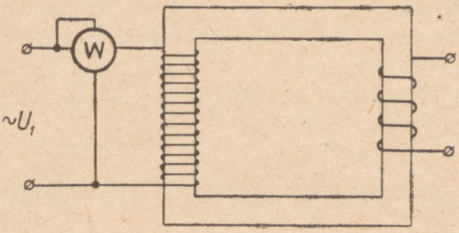


Рис. 122.

Тока во вторичной обмотке нет, а ток первичной обмотки мал. Поэтому можно считать, что $P_м = 0$ и измеренная ваттметром мощность равна мощности потерь в стали:

$$P_х = P_{ст}.$$

б) Опыт короткого замыкания

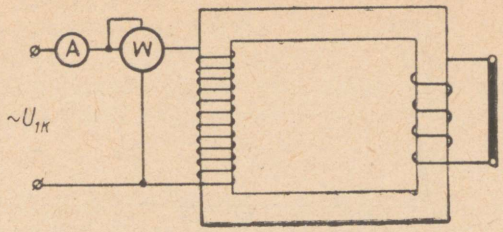


Рис. 123.

Вторичная обмотка замкнута накоротко. К первичной обмотке подводится пониженное напряжение $U_{1к}$ (4,5 ÷ 10,5% $U_{1н}$), чтобы токи в обмотках имели номинальные значения.

Поскольку магнитный поток в сердечнике, пропорциональный напряжению, мал, то потерями в стали можно пренебречь. Тогда измеренная мощность равна потери в меди обмоток:

$$P_к = P_м.$$

Коэффициент полезного действия трансформатора равен отношению мощности, отдаваемой трансформатором, к мощности, потребляемой им:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_{ст} + P_м} \cdot 100\%.$$

К. п. д. трансформатора изменяется с изменением нагрузки. Так, если отношение нагрузки S_2 к номинальной $S_{2н}$ равно

$$\frac{S_2}{S_{2н}} = \beta,$$

то к. п. д. определяют по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta \cdot S_{2н} \cdot \cos \varphi_2}{\beta S_{2н} \cos \varphi_2 + P_{ст} + \beta^2 P_{м.н.}}.$$

β — называется коэффициентом нагрузки.

К. п. д. трансформатора будет максимальным при такой нагрузке, когда потери в стали равны потерям в меди:

$$P_м = P_{ст},$$

тогда $P_{ст} = \beta^2 P_{мн}$ или $P_х = \beta^2 P_к$, откуда наивыгоднейший коэффициент нагрузки

$$\beta = \sqrt{\frac{P_х}{P_к}}.$$

К. п. д. современных трансформаторов достигает 98 ÷ 99%.

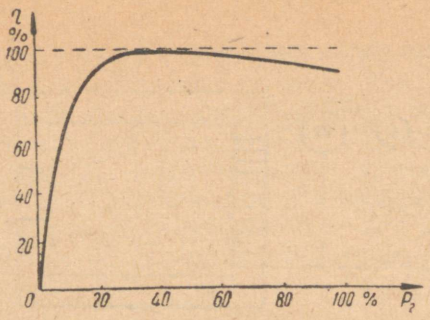


Рис. 124. Кривая зависимости к. п. д. трансформатора от вторичной мощности.

8. Трехфазные трансформаторы

Для повышения или понижения напряжения трехфазного тока применяют три однофазных трансформатора или один трехфазный трансформатор.

Трехфазный трансформатор состоит из трехстержневого магнитопровода и обмоток низшего и высшего напряжения, помещенных одна на другой. Обмотки одной фазы расположены на одном стержне.

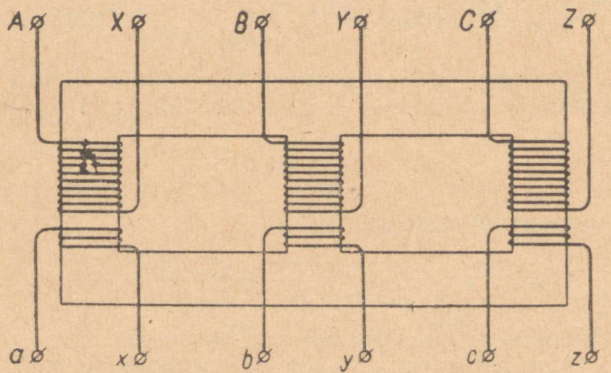


Рис. 125. Схема трехфазного трансформатора.

Коэффициентом трансформации трехфазного трансформатора называется отношение фазных напряжений:

$$k = \frac{U_{ф1}}{U_{ф2}} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Первичные и вторичные обмотки соединяются звездой (Y) или треугольником ($\triangle$).

По ГОСТу применяют три схемы соединения обмоток:
Звезда — звезда с нулем (Y/Y_0).
Звезда — треугольник ($Y/\triangle$).
Звезда с нулем — треугольник ($Y_0/\triangle$).
Числитель в обозначении показывает соединение обмоток высшего напряжения, знаменатель — обмоток низшего напряжения.

Схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов:

Схемы соединения обмоток		Условные обозначения
высшего напряжения	низшего напряжения	

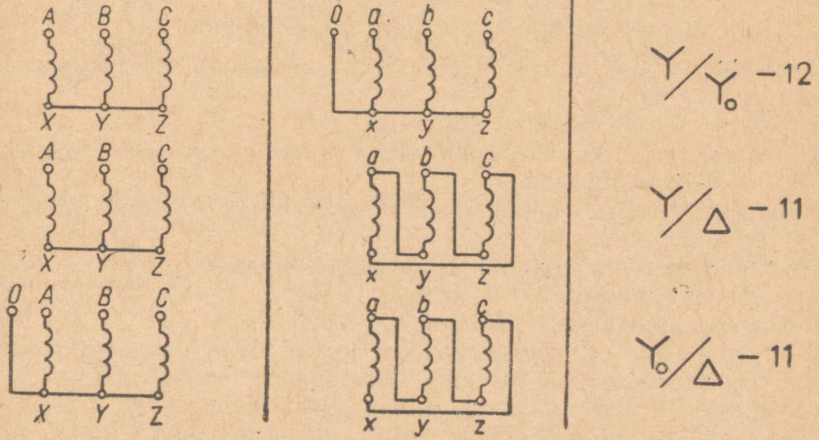


Рис. 126.

Цифры, стоящие за условным обозначением, определяют группу соединения трансформаторов. Группа указывает угол сдвига фаз линейного напряжения обмоток низшего напряжения относительно линейного напряжения обмоток высшего напряжения. Этот угол дается в виде расположения часовых стрелок в указанное цифрами время. Так, при группе 12 расположение стрелок ↑ и сдвига фаз нет (векторы высшего и низшего напряжения совпадают); при группе 11 расположение стрелок ↖ и вектор низшего напряжения опережает по фазе вектор высшего напряжения на угол 30°.

Группа соединения трансформатора зависит от:
— направления намотки обмоток;

— последовательности соединения фазных обмоток;
— порядка чередования фаз при соединении в звезду или в треугольник.

Группу соединения трансформаторов необходимо знать при включении их на параллельную работу.

9. Технические данные трехфазных трансформаторов

Наиболее распространенными из выпускаемых в настоящее время являются силовые трансформаторы серии ТСМ и ТСМА, где буквы обозначают:

Т — трехфазный;
С — силовой;
М — с масляным охлаждением;
А — обмотки выполнены из алюминия.

Трансформаторы серии ТСМ в зависимости от мощности делят на десять типов:

I габарит — 20, 35, 60 и 100 *ква*;

II габарит — 180, 320 и 560 *ква* (и промежуточные мощности — 135, 240 и 420 *ква*).

Трансформаторы серии ТСМА выпускают на мощности 60, 100 и 320 *ква*.

Номинальные напряжения трансформаторов:

высшее напряжение — 3, 6, 6,3, 10 *кв*;

низшее напряжение — 0,23, 0,4 и 0,525 *кв*.

В обозначении трансформаторов, кроме букв, указывающих серию, имеются две цифры, показывающие:

а) первая — номинальную мощность в *ква*;

б) вторая — номинальное напряжение первичной обмотки в *кв*.

Например, трансформатор ТСМ 180/6 имеет номинальную мощность 180 *ква* и номинальное высшее напряжение 6 *кв*.

10. Измерительные трансформаторы тока и напряжения

Измерительные трансформаторы служат для подключения через них измерительных приборов в сети переменного тока.

Применение измерительных трансформаторов позволяет:

расширить пределы измерения обычных электроизмерительных приборов;

отделить электрические измерительные приборы от цепей высокого напряжения.

Измерительные трансформаторы напряжения служат для понижения напряжения, подводимого к вольтметру.

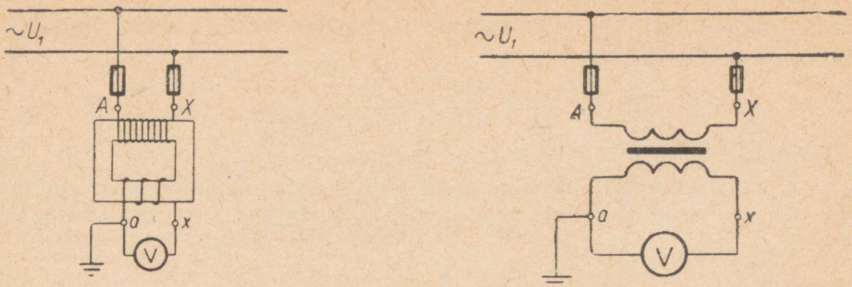


Рис. 127. Схема и условное изображение трансформатора напряжения.

По стандарту все трансформаторы напряжения выполняются на вторичное напряжение 100 *в*.

Коэффициент трансформации трансформатора напряжения определяется из выражения:

$$k = \frac{U_{1н}}{U_{2н}} = \frac{U_{1н}}{100},$$

где $U_{1н}$ — стандартное высокое напряжение.

Величину измеряемого (первичного) напряжения U_1 определяют умножением вторичного напряжения на коэффициент трансформации:

$$U_1 = k \cdot U_2 \text{ в}.$$

Трансформатор напряжения работает практически в режиме холостого хода.

Для безопасности вторичные обмотки и корпус измерительных трансформаторов заземляют.

Измерительные трансформаторы тока преобразуют ток большой величины в ток, который удобно измерять обычным амперметром. Вторичная обмотка трансформатора рассчитывается на ток 5 *а*.

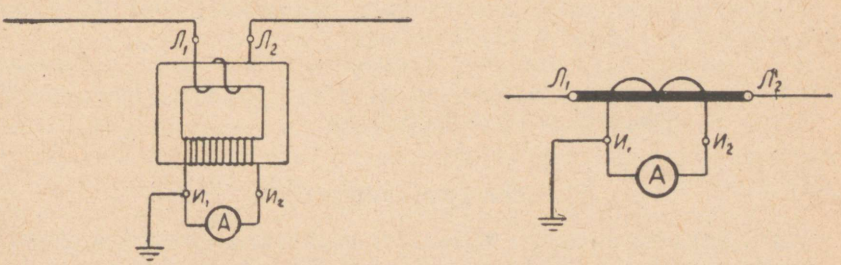


Рис. 128. Схема и условное изображение трансформатора тока.

Коэффициент трансформации трансформатора тока определяют из выражения:

$$k = \frac{I_{1н}}{I_{2н}} = \frac{I_{1н}}{5},$$

где $I_{1н} = 20, 50, 100$ и т. д. *а*.

Зная вторичный ток I_2 и коэффициент трансформации трансформатора тока, можно определить измеряемый (первичный) ток I_1:

$$I_1 = k \cdot I_2 \ \ а.$$

Измерительный трансформатор тока работает в режиме короткого замыкания.

В целях безопасности (в случае электрического пробоя между обмотками) вторичную обмотку соединяют с корпусом и при измерении заземляют.

При пользовании трансформатором тока нужно следить за тем, чтобы вторичная обмотка была замкнута на амперметр или накоротко. В противном случае во вторичной обмотке возникают сильные перенапряжения, опасные для персонала и для самого прибора; трансформатор перегревается и выходит из строя.

Измерительные клещи являются разновидностью трансформатора тока. Они имеют только вторичную обмотку, замкнутую на амперметр. Первичной обмоткой служит токоведущий провод или шина, в которой измеряется ток.

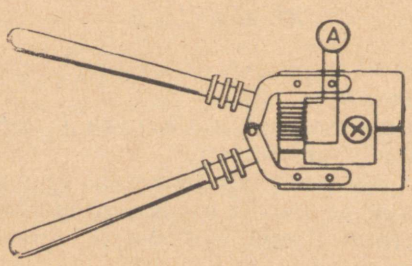


Рис. 129. Измерительные клещи.

Для измерения тока достаточно с помощью рукояток обхватить провод разъемным сердечником.

У стационарных приборов, постоянно включенных с измерительными трансформаторами, градуировка шкалы выполняется с учетом коэффициента трансформации.

11. Автотрансформаторы

Автотрансформатором называется трансформатор, у которого обмотка низшего напряжения является частью обмотки высшего напряжения.

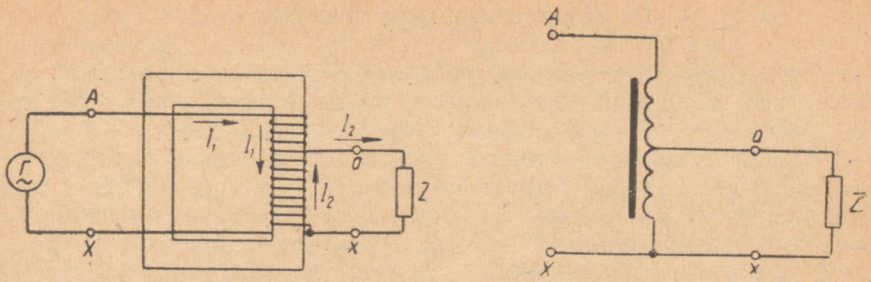


Рис. 130. Схема и условное изображение автотрансформатора.

В обмотке автотрансформатора переменный магнитный поток индуктирует э. д. с. Величина э. д. с. зависит от числа витков обмотки. Следовательно, напряжение сети и напряжение на потребителе различны, т. к. они подключены к различным числам витков:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = k.$$

Первичный и вторичный токи обратно пропорциональны числам витков обмоток:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}.$$

Вторичный ток, так же как в обычном трансформаторе, создает размагничивающее действие, т. е. противоположен по фазе первичному току. В общей части витков обмотки автотрансформатора проходят оба тока — первичный и вторичный. Поэтому величина тока в общей части витков автотрансформатора равна разности первичного и вторичного токов:

$$I_{\text{общ}} = I_2 - I_1.$$

Если по величине I_1 и I_2 близки друг другу, то их разность невелика. Поэтому общая часть витков может быть намотана проводом малого сечения. Таким образом, автотрансформаторы выгодно применять тогда, когда требуется немного повысить или понизить напряжение. При этих условиях автотрансформатор может быть в два — три раза легче по весу и меньше по размерам, чем трансформатор такой же мощности.

Автотрансформаторы, позволяющие плавно и в широких пределах регулировать напряжение, называются вариаторами. Регулирование напряжения производится перемещением скользящего контакта по обмотке, которая в месте движения щетки очищена от изоляции. По такому принципу устроен лабораторный автотрансформатор — автотрансформатор типа ЛАТР.

12. Сварочные трансформаторы

Сварочный трансформатор представляет собой однофазный трансформатор, понижающий напряжение сети до 60—70 *в* на вторичной обмотке при холостом ходе.

Внешняя характеристика сварочных трансформаторов ($U_2 = f(I_2)$) должна быть круто падающей, т. е. при нагрузке напряжение должно изменяться так, чтобы сварочный ток оставался почти постоянным. При коротких замыканиях ток не должен превышать рабочий более чем на 20—40%.

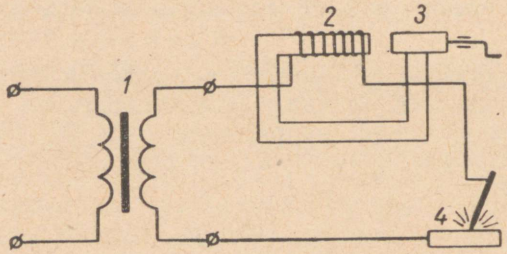


Рис. 131. Схема сварочного трансформатора:
1 — трансформатор; *2* — дроссель; *3* — винт для перемещения ярма; *4* — свариваемая деталь.

Величину сварочного тока регулируют, передвигая рукояткой верхнюю часть сердечника (ярма) дросселя. При вращении рукоятки по часовой стрелке часть ярма сдвигается винтовой передачей и воздушный зазор в сердечнике увеличивается. При этом магнитный поток в сердечнике и противо-э. д. с. катушки дросселя уменьшаются, что увеличивает величину сварочного тока. При вращении рукоятки против часовой стрелки воздушный зазор уменьшается, противо-э. д. с. катушки увеличивается, а величина сварочного тока уменьшается.

Круто падающая внешняя характеристика сварочных трансформаторов получается благодаря действию дросселя. При увеличении сварочного тока увеличивается падение напряжения в катушке дросселя и уменьшается падение напряжения на дуге. Поэтому величина сварочного тока мало изменяется.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ТЕМЕ VI

1. Что называется трансформатором и какие бывают трансформаторы?
2. Как устроен однофазный трансформатор?
3. Каково назначение стального сердечника (магнитопровода) трансформатора?
4. Как делятся трансформаторы в зависимости от конструкции магнитопровода и от способа охлаждения?

5. Назовите основные части трансформатора с масляным охлаждением.

6. Объясните принцип действия однофазного трансформатора.

7. В каких режимах может работать трансформатор и чем характерны эти режимы?

8. Начертите векторную диаграмму холостого хода трансформатора.

9. От каких величин зависят э. д. с., индуктируемые в обмотках трансформатора?

10. Что называется коэффициентом трансформации?

11. Почему при увеличении нагрузки трансформатора увеличивается ток первичной обмотки?

12. Начертите векторную диаграмму намагничивающих сил при работе трансформатора под нагрузкой.

13. Начертите векторную диаграмму нагруженного трансформатора.

14. Что называют процентным изменением напряжения трансформатора и чему оно равно в современных трансформаторах?

15. Какие номинальные величины указываются на заводском щитке трансформатора?

16. Какие потери мощности имеют место в трансформаторе?

17. В чем заключается опыт холостого хода и опыт короткого замыкания при определении потерь мощности в трансформаторе?

18. Напишите формулу для определения к. п. д. трансформатора.

19. Как устроен трехфазный трансформатор?

20. Что называется коэффициентом трансформации трехфазного трансформатора?

21. Как соединяются обмотки трехфазных трансформаторов?

22. Какие схемы и группы соединений обмоток трансформаторов приняты в СССР?

23. Назовите наиболее распространенные серии выпускаемых в настоящее время трансформаторов. Что обозначают буквы, указывающие серию?

24. Для чего служат измерительные трансформаторы и как они устроены?

25. Почему недопустимо размыкание вторичной обмотки трансформатора тока при протекании по первичной обмотке тока нагрузки?

26. Расскажите об устройстве измерительных клещей.

27. Что называется автотрансформатором?

28. Начертите схему присоединения потребителя к сети через автотрансформатор.

29. Для каких целей применяют автотрансформаторы?

30. Объясните принцип регулирования величины тока в сварочных трансформаторах.

ТЕМА VII

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

1. Роль и значение электрических измерений

Под электрическими измерениями понимают область электротехники, занимающуюся измерениями электрических величин: тока, напряжения, мощности, частоты, сопротивления, ёмкости, угла сдвига фаз и др.

Электрические измерения дают также возможность измерять неэлектрические величины, предварительно преобразовав их в электрические (например, усилие, давление, скорость, температура, уровень жидкости и т. п.).

Электроизмерительная техника обеспечивает:

— четкую, бесперебойную работу электроустановок;

— безопасность эксплуатации электроустановок;

— экономию энергии, топлива и сырья;

— рациональное ведение производственных процессов;

— возможность автоматизации и телемеханизации производства.

2. Основные положения о порядке поверки измерительных приборов на предприятиях

Электроизмерительные приборы подвергаются обязательной периодической поверке, а также поверке после ремонта.

Сроки периодических поверок устанавливаются ведомствами и органами Государственного комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР.

Поверки приборов должны производиться в соответствии с инструкциями этого Комитета.

Поверка прибора состоит из внешнего осмотра, установления механической исправности прибора и определения погрешностей.

Все образцовые измерительные приборы, а также рабочие счетчики электроэнергии подлежат государственной по-

верке после каждого ремонта, а находящиеся в обращении — в следующие сроки:

1 раз в год:
образцовые амперметры, вольтметры, ваттметры, фазометры, шунты, сопротивления, измерительные трансформаторы, счетчики электроэнергии;

1 раз в два года:
образцовые измерительные конденсаторы, магазины индуктивности, магазины ёмкости.

1 раз в пять лет:
счетчики однофазные бытовые.

Все рабочие измерительные приборы подвергаются поверке в порядке ведомственного надзора. Периодичность этих поверок устанавливают ведомства и организации.

3. Требования, предъявляемые к измерительным приборам. Методы измерения

К измерительным приборам предъявляются следующие требования:

точность показаний;
быстрота и удобство отсчета измеряемой величины;
высокая чувствительность, т. е. способность реагировать на малые изменения измеряемой величины;
малая потребляемая энергия;
стойкость к перегрузкам;
быстрота успокоения подвижной системы;
простота и надежность конструкции;
низкая стоимость.

Измерения могут производиться как методом непосредственной оценки, так и методом сравнения.

При методе непосредственной оценки измеряемая величина определяется непосредственно с помощью отсчетных приспособлений прибора (чаще всего стрелки, перемещающейся по градуированной шкале). К таким приборам относятся: амперметры, вольтметры, ваттметры, омметры, счетчики электроэнергии, частотомеры, фазометры и др.

При методе сравнения производят сравнение измеряемой величины с образцами. К приборам этого метода относятся мосты для измерения сопротивлений и потенциометры. Эти приборы используются для более точных измерений.

В технических измерениях чаще применяют приборы непосредственной оценки, как более простые и требующие мало времени для измерения.

4. Погрешности при измерениях

При электрических измерениях обычно имеет место некоторое отличие показания прибора от действительного значения измеряемой величины (значения, полученного по образцовому прибору).

Погрешности при измерении могут быть обусловлены:

несовершенством метода измерения — методические погрешности;

несовершенством самого прибора — инструментальные погрешности.

Инструментальные погрешности делят на:

а) абсолютную;

б) относительную;

в) приведенную.

Абсолютной погрешностью называют разность между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины:

$$\Delta A = A - A_д,$$

где ΔA — абсолютная погрешность прибора;

A — показание прибора;

$A_д$ — действительное значение измеряемой величины.

Например, если амперметр показал величину тока 5 *а*, а действительное значение тока равно 4,9 *а*, то

$$\Delta A = 5 - 4{,}9 = 0{,}1 \ а.$$

Зная абсолютную погрешность прибора, можно вносить поправки при измерениях.

Относительной погрешностью называют отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины:

$$\beta = \frac{\Delta A}{A_д} \cdot 100\% = \frac{A - A_д}{A_д} \cdot 100\%.$$

В приведенном примере

$$\beta = \frac{0{,}1}{4{,}9} \cdot 100\% = 2\%.$$

Относительная погрешность зависит от значения измеряемой величины. Поэтому в начале шкалы она значительно больше, чем в конце. Первую треть шкалы прибора, как правило, считают нерабочим участком и все измерения стремятся производить в остальной части шкалы.

Приведенной погрешностью прибора называют отношение абсолютной погрешности к предельному (или номинальному) показанию прибора:

$$\beta_{пр} = \frac{\Delta A}{A_{макс}} \cdot 100\% = \frac{A - A_д}{A_{макс}} \cdot 100\%.$$

В зависимости от величины приведенной погрешности (полученной при нормальных условиях работы) приборы подразделяются на восемь классов точности:

0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Цифры, характеризующие класс точности, указывают наибольшую приведенную погрешность, допускаемую для прибора данного класса. Так, прибор, имеющий наибольшую приведенную погрешность 0,15%, может быть отнесен только к классу 0,2, а прибор, имеющий приведенную погрешность 0,75%, — к классу 1,0.

5. Классификация измерительных приборов

Таблица 2

Классификация по принципу действия (системы) приборов

№ п/п	Наименование системы	Условное обозначение	Принцип действия системы
1	Магнитоэлектрическая		Взаимодействие магнитных потоков постоянного магнита и подвижного контура с током
2	Электромагнитная		Втягивание ферромагнитного сердечника
3	Электродинамическая		Взаимодействие двух катушек с током
4	Индукционная		Взаимодействие проводящего диска с вращающимся магнитным полем
5	Выпрямительная (детекторная)		Выпрямление переменного тока с последующим измерением его магнитоэлектрическим прибором
6	Термоэлектрическая		Возникновение э. д. с. в результате термоэлектрического эффекта и измерение ее магнитоэлектрическим прибором
7	Электростатическая		Взаимодействие электрических зарядов
8	Вибрационная		Увеличение амплитуды колебаний при механическом резонансе

Таблица 3

Классификация по роду измеряемой величины

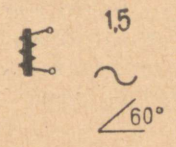
Измеряемая величина	Название прибора	Условное обозначение
Ток	Миллиамперметр Амперметр Килоамперметр	
Напряжение и э. д. с.	Милливольтметр Вольтметр Киловольтметр	
Электрическое сопротивление	Омметр Килоомметр Мегомметр	
Электрическая мощность	Ваттметр Киловаттметр	
Электрическая энергия	Счетчики электроэнергии	
Сдвиг фаз	Фазометр	
Частота	Частотомер	

Таблица 4

Условные обозначения на шкалах приборов

Обозначение знаков	Изображение знаков	Пояснения
Знаки классов точности	0,05 0,1 0,2 0,5 1 1,5 2,5 4	Приведенные погрешности, % (в нормальных условиях):
Знаки рода тока		Постоянный ток
		Переменный ток
		Трехфазный ток
Знаки установки прибора		Вертикальное положение шкалы
		Горизонтальное положение шкалы
		Наклонное положение шкалы

Обозначение знаков	Изображение знаков	Пояснения
Знаки прочности изоляции прибора		Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 *кв*
Знаки на зажимах прибора		Генераторный зажим
		Зажим, соединенный с корпусом
		Зажим для заземления

Пример. 

Прибор электромагнитной системы, класса точности 1,5, переменного тока, со шкалой, устанавливаемой под углом 60° к горизонту.

6. Измерительные механизмы приборов

Измерительный механизм — основная часть каждого измерительного прибора.

При воздействии на измерительный механизм измеряемой величины происходит перемещение его подвижной части. По углу поворота или по линейному перемещению подвижной части определяют значение измеряемой величины.

Измерительный механизм магнитоэлектрической системы (рис. 132) состоит из:

неподвижной части, включающей:

а) постоянный магнит с двумя полюсными башмаками;

б) стальной цилиндр, установленный между полюсными башмаками, с зазором не более 2 *мм*;

подвижной части, в которую входят:

а) прямоугольная алюминиевая рамка с катушкой и двумя закрепленными на ней полуосями, установленными в опорах;

б) стрелка, закрепленная на полуоси;

в) спиральные пружины.

Ток к подвижной катушке подводится через спиральные пружины.

Принцип действия механизма магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии полей постоянного магнита и катушки с током.

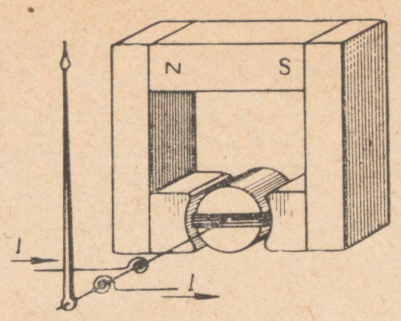


Рис. 132. Измерительный механизм магнитоэлектрической системы.

При прохождении тока через катушку возникает магнитное поле, которое, взаимодействуя с полем постоянного магнита, создает вращающий момент. Под действием этого момента катушка поворачивается на некоторый угол, преодолевая сопротивление пружин. Чем больше ток, тем больше угол поворота стрелки:

$$\alpha = c \cdot I.$$

Отсчет угла производится по указательной стрелке и шкале, отградуированной непосредственно в измеряемых единицах.

Успокоение подвижной части обеспечивается за счет тормозящего действия вихревых токов, возникающих в алюминиевой рамке прибора при её движении в магнитном поле.

Механизмы магнитоэлектрической системы не могут применяться для непосредственных измерений в цепях переменного тока, т. к. отклонения стрелки пропорциональны току в катушке. При переменном токе катушка, получая толчки чередующихся знаков, остается неподвижной.

Механизмы магнитоэлектрической системы применяются в приборах, используемых для измерения: величины тока; напряжения; сопротивления в цепях постоянного тока.

Достоинства механизмов магнитоэлектрической системы:

— высокая точность;
— большая чувствительность;
— малое потребление мощности;
— равномерная шкала;
— малая зависимость показаний от воздействия внешних магнитных полей;
— хорошее успокоение подвижной части.

Недостатки механизмов магнитоэлектрической системы:

— пригодность только для постоянного тока;
— большая чувствительность к перегрузкам и тряскам;
— сравнительно высокая стоимость.

Измерительный механизм электромагнитной системы состоит из:

неподвижной части, представляющей собой катушку, намотанную на металлический или пластмассовый каркас;

подвижной части, куда входят:

а) сердечник из мягкой стали или специального сплава — пермаллоя, насаженный на ось;

б) стрелка и уравновешивающие грузики, укрепленные на оси;

в) спиральная пружина;

г) успокоитель (воздушный или магнитоиндукционный), обеспечивающий быстрое успокоение стрелки.

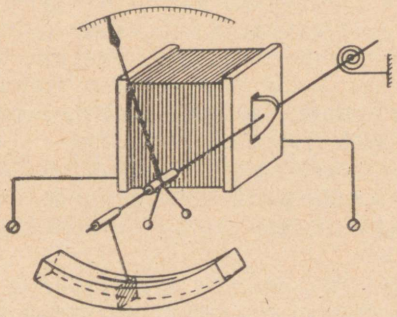


Рис. 133. Измерительный механизм электромагнитной системы.

Принцип действия механизма электромагнитной системы основан на втягивании сердечника (лепестка) в катушку при прохождении по ней электрического тока.

Ток в катушке создает магнитное поле, которое намагничивает сердечник и втягивает его внутрь катушки. Чем больше ток, тем больше отклоняется стрелка, преодолевая сопротивление пружины.

Действие воздушного успокоителя основано на использовании сопротивления воздуха, которое встречает подвижное легкое крыло, перемещающееся внутри закрытой коробки.

Действие магнитоиндукционного успокоителя основано на использовании вихревых токов. При движении алюминиевого сегмента успокоителя между полюсами постоянного магнита в нем индуктируются вихревые токи. Взаимодействие этих токов с полем магнита создает тормозной момент, обеспечивающий успокоение.

Приближенно можно считать, что сила, втягивающая сердечник, пропорциональна квадрату тока катушки измерительного механизма. Следовательно, в приборах электромагнитной си-

стемы отклонения стрелки пропорциональны квадрату тока:

$$\alpha = c \cdot I^2.$$

Отсюда следует, что шкала прибора должна быть квадратичной (деления сильно сжаты в начале и растянуты в конце шкалы). Такая шкала неудобна при измерениях. Поэтому путем подбора формы и расположения сердечника добиваются более равномерного расположения делений на шкале в её рабочей части (начиная с 20% номинального значения и выше).

При протекании по катушке переменного тока подвижный сердечник перемагничивается одновременно с изменением направления магнитного поля, и направление вращающего момента не меняется. Это видно также из формулы для угла отклонения стрелки: изменение знака тока не меняет знака угла отклонения. Следовательно, приборы этой системы пригодны как для постоянного, так и для переменного токов.

Приборы электромагнитной системы применяются в качестве амперметров и вольтметров.

Достоинства механизмов электромагнитной системы:

— простота и надежность конструкции;

— относительная дешевизна (на 30—40% дешевле магнитоэлектрических);

— малая чувствительность к перегрузкам;

— малая зависимость точности показаний от изменений температуры;

— пригодность для измерения переменных и постоянных токов.

Недостатки механизмов электромагнитной системы:

— низкая чувствительность и недостаточно высокая точность измерений;

— чувствительность к внешним магнитным полям, вносящим большую погрешность;

— неравномерность шкалы;

— большое потребление мощности.

Измерительный механизм электродинамической системы состоит из следующих частей:

а) неподвижной катушки;

б) подвижной катушки, закрепленной на оси и расположенной внутри неподвижной катушки;

в) стрелки и уравнивающих грузиков, закрепленных на оси;

г) двух спиральных пружин;

д) воздушного успокоителя.

Принцип действия механизма электродинамической системы основан на взаимодействии магнитных полей двух катушек, по которым протекает электрический ток.

При прохождении тока по обеим катушкам, соединенным последовательно или параллельно, подвижная катушка будет по-

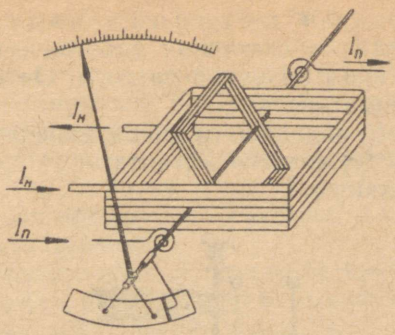


Рис. 134. Измерительный механизм электродинамической системы.

ворачиваться, преодолевая сопротивление пружин, стремясь встать так, чтобы направление ее магнитного поля совпало с направлением поля неподвижной катушки.

Таким образом, угол отклонения подвижной катушки и стрелки зависит от произведения токов, протекающих в обмотках катушек:

$$\alpha = k \cdot I_н I_п,$$

где $I_н$ — ток в неподвижной катушке.

$I_п$ — ток в подвижной катушке.

Приборы электродинамической системы применяются в качестве амперметров, вольтметров, ваттметров.

Для амперметров и вольтметров катушки соединяются последовательно; токи в катушках одинаковы $I_н = I_п$, поэтому отклонение стрелки пропорционально квадрату тока:

$$\alpha = k \cdot I^2,$$

Следовательно, шкалы амперметров и вольтметров квадратичны.

Приборы электродинамической системы пригодны для измерений в цепях постоянного и переменного токов. При одновременном изменении направления тока в обеих катушках направление вращающего момента остается неизменным.

Достоинства механизмов электродинамической системы:

— высокая точность;
— пригодность для постоянного и переменного токов;
— равномерность шкалы (для ваттметров).

Недостатки механизмов электродинамической системы:

— чувствительность к внешним магнитным полям;
— слабая перегрузочная способность;
— неравномерность шкалы у амперметров и вольтметров;
— большая потребляемая мощность;
— высокая стоимость.

Измерительный механизм индукционной системы используется в счетчиках электрической энергии для переменного тока промышленной частоты. Он состоит из:

а) двух электромагнитов;
б) алюминиевого подвижного диска, укрепленного на оси;
в) постоянного тормозного магнита;
г) счетного механизма.

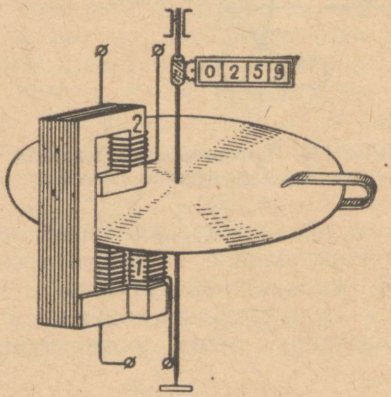


Рис. 135. Измерительный механизм индукционной системы (счетчик).

Катушка электромагнита *1* наматывается толстым проводом и имеет малое число витков. Её включают в цепь последовательно с нагрузкой и называют токовой.

Катушка электромагнита *2* наматывается тонким проводом и имеет большое число витков. Её включают параллельно нагрузке и называют катушкой напряжения.

Принцип действия:

1) переменные токи, протекающие по каждой обмотке, создают переменные магнитные потоки, которые образуют вращающееся магнитное поле;

2) переменные магнитные потоки, пронизывая алюминиевый диск, индуктируют в нем вихревые токи;

3) воздействие вращающегося магнитного поля на вихревые токи приводит диск во вращение;

4) ось диска через зубчатую передачу передает движение счетному механизму.

Воздействие магнитного поля на вихревые токи пропорционально произведению тока и напряжения. Следовательно, скорость вращения диска пропорциональна мощности потребителя, а число оборотов за какой-либо промежуток времени пропорционально израсходованной энергии.

Постоянный магнит, индуктируя также в диске вихревые токи, создает необходимое торможение диска, чтобы для каждой мощности была своя постоянная скорость вращения.

Достоинства механизмов индукционной системы:

— возможность перегрузок;

— малое собственное потребление мощности;

— прочность;

— сравнительно невысокая стоимость.

Недостатки механизмов:

— влияние температуры на точность измерений;

— невозможность использования одного прибора для измерения энергии при токах разной частоты.

Все показывающие измерительные механизмы имеют корректор для точной начальной установки стрелки на нулевое деление шкалы.

7. Измерение тока и напряжения

Для измерения величины тока служат: амперметры, миллиамперметры, микроамперметры.

Эти приборы включают в цепь последовательно, чтобы через них проходил весь измеряемый ток. С целью потребления наименьшей мощности они должны иметь возможно малое сопротивление.

Если измеряемый ток больше номинального тока прибора, для расширения пределов измерения амперметров применяют:

в цепях постоянного тока шунты;

в цепях переменного тока измерительные трансформаторы тока.

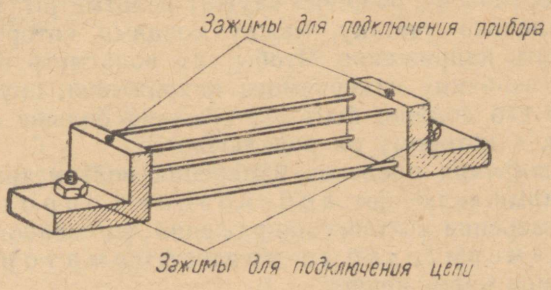


Рис. 136. Шунт.

Шунт представляет собой манганиновые пластины или стержни, впаянные в медные или латунные наконечники. Сопротивление шунта значительно меньше внутреннего сопротивления прибора.

Шунты включают в электрическую цепь последовательно, а параллельно им подключают прибор.

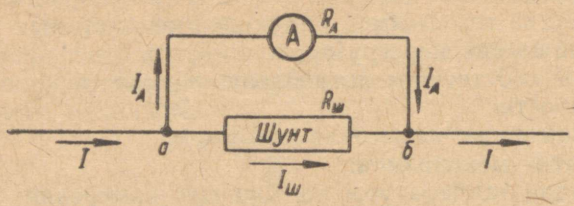


Рис. 137. Включение шунта.

Напряжение между точками *аб*:

$$U_{аб} = I_A \cdot R_A = I \cdot R_{экв} = I \cdot \frac{R_A \cdot R_ш}{R_A + R_ш}$$

$$I_A R_A = I \cdot \frac{R_A \cdot R_ш}{R_A + R_ш},$$

откуда

$$I = I_A \cdot \frac{R_A + R_ш}{R_ш} = I_A \cdot p,$$

где

$p = \frac{I}{I_A} = \frac{R_A + R_ш}{R_ш}$, — называемый коэффициентом шунтирования.

$$I = I_A \cdot p \quad а \quad \text{и} \quad R_ш = \frac{R_A}{p - 1} \quad ом.$$

Шунты на токи до 25—50 *а* обычно помещают в кожухе прибора, а на бо́льшие токи делают наружными.

Для измерения напряжения служат вольтметры. Их подключают параллельно участку, между концами которого необходимо измерить напряжение. Чтобы сам вольтметр не оказывал влияния на величину измеряемого напряжения, внутреннее сопротивление его должно быть значительно больше сопротивления участка, к которому он подключается.

Для расширения пределов измерения вольтметров последовательно с ними включают добавочное сопротивление или (для измерения высоких напряжений переменного тока) используют измерительные трансформаторы.

Измеряемое напряжение:

$$U = U_{доб} + U_v,$$

или

$$U = I_v (R_v + R_д) \quad в,$$

где R_v — сопротивление вольтметра;
$R_д$ — добавочное сопротивление;
I_v — ток, проходящий через вольтметр.

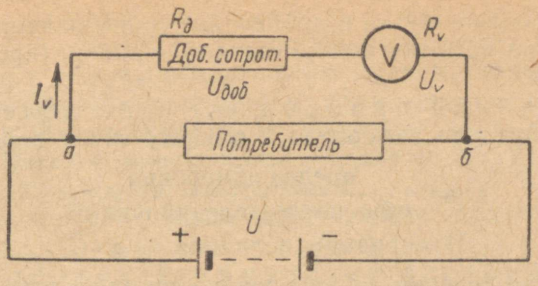


Рис. 138. Включение добавочного сопротивления.

Показание вольтметра при этом будет:

$$U_v = I_v R_v.$$

Величину $\frac{U}{U_v} = p_д$ называют коэффициентом добавочного сопротивления.

$$U = U_v \cdot p_д \ в; \quad R_д = R_v (p_д - 1) \ ом.$$

Амперметры и вольтметры могут иметь шунты и добавочные сопротивления: однопредельные и многопредельные.

Подключение нескольких шунтов или добавочных сопротивлений позволяет использовать один и тот же прибор на несколько пределов измерений.

Чем больше измеряемый ток, тем меньше сопротивление шунта.

Чем больше измеряемое напряжение, тем больше добавочное сопротивление.

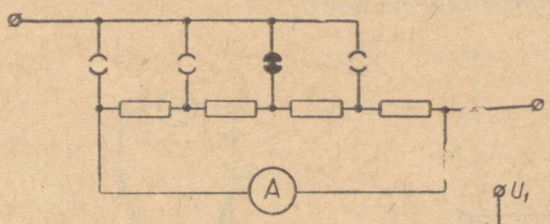


Рис. 139. Амперметр с многопредельным шунтом.

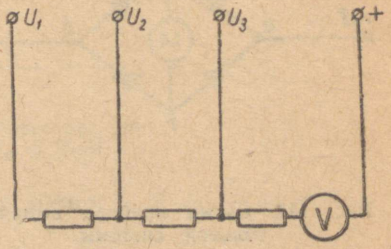


Рис. 140. Вольтметр с многопредельным добавочным сопротивлением.

Сопротивление шунта и добавочное сопротивление подбирают так, чтобы по обмотке измерительного прибора проходил номинальный ток.

Постоянная прибора, или цена деления, — это отношение предела измерения к общему числу делений шкалы:

$$C = \frac{\text{предел измерения}}{\text{общ. число делений шкалы}}$$

$$\text{Измеряемая величина} = a \cdot C,$$

где a — число делений, на которое отклонилась стрелка прибора.

Для измерения тока и напряжения в цепях постоянного тока пользуются приборами магнитоэлектрической системы, однако они непригодны для непосредственных измерений в цепях переменного тока, т. к. отклонения стрелки пропорциональны первой степени тока:

$$a = c \cdot i.$$

Для непосредственного измерения тока и напряжения в цепях переменного тока применяют приборы электромагнитной и электродинамической систем, в которых отклонения стрелки пропорциональны квадрату тока:

$$a = c \cdot i^2.$$

Поэтому, независимо от направления тока, стрелка прибора будет всегда отклоняться в одну сторону. Эти приборы показывают действующие значения тока и напряжения.

Примечание. Приборы электромагнитной и электродинамической систем могут применяться и в цепях постоянного тока.

В цепях переменного тока могут также применяться:
приборы выпрямительной (детекторной) системы;
приборы термоэлектрической системы.

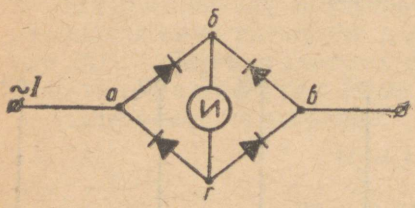


Рис. 141. Схема прибора выпрямительной системы.

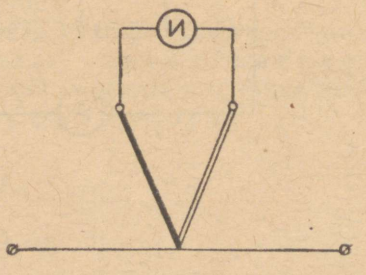


Рис. 142. Схема прибора термоэлектрической системы.

Приборы выпрямительной системы (рис. 141) представляют собой сочетание магнитоэлектрического измерительного прибора с полупроводниковыми выпрямителями.

В течение одного полупериода ток идет в направлении *а—б—г—в*; в течение другого полупериода — в направлении *в—б—г—а*. Через измерительный механизм ток в течение периода проходит в одном направлении.

На шкале прибора наносят действующие значения напряжения или тока.

Приборы термоэлектрической системы (рис. 142) представляют собой сочетание магнитоэлектрического измерительного прибора с термопреобразователем.

Если сварить концы проводников из разных металлов (например, железо и константан), а затем нагреть место сварки, то на других концах проводников появится разность потенциалов, зависящая от температуры нагрева. Такие проводники носят название термопары. Термопару приваривают или припаивают к нити, по которой проходит измеряемый ток. К свободным концам термопары подключают магнитоэлектрический прибор, на шкале последнего наносят действующие значения тока или напряжения.

8. Измерение сопротивлений

Измерение сопротивлений производят:
— методом амперметра и вольтметра;
— с помощью омметров и мегомметров;
— с помощью измерительных мостов.

Метод амперметра и вольтметра основан на использовании закона Ома:

$$R_x = \frac{U}{I} \text{ ом.}$$

Возможные схемы включения амперметра и вольтметра:

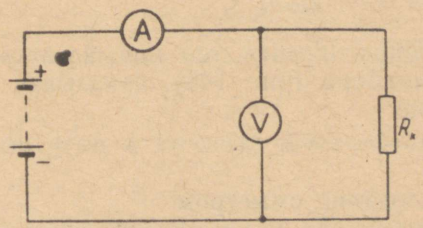


Рис. 143. Схема соединения при малой величине $R_x (R_x \ll R_V)$.

Здесь амперметр измеряет сумму токов I_V и I_{Rx}, где током I_V можно пренебречь.

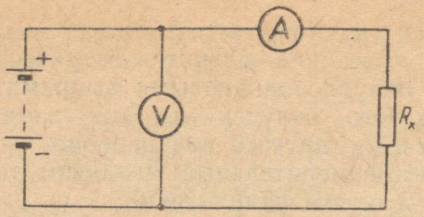


Рис. 144. Схема соединения при большой величине $R_x (R_x \gg R_A)$.

Здесь вольтметр измеряет суммарное напряжение U_A и U_{R_x}, где напряжением U_A можно пренебречь.

Определение сопротивлений методом амперметра и вольтметра применяют тогда, когда большой точности не требуется.

Омметр и мегомметр — приборы для непосредственного измерения сопротивлений.

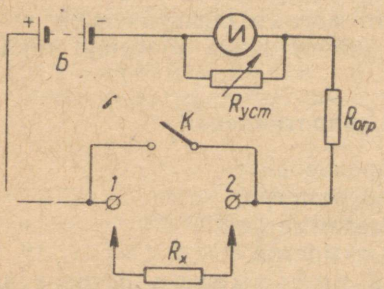


Рис. 145. Типовая схема омметра: *Б* — источник тока; *И* — магнитоэлектрический измерительный прибор; $R_{огр}$ — ограничительное сопротивление; $R_{уст}$ — реостат для установки стрелки на «0»; R_x — измеряемое сопротивление; *К* — кнопка.

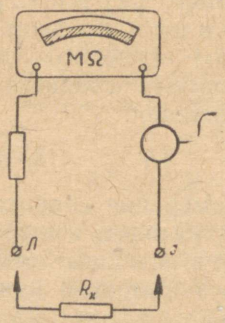


Рис. 146. Схема мегомметра.

Чем больше сопротивление, тем меньше отклоняется стрелка измерительного прибора (рис. 145), показывая на шкале бо́льшее сопротивление.

Примечание. «0» шкалы находится в месте максимального отклонения стрелки.

Правила пользования омметром:

1) нажать кнопку «*К*» и установить стрелку на нуль с помощью реостата $R_{уст}$;

2) отпустить кнопку «*К*» и подключить к зажимам *1* и *2* измеряемое сопротивление;

3) произвести отсчет величины измеряемого сопротивления по шкале прибора.

Мегомметры служат для измерений больших сопротивлений: изоляции между проводами, между проводом и землей и т. д.

Мегомметр (рис. 146) состоит из двух частей:

измерительного устройства магнитоэлектрической системы;

источника электрической энергии — генератора постоянного тока с ручным приводом.

Наиболее распространенным является мегомметр типа М-1101. Он имеет две шкалы (на 2 и 100 *Мом*) и переключатель для перехода с одной шкалы на другую. Генератор этого прибора при вращении рукоятки с постоянной скоростью 2 *об/сек* развивает напряжение порядка 500 *в*.

Порядок пользования прибором:

1) переключателем выбрать нужную шкалу;

2) подключить измеряемое сопротивление к зажимам прибора;

3) вращать рукоятку прибора со скоростью 2 *об/сек* и произвести отсчет измеряемой величины на шкале прибора.

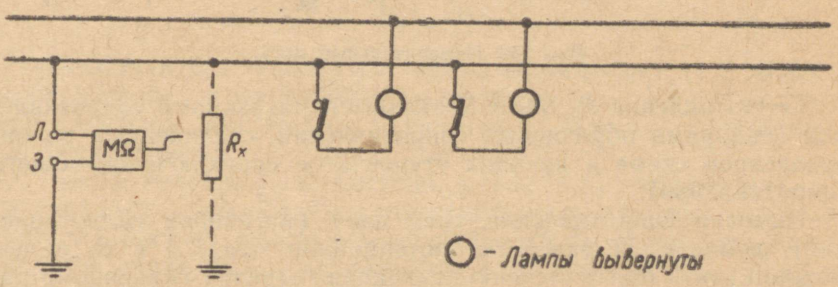


Рис. 147. Схема для измерения сопротивления изоляции провода относительно земли.

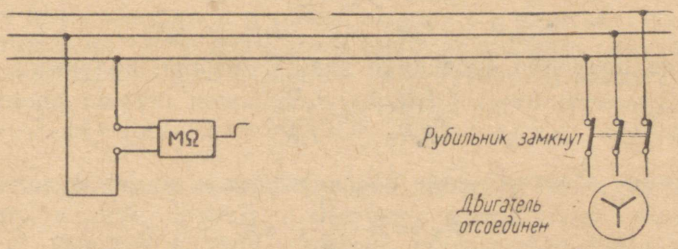


Рис. 148. Схема для измерения сопротивления изоляции между проводами.

Электротехнические правила для установок низкого напряжения требуют, чтобы сопротивление изоляции участка сети, расположенного между двумя, следующими друг за другом пре-

дохранителями не опускалось ниже 1000 *ом* на каждый вольт рабочего напряжения. Например, для сети с напряжением 380 *в* сопротивление должно быть не менее $1000 \cdot 380 = 380\,000$ *ом* = = 380 *ком*.

Измерительные мосты применяют в тех случаях, когда требуется высокая точность измерения сопротивлений.

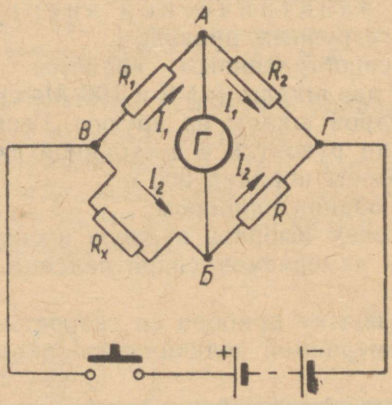


Рис. 149. Измерительный мост.

Сопротивления R_1, R_2 и R являются магазинами сопротивлений (наборами образцовых сопротивлений, соединенных по определенной схеме и дающих ступенчатое переключение общего сопротивления).

Изменяя сопротивления трех плеч (магазинов сопротивлений), добиваются равенства потенциалов точек A и B, о чем можно судить по отсутствию отклонения стрелки гальванометра.

В этом случае:

$$U_{ВА} = U_{ВБ} \quad \text{и} \quad U_{АГ} = U_{БГ}$$

или

$$I_4 R_1 = I_2 R_x \quad \text{и} \quad I_1 R_2 = I_2 R.$$

Разделив почленно последние два уравнения, получим:

$$\frac{I_1 R_1}{I_1 R_2} = \frac{I_2 R_x}{I_2 R}.$$

Искомое сопротивление подсчитывается по формуле:

$$R_x = R \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad ом.$$

9. Измерение мощности

Мощность цепи можно определить: с помощью амперметра и вольтметра; с помощью электродинамического ваттметра.

Для определения мощности посредством амперметра и вольтметра показания приборов необходимо перемножить:

а) для цепей постоянного тока полезная мощность:

$$P = U \cdot I \text{ вт};$$

б) для цепей переменного тока полная (кажущаяся) мощность:

$$S = U \cdot I \text{ ва}.$$

Для определения мощности посредством электродинамического ваттметра последний включается в цепь по следующей схеме:

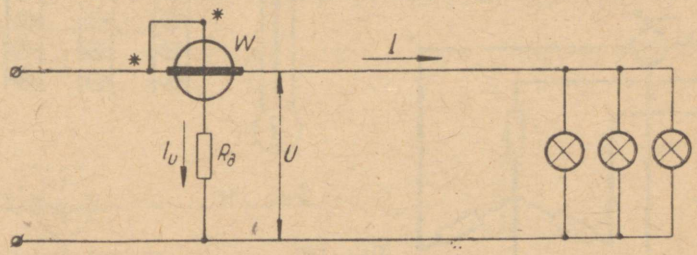


Рис. 150.

Неподвижная, токовая, катушка включается в цепь последовательно с потребителями, а подвижная, катушка напряжения, включается параллельно (вместе с добавочным сопротивлением).

Ток в неподвижной катушке равен току потребителя, а в подвижной — пропорционален напряжению на зажимах потребителя. Поэтому угол отклонения стрелки будет пропорционален произведению тока и напряжения, т. е. мощности, и шкала прибора градуирована непосредственно в ваттах.

При включении ваттметра в цепь переменного тока мгновенный угол поворота стрелки пропорционален произведению мгновенных значений токов в обеих катушках, но вследствие быстрых изменений токов подвижная система прибора повернется на угол, пропорциональный средней (или активной) мощности. Следовательно, по углу поворота подвижной части ваттметра можно судить о величине активной мощности, потребляемой цепью.

Ваттметр имеет четыре зажима. К двум выводят токовую катушку, к двум другим — катушку напряжения. Зажимы, к которым выводят начала катушек, обозначают звездочками и называют генераторными зажимами. Они должны быть присоединены к одному проводу всегда со стороны источника тока.

Измерение активной мощности в цепях трехфазного тока производят:

1. При четырехпроводной системе:

а) тремя ваттметрами (рис. 151), соединенными так, чтобы каждый из них измерял мощность отдельной фазы.

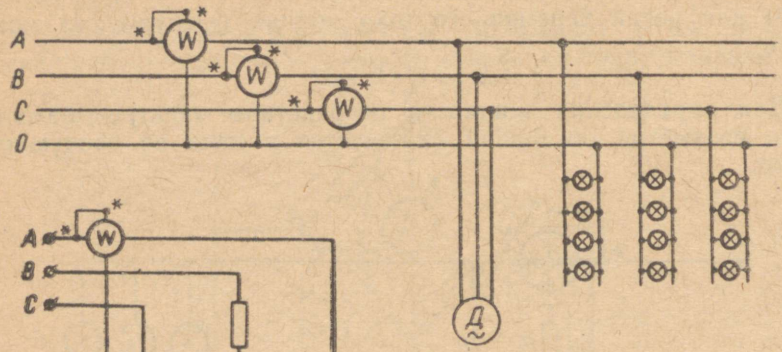


Рис. 151.

Рис. 152.

Активная мощность трех фаз равна сумме показаний ваттметров:

$$P = P_A + P_B + P_C \ вт;$$

б) трехэлементным ваттметром, состоящим из трех неподвижных и трех подвижных катушек, укрепленных на одной оси с указательной стрелкой. Схема соединения такая же, как и при трёх ваттметрах. На шкале ваттметра наносят значения активной мощности всех трех фаз;

в) одним ваттметром (рис. 152) — при равномерной нагрузке фаз.

Ваттметр измеряет активную мощность одной фазы $P_ф$.

Мощность трех фаз:

$$P = 3P_ф \ вт.$$

2. При трехпроводной системе:

а) схемой двух ваттметров (рис. 153).

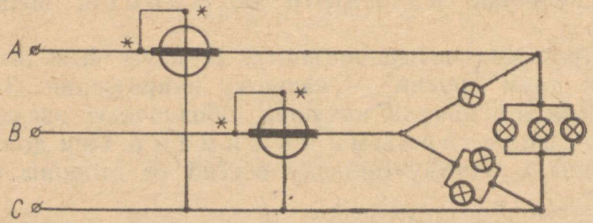


Рис. 153.

Токовые катушки включают последовательно в два линейных провода. Катушки напряжения соединяют одним концом с генераторным зажимом токовой катушки, а другим — с оставшимся свободным линейным проводом.

Активная мощность трехфазной цепи равна сумме показаний обоих ваттметров:

$$P = P_1 + P_2 \ вт;$$

б) двухэлементным ваттметром, имеющим две неподвижные и две подвижные катушки, укрепленные на одной оси со стрелкой. Схема соединения такая же, как и при двух ваттметрах. На шкале ваттметра наносят значения мощности трехфазной цепи;

в) одним ваттметром — при равномерной нагрузке фаз.

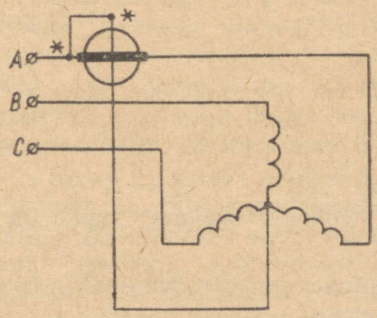


Рис. 154. Измерение мощности двигателя при соединении звездой.

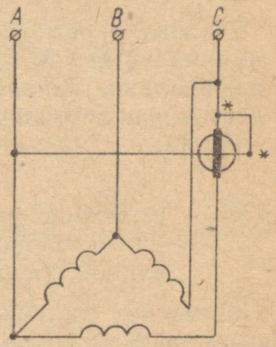


Рис. 155. Измерение мощности двигателя при соединении треугольником.

Мощность трехфазной цепи равна утроенному показанию ваттметра:

$$P = 3P_ф \ вт.$$

10. Измерение электрической энергии

Электрическую энергию учитывают счетчиком энергии.

В настоящее время для цепей постоянного тока применяют электродинамические счетчики и для цепей переменного тока — индукционные.

Электрические счетчики представляют собой суммирующие приборы. Угол поворота их подвижной части не ограничивается пружиной. С течением времени угол поворота нарастает, а показание счетчика суммируется. Израсходованная энергия (*квт.ч*) регистрируется счетным механизмом.

Схемы включения счетчиков электрической энергии в сеть не отличаются от схем включения ваттметров.

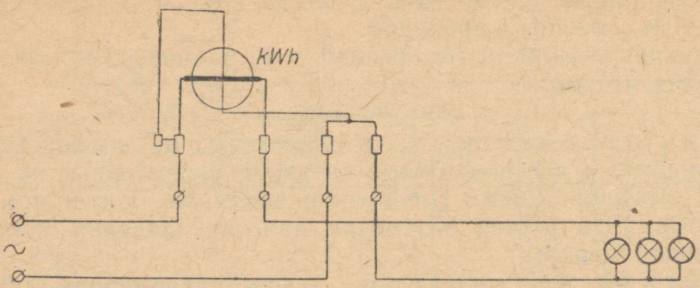


Рис. 156. Схема включения однофазного счетчика.

Основные параметры счетчика:
номинальный ток $I_н$;
номинальное напряжение $U_н$;
постоянная счетчика:

$$k = \frac{W}{N},$$

где W — израсходованная энергия;
N — число оборотов диска, соответствующее израсходованной энергии.

Постоянная счетчика численно равна израсходованной в сети энергии за время одного оборота диска.

Для измерения электрической энергии в цепях трехфазного тока применяют:

При четырехпроводной системе:
трехэлементный счетчик, имеющий три электромагнитных системы (такие же, как у однофазного счетчика), и три диска, укрепленные на одной оси.

При трехпроводной системе:
двухэлементный двухдисковый или однодисковый счетчик.

11. Измерение электрическими методами неэлектрических величин

Сущность измерения неэлектрических величин (температуры, давления, скорости, усилия и т. п.) заключается в том, что они преобразуются в зависимые от них электрические величины, измеряя которые определяют искомые величины.

Устройство для измерения неэлектрических величин состоит из:

а) преобразователя (датчика);

б) измерительного механизма, на шкале которого наносят значения измеряемой величины;

в) промежуточных устройств (провода, источники питания, выпрямители, усилители и др.).

Преобразователь может быть:

— параметрическим, где неэлектрическая величина преобразуется в один из электрических параметров:

а) сопротивление постоянному току R;

б) сопротивление переменному току r, x_L или x_C;

— генераторным, где неэлектрическая величина преобразуется в э. д. с.

Параметрические преобразователи по принципу действия подразделяются на следующие группы:

реостатные преобразователи, где неэлектрическая величина, воздействуя через движок на реостат, устанавливает соответствующее сопротивление. Применяются для измерения объема и уровня жидкости, перемещения деталей и т. п.;

преобразователи контактного сопротивления, где используется зависимость сопротивления (например, столбика угольных шайб) от сжатия. Применяются для измерения давления, деформации и т. д.;

проволочные преобразователи, действие которых основано на изменении сопротивления проволоки при ее деформации. Для этого тонкая проволока (константан, нихром), изогнутая змейкой, закрепляется клеем между двумя листочками бумаги и приклеивается к испытуемой детали. По изменению сопротивления проволоки можно определить степень деформации детали;

преобразователи-термосопротивления, где используется зависимость температуры провода и его сопротивления от причин, влияющих на отдачу тепла в окружающую среду: размеров и конфигурации провода, скорости движения среды, в которой находится провод, ее состава и др. Применяются для измерения температуры, скорости, плотности и состава газовой среды по изменению сопротивления провода;

электролитические преобразователи, где используется зависимость электрического сопротивления раствора электролита от его концентрации. Применяются для измерения концентрации растворов электролитов и количественного анализа жидкостей и газов, растворимых в жидкостях. Во избежание электролиза измерение производится на переменном токе;

индуктивные преобразователи, где используется изменение индуктивности катушки, а значит и ее полного сопротивления, от перемещения сердечника или изменения воздушного зазора магнитопровода. Применяются для измерения силы, давления, линейного перемещения;

магнитоупругие преобразователи, где используется зависимость магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника катушки, а следовательно ее индуктивного и полного сопротивлений, от механических напряжений, действующих на сердечник. Применяются для измерения механических величин;

емкостные преобразователи, где используется зависимость ёмкости и ёмкостного сопротивления от площади электродов, их формы, расстояния между ними, а также от размеров диэлектрика и его диэлектрической проницаемости. Применяются при измерении силы, давления, линейного перемещения, угла поворота, количества вещества, содержания влаги;

фотоэлектронные преобразователи, где используется зависимость тока от светового потока. Применяются для измерения линейных размеров, температуры, прозрачности жидкостей и газов;

ионизационные преобразователи, где используется зависимость ионизационного тока от состава, плотности и толщины слоя газов и твердых тел. Применяются для анализа газов и определения геометрических размеров изделий.

Генераторные преобразователи по принципу действия делятся на следующие группы:

индукционные преобразователи, где неэлектрическая величина индуктирует э. д. с., например путем вращения якоря электрогенератора, вращения постоянного магнита, создающего в поворотном диске э. д. с. и вихревые токи, и т. д. Применяются для измерения скорости, линейных или угловых перемещений;

термоэлектрические преобразователи, где используется явление возникновения термо-э. д. с. под действием температуры. Применяются для измерения температуры;

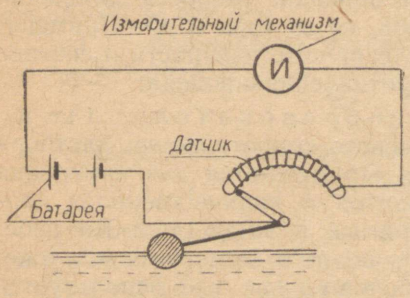


Рис. 157. Схема уровномера с реостатным датчиком (параметрический преобразователь).

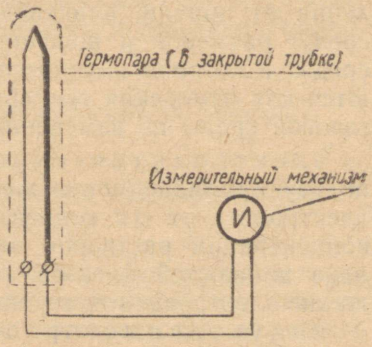


Рис. 158. Схема термоэлектрического измерителя температуры-пирометра (генераторный преобразователь).

пьезоэлектрические преобразователи, где используется пьезоэлектрический эффект, т. е. возникновение э. д. с. в некоторых кристаллах (например, кварц) под действием механических сил. Применяются для измерений этих сил, давлений и геометрических размеров изделий.

Примеры использования преобразователей приведены на рис. 157 и 158.

При повышении уровня жидкости поплавок уменьшает сопротивление датчика, и стрелка измерительного механизма отклоняется на больший угол.

Нагревание рабочего конца термопары (рис. 158) вызывает термо-э. д. с. и ток в цепи измерительного механизма. По отклонению стрелки судят о величине температуры. С целью устранения влияния температуры свободных концов проводов термопары на показания измерительного механизма они часто помещаются в термостат с постоянной температурой.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ТЕМЕ VII

1. Что понимают под электрическими измерениями и какова роль электроизмерительной техники?
2. В чем заключается поверка электрических приборов?
3. Какие требования предъявляются к измерительным приборам?
4. Чем могут быть обусловлены погрешности при электрических измерениях?
5. Как подразделяют инструментальную погрешность прибора?
6. Что называется абсолютной погрешностью прибора?
7. Что называется относительной погрешностью прибора?
8. Что называется приведенной погрешностью прибора?
9. Как разделяются приборы на классы точности?
10. Как подразделяются электроизмерительные приборы по принципу действия?
11. Как устроен измерительный механизм магнитоэлектрической системы?
12. Расскажите о принципе действия измерительного механизма магнитоэлектрической системы.
13. Каковы достоинства и недостатки механизма магнитоэлектрической системы?
14. Как устроен измерительный механизм электромагнитной системы?
15. Расскажите о принципе действия измерительного механизма электромагнитной системы.
16. Каковы достоинства и недостатки механизма электромагнитной системы?
17. Как устроен измерительный механизм электродинамической системы?
18. Расскажите о принципе действия измерительного механизма электродинамической системы.
19. Каковы достоинства и недостатки механизма электродинамической системы?

20. Как устроен измерительный механизм индукционной системы?

21. Расскажите о принципе действия измерительного механизма индукционной системы.

22. Каковы достоинства и недостатки механизма индукционной системы?

23. Какими приборами измеряется величина тока и напряжения и как они включаются в цепь?

24. Какими способами можно расширить пределы измерения амперметров и вольтметров?

25. Что называется коэффициентом шунтирования? Как производится расчет шунта к амперметру?

26. Что называется коэффициентом добавочного сопротивления? Как производится расчет добавочного сопротивления к вольтметру?

27. Для чего применяются многопредельные шунты и добавочные сопротивления?

28. Почему магнитоэлектрический прибор непригоден для непосредственного измерения переменного тока?

29. Почему приборы электромагнитной и электродинамической системы могут измерять переменный ток?

30. Начертите схему включения магнитоэлектрического прибора с выпрямителем для измерения переменного тока.

31. По какому принципу работает термоэлектрический амперметр?

32. Начертите схемы для измерения сопротивлений методом амперметра и вольтметра.

33. Начертите схему омметра и изложите порядок измерения сопротивлений.

34. Начертите схемы присоединения мегомметра для измерения сопротивления изоляции сети.

35. Можно ли измерять мегомметром сопротивление изоляции сети, находящейся под напряжением?

36. Почему при измерении изоляции сети мегомметром лампы должны быть вывернуты и проводники, подходящие к двигателю, отсоединены от зажимов, а включатели и пусковые аппараты должны находиться во включенном положении?

37. Сопротивление изоляции сети с рабочим напряжением 380 *в* равно 300 000 *ом*. Удовлетворяет ли нормам такая изоляция?

38. Изложите порядок измерения сопротивлений с помощью моста.

39. Как можно измерить мощность цепи постоянного и переменного тока?

40. Начертите схему включения электродинамического ваттметра.

41. Какую мощность измеряет электродинамический ваттметр в цепи переменного тока?

42. Как измеряется активная мощность в цепях трехфазного тока при четырехпроводной системе?

43. Как измеряется активная мощность в цепях трехфазного тока при трехпроводной системе?

44. Начертите схему включения индукционного счетчика.

45. Из каких частей состоит устройство для измерения неэлектрических величин?

46. Укажите принципиальное различие параметрического и генераторного датчиков.

47. Как подразделяются параметрические датчики по принципу действия?

48. Как подразделяются генераторные преобразователи по принципу действия?

49. Изложите по чертежу принцип работы уровнемера с использованием реостатного датчика.

50. Из каких элементов состоит термоэлектрический пирометр?

ТЕМА VIII

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Общие сведения об асинхронных двигателях

Асинхронный двигатель изобретен в 1889 г. русским ученым М. О. Доливо-Добровольским.

Асинхронный трехфазный двигатель — самый распространенный в промышленности и в сельском хозяйстве. Около 95% всех электродвигателей — асинхронные.

Достоинства асинхронных двигателей:

— простота устройства;
— дешевизна;
— высокий к. п. д.;
— большая надежность в работе;
— простота обслуживания.

Принцип действия асинхронных двигателей основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля, создаваемого в трехфазной обмотке статора, и проводников с током, из которых состоит обмотка ротора.

Название асинхронный обусловлено тем, что ротор всегда вращается со скоростью, не равной скорости магнитного потока статора, т. е. не синхронно с ним.

Асинхронные двигатели изготовляются на мощности от нескольких долей ватта до тысяч киловатт.

2. Устройство трехфазного асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель состоит из двух основных частей:

статора — неподвижной части, предназначенной для создания вращающегося магнитного поля;

ротора — вращающейся части двигателя.

Статор состоит из станины (чугунной, стальной или из алюминиевого сплава), в которую запрессован стальной сердечник. Сердечник, в виде пустотелого цилиндра, набирается из

отдельных листов электротехнической стали, изолированных между собой лаком. Внутри цилиндра выштампованы пазы, куда укладывают обмотку из медного изолированного провода. С обоих торцов станина закрывается подшипниковыми щитами.

Ротор представляет собой стальной, закрепленный на валу цилиндр, набранный из отдельных листов электротехнической стали. Листы покрыты изоляционным лаком. В пазах ротора помещается обмотка.

В зависимости от выполнения обмотки роторы бывают двух типов: короткозамкнутые и фазные.

Обмотка короткозамкнутого ротора выполняется из медных стержней, закладываемых в пазы ротора. Торцы стержней соединяются медными кольцами, образуя обмотку, называемую «беличьим колесом».

В двигателях небольшой мощности, до 100 *квт*, беличье колесо делается из алюминия, путем заливки его под давлением в пазы ротора.

Беличье колесо от стали не изолируют, т. к. проводимость обмотки в десятки раз больше проводимости стали.

Фазный ротор (с контактными кольцами) имеет трехфазную обмотку, соединяемую обычно звездой. Три свободных конца обмоток присоединяют к трем медным или стальным контактным кольцам, к которым прижимаются щетки, соединенные с пусковым реостатом. Фазные роторы применяют в электродвигателях большой мощности, когда требуется большое усилие при трогании с места.

Принципиальной особенностью асинхронных двигателей является то, что электрическое соединение с внешней сетью имеет только обмотка статора. Обмотка ротора с внешней сетью соединения не имеет.

Выводы обмоток статора асинхронных двигателей обозначаются:

Таблица 5

Фазы	Начала	Концы
1-я фаза	C_1	C_4
2-я фаза	C_2	C_5
3-я фаза	C_3	C_6

Обмотки двигателя могут быть соединены в звезду или в треугольник. Для удобства выводы обмоток присоединены к щитку зажимов по следующей схеме:

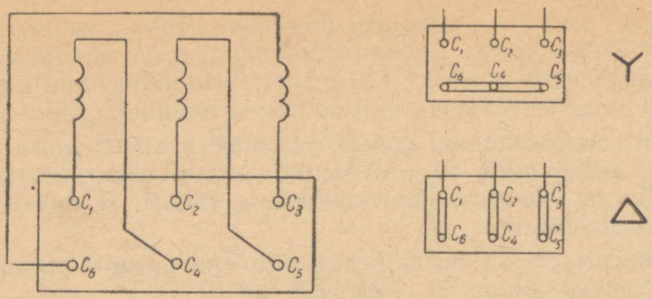


Рис. 159. Схемы соединения обмоток статора асинхронных двигателей.

3. Обмотка статора
Получение вращающегося магнитного поля

Обмотка статора состоит из ряда катушек, соединенных между собой.

Витки катушки изолированы между собой и от стенок паза.

Обмотка может выполняться сосредоточенной или распределенной.

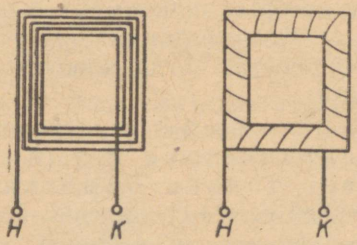


Рис. 160. Катушка обмотки статора:

Н — начало катушки; *К* — конец катушки.

В сосредоточенной обмотке сторона катушки полностью помещается в один паз, а вся катушка занимает два паза.

В распределенной обмотке каждая сторона катушки занимает несколько пазов.

Если по окружности статора размещены три катушки, то магнитное поле статора будет иметь одну пару полюсов ($p = 1$).

Если увеличить число катушек, размещенных по окружности статора, то увеличится и число пар полюсов. Так, если разместить три катушки на одной половине окружности статора и

три — на другой и соединить противоположные катушки последовательно, то получится четырехполюсный статор ($p=2$).

Если по три катушки разных фаз расположить на одной четверти окружности, то магнитное поле будет иметь 8 полюсов ($p=4$).

При подключении обмотки статора к трехфазной сети токи в катушках будут сдвинуты на $^1/_3$ периода. Эти токи образуют общее вращающееся магнитное поле. Чтобы в этом убедиться, рассмотрим магнитное поле в разные моменты времени на простейшем статоре.

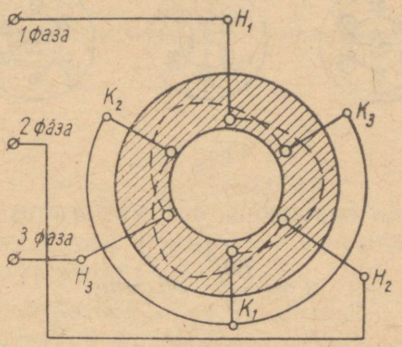


Рис. 161. Схема простейшего статора с тремя катушками и обмоткой, соединенной звездой.

На схеме каждая из обмоток изображена условно одним витком.

Для определения направления результирующего магнитного поля нанесем направления токов в фазных обмотках в различные моменты времени и определим направление поля по правилу буравчика (рис. 162).

Примечание. За положительное примем направление тока от начала к концу обмотки (катушки).

Из схемы видно, что:

а) внутри статора создается вращающееся магнитное поле, которое за один период изменения тока в обмотках делает один оборот;

б) когда ток в одной из катушек достигает максимального значения, направление вращающегося поля совпадает с направлением оси этой катушки.

Если увеличить количество катушек на статоре, то скорость вращения магнитного поля уменьшится, т. к. за один период изменения тока магнитное поле повернется на часть окружности, соответствующую углу между двумя одноименными полюсами.

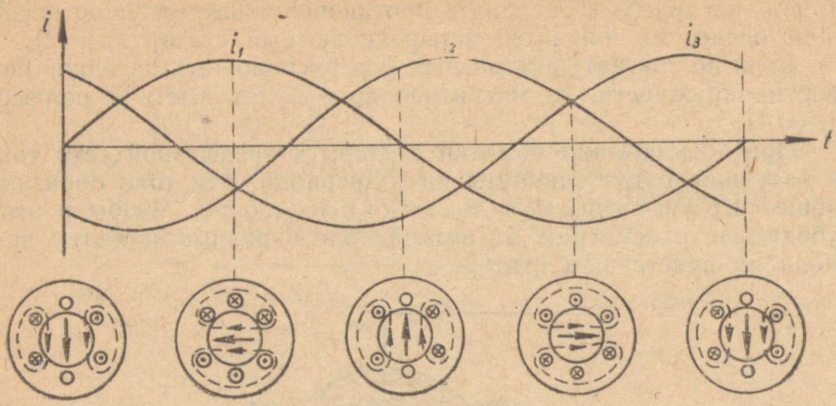


Рис. 162.

Число оборотов вращающегося магнитного поля можно вычислить по формуле:

$$n = \frac{60f}{p} \quad об/мин,$$

где p — число пар полюсов;
f — частота тока, *гц*.

Скорость вращения магнитного поля называется синхронной скоростью.

Таким образом, при частоте $f = 50$ *гц* синхронная скорость может быть:

при $p = 1$ (на статоре 3 катушки) — $n = 3000$ *об/мин*;
$p = 2$ (на статоре 2×3 катушки) — $n = 1500$ *об/мин*;
$p = 3$ (на статоре 3×3 катушки) — $n = 1000$ *об/мин*;
$p = 4$ (на статоре 4×3 катушки) — $n = 750$ *об/мин*.

Направление вращения магнитного поля можно определить, установив порядок чередования амплитуд тока в катушках. Для изменения направления вращения следует переключить две любые фазы.

4. Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя

В асинхронном двигателе происходят следующие явления:

1) вращающееся магнитное поле, созданное статором, пересекает проводники обмотки ротора;

2) в проводниках ротора индуктируется э. д. с., под действием которой в обмотке ротора протекает ток;

3) взаимодействие индуктированных в роторе токов с вра-

щающимся магнитным полем заставляет ротор вращаться в направлении вращения магнитного поля;

4) скорость вращения ротора будет всегда меньше скорости вращения магнитного поля, т. к. иначе не будет пересечения проводников ротора магнитными силовыми линиями и в них не появится э. д. с. и ток, который служит причиной вращения ротора.

5. Скольжение ротора

Скольжением (s) называется отставание ротора от поля статора.

Величина скольжения может быть определена из выражения:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

или

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%,$$

где n_1 — скорость поля статора;
n_2 — скорость ротора.

При неподвижном роторе $s = 1$, т. к. $n_2 = 0$.

При работе двигателя вхолостую $s \approx 0$, т. к. $n_2 \approx n_1$.

Число оборотов ротора n_2 при номинальной нагрузке указывают на заводском щитке двигателя. Величина скольжения асинхронных двигателей при номинальной нагрузке составляет $s = 0{,}01 \div 0{,}06$ или $s = 1 \div 6\%$. Чем больше мощность двигателя, тем меньше его скольжение при номинальной нагрузке.

6. Работа асинхронного двигателя при вращении ротора

При вращении ротора магнитный поток статора, обгоняя его со скоростью $n = n_1 - n_2$ *об/сек*, индуктирует в роторе э. д. с. и токи с частотой f_2.

Поэтому f_2 может быть определена из формулы:

$$f_2 = p \cdot n = p(n_1 - n_2) \quad гц.$$

Умножим и разделим правую сторону этого выражения на n_1. Получим:

$$f_2 = \frac{pn_1(n_1 - n_2)}{n_1} = sf_1 \quad гц.$$

Таким образом, частота э. д. с. и тока, индуктируемых в роторе вращающимся магнитным полем, равна частоте сети, умноженной на скольжение.

При пуске двигателя $s = 1$; $f_2 = f_1$.

При холостом ходе $s \approx 0$; $f_2 \approx 0$.

Вращающийся магнитный поток индуктирует:

а) в каждой фазе статора э. д. с.:

$$E = 4{,}44 f_1 w_1 \Phi_м k_1 \quad в;$$

б) в обмотке ротора, если ротор неподвижен:

$$E_2 = 4{,}44 f_1 w_2 \Phi_м k_2 \quad в;$$

в) в обмотке вращающегося ротора:

$$E_{2s} = 4{,}44 f_2 w_2 \Phi_м k_2 \quad в.$$

В этих выражениях k_1 и k_2 — обмоточные коэффициенты, учитывающие особенности распределенных обмоток.

Из двух последних выражений имеем:

$$\frac{E_{2s}}{E_2} = \frac{f_2}{f_1} = \frac{f_1 \cdot s}{f_1} = s,$$

откуда

$$E_{2s} = E_2 \cdot s \quad в,$$

т. е. э. д. с., индуктируемая во вращающемся роторе E_{2s}, равна э. д. с. неподвижного ротора E_2, умноженной на скольжение.

Чем быстрее вращается ротор, тем меньше э. д. с., индуктируемая в его обмотке.

Если $s = 1$, то $E_{2s} = E_2$.

При $s \approx 0$ $E_{2s} \approx 0$.

Реактивное сопротивление обмотки ротора:

а) при неподвижном роторе: $x_2 = \omega_1 L_2 = 2\pi f_1 \cdot L_2$ *ом*;

б) при вращающемся роторе: $x_{2s} = 2\pi f_2 \cdot L_2 = 2\pi f_1 s L_2$ *ом*.

Отсюда

$$\frac{x_{2s}}{x_2} = \frac{f_1 \cdot s}{f_1} = s$$

или

$$x_{2s} = x_2 \cdot s \quad ом,$$

т. е. реактивное сопротивление вращающегося ротора x_{2s} равно индуктивному сопротивлению неподвижного ротора x_2, умноженному на скольжение s.

При $s = 1$ реактивное сопротивление $x_{2s} = x_2$, т. е. наибольшее.

При $s \approx 0$ $x_{2s} \approx 0$.

Активное сопротивление ротора r_2 не зависит от частоты.

Ток в обмотке ротора по закону Ома равен:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} \quad а.$$

В начальный момент пуска двигателя I_2 наибольший (в 2—7 раз больше номинального), т. к. E_2 имеет максимальное значение. Этот ток отстает по фазе от E_2 на угол, близкий к 90°, т. к. реактивное сопротивление в 8—10 раз больше активного.

При вращении ротора уменьшаются E_{2s} и x_{2s}. Вследствие этого уменьшается ток I_2 и угол сдвига его фазы относительно э. д. с.

7. Вращающий момент двигателя

Вращающий момент асинхронного двигателя возникает благодаря взаимодействию тока ротора I_2 с вращающимся магнитным потоком.

Поскольку в механическую работу может быть превращена только активная мощность тока, в создании вращающего момента двигателя будет участвовать не весь ток I_2, а только его активная составляющая $I_2 \cos \varphi_2$.

Следовательно, вращающий момент:

$$M = C\Phi_м I_2 \cos \varphi_2 \text{ н.м},$$

где C — коэффициент, зависящий от конструкции двигателя.

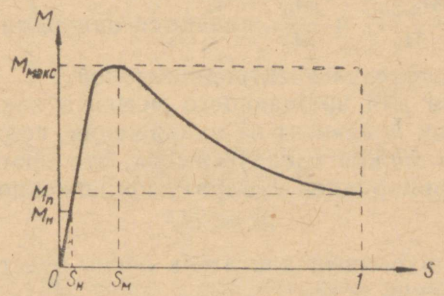


Рис. 163. Зависимость вращающего момента двигателя от скольжения.

Вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален магнитному потоку, току ротора и косинусу угла сдвига между э. д. с. и током ротора.

При увеличении скольжения величина тока в обмотке ротора увеличивается, а $\cos \varphi_2$ уменьшается. Поэтому с изменением скольжения вращающий момент изменяется, но не равномерно:

а) при незначительных скольжениях (до 20%) увеличение скольжения вызывает незначительное уменьшение $\cos \varphi_2$, так что I_2 увеличивается в большей мере. Поэтому вращающий момент увеличивается;

б) при больших скольжениях (более 20%) увеличение скольжения вызывает значительное уменьшение $\cos\varphi_2$. Величина тока I_2 увеличивается в меньшей степени, чем уменьшается $\cos\varphi_2$. Поэтому вращающий момент уменьшается.

При некотором скольжении $s_м \approx 0{,}2$ двигатель развивает максимальный момент.

Нормальная работа двигателя возможна только на участке кривой (рис. 163) при скольжении s от нуля до $s_м$, ибо в этом случае при увеличении нагрузки вращающий момент возрастает. На участке от $s = s_м$ до $s = 1$ работа двигателя неустойчива, т. к. при увеличении нагрузки скольжение увеличивается, а вращающий момент уменьшается.

Перегрузочной способностью асинхронного двигателя называется отношение максимального вращающего момента $M_{макс}$ к номинальному моменту $M_н$. Обычно

$$\frac{M_{макс}}{M_н} = 1{,}8 \div 2{,}5.$$

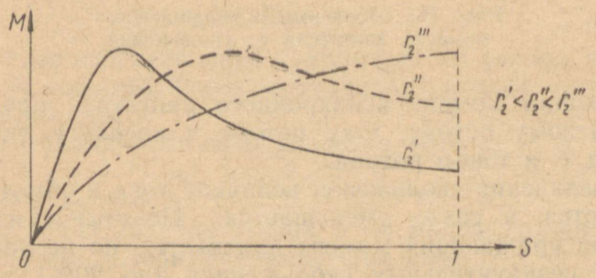
Кратность пускового момента — это отношение пускового вращающего момента $M_п$ к номинальному $M_н$. Обычно $\frac{M_п}{M_н} = 1 \div 2$.

Отношения $\frac{M_{макс}}{M_н}$ и $\frac{M_п}{M_н}$ являются важными параметрами и приводятся в каталогах электродвигателей.

В выражении для вращающего момента как магнитный поток $\Phi_м$, так и ток I_2 зависят от напряжения, подводимого к двигателю. Отсюда можно сделать вывод, что вращающий момент двигателя пропорционален квадрату приложенного напряжения:

$$M \equiv U_1^2.$$

Поэтому асинхронный двигатель очень чувствителен к колебаниям напряжения сети.



164. Зависимость вращающего момента от скольжения при различных активных сопротивлениях обмотки ротора.

Если увеличить активное сопротивление в роторе (например, включить в цепь его фазной обмотки реостат), то изменится зависимость вращающего момента от скольжения (рис. 164), т. к. $\cos \varphi_2$ и вращающий момент двигателя при тех же скольжениях станут больше.

Пусковой реостат включают в цепь ротора при пуске, а затем, как только двигатель увеличит скорость, выводят.

Увеличение пускового момента приводит к тому, что максимальный вращающий момент получается при большем скольжении (пунктирная кривая). Путем увеличения активного сопротивления цепи ротора можно добиться того, что максимальный вращающий момент будет при пуске (при $s = 1$).

Механической характеристикой двигателя называется зависимость скорости вращения ротора от вращающего момента:

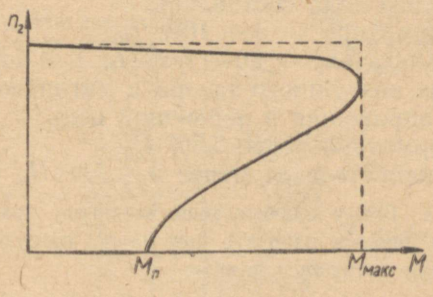


Рис. 165. Механическая характеристика двигателя.

Кривая $n_2 = f(M)$ может быть получена из кривой $M = f(s)$, т. к. скольжение обратно пропорционально n_2.

Зависимость вращающего момента от мощности на валу и скорости вращения ротора может быть выражена следующими формулами:

$$M_н = 975 \frac{P_н}{n_н} \text{ кгм}$$

или

$$M_н = 9{,}81 \cdot 975 \frac{P_н}{n_н} \text{ нм},$$

где $P_н$ — номинальная мощность на валу двигателя, *квт*;
$n_н$ — номинальная скорость вращения ротора, *об/мин*.

8. Асинхронный двигатель как трансформатор

Электромагнитные процессы в асинхронном двигателе аналогичны процессам, происходящим в трансформаторе. Обмотку статора можно рассматривать как первичную обмотку трансформатора, а обмотку ротора — как вторичную.

Различие в рабочих процессах трансформатора и асинхронного двигателя:

а) отдаваемая вторичной цепью энергия является:
в трансформаторе — электрической;
в электродвигателе — механической;

б) частота тока во вторичной цепи:
в трансформаторе постоянна и равна частоте тока в первичной цепи;
в электродвигателе изменяется при изменении нагрузки и не равна частоте тока в первичной цепи;

в) ток холостого хода составляет:
в трансформаторе — $3 \div 10\%$ $I_н$;
в электродвигателе — $20 \div 60\%$ $I_н$, т. е. значительно больше из-за наличия воздушного зазора в магнитной цепи;

г) падение напряжения в первичной цепи:
в трансформаторе менее $0{,}5\%$ $U_н$;
в электродвигателе не менее $2 \div 5\%$ $U_н$.

Примечание. Ввиду значительной величины тока холостого хода электродвигатель не должен работать при малых нагрузках — это создает большую индуктивную нагрузку для сети.

9. Пуск в ход трехфазных асинхронных двигателей

Пуск двигателей с короткозамкнутым ротором может осуществляться:
прямым включением в сеть (прямой пуск);
при пониженном напряжении.

Прямой пуск производится включением обмотки статора сразу на полное напряжение. Этот способ, простой и удобный в эксплуатации, является самым распространенным.

Недостатки прямого пуска:

— значительный пусковой ток ($4 \div 7$ $I_н$), т. к. в начальный момент пуска, когда скольжение $s = 1$, двигатель находится в режиме короткого замыкания. Большая величина пускового тока вызывает резкие колебания напряжения в сети, что плохо отражается на работе других потребителей;

— пусковой момент относительно мал: $M_п \approx 1 \div 2$ $M_н$.

Пуск при пониженном напряжении применяется для уменьшения пускового тока.

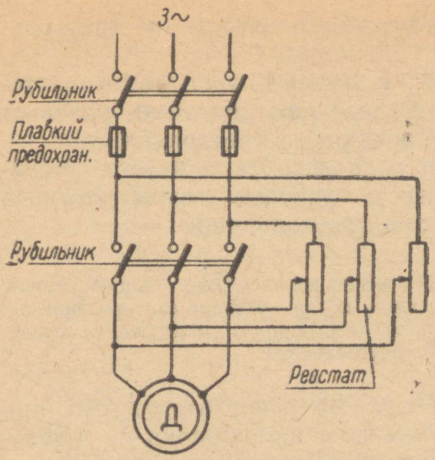


Рис. 166. Схема пуска двигателя с реостатом в цепи статора.

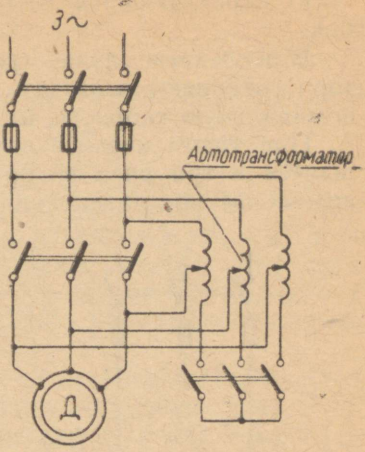


Рис. 167. Схема пуска двигателя с понижением напряжения автотрансформатором.

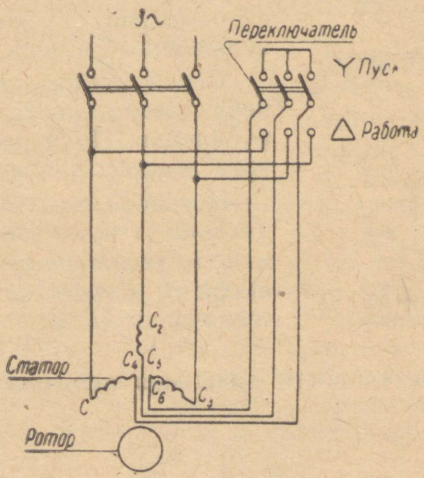


Рис. 168. Схема пуска двигателя переключением со звезды на треугольник.

Понижение напряжения на зажимах двигателя при пуске осуществляют:

а) введением в цепь статора пускового реостата;

б) включением статора через автотрансформатор или трансформатор;

в) переключением обмотки статора со звезды на треугольник.

В последнем случае (рис. 168) в момент пуска обмотки статора соединяют в звезду, а после того как двигатель разовьет номинальную скорость, их переключают на треугольник.

При таком способе величина пускового тока в сети уменьшается в три раза по сравнению с пусковым током, который возник бы при соединении обмоток треугольником.

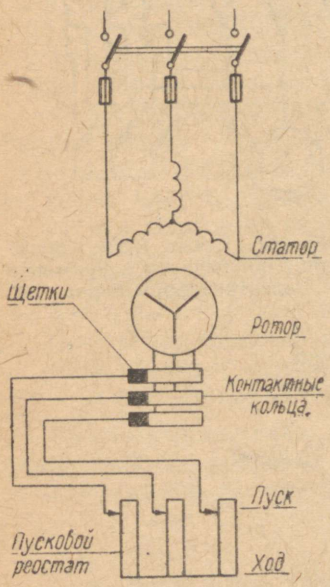


Рис. 169. Схема пуска двигателя с фазным ротором.

Примечание. Этот способ можно применять, когда обмотки статора при питании от сети данного напряжения соединены треугольником.

Основной недостаток пуска при пониженном напряжении — уменьшение вращающего момента двигателя, величина которого пропорциональна квадрату напряжения сети.

Пуск двигателя с фазным ротором осуществляется с помощью пускового реостата, включаемого в цепь ротора.

Перед пуском реостат вводят в цепь ротора, после чего замыкают рубильник. По мере разгона двигателя реостат плавно выводят.

Пусковой реостат в цепи ротора уменьшает пусковой ток и одновременно увеличивает пусковой вращающий момент двигателя (за счет увеличения $\cos\varphi$).

10. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя

Из формулы

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

имеем

$$n_2 = n_1(1 - s) \ об/мин$$

или

$$n_2 = \frac{60f_1}{p}(1 - s) \ об/мин,$$

где n_2 — скорость вращения ротора, *об/мин*;
n_1 — скорость вращения магнитного поля статора, *об/мин*;

f_1 — частота переменного тока, *гц*;
p — число пар полюсов двигателя;
s — скольжение.

Следовательно, скорость вращения асинхронных двигателей можно регулировать, изменяя:

— скольжение s;
— частоту f_1;
— число пар полюсов p.

Регулирование скорости изменением скольжения применяют в двигателях с фазным ротором. Для этого на место пускового реостата включают регулировочный реостат и, изменяя его сопротивление, регулируют скорость двигателя.

Отличие регулировочного реостата от пускового заключается в том, что он рассчитан на длительное прохождение тока.

При введении регулировочного реостата величина тока в роторе уменьшается. При этом уменьшается вращающий момент, и скольжение увеличивается. С увеличением скольжения ток в роторе возрастает, и момент снова увеличивается, пока не станет равным тормозному моменту.

Недостаток данного способа — в его неэкономичности, т. к. регулировочное сопротивление поглощает мощность, понижая к. п. д. двигателя.

Регулирование скорости изменением частоты переменного тока требует установки специального генератора (преобразователя частоты) на группу двигателей, скорость которых нужно одновременно и в одинаковой степени изменять, а также, когда необходимо получить высокие скорости (порядка 10000—24000 *об/мин*).

Регулирование скорости изменением числа пар полюсов обмотки статора является самым распространенным способом. Для этого на статоре размещают две обмотки с различным числом пар полюсов или одну обмотку, которая допускает переключение на разное число полюсов.

Изменение числа пар полюсов осуществляется изменением схемы соединения между собой катушек каждой фазы:

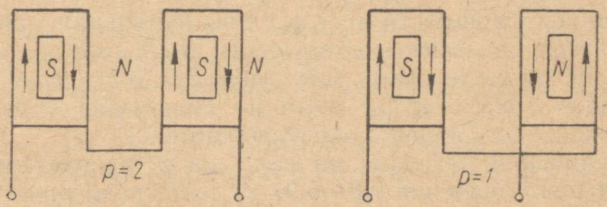


Рис. 170. Схема изменения числа пар полюсов обмотки статора.

На схеме (рис. 170) условно приведена одна фаза обмотки статора.

Этот способ применяется только у двигателей с короткозамкнутым ротором.

Регулирование скорости асинхронных двигателей весьма несовершенно и затруднительно, в чем их основной недостаток. В большинстве случаев асинхронные двигатели работают без регулирования скорости.

11. Потери энергии, к.п.д. и коэффициент мощности трехфазного асинхронного двигателя

В асинхронном двигателе имеют место следующие потери мощности:

а) потери в меди статора $P_{м1}$;

б) потери в стали статора $P_{ст1}$;

в) потери в меди ротора $P_{м2}$;

г) потери на трение $P_{тр}$.

Примечание. Потерями в стали ротора можно пренебречь, т. к. частота f_2 близка к нулю.

Подводимая к двигателю мощность

$$P_1 = \sqrt{3}\, U_1 I_1 \cos\varphi_1 \ вт.$$

Полезная (механическая) мощность на валу

$$P_2 = P_1 - (P_{м1} + P_{ст1} + P_{м2} + P_{тр}) \ вт.$$

К. п. д. асинхронного двигателя называют отношение механической мощности на валу двигателя P_2 к активной электрической мощности, потребляемой двигателем из сети.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} \cdot 100\%.$$

Величина к. п. д. асинхронных двигателей находится в пределах от 70—90% и выше, причем для более мощных двигателей к. п. д. выше.

Коэффициент мощности ($\cos\varphi_1$) при изменении нагрузки на валу двигателя изменяется следующим образом:

при холостом ходе $\cos\varphi_1$ мал (порядка 0,2), т. к. активная составляющая тока статора мала по сравнению с реактивной составляющей, создающей магнитный поток;

при увеличении нагрузки на валу $\cos\varphi_1$ возрастает (достигая наибольшего значения 0,8—0,9) за счет увеличения активной составляющей тока статора;

при перегрузке $\cos\varphi_1$ уменьшается.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя показывают зависимость:

скольжения s;

скорости вращения n_2;

развиваемого момента M;

потребляемого тока I_1;

коэффициента мощности $\cos\varphi_1$;

к. п. д. η

от полезной мощности P_2 при постоянных значениях напряжения $U_1 = \text{const}$ и частоты сети $f_1 = \text{const}$.

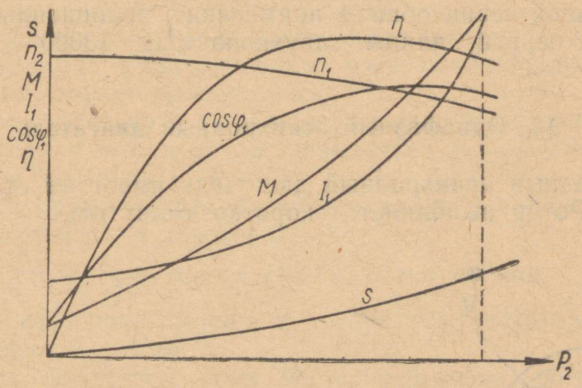


Рис. 171. Рабочие характеристики асинхронного двигателя.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя n_2, η, I_1 и $M = f(P_2)$ сходны с характеристиками двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.

12. Технические данные трехфазных асинхронных двигателей

В СССР выпускается единая серия трехфазных асинхронных двигателей — А2. В нее входят двигатели мощностью от 0,6 до 100 *квт*. Все двигатели этой серии выполняются с короткозамкнутым ротором, имеющим обмотку из алюминия.

Обозначения разновидностей серии:

АЛ2 — корпус из алюминиевого сплава (при малых мощностях);

АО2 — двигатель закрытой конструкции с обдувом внешней ребристой поверхности статора посредством вентилятора, укрепленного на валу;

АОЛ2 — то же, но при изготовлении корпуса из алюминиевого сплава.

Единая серия асинхронных электродвигателей изготовляется на 9 габаритов с 18 ступенями мощностей на номинальные напряжения 220, 380 и 500 *в* с номинальной скоростью вращения 600, 750, 1000, 1500 и 3000 *об/мин*.

В обозначениях единой серии электродвигателей число после первого тире обозначает типоразмер: первая цифра этого числа — порядковый номер наружного диаметра сердечника статора (габарит), вторая — порядковый номер длины электродвигателя; цифра после второго тире указывает число полюсов обмотки статора.

Например, А2-61-2 означает трехфазный асинхронный двигатель единой серии общего применения, защищенный, шестого габарита, первой длины, двухполюсный (3000 синхронных *об/мин*).

13. Однофазный асинхронный двигатель

Однофазный асинхронный двигатель имеет на статоре одну обмотку. Ротор выполняется короткозамкнутым.

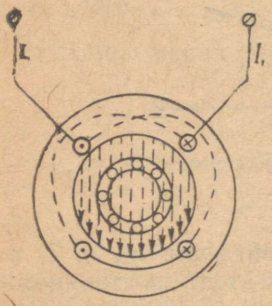


Рис. 172. Схема однофазного асинхронного двигателя.

Переменный ток I_1, проходящий по обмотке статора, вызывает пульсирующее (неподвижное в пространстве) магнитное поле, которое не создает пускового момента. Поэтому ротор не может начать вращаться самостоятельно. Если же ротор двигателя раскрутить с помощью посторонней силы, двигатель будет вращаться и может быть нагружен.

Это объясняется следующим.

Переменное пульсирующее магнитное поле Φ можно заменить двумя, равными по величине и вращающимися в разные стороны со скоростью $n = \pm \frac{60f_1}{p}$ *об/мин*, полями:

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{\Phi_м}{2}.$$

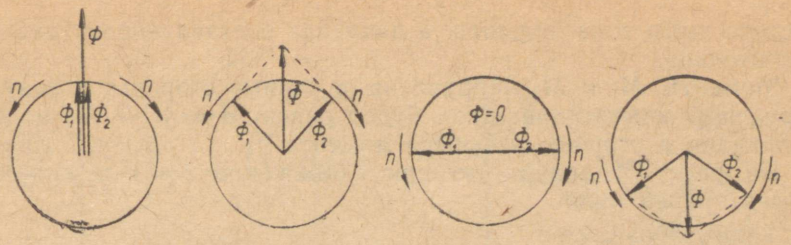


Рис. 173. Разложение пульсирующего поля на две составляющие.

При неподвижном роторе вращающие моменты, создаваемые этими полями, будут взаимно равны и противоположны. Поэтому двигатель не сможет развернуться.

Если ротор заставить вращаться, то одно поле, вращающееся в ту же сторону, что и ротор, называется прямым полем, второе — обратным.

Скорость прямого поля Φ_1 относительно ротора равна разности скоростей поля и ротора:

$$n_1 - n_2 = n_1 - n_1(1 - s) = n_1 s \ об/мин.$$

Прямое поле индуктирует в роторе ток частотой $f_2 = s \cdot f_1$, т. е. примерно $2 \div 5$ *гц*;

Скорость обратного поля Φ_2 относительно ротора равна сумме скоростей поля и ротора:

$$n_1 + n_2 = n_1 + n_1(1 - s) = n_1(2 - s) \ об/мин.$$

Обратное поле индуктирует в роторе токи частотой $f_2 = f_1(2 - s)$, т. е. примерно $95 \div 98$ *гц*.

Ток, индуктируемый прямым полем, взаимодействуя с ним, создает большой вращающий момент, т. к. активная составляющая этого тока вследствие малой частоты будет значительной.

Ток, индуктируемый обратным полем, взаимодействуя с ним, создает небольшой вращающий момент, вследствие того, что

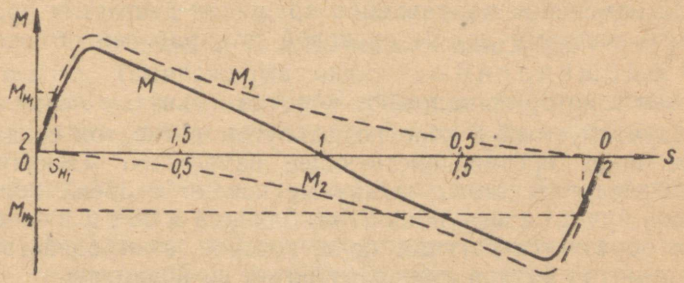


Рис. 174. Кривые вращающих моментов.

частота этого тока большая, а активная составляющая тока незначительна.

Моменты M_1 и M_2 направлены в разные стороны, а результирующий момент двигателя будет равен $M = M_1 - M_2$ н·м и направлен в сторону большего момента.

Из рис. 174 видно, что при скольжении $s = 1$ суммарный момент равен нулю.

Таким образом:

— предварительно развернутый однофазный асинхронный двигатель вращается в дальнейшем под действием прямого поля;

— направление вращения однофазного асинхронного двигателя определяется направлением предварительного разворота ротора.

Приспособления для пуска однофазных асинхронных двигателей:

а) пусковая обмотка, уложенная на статоре под углом 90° к основной обмотке. Ток в этой обмотке сдвигается по фазе на угол, близкий к 90°. Это достигается путем включения в ее цепь конденсатора или активного сопротивления (рис. 175).

Сдвинутые по фазе токи в обмотках статора создают вращающееся магнитное поле, которое, взаимодействуя с токами обмотки ротора, приводят ротор во вращение.

Иногда пусковая обмотка выполняется из малого количества витков, а рабочая — из большого. Вследствие этого рабочая обмотка обладает большим индуктивным сопротивлением, чем также достигается сдвиг фаз токов в обмотках на угол, близкий к 90°.

Пусковая обмотка включается только на время пуска, а после разворота двигателя сразу же выключается.

В некоторых двигателях рабочая обмотка и обмотка с конденсатором в цепи остаются включенными на все время работы. Такие двигатели, называемые конденсаторными, имеют лучшие рабочие и пусковые характеристики — лучший $\cos\varphi$ и бо́льшую перегрузочную способность.

Для изменения направления вращения двигателя достаточно поменять местами концы пусковой или рабочей обмоток;

б) расщепленные (явно выраженные) полюсы, на одну часть которых надевают короткозамкнутые витки.

Индуктируемый в короткозамкнутом витке ток создает магнитное поле, противодействующее изменению магнитного потока. Вследствие этого магнитные потоки в обеих половинках полюсов будут сдвинуты на угол, близкий к 90°, и в электродвигателе образуется бегущее поле, которое, взаимодействуя с токами обмотки ротора, приводит ротор во вращение.

Эти двигатели применяют для привода настольных вентиляторов, электропроигрывателей, радиол и пр.

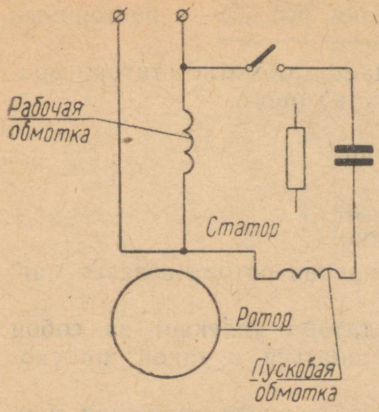


Рис. 175. Схема пуска с конденсатором или активным сопротивлением в цепи пусковой обмотки.

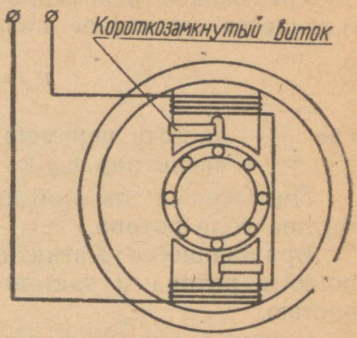


Рис. 176. Однофазный асинхронный двигатель с расщепленными полюсами и короткозамкнутыми витками.

Для изменения направления вращения такого двигателя достаточно переместить короткозамкнутые витки (кольца) на другие части полюсов.

Недостатки однофазных асинхронных двигателей:

— отсутствие начального пускового момента;

— невысокий к. п. д. $\eta = 0{,}4 \div 0{,}7$;

— низкий коэффициент мощности $\cos\varphi = 0{,}62 \div 0{,}72$;

— более высокая стоимость по сравнению с двигателем трехфазного тока той же мощности.

Однофазный асинхронный двигатель получил распространение при мощностях менее 0,5 *квт*, а двигатель с расщепленными полюсами и короткозамкнутыми витками выполняется на мощности от 0,5 до 30 *вт*.

14. Понятие о синхронном двигателе

Синхронными называются двигатели, у которых скорость вращения ротора совпадает со скоростью вращения поля статора.

Синхронный двигатель состоит из статора с трехфазной обмоткой и ротора с обмоткой возбуждения.

Принцип действия синхронного двигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с магнитным полем полюсов ротора.

При работе двигателя к статору подводят трехфазный пере-

менный ток, а к обмотке возбуждения ротора — постоянный ток.

Трехфазный переменный ток создает в обмотке статора вращающееся магнитное поле, скорость которого

$$n = \frac{60f}{p} \text{ об/мин},$$

где f — частота переменного тока, *гц*;
p — число пар полюсов в машине.

Постоянный ток в обмотке возбуждения ротора создает магнитное поле ротора.

Вращающееся магнитное поле статора увлекает за собой полюсы ротора и заставляет их вращаться с такой же скоростью.

Скорость вращения ротора, равную скорости вращения магнитного поля статора, называют синхронной скоростью.

15. Пуск синхронных двигателей

Синхронные двигатели нельзя пускать в ход непосредственным включением в сеть, т. к. ротор не может сразу развить скорость, необходимую для синхронного вращения с полем статора.

Для пуска синхронного двигателя в ход нужно развернуть его ротор до скорости, близкой к синхронной, при которой между статором и ротором возникнет магнитная связь и ротор, войдя в синхронизм, будет вращаться с синхронной скоростью.

Существуют два основных способа пуска синхронных двигателей:

а) пуск с помощью вспомогательного двигателя или синхронный пуск (применяется редко);

б) асинхронный пуск.

При асинхронном пуске в пазы на наконечниках полюсов ротора закладывают короткозамкнутую пусковую обмотку (рис. 177) и синхронный двигатель пускают в ход как асинхронный. После достижения ротором скорости вращения, близкой к

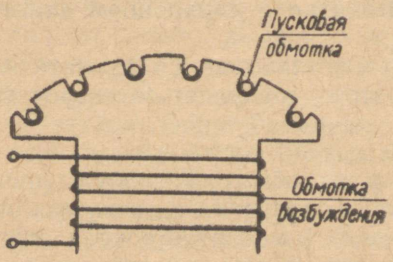


Рис. 177. Магнитный полюс ротора.

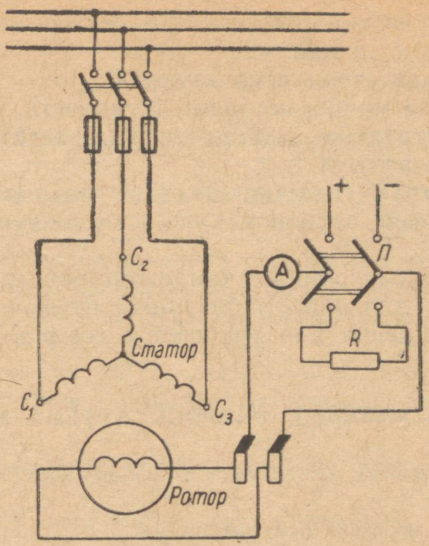


Рис. 178.

синхронной, в обмотку возбуждения включают постоянный ток, и ротор втягивается в синхронизм.

Порядок пуска синхронного двигателя (рис. 178):

1) замкнуть обмотку возбуждения на разрядное сопротивление R;

2) включить обмотку статора на напряжение сети;

3) при достижении ротором максимально возможного числа оборотов включить переключателем $П$ в обмотку возбуждения ротора постоянный ток.

16. Область применения синхронных двигателей

Достоинства синхронных двигателей:

— сохранение постоянной скорости при различных нагрузках;

— высокий $\cos\varphi$;

— возможность служить устройством, улучшающим $\cos\varphi$ (быть «синхронным компенсатором»);

— малая зависимость вращающего момента от напряжения (зависит от первой степени напряжения, а не от квадрата, как у асинхронных двигателей).

Недостатки синхронных двигателей:

— ограниченность в выборе скорости вращения и невозможность ее регулирования;

— выпадание из синхронизма при перегрузке;
— склонность к качаниям.

Синхронные двигатели используются:

а) для привода машин постоянной скорости, таких, как мощные насосы, вентиляторы, компрессоры, двигатель-генераторы, трансмиссионные валы и т. п.;

б) в устройствах синхронной связи разных параллельных процессов, например звуковом кино, самопишущих приборах и пр.

в) в качестве синхронных компенсаторов, т. е. двигателей, предназначенных для работы без механической нагрузки в режиме перевозбуждения для улучшения $\cos\varphi$ в сети.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ТЕМЕ VIII

1. Из каких основных частей состоит асинхронный двигатель и каково их назначение?
2. Как устроен короткозамкнутый ротор?
3. Как устроен фазный ротор?
4. Как присоединены выводы обмотки статора к зажимам и почему выбрана такая схема присоединения?
5. Какая связь существует между числом катушек на одну фазу обмотки статора и числом оборотов магнитного поля?
6. Может ли ротор асинхронного двигателя иметь 2000 *об/мин.* при частоте сети $f = 50$ *гц*?
7. В каждую фазу обмотки статора включены две катушки, соединенные последовательно. Чему равна скорость вращающегося магнитного поля? ($n_1 = 1500$ *об/мин.*).
8. Определите число оборотов вращающегося магнитного поля шестиполюсного двигателя, если частота тока 50 *гц*.
9. Как изменить направление вращения магнитного поля статора?
10. Объясните принцип действия асинхронного двигателя.
11. Что такое скольжение и как его определяют?
12. Определите скольжение восьмиполюсного двигателя, если его ротор вращается со скоростью 735 *об/мин.* Частота тока 50 *гц*. ($s = 2\%$).
13. Почему у асинхронных двигателей скольжение не может быть равным нулю?
14. При каком скольжении работает обычно асинхронный двигатель?
15. От чего зависят частота тока, э. д. с. и индуктивное сопротивление вращающегося ротора?
16. Э. д. с., индуктируемая в обмотке неподвижного ротора, равна 68 *в*. Скольжение ротора 3%. Определите э. д. с. во вращающемся роторе. ($E_{2s} = 2{,}04$ *в*).
17. Напишите формулу для тока в обмотке вращающегося ротора.
18. Э. д. с. в обмотке неподвижного ротора 100 *в*. Активное сопротивление обмотки ротора 0,02 *ом*; индуктивное сопротивление обмотки неподвиж-

ного ротора 0,8 *ом*. Определите ток в обмотке ротора при работе двигателя со скольжением 5%. ($I_{2s} = 112$ *а*).

19. От каких величин зависит вращающий момент асинхронного двигателя?

20. Начертите зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от скольжения.

21. Рассмотрите работу двигателя на устойчивой части характеристики при увеличении нагрузки.

22. Что называется перегрузочной способностью двигателя?

23. Что называется кратностью пускового момента?

24. Почему асинхронный двигатель очень чувствителен к колебаниям напряжения сети?

25. При напряжении 380 *в* асинхронный двигатель развивает момент 28 *нм*. Каким станет момент двигателя при снижении напряжения в сети на 10% ($M = 22{,}7$ *нм*).

26. Каково назначение пускового реостата асинхронного двигателя с фазным ротором?

27. Почему при увеличении нагрузки двигателя увеличиваются токи ротора и статора?

28. Каково различие в рабочих процессах трансформатора и асинхронного двигателя?

29. Какие схемы пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором вам известны?

30. Перечислите достоинства и недостатки пуска в ход короткозамкнутого асинхронного двигателя прямым включением в сеть.

31. Нарисуйте схему и расскажите, как изменятся момент и пусковой ток при пуске в ход короткозамкнутого асинхронного двигателя реостатом или автотрансформатором.

32. Нарисуйте схему и расскажите, как изменятся ток и пусковой момент асинхронного двигателя при пуске его в ход переключением со звезды на треугольник.

33. Как осуществляется пуск асинхронного двигателя с фазным ротором?

34. Почему включение реостата в цепь ротора увеличивает пусковой момент двигателя?

35. Какими способами можно регулировать скорость вращения асинхронного двигателя?

36. Какие потери мощности имеют место в асинхронном двигателе?

37. Номинальная мощность двигателя 15 *квт*. Потери в стали 0,8 *квт*; потери в меди 1,2 *квт*; потери на трение 0,4 *квт*. Определите к. п. д. двигателя ($\eta = 86{,}4\%$).

38. Какую зависимость показывают рабочие характеристики двигателя?

39. Приведите технические данные выпускаемой в СССР единой серии трехфазных асинхронных электродвигателей А2.

40. Объясните принцип работы однофазного асинхронного двигателя. Почему такой двигатель без специального приспособления не может начать вращаться самостоятельно?

41. Какие существуют приспособления для пуска однофазных асинхронных двигателей?

42. Как можно изменить направление вращения однофазного асинхронного двигателя?

43. Расскажите об устройстве и принципе работы синхронного электродвигателя.

44. Как производится пуск синхронного двигателя?

45. Перечислите достоинства и недостатки синхронных двигателей.

46. Укажите область применения синхронных двигателей.

ТЕМА IX

ЭЛЕКТРОПРИВОД И АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ

1. Понятие об электроприводе

Электрическим приводом (электроприводом) называется электромеханическое устройство, предназначенное для приведения в движение рабочей машины.

Электропривод состоит из электродвигателя, аппаратуры управления двигателем, передаточного механизма от двигателя к рабочей машине.

Различают три вида приводов:

групповой;

одиночный;

многодвигательный.

Групповым называют электропривод, у которого от одного электродвигателя с помощью трансмиссии приводится в действие несколько рабочих машин (рис. 179).

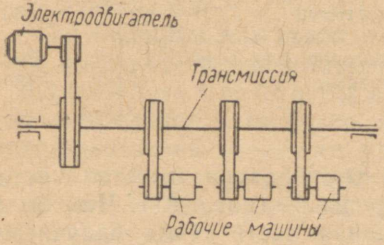


Рис. 179.

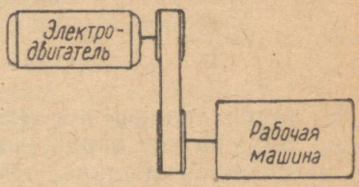


Рис. 180.

Однако этот вид привода в настоящее время почти не применяется.

Одиночным называется электропривод, в котором рабочая машина приводится в движение от отдельного электродвигателя, что дает возможность согласования характеристик привода и рабочей машины (рис. 180).

Многодвигательным называется электропривод, состоящий из нескольких одиночных электроприводов, каждый из которых предназначен для приведения в движение отдельных органов рабочей машины. Этот привод обеспечивает возможность полной автоматизации технологических процессов.

2. Нагрев и охлаждение электрических машин

Допускаемая нагрузка электродвигателей определяется нагревом его обмоток. Допускаемая температура обмоток зависит от рода изоляции.

Изоляционные материалы разделяются по теплостойкости на семь классов:

Таблица 6

Класс теплостойкости изоляции	Характеристика материала	Предельно допускаемая температура, °С
O	Непропитанные волокнистые материалы из целлюлозы и шелка	90
A	Те же материалы, но пропитанные	105
E	Синтетические органические пленки	120
B	Материалы из слюды, асбеста и стекловолокна, содержащие органические связующие вещества	130
F	Те же материалы в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами	155
H	Те же материалы, но в сочетании с кремнийорганическими и связующими веществами	180
C	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими связующими составами	Более 180

В момент включения машины температура всех ее частей равна температуре окружающей среды ϑ_0 (рис. 181). Чем больше нагревается машина, тем бо́льшая часть тепла излучается во внешнюю среду, и рост температуры машины замедляется. При установившейся температуре $\vartheta_{уст}$ и неизменной нагрузке машина может работать неопределенно длительное время.

По способу охлаждения электрические машины могут быть:

а) с естественной вентиляцией (при мощности до 1 *квт*), когда специальных мер для охлаждения не предусмотрено;

б) с самовентиляцией, когда вентилятор помещают на валу ротора.

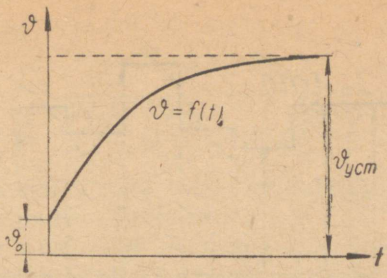


Рис. 181. Кривая нагревания машины при работе.
ϑ — температура машины; t — время работы.

Самовентиляция бывает:

внутренняя (воздух продувается вентилятором через машину);

наружная (вентилятор обдувает воздухом ребристую поверхность корпуса машины);

в) с независимой вентиляцией (для машин бо́льшой мощности — охлаждающий воздух подается в машину от постороннего вентилятора).

3. Режимы работы и выбор мощности электродвигателей по нагреву

По условиям нагрева электродвигателей различают три основных режима их работы:

— длительный;

— кратковременный;

— повторно-кратковременный.

Длительным режимом работы называют режим, продолжительность которого настолько велика, что все части электродвигателя достигают установившейся температуры. Примером длительного режима может служить режим работы электродвигателей вентиляторов, центробежных насосов, компрессоров, конвейеров.

Определение мощности электродвигателей производится по формулам, приводимым в справочниках для различных механизмов (вентиляторов, компрессоров и др.). Затем по каталогу выбирают двигатель, мощность которого соответствует данной нагрузке (или ближайший, бо́льший по мощности).

При длительной переменной нагрузке изменяется и количество тепла, выделяемое в двигателе. Для определения мощности двигателя надо иметь график нагрузки $I = f(t)$.

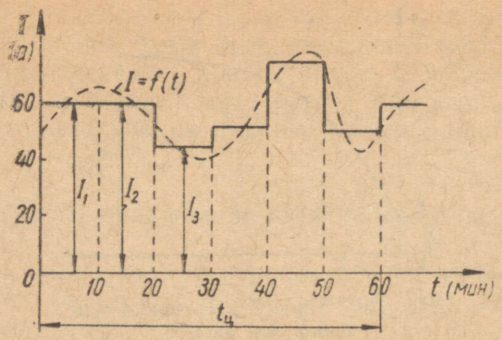


Рис. 182. Диаграмма для выбора мощности двигателя при длительной переменной нагрузке.

График (пунктирная линия) заменяют ступенчатой кривой тока, полагая, что за время t_1 двигатель берет ток I_1, за время $t_2 - I_2$ и т. д. Этот ступенчатый ток за время одного цикла работы заменяют неизменным током, который производит нагрев двигателя, равноценный вызываемому фактически протекающим током. Такой ток называется эквивалентным током $I_э$.

Эквивалентный ток равен:

$$I_э = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \ldots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots \ldots t_n}} \; a.$$

По значению $I_э$ выбирают в каталоге электродвигатель, соблюдая условие

$$I_н \geqslant I_э.$$

Если магнитный поток электродвигателя постоянный (двигатели постоянного тока с параллельным возбуждением, синхронные и асинхронные двигатели переменного тока), то вращающий момент пропорционален току:

$$M = C_м \Phi I \equiv I,$$

и формулу эквивалентного тока можно заменить формулой вращающего момента:

$$M_э = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \ldots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots . t_n}} \; нм$$

и по этому моменту выбрать двигатель.

В случае назначительного влияния нагрузки на скорость электродвигатель можно выбирать по эквивалентной мощности,

т. к. при $\omega = \text{const}$

$$P = M \cdot \omega \equiv M$$

$$P_э = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \ldots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots . t_n}} \quad вт.$$

Выбранные значения мощности двигателя проверяют по пусковым и перегрузочным моментам.

Кратковременным режимом работы именуется режим, при котором двигатель работает такое ограниченное время $t_к$, за которое температура его не успевает достигнуть установившегося значения, а следующая затем остановка (пауза) настолько продолжительна, что электродвигатель успевает охладиться до температуры окружающей среды.

В качестве примеров электродвигателей, работающих в кратковременном режиме, могут быть приведены двигатели шлюзовых устройств, двигатели разводных мостов, двигатели зажимных приспособлений металлорежущих станков, двигатели механизмов подъема стрелы одноковшовых экскаваторов.

Электропромышленность выпускает электродвигатели для кратковременного режима работы (соответственно меньшей мощности, чем для длительного режима), на заводских щитках которых указывают мощность и продолжительность работы с этой мощностью: 15, 30, 60 и 90 *мин*.

Повторно-кратковременный режим работы — это режим, при котором за время рабочего периода двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время паузы не успевает охладиться до температуры окружающей среды.

В этом режиме работают двигатели лифтов, кранов, подъемников, экскаваторов и др.

Повторно-кратковременный режим характеризуется коэффициентом относительной продолжительности включения (ПВ), под которым понимают отношение времени работы к общей продолжительности всего цикла, включающего время работы и время паузы:

$$ПВ = \frac{t_р}{t_ц} \cdot 100\% = \frac{t_р}{t_р + t_0} \cdot 100\%,$$

где $t_ц$ — продолжительность цикла, *сек*;
$t_р$ — продолжительность рабочего периода, *сек*;
t_0 — продолжительность паузы, *сек*.

Электропромышленность выпускает электродвигатели для стандартных $ПВ = 15$, 25, 40 и 60%. Чем больше $ПВ$, тем меньше номинальная мощность двигателя при равных габаритах.

Продолжительность одного цикла не должна превышать 10 *мин*, в противном случае режим работы считается длительным.

4. Пускорегулирующая аппаратура для ручного управления электродвигателями

Пускорегулирующие аппараты предназначаются для включения и отключения электрических цепей, пуска, остановки, торможения и реверсирования (изменения направления вращения) электродвигателей.

Основными пускорегулирующими аппаратами для ручного управления двигателями являются:

рубильники;
пакетные выключатели и переключатели;
контроллеры;
реостаты.

Рубильники служат для ручного включения электрических установок с напряжением до 500 *в* при токах до 1000 *а*.

Рубильники изготовляются одно-, двух- и трехполюсными.

Рубильники монтируются на изолирующей панели и состоят из следующих частей:

а) медных ножей, закрепленных шарнирно в нижних стойках панели;

б) траверсы из изолирующего материала с рукояткой, соединяющей ножи;

в) контактных губок из латуни, твердотянутой меди или бронзы.

В установках переменного тока 380 и 500 *в* и постоянного тока 220 *в* и выше для отключения цепей под нагрузкой рубильники снабжаются дугогасящими устройствами, такими, как:

«разрывные» ножи;
угольные дугогасящие контакты, разрывающие цепь после отхода ножей;
специальные дугогасящие решетки.

По условиям техники безопасности при напряжениях 220, 380 и 500 *в* рубильники закрываются защитными кожухами из неэлектропроводного материала.

Для переключения цепи тока на два направления выпускаются переключатели, у которых ножи могут перекидываться в верхнее и нижнее положения.

Пакетные выключатели — малогабаритные отключающие аппараты, применяемые на токи от 10 до 400 *а* при напряжениях до 380 *в*.

Пакетный выключатель состоит из:

а) неподвижных колец (шайб) из изолирующего материала с укрепленными на них неподвижными контактами. Шайбы соединены стяжными шпильками;

б) двойных плоских (скользящих) подвижных контактов, по-

мещенных на четырехгранном валике и охватывающих неподвижные контакты сверху и снизу;

в) двойных фибровых искрогасящих шайб, поворачивающихся вместе с подвижными контактами;

г) пружинного механизма, расположенного под крышкой выключателя;

д) рукоятки, укрепленной на валу.

При повороте рукоятки пружинный механизм производит быстрый поворот валика выключателя с подвижными контактами (независимо от скорости поворота рукоятки). Фибровые шайбы способствуют быстрому гашению дуги.

Контроллеры представляют собой переключающие аппараты с ручным приводом. С их помощью производится изменение схем соединений управляемых цепей.

Контроллеры изготовляются двух типов: барабанные и кулачковые.

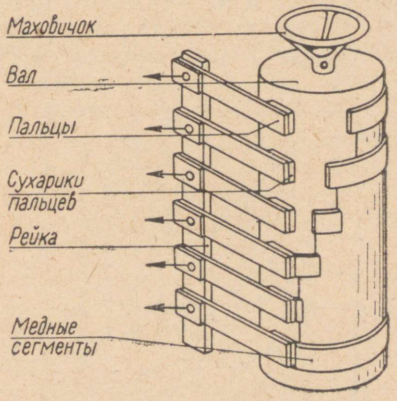


Рис. 183. Устройство барабанного контроллера.

При повороте вала маховичком сегменты соединяются с сухарями пальцев, осуществляя тем самым необходимые переключения в схеме.

Присоединение внешних цепей к контроллеру производится через зажимы пальцев.

Кулачковый контроллер производит переключения посредством фасонных кулачков, укрепленных на валу. При вращении вала кулачки замыкают или размыкают контакты контроллера, осуществляя таким образом необходимые переключения.

Реостаты представляют собой переменные сопротивления, с помощью которых ограничивается величина тока в цепи.

Реостат состоит из регулируемого активного сопротивления и переключающего устройства.

По назначению реостаты подразделяются на пусковые, регулировочные, нагрузочные, реостаты возбуждения (шунтовые).

По способу охлаждения различают реостаты с воздушным и масляным охлаждением.

Сопротивление реостата изготовляют, как правило, из константановой проволоки в виде спиралей, уложенных на основаниях из неэлектропроводного материала. Такие сопротивления собирают в общую конструкцию и помещают в бак с трансформаторным маслом (реостат с масляным охлаждением).

Переключающее устройство реостатов может быть выполнено в виде:

скользящего контакта;

плоского переключателя ступеней;

барабанного переключателя.

Первый вид применяют в маломощных цепях (реостаты возбуждения), второй и третий обычно используются при больших мощностях (пусковые и нагрузочные реостаты).

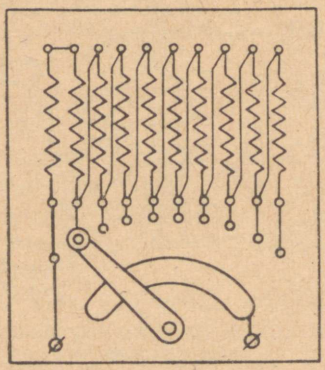


Рис. 184. Реостат с воздушным охлаждением и плоским переключением ступеней.

Барабанный переключатель реостата подобен барабанному контроллеру.

Для регулирования числа оборотов электродвигателей изготовляют ящики сопротивлений, рассчитанные на более длительное прохождение тока. Они состоят из стандартных элементов, собираемых в комплекты. Материалом для элементов служит фехраль и константан (проволока или лента), а также чугун (фасонные пластины).

5. Защитная аппаратура

Защитная аппаратура предназначена для предохранения двигателей и сетей от чрезмерных нагрузок, коротких замыканий, самопроизвольных включений и повреждений.

К аппаратам защиты относятся плавкие предохранители, автоматические выключатели, реле.

Плавкие предохранители разрывают электрическую цепь при перегорании (расплавлении) плавкой вставки.

По нормам плавкая вставка предохранителя должна выдерживать, не перегорая, ток, на 30% превышающий величину ее номинального тока, и расплавляться в течение 1 часа при токе, превышающем номинальный ток на 60—75%.

Свойство плавких вставок выдерживать кратковременные перегрузки учитывается при выборе предохранителей для защиты асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Номинальный ток плавкой вставки для этой цели выбирают примерно равным 40% пускового тока двигателя, который, как известно, превышает номинальный ток двигателя в 5—7 раз.

В последние годы получили распространение комплектные устройства, называемые «блок предохранитель-выключатель» (БПВ), в которых ножи плавких предохранителей (обычно типа ПН-2) выполняют роль рубильника, разрывая цепь тока.

Плавкие предохранители защищают электродвигатели и сети только от токов короткого замыкания, от длительных перегрузок они надежно защитить не могут.

Автоматические выключатели предназначены для редких включений и отключений электрической цепи вручную и для автоматического размыкания цепи при коротких замыканиях и перегрузках.

Воздушные автоматические выключатели — автоматы — применяются в цепях переменного тока напряжением до 500 *в* и постоянного тока до 220 *в*.

Различают автоматы: максимального тока, минимального тока, минимального напряжения.

Автоматы максимального тока размыкают электрические цепи при повышении величины тока до недопустимой величины (рис. 185).

Когда ток в катушке автомата, включенной последовательно в цепь, превышает нормальную величину, сердечник втягивается, освобождая пружину, которая оттягивает контактную пластину и разрывает цепь.

Автоматы минимального тока размыкают электрические цепи, когда ток понижается до недопустимой величины (рис. 186).

При понижении величины тока магнитное поле катушки уменьшается, сердечник перестает удерживаться и освобождает

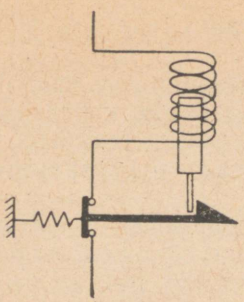


Рис. 185. Схема автомата максимального тока.

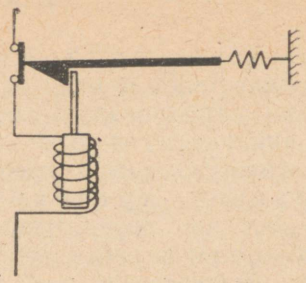


Рис. 186. Схема автомата минимального тока.

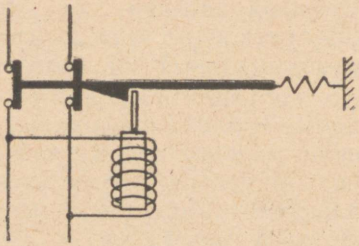


Рис. 187. Схема автомата минимального напряжения.

пружину, которая, оттягивая контактную пластину, разрывает цепь.

Автоматы минимального напряжения размыкают электрические цепи при понижении напряжения до недопустимой величины (рис. 187). При понижении напряжения ток в катушке, включенной между двумя проводами, уменьшается. Магнитное поле перестает удерживать сердечник, который, опускаясь, освобождает пружину, и цепь размыкается.

Реле представляет собой аппарат, автоматически замыкающий или размыкающий вспомогательные электрические цепи при изменении параметров главной силовой цепи.

Реле предназначаются для защиты и управления.

По системе исполнения реле делятся на электромагнитные, индукционные, электродинамические, тепловые, ионно-электронные, механические и др.

В тепловом реле (рис. 188) ток защищаемой цепи I проходит через нагревательный элемент, нагревающий биметаллическую пластину. При чрезмерном токе биметаллическая пластина

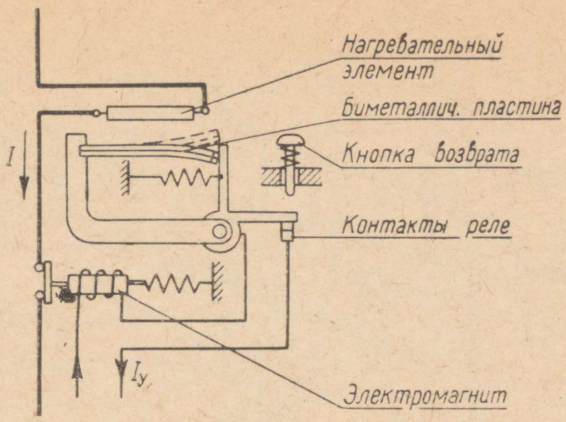


Рис. 188. Схема теплового реле.

изгибается вверх, освобождая рычажок контактов цепи управления, который под действием пружины размыкает контакты. Ток в обмотке электромагнита прерывается, и контакты защищаемой цепи размыкаются пружиной.

6. Контакторы и магнитные пускатели

Релейно-контакторная аппаратура применяется для дистанционного автоматического управления электроприводом.

Контактором называется аппарат дистанционного действия, который служит для частых включений и отключений под нагрузкой электрической силовой цепи (до 1500 включений в час). Он применяется в цепях постоянного и переменного тока с напряжением до 1000 *в*.

Основные части контактора:

а) магнитная система, состоящая из сердечника, втягивающей обмотки (катушки) и якоря;

б) главные контакты;

в) вспомогательные контакты (блок-контакты).

По конструктивному выполнению контакторы делятся на два типа: с качающимся якорем; с прямолинейным ходом якоря сердечника.

В контакторе с качающимся якорем (рис. 189) при замыкании кнопки *П* (пуск) ток идет от провода $Л_1$ через кнопки *П* и *СТ* (стоп) в обмотку электромагнита и к проводу $Л_3$. Якорь притягивается и поворачивает валик. При этом одновременно замыкаются главные контакты и блок-контакты. Последние шунтируют кнопку *П* и позволяют отпустить включающую кнопку.

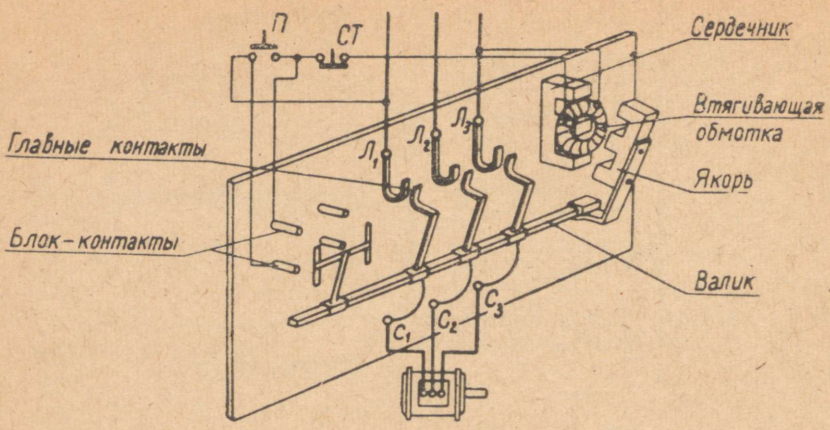


Рис. 189. Схема контактора с качающимся якорем.

При нажатии на кнопку *СТ* ток в обмотке электромагнита прерывается и контакты отпадают под влиянием своего веса.

Магнитный пускатель предназначен для дистанционного пуска и остановки электродвигателя нажатием кнопок управления, а также для автоматического отключения при перегрузках и недопустимом понижении напряжения в сети.

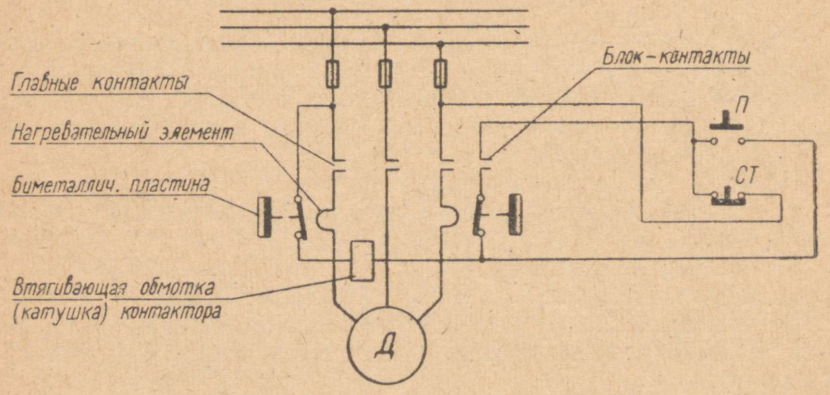


Рис. 190. Схема магнитного пускателя.

Пускатель состоит из одного или нескольких контакторов, тепловых реле (как правило, двух) и кнопок управления.

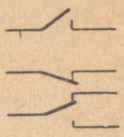
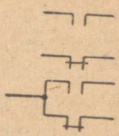
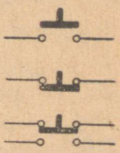
Здесь в два линейных провода главной цепи включены нагревательные элементы двух биметаллических тепловых реле.

Они служат для защиты двигателя от длительных перегрузок, превышающих номинальную нагрузку на 10—20%.

Размыкающие контакты этих реле находятся в цепи втягивающей обмотки контактора.

Таблица 7

Условные обозначения на схемах электрической аппаратуры

№ п. п.	Наименование	Обозначение
1	Обмотка реле, контактора и магнитного пускателя	
2	Контакт реле: замыкающий размыкающий переключающий	
3	Контакт контактора, пускателя и блок-контакты их: замыкающий размыкающий переключающий	
4	Кнопки с самовозвратом: замыкающая размыкающая размыкающая и замыкающая	
5	Нагревательный элемент теплового реле	

7. Схемы релейно-контакторного управления двигателями постоянного и переменного тока

На электрических схемах контакты аппаратов указывают в положении, при котором во всех цепях отсутствуют напряжения и токи, а также всякие механические воздействия на эти контакты.

В соответствии с этим все контакты аппаратов разделяют на:

а) замыкающие — разомкнутые при отсутствии электрических и механических воздействий;

б) размыкающие — замкнутые при отсутствии электрических и механических воздействий.

Электрические цепи автоматизированных установок делят на две группы:

1) цепи главного тока — цепи питания электродвигателей (изображаются толстыми линиями);

2) цепи вспомогательного тока (изображаются тонкими линиями).

Схемы цепей вспомогательного тока делят на принципиальные и монтажные.

Принципиальные схемы поясняют принцип работы и взаимодействие отдельных реле, приборов и аппаратов, входящих в схему.

Монтажные схемы являются рабочими чертежами, по которым производится монтаж электроустановок.

Принципиальные схемы могут быть совмещенными и развернутыми.

Совмещенной называется схема, на которой условные изображения обмоток и контактов отдельных приборов и аппаратов расположены приблизительно так, как они размещены в действительности (рис. 190).

Развернутой называется схема, на которой условные изображения элементов расположены по принципу электрической связи между элементами (рис. 191).

Для облегчения чтения развернутых схем применяют маркировку, состоящую из букв и цифр.

Буквы:

Р — реле;
РТ — реле тепловое;
РН — реле напряжения;
РВ — реле времени;
РП — реле промежуточное;
К — контактор (катушка контактора);
КВ и *КН* — контактор — «вперед» и контактор — «назад».

Цифры:

слева от буквы — номер аппарата в схеме;
справа от буквы — номер контакта данного аппарата.

Например, в схеме управления тремя сблокированными двигателями будут установлены три контактора 1*К*, 2*К* и 3*К*. Каждый контактор имеет несколько контактов. Контакты контактора 2 получат маркировку: 2*К*1, 2*К*2, 2*К*3.

В схеме (рис. 192) при нажатии кнопки *П* катушка линейного контактора 1*К* включается в сеть. При этом, под действием притяжения магнитного поля, силовой контакт 1*К*1 и блок-кон-

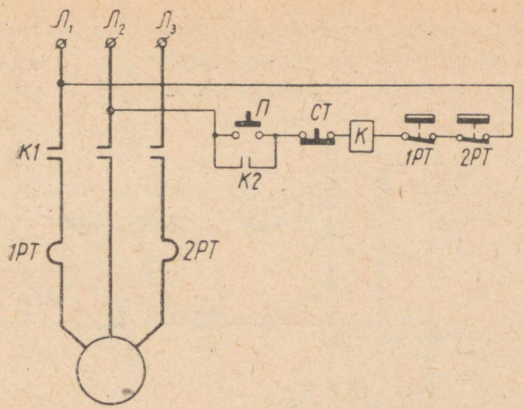


Рис. 191. Развернутая схема магнитного пускателя.

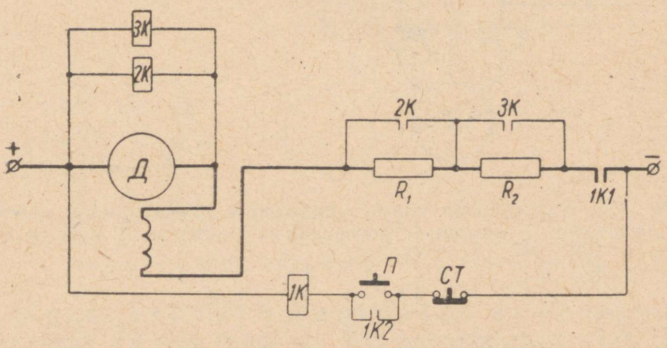


Рис. 192. Схема управления пуском двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.

такт 1К2 замыкаются. В цепи якоря двигателя возникает постоянный ток, величина которого ограничивается пусковым реостатом R_1 и R_2.

В первый момент пуска напряжение на катушках контакторов 2К и 3К мало, т. к. якорь имеет малое сопротивление.

По мере увеличения скорости вращения двигателя увеличивается противо-э. д. с. обмотки якоря. Вместе с ней увеличивается и напряжение на катушках контакторов 2К и 3К. При этом сначала срабатывает контактор 2К (рассчитанный на более низкое напряжение), закорачивая своими контактами первую секцию пускового реостата R_1. Затем контактор 3К закорачивает секцию реостата R_2.

Так постепенно уменьшается сопротивление цепи якоря, увеличивается вращающий момент двигателя и скорость его вращения доводится до нормальной.

Остановка двигателя производится нажатием кнопки *СТ*. При этом разрывается цепь катушки линейного контактора 1*К*, его контакты размыкаются, и двигатель отключается от питающей сети.

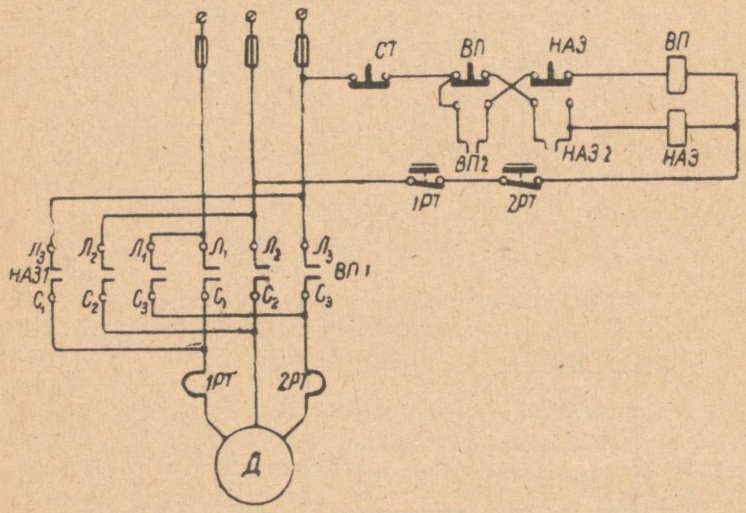


Рис. 193. Развернутая схема управления асинхронным электродвигателем с помощью реверсивного магнитного пускателя.

Реверсивный магнитный пускатель (рис. 193) состоит из двух контакторов: *ВП* (вперед) и *НАЗ* (назад), включающихся по очереди и переключающих две фазы на зажимах электродвигателя.

При нажатии кнопки *ВП* ток управления идет по следующей цепи:

провод $Л_3$ — кнопка *СТ* — замкнутые нижние контакты кнопки *ВП* — замкнутые верхние контакты кнопки *НАЗ* — катушка *ВП* — контакты тепловых реле 1*РТ* и 2*РТ* — провод $Л_2$.

При этом замыкаются главные контакты *ВП*1 в цепи главного тока, и на двигатель подается питание. Одновременно замыкается блок-контакт *ВП*2, и кнопку *ВП* можно отпустить.

Если попытаться нажать кнопку *НАЗ*, не выключив предварительно кнопкой *СТ* контактор *ВП*, то сначала разомкнутся верхние контакты кнопки *НАЗ*, и контактор *ВП* отключится, после чего включится контактор *НАЗ*. Таким образом, одновременное включение обоих контакторов исключается.

Схема (рис. 195) позволяет осуществлять ручное или автоматическое управление в зависимости от положения переключа-

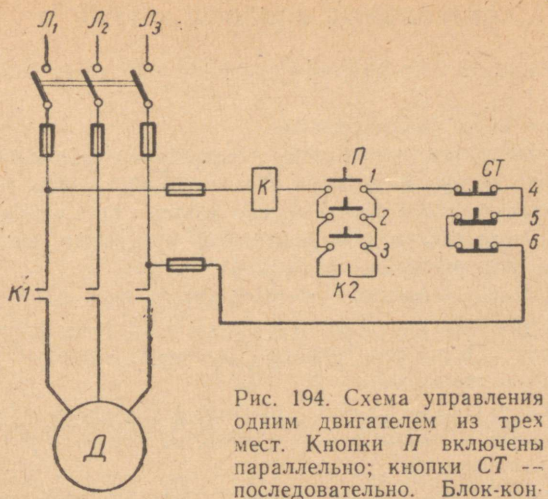


Рис. 194. Схема управления одним двигателем из трех мест. Кнопки *П* включены параллельно; кнопки *СТ* — последовательно. Блок-контакты *К2* блокируют любую кнопку *П*.

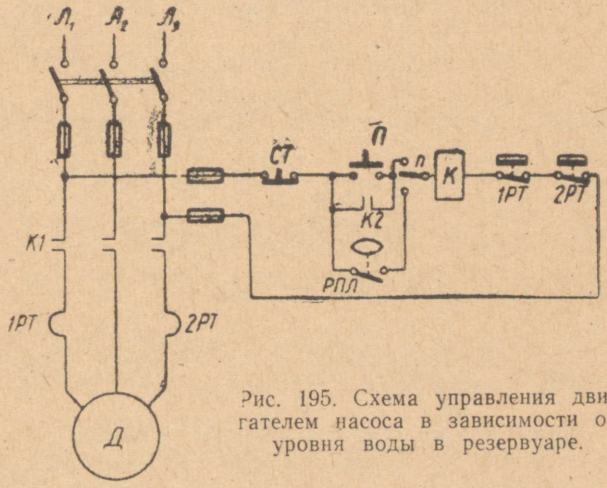


Рис. 195. Схема управления двигателем насоса в зависимости от уровня воды в резервуаре.

теля *п*. При верхнем положении переключателя управление двигателем производится вручную кнопками *П* и *СТ*; в нижнем положении — включение автоматическое при помощи поплавкового реле.

Когда уровень воды в резервуаре достигает предельного, поплавок поднимается в крайнее верхнее положение и замыкает контакт *РПЛ*, насос включается и производит откачку воды; уровень воды понижается, поплавок опускается, размыкает контакт *РПЛ*, и насос останавливается.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ТЕМЕ IX

1. Что называется электрическим приводом и из каких элементов привод состоит?
2. Назовите виды электроприводов.
3. Как разделяются изоляционные материалы по теплостойкости?
4. Начертите кривую нагревания электрической машины при работе.
5. Как подразделяются электрические машины по способу охлаждения?
6. Какой режим работы электродвигателя называется длительным, кратковременным и повторно-кратковременным?
7. Как выбрать мощность электродвигателя при длительном режиме работы?
8. Перечислите основные пускорегулирующие аппараты для ручного управления электродвигателями.
9. Расскажите о назначении и устройстве рубильников и переключателей.
10. Расскажите о назначении и устройстве контроллеров. Какие типы контроллеров вам известны?
11. Из каких частей состоит реостат? Назовите виды переключающих устройств реостатов.
12. Номинальный ток двигателя 25 *а*; кратность пускового тока 6. На какой ток необходимо выбрать плавкую вставку предохранителя? ($I_{вст} = 60\ а$).
13. Что такое «блок предохранитель-выключатель» (БПВ)?
14. Каково назначение автоматических выключателей?
15. Начертите и объясните принцип действия автомата максимального тока.
16. Начертите и объясните принцип действия автомата минимального тока.
17. Начертите и объясните принцип действия автомата минимального напряжения.
18. Начертите и объясните схему теплового реле для защиты двигателя от перегрузки.
19. Укажите назначение контактора в схемах управления двигателями.
20. Расскажите об устройстве контактора и объясните принцип его работы.
21. Чем отличается магнитный пускатель от контактора?
22. Начертите схему магнитного пускателя с кнопками управления.
23. Объясните схему управления пуском двигателя постоянного тока.
24. Объясните схему управления асинхронным электродвигателем с помощью реверсивного магнитного пускателя.
25. Объясните схему управления одним двигателем из трех мест.
26. Объясните схему управления двигателем насоса в зависимости от уровня воды в резервуаре.

ТЕМА X

ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

1. Общие принципы передачи электрической энергии

В СССР бóльшая часть электрической энергии вырабатывается на мощных тепловых государственных районных электростанциях — ГРЭС и гидроэлектростанциях — ГЭС.

ГРЭС и ГЭС находятся в районах расположения таких природных запасов энергии, как торф, бурый уголь, горючий сланец, падающая вода, и в большинстве случаев удалены от потребителей электроэнергии.

Меньшая часть электроэнергии вырабатывается на электростанциях местного значения. Ими являются теплоэлектроцентрали — ТЭЦ, вырабатывающие электрическую и тепловую энергию, станции промышленных предприятий, городские электростанции, сельскохозяйственные электростанции и др.

Все районные электростанции, ТЭЦ и большая часть станций местного значения представляют собой станции трехфазного тока.

Большинство станций объединяются для общей совместной (параллельной) работы. Такие объединения называются *энергетическими системами* (энергосистемами).

Достоинства энергосистем:

— возможность рационального распределения нагрузки между станциями;

— более благоприятный график работы вследствие меньших колебаний нагрузки, чем у отдельных электростанций;

— снижение себестоимости электроэнергии и сокращение расходов топлива за счет наиболее полного использования ГЭС;

— возможность уменьшения мощности резервных агрегатов на станциях;

— надежность электроснабжения.

В настоящее время идет объединение энергосистем в *Единую энергетическую систему* (ЕЭС) страны.

Промышленные предприятия в большинстве случаев получают электрическую энергию от энергосистемы.

Синхронные генераторы электростанций вырабатывают электрическую энергию при напряжении 6—35 *кв*. Для передачи электроэнергии на дальние расстояния — порядка сотен километров — необходимы более высокие напряжения. Ориентировочно для линий передач средней длины можно считать целесообразным рабочее напряжение 1000 *в* на километр.

Шкала стандартных высоких напряжений:

3, 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220, 330, 500 *кв*.

2. Схемы электроснабжения промышленных предприятий

Электрическая энергия может подаваться на предприятие (в зависимости от его мощности) под напряжением:

35—110 *кв*;
3—6—10 *кв*;
380/220 *в*.

В первом случае (рис. 196) напряжение подается на понизительную подстанцию предприятия, где оно трансформируется с 35—110 *кв* до 6—10 *кв*, после чего подается к цеховым подстанциям.

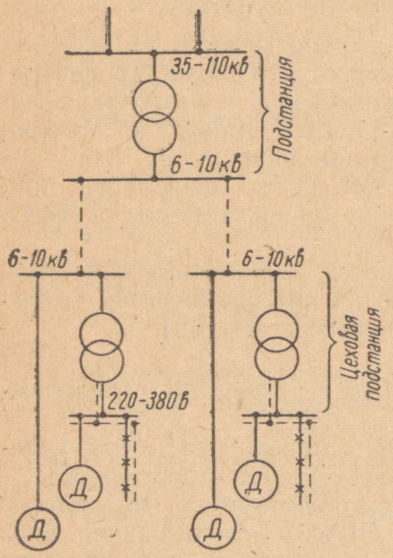


Рис. 196. Схема распределения энергии крупного промышленного предприятия.

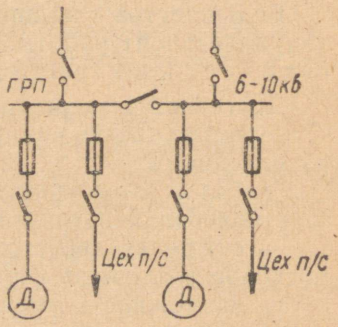


Рис. 197. Схема распределения электроэнергии через распределительный пункт предприятия.

К шинам цеховых подстанций присоединяются:

кабельные линии для питания высоковольтных электродвигателей;

трансформаторы, понижающие напряжение до 380/220 *в*.

Примечание. Схемы даются однолинейными, т. е. три фазы линий передач изображаются одной линией.

Во втором случае (рис. 197) энергия поступает на главный распределительный пункт предприятия (ГРП), предназначенный для приема и распределения энергии.

Энергия к ГРП подводится по одной—двум кабельным (реже воздушным) линиям напряжением 3—6—10 *кв*, а число отходящих от него линий того же напряжения значительно больше.

В третьем случае (на более мелких предприятиях, не имеющих высоковольтных приемников энергии) электроэнергия поступает на низковольтный распределительный пункт предприятия, откуда и распределяется по отдельным цехам.

3. Трансформаторные подстанции и распределительные устройства промышленных предприятий

Подстанцией называется электроустановка, служащая для преобразования и распределения электроэнергии.

Подстанция может быть:

понизительной или повысительной.

Подстанция включает в себя:

а) силовые трансформаторы;

б) аппараты и приборы для управления трансформаторами.

Часть подстанции, служащая для приема и распределения электроэнергии, называется распределительным устройством (РУ).

В РУ смонтированы:

— аппараты и приборы управления;

— приборы защиты;

— приборы измерения;

— сборные и соединительные шины.

На трансформаторной подстанции должно быть не менее двух РУ:

для высшего напряжения трансформатора;

для низшего напряжения трансформатора.

Трансформаторные подстанции с напряжением 35—500 *кв* выполняются открытыми. Все электрооборудование их (если нет опасности загрязнения и запыления) размещается на открытом воздухе.

Подстанции до 20 *кв* выполняются закрытыми.

В настоящее время широко применяются комплектные

распределительные устройства (КРУ) и комплектные трансформаторные подстанции (КТП), состоящие из отдельных шкафов со смонтированным в них (на заводе) электрооборудованием.

4. Электрические сети промышленных предприятий

Электрические сети служат для передачи и распределения электрической энергии.

По своему устройству сети делятся на:

— воздушные;

— кабельные или подземные;

— внутренней проводки.

Если система проводов не имеет разветвлений, она называется электрической линией.

В зависимости от напряжения воздушные и кабельные линии и сети могут быть:

— до 1000 *в*;

— выше 1000 *в*.

Воздушные линии электропередачи состоят из трех основных частей:

1) голых проводов (алюминиевые, стале-алюминиевые или медные);

2) изоляторов;

3) опор.

Для защиты проводов воздушной линии от влияния атмосферного электричества по вершинам опор прокладывают стальные заземляющие тросы, прикрепленные непосредственно к металлическим опорам. Сами опоры тщательно заземляют, т. е. присоединяют к металлическим полосам, трубам или пластинам, закопанным в землю глубже уровня промерзания почвы. Основное назначение заземляющих тросов — принимать на себя прямые удары молнии и быстро отводить атмосферные заряды в землю.

Кабельные линии прокладывают преимущественно под землей — в траншеях, каналах, туннелях, коллекторах. Они состоят из одного или нескольких кабелей.

Сети внутренней проводки (до 1000 *в*) прокладывают внутри зданий и сооружений или по их наружным стенам.

5. Внутренние электрические сети и распределительные пункты

Для передачи и распределения электрической энергии внутри зданий применяют провода, шнуры, кабели, шины.

Проводом называется отдельная проволока или жила (одна или несколько скрученных между собой проволок), голая или изолированная.

Наиболее распространенные марки проводов, шнуров и кабелей

Марки	Число жил и сечение, $мм^2$	Характеристика провода, шнура или кабеля	Область применения
1	2	3	4
ПР	1 0,75—400	Провод медный с резиновой изоляцией в оплетке из хлопчатобумажной пряжи	Для неподвижной прокладки в сухих и сырых помещениях и вне зданий при напряжении до 500 *в* переменного тока
АПР	1 2,5—400	То же, но жила из алюминия	То же
ПРГ	1 0,75—400	То же, но провод медный гибкий (жила из более тонких проволок)	Для соединения электрических машин и аппаратов внутри и вне зданий при напряжении до 500 *в*
ПГВ	1 0,75—95	Провод с медной жилой, многопроволочный, гибкий в полихлорвиниловой изоляции	То же
ПВ	1 0,75—95	Провод с медной жилой, изолированный полихлорвиниловым пластикатом	Для неподвижной прокладки внутри помещений при температуре не выше 40° С в сырых и особо сырых помещениях
АПВ	1 0,75—95	То же, но с алюминиевой жилой	То же
ПРД	2 0,5—6,0	Провод медный, гибкий, в оплетке из хлопчатобумажной пряжи с резиновой изоляцией	Для прокладки на роликах в сухих помещениях при напряжении до 380 *в*
ПРТО	1 — 4 1—120	Провод с медной жилой с резиновой изоляцией в общей оплетке из хлопчатобумажной пряжи	Для прокладки в металлических трубах в сетях с переменным напряжением до 500 *в* и до 2000 *в*
ППВ	2—3 0,75—2,5	Провод ленточный (плоский) с медными жилами в полихлорвиниловой изоляции	Для неподвижной открытой или скрытой прокладки под сырой штукатуркой при напряжении до 500 *в*

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4
АППВ	2—3 2,5—4,0	Провод ленточный (плоский) с алюминиевыми жилами в полихлорвиниловой изоляции	Для неподвижной открытой или скрытой прокладки под сырой штукатуркой при напряжении до 500 *в*
ПРП	1—3 1—95	Провод с медной жилой с резиновой изоляцией, панцирный, т. е. с защитной и экранирующей оплеткой из стальной проволоки	Для неподвижной прокладки, когда требуется экранировка или механическая защита провода
ШР	2 0,75—1,5	Шнур из двух гибких медных жил с резиновой изоляцией и непропитанной оплеткой из хлопчатобумажной пряжи	Для присоединения переносных токоприемников при напряжении до 220 *в*
ШПРО	2 0,5—0,75	Шнур из двух гибких медных жил в резиновой изоляции (жилы уложены параллельно), заключенных в общую оплетку из шелка	Для присоединения настольных ламп и переносных бытовых электроприборов
СРБ	2—4 4—185	Кабель из медных жил с резиновой изоляцией, освинцованный, с броней из стальных лент, поверх которых положена оболочка из кабельной пряжи	Для прокладки по поверхности стен и потолков (для внутренней установки) при напряжении до 220 *в*
СРГ	2—4 4—185	То же, но без оболочки из пряжи	То же
ВРГ	2—4 1—185	Кабель с резиновой изоляцией в полихлорвиниловой оболочке	То же

Изолированный провод заключен в оболочку: резиновую, полихлорвиниловую; найритовую или хлопчатобумажную.

Шнур — система двух или нескольких соединенных вместе изолированных гибких жил.

Кабель — одна или несколько скрученных вместе изолированных жил, заключенных в защитную герметическую свинцовую, алюминиевую или полихлорвиниловую оболочку.

Шина — полосовая (реже круглая) медь, алюминий или сталь.

Распределение электроэнергии на промышленных предприятиях между главным распределительным пунктом (ГРП) или трансформаторной подстанцией и цеховыми распределительными пунктами производится по радиальной или магистральной схемам.

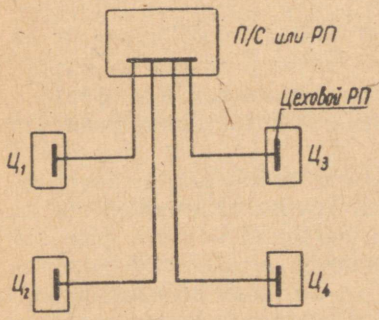


Рис. 198. Радиальная схема

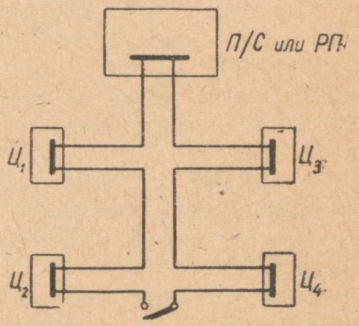


Рис. 199. Магистральная схема

Схемы распределения электроэнергии по цехам.

Достоинства радиальной схемы:
— простота эксплуатации;
— простота защиты и автоматизации.

Недостатки радиальной схемы:
— высокая стоимость;
— меньшая надежность работы.

Достоинства магистральной схемы:
— дешевизна;
— бóльшая надежность снабжения электроэнергией (при замкнутой магистрали).

Недостатки магистральной схемы:
— сложнее защита и автоматизация.

Цеховые распределительные пункты представляют собой распределительные щиты или выполняются в виде металлических шкафов (КРУ), целиком изготовляемых и монтируемых на заводе.

Силовые сети предприятий наиболее часто выполняются:
— кабелем;
— шинами;
— изолированным проводом в трубах и на изоляторах.

Осветительные сети предприятий преимущественно выполняются:
— проводом в металлических трубах;

— проводом на изоляторах или роликах (открытая проводка);

— проводом на тросах (тросовая проводка).

Кабели прокладываются открыто или скрыто. В первом случае они прокладываются по стенам или потолкам на опорных конструкциях или закрепляются скобами. Во втором случае — в каналах, устраиваемых в полу.

Шинопроводы бывают открытыми и закрытыми. Открытый шинопровод представляет собой шины, закрепленные на изоляторах, которые монтируются на металлических конструкциях, укрепляемых на стенах, колоннах, потолках или фермах. Ответвления к приемникам энергии выполняются проводами или кабелями.

Закрытые шинопроводы представляют собой шины, расположенные внутри стального короба или трубы. Они крепятся на трубчатых стойках, кронштейнах или подвешиваются к фермам. Ответвления от шинопровода выполняются с помощью коробок или ящиков, укрепляемых на коробе, от которых по изолированным проводам, расположенным в стальных трубах или металлических рукавах, отводится ток к приемникам энергии.

Прокладка изолированных проводов в трубах в цехах и машинных залах производится скрыто в полу.

Прокладка изолированных проводов на роликах и изоляторах в настоящее время применяется редко.

Тросовая проводка представляет собой провода, подвешенные к натянутому тросу. Ответвления от таких проводов выполняются в коробках, укрепляемых в нужных местах на тросе.

6. Защитное заземление электротехнических установок

Считается, что токи более 0,05 *а* опасны для жизни, а токи более 0,1 *а* — смертельны.

Величину тока, проходящего через тело человека — цепь поражения, — определяют по закону Ома:

$$I_{\text{п}} = \frac{U}{R_{\text{чел}} + r_{\text{д}}}\ a,$$

где $I_{\text{п}}$ — ток в цепи поражения, *а*;
U — напряжение, *в*;
$R_{\text{чел}}$ — сопротивление человеческого тела, *ом*;
$r_{\text{д}}$ — остальное дополнительное сопротивление цепи поражения (если оно имеется), *ом*.

Электрическое сопротивление человеческого тела, зависящее главным образом от состояния тонкого верхнего слоя кожи, может быть весьма различным. При сухой и неповрежденной

коже и малой площади контакта оно может достигать величины порядка 10 000 *ом* и выше. Однако увлажнение кожи, загрязнение ее токопроводящими веществами, увеличение площади контакта резко уменьшают сопротивление тела человека. В связи с этим в расчетах принято считать сопротивление тела человека равным 1000 *ом*.

С целью защиты людей от поражения электрическим током при прикосновении к нетоковедущим частям электрических установок, случайно оказавшихся под напряжением, применяют защитное заземление.

Заземлением какой-либо части электроустановки называется преднамеренное соединение ее с заземляющим устройством.

Заземляющее устройство состоит из:

а) заземлителей — металлических проводников, находящихся в непосредственном соприкосновении с землей;

б) заземляющих проводников (провода, шины), соединяющих заземлители с заземляемыми частями установки.

По степени опасности поражения людей электрическим током помещения, в которых имеются электроустановки, разделяют на три группы:

1 — повышенной опасности;

2 — особо опасные;

3 — без повышенной опасности.

Помещения с повышенной опасностью характеризуются наличием одного из следующих условий:

а) сырость;

б) проводящая пыль;

в) токопроводящие полы: металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т. д.;

г) высокая температура;

д) возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, оборудованию, механизмам и т. п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования — с другой стороны.

Особо опасные помещения характеризуются наличием:

а) особой сырости (потолок, стены, пол покрыты влагой);

б) химически активной среды;

в) одновременно двух или более условий повышенной опасности (например, сырости и токопроводящих полов).

Помещения без повышенной опасности — те, в которых отсутствуют условия, создающие «особую» и «повышенную» опасность.

Заземлению подлежат:

— корпуса электрических машин;

— корпуса трансформаторов;
— корпуса светильников;
— корпуса приводов электрических аппаратов;
— вторичные обмотки измерительных трансформаторов;
— металлические каркасы электрораспределительных щитов и др.

В помещениях с повышенной опасностью, особо опасных и наружных электроустановках заземление необходимо при напряжениях переменного тока выше 36 *в* и постоянного тока выше 110 *в*.

В помещениях без повышенной опасности заземление требуется при напряжении 500 *в* и выше переменного и постоянного тока.

Электрические установки для питания источников света и электродвигателей нормально сооружают четырехпроводными с напряжением 380/220 *в* или 220/127 *в*. Четвертый провод глухо заземляют. Т. к. его потенциал равен нулю, то он называется нулевым. Глухим соединение именуется потому, что делается металлическим с ничтожно малым переходным сопротивлением.

Нулевой провод заземляют у источника питания и у потребителя.

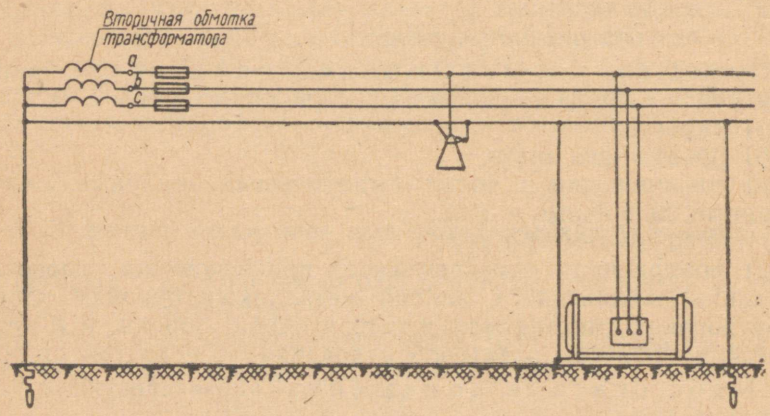


Рис. 200. Схема заземления в электроустановках напряжением до 1000 *в* с глухозаземленной нейтралью.

Действие этого заземления заключается в том, что при повреждении изоляции одной из фаз, например «*c*», и соединении ее с корпусом машины и землей возникнет однофазное короткое замыкание, и предохранитель или автомат этой фазы отключат ее от источника питания. Напряжение фаз «*a*» и «*b*» по отношению к земле останется равным фазному, т. е. 220 или 127 *в*.

Если человек, стоящий на земле, коснется неизолированного провода фаз «*a*» или «*b*», то он окажется только под фазным напряжением. Если же нейтраль была бы не заземлена, то предохранитель или автомат не отключили бы заземленной фазы «*c*», и человек оказался бы по отношению к фазам «*a*» и «*b*» под линейным напряжением 380 или 220 *в*.

В электроустановках напряжением выше 1000 *в*, а также в электроустановках напряжением до 1000 *в* с изолированной нулевой точкой (нейтралью) трансформаторов защитное заземление выполняется путем сооружения местного заземляющего устройства с малым сопротивлением.

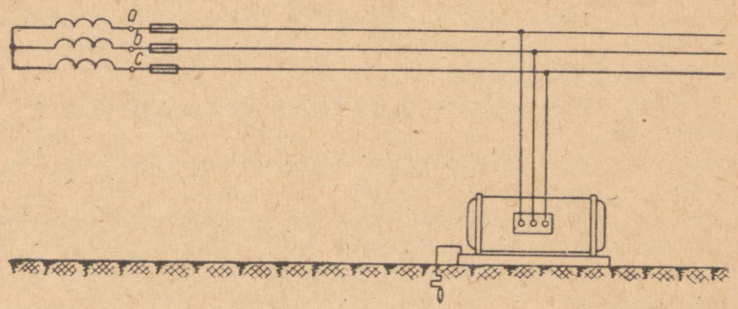


Рис. 201. Схема заземления в электроустановках с изолированной нейтралью.

В качестве заземлителей используют:

— металлические конструкции зданий;

— оборудование, надежно соединенное с землей;

— трубопроводы (кроме газовых и с горючими жидкостями), проложенные в земле.

Если таких конструкций нет, то заземлители делают искусственно:

— из стальных труб ∅ 35—40 *мм* и толщиной стенок не менее 3,5 *мм*;

— из угловой стали с толщиной полок не менее 4 *мм*.

Число искусственных заземлителей определяют расчетом. Оно не должно быть меньше двух. Длина заземлителей 2—3 *м*. Их забивают в землю на расстоянии 2,5—3 *м* так, чтобы верхний конец был ниже поверхности земли на 0,4—1,5 *м*, и сваркой соединяют между собой стальными полосами толщиной не менее 4 *мм* на глубине не менее 0,3 *м*.

В качестве заземляющих проводников в первую очередь используют металлические конструкции зданий, металлические трубы и свинцовые и алюминиевые оболочки силовых кабелей. Искусственные заземляющие провода выполняют из стальных

полос сечением не менее 24 *мм*^{2} и толщиной не менее 3 *мм* или из круглых стальных проводов диаметром не менее 5 *мм*. Соединение этих проводников с оборудованием производят с помощью болтов или сварки. Заземляющие провода окрашивают в фиолетовый цвет.

Сопротивление заземляющего устройства не должно превосходить 4 *ом* (при мощностях генераторов или трансформаторов до 100 *ква* — не более 10 *ом*).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ТЕМЕ X

1. Что представляет собой энергосистема? В чем ее преимущества?
2. Под каким напряжением может передаваться электрическая энергия на промышленное предприятие?
3. Начертите схему распределения электроэнергии крупного промышленного предприятия.
4. Начертите схему распределения электроэнергии промышленного предприятия через распределительный пункт.
5. Из каких элементов состоит подстанция промышленного предприятия?
6. Как подразделяются электрические сети по своему устройству?
7. Как осуществляется прокладка воздушных и кабельных сетей и сетей внутренней прокладки?
8. Как расшифровать условные обозначения проводов и кабелей: АПР, ПРД, СРГ, ВРГ, ШР?
9. Перечислите схемы распределения электроэнергии по цехам. В чем их достоинства и недостатки?
10. Для чего применяется защитное заземление электроустановок?
11. Из каких элементов состоит заземляющее устройство?
12. Как подразделяются помещения по степени опасности поражения людей электрическим током?
13. При каких напряжениях необходимо заземление электроустановок?
14. Как производится заземление в электроустановках при четырехпроводной системе?
15. Как производится заземление в электроустановках при трехпроводной системе?
16. Как устроены заземлители и заземляющие проводники?

ЛИТЕРАТУРА

А. С. Касаткин. «Основы электротехники». Москва, «Энергия». 1966.

А. В. Врублевский, Г. Н. Григорьянц. «Электротехника». Москва. Воениздат. 1967

В. С. Попов, С. А. Николаев. «Электротехника». Москва, «Энергия». 1966

И. М. Иванов, Я. Д. Мац, М. М. Могилевский, Ю. Б. Россов «Электротехника». Москва. Воениздат. 1966

К. В. Лотоцкий, «Электрические машины и основы электропривода». Москва. «Колос». 1964

М. Ю. Анвельт, Ю. Х. Пухляков, М. А. Ушаков. «Электротехника». Москва. «Просвещение». 1965

Ш. М. Алукер. «Электроизмерительные приборы». Москва. Профтехиздат. 1962

В. Е. Китаев, Л. С. Шляпинтох. «Электротехника с основами промышленной электроники». Москва. Профтехиздат. 1963.

С. С. Леви, Н. Н. Лебедев. «Электрооборудование и электроснабжение строительных площадок». Москва. «Высшая школа». 1966

Н. Л. Аматуни, С. И. Бардинский, Г. В. Древс, Б. В. Ильин, Г. М. Кнорринг, С. Я. Пасечник, А. А. Преображенский, Б. Ф. Розенберг, В. И. Соловьев, П. П. Ястребов. «Электротехника и электрооборудование». Москва. Росвузиздат. 1963.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
Введение 4

Тема I. **Электрические цепи постоянного тока**

1. Источники электрического тока 7
2. Электрический ток 8
3. Электродвижущая сила и напряжение 9
4. Работа и мощность постоянного тока 10
5. Преобразование электрической энергии в тепловую 12
6. Работа источника тока на цепь с переменным сопротивлением . 13
7. Защита проводов цепи от коротких замыканий 14
8. Потеря напряжения в проводах 16
9. Первый закон Кирхгофа 18
10. Смешанное соединение сопротивлений 18
11. Электрическая цепь с несколькими источниками э. д. с. 19
12. Второй закон Кирхгофа 20
13. Расчет сложной цепи 21
14. Соединение источников э. д. с. 22

Контрольные вопросы к теме I 23

Тема II. **Электромагнетизм**

1. Магнитная индукция. Магнитный поток 25
2. Магнитное поле тока 26
3. Магнитная проницаемость 28
4. Напряженность магнитного поля 29
5. Ферромагнитные вещества и их намагничивание 29
6. Магнитная цепь 32
7. Электромагниты 34
8. Электромагнитная индукция 35
9. Принцип работы электрического генератора 36
10. Правило Ленца 37
11. Принцип работы электродвигателя 38

12. Индуктирование э. д. с. в контуре 39
13. Вихревые токи 42
Контрольные вопросы к теме II 42

Тема III. **Электрические машины постоянного тока**

1. Назначение машин постоянного тока 44
2. Устройство машины постоянного тока 44
3. Принцип действия машины постоянного тока 45
4. Понятие об обмотках якоря 47
5. Э. д. с. обмотки якоря 48
6. Реакция якоря 49
7. Коммутация тока 50
8. Момент на валу машины 52
9. Типы генераторов постоянного тока 52
10. Генератор с независимым возбуждением 53
11. Генератор с параллельным возбуждением 54
12. Генератор со смешанным возбуждением 55
13. Электродвигатели постоянного тока 57
14. Электродвигатель с параллельным возбуждением 58
15. Электродвигатель с последовательным возбуждением 60
16. Потери и коэффициент полезного действия 61
17. Технические данные машин постоянного тока 62
Контрольные вопросы к теме III 62

Тема IV. **Электрическая цепь однофазного переменного тока**

1. Общие сведения и определения 65
2. Получение переменного тока 66
3. Многополюсные генераторы переменного тока 68
4. Фаза и сдвиг фаз 68
5. Графическое изображение синусоидальных величин 69
6. Цепь переменного тока с одним активным сопротивлением . . 70
7. Цепь переменного тока с одной индуктивностью 72
8. Цепь переменного тока с активным сопротивлением и индуктивностью 74
9. Общий случай последовательного соединения активно-индуктивных сопротивлений 76
10. Общий случай параллельного соединения активно-индуктивных сопротивлений 78
11. Коэффициент мощности 79
12. Цепь переменного тока с емкостью 80
13. Последовательное соединение активного сопротивления, индуктивности и емкости 82
14. Параллельное соединение активно-индуктивного и емкостного сопротивлений 84
Контрольные вопросы к теме IV 86

Тема V. **Трехфазные цепи**

1. Получение трехфазного тока 89
2. Соединение обмоток трехфазного генератора 92
3. Включение потребителей в сеть трехфазного тока 95
4. Включение электрических ламп и электродвигателей в сеть трехфазного тока 99
Контрольные вопросы к теме V 100

Тема VI. **Трансформаторы**

1. Назначение трансформаторов и их применение 101
2. Устройство трансформатора 101
3. Принцип действия однофазного трансформатора 103
4. Режим холостого хода трансформатора 104
5. Работа трансформатора под нагрузкой 106
6. Номинальные параметры трансформатора 109
7. Потери энергии и к. п. д. трансформатора 110
8. Трехфазные трансформаторы 112
9. Технические данные трехфазных трансформаторов 114
10. Измерительные трансформаторы тока и напряжения 114
11. Автотрансформаторы 116
12. Сварочные трансформаторы 118
Контрольные вопросы к теме VI 118

Тема VII. **Электротехнические измерения и приборы**

1. Роль и значение электрических измерений 120
2. Основные положения о порядке поверки измерительных приборов на предприятиях 120
3. Требования, предъявляемые к измерительным приборам. Методы измерения 121
4. Погрешности при измерениях 122
5. Классификация измерительных приборов 123
6. Измерительные механизмы приборов 125
7. Измерение тока и напряжения 131
8. Измерение сопротивлений 135
9. Измерение мощности 138
10. Измерение электрической энергии 141
11. Измерение электрическими методами неэлектрических величин 142
Контрольные вопросы к теме VII 145

Тема VIII. **Электрические машины переменного тока**

1. Общие сведения об асинхронных двигателях 148
2. Устройство трехфазного асинхронного двигателя 148

3. Обмотка статора. Получение вращающегося магнитного поля 150
4. Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя . . . 152
5. Скольжение ротора 153
6. Работа асинхронного двигателя при вращении ротора 153
7. Вращающий момент двигателя 155
8. Асинхронный двигатель как трансформатор 158
9. Пуск в ход трехфазных асинхронных двигателей 158
10. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя . . 160
11. Потери энергии, к. п. д. и коэффициент мощности трехфазного асинхронного двигателя 162
12. Технические данные трехфазных асинхронных двигателей . . . 163
13. Однофазный асинхронный двигатель 164
14. Понятие о синхронном двигателе 167
15. Пуск синхронных двигателей 168
16. Область применения синхронных двигателей 169
Контрольные вопросы к теме VIII 170

Тема IX. **Электропривод и аппаратура управления**

1. Понятие об электроприводе 173
2. Нагрев и охлаждение электрических машин 174
3. Режимы работы и выбор мощности электродвигателей по нагреву 175
4. Пускорегулирующая аппаратура для ручного управления электродвигателями 178
5. Защитная аппаратура 181
6. Контакторы и магнитные пускатели 183
7. Схемы релейно-контакторного управления двигателями постоянного и переменного тока 185
Контрольные вопросы к теме IX 190

Тема X. **Передача и распределение электрической энергии**

1. Общие принципы передачи электрической энергии 191
2. Схемы электроснабжения промышленных предприятий 192
3. Трансформаторные подстанции и распределительные устройства промышленных предприятий 193
4. Электрические сети промышленных предприятий 194
5. Внутренние электрические сети и распределительные пункты . 194
6. Защитное заземление электротехнических установок 198
Контрольные вопросы к теме X 202

Литература 203

В. Ю. Вальдметс
ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
На русском языке

*

Сдано в набор 3/I 1969. Подписано к печати 26/IX 1969 г. Бумага 60 × 90 1/16. Печ. л. 13. Уч.-изд. л. 10,65. Тираж 2000 экз. МВ-09182. Заказ № 44. Тип. им. Ханса Хейдеманна. ЭССР, г. Тарту, ул. Юликооли 17/19. II

Цена 72 коп.

Kontrolekse-plar

72 коп.

1А-1796
236921