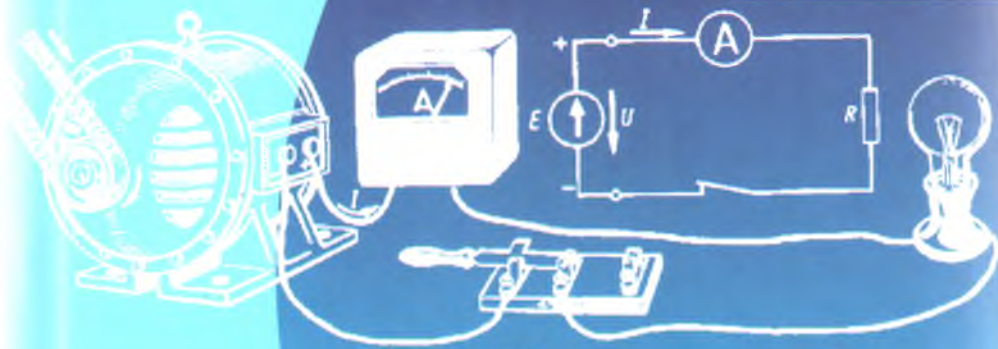


Э.Э.
А36
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ

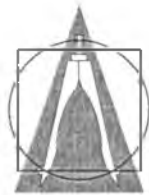


А. Айтимов, Е. Катаев

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

31.2
А 36

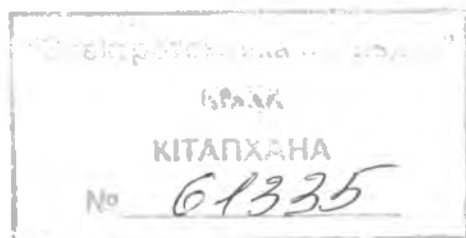
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ



А. АЙТИМОВ, Е. КАГАЕВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Учебное пособие



Издательство «Фолиант»
Астана-2010

УДК 621.3
ББК 34.2
А 36

Рецензент:

Ахметов Б.С. – доктор технических наук, профессор

А 36 Айтимов А., Катаев Е.
Электротехника: Учебное пособие. – Астана: Фолиант, 2010. – 240 с.

ISBN978-601-292-178-6

Параграфы пособия представлены в форме лекций, содержат основы теории электрических и магнитных цепей, электромагнитных устройств, электрических машин. В конце параграфов приведены контрольные вопросы и задачи для самостоятельного решения.

Для учащихся профессиональных лицеев и колледжей.

УДК 621.3
ББК 31.2

ISBN 978-601-292-178-6 © Айтимов А., Катаев Е., 2010
© Издательство «Фолиант», 2010

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие представляет собой курс лекций по общеобразовательным дисциплинам «Теоретические основы электротехники» для технических и «Электротехника», «Основы электротехники и электроники» – других специальностей организаций технического и профессионального образования.

Материал пособия формирует целостное представление об изучаемой дисциплине, логически структурирован и соответствует требованиям Государственного стандарта технического и профессионального образования Республики Казахстан (ГОСО РК 4.05-2008 «Среднее образование. Техническое и профессиональное образование. Основные положения»). Вместе с тем, каждый параграф пособия представляет отдельный блок, что позволяет использовать материал в соответствии с рабочими учебными планами профессионального лицея или колледжа, дополнять и корректировать содержание в соответствии с будущей специальностью учащегося.

Еще одна особенность – изложение теоретического материала несет практическую направленность, а контрольные вопросы и задачи предусматривают использование учебно-методического комплекса для проведения лабораторно-практических работ «UniTrain», имеющегося во всех профессиональных лицеях Западно-Казахстанской области.

В пособии наряду с задачами репродуктивного характера представлены задания, требующие от учащегося творческого подхода в их решении, самостоятельного поиска дополнительных знаний. Проблемный характер задач способствует повышению познавательной активности, углублению знаний учащихся по предмету.

С целью упрощения восприятия учебный материал излагается с приведением аналогий и сравнений, математический аппарат соответствует содержанию образования общеобразовательной школы.

Пособие будет полезно учащимся старших классов общеобразовательных, профильных школ, лицеев, а также для самостоятельного изучения.

§1. ПРОЦЕССЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Для поддержания длительного тока нужно все время поддерживать разность потенциалов на концах металлического проводника. Если бы электроны не испытывали никаких помех в своем движении, то, будучи приведены в упорядоченное движение, они двигались бы по инерции, без действия электрического поля, неограниченно долго. Однако в действительности электроны испытывают соударения с ионами, атомами вещества. При этом электроны, обладавшие перед соударением некоторой скоростью упорядоченного движения, после соударения будут отскакивать в произвольных, случайных направлениях, и упорядоченное движение электронов (электрический ток) будет превращаться в беспорядочное (тепловое) движение: после устранения электрического поля ток очень скоро исчезнет. Для того, чтобы получить длительный ток, нужно после каждого соударения вновь и вновь гнать электроны в определенном направлении, а для этого нужно, чтобы на электроны все время действовала сила, т.е. чтобы внутри металла было электрическое поле.

Чем большая разность потенциалов поддерживается на концах металлического проводника, тем сильнее внутри него электрическое поле, тем больше ток в проводнике. Двигаясь под действием электрического поля, электроны приобретают некоторую кинетическую энергию. При соударениях эта энергия частично передается ионам решетки, отчего они приходят в более интенсивное тепловое движение. Таким образом, при наличии тока все время происходит переход энергии упорядоченного движения электронов (тока) в энергию хаотического движения ионов и электронов, которая представляет собой внут-

ренную энергию тела, а это значит, что внутренняя энергия металла увеличивается. Этим объясняется выделение джоулева тепла. Резюмируя, можно сказать, что причина электрического сопротивления заключается в том, что электроны при своем движении испытывают соударения с ионами металла. Эти соударения производят такой же результат, как и действие некоторой постоянной силы трения, стремящейся тормозить движение электронов.

Нетрудно представить те процессы, которые обуславливают эти помехи. В металлическом проводнике движение зарядов есть движение электронов между положительно заряженными атомами, которые получают в результате отделения этих электронов проводимости от атомов, составляющих металл. В электролитах — это движение положительных и отрицательных ионов навстречу друг другу, происходящее среди неионизированных молекул раствора. Естественно считать, что упорядоченное движение заряженных частиц, представляющее собой ток и происходящее среди многочисленных частиц, не принимающих участия в этом упорядоченном движении, а лишь совершающих хаотическое тепловое «колебание на месте», сопровождается многочисленными столкновениями носителей зарядов с другими частицами. Эти столкновения, затрудняющие перемещение заряженных частиц по проводнику, и являются причиной сопротивления проводников прохождению тока.

Можно предвидеть из этих соображений, что сопротивление зависит от геометрических размеров проводника, т.е. от его длины и сечения, равно как от его состава и строения, определяющих частоту столкновений носителей зарядов с окружающими частицами. Не исключено и влияние температуры проводника, поскольку более или менее оживленное тепловое движение частиц может сказаться на числе столкновений.

Электрическое сопротивление означает противодействие протеканию тока. Это противодействие может быть вызвано проводниками ограниченного сечения или на-

мерно путем включения в цепь элемента, обладающего сопротивлением (резистивностью) и называемого резистором.

В СИ единицей сопротивления является сопротивление такого проводника, по которому течет ток, равный одному амперу, если на концах его поддерживать напряжение, равное одному вольту. Эта единица сопротивления называется омом (Ом).

Закон Ома, представляющий один из важнейших законов электрического тока, имеет смысл только тогда, когда отношение U к I , названное нами сопротивлением, есть постоянная для данного проводника величина. Другими словами, закон Ома справедлив для таких проводников, у которых сопротивление не зависит от приложенного напряжения и силы тока. К этому типу проводников относятся металлические проводники, уголь и электролиты.

Если l – длина такого проводника, S – площадь поперечного сечения, то его сопротивление вычисляется по следующей формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1.1)$$

где ρ – удельное сопротивление материала.

Для конкретного элемента значение ρ определяют по справочникам. Оно зависит от рода материала. ρ равно сопротивлению цилиндра из данного вещества, имеющего длину, равную единице, и площадь поперечного сечения, равную единице.

Сопротивление таких элементов не зависит от тока и приложенного напряжения. К таким элементам относятся резисторы. Величину, обратную сопротивлению, вычисляют по формуле:

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.2)$$

При увеличении площади поперечного сечения проводника увеличивается площадь, по которой проходят заряженные частицы. Таким образом, увеличивается проводимость материала или, по-другому говоря, уменьшается сопротивление проводника.

Чем длиннее проводник, тем больше количество атомов, препятствующих прохождению заряженных частиц или тока. В результате увеличивается сопротивление проводника.

Задачи

1. Как изменится сопротивление проводника, если площадь его поперечного сечения увеличить в K раз?

2. Во сколько раз изменится сопротивление медного провода, если его длину увеличить в два раза, а сечение уменьшить в три раза?

3. При повышении температуры сопротивление терморезистора увеличилось на 50%. Как изменится его проводимость?

4. Используемый в линии медный провод имеет сопротивление R . Как изменится это значение, если медный провод заменить: а) стальным; б) алюминиевым при неизменных l и S ?

Вопросы

1. Чем обусловлено сопротивление проводника?

2. Откуда берутся свободные электроны внутри проводника?

3. Что описывает удельное сопротивление?

4. Каким образом при увеличении площади поперечного сечения проводника уменьшается его сопротивление?

5. Каким образом при увеличении длины проводника увеличивается его сопротивление?

§2. ПРОЦЕССЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Представим себе очень длинную цепь тока, например, телефонную линию между двумя городами, стоящими один от другого, скажем, на 1000 км.

Тщательные опыты показывают, что действия тока во втором городе начнут проявляться, т.е. электроны в находящихся там проводниках начнут двигаться, примерно через $1/300$ секунды после того, как началось их движение по проводам в первом городе. Часто говорят, что ток распространяется по проводам со скоростью 300000 км/с. Это, однако, не означает, что движение носителей заряда в проводнике происходит с такой огромной скоростью так, что электрон или ион, находившийся в нашем примере в первом городе, через $1/300$ секунды достигнет второго. Вовсе нет. Движение носителей в проводнике происходит почти всегда очень медленно, со скоростью несколько миллиметров в секунду, а часто и еще меньшей. Мы видим, следовательно, что нужно тщательно различать и не смешивать понятия «скорость тока» и «скорость движения носителей заряда».

Начавшееся в одном месте движение (возмущение) зарядов через изменение электрического поля распространяется по всей цепи. Одни за другими все более удаленные носители заряда вовлекаются в это движение, и эта передача действия от одних зарядов к другим и происходит с огромной скоростью (около 300 000 км/с). Иначе можно сказать, что электрическое действие (возмущение) передается от одной точки цепи к другой с этой скоростью или что с этой скоростью распространяется вдоль проводов изменение электрического поля, возникшее в каком-нибудь месте цепи. Таким образом, та скорость, которую мы для краткости называем «скоростью

тока», — это скорость распространения вдоль проводника изменений электрического поля, а отнюдь не скорость движения в нем носителей заряда.

Поясним сказанное механической аналогией. Представим себе, что два города соединены нефтепроводом и что в одном из этих городов начал работать насос, повышающий в этом месте давление нефти. Это повышенное давление будет распространяться по жидкости в трубе с большой скоростью — около километра в секунду. Таким образом, через секунду начнут двигаться частицы на расстоянии, скажем, 1 км от насоса, через две секунды — на расстоянии 2 км, через минуту — на расстоянии 60 км и т.д. Спустя примерно четверть часа начнет вытекать из трубы нефть во втором городе. Но движение самих частиц нефти происходит значительно медленнее, и может пройти несколько суток, пока какие-нибудь определенные частицы нефти дойдут от первого города до второго. Возвращаясь к электрическому току, мы должны сказать, что «скорость тока» (скорость распространения электрического поля) аналогична скорости распространения давления по нефтепроводу, а «скорость носителей» аналогична скорости движения частиц самой нефти.

В металлах в обычных условиях могут перемещаться только электроны, несущие отрицательный заряд. При замыкании полюсов источника тока проводником, электрическое поле двигает электроны в сторону возрастания потенциала, т.е. от отрицательного полюса к положительному через проводник. А за направление тока принято направление, противоположное движению электронов. Следует признать такое определение направления тока довольно неудачным. Оно было сделано в те времена, когда представление об электронах и их свойствах еще не было введено, и природа носителей заряда в металлах была еще неизвестна. В то время считали, что носителями зарядов являются положительные частицы и при замыкании цепи именно они двигаются из положительного полюса к отрицательному.

Для поддержания длительного тока нужно все время поддерживать разность потенциалов на концах металлического проводника. Чем большая разность потенциалов поддерживается на концах металлического проводника, тем сильнее внутри него электрическое поле и тем больше ток в проводнике.

Для создания разности потенциалов на концах металлического проводника используются силы неэлектростатического происхождения. Источники, создающие такие силы, являются источниками электрического питания. Разделяя атомы на заряды, сдвигая эти заряды в разные концы цепи, эти силы создают разность потенциалов между этими концами. А движение зарядов через цепь обусловлено электрическим полем, возникающим в проводнике вследствие разности потенциалов между его концами.

Электродвижущей силой источника тока называется отношение работы A , произведенной сторонними силами при перемещении положительного заряда q по замкнутому контуру тока, к этому заряду:

$$\varepsilon = \frac{A}{q} . \quad (2.1)$$

Следует иметь в виду, что название «электродвижущая сила» (ЭДС) нельзя понимать в буквальном смысле, поскольку ее размерность отличается от размерности силы или работы. ЭДС выражается в вольтах.

Для количественной же характеристики тока вводится понятие силы тока. Силой тока в проводнике называют физическую величину, равную количеству электричества, проходящему через сечение проводника за единицу времени. Таким образом, если за время t через единичное сечение проводника проходит количество электричества, равное q , то сила тока:

$$I = \frac{q}{t} . \quad (2.2)$$

гене
итвой
ства
публик
ект
ческого
ошнно
рдных
Равито

заряда $+q$ в одном направлении или заряда $-q$ в противоположном направлении с точки зрения направления тока совершенно тождественны. Поэтому (рис. 1) под зарядом q мы имеем в виду сумму тех зарядов, которые были фактически перенесены положительными носителями заряда в направлении, принятом нами за направление тока, и отрицательными носителями — в противоположном направлении. Если сила и направление которого не изменяются со временем, называют постоянным током. Иногда возникает вопрос, постоянна ли сила тока в различных сечениях проводника. Если это имеет место, то можно сказать, что электрические заряды проходят через проводник, не накапливаясь: через любое сечение за одни и те же промежутки времени проходит одно и то же количество электричества. Такой ток называют установившимся (стационарным). Опыт показывает, что для установления тока достаточно очень короткий промежуток времени. Поэтому в случае постоянного тока мы всегда имеем дело с установившимся током. Если ток не постоянен, то изменяет с течением времени величину или даже свое направление.

Вопросы

- 1. Что называется «электродвижущая сила»?
- 2. Как называют силой тока в проводнике?
- 3. С какой скоростью распространяется вдоль проводника электрическое поле, возникшее в каком-либо месте цепи?
- 4. Как движутся заряды внутри металлов?
- 5. Как называется установившимся (стационарным) ток?

§3. УЧЕБНЫЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Измерение – это определение истинного значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Приборы, используемые для измерения электрических величин (тока, напряжения, мощности, сопротивления, емкости и т.д.), называются *электроизмерительными приборами*.

Правильность полученных результатов определяется тем, насколько грамотно используются имеющиеся средства измерений.

Выполняемые в процессе изучения курса «Электротехника» лабораторные работы также сопровождаются измерением токов, напряжений, сопротивлений и мощностей. К основным средствам электрических измерений, применяемым в учебных целях, относятся: приборы постоянного и переменного тока – миллиамперметр, вольтметр, ваттметр; цифровой мультиметр; электронные приборы – осциллограф, милливольтметр.

Амперметр (условное обозначение – Ⓐ). Это прибор, измеряющий силу тока и поэтому включаемый в электрическую цепь (ЭЦ) последовательно с нагрузкой (рис. 3.1, а).

Для исключения влияния прибора на режим работы цепи (силу тока) его внутреннее сопротивление должно быть ничтожно мало.

Поэтому включение амперметра в цепь параллельно нагрузке вызовет протекание по нему значительного тока и выведет его из строя.

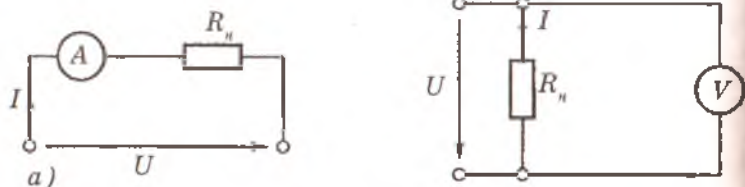


Рис. 3.1.

Вольтметр (условное обозначение – \textcircled{V}). Это прибор, измеряющий напряжение (разность потенциалов), и поэтому включаемый в ЭЦ параллельно с нагрузкой (рис. 3.1, б). Для исключения влияния прибора на режим работы цепи его внутреннее сопротивление должно быть бесконечно большим, а потребляемый прибором ток – ничтожно малым. Поэтому разрешается измерять напряжение путем касания подключенными к вольтметру щупами соответствующих точек ЭЦ.

Ваттметр (условное обозначение – \textcircled{W}). Это прибор, измеряющий активную мощность P , потребляемую ЭЦ или отдельными ее элементами. К внешней цепи ваттметр подключается тремя выводами (рис. 3.2).

При постоянном токе $P = IU$, поэтому ваттметр должен иметь токовую катушку, включаемую в цепь, как и амперметр, т.е. последовательно с нагрузкой, и катушку напряжения, включаемую, как и вольтметр, параллельно нагрузке (рис. 3.3).

Зажимы ваттметра, обозначенные на схеме звездочкой (*), должны быть соединены вместе.

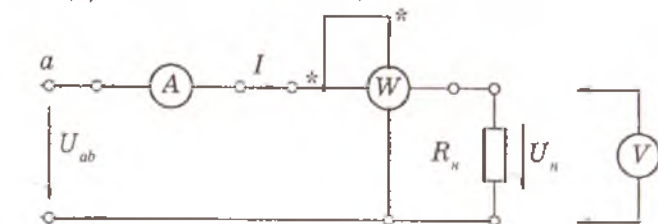


Рис. 3.3

Омметр (условное обозначение Ω) – прибор для измерения сопротивления. Отличается от остальных электроизмерительных приборов тем, что в его состав входит источник тока. Подключая омметр к цепи, через эту цепь пропускается ток от источника. Замеряя эту силу тока и зная напряжение, создаваемое источником, можно вычислить сопротивление цепи. Все это делается автоматически внутри прибора.



Рис. 3.4.

Это прибор (рис. 3.4), измеряющий электрическое сопротивление элементов, участков ЭЦ и ЭЦ в целом в обесточенном состоянии (при отключенных источниках питания ЭЦ). В основу действия прибора положено измерение тока I в исследуемом резисторе R_x , создаваемого эталонным источником ЭДС E , находящимся внутри прибора.

Так как $I = E / (R + R_x)$, то шкала прибора проградуирована в омах таким образом, что наибольшему отклонению стрелки соответствует наименьшее значение сопротивления исследуемого резистора R_x . Перед началом измерений сопротивления производят установку нуля прибора. Для этого при закороченных с помощью щупов щипках прибора ручкой «Установка нуля» совмещают положение стрелки с отметкой «0» на шкале. У цифрового омметра ручка «Установка нуля» отсутствует. Включение омметра в цепь с источником питания недопустимо, т.к. измерительный механизм прибора представляет собой микроамперметр и даже при незначительной величине внешнего тока может выйти из строя.

Осциллограф – (условное обозначение N) многоходовое измерительное устройство. Это прибор, предназначенный для исследования электрических сигналов во временной области путём визуального наблюдения графика сигнала на экране, для измерения в широком диапазоне частот, амплитуд, длительностей и частот повторения сигналов по форме графика.

На рис. 3.5 показан двухвходовой осциллограф, к левому входу которого подключена внешняя цепь. Осциллограф измеряет напряжение в цепи. По меткам на мониторе осциллографа можно вычислить амплитуду, частоту поступающего сигнала. С одновременной подачей сигналов на оба входа, можно сравнить эти сигналы, вычислить фазовый сдвиг между ними.



Рис. 3.5.

Вопросы

1. Какие приборы называются электроизмерительными?
2. Как включается амперметр в электрическую цепь?
3. Как включается вольтметр в электрическую цепь?
4. Почему включение омметра в цепь с источником питания недопустимо?
5. Для чего применяются осциллографы?

Лабораторные работы

1. Измерение напряжения.
2. Измерение тока.

§4. ЗАКОН ОМА

Закон Ома в простейшем случае связывает величину тока, проходящего через элемент с сопротивлением R и приложенным к нему напряжением: $I=U/R$. В качестве элемента с сопротивлением R может выступать простой резистор.

Сила тока на некотором участке электрической цепи прямо пропорциональна напряжению на этом участке и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка.

В электрических цепях ток течет от точки с относительно большим потенциалом к точке, имеющей относительно меньший потенциал.

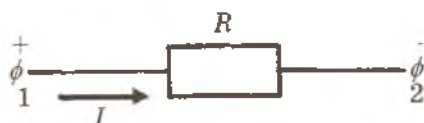


Рис. 4.1.

Поэтому на рис. 4.1 стрелка тока направлена от «+» к «-», что соответствует закону Ома в форме:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = IR. \quad (4.1)$$

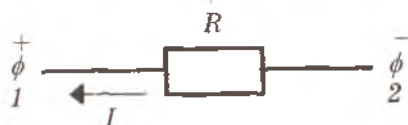


Рис. 4.2.

Для обозначений, принятых на рис. 4.2, закон Ома должен быть записан в следующей форме:

$$U_{12} = -IR. \quad (4.2)$$

КНИЖКА
КНИПХАНА
№ 61335 17

Закон Ома справедлив для любой ветви (или части ветви) электрической цепи, в таких случаях его называют обобщенным законом Ома. Для ветви, не содержащей ЭДС, закон Ома:

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{\sum_1^n R_i} = \frac{U_{ab}}{\sum_1^n R_i}, \quad (4.3)$$

где φ_a, φ_b – потенциалы крайних точек ветви, их разность можно заменить напряжением U_{ab} ;

$\sum_1^n R_i$ – сумма всех n сопротивлений, содержащихся в этой ветви;

R_i – значение i -го сопротивления.

Обобщенный закон Ома для ветви, содержащей источники ЭДС и активные сопротивления:

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_b + \sum_1^k E_j}{\sum_1^n R_i} = \frac{U_{ab} + \sum_1^k E_j}{\sum_1^n R_i}, \quad (4.4)$$

где $\sum_1^k E_j$ – алгебраическая сумма всех k источников питания, содержащихся в этой ветви;

E_j – ЭДС j -го источника питания.

Пример: Закон Ома для активной цепи на рис. 4.3.

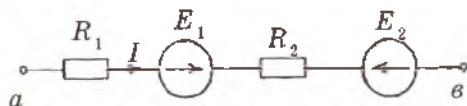


Рис. 4.3.

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_b + E_1 - E_2}{R_1 + R_2} \quad (4.5)$$

Для реального источника, приведенного на рисунке 4.4, закон Ома для полной цепи имеет следующую форму:

$$I = \frac{E}{R_{вн} + R_H} \quad (4.6)$$

Напряжение между концами нагрузки, т.е. между точками 1 и 2:

$$U = I \cdot R_H,$$

где I – ток, протекающий по цепи;

E – ЭДС источника питания;

$R_{вн}$ – внутреннее сопротивление источника питания;

R_H – сопротивление нагрузки,

$R_{вн} + R_H$ – полное сопротивление цепи.

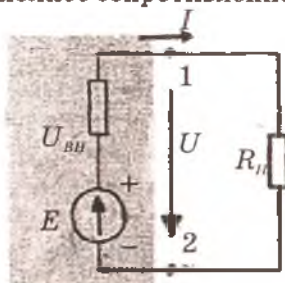


Рис. 4.4. Схема с реальным источником ЭДС (сторона источника выделена затемненным цветом)

Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью $G = 1/R$. Закон Ома можно представить через проводимость:

$$\frac{I}{U} = G, \quad U = \frac{I}{G}, \quad I = U \cdot G \quad (4.7)$$

Задачи

1. Как определить силу тока, проходящего через нагрузки с сопротивлением R на рис. 4.5, если заданы параметры источника электроэнергии E и R_0 ?

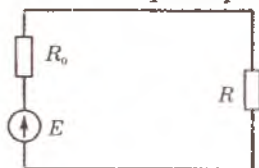


Рис. 4.5.

2. Найти ток, проходящий через резистор с сопротивлением R в схеме на рис. 4.6, если $\varepsilon_1=9$, $\varepsilon_2=6$ В, $r_1 = r_2 = 2$ Ом, $R = 28$ Ом.

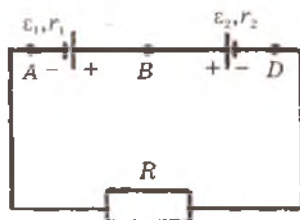


Рис. 4.6.

3. Концам резистора подается напряжение 12 В. При последовательном подключении к резистору еще двух таких резисторов, сила тока приравнивается к 0,4А. Чему равно сопротивление резистора? Чему равен первоначальный ток?

4. Через резистор проходит ток 1А. При последовательном подключении к резистору еще нескольких таких резисторов сила тока равна 0,2А. Сколько резисторов были дополнительно подключены?

Вопросы

1. Какие электрические величины связывает закон Ома?
2. Напишите закон Ома для нескольких сопротивлений, соединенных последовательно, к общим концам которых приложено напряжение.
3. Как учитывается внутреннее сопротивление источника питания, приложенного к цепи, при написании закона Ома для этой цепи?
4. Какая электрическая величина уменьшается при увеличении сопротивления?
5. Какова связь между сопротивлением и проводимостью?

Лабораторная работа

1. Закон Ома.



§5. ИСТОЧНИКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Свободные электроны находятся внутри металла в непрерывном тепловом движении. Электрический ток создается тогда, когда движения электронов упорядочиваются и принимают одно направление.

Для поддержания длительного тока в цепи нужно все время поддерживать разность потенциалов между концами этой цепи. Для этих целей используются источники электрического питания.

Источники электрического питания могут быть постоянными и переменными.

Источники питания цепи постоянным током – электрические батарейки, аккумуляторы, электромеханические генераторы, термоэлектрические генераторы, фотоэлементы и др. Все источники питания имеют внутреннее сопротивление, значение которого невелико по сравнению с сопротивлением других элементов электрической цепи.

Источник ЭДС (электродвижущих сил) характеризуется величиной ЭДС, равной напряжению (разности потенциалов) на зажимах при отсутствии тока через источник. В электрических схемах источники ЭДС могут обозначаться как на рис. 5.1. Если источник обозначен знаком , то сторона с длинной линией показывает источник с положительным полюсом. Если источник обозначен , то начало стрелки является отрицательным полюсом источника.

В электрических схемах точки с большим потенциалом обозначаются со знаком «+», а с меньшим потенциалом – со знаком «-».

Если к точке «1» рисунка 5.2 подключен положительный полюс источника, а к точке «2» – отрицательный, то

ток через сопротивление течет от точки «1» к точке «2», а внутри источника питания – со стороны точки «2» в сторону точки «1».

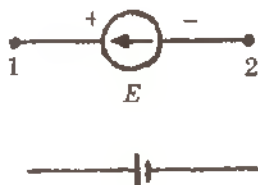


Рис. 5.1. Обозначения постоянного источника ЭДС и батареек в схемах

В качестве постоянного потребителя может выступить резистор (рис. 5.2), характеризующийся сопротивлением R , для которого справедлив закон Ома:

$$I = \frac{U_{12}}{R} \text{ или } U_{12} = I \cdot R,$$

$$\text{где } U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = I \cdot R \quad (5.1)$$

Напряжение на выходе реального источника, имеющего внутреннее сопротивление $R_{вн}$:

$$U = E - I \cdot R_{вн}, \quad (5.2)$$

где I – ток в цепи;

E – ЭДС источника питания;

R_H – сопротивление нагрузки.

Напряжение U на зажимах реального источника меньше ЭДС на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении. Идеальный источник имеет $R_{вн} = 0$.

Максимальный ток возникает в режиме короткого замыкания при $R_H = 0$, при этом выходное напряжение U стремится также к нулю.

Электрические цепи создают для того, чтобы они совершали определенную функцию. Это, например, – высвечивание ламп, работы нагревающих или охлаждающих устройств, вращение двигателей и т.д. Эти работы могут совершаться при одном условии – при прохождении через цепь предусмотренного тока. Сама работа называется работой электрического тока.

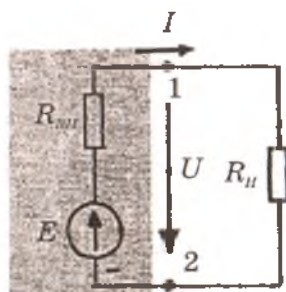


Рис. 5.2. Схема с реальным источником ЭДС (сторона источника выделена затемненным цветом)

Работа тока на определенном участке цепи равна произведению силы тока, напряжения и времени, в течение которого совершалась работа:

$$A = U \cdot I \cdot t \quad (5.3)$$

Разделяя работу A к соответствующему промежутку времени t , получают мощность:

$$P = A / t = UI \quad (5.4)$$

Используя закон Ома, можно получить другие формулы для мощности в электрических цепях:

$$P = UI = I^2 R = U^2 / R \quad (5.5)$$

При расчетах эффективным является применение мощности по сравнению с применением работы.

Для того, чтобы электрический ток совершал определенную работу во внешней цепи, источник питания использует свою энергию или мощность. Для того, чтобы выполнялась максимальная работа, максимально большая часть мощности должна совершать работу. Для получения во внешней цепи максимальной мощности, необходимо равенство внутреннего сопротивления источника r_0 к сопротивлению внешней части цепи: $r_0 = r$.

Вопросы

1. Какой ток называется постоянным?
2. В каких единицах измеряются сила тока, напряжение, мощность, сопротивление?
3. Чему равна мощность тока, проходящего через активное сопротивление?
4. Для чего применяются источники постоянного тока?
5. Как обозначаются источники постоянного тока в электрических схемах?

§6. РАЗЛИЧНЫЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ПОСТОЯННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭДС

При последовательном соединении источников общая ЭДС равна алгебраической сумме ЭДС отдельных источников, общее внутреннее сопротивление равно сумме внутренних сопротивлений отдельных источников. Для определения знака ЭДС для каждого источника нужно выбрать положительное направление движения на участке с этим источником. ЭДС источника берется со знаком «+», если направление действия ЭДС совпадает с выбранным направлением. В противном случае ставится знак «-».

При параллельном соединении источников с одинаковыми ЭДС и возможно различными внутренними сопротивлениями общая ЭДС (ЭДС батареи) равна ЭДС одного источника. Внутреннее сопротивление батареи рассчитывается как при параллельном соединении проводников с сопротивлениями, равными внутренним сопротивлениям источников.

При параллельном соединении источников с различными ЭДС выражение для ЭДС батареи усложняется и здесь не приводится.

Источники постоянных ЭДС (аккумуляторы, элементы) включаются между собой последовательно, параллельно и смешанно.

6.1. Последовательное соединение источников ЭДС

На рис. 6.1, а представлены три соединенных между собой аккумулятора. Такое соединение аккумуляторов, когда минус каждого предыдущего источника соединен

с плюсом последующего источника, называется последовательным соединением.

Группа соединенных между собой аккумуляторов или элементов называется батареей (на рисунке приведены старые виды аккумуляторов). При последовательном соединении аккумуляторов общая ЭДС E равна:

$$E = E_1 + E_2 + E_3, \quad (6.1)$$

где E_1, E_2, E_3 — ЭДС отдельного источника.

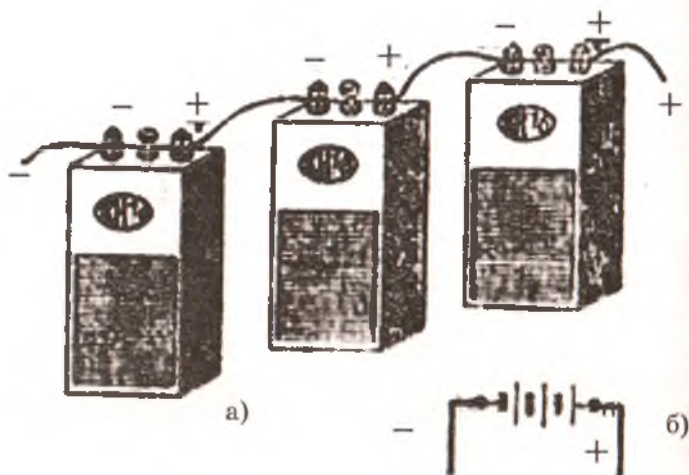


Рис. 6.1. Последовательное соединение источников ЭДС

Внутреннее сопротивление батареи равно сумме внутренних сопротивлений отдельных аккумуляторов:

$$r_0 = r_1 + r_2 + r_3 \quad (6.2)$$

Схематически последовательное соединение трех аккумуляторов в батарею показано на рис. 6.1, б. Так как ЭДС аккумуляторов в этом случае совпадают по направлению, ЭДС всей батареи равна их сумме.

Если батарея окажется замкнутой на внешнее сопротивление r , то ток в цепи будет найден по формуле:

$$I = \frac{E}{r_0 + r} = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{r_{01} + r_{02} + r_{03} + r} \quad (6.3)$$

Последовательно соединяют аккумуляторы в том случае, когда напряжение потребителя выше ЭДС одного аккумулятора.

Практически приходится соединять между собой в батареи только однотипные аккумуляторы, т.е. имеющие одинаковые ЭДС, внутренние сопротивления и емкости.

Внутреннее сопротивление батареи:

$$r_0 = r_{01}n \quad (6.4)$$

Ток батареи, замкнутой на внешнее сопротивление, будет:

$$I = \frac{E_1 n}{r_{01}n + r} \quad (6.5)$$

В этом случае ЭДС батареи, состоящей из n аккумуляторов, равна:

$$E_{\text{бат}} = E_1 n \quad (6.6)$$

6.2. Параллельное соединение источников ЭДС

Если положительные зажимы (плюсы) нескольких аккумуляторов соединить между собой и вывести общий плюс, а отрицательные зажимы (минусы) этих же аккумуляторов также соединить между собой и вывести общий минус, то такое соединение будет называться параллельным. На рис. 6.2, а представлено параллельное соединение трех аккумуляторов, а на рис. 6.2, б дана схема того же соединения.

Обязательным условием для параллельного соединения аккумуляторов является равенство их ЭДС, внутренних сопротивлений и емкостей, т.к. иначе между аккумуляторами будут протекать уравнительные токи, вредные для батареи.

ЭДС батареи при параллельном соединении равна ЭДС одного аккумулятора:

$E_{\text{бат}} = E_1 = E_2 = E_3 = \dots = E_n$, где $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ - ЭДС отдельного источника.

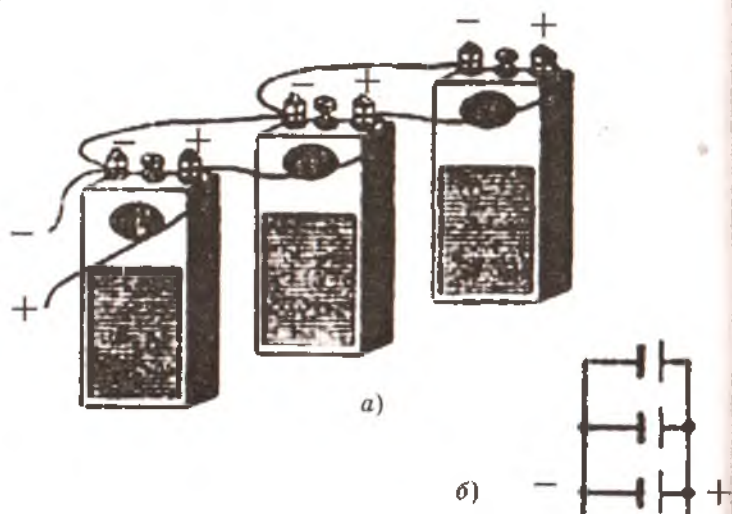


Рис. 6.2. Параллельное соединение источников ЭДС

При параллельном соединении аккумуляторов батарея в целом может отдать в сеть ток больший, чем каждый аккумулятор в отдельности.

Внутреннее сопротивление батареи, состоящей из n параллельно включенных аккумуляторов, будет и в n раз меньше сопротивления каждого аккумулятора:

$$r_0 = \frac{r_{01}}{n} \quad (6.7)$$

Ток, отдаваемый батареей в сеть, будет:

$$I = \frac{E}{\frac{r_{01}}{n} + r} \quad (6.8)$$

Параллельное соединение аккумуляторов применяется в том случае, когда напряжение потребителя равно

ЭДС аккумулятора, а ток, необходимый потребителю, больше разрядного тока одного аккумулятора.

6.3. Смешанное соединение источников ЭДС

Комбинируя последовательное и параллельное соединения, мы получим смешанное соединение аккумуляторов. На рис. 6.3, а представлено смешанное соединение четырех аккумуляторов из двух параллельных групп по два элемента в каждой группе, а на рис. 6.3, б дана схема этого соединения. ЭДС батареи со смешанным соединением аккумуляторов равна сумме ЭДС элементов, последовательно включенных в каждую группу (n):

$$E_{\text{сам}} = En \quad (6.9)$$

Внутреннее сопротивление аккумуляторов в группе:

$$r_{\text{Огр}} = r_{\text{Ог}} n \quad (6.10)$$

Внутреннее сопротивление батареи, состоящей из m групп:

$$r_{\text{об}} = \frac{r_{\text{Огр}}}{m} = \frac{r_{\text{Ог}} n}{m} \quad (6.11)$$

Ток, отдаваемый батареей в сеть сопротивлением r :

$$I = \frac{E_{\text{сам}}}{r_{\text{об}} + r} = \frac{E_1 n}{\frac{r_{\text{Ог}} n}{m} + r} \quad (6.12)$$

Смешанное соединение аккумуляторов применяется в том случае, когда напряжение и ток потребителя соответственно больше ЭДС и разрядного тока одного аккумулятора.

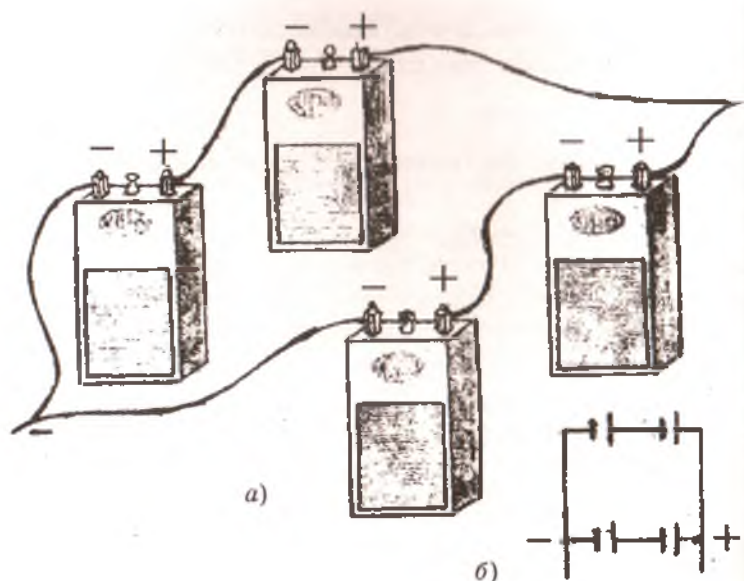


Рис. 6.3. Смешанное соединение батареек

Задачи

1. Имеется батарея из четырех аккумуляторов с ЭДС по 1,2 В и внутренним сопротивлением по 0,2 Ом. Батарея замкнута на сопротивление 4 Ом. Определить ток батареи в случае, если аккумуляторы соединены: а) последовательно; б) параллельно.

2. Четыре аккумулятора с ЭДС по 1,2 В и внутренним сопротивлением по 0,3 Ом включены последовательно. Внешнее сопротивление равно 8,4 Ом. Определить величину тока и напряжения батареи.

3. Три параллельные группы аккумулятора по пять последовательно включенных аккумуляторов в каждой группе работают на внешнюю сеть сопротивлением 4,995 Ом. ЭДС аккумулятора 2 В, внутреннее сопротивление 0,003 Ом. Определить ток, напряжение батареи и мощность, отдаваемую ею во внешнюю цепь.

4. Батарея из пяти аккумуляторов, обладающих ЭДС 1,2 В и внутренним сопротивлением 0,2 Ом, замкнута на внешнее сопротивление 11 Ом. Определить ток, отдаваемый батареей в сеть.

б. Определить ток, отдаваемый в сеть батареей, состоящей из двух параллельно включенных аккумуляторов, если ЭДС каждого аккумулятора равна 2 В, а внутреннее сопротивление – 0,02 Ом. Внешнее сопротивление равно 1,00 Ом.

б. В схеме на рис. 6.4 $\varepsilon = 12$ В, $r = 2$ Ом, $R = 6$ Ом. Найти напряжение на зажимах источников, т.е. разность потенциалов $\varphi_A - \varphi_B$

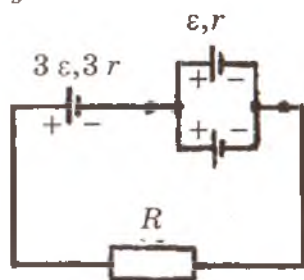


Рис. 6.4.

7. Имеется батарея, состоящая из двух параллельно соединенных групп аккумуляторов по три аккумулятора в группе. Батарея замкнута на сопротивление 1,65 Ом, ЭДС аккумулятора 1,2 В, внутреннее сопротивление 0,1 Ом. Определить ток во внешней цепи.

Вопросы

1. Как соединяются между собой источники постоянной ЭДС?
2. Каковы свойства положительного и отрицательного полюсов источника ЭДС?
3. Какова особенность последовательного соединения ЭДС?
4. Какова особенность параллельного соединения ЭДС?
- б. Какова особенность смешанного соединения ЭДС?

§7. ПЕРВЫЙ ЗАКОН КИРХГОФА

Первый закон (правило) Кирхгофа гласит: «Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле электрической цепи равна нулю»:

$$\sum_1^n I_l = 0, \quad (7.1)$$

где n – количество сходящихся токов.

При этом токи, текущие к узлу, считаются положительными, а от узла – отрицательными. Другая формулировка: сумма токов, подходящих к узлу, равна сумме токов, отходящих от узла.

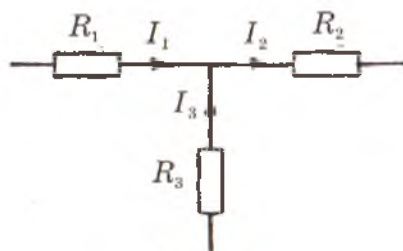


Рис. 7.1.

Например, рассмотрим точку следующего рисунка, к которой поступают токи I_1, I_3 , а исходит ток I_2 . Правило Кирхгофа пишется в следующих формулировках:

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0 \text{ или } I_1 + I_3 = I_2$$

Первый закон Кирхгофа по сути является законом баланса токов в узлах цепи. Если цепь стабильна, то не может быть процесса, когда все токи только поступают в узел или исходят от узла. Это привело бы к накоплению зарядов в этом узле или разрыву этого узла.

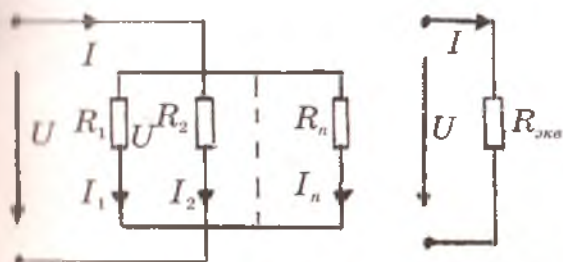


Рис.7.2.

Если группа заменяемых сопротивлений соединена параллельно (рис. 7.2), то напряжения на каждом из них и на эквивалентном сопротивлении одинаковы (на рисунке — U).

Значения токов через сопротивления определяются следующим образом:

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

Общий ток равен: $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$ (7.2)

Используя закон Ома для отдельного сопротивления, можем написать:

$$\frac{U}{R_{\text{экв}}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n}.$$
 (7.3)

Сокращая обе стороны уравнения на U , получим:

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$
 (7.4)

Эквивалентное сопротивление цепи, состоящей из параллельных составляющих, всегда меньше меньшего из сопротивлений цепи.

Поскольку величина, обратная сопротивлению, есть проводимость, то, вводя обозначения для проводимости G и $G_{\text{экв}}$ для сопротивления

$$G_i = \frac{1}{R_i}, \text{ получим: } G_{\text{ЭКВ}} = \sum_1^n G_i \quad (7.5)$$

Задачи

1. Как выглядит 1-й закон Кирхгофа для токов, указанных на рис. 7.3?

2. Каково сопротивление R_2 на рис. 7.4 при $R_1 = 3 \text{ Ом}$ и показаниях амперметров, указанных на схеме?

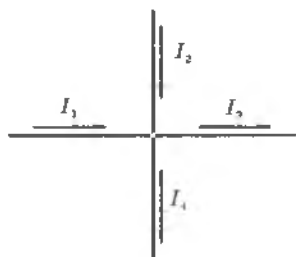


Рис. 7.3.

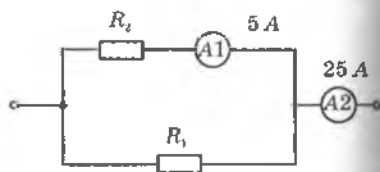


Рис. 7.4.

3. На узле цепи, показанной на рис. 7.5, ток I_3 в три раза больше тока I_1 и в два раза больше тока I_2 . Чему равны токи I_2, I_3 , если $I_1 = 2 \text{ А}$?

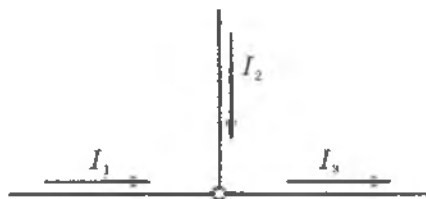


Рис. 7.5.

4. К схеме рис. 7.6. приложено напряжение $U = 6 \text{ В}$. При этом, ток $I = 1,2 \text{ А}$. Чему равны и какие направления имеют токи, проходящие через сопротивления схемы, если

известны соотношения между этими сопротивлениями:

$$R_1 = 3 \cdot R_2 = 3 \cdot R_3?$$

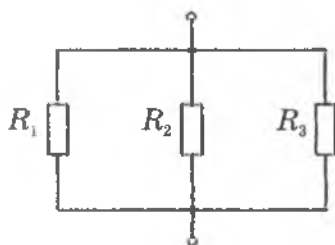


Рис. 7.6.

б. Составить уравнение для токов верхнего узла цепи рис. 7.7.

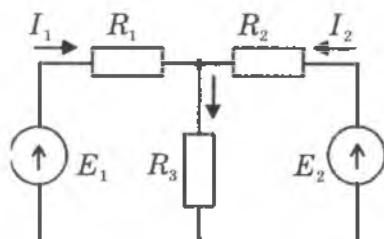


Рис. 7.7.

Вопросы

1. Что такое узел электрической цепи?
2. Что означает «ток, поступающий в узел»?
3. Что означает «алгебраическая сумма токов»?
4. Каким знаком обозначаются токи, исходящие от узла при составлении закона Кирхгофа для этого узла?
5. Может ли быть случай, когда токи только поступают в узел?

§8. ВТОРОЙ ЗАКОН КИРХГОФА

Если в замкнутом контуре электрической цепи имеются n элементов и m источников ЭДС, то алгебраическая сумма падений напряжений на элементах, входящих в контур, равна алгебраической сумме ЭДС, имеющих в контуре:

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{j=1}^m E_j, \quad (8.1)$$

где E_j — ЭДС j -го источника;

$I_k R_k$ — падение напряжения на k -том элементе.

Здесь вместо падения напряжения на k -том элементе U_k сразу вставлено обозначение $I_k R_k$ по закону Ома.

Второй закон Кирхгофа, по сути, является законом баланса напряжений в контурах электрических цепей.

Для составления уравнения по 2-му закону Кирхгофа выбираются произвольные направления обхода контура и каждого тока. Тогда, если направление тока в цепи совпадает с направлением обхода, то в уравнении соответствующее слагаемое берется со знаком «+», а если не совпадает, то со знаком «-». Аналогичное правило расстановки знаков справедливо и для ЭДС.

Пример:

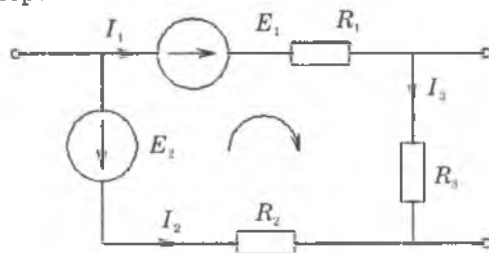


Рис. 8.1.

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 - I_2 R_2 = E_1 - E_2 \quad (8.2)$$

При последовательном соединении сопротивлений (рис. 8.2.) по каждому из них протекает один и тот же ток I , следовательно, падение напряжения на эквивалентном сопротивлении $R_{эКВ}$ должно быть равно сумме падений напряжений на исходных сопротивлениях:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n, \quad (8.3)$$



Рис. 8.2.

Вставляя вместо $U_i = I_i R_i$, из (8.3) получаем:

$$R_{жкВ} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_1^n R_i \quad (8.4)$$

Задачи

1. Для схемы (рис. 8.3) установить направление обхода контура и написать 2-й закон Кирхгофа. Направление тока указано в схеме.

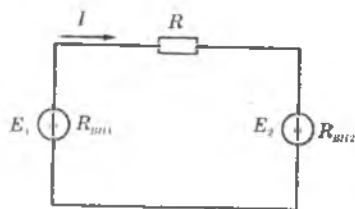


Рис. 8.3.

2. Чему равен ток в схеме рис. 8.4, если $E_1 = 10$ В, $R_{ВН1} = 2$ Ом, $E_2 = 4$ В, $R_{ВН2} = 3$ Ом, $R = 25$ Ом?

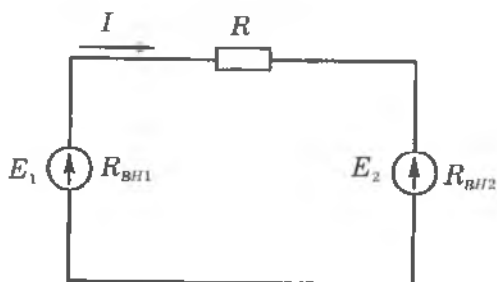


Рис. 8.4.

3. Каково внутреннее сопротивление R_0 источника электроэнергии на рис. 8.5, если при токе нагрузки 5 А вольтметр показывает 48 В, а при токе 10 А – 46 В?

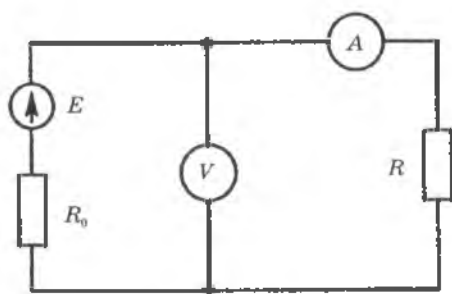


Рис. 8.5.

4. Каковы напряжение U и ток I_3 в цепи на рис. 8.6, если $I = 40$ А, $E = 20$ В, $R_1 = 12$ Ом, $R_2 = 6$ Ом, $R_3 = 4$ Ом, $R_4 = 5$ Ом?

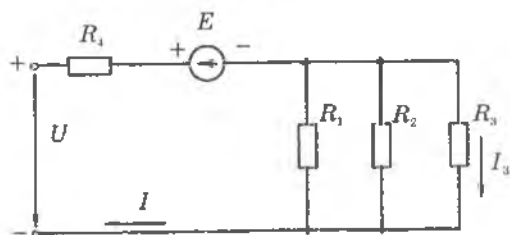


Рис. 8.6

в. Для заданной на рис. 8.7 ветви mn цепи постоянного тока составить уравнение второго закона Кирхгофа и указать правильное выражение для определения тока I в этой ветви.

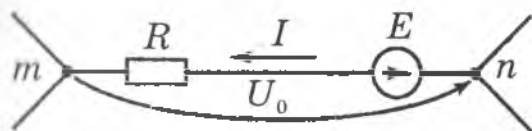


Рис. 8.7.

б. При расчете цепи с тремя ветвями с применением законов Кирхгофа были получены следующие уравнения:

$$\begin{aligned} I_1 + I_3 - I_2 &= 0 \\ E_1 &= I_1 R_1 + I_2 R_2 \\ E_2 &= I_2 R_2 + I_3 R_3 \end{aligned}$$

Считая параметры $E_1 = E_2 = E$ и $R_1 = R_2 = R_3 = R$ заданными, найти значения токов I_1 , I_2 и I_3 . Составить принципиальную электрическую схему цепи. I_1 , I_2 и I_3 — токи отдельных ветвей.

Вопросы

1. Что означает «алгебраическая сумма падений напряжений на элементах, входящих в контур»?
2. Что означает «алгебраическая сумма ЭДС, имеющих в контуре»?
3. Как выбирается направление обхода контура?
4. Как выбирается направление каждого тока?
5. Что гласит второй закон Кирхгофа?
6. Какие токи берутся со знаком «+» при составлении уравнения по 2-му закону Кирхгофа?
7. Какие ЭДС берутся со знаком «+» при составлении уравнения по 2-му закону Кирхгофа?

§9. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

9.1. Последовательное соединение потребителей

Потребители электрической энергии (нагреватели, осветительные приборы, реле, двигатели и др.) в электрических цепях постоянного тока характеризуются активным сопротивлением R (Ом). Они могут быть подключены к источнику питания последовательно (например, лампы елочной гирлянды – рис. 9.1, а), параллельно (лампы освещения промышленных и бытовых помещений, улиц – рис. 9.1, б)

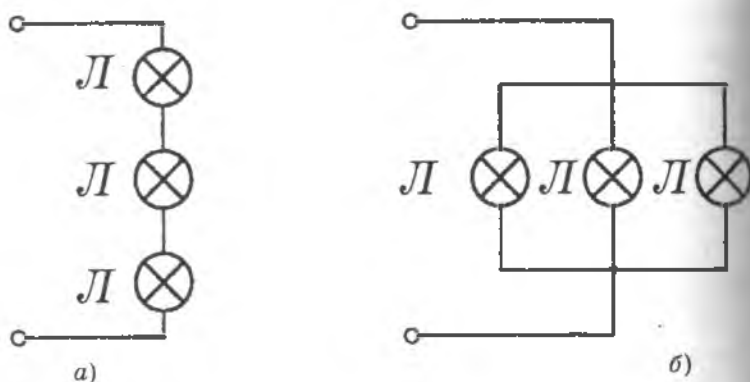


Рис. 9.1. Схемы соединений ламп:
а – последовательное; б – параллельное соединение

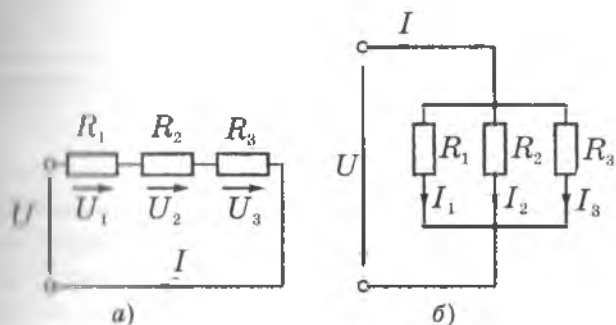


Рис. 9.2. Схемы замещения электрической цепи с включением нагрузки: а – последовательно; б – параллельно

При последовательном соединении элементов конец цепи первого потребителя соединяется с началом второго, конец второго – с началом третьего и т.д. Начало цепи первого и конец последнего потребителей подключаются к выводам источника питания (рис. 9.2, а).

Общее сопротивление всей цепи равно сумме сопротивлений отдельных потребителей:

$$R = R_1 + R_2 + R_3. \quad (9.1)$$

Общее сопротивление цепи, состоящей из n сопротивлений:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n. \quad (9.2)$$

Ток в такой цепи является общим для всех потребителей и определяется в соответствии с законом Ома:

$$I = U/R.$$

На каждом из потребителей падает напряжение. Падающее напряжение на потребителе определяется сопротивлением потребителя и проходящим через него током:

$$U_1 = IR_1; U_2 = IR_2; U_3 = IR_3.$$

Общее напряжение U состоит из суммы напряжений наведенного сопротивления:

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (9.3)$$

Умножив левую и правую части уравнения (9.1) на I^2 , получим

$$I^2 R = I^2 R_1 + I^2 R_2 + I^2 R_3$$

или

$$P_{\text{эц}} = P_1 + P_2 + P_3. \quad (9.4)$$

Таким образом, потребляемая электрической цепью мощность $P_{\text{эц}}$ равна сумме мощностей, потребляемых каждым элементом цепи. Отдаваемая источником мощность $P_{\text{и}}$ равна мощности, потребляемой всей цепью:

$$P_{\text{и}} = UI = I^2 R = P_{\text{эц}}. \quad (9.5)$$

Уравнение (9.5) является выражением баланса мощностей.

9.2. Параллельное соединение потребителей

При параллельном соединении потребителей их начала соединяются в одну точку (1-й узел), а концы — в другую (2-й узел). Оба узла подключаются к клеммам источника питания (рис. 9.2, б).

В соответствии с 1-м *правилом Кирхгофа* алгебраическая сумма токов для любого узла электрической цепи равна нулю:

$$I - I_1 - I_2 - I_3 = 0 \text{ или } I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Следовательно, сумма входящих в узел токов равна сумме отходящих. Поскольку напряжение для всех потребителей одно и то же, то в соответствии с законом Ома:

$$I_1 = U/R_1; I_2 = U/R_2; I_3 = U/R_3; I = U/R$$

или

$$U/R = U/R_1 + U/R_2 + U/R_3.$$

откуда

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3. \quad (9.6)$$

или

$$g = g_1 + g_2 + g_3, \quad (9.7)$$

где $g = 1/R$ — величина, обратная сопротивлению — проводимость потребителя, измеряемая в сименсах (См).

Для цепи, состоящей из n параллельных сопротивлений:

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots + 1/R_n \quad (9.8)$$

$$g = g_1 + g_2 + g_3 + \dots + g_n \quad (9.9)$$

Таким образом, при параллельном соединении потребителей общая проводимость равна сумме проводимостей отдельных потребителей.

Умножив левую и правую части уравнения (9.8) на U^2 , получим:

$$U^2/R = U^2/R_1 + U^2/R_2 + U^2/R_3 \text{ или } P = P_1 + P_2 + P_3. \quad (9.10)$$

Таким образом, как и при последовательном соединении элементов, потребляемая электрической цепью мощность равна сумме мощностей, потребляемых каждым элементом цепи, и равна мощности, отдаваемой источником.

Задачи

1. Имеем два резистора сопротивлением 5 и 10 кОм. Чему равно сопротивление при (а) последовательном и (б) параллельном их соединении?

2. Лампочка напряжением 12 В соединена последовательно с лампочкой напряжением 220 В, и обе они подключены к напряжению 220 В. Двенадцативольтовая лампочка горит слабо. На лампу большей или меньшей мощности следует заменить 220-вольтовую лампочку, чтобы 12-вольтовая загорелась ярче?

3. Какое соединение резисторов R_1 - R_3 представлено на рис. 9.3?

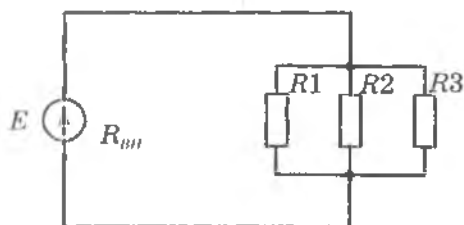


Рис. 9.3.

4. Какое соединение резисторов R_1 , R_2 , R_3 представлено на рис. 9.4?

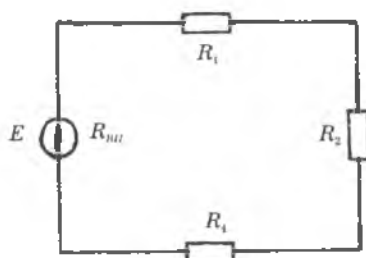


Рис. 9.4.

5. Нагреватель состоит из двух одинаковых спиралей. Как изменится мощность нагревателя, если последовательное соединение спиралей заменить на параллельное?

6. Нагреватель состоит из двух одинаковых спиралей. Как изменится мощность нагревателя, если параллельное соединение спиралей заменить на последовательное?

7. Нагреватель состоит из двух последовательно соединенных нагревательных элементов. Что нужно сделать, чтобы мощность нагревателя осталась прежней, если питающее напряжение уменьшилось в два раза?

8. Изменятся ли яркость ламп $L1$ и $L2$ и ток I в цепи на рис. 9.5 после включения лампы $L3$?

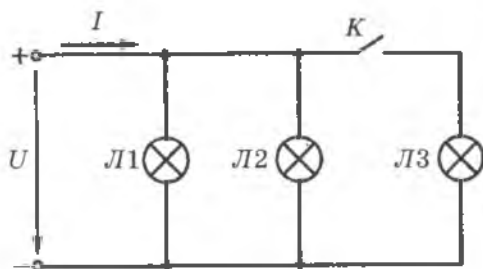


Рис. 9.5.

Вопросы

1. Каким соединения приемников электрической энергии являются последовательными, параллельными?
2. Как определить общее сопротивление цепи при любом соединении, если сопротивления участков известны?
3. Эквивалентное сопротивление нескольких последовательно соединенных резисторов больше или меньше любого из них?
4. Эквивалентное сопротивление нескольких параллельно соединенных резисторов меньше или больше любого из них?
5. Какие виды преобразований сопротивлений вы знаете?
6. Дано n последовательно соединенных сопротивлений. Запишите формулы для их эквивалентного сопротивления и эквивалентной проводимости.
7. Выполните предыдущую задачу для параллельного соединения сопротивлений.

Лабораторные работы

1. Последовательно соединенные резисторы.
2. Параллельно соединенные резисторы.

§10. СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Потребители электрической энергии, кроме способов последовательного и параллельного соединения, могут быть подключены к источнику питания смешанно (лампы двух и более елочных гирлянд – рис. 10.1).

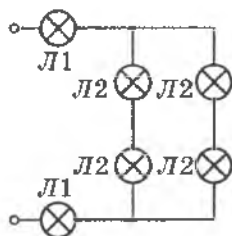


Рис. 10.1. Схема смешанного соединения ламп

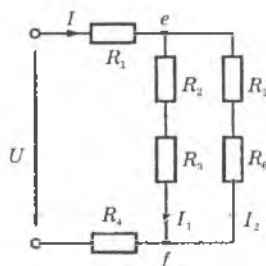


Рис. 10.2. Схемы замещения электрической цепи с включением нагрузки

Схема со смешанным соединением потребителей показана на рис. 10.2. Расчет такой электрической цепи может быть выполнен на основе приведенных ниже соотношений.

Для расчета такой цепи надо разделить ее на отдельные части: на схемы с последовательным соединением

формитов и на схемы с параллельным соединением элементов.

При последовательном соединении элементов общее сопротивление всей цепи равно сумме сопротивлений отдельных потребителей:

$$R = R_1 + R_2 + R_3.$$

При параллельном соединении потребителей между общим сопротивлением R и сопротивлениями отдельных элементов (R_1, R_2, R_3) выполняется следующее соотношение:

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 \text{ или } g = g_1 + g_2 + g_3,$$

где $g = 1/R$ — величина, обратная сопротивлению, — проводимость потребителя, измеряемая в сименсах (См).

Тогда, общее сопротивление электрической цепи при смешанном соединении сопротивлений для рис. 10.2 может быть вычислено в соответствии с выражением:

$$R = R_1 + R_{ef} + R_6, \quad (10.1)$$

где

$$R_{ef} = \frac{1}{1/(R_2 + R_3) + 1/(R_4 + R_5)} \quad (10.2)$$

Задачи

1. Две лампочки соединены параллельно, к ним последовательно — еще одна. Мощность ламп одинакова. Как будут светиться лампочки при подключении такой схемы к напряжению?

2. Чому равно общее сопротивление цепи, показанной на рис. 10.3?

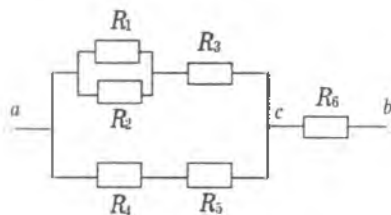


Рис. 10.3.

3. Изменятся ли яркость ламп $L1$ и $L2$ и ток I в цепи на рис. 10.4 после включения лампы $L3$?

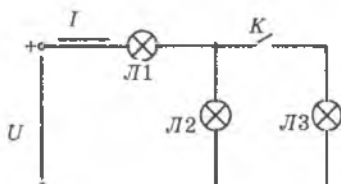


Рис. 10.4

4. Какое соединение резисторов R_1, R_2, R_3 представлено на рис. 10.5?

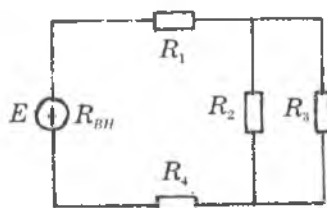


Рис. 10.5

Вопросы

1. Какие соединения приемников электрической энергии называются последовательными, параллельными, смешанными?
2. Как определить общее сопротивление цепи при любом соединении, если сопротивления участков известны?
3. В чем состоит особенность последовательного и параллельного соединений приемников?
4. Эквивалентное сопротивление нескольких последовательно соединенных резисторов больше или меньше любого из них?
5. Эквивалентное сопротивление нескольких параллельно соединенных резисторов меньше или больше любого из них?

Лабораторная работа

1. Смешанная параллельно-последовательная резисторная цепь.

11. ОДНОФАЗНЫЙ СИНУСОИДАЛЬНЫЙ ТОК

11.1. Генерация переменного тока

В генераторах, установленных на электростанциях, идет обратный процесс воспроизводства переменной ЭДС.

В современной технике применяются почти исключительно индукционные генераторы, т.е. машины, в которых ЭДС воспроизводится в результате процесса электромагнитной индукции.

Рассмотрим теперь подробнее, какова будет возникающая в рамке индуцированная ЭДС. Для простоты будем считать магнитное поле, в котором вращается рамка, однородным. Магнитный поток через рамку Φ есть произведение магнитной индукции поля на площадь рамки S и на синус угла φ между плоскостью рамки и направлением поля:

$$\Phi = BS \sin \varphi \quad (11.1)$$

Если рамка вращается равномерно и совершает полный оборот за время T , то за единицу времени рамка поворачивается на угол $2\pi/T$. Поэтому, если время отсчитывать от того момента, когда рамка стояла параллельно линиям поля, то значение угла φ в некоторый момент времени t будет равно $\varphi = (2\pi/T)t$. Обозначая частоту вращения рамки, т.е. число ее оборотов в единицу времени буквой ν , а угловую скорость буквой ω , можно написать:

$$\nu = \frac{1}{T}, \quad \omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} \quad (11.2)$$

$$\text{Тогда} \quad \varphi = \omega t \quad (11.3)$$

Подставив это выражение в формулу (11.1) для магнитного потока, мы увидим, что закон его изменения с течением времени имеет вид:

$$\Phi = BS \sin \omega t. \quad (11.4)$$

Переменный ток, в отличие от тока постоянного, непрерывно изменяется как по величине, так и по направлению, причем изменения эти происходят периодически, т.е. точно повторяются через равные промежутки времени.

Для получения переменного тока используются источники переменного тока, создающие переменную ЭДС, периодически изменяющуюся по величине и направлению. Такие источники называются генераторами переменного тока.

На рис. 11.1 показана схема устройства (модель) простейшего генератора переменного тока, его принципиально важные детали.

Прямоугольная рамка (контур), изготовленная из медной проволоки, укреплена на оси и при помощи ременной передачи вращается в поле магнита. Концы рамки припаяны к медным контактным кольцам, которые, вращаясь вместе с рамкой, скользят по контактным (металлическим) пластинам (щеткам).

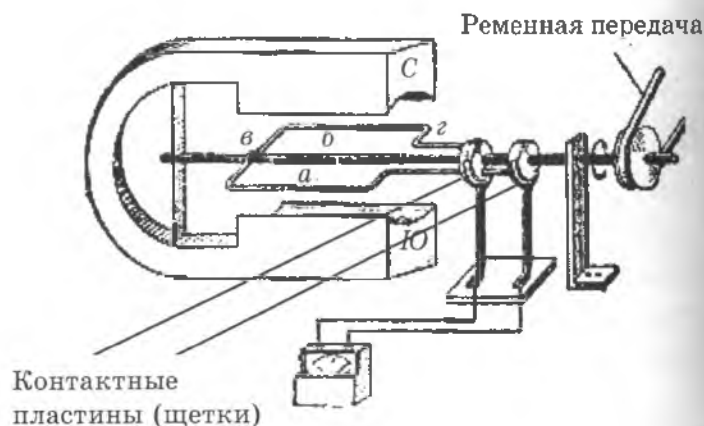


Рис. 11.1. Схема простейшего генератора переменного тока

Убедимся в том, что такое устройство действительно является источником переменной ЭДС.

Предположим, что магнит создает между своими полюсами равномерное магнитное поле, т.е. такое, в котором плотность магнитных силовых линий в любой части поля одинаковая. Вращаясь, рамка пересекает силовые линии магнитного поля.

При изменяющемся магнитном потоке, проходящем по поверхности замкнутого контура, на заряженную часть контура q контура действует сила Лоренца:

$$F=q[v \times B], \quad (11.5)$$

где $[v \times B]$ – векторное произведение скорости заряда (v и B является линейной скоростью вращения контура) в магнитного поля. Эта сила разгоняет разноименные заряды в разные концы контура. В результате, на концах контура, припаянных к кольцам, индуцируются ЭДС.

Стороны же «в» и «г» рамки – нерабочие, т.к. в этих участках сила Лоренца направлена перпендикулярно в сторону, и заряды этих сторон при действии силы прижимаются к стенкам рамки и не участвуют в создании ЭДС. Эти стороны просто являются связующими сторонами «а» и «б».

В любой момент времени ЭДС, возникающая в стороне «а», противоположна направлению ЭДС, возникающей в стороне «б», но в рамке обе ЭДС действуют согласованно и в сумме составляют общую ЭДС, т.е. индуцируемую всей рамкой.

В этом нетрудно убедиться, если использовать для определения направления ЭДС известное нам правило правой руки.

Для этого надо ладонь правой руки расположить так, чтобы она была обращена в сторону северного полюса магнита, а большой отогнутый палец совпадал с направлением движения той стороны рамки, в которой мы хотим определить направление ЭДС. Тогда направление ЭДС в ней укажут вытянутые пальцы руки.

Для какого бы положения рамки мы ни определяли направление ЭДС в сторонах «а» и «б», они всегда складываются и образуют общую ЭДС в рамке. При этом с каж-

дым оборотом рамки направление общей ЭДС изменяется в ней на обратное, т.к. каждая из рабочих сторон рамки за один оборот проходит под разными полюсами магнита.

Величина ЭДС, индуктируемой в рамке, также изменяется, т.к. изменяется скорость, с которой стороны рамки пересекают силовые линии магнитного поля.

На рис. 11.2 более детально показаны положения рамки в различные моменты времени и соответствующий график ЭДС.

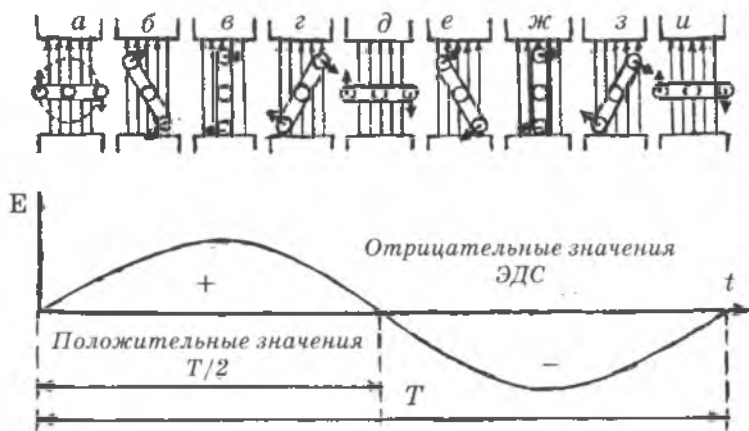


Рис. 11.2. Изменения положения рамки в разные периоды времени

Точкой отсчета будет положение рамки, показанное на рис. 11.2, а. В этот момент плоскость рамки перпендикулярна к магнитным линиям, и магнитный поток будет иметь максимальное значение. Параллельно магнитным линиям рамка встанет через четверть периода. Магнитный поток при этом станет равным нулю, потому что ни одна магнитная линия не проходит через поверхность рамки. Чтобы определить ЭДС индукции, нужно знать не величину потока, а скорость его изменения. В точке отсчета ЭДС индукции равна нулю (т.к. изменение потока равно нулю), а в третьем (рис. 11.2, в) – мак-

симальному значению. Исходя из положений рамки, можно увидеть, что ЭДС индукции меняет и значение, и знак. Таким образом, она является переменной (см. график на рис. 11.2). При равномерном вращении рамки в ней будет индуцироваться ЭДС, периодически изменяющаяся как по величине, так и по направлению.

ЭДС, возникающую в рамке, можно измерить прибором и использовать для создания тока во внешней цепи.

Если же рамка будет замкнута на какую-либо внешнюю цепь, то по цепи потечет переменный ток, график которого будет по виду таким же, как и график ЭДС. Если рамке последовательно подключить активное сопротивление, то ток, который возникает в контуре под действием ЭДС индукции, с течением времени будет меняться, как и сама ЭДС. Такой ток называется переменным синусоидальным током.

Полученная нами волнообразная кривая называется синусоидой, а ток, ЭДС или напряжение, изменяющиеся по такому закону, называются синусоидальными.

Сама кривая названа синусоидой потому, что она является графическим изображением переменной тригонометрической величины, называемой синусом.

Синусоидальный характер изменения тока – самый распространенный в электротехнике, поэтому, говоря о переменном токе, в большинстве случаев имеют в виду синусоидальный ток.

Для сравнения различных переменных токов (ЭДС и напряжений) существуют величины, характеризующие тот или иной ток. Они называются параметрами переменного тока.

Период, амплитуда и частота – параметры переменного тока. Зная их, можно построить график тока (рис. 11.3).

Промежутки времени, на протяжении которого совершается полный цикл изменения тока, называется периодом. Период обозначается буквой T и измеряется в секундах.

Число полных колебаний за 1 сек. называется частотой тока и обозначается буквой f . Частота измеряется

в герцах (Гц). В промышленности и в быту большинства стран используют переменный ток с частотой 50 Гц.

Переменный ток для промышленных целей и для освещения вырабатывается мощными генераторами, приводимыми во вращение паровыми или водяными турбинами и двигателями внутреннего сгорания.

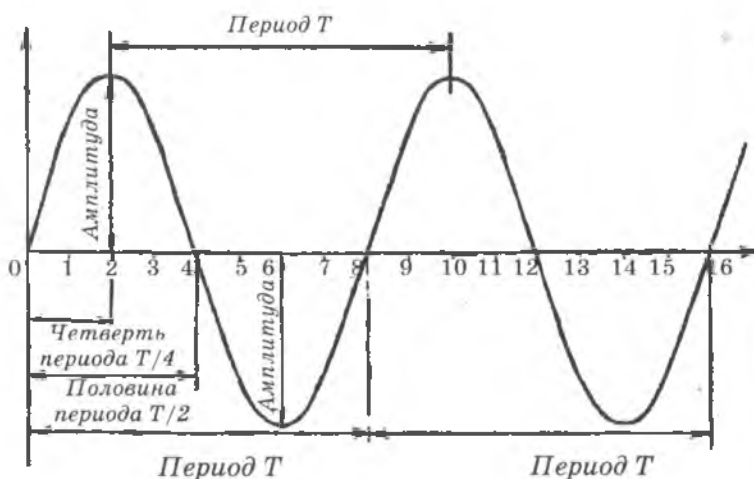


Рис. 11.3. Кривая синусоидального тока

Если в схеме рисунка 11.1 вместо измерительного устройства подключить нагрузку — резистор R_H , то в цепи, состоящей из резистора и рамки, возникнет электрический ток, сила которого, согласно закону Ома, равна:

$$i(t) = \frac{e(t)}{R_H}, \quad (11.6)$$

где $e(t)$ — ЭДС, возникающая в концах рамки.

При вращении рамки с постоянной частотой ω :

$$e(t) = E_m \sin(\omega \cdot t) \quad (11.7)$$

Ток, проходящий по цепи

$$i(t) = \frac{e(t)}{R_H},$$

откуда

$$i(t) = I_m \sin \omega t, \quad (11.8)$$

где

$$I_m = \frac{E_m}{R_H},$$

E_m и I_m – амплитудное значение ЭДС и силы тока.

Синусоидальный ток имеет ряд преимуществ перед постоянным током, в связи с чем он получил очень широкое распространение:

а) его легко трансформировать из одного напряжения в другие;

б) при передаче на большие расстояния (сотни и тысячи километров) от источника до потребителя при многократной трансформации напряжение остается неизменным, т.е. синусоидальным;

в) с его помощью может быть достаточно просто получено вращающееся магнитное поле, используемое в синхронных и асинхронных машинах.

11.2. Действующие значения силы тока и напряжения

В электроэнергетике нашли широкое применение синусоидальные токи, как наиболее экономичные.

Форма синусоидального тока и напряжения:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (11.9)$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (11.10)$$

где $u(t)$, $i(t)$ – мгновенное значение;

U_m , I_m – амплитуда переменного напряжения и тока – максимальная по модулю их величина;

$\omega t + \psi_u, \omega t + \psi_i$ – фаза гармонического тока и напряжения – аргумент при синусе в каждый момент времени;

ψ_u, ψ_i – начальные фазы – значения аргументов в начальный момент времени ($t = 0$). Фаза измеряется в радианах или градусах.

О значениях периодических токов и напряжений обычно судят по их среднеквадратическим значениям за период, который называют действующим значением тока и напряжения и обозначают I, U :

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}, \quad I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (11.11)$$

Среднее значение за период напряжения и тока:

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt, \quad I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad (11.12)$$

Установим связь между действующим и амплитудным значением гармонического тока. Если ток изменяется по закону:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

то

$$\begin{aligned} I^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t + \psi_i) dt = \frac{I_m^2}{T} \int_0^T \sin^2(\omega t + \psi_i) dt = \\ &= \frac{I_m^2}{2T} \int_0^T (1 - \cos(2\omega t + 2\psi_i)) dt = \frac{I_m^2}{2T} \int_0^T dt - \\ &\quad - \underbrace{\frac{I_m^2}{2T} \int_0^T \cos(2\omega t + 2\psi_i) dt}_0 = \frac{I_m^2}{2T} T = \frac{I_m^2}{2}, \end{aligned}$$

т.е.
$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (11.13)$$

Произведя аналогичные действия для напряжения и ЭДС, получим:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \quad (11.14)$$

11.3. Мощность в цепи переменного тока

Введем понятие *мощности переменного тока*. Среднее арифметическое значение мощности за период называют активной мощностью и обозначают буквой P . Эта мощность измеряется в ваттах и характеризует необратимое преобразование электрической энергии в другой вид энергии, например, в тепловую, световую и механическую энергию.

Мгновенная мощность вычисляется как произведение мгновенных значений напряжения и тока $p(t) = u(t) \cdot i(t)$. Тогда, с применением формул 11.9, 11.10:

$$\begin{aligned} p(t) &= I_m U_m \sin(\omega t + \psi_u) \sin(\omega t + \psi_i) = \\ &= I_m U_m \frac{1}{2} [\cos(\omega t + \psi_u - \omega t - \psi_i) - \cos(\omega t + \psi_u + \omega t + \psi_i)] = \\ &= \frac{I_m U_m \cos \varphi}{2} - \frac{I_m U_m \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i)}{2} = IU \cos \varphi - \\ &- IU \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i) = I \cdot IR \cos \varphi - I \cdot IR \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i) = \\ &= I^2 R \cos 0 - I^2 R \cos(2\omega t + 2\psi) = I^2 R - I^2 R \cos 2(\omega t + \psi), \end{aligned}$$

где введено обозначение $\psi = \psi_u = \psi_i$, в связи с совпадением по фазе напряжения и тока в активном сопротивлении, φ — сдвиг фазы тока по отношению к напряжению,

$$\varphi = \psi_u - \psi_i \quad (11.15)$$

и учтено, что: $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$.

В итоге, мгновенная мощность:

$$p(t) = I^2 R (1 - \cos 2(\omega t + \psi)) \quad (11.16)$$

Если в формуле 11.16 вместо IR ставить U_R по закону Ома, где знак R означает, что напряжение U является напряжением на активном сопротивлении, то получится:

$$p(t) = UI(1 - \cos 2(\omega t + \psi)) \quad (11.17)$$

График мгновенной мощности имеет вид:

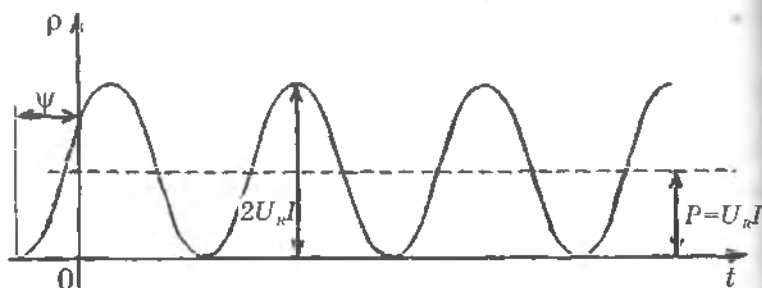


Рис. 11.4.

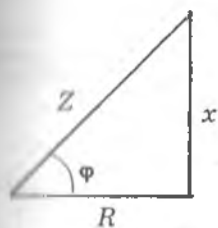
Активная мощность, равная средней мощности за период:

$$P = P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = I^2 R. \quad (11.18)$$

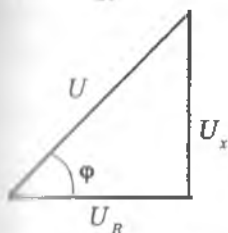
Таким образом, в резистивном элементе с сопротивлением R электромагнитная энергия преобразуется в тепловую при мощности преобразования $P_{\text{ф}} = I^2 R$.

В реальных цепях всегда имеются реактивные нагрузки. Под их действием происходит сдвиг фаз между током и напряжением. Т.е. в формуле при вычислении $p(t)$ $\varphi \neq 0$ оно определяется из соотношения $\operatorname{tg} \varphi = R/Z$, где Z — полное сопротивление нагрузки.

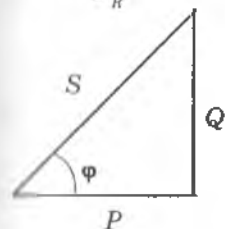
Применяя тригонометрические методы, можно построить следующие формы, описывающие соотношения активных и реактивных параметров цепи, по которым можно определить φ .



Треугольник сопротивлений
 $\cos\varphi=R/Z$



Треугольник сопротивлений
 $\cos\varphi=U_R/U$



Треугольник сопротивлений
 $\cos\varphi=P/S$

Рис. 11.5.

С помощью треугольника мощностей можно установить, что:

$$\cos\varphi=P/S, \quad (11.19)$$

$\cos\varphi$ называется коэффициентом мощности. Определяется отношением активной мощности к полной мощности. P – активная мощность, S – полная мощность, U_x – напряжение на реактивных элементах.

Коэффициент мощности измеряется особым прибором – физометром.

Задачи

1. Амперметр показывает ток 10А, вольтметр – 120 В, ваттметр – 1 кВт. Определить $\cos\varphi$ потребителя.

2. Определить активную мощность, отдаваемую генератором однофазного переменного тока в сеть, если вольт-

метр на щите генератора показывает 220 В, амперметр – 20 А и фазометр – 0,8.

3. Определить $z, x_L, U, U_R, U_L, S, P, Q$, если $I = 6 \text{ А}$, $r = 3 \text{ Ом}$, $\cos \varphi = 0,8$, и ток отстает по фазе от напряжения.

4. Амплитуда синусоидального переменного тока равна 5 А. Каково его действующее значение?

5. Действующее значение переменного синусоидального тока равно 14,2 А. Какова амплитуда этого тока?

6. Чему равна начальная фаза переменного тока, представленного на рис. 11.6, а?

7. Чему равна начальная фаза переменного тока, представленного на рис. 11.6, б?

8. Какой из токов на рис. 11.7 является опережающим по фазе и на какой угол?

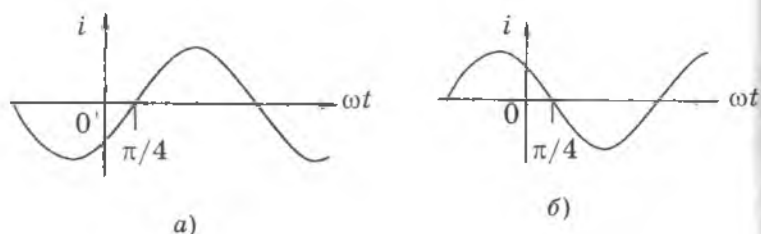


Рис. 11.6

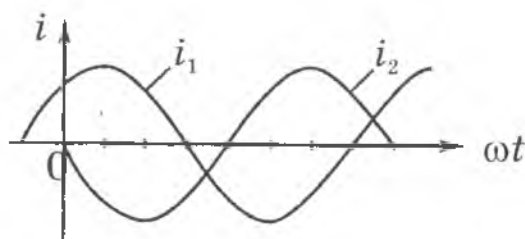


Рис. 11.7

Качественные задачи

1. Период переменного тока T . Как нужно изменить частоту тока, чтобы T : а) увеличился в три раза; б) уменьшился в два раза; в) увеличился в K раз?

2. Частота переменного тока f . Как изменится частота тока, если период: а) уменьшить в K раз; б) увеличить в K раз?

3. Мгновенные значения тока и напряжения на нагрузке $i = I_m \sin(\omega t + \pi/4)$ и $u = U_m \sin(\omega t - \pi/4)$. Определить фазовый сдвиг между током и напряжением.

4. Напряжение на выходе генератора имеет частоту f . Частоту: а) увеличили в 100 раз; б) уменьшили в 10 раз. Как при этом меняется период выходного напряжения?

5. Заданы выражения мгновенных значений тока и напряжения $i = 6 \sin(471t - \pi/4)$, $u = 180 \sin(157t + \pi/2)$. Можно ли определить фазовый сдвиг между ними?

6. Мгновенное значение напряжения $u = U_m \sin(3140t + \pi/2)$. Чему равны начальная фаза и период напряжения?

7. Амплитуда синусоидального напряжения $U_m = 100$ В, начальная фаза $\varphi = -\pi/3$, частота $f = 50$ Гц. Записать выражение для мгновенного значения напряжения.

8. Действующее значение ЭДС на выходе генератора $E = 300$ В, период ЭДС $T = 0,01$ с, $\varphi = 0$. Записать выражение для мгновенного значения ЭДС.

9. Мгновенное значение тока в нагрузке генератора $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$. Записать выражение для мгновенного значения тока, если частота вращения генератора уменьшилась в π раз.

§12. ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ

Делитель напряжения – это схема, состоящая из комбинации резисторов, выходное напряжение которой меньше, чем входное напряжение. В электронных схемах часто оказывается необходимым уменьшить уровень напряжения входного сигнала. Наиболее легко это можно осуществить при помощи двухрезисторной схемы (рис. 12.1).

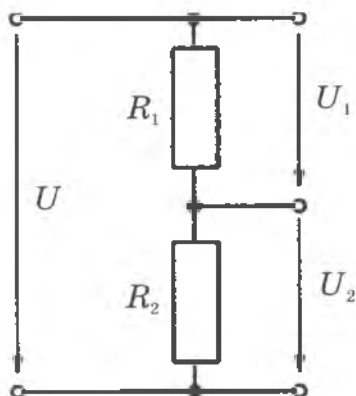


Рис. 12.1. Делитель напряжения

Это электрическая схема, состоящая из двух резисторов R_1 и R_2 , подключённых к источнику напряжения U , к точке соединения которых (параллельно одному из сопротивлений) подключена нагрузка. Схему можно представить как два участка цепи, называемые плечами, сумма напряжений на которых равна входному напряжению. Поскольку резисторы соединены последовательно, то ток через них будет постоянен (напомним, что ток – это количество зарядов в единицу времени. Если бы ток не был бы постоянен, то заряды либо где-то накапливались бы, либо откуда-то вводились бы в цепь, однако на выхо-

де мы имеем ровно столько зарядов, сколько поступило в цепь на входе и совокупный заряд участка цепи не изменяется во времени). Падение напряжения (уменьшение потенциала при перемещении заряда от одной точки цепи до другой её точки) на каждом резисторе согласно закону Ома будет пропорционально сопротивлению:

$$U=IR.$$

Поэтому можно записать:

$$U=U_1+U_2$$

$$U_1=IR_1$$

$$U_2=IR_2$$

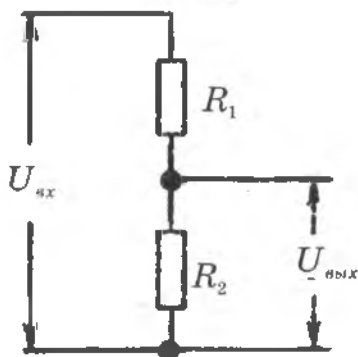


Рис. 12.2. Схема простейшего делителя

Разделив выражение для U_1 на выражение для U_2 , в итоге получаем:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (12.1)$$

Таким образом, отношение напряжений U_1 и U_2 в точности равно отношению сопротивлений R_1 и R_2 .

Сопротивления резисторов R_1 и R_2 выбираются таким образом, чтобы выходное напряжение составляло некоторую определенную часть от входного напряжения.

Простейший делитель представлен на рис. 12.2. Что такое $U_{ВЫХ}$? Предположим здесь и далее, что нагрузки на выходе нет, тогда ток цепи, т.е. ток, проходящий через R_1 и R_2 , определяется следующим образом:

$$I = U_{ВХ} / (R_1 + R_2). \quad (12.2)$$

Приложенное напряжение $U_{ВХ}$ создает на выходе напряжение $U_{ВЫХ}$ (меньшее приложенного).

Мы воспользовались формулой для определения сопротивления резистора и правилом для последовательного соединения резисторов. Тогда напряжение в концах R_2 , т.е. выходное напряжение $\hat{U}_{ВЫХ}$

$$U_{ВЫХ} = IR_2 = U_{ВХ} R_2 / (R_1 + R_2) \quad (12.3)$$

Из уравнения видно, что выходное напряжение всегда меньше входного (или равно ему), поэтому мы говорим о делителе напряжения.

Вычисление выходного напряжения в соответствии с приведенной выше формулой предполагает, что в схеме нет нагрузки.

Делитель напряжения с нагрузкой показан на рисунке 12.3.

В этой схеме параллельно резистору R_2 подключена резистивная нагрузка с конечным сопротивлением, выходное напряжение будет меньше, чем вычисленное по формуле 12.3. Если сопротивление нагрузки приближается к сопротивлению R_2 , нагрузка будет отбирать все больше и больше тока из схемы. Это приведет к перераспределению падений напряжения в схеме, и выходное напряжение будет уже значительно отличаться от рассчитанного в соответствии с приведенной выше формулой напряжения.

Для определения выходного напряжения делителя при наличии нагрузки можно использовать стандартные методы расчетов в соответствии с законами Ома и Кирхгофа. Если сопротивление нагрузки достаточно велико в сравнении со значением R_2 , выходное напряжение будет почти равным напряжению, значение которого получается в соответствии с приведенной выше формулой (12.3). При этом эмпирическим правилом является: сопротив-

ление нагрузки должно в десять или более раз превышать сопротивление R_2 . Чем выше значение сопротивления нагрузки по отношению к R_2 , тем ближе будет выходное напряжение к значению, рассчитанному в соответствии с приведенной ранее формулой.

Напряжение U_1 на резисторе R_1 определяется из соотношения:

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вых}} + U_1 \quad (12.4)$$

Делитель напряжения может состоять не только из двух, а из большого количества сопротивлений.

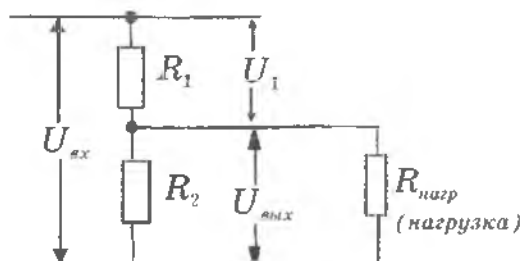


Рис. 12.3 Делитель напряжения с нагрузкой

Задачи

1. Делитель напряжения, показанный на рисунке 12.3, имеет следующие сопротивления резисторов: $R_1 = 1 \text{ кОм}$ и $R_2 = 2 \text{ кОм}$, $R_{\text{нагр}} = 10 \text{ кОм}$. Источник питания дает напряжение $U_{\text{вх}} = 15 \text{ В}$. Чему равно напряжение на нагрузке?

2. Каково самое подходящее значение сопротивления нагрузки, которая может подключаться к делителю напряжения из задачи 12.1, чтобы выходное напряжение не снижалось значительно?

3. Источник питания, показанный на рисунке 12.3, дает напряжение $U_{\text{вх}} = 15 \text{ В}$. Напряжение на резисторе R_1 равно 7 В. Чему равно напряжение на выходе делителя?

4. Как изменится напряжение U_{12} на резисторах R_1 и R_2 в схеме на рис. 12.4, если движок реостата R_3 переместить вниз?

5. Как в схеме на рис. 12.5 изменится напряжение U_{23} на резисторах R_2 и R_3 , если замкнуть ключ K ?

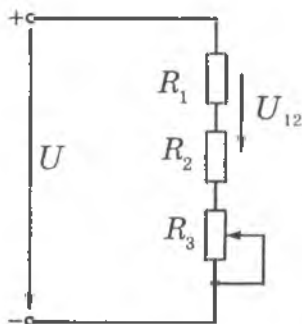


Рис. 12.4.

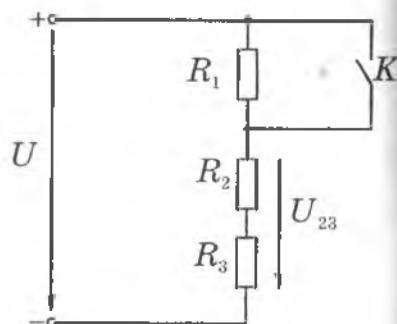


Рис. 12.5

Вопросы

1. Является ли делитель напряжения средством измерений?
2. У делителя напряжения выходное напряжение меньше или больше входного напряжения?
3. В каком случае сопротивление нагрузки будет отбирать все больше и больше тока из схемы: при увеличении его значения или уменьшении?
4. Минимум из скольких сопротивлений может составлять делитель напряжения?
5. Для чего применяются делители напряжения?

Лабораторная работа

1. Простой делитель напряжения.

§13. ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОТЕНЦИОМЕТРА

Потенциометры (рис.13.1) используются в качестве регуляторов параметров (громкости, мощности, выходного напряжения и т.д.), для подстройки внутренних характеристик цепей аппаратуры (подстроечный резистор). На основе прецизионных потенциометров построены многие типы датчиков углового или линейного перемещения.

С развитием электронной промышленности помимо «классических» потенциометров появились также цифровые потенциометры. Такие потенциометры, как правило, представляют собой интегральные схемы, не имеющие подвижных частей и позволяющие программно выставлять собственное сопротивление с заданным шагом.

Очень часто вместо термина «потенциометр» используют термин «переменный резистор». Однозначного подхода к использованию терминов нет.



Рис. 13.1. Подстроечный потенциометр

Потенциометр – это переменный резистор с тремя выводами (рис. 13.2), представляющий собой резистор

с подвижным отводным контактом (движком). Центральный вывод соединен с подвижным контактом, который может соединяться с любой точкой резистивного элемента, позволяя гасить часть полного приложенного напряжения. Напряжение прилагается остальным двум (направленным вниз и выше) выводам потенциометра.

Подвижный контакт может перемещаться от одного конца резистивного элемента к другому, позволяя выбирать любое значение напряжения между напряжением входного источника и нулевым значением. Потенциометры широко используются в электронных схемах, поскольку с их помощью удастся точно выполнить настройку выходного напряжения, желательного для конкретного применения.



Рис. 13.2. Схема потенциометра

Большинство разновидностей переменных резисторов могут использоваться как в качестве потенциометров, так и в качестве реостатов, разница в схемах подключения и в назначении (потенциометр – регулятор напряжения, реостат – силы тока).

Реостаты, представляющие собой резисторы, сопротивление которых можно изменять, состоят из проволоки из материала с высоким удельным сопротивлением, виток к витку натянутой на стержень из изолирующего материала. Проволока покрыта слоем окалины, который специально получается при производстве. При перемещении ползунка с подсоединённым к нему контактом слой окалины соскабливается, и электричество идет из про-

положи на ползунок. Чем больше витков от одного контакта до другого, тем больше сопротивление.

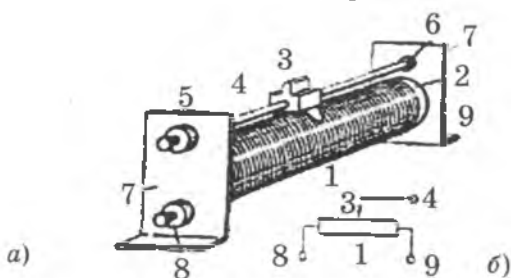


Рис. 13.3. Реостат со скользящим контактом:
 а) общий вид; б) схема включения. Обмотка реостата 1 намотана на фарфоровый цилиндр 2. Скользящий контакт 3 соединяет произвольную точку обмотки со стержнем 4 и зажимами 5 и 6. Фарфоровый цилиндр реостата 2 укреплен на металлических щеках 7.

На них же укреплен стержень 4 (на изолирующих прокладках в местах зажимов 5 и 6). Концы обмотки реостата выведены к зажимам 8 и 9

Изменение сопротивления может осуществляться как плавно, так и ступенчато. Для плавного изменения сопротивления служат реостаты со скользящим контактом (рис. 13.3). Перемещая движок, можно включать в цепь большую или меньшую часть обмотки реостата.



Рис. 13.4. Мощный тороидный реостат

Рис. 13.3, б схож с рисунком 13.2. Входное напряжение подается к выводам 8 и 9, а выходной ток снимается из вывода 4.

Рассмотренный реостат применяется в основном в учебно-методических целях. Промышленные реостаты имеют форму, показанную на рис. 13.4.

На рис. 13.5 показан ступенчатый потенциометр с общим сопротивлением R_{II} . Ползунок потенциометра (на рисунке « \triangleright ») может принимать только пять положений. Контакты B, C, D делят сопротивление потенциометра на четыре равные части. Например, при подаче к концам потенциометра (контакты A, E) напряжение U , между верхним (контакт A) концом потенциометра и ползунком, находящимся в положении D , как показано на рисунке, получается напряжение $3U/4$.

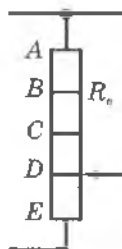


Рис. 13.5. Ступенчатый потенциометр

Регулируемый делитель напряжения может состоять из двух резисторов – с фиксированным сопротивлением и с переменным сопротивлением, или из потенциометра.

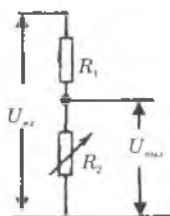


Рис. 13.6. Принцип действия потенциометра

Если в качестве R_2 взять резистор с регулируемым сопротивлением (рис. 13.6), то мы получим не что иное, как схему с управляемым выходом.

Задачи

1. К потенциометру приложено постоянное напряжение 6 В. В каком диапазоне может быть установлено выходное напряжение?

2. Потенциометр из задачи 1 настроен так, чтобы гасить 85% приложенного напряжения. Чему равно выходное напряжение?

3. Номинальное сопротивление R_D потенциометра (рис. 13.7) равно сопротивлению нагрузки R . Ползунок потенциометра находится на контакте D . Чему равно сопротивление участка между контактом D и верхней точки (A) цепи, если нагрузка подключена между точками A и D ?

4. В задаче 3 на вход (точкам «+» и «-») цепи подано напряжение 10 В. Чему равно напряжение на концах сопротивления R ?

5. Решить задачу 3 при условии $R=2R_D$.

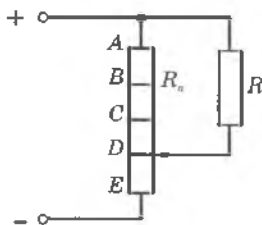


Рис. 13.7. Ступенчатый потенциометр с нагрузкой

Вопросы

1. Сколько выводов имеет потенциометр?
2. Какую функцию выполняет потенциометр?
3. Объясните принцип действия и устройство потенциометра.
4. Какой из выводов потенциометра соединяется с подвижным контактом?
5. Скольким выводам потенциометра подается входное напряжение?

Лабораторная работа

1. Делитель напряжения (при работе использовать потенциометр).

§14. ОДИНАРНЫЙ МОСТ

Мостами называются приборы, предназначенные для измерения методом сравнения величин.

Для измерения сопротивления по постоянному току применяют две схемы измерения – схема одинарного моста и схема двойного моста.

Схема одинарного моста приведена на рис. 14.1. По сути, он представляет собой два делителя напряжения, включенных параллельно. Делитель сверху – это сопротивления R_1 и R_2 , а делитель снизу – это сопротивления R_x и R .

Четыре сопротивления R_x , R , R_1 и R_2 образуют плечи моста. В одну из диагоналей (АВ) схемы включен источник ЭДС, а в другую (DC) – чувствительный гальванометр G , являющийся устройством для измерения разности потенциалов (в схеме обозначено Ⓢ). Участок DC и называется мостом в собственном смысле, т.к. в момент измерения сопротивлений ток по нему не идет.

Сопротивления R_1 , R_2 и R являются элементами моста и их значения известны. Сопротивление R_x – это неизвестное (измеряемое) сопротивление. Одно из сопротивлений моста (по схеме – это сопротивление R) можно изменять в широких пределах, меняя, тем самым, потенциал в точке C. В процессе измерений мы меняем R в ту или иную сторону, добиваясь нулевых показаний гальванометра G , включенного в измерительную диагональ моста – уравниваем мост.

Одинарная мостовая схема, приведенная на рис. 14.1, называется мостом Уитстона.

R_x – измеряемое сопротивление; R_1 и R_2 – постоянные сопротивления моста; R – переменное сопротивление.

Выведем формулу для расчета неизвестного сопротивления R_x при использовании равновесного моста Уитстона.

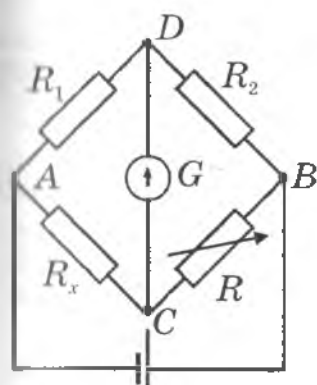


Рис. 14.1. Схема одинарного моста

Изменяя сопротивления R , R_1 и R_2 (или одно из них), можно добиться того, чтобы стрелка гальванометра G установилась на нуле. Разность потенциалов между точками C и D станет равной нулю, и выполняется равенство напряжений:

$$U_{AC} = U_{AD'} \quad (14.1)$$

$$U_{BC} = U_{BD'} \quad (14.2)$$

Обозначим силу тока в ветви BDA I_2 , а в ветви BCA — I_1 . Используя закон Ома для участка цепи, перепишем (14.1) и (14.2):

$$I_1 R_x = I_2 R_1, \quad (14.3)$$

$$I_1 R = I_2 R_2. \quad (14.4)$$

Разделив почленно (14.3) на (14.4), получим:

$$\frac{R_x}{R} = \frac{R_1}{R_2} \quad (14.5)$$

откуда

$$R_x = R \frac{R_1}{R_2}. \quad (14.6)$$

Таким образом, в случае равновесного моста ($I_G = 0$ — ток через гальванометр) для определения сопротивления

R_x достаточно знать величину сопротивления R и отношение сопротивлений R_1 и R_2 .

Значения сопротивления R должны воспроизводиться очень точно и стабильно. Поэтому оно выполнено в виде магазина (набора) образцовых сопротивлений. Эти сопротивления соединены последовательно, группами по 10 шт. Величины сопротивлений в каждой группе одинаковы и отличаются от величин сопротивлений в соседних группах в 10 раз (например, группа 100-Омных сопротивлений, группа 10-Омных сопротивлений, ..., группа 0,01-Омных сопротивлений). Сопротивления внутри каждой группы коммутируются отдельным декадным переключателем.

Внутреннее сопротивление источника ЭДС, сопротивление гальванометра здесь не учитывались.

В настоящее время выпускаются цифровые мостовые схемы.

Задачи

1. На рис. 14.2. $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 20$ Ом. Чему равно сопротивление R_x , если $R = 40$ Ом?

2. Если в условиях предыдущей задачи $R = 60$ Ом, чему равно сопротивление R_x ?

3. Какие токи поступают в узел B и какие исходят из него в схеме рис. 14.2?

4. Если ток, проходящий через R в два раза больше тока через R_2 , то какое соотношение имеется между сопротивлениями верхней и нижней ветвей между точками A и B рис. 14.2?

5. Между сопротивлениями верхней и нижней ветвей между точками A и B (рис. 14.2) имеется соотношение $R_1 + R_2 = 3(R_x + R)$. Чему равен ток, проходящий через R_x , если ток через R_1 равен $1,5A$?

Вопросы

1. Что представляет собой мостовая схема измерения?
2. Объясните принцип измерения посредством мостовой схемы.
3. Для чего предназначены мостовые схемы?
4. Сколько сопротивлений имеются в одинарном мосте?
5. Сколько делителей напряжения входят в состав одинарного моста?
6. Какие сопротивления входят в состав верхнего делителя напряжения в схеме рис. 14.1?

Лабораторная работа

1. Мостовая схема.

§15. ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА С РЕЗИСТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Пусть к концам резистора R (рис. 15.1) приложено напряжение $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi)$.

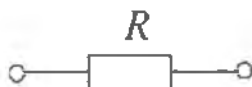


Рис. 15.1.

Ток в сопротивлении можно определить по закону Ома:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R}.$$

Тогда ток

$$i(t) = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t + \psi) = I_m \sin(\omega t + \psi), \quad (15.1)$$

где введено обозначение: $I_m = \frac{U_m}{R}$ — амплитуда тока.

Сдвиг фаз между напряжением и током $\psi = 0$, т.е. ток и напряжение на резистивном сопротивлении совпадают по фазе (рис. 15.2)



Рис. 15.2.

Поскольку $U_m = U\sqrt{2}$, то для действующих значений справедливо соотношение:

$$\frac{U}{I} = \frac{U_m/\sqrt{2}}{I_m/\sqrt{2}} = \frac{U_m}{I_m} = Z, \quad (15.2)$$

где Z — полное сопротивление цепи (импеданс), равное отношению действующих значений напряжения к току.

Для цепи, представленной на рис. 15.1, полное сопротивление $Z=R$, т.е. $\frac{U}{I} = R$.

Можно было бы характеризовать силу переменного тока его амплитудой. Принципиально это вполне возможно, но практически очень неудобно, потому что трудно построить приборы, непосредственно измеряющие амплитуду переменного тока. Удобнее использовать для характеристики переменного тока какое-нибудь его свойство, не зависящее от направления тока. Таким свойством является, например, способность тока нагревать проводник, по которому он проходит. Это нагревание не зависит от направления тока, оно производится переменным током при прохождении как в одном направлении, так и в обратном ему.

Представим себе переменный ток, проходящий по некоторому проводнику с сопротивлением R . В течение секунды ток выделяет в проводнике определенное количество теплоты, скажем, Q . Пропустим через тот же проводник постоянный ток, подобрав силу его так, чтобы он выделял в проводнике каждую секунду то же количество теплоты Q . По своему действию оба тока равны; поэтому сила постоянного тока характеризует действующее значение переменного тока, которое обозначают через I .

Сила постоянного тока, выделяющего в проводнике то же количество теплоты, что и данный переменный ток, называется действующим значением переменного тока.

Из сказанного следует, что, заменив в формуле (15.1)

силу переменного тока действующим значением I , мы можем вычислить количество теплоты, выделяемое переменным током в проводнике:

$$Q = I^2 R t \quad (15.3)$$

Подчеркнем еще раз, что в этой формуле I обозначает действующее значение переменного тока. Когда мы говорим, что переменный ток равен, скажем, 2А, то мы хотим сказать, что тепловое действие этого тока такое же, как тепловое действие постоянного тока силы 2А. В случае синусоидального тока действующее значение тока весьма просто связано с амплитудой этого тока. Соответствующий расчет дает, что:

$$I = I_m / \sqrt{2} = 0,707 I_m \quad (15.4)$$

Таким образом, измерив действующее значение синусоидального тока, можно вычислить из формулы (15.4) его амплитуду.

Определим падение напряжения, действующее на зажимах сопротивления на основании закона Ома, при прохождении через сопротивления синусоидального тока $i = I_m R \sin \omega t$:

$$u = iR = I_m R \sin \omega t = U_m \sin \omega t. \quad (15.5)$$

Полученный результат показывает, что напряжение изменяется в фазе с током.

По определению – мгновенная мощность $p = i(t) \cdot u(t)$

Определим функцию мгновенной мощности, потребляемой R :

$$p = iu = I_m U_m \sin^2 \omega t = \frac{I_m U_m}{2} (1 - \cos 2\omega t) = UI (1 - \cos 2\omega t);$$

$$p = UI (1 - \cos 2\omega t), \quad (15.6)$$

где U, I – действующие значения напряжения и силы тока.

Из графика мгновенной мощности следует, что она неотрицательна и меняется с удвоенной частотой.

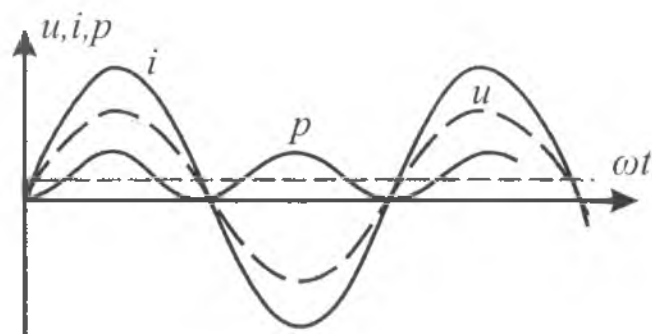


Рис. 15.3. Графики мгновенных значений напряжения, тока и мощности на сопротивлении (резисторе)

Для оценки потребляемой приемником мощности вводят понятие средней мощности за период:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_m I_m \sin^2 \omega t dt = \frac{U_m I_m}{2} = U \cdot I \quad (15.7)$$

Задачи

1. В проводнике, имеющем сопротивление 50 Ом, по которому шел переменный ток, за 2,5 ч выделилось количество теплоты, равное 6 кДж. Каково действующее значение тока и какова амплитуда тока?

2. В проводнике, имеющем сопротивление 10 Ом, переменный ток выделяет в секунду количество теплоты, равное 1 кДж. Каково действующее значение тока?

3. Напряжение на зажимах цепи с активным сопротивлением R (рис. 15.4.) изменяется по закону $u = 220 \sin(314t + \pi/4)$. Каков закон изменения тока в цепи, если $R = 50$ Ом?

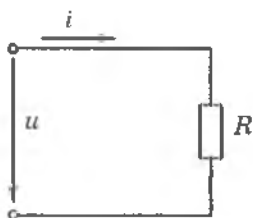


Рис. 15.4.

4. Напряжение на зажимах цепи (рис. 15.5) $u=100\sin 314t$. Каковы показания амперметра и вольтметра, если $R=100$ Ом?

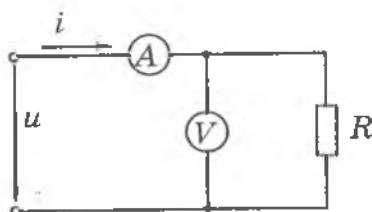


Рис. 15.5.

5. На резисторе с сопротивлением 15 Ом мгновенное значение напряжения $u=120\sin(314t - \varphi)$. Записать выражение для мгновенного значения тока и определить его амплитудное и действующее значения. Как изменится ток в резисторе, если: а) частоту сигнала увеличить вдвое; б) увеличить период в два раза; в) уменьшить действующее значение напряжения в три раза?

Вопросы

1. Что такое резистор?
2. Какие электрические процессы протекают в цепи с резистором, питаемой синусоидальным напряжением?
3. Какая связь имеется между действующим и амплитудным значениями силы гармонического тока?
4. Чему равен фазовый сдвиг между током и напряжением резистивного элемента?
5. Может ли мощность цепи с резистором иметь отрицательные значения?

§16. ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА С ИНДУКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

16.1. Катушка индуктивности

Индуктивность – свойство элемента цепи, который запасает энергию магнитного поля:

$$W_M = Li^2/2, \quad (16.1)$$

где L – индуктивность катушки;

i – сила тока, проходящего через катушки.

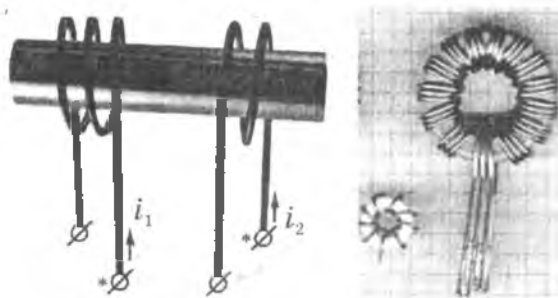


Рис. 16.1. Разновидности катушек индуктивности

При увеличении (уменьшении) тока энергия магнитного поля увеличивается (уменьшается). Следовательно, индуктивные элементы можно рассматривать как аккумуляторы (накопители энергии).

Включим в цепь катушку из медной проволоки с большим числом витков (рис. 16.2). Такие катушки обладают, как известно, большой индуктивностью. Сопротивление же такой катушки при постоянном токе будет невелико, т.к. она сделана из довольно толстой проволоки. В случае постоянного тока (рис. 16.2, а) лампочка горит ярко, в случае же переменного тока (рис. 16.2, б)

накала почти незаметно. К постоянному току катушка не оказывает сопротивление, присутствие ее почти не изменяет тока, и лампочка горит ярко. Таким образом, мы видим, что катушка с индуктивностью, включенная в цепь переменного тока, может значительно ослабить этот ток.

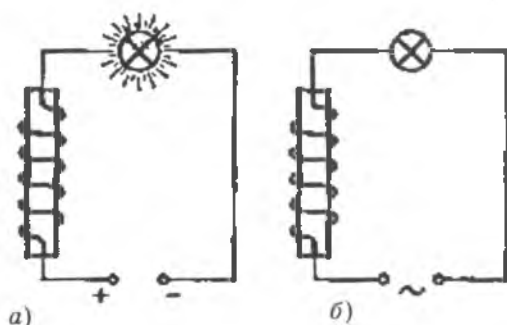


Рис. 16.2. Лампочка включена в цепь постоянного (а) и переменного (б) тока

При самоиндукции, как и при всяком процессе индукции, индуцированная в катушке ЭДС пропорциональна скорости изменения магнитного потока через витки катушки.

Магнитный же поток пропорционален силе тока в цепи. Рассмотрим цепь, содержащую в себе катушку индуктивности, и предположим, что активное сопротивление цепи, включая провод катушки, настолько мало, что им можно пренебречь.

Когда катушка присоединена к источнику переменного тока с напряжением $u = U_m \cdot \sin \omega t$, катушка индуктивности оказывает сопротивление проходящему по ней переменному току.

Каков характер этого сопротивления и чем оно обуславливается?

Влияние катушки с индуктивностью на переменный ток также легко объяснить. Переменный ток представляет собой ток, сила которого быстро изменяется, то увеличиваясь, то уменьшаясь. При этих изменениях в цепи

возникает ЭДС самоиндукции, которая зависит от индуктивности цепи. Направление этой ЭДС таково, что ее действие препятствует изменению тока, т.е. уменьшает амплитуду тока, а следовательно, и его действующее значение. При наличии большой индуктивности эта добавочная ЭДС может значительно влиять на силу переменного тока.

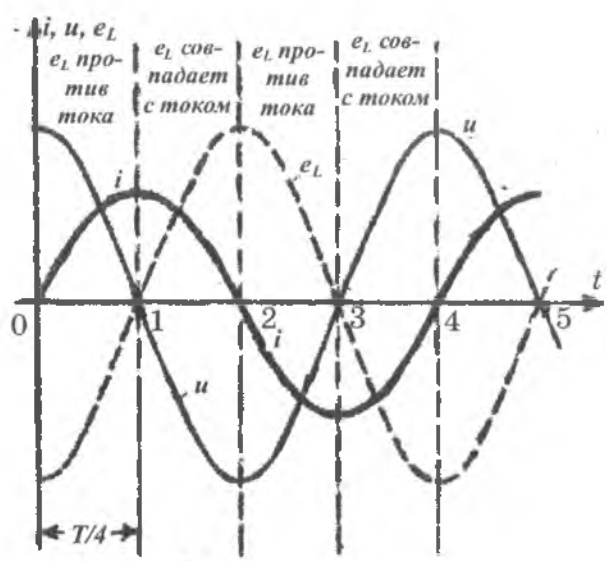


Рис. 16.3. Процессы, происходящие с катушкой индуктивности

Для уяснения процессов, происходящих в цепи переменного тока с катушкой индуктивности, обратимся к графику. На рис. 16.3. построены кривые линии, характеризующие соответственно ток в цепи, напряжение на катушке и возникающую в ней ЭДС самоиндукции. Убедимся в правильности произведенных на рисунке построений.

С момента $t=0$, т.е. с начального момента наблюдения за током, он начал быстро возрастать, но по мере прибли-

жения к своему максимальному значению скорость нарастания тока уменьшалась. В момент, когда ток достиг максимальной величины, скорость его изменения на мгновение стала равной нулю, т.е. прекратилось изменение тока. Затем ток начал сначала медленно, а потом быстро убывать и по истечении второй четверти периода уменьшился до нуля. Скорость же изменения тока за эту четверть периода, возрастая от нуля, достигла наибольшей величины тогда, когда ток стал равным нулю.

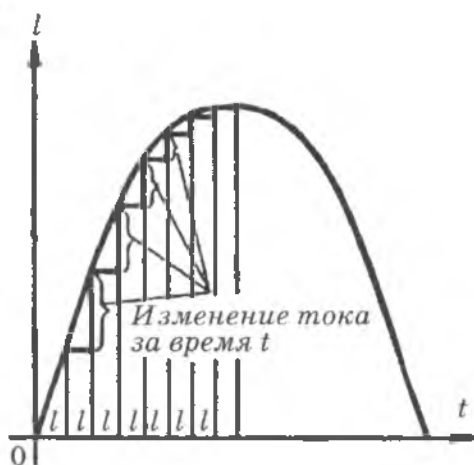


Рис. 16.4. Характер изменений тока во времени в зависимости от величины тока

Из построений на рис. 16.4. видно, что при переходе кривой тока через ось времени увеличение тока за небольшой отрезок времени t больше, чем за этот же отрезок времени, когда кривая тока достигает своей вершины.

Следовательно, скорость изменения тока уменьшается по мере увеличения тока и увеличивается по мере его уменьшения, независимо от направления тока в цепи.

Очевидно, и ЭДС самоиндукции в катушке должна быть наибольшей тогда, когда скорость изменения тока наибольшая, и уменьшаться до нуля, когда прекращает-

ся его изменение. Действительно, на графике кривая ЭДС самоиндукции e_L за первую четверть периода, начиная от максимального значения, упала до нуля (см. рис. 16.3).

На протяжении следующей четверти периода ток от максимального значения уменьшался до нуля, однако скорость его изменения постепенно возрастала и была наибольшей в момент, когда ток стал равным нулю. Соответственно и ЭДС самоиндукции за время этой четверти периода, появившись вновь в катушке, постепенно возрастала и оказалась максимальной к моменту, когда ток стал равным нулю.

Однако свое направление ЭДС самоиндукции изменила на обратное, т.к. возрастание тока в первой четверти периода сменилось во второй четверти его убыванием.

Продолжив дальше построение кривой ЭДС самоиндукции, мы убеждаемся в том, что за период изменения тока в катушке и ЭДС самоиндукции совершит в ней полный период своего изменения. Направление ее определяется законом Ленца: при возрастании тока ЭДС самоиндукции будет направлена против тока (первая и третья четверти периода), а при убывании тока, наоборот, совпадать с ним по направлению (вторая и четвертая четверти периода).

Таким образом, ЭДС самоиндукции, вызываемая самим переменным током, препятствует его возрастанию и, наоборот, поддерживает его при убывании.

Обратимся теперь к графику напряжения на катушке (см. рис. 16.3). На этом графике синусоида напряжения на зажимах катушки изображена равной и противоположной синусоиде ЭДС самоиндукции. Следовательно, напряжение на зажимах катушки в любой момент времени равно и противоположно ЭДС самоиндукции, возникающей в ней. Напряжение это создается генератором переменного тока и идет на то, чтобы погасить действие в цепи ЭДС самоиндукции.

Таким образом, в катушке индуктивности, включенной в цепь переменного тока, создается сопротивление прохождению тока. Но т.к. такое сопротивление вызы-

вается в конечном счете индуктивностью катушки, то и называется оно индуктивным сопротивлением.

16.2. Индуктивное сопротивление

Индуктивное сопротивление обозначается через X_L и измеряется, как и активное сопротивление, в Омах.

Рассматривая графики изменения тока в катушке, ЭДС самоиндукции и напряжения на ее зажимах, мы обратили внимание на то, что изменение этих величин не совпадает по времени. Иначе говоря, синусоиды тока, напряжения и ЭДС самоиндукции оказались для рассматриваемой нами цепи сдвинутыми по времени одна относительно другой. В технике переменных токов такое явление принято называть сдвигом фаз.

В том случае, когда цепь содержит индуктивное сопротивление, фазы тока и напряжения, как это видно из рис. 16.3, не совпадают, т.е. имеется сдвиг фаз между этими переменными величинами. Кривая тока в этом случае как бы отстает от кривой напряжения на четверть периода.

Следовательно, при включении катушки индуктивности в цепь переменного тока в ней появляется сдвиг фаз между током и напряжением, причем ток отстает по фазе от напряжения на четверть периода. Это значит, что максимум тока наступает через четверть периода после того, как наступил максимум напряжения.

ЭДС же самоиндукции находится в противофазе с напряжением на катушке, отставая, в свою очередь, от тока на четверть периода. При этом период изменения тока, напряжения, а также и ЭДС самоиндукции не меняется и остается равным периоду изменения напряжения генератора, питающего цепь. Сохраняется также и синусоидальный характер изменения этих величин.

Нахождение ЭДС самоиндукции в противофазе с напряжением на катушке имеет следующую математическую форму:

$$u = -e_L \quad (16.2)$$

Согласно закону Фарадея, ЭДС самоиндукции:

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (16.3)$$

Из этого уравнения: $\frac{di}{dt} = -e_L / L$. Подставим вместо $-e_L$ на основе уравнения (16.2) напряжение u , которое изменяется по форме $u = U_m \cdot \sin \omega t$:

$$\frac{di}{dt} = -e_L / L = U / L = (U_m / L) \cdot \sin \omega t \quad (16.4)$$

Решение этого дифференциального уравнения имеет вид:

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t - \pi/2), \quad (16.5)$$

где

$$I_m = U_m / \omega \cdot L = U_m / X_L \quad (16.6)$$

Деля правую и левую стороны равенства (16.6) на $\sqrt{2}$, получим для действующих значений:

$$I = U / X_L,$$

где I и U – действующие значения тока и напряжения.

Это соотношение представляет собой закон Ома для цепи с идеальной индуктивностью, а величина $X_L = \omega \cdot L$ называется индуктивным сопротивлением. Индуктивное сопротивление измеряется в Омах.

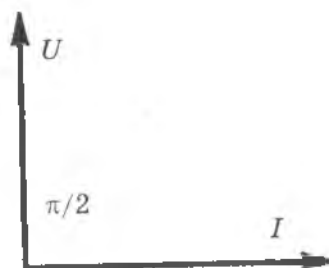


Рис. 16.5. Векторная диаграмма тока и напряжения индуктивной катушки

Индуктивное сопротивление катушки возрастает с увеличением частоты тока и индуктивности катушки. Действительно, ЭДС самоиндукции, уменьшающая ток в цепи, равна $L di/dt$. Чем больше частота тока, тем быстрее происходят его изменения, т.е. тем больше отношение di/dt . Таким образом, с ростом частоты тока и индуктивности катушки увеличивается и индуцируемая в ней ЭДС, стремящаяся противодействовать изменениям первичного поля. Ток при этом уменьшается, т.е. сопротивление цепи переменному току возрастает.

Из формулы (16.5) мы видим, что в рассмотренной цепи ток отстаёт по фазе от напряжения на угол $\pi/2$.

16.3. Мощность в цепи индуктивного сопротивления

Мощность, потребляемая в цепи переменного тока, равна произведению тока на напряжение, но т.к. ток и напряжение есть переменные величины, то и мощность будет также переменной. При этом значение мощности для каждого момента времени мы сможем определить, если умножим величину тока на величину напряжения, соответствующую данному моменту времени.

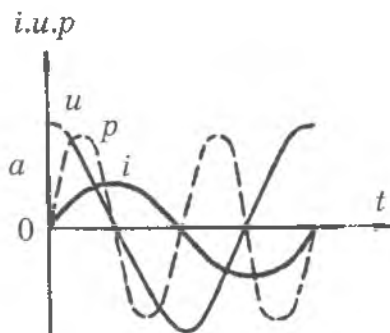


Рис. 16.6. Графики мощности в цепи, содержащей индуктивное сопротивление

Мгновенная мощность в цепи с чисто индуктивным сопротивлением равна:

$$p(t) = I_m U_m \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \pi/2) = \frac{U_m I_m}{2} \cdot \sin 2\omega t. \quad (16.7)$$

Чтобы получить график мощности, мы должны перемножить величины отрезков прямых линий, определяющие ток и напряжение в различные моменты времени. Точное построение и приведено на рис. 16.6. Пунктирная полнообразная кривая p показывает нам, как изменяется мощность в цепи переменного тока, содержащей только индуктивное сопротивление.

При построении этой кривой использовалось следующее правило алгебраического умножения: при умножении положительной величины на отрицательную, получается отрицательная величина, а при перемножении двух отрицательных или двух положительных – положительная величина.

Положительные значения мощности соответствуют потреблению энергии из сети катушкой, а отрицательные – возврату запасенной энергии обратно в сеть. Средняя за период мощность равна нулю. Следовательно, цепь с индуктивностью энергии не потребляет – это чисто реактивная нагрузка. В этой цепи происходит лишь перемещение электрической энергии от источника в катушку и обратно. Энергия, потребляемая индуктивностью, работы не совершает.

На рис. 16.7 изображен график мощности для цепи, содержащей в себе одновременно индуктивное и активное сопротивления. В этом случае также происходит обратный переход энергии из цепи к источнику тока, однако в значительно меньшей степени, чем в цепи с одним индуктивным сопротивлением.

Большая часть кривой мощности в этом случае расположена выше оси времени. Это значит, что обмен энергией между генератором и цепью происходит в меньшей мере, а следовательно, мощность, отдаваемая генератором в цепь, в основном потребляется цепью.

Рассмотрев приведенные графики мощности, приходим к выводу, что только сдвиг фаз между током и на-

пряжением в цепи создает «отрицательную» мощность. При этом, чем больше будет сдвиг фаз между током и напряжением в цепи, тем меньше будет потребляемая цепью мощность, и, наоборот, чем меньше сдвиг фаз, тем потребляемая цепью мощность будет больше.

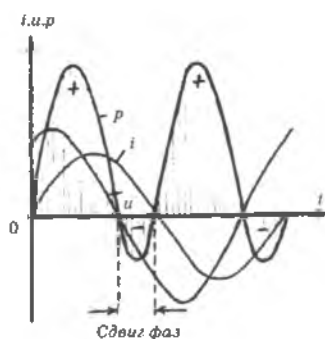


Рис. 16.7. График мощности для цепи, содержащей R и L

Выясним теперь, каково отличие нагрузки генератора переменного тока активным сопротивлением от нагрузки его индуктивным сопротивлением.

Когда цепь переменного тока содержит в себе лишь одно активное сопротивление, то энергия источника тока поглощается в активном сопротивлении, нагревая проводник.

Когда же цепь не содержит активного сопротивления (мы условно считаем его равным нулю), а состоит лишь из индуктивного сопротивления катушки, энергия источника тока расходуется не на нагрев проводов, а только на создание ЭДС самоиндукции, т.е. она превращается в энергию магнитного поля. Однако переменный ток непрерывно изменяется как по величине, так и по направлению, а следовательно, и магнитное поле катушки непрерывно изменяется в такт с изменением тока. В первую четверть периода, когда ток возрастает, цепь получает энергию от источника тока и запасает ее в магнитном поле катушки. Но как только ток, достигнув своего максимума, начинает убывать, он поддерживается

за счет энергии, запасенной в магнитном поле катушки посредством ЭДС самоиндукции.

Таким образом, источник тока, отдав в течение первой четверти периода часть своей энергии в цепь, в течение второй четверти получает ее обратно от катушки, выполняющей при этом роль своеобразного источника тока. Иначе говоря, цепь переменного тока, содержащая только индуктивное сопротивление, не потребляет энергии: в данном случае происходит колебание энергии между источником и цепью. Активное же сопротивление, наоборот, поглощает в себе всю энергию, сообщенную ему источником тока.

Катушка индуктивности, в противоположность омическому сопротивлению, не активна по отношению к источнику переменного тока, т.е. реактивна. Поэтому индуктивное сопротивление катушки называют также реактивным сопротивлением.

В реактивных элементах отсутствуют необратимые потери электрической энергии, не происходит нагрева элементов. Происходит обратимый процесс в виде обмена электрической энергией между источником и приемником. Для качественной оценки интенсивности обмена энергией вводится понятие реактивной мощности Q (мощность в индуктивной катушке — Q_L):

$$(16.8)$$

Размерность для реактивной мощности та же, что и для активной, но чтобы их различать, единица реактивной мощности называется «вар» (вольт-ампер-реактивный).

16.4. Цепь с индуктивным и активным сопротивлениями

Рассматривая цепь переменного тока, содержащую только индуктивное сопротивление, мы предполагали равным нулю активное сопротивление этой цепи.

Однако в действительности как провод самой катушки, так и соединительные провода обладают хотя и небольшим, но активным сопротивлением, поэтому цепь неизбежно потребляет энергию источника тока (рис. 16.8). Поэтому при определении общего сопротивления внешней цепи нужно складывать ее реактивное и активное сопротивления. Но складывать эти два различных по своему характеру сопротивления нельзя.

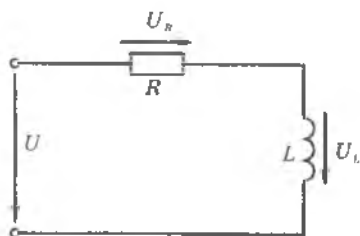


Рис. 16.8.

В этом случае полное сопротивление цепи переменному току находят путем геометрического сложения.

Строят прямоугольный треугольник (рис. 16.9), одной стороной которого служит величина индуктивного сопротивления, а другой – величина активного сопротивления.



Рис. 16.9. Определение полного сопротивления цепи, содержащей индуктивное и активное сопротивление

Полное сопротивление цепи обозначается латинской буквой Z и измеряется в Омах. Из построения видно, что полное сопротивление всегда больше индуктивного и активного сопротивлений, отдельно взятых.

Алгебраическое выражение полного сопротивления цепи имеет вид:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad (16.9)$$

где Z – общее сопротивление;

R – активное сопротивление;

X_L – индуктивное сопротивление цепи.

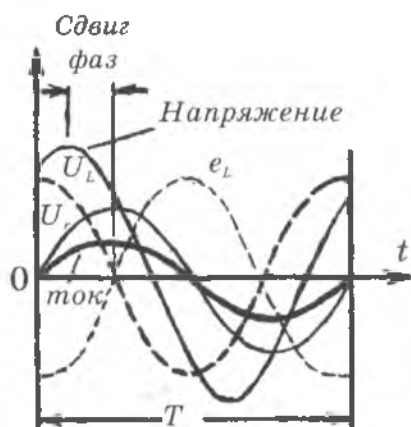


Рис. 16.10. Ток и напряжение в цепи, содержащей R и L

Закон Ома для такой цепи выразится формулой $I = U / Z$.

Разберем теперь, какое будет напряжение, если цепь обладает также сравнительно большим активным сопротивлением. На практике такой цепью может служить, например, цепь, содержащая катушку индуктивности без железного сердечника, намотанную из тонкой проволоки (дрессель высокой частоты).

В этом случае сдвиг фаз между током и напряжением составит уже не четверть периода (как это было в цепи только с индуктивным сопротивлением), а значительно

меньше; причем чем больше будет активное сопротивление, тем меньший получится сдвиг фаз.

Теперь и сама ЭДС самоиндукции не находится в противофазе с напряжением источника тока, т.к. сдвинута относительно напряжения уже не на половину периода, а меньше. Кроме того, напряжение, создаваемое источником тока на зажимах катушки, не равно ЭДС самоиндукции, а больше нее на величину падения напряжения в активном сопротивлении провода катушки. Иначе говоря, напряжение на катушке состоит как бы из двух слагающих;

– u_L – реактивной слагающей напряжения, уравновешивающей действие ЭДС самоиндукции;

– u_r – активной слагающей напряжения, идущей на преодоление активного сопротивления цепи.

Если бы мы включили в цепь последовательно с катушкой большое активное сопротивление, то сдвиг фаз настолько бы уменьшился, что синусоида тока почти догнала бы синусоиду напряжения, и разность фаз между ними была бы едва заметна. В этом случае амплитуда слагающей и была бы больше амплитуды слагаемой.

Точно так же можно уменьшить сдвиг фаз и даже совсем свести его к нулю, если уменьшить каким-либо способом частоты генератора. Уменьшение частоты приведет к уменьшению ЭДС самоиндукции, а следовательно, и к уменьшению вызываемого ею сдвига фаз между током и напряжением в цепи.

Если активное сопротивление цепи R не настолько мало, чтобы им можно было пренебречь, то часть внешнего напряжения и падает на сопротивлении R , а оставшая часть уравновешивается ЭДС самоиндукции: $u = Ri + Ldi/dt$. В этом случае максимум i отстает от максимума и по времени меньше, чем на $T/4$ (сдвиг фаз меньше $\pi/2$), как это изображено на рис. 16.11. Расчет показывает, что в этом случае отставание по фазе φ может быть вычислено по формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_L}{R} = \frac{\omega L}{R} \quad (16.10)$$

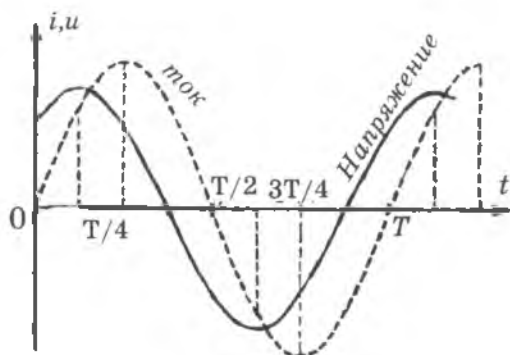


Рис. 16.11. Сдвиг фаз между током и напряжением в цепи, содержащей активное и индуктивное сопротивление

Задачи

1. Какой ток пройдет через катушку с индуктивностью 4 Гн, если ее включить в сеть с напряжением $U=220$ В и частотой $f=50$ Гц?

2. Напряжение на зажимах цепи с индуктивным сопротивлением x_L (рис. 16.12) изменяется по закону $u=220\sin(314t+\pi/4)$. Каков закон изменения тока в цепи, если $x_L = 50$ Ом?

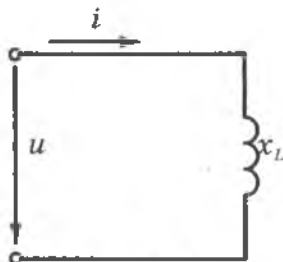


Рис. 16.12.

3. Какой ток пройдет через катушку с индуктивностью 2 Гн, если ее включить в сеть с напряжением $U=220$ В и частотой $f=60$ Гц?

4. Как уменьшить индуктивность катушки при условии, что ее длина и поперечное сечение останутся неизменными?

5. Ток в цепи с индуктивностью L на рис. 16.13 изменяется по закону $i = I_{max} \sin \pi t$. Каковы в этой цепи напряжение и ЭДС самоиндукции?

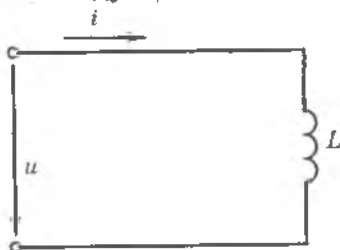


Рис. 16.13.

6. Катушка с индуктивностью L и активным сопротивлением R подключена к источнику переменного тока с частотой f . Как изменится ток через катушку, если ее подключить к источнику постоянного тока?

Вопросы

1. Какие электромагнитные процессы протекают в цепи с индуктивностью, питаемой синусоидальным напряжением?

2. Чему равна ЭДС самоиндукции при прохождении переменного тока через катушку индуктивности?

3. Как изменится сопротивление катушки индуктивности при увеличении частоты переменного тока?

4. ЭДС самоиндукции создает сопротивление переменному току или усиливает его?

5. Укажите свойства индуктивного сопротивления в цепи синусоидального тока.

§17. ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА С ЕМКОСТНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

17.1. Процессы, протекающие в конденсаторе

Пусть в нашем распоряжении имеется источник постоянного тока с напряжением 12 В и источник переменного тока с напряжением также 12 В. Присоединив к каждому из этих источников маленькую лампочку накаливания, мы увидим, что обе лампочки горят одинаково ярко (рис. 17.1, а). Включим теперь в цепь как первой, так и второй лампочки конденсатор большой емкости (рис. 17.1, б). Мы обнаружим, что в случае постоянного тока лампочка не накаливается вовсе. Отсутствие накала в цепи постоянного тока легко понять: между обкладками конденсатора имеется изолирующая прослойка, так что цепь разомкнута. В случае переменного тока накал ее остается почти таким же, как раньше, несмотря на то, что между обкладками конденсатора имеется изолирующая прослойка.

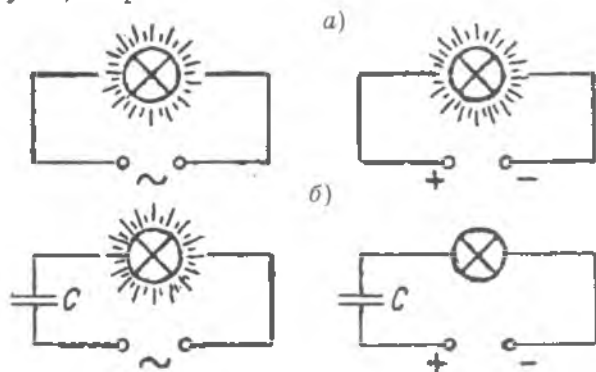


Рис. 17.1. Прохождение переменного тока через конденсатор

Лампочки, включенные в цепь тока постоянного (справа) или переменного (слева), накаливаются одинаково. При включении в цепь конденсатора емкости C постоянный ток прекращается, переменный ток продолжает идти и накаливать лампочку.

В этом нет ничего загадочного. Мы имеем здесь только частое повторение процесса зарядки и разрядки конденсатора. Когда мы присоединяем (рис. 17.2, а) конденсатор к источнику постоянного тока (повернув рычаг переключателя налево), то по проводам идет ток до тех пор, пока заряды, накопившиеся на обкладках конденсатора, не создадут разность потенциалов, уравнивающую напряжение источника. В конденсаторе при этом создается электрическое поле, в котором сосредоточен определенный запас энергии. Когда же мы соединим обкладки заряженного конденсатора проводником, отсоединив источник тока (повернув рычаг переключателя направо), заряд будет по проводнику стекать с одной обкладки на другую, и в проводнике, включающем лампочку, пройдет кратковременный ток. Поле в конденсаторе исчезает, и запасенная в нем энергия тратится на накал лампочки.

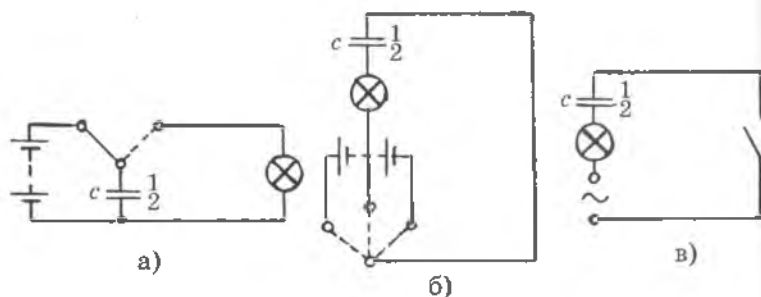


Рис. 17.2. При каждой перезарядке конденсатора лампочка вспыхивает: а — зарядка конденсатора (ключ — налево) и его разрядка через лампочку (ключ — направо); б — быстрая зарядка и разрядка конденсатора при поворотах ключа, лампочка вспыхивает; в — конденсатор и лампочка в цепи переменного тока

То, что происходит при прохождении переменного тока через конденсатор, очень наглядно поясняет опыт, изображенный на рис. 17.2, б. Поворачивая рычаг переключателя направо, мы соединяем конденсатор с источником тока, причем обкладка 1 заряжается положительно, а обкладка 2 – отрицательно. При среднем положении переключателя, когда цепь разомкнута, конденсатор разряжается через лампочку. При повороте ручки переключателя налево конденсатор снова заряжается, но на этот раз обкладка 1 заряжается отрицательно, а обкладка 2 – положительно. Двигая быстро рычаг переключателя то в одну сторону, то в другую, мы увидим, что при каждой смене контакта лампочка на мгновение вспыхивает, т.е. через нее проходит кратковременный ток. Если производить переключения достаточно быстро, то вспышки лампочки следуют настолько быстро друг за другом, что она будет гореть непрерывно; при этом через нее течет ток, часто меняющий свое направление. В конденсаторе при этом все время будет меняться электрическое поле: оно будет то создаваться, то исчезать, то вновь создаваться с обратным направлением. То же происходит и тогда, когда мы включаем конденсатор в цепь переменного тока (рис. 17.2, в).

Емкостное сопротивление конденсатора тем меньше, чем больше его емкость и чем больше частота переменного тока, т.е. чем короче период. Действительно, чем больше емкость конденсатора, тем больший электрический заряд накапливается на его обкладках в процессе зарядки, а чем больше частота (меньше период), тем за более короткое время этот заряд будет проходить по проводам, т.е. тем больший средний ток будет пропускать конденсатор. Итак, при увеличении C (емкость конденсатора) и ω (частота приложенного напряжения) ток возрастает, а сопротивление уменьшается.

17.2. Параметры процессов, протекающих в конденсаторе

В электрической цепи конденсатор является накопителем энергии электрического поля. При приложении постоянного напряжения ток через конденсатор отсутствует. А переменный ток протекает через конденсатор. Величина тока пропорциональна скорости изменения электрического напряжения на пластинах конденсатора:

$$i_c = C \frac{dU_c}{dt}, \quad (17.1)$$

где C — емкость конденсатора.

Этот элемент отражает свойство накопления зарядов или создания электрического поля.

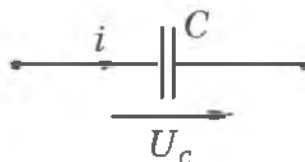


Рис. 17.3.

Если к концам конденсатора приложено напряжение $u_c = U_m \sin \omega t$ (рис. 17.5), то получим:

$$\begin{aligned} i_c &= C \cdot \frac{d}{dt} (U_m \sin \omega t) = \omega C U_m \sin(\omega t + 90^\circ) = \\ &= I_m \sin(\omega t + 90^\circ), \end{aligned} \quad (17.2)$$

где введено обозначение $I_m = \omega C U_m$, называемое амплитудой тока.

Отношение амплитуды напряжения на амплитуды тока равно величине:

$$\frac{U_m}{I_m} = \frac{U_m}{\omega C U_m} = \frac{1}{\omega C} = X_C, \quad (17.3)$$

называемой реактивным сопротивлением конденсатора.

Сравнивая формулы для тока и напряжения на конденсаторе, видим, что ток опережает напряжение по фазе

на угол 90° . Векторная диаграмма для цепи с конденсатором изображена на рис. 17.6. Графики $i_c(t)$ и $U_c(t)$ имеют вид (рис. 17.4):

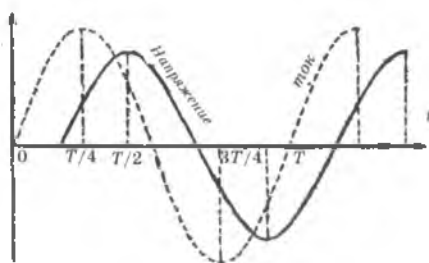


Рис. 17.4.

Так как в цепи отсутствует активное сопротивление, безвозвратная потеря мощности не происходит, поэтому активная мощность емкостной цепи равна нулю, а реактивная мощность определяется выражением: $Q_c = u_c \cdot i_c$. Она идет на создание электрического поля. Для реактивной мощности можно получить другое выражение:

$$Q_c = U_c I = X_c I^2 = \frac{U_c^2}{X_c}, \quad (17.4)$$

где учтено, что $I_c = I$.

При последовательном соединении конденсатора и резистора (рис. 17.7), ток, протекающий по ним, одинаковый, а мгновенные значения напряжений цепи определяется уравнением по второму закону Кирхгофа:

$$u = u_R + u_c \quad (17.5)$$

Графически это уравнение отражено на векторной диаграмме (рис. 17.8).

Напряжение на резисторе U_R совпадает по фазе с током, на конденсаторе U_C отстает от тока на 90° . Из треугольника напряжений следует соотношение между модулями напряжений:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} \quad (17.6)$$

Так как элементы соединены последовательно, по ним проходит одинаковый ток I . При этом $UR=IR$, $UC=IX_C$. Введем обозначение Z , называемое полным сопротивлением цепи и определяемым как $U=IZ$. Вставляя вместо U в формулу (17.6) указанные значения, получим:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}, \quad (17.7)$$

Z – значение полного сопротивления цепи.

Умножая обе стороны формулы (17.7) на I^2 , получим уравнение для мощностей:

$$S = \sqrt{P^2 + Q_C^2} \text{ – модуль полной мощности} \quad (17.8)$$

где $S=I^2Z$ – значение полной мощности, (17.9)

$P=I^2R$, $Q_C=I^2X_C$ – активная и реактивная мощности. (17.10)

Между полной и активной мощностями имеется следующая зависимость $\cos \varphi = \frac{P}{S}$ – коэффициент мощности цепи.

φ определяется из соотношения:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_C}{R} = \frac{1/\omega C}{R} \quad (17.11)$$

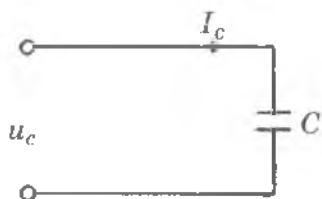


Рис. 17.5.

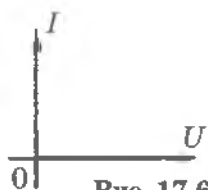


Рис. 17.6.

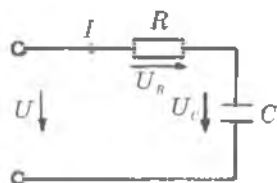


Рис. 17.7.

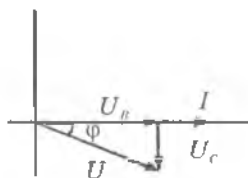


Рис. 17.8.

При параллельном включении R и C (рис. 17.9) напряжение на них одинаковое, а электрическое состояние цепи определяется уравнением первого закона Кирхгофа в векторной форме:

$$I = I_R + I_C \quad (17.12)$$

Векторная диаграмма цепи изображена на рис. 17.10.

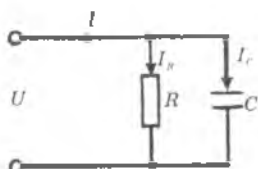


Рис. 17.9.

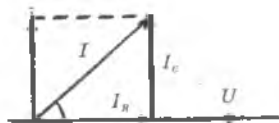


Рис. 17.10.

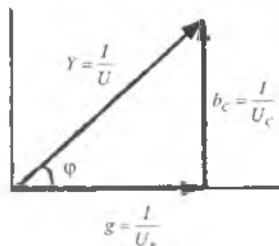


Рис. 17.11. Треугольник проводимостей

Начальную фазу напряжения U условно примем равной нулю.

Поделив каждую сторону треугольника токов на рис. 17.10 на напряжение, получаем подобный треугольник проводимостей (рис. 17.11).

$$Y = \sqrt{g^2 + b_C^2}, \quad (17.13)$$

где Y – модуль полной проводимости, g – активная проводимость, b_C – реактивная проводимость.

Единица измерения проводимости – Сименс (См).

Мощности определяются аналогично случаю, когда R и C соединены последовательно (формулы 17.8 – 17.10).

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Амплитуда и действующее значение напряжения и тока на емкости связаны законом Ома.

2. Напряжение u_c отстает по фазе от тока i_c на $\frac{\pi}{2}$.

3. Мгновенная мощность:

$$p(t) = u_c i_c = I_m U_m \sin \omega t \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = UI \sin 2\omega t = \omega C U^2 \sin 2\omega t$$

Мгновенная мощность может быть положительной, отрицательной и равной нулю (рис. 17.12).

Определим мгновенную мощность:

$$p = ui = UI \sin 2\omega t.$$

Среднее значение мощности за период:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t \cdot dt = 0. \quad (17.14)$$

Таким образом, идеальная емкость не потребляет из сети мощность. Для оценки запасенной в емкости энергии электрического поля вводят понятие реактивной мощности, равной:

$$Q_c = U_c I = I^2 X_c \quad (17.15)$$

График функции мгновенной мощности представлен на рис. 17.12. Здесь, где $p > 0$, энергия идет на создание электрического поля, где $p < 0$ – происходит возврат энергии. Средняя мощность за период $P_{cp} = 0$, а, следовательно, и активная мощность равна нулю, что означает, что происходит обмен энергией без потерь, емкость – реактивный элемент.

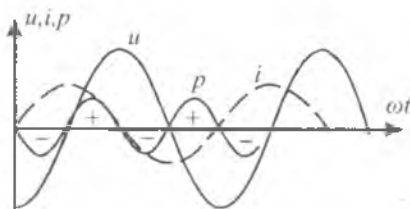


Рис. 17.12. Графики мгновенных значений тока, напряжения и мощности на емкости

17.3. Возникновение сдвига фаз

Если цепь состоит из конденсатора емкости C , а активным сопротивлением можно пренебречь, то обкладки конденсатора, присоединенные к источнику тока с напряжением u , заряжаются и между ними возникает напряжение u_c . Напряжение на конденсаторе u_c следует за напряжением источника тока и практически мгновенно, т.е. достигает максимума одновременно с u и обращается в нуль, когда $u=0$.

Зависимость между током i и напряжением u в этом случае показана на рис. 17.13, а. На рис. 17.13, б условно изображен процесс перезарядки конденсатора, связанный с появлением переменного тока в цепи.

Когда конденсатор заряжен до максимума (т.е. u_c , а следовательно, и u имеют максимальное значение), ток $i=0$ и вся энергия цепи есть электрическая энергия заряженного конденсатора (точка a на рис. 17.13, а).

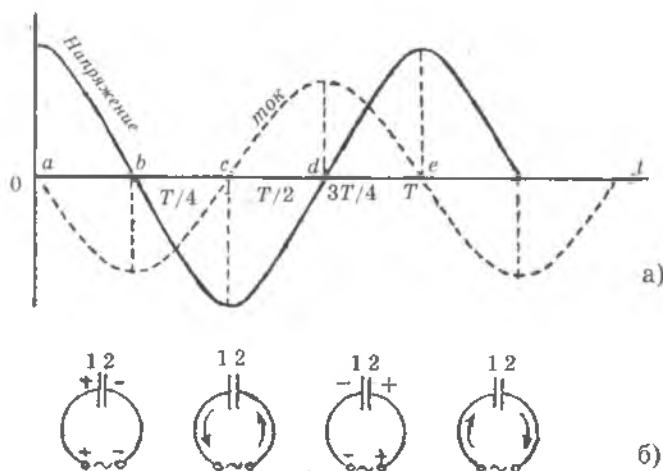


Рис. 17.13. а – Сдвиг фаз между напряжением и током в цепи с емкостным сопротивлением в отсутствие активного сопротивления; б – Процесс перезарядки конденсатора в цепи переменного тока

При уменьшении напряжения u конденсатор начинает разряжаться, и в цепи появляется ток; он направлен от обкладки 1 к обкладке 2, т.е. навстречу напряжению u . Поэтому на рис. 17.13, а он изображен как отрицательный (точки лежат ниже оси времени). К моменту времени $t=T/4$ конденсатор полностью разряжен ($u_c=0$ и $u=0$), а ток достигает максимального значения (точка b); электрическая энергия равна нулю, и вся энергия сводится к энергии магнитного поля, создаваемого током. Далее, напряжение u меняет знак, и ток начинает ослабевать, сохраняя прежнее направление. Когда u (и u_c) достигнет максимума, вся энергия вновь станет электрической, и ток $i=0$ (точка c). В дальнейшем u (и u_c) начинает убывать, конденсатор разряжается, ток нарастает, имея теперь направление от обкладки 2 к обкладке 1, т.е. положительное; ток доходит до максимума в момент, когда $u=0$ (точка d) и т.д. Из рис. 17.13, а видно, что ток раньше, чем напряжение, достигает максимума и проходит через нуль, т.е. ток опережает напряжение по фазе.

Если активным сопротивлением цепи R нельзя пренебречь по сравнению с емкостным $X_c=1/\omega C$, то ток опережает напряжение по времени меньше, чем на $T/4$ (сдвиг фаз меньше $\pi/2$, рис.17.14).

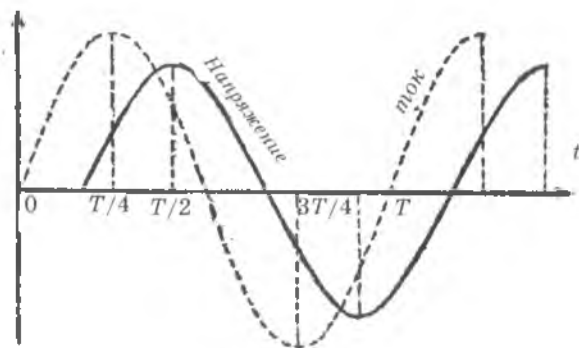


Рис. 17.14. Сдвиг фаз между током и напряжением в цепи, содержащей активное и емкостное сопротивления

Для этого случая, как показано выше, сдвиг фаз φ может быть вычислен по формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_C}{R} = \frac{1/\omega C}{R}.$$

Задачи

1. В сеть переменного тока с частотой 50 Гц включен конденсатор емкости 20 мкФ. Напряжение сети равно 220 В. Какой ток пройдет через конденсатор?

2. Напряжение на зажимах цепи с емкостным сопротивлением x_C (рис. 17.15) изменяется по закону $u = 220 \sin(314t + \pi/4)$. Каков закон изменения тока в цепи, если $x_C = 50$ Ом?

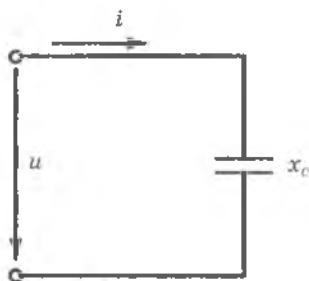


Рис. 17.15.

3. Напряжение на зажимах цепи, показанной на рис. 17.16, $u = 100 \sin 314t$. Каковы показания амперметра и вольтметра, если $x_C = 100$ Ом?

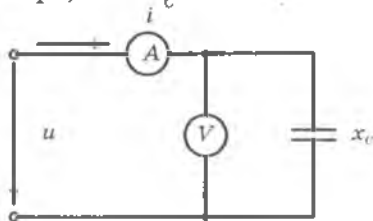


Рис. 17.16.

4. Чему равно емкостное сопротивление на частоте $f = 50$ Гц, если емкость конденсатора $C = 100$ мкФ?

5. Конденсатор емкостью C подключен к источнику переменного тока. Как изменится ток в конденсаторе, если частоту: а) увеличить в три раза; б) уменьшить в два раза; в) если конденсатор подключить к источнику постоянного тока того же напряжения?

6. Конденсатор с емкостью C подключен к источнику переменного тока. Как изменится ток в конденсаторе, если:

а) включить параллельно ему конденсатор той же емкости;

б) включить последовательно с ним конденсатор той же емкости?

7. К источнику переменного тока подключен резистор R с последовательно включенным конденсатором C . Как изменится ток в цепи, если закорачивается конденсатор C ? Как при этом изменяется фазовый сдвиг между током и напряжением?

8. Лампочка соединена последовательно с конденсатором и при подключении к переменному напряжению горит ярко. На конденсатор большей или меньшей емкости нужно заменить имеющийся, чтобы уменьшить расход электроэнергии?

9. Конденсатор соединен с резистором параллельно. Схема подключается к батарее. Через какой элемент будет протекать больший ток в момент подключения батареи?

Вопросы

1. Какие электрические процессы протекают в цепи с конденсатором, питаемой синусоидальным напряжением?

2. Сопротивление конденсатора при уменьшении частоты переменного тока увеличивается или уменьшается?

3. К батарее подключается конденсатор. Что скорее достигнет максимума: ток в цепи или напряжение на конденсаторе?

4. Два конденсатора разной емкости соединены последовательно и подключены к переменному напряжению. На каком из конденсаторов разность потенциалов будет больше и почему?

5. Конденсатор соединен с резистором последовательно. Схема подключается к батарее. Какое напряжение будет на резисторе и на конденсаторе в момент подключения к батарее?

6. Укажите свойства индуктивного сопротивления в цепи синусоидального тока.

§18. ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ РЕЗИСТИВНЫМ, ЕМКОСТНЫМ И ИНДУКТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТАМИ

Включим в цепь переменного тока последовательно активное сопротивление R и индуктивное сопротивление X_L и подключим параллельно каждому из них вольтметр, измеряющий напряжения между концами соответствующего участка цепи. Вольтметр V_1 измеряет напряжение U_{ab} между точками a и b , а вольтметр V_2 — напряжение U_{bc} между точками b и c . Третий вольтметр V_3 измеряет напряжение U_{ac} между точками a и c (рис. 18.1). Опыт показывает, что в случае, когда оба сопротивления одинаковы по своей природе, т.е. оба являются активными, или индуктивными, или емкостными, то, как и в случае постоянного тока, напряжение на всем участке ac равно сумме напряжений на участках ab и bc :

$$U_{ac} = U_{ab} + U_{bc} \quad (18.1)$$

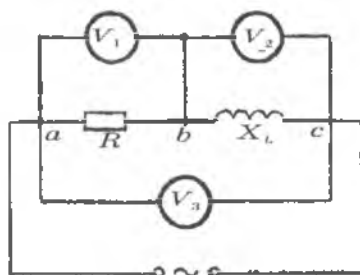


Рис. 18.1. Сумма напряжений на активном и индуктивном (или емкостном) сопротивлениях не равна напряжению между концами участка цепи ac , содержащего оба эти сопротивления

В общем же случае, когда сопротивления различны по природе (рис. 18.1), напряжение на всем участке ac всегда меньше суммы напряжений на участках ab и bc .

$$U_{ac} < U_{ab} + U_{bc} \quad (18.2)$$

Если, например, включить в сеть с напряжением 220 В последовательно лампочку с активным сопротивлением 60 Ом и катушку с индуктивным сопротивлением 80 Ом, то окажется, что напряжение на лампочке равно 125 В, а напряжение на катушке равно 166 В; сумма этих напряжений равна $U_{ab} + U_{bc} = 291$ В, хотя $U_{ac} = 220$ В.

Действительно, заменив вольтметры V_1 и V_2 (рис. 18.1) осциллографами, можно убедиться в том, что напряжения U_{ab} и U_{bc} не совпадают по фазе. Если первое сопротивление активное, а второе емкостное, то напряжение U_{ab} опережает по фазе напряжение U_{bc} на четверть периода, а если второе сопротивление индуктивное, то напряжение U_{ab} отстает по фазе от напряжения U_{bc} на такую же величину. Кривые, изображающие форму напряжений U_{ab} и U_{bc} , были бы расположены в этом случае так же, как соответствующие кривые на рис. 18.2.

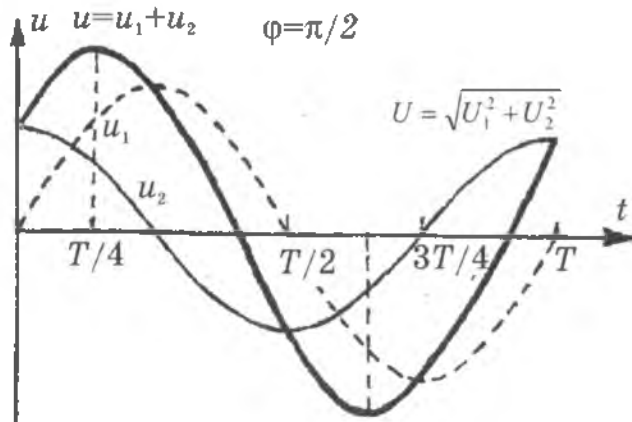


Рис. 18.2. Сложение двух синусоидальных переменных напряжений. Складываемые напряжения сдвинуты во времени на четверть периода ($\varphi = \pi/2$)

Для мгновенных значений напряжений всегда имеет место соотношение:

$$u = u_1 + u_2, \quad (18.3)$$

но результат сложения двух синусоидальных напряжений, т.е. амплитуда и фаза результирующего напряжения, будет зависеть от разности фаз между складываемыми напряжениями так же, как и в случае токов.

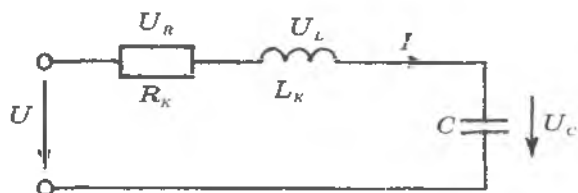


Рис. 18.3. Схема электрической цепи с последовательным включением катушки индуктивности, резистора и конденсатора

Рассмотрим цепь с последовательным соединением R , C и L (рис. 18.3) ($R = R_K$ – активное сопротивление катушки). На цепь подано синусоидальное напряжение. При наличии в цепи различных по природе сопротивлений, как активное и реактивное, то происходит фазовый сдвиг между током и напряжением. Его знак и значение зависят от соотношения между активным и реактивным сопротивлениями.

Цепь, содержащая последовательно соединенные катушку индуктивности и конденсатор (рис. 18.3), обладает активным сопротивлением $R = R_K$ (сопротивление катушки) и реактивным сопротивлением X , определяемым индуктивностью катушки L_K и емкостью конденсатора C : $X = X_L - X_C$, при этом:

$$X_L = \omega L_K = 2\pi f L_K; X_C = 1/(\omega C) = 1/2\pi f C,$$

где ω и f – соответственно круговая и линейная частоты питающего напряжения.

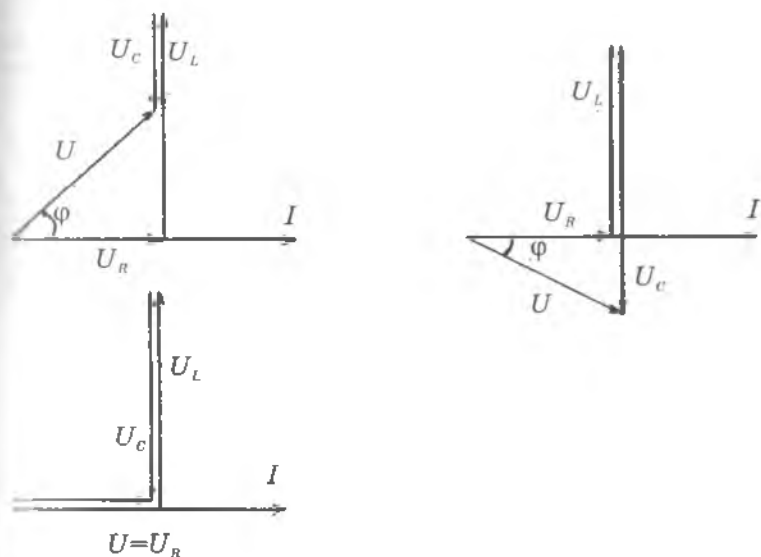


Рис. 18.4.

Поскольку элементы соединены последовательно, совместно с источником прилагаемого напряжения создают замкнутый контур. В соответствии со 2-м правилом Кирхгофа вектор приложенного напряжения равен векторной сумме падений напряжения на элементах цепи:

$$U = U_R + U_L + U_C \quad (18.3)$$

Из треугольника напряжений (рис. 18.5, а) следует, что:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}, \quad (18.4)$$

где

$$U = IZ; U_R = IR; U_L = IX_L; U_C = IX_C \quad (18.5)$$

по закону Ома.

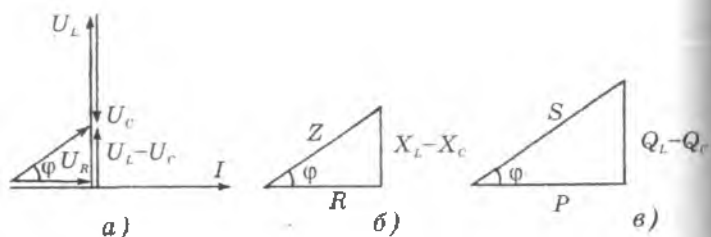


Рис. 18.5. Векторная диаграмма напряжений (а), треугольник сопротивлений (б) и треугольник мощностей (в) при последовательном включении катушки индуктивности и конденсатора (случай, когда $X_L > X_C$)

Подставив выражение (18.5) в формулу (18.4), сокращая обе стороны на I , получим выражение для треугольника сопротивлений (рис. 18.5, б):

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (18.6)$$

Таким образом, полное сопротивление электрической цепи (ЭЦ) переменного тока Z , измеряемое в Омах, определяется соотношением активного R и реактивного X сопротивлений и определяет характер тока в ЭЦ.

Фазовый сдвиг между током и напряжением:

$$\omega = \arctg(X_L - X_C)/R = \arccos R/Z \quad (18.7)$$

Умножив обе части уравнения (18.4) на I , получим выражение для треугольника мощностей в ЭЦ переменного тока (рис. 18.5, в):

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}, \quad (18.8)$$

где $S = I^2 Z$ – полная мощность, В·А;

$P = I^2 R$ – активная мощность, Вт;

$Q_L = I^2 X_L$ – реактивная индуктивная мощность, вар;

$Q_C = I^2 X_C$ – реактивная емкостная мощность, вар.

Или, по другому, вместо (18.8) можно использовать

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (18.9)$$

где $P = S \cos \varphi$, $Q = S \sin \varphi$, $Q = Q_L - Q_C$ - полная реактивная мощность.

Значит мощность цепи переменного тока имеет три составляющие: реактивные - индуктивную Q_L и емкостную Q_C мощности и активную мощность P .

Задачи

1. Каковы сопротивление R и активная мощность P в цепи, показанной на рис. 18.6, если $x_L = 30$ Ом, амперметр показывает 4 А, а вольтметр 200 В?

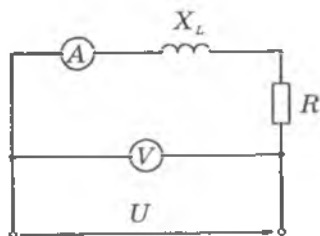


Рис. 18.6.

2. Напряжение на зажимах цепи, показанной на рис. 18.7, $U = 141$ В. Каковы будут напряжения U_R и U_L при нулевой частоте источника питания этой цепи?

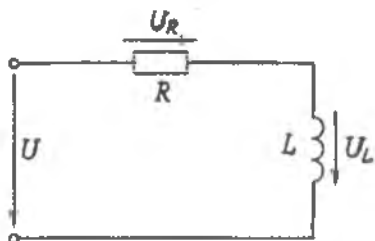


Рис. 18.7.

3. Цепь с последовательно соединенными резистором R и конденсатором C , показанная на рис. 18.8, подключена к источнику питания с постоянным напряжением $U=100$ В. Как распределяется напряжение на участках цепи?

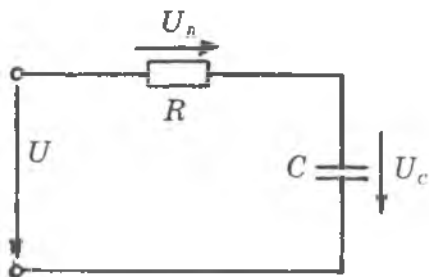


Рис. 18.8.

4. Чему равно емкостное сопротивление на частоте $f=50$ Гц, если емкость конденсатора $C=100$ мкФ?

5. Каковы будут сопротивления R и x в схеме на рис. 18.9, если подведенное напряжение $u = 100 \sin \omega t$, а ток в цепи $i = 14,1 \sin(\omega t + 90^\circ)$?

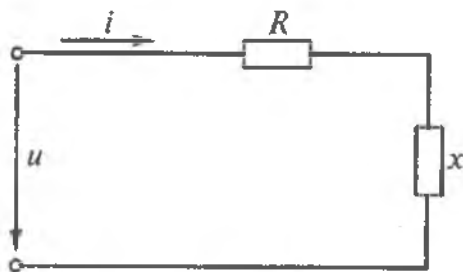


Рис. 18.9.

6. В схеме цепи на рис. 18.10 мгновенные значения напряжения и тока соответственно составляют $u = 100 \sin(\omega t + 75^\circ)$, $i = 2 \sin(\omega t + 120^\circ)$. Каковы активная и реактивная мощности в этой цепи?

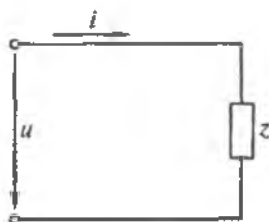


Рис. 18.10.

7. Каким в цепи на рис. 18.11 будет мгновенное значение напряжения на зажимах, если ток в этой цепи выражается функцией времени: $i = -4\sin(\omega t - 120^\circ)$?

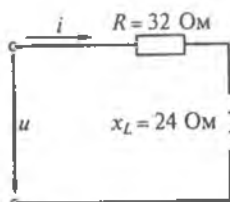


Рис. 18.11.

8. Последовательно соединенные идеальная катушка индуктивности с $L=0,15$ Гн, резистор с $R=500$ Ом, конденсатор с $C=2$ мкФ подключены к источнику синусоидального напряжения с частотой 400 Гц. Найдите полное сопротивление цепи.

Вопросы

1. Запишите формулы для сопротивления цепи с последовательным соединением R и L , R и C ?
2. Какие электрические процессы протекают в последовательной цепи, содержащей R , L и C элементы?
3. Как определить полное сопротивление последовательной цепи, содержащей R , L и C элементы?
4. Как построить треугольник напряжений?
5. Как построить треугольник сопротивлений на основе треугольника напряжений?
6. Как построить треугольник мощностей на основе треугольника сопротивлений?

§19. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

19.1. Процессы, протекающие в параллельных цепях

Включим в цепь переменного тока две параллельные ветви, содержащие активные сопротивления R' и R'' и амперметры A_1 и A_2 , измеряющие токи I_1 и I_2 в этих ветвях (рис. 19.1). Третий амперметр A измеряет ток в неразветвленной цепи. Положим сначала, что оба сопротивления R' и R'' представляют собой лампочки накаливания или реостаты, индуктивным сопротивлением которых можно пренебречь по сравнению с их активным сопротивлением (рис. 19.1, а). Тогда, так же как и в случае постоянного тока, мы убедимся в том, что показание амперметра A равно сумме показаний амперметров A_1 и A_2 , т. е. $I = I_1 + I_2$. Если сопротивления R' и R'' представляют собой реостаты, то, изменяя их сопротивления, мы можем как угодно изменять каждый из токов I_1 и I_2 , но равенство $I = I_1 + I_2$ всегда будет сохраняться.

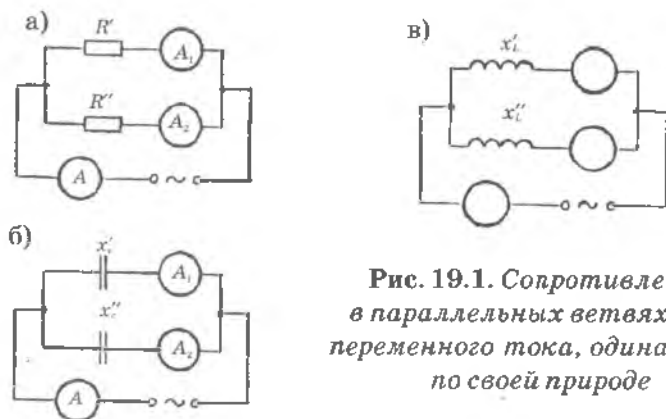


Рис. 19.1. Сопротивления в параллельных ветвях цепи переменного тока, одинаковых по своей природе

То же будет иметь место и в том случае, если мы заменим оба реостата конденсаторами, т.е. если оба сопротивления будут емкостными (рис. 19.1, б), или в том случае, если оба сопротивления являются индуктивными, т.е. реостаты заменены катушками с железным сердечником, индуктивное сопротивление которых настолько больше активного, что последним можно пренебречь (рис. 19.1, в).

Таким образом, если сопротивления параллельных ветвей одинаковы по своей природе, то ток в неразветвленной цепи равен сумме токов в отдельных ветвях. Это справедливо, конечно, и в том случае, когда имеются не две ветви, а любое их число. Заменим теперь в одной из ветвей (рис. 19.2, а и б) активное сопротивление емкостным (конденсатором) или индуктивным (катушкой с большой индуктивностью и малым активным сопротивлением). Опыт дает в этом случае результат, кажущийся на первый взгляд странным: ток в неразветвленной цепи I оказывается меньшим, чем сумма токов в обеих ветвях: $I < I_1 + I_2$. Если, например, ток в одной ветви равен 3 А, а в другой — 4 А, то амперметр в неразветвленной цепи покажет не ток 7 А, как мы ожидали бы, а только ток 5 А, или 3 А, или 2 А и т.д. Ток I будет меньше суммы токов I_1 и I_2 и тогда, когда сопротивление одной ветви емкостное, а другой — индуктивное (рис. 19.2, в).

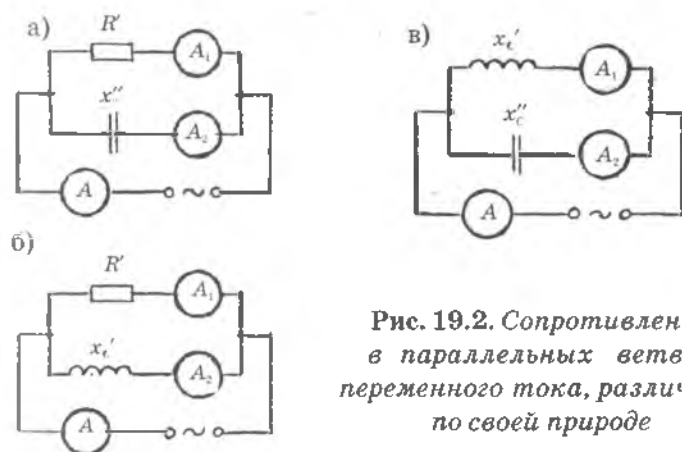


Рис. 19.2. Сопротивления в параллельных ветвях переменного тока, различных по своей природе

Таким образом, если сопротивления параллельных ветвей различны по своей природе, то ток в неразветвленной цепи меньше суммы токов в отдельных ветвях.

Чтобы разобраться в этих явлениях, заменим в схемах на рис. 19.1 и 19.2 амперметры осциллографами и запишем форму кривой тока в каждой из параллельных ветвей. Оказывается, что токи разной природы в каждой из ветвей не совпадают по фазе ни друг с другом, ни с током в неразветвленной цепи. В частности, ток в цепи с активным сопротивлением опережает по фазе на четверть периода ток в цепи с емкостным сопротивлением и отстает по фазе на четверть периода от тока в цепи с индуктивным сопротивлением.

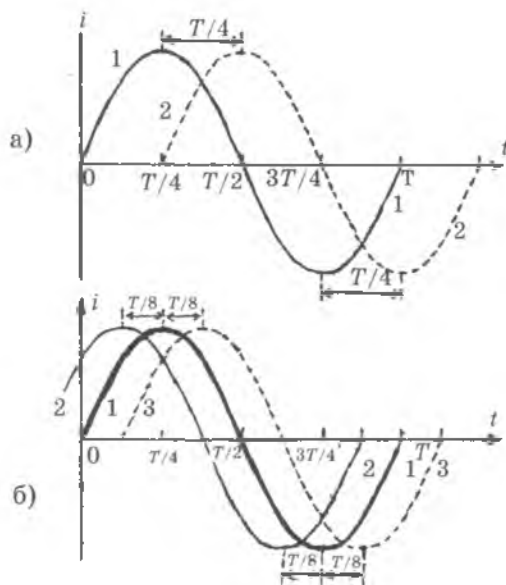


Рис. 19.3. Графическое изображение переменных токов одинаковой частоты и амплитуды, смещенных по фазе: а – два синусоидальных тока, смещенные по фазе на четверть периода; б – токи, изображаемые кривыми 2 и 3, смещены по фазе относительно кривой 1 на одну восьмую часть периода

В этом случае кривые, изображающие форму тока в неразветвленной цепи и в какой-нибудь из ветвей, расположены относительно друг друга так, как кривые 1 и 2 на рис. 19.3. В общем же случае, в зависимости от соотношения между активным и емкостным (или индуктивным) сопротивлениями каждой из ветвей, сдвиг фаз между током в этой ветви и неразветвленным током может иметь любое значение от нуля до $\pm\pi/2$. Следовательно, при смешанном сопротивлении разность фаз между токами в параллельных ветвях цепи может иметь любое значение между нулем и $\pm\pi/2$.

Две кривые на рис. 19.3, а изображают форму двух синусоидальных переменных токов с одной и той же частотой и амплитудой, но кривые эти смещены по оси абсцисс (оси времени) на отрезок, равный четверти периода. Начальная точка отсчета времени выбрана так, что для первой кривой нулевые значения достигаются в моменты $0, T/2, T, 3T/2 \dots$, а амплитудные – в моменты $T/4, 3T/4, 5T/4, \dots$. Вторая же кривая проходит через нулевые значения в моменты $T/4, 3T/4, 5T/4, \dots$, а через амплитудные – в моменты $T/2, T, 3T/2, \dots$

В подобных случаях говорят, что эти два тока (или две другие синусоидальные величины) сдвинуты друг относительно друга по фазе, или, иначе, что между ними существует некоторый сдвиг фаз (или разность фаз), равный в данном примере четверти периода. Так как кривая 1 проходит через амплитудное значение, так же как и через любое другое соответствующее значение раньше, чем кривая 2, то говорят, что она опережает кривую 2 по фазе или, иначе, что кривая 2 отстает по фазе от кривой 1.

Это несовпадение фаз токов в параллельных ветвях с сопротивлениями, различными по своей природе, и является причиной тех явлений, о которых было сказано в начале этого параграфа. Действительно, для мгновенных значений токов, т.е. для тех значений, которые эти токи имеют в один и тот же момент времени, соблюдается известное правило: $i = i_1 + i_2$. Но для амплитуд (или действующих значений) этих токов это правило не соблюдается,

потому что результат сложения двух синусоидальных токов или иных двух величин, изменяющихся по закону синуса, зависит от разности фаз между складываемыми величинами.

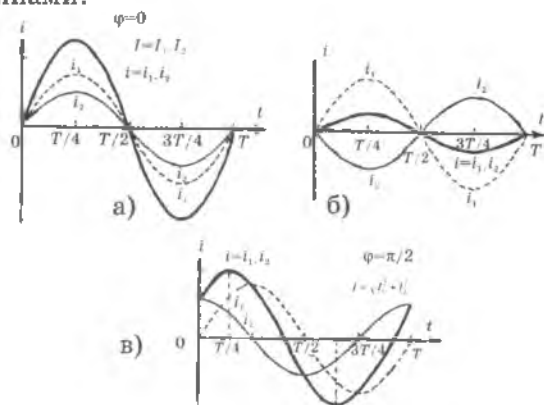


Рис. 19.4. Сложение двух синусоидальных переменных токов. Складываемые токи: а – совпадают по фазе ($\varphi=0$); б – противоположны по фазе, т.е. сдвинуты во времени на половину периода ($\varphi=\pi$); в – сдвинуты во времени на четверть периода ($\varphi=\pi/2$)

В самом деле, предположим для простоты, что амплитуды складываемых токов одинаковы, а разность фаз между ними равна нулю. Тогда мгновенное значение суммы двух токов будет равно просто удвоенному значению мгновенного значения одного из складываемых токов, т.е. форма результирующего тока будет представлять собой синусоиду с тем же периодом и фазой, но с удвоенной амплитудой. Если амплитуды складываемых токов различны (рис. 19.4, а), то сумма их представляет собой синусоиду с амплитудой, равной сумме амплитуд складываемых токов. Это имеет место, когда разность фаз между складываемыми токами равна нулю, например, когда сопротивления в обеих параллельных ветвях одинаковы по своей природе. Рассмотрим теперь другой крайний случай, когда складываемые токи, имея равные

амплитуды, противоположны по фазе, т.е. разность фаз между ними равна π . В этом случае мгновенные значения складываемых токов равны по модулю, но противоположны по направлению. Поэтому их алгебраическая сумма будет постоянно равна нулю. Таким образом, при сдвиге фаз на π между токами в обеих ветвях, несмотря на наличие токов в каждой из параллельных ветвей, в неразветвленной цепи тока не будет. Если амплитуды обоих смещенных на π токов различны, то мы получим результирующий ток с той же частотой, но с амплитудой, равной разности амплитуд складываемых токов; по фазе этот ток совпадает с током, имеющим большую амплитуду (рис. 19.4, б). Практически этот случай имеет место тогда, когда в одной из ветвей имеется емкостное, а в другой – индуктивное сопротивление.

В случае, если ветвь токов сдвинута на $\pi/2$, то амплитуда результирующего тока определяется выражением:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} \quad (19.1)$$

19.2. Параллельное соединение резистора и конденсатора

Когда к цепи (рис. 19.5) с параллельным соединением резистора и конденсатора подается переменное синусоидальное напряжение, одно и то же напряжение приложено к обоим компонентам цепи.

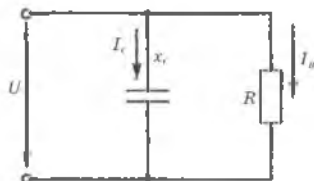


Рис. 19.5.

Общий ток цепи I разветвляется на ток в конденсаторе I_C (емкостная составляющая общего тока) и ток в резисторе I_R (активная составляющая).

Между токами I , I_C и I_R существуют фазовые сдвиги, обусловленные емкостным реактивным сопротивлением X_C конденсатора. Они могут быть представлены с помощью векторной диаграммы токов (рис. 19.6, а).

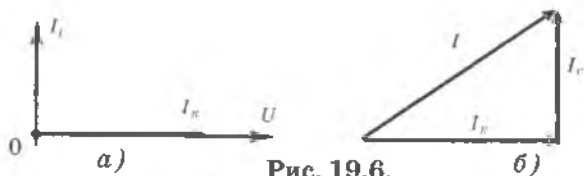


Рис. 19.6.

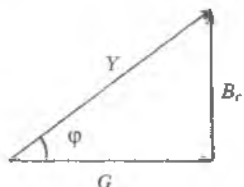


Рис. 19.7.

Фазовый сдвиг между напряжением U цепи и током в резисторе I_R отсутствует, тогда как между этим напряжением и током в конденсаторе I_C равен -90° (т.е. ток опережает напряжение на 90°). При этом сдвиг между полным током I и напряжением U цепи определяется соотношением между проводимостями B_C и G . Разделив каждую сторону (рис. 16.6, б) треугольника токов на напряжение, получим треугольник проводимостей (рис. 19.7).

В треугольнике проводимостей $G=1/R$, $B_C=1/X_C$, Y представляет собой так называемую полную проводимость цепи в $См$, тогда как G – активная, а B_C – реактивная (емкостная) проводимости.

Из-за фазового сдвига между током и напряжением в цепях, подобных данной, простое арифметическое сложение действующих или амплитудных токов в параллельных ветвях невозможно. Но в векторной форме:

$$I = I_R + I_C \quad (19.2)$$

Расчет ведется по следующим формулам, вытекающим из векторной диаграммы и треугольника проводимости.

Действующее значение полного тока цепи:

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \quad (19.3)$$

$$I=U/Z=UY \quad (19.4)$$

Полная проводимость цепи:

$$Y = \sqrt{G^2 + B_C^2} \quad (19.5)$$

$$Y=I/U=1/Z, \quad (19.6)$$

где Z – полное сопротивление цепи.

Угол сдвига фаз:

$$\omega = \arctg(I_C/I_R) = \arctg(B_C/G) \quad (19.7)$$

19.3. Параллельное соединение резистора и катушки индуктивности

Когда к цепи (рис. 19.8) с параллельным соединением резистора и катушки подается переменное синусоидальное напряжение U , одно и то же напряжение приложено к обоим компонентам цепи. Общий ток цепи I разветвляется на ток в катушке I_L (индуктивная составляющая общего тока) и тока в резисторе I_R (активная составляющая).

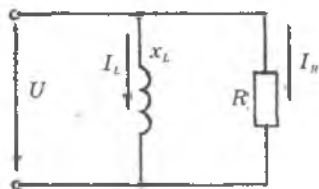


Рис.19.8

Из-за фазового сдвига между током и напряжением в цепях, подобных данной, простое арифметическое сложение действующих или амплитудных токов в параллельных ветвях невозможно. Но в векторной форме:

$$I = I_R + I_L \quad (19.8)$$

На основе этого выражения можно построить векторную диаграмму и треугольник токов (рис. 19.9):

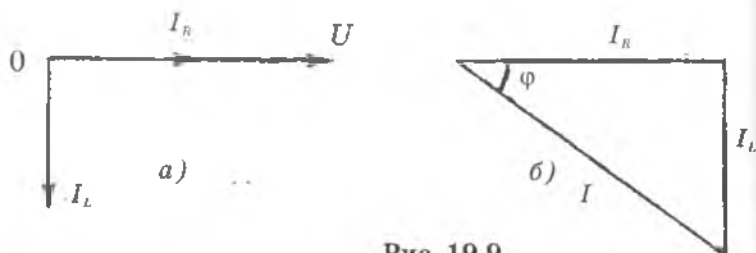


Рис. 19.9.

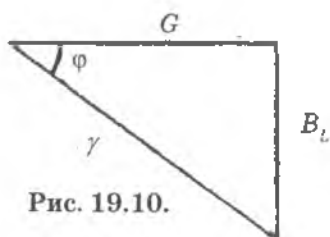


Рис. 19.10.

Фазовый сдвиг между напряжением U цепи и током в резисторе I_R отсутствует, тогда как в катушке I_L всегда отстает от напряжения цепи (или тока в резисторе I_R) на 90° . При этом сдвиг между полным током I и напряжением U цепи определяется соотношением между проводимостями B_L и G .

Разделив каждую сторону треугольника токов (рис. 19.9, б) на напряжение, получим треугольник проводимостей (рис. 19.10), в котором $G=1/R$, $B_L=1/X_L$, а Y представляет собой так называемую полную проводимость цепи в См, тогда как G – активная, а B_L – реактивная (индуктивная) проводимости.

Расчет ведется по следующим формулам, вытекающим из векторной диаграммы и треугольника проводимости.

Действующее значение полного тока цепи:

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} \quad I = U/Z = UY \quad (19.9)$$

Полная проводимость цепи:

$$Y = \sqrt{G^2 + B_L^2}, \quad Y = I/U = 1/Z, \quad (19.10)$$

где Z – полное сопротивление цепи.

Угол сдвига фаз:

$$\varphi = \arctg(I_L/I_R) = \arctg(B_L/G) \quad (19.11)$$

Активная проводимость цепи:

$$G = Y \cdot \cos \varphi \quad (19.12)$$

Реактивная проводимость цепи:

$$B_L = Y \cdot \sin \varphi \quad (19.13)$$

19.4. Параллельный колебательный контур

В электрической цепи, содержащей параллельно включенные катушку индуктивности (R_k — небольшое активное сопротивление катушки) и конденсатор (см. рис. 19.11) вектор тока i , потребляемого электрической цепью, равен векторной сумме токов в ветвях:

$$i = i_k + i_c, \quad (19.14)$$

где i_k , i_c — мгновенные значения токов в катушке и конденсаторе.

$$I = \sqrt{I_R + (I_L - I_C)^2} \quad (19.15)$$

— выражение для амплитуд токов.

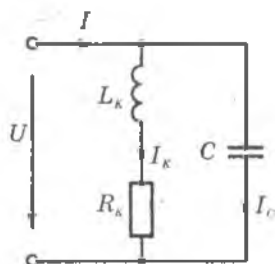


Рис. 19.11.

Векторная диаграмма токов приведена на рис. 19.12, а (для случая, когда $I_L > I_C$). Учитывая, что $I = U/Z = Uy$, где $y = 1/Z$ — полная проводимость электрической цепи, из-

меряемая в Сименсах (См), по аналогии с последовательным соединением элементов можно построить треугольники проводимостей (рис. 19.12, б) и мощностей (рис. 19.12, в).

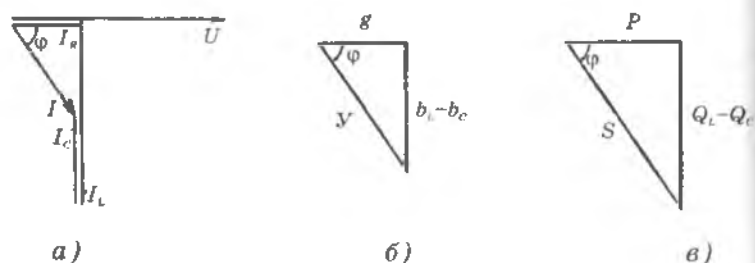


Рис. 19.12. Векторная диаграмма токов (а), треугольник проводимостей (б) и треугольник мощностей (в) при параллельном включении катушки индуктивности и конденсатора

Здесь $g = R / Z_k^2$ – активная проводимость;

$b_L = X_L / Z_k^2$ – индуктивная проводимость;

$b_C = 1 / X_C$ – емкостная проводимость,

$Z_k = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ – полное сопротивление ветви катушки индуктивности. Из треугольника проводимостей следует, что:

$$y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}, \quad (19.16)$$

а из треугольника мощностей:

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}, \quad (19.17)$$

коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = P / S \quad (19.18)$$

$$\varphi = \arctg \frac{b_L - b_C}{g}, \quad (19.19)$$

где $S = U^2 y$ – полная мощность, $B \cdot A$;

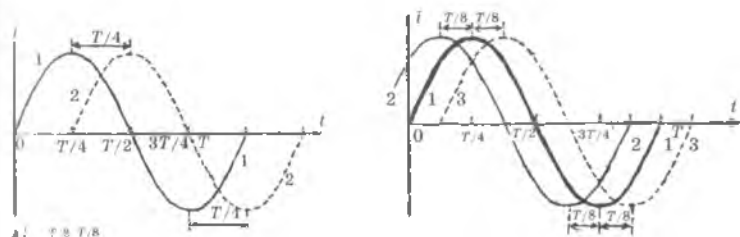
$P = U^2 g$ – активная мощность, Вт;

$Q_L = U^2 / X_L$ – реактивная индуктивная мощность, вар;

$Q_C = U^2 / X_C$ – реактивная емкостная мощность, вар.

Здесь учтено, что РК имеет небольшое значение, поэтому падение напряжения на нем отсутствует, а напряжения на концах конденсатора и катушки одинаковые – U .

В зависимости от соотношения величин b_L и b_C , как и в рассмотренном выше случае последовательного соединения элементов, возможны три различных случая:



а)

б)

Рис. 19.13.

В цепи преобладает индуктивность, т.е. $b_L > b_C$, а следовательно, $I_L > I_C$. Этому режиму соответствует векторная диаграмма на рис. 19.13, а.

В цепи преобладает емкость, т.е. $b_L < b_C$, а значит, $I_L < I_C$. Этот случай иллюстрирует векторная диаграмма на рис. 19.13, б.

Случай, когда $b_L = b_C$, соответствует так называемому резонансу токов.

19.5. Сложные параллельные цепи

Для цепи (рис. 19.14), где I – ток общей цепи в векторной форме, справедливо выражение:

$$I = I_R + I_L + I_C, \quad (19.20)$$

где I_R, I_L, I_C – векторы токов соответствующих ветвей.

Векторная диаграмма токов, а также треугольники токов, сопротивлений, мощностей имеют точно такую же форму, как на рисунках 18.4 и 18.5, только I и U меняются местами. Из треугольника проводимостей имеем:

$$Y = \sqrt{g^2 + (b_c - b_l)^2} \quad (19.21)$$

- полная проводимость цепи,

$$\varphi = \arctg \frac{b_l - b_c}{g}$$

- фазовый сдвиг между ветвями, содержащими L и C .

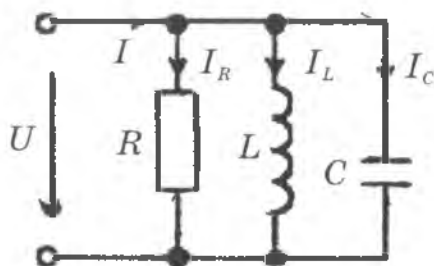


Рис. 19.14.

Выражения для мощностей:

$S = U^2 y$ - полная мощность, В·А;

$P = U^2 / R$ - активная мощность, Вт;

$Q_L = U^2 / X_L$ - реактивная индуктивная мощность, вар;

$Q_C = U^2 / X_C$ - реактивная емкостная мощность, вар.

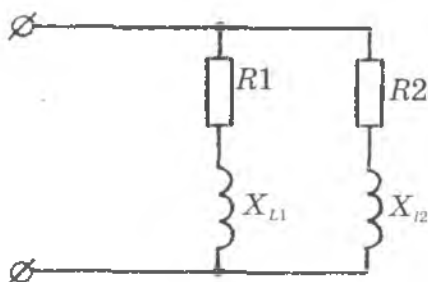


Рис. 19.15.

При расчете цепи (рис. 19.15) используются проводимости цепи. Сопротивления ветвей по отдельности:

$$z_1 = \sqrt{R1^2 + X_{L1}^2} \quad (19.22.1)$$

$$z_2 = \sqrt{R2^2 + X_{L2}^2} \quad (19.22.2)$$

Активные проводимости ветвей соответственно равны:

$$g_1 = \frac{R1}{z_1^2}, \quad g_2 = \frac{R2}{z_2^2} \quad (19.23)$$

Реактивные проводимости ветвей:

$$b_1 = \frac{X_{L1}}{z_1^2}, \quad b_2 = \frac{X_{L2}}{z_2^2} \quad (19.24)$$

Полная активная проводимость цепи:

$$g = g_1 + g_2 \quad (19.25)$$

Полная реактивная проводимость цепи:

$$b = b_1 + b_2 \quad (19.26)$$

Полная проводимость цепи схожа с проводимостью, приведенной в формуле (19.10):

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} \quad (19.27)$$

Для цепи выполняется закон Ома:

$$I = U \cdot y, \quad (19.28)$$

где U – напряжение, подводимое к цепи;

I – общий ток цепи.

Задачи

1. Какой из трех цепей, приведенных на рис. 19.16, соответствует векторная диаграмма, данная на рис. 19.17?

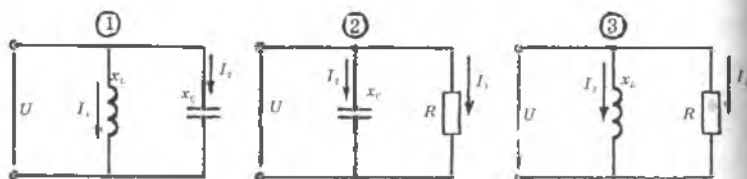


Рис. 19.16.

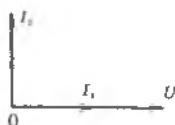


Рис. 19.17.

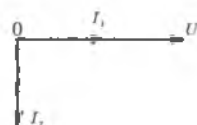


Рис. 19.18.

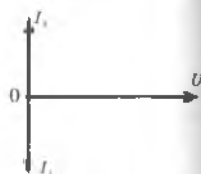


Рис. 19.19.

2. Какой из трех цепей, приведенных на рис. 19.16, соответствует векторная диаграмма, данная на рис. 19.18?

3. Какой из трех цепей, приведенных на рис. 19.16, соответствует векторная диаграмма, данная на рис. 19.19?

4. В схеме на рис. 19.20 при напряжении $U = 100$ В и частоте $f = 50$ Гц активная мощность $P = 100$ Вт, а реактивные $Q_L = 200$ вар, $Q_C = 400$ вар. Каковы будут эти же мощности при напряжении $U = 200$ В и частоте $f = 100$ Гц?

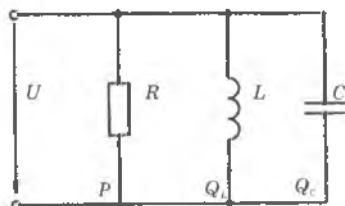


Рис. 19.20.

5. Определить полное сопротивление цепи и напряжение на ее выводах, если цепь состоит из двух парал-

дельных ветвей (рис. 19.15), элементы которых имеют следующие параметры: $R_1 = 150 \text{ Ом}$; $X_{L1} = 200 \text{ Ом}$; $R_2 = 250 \text{ Ом}$; $X_{L2} = 100 \text{ Ом}$. Ток в неразветвленной части цепи $0,8 \text{ А}$.

6. Чему будет равен ток i в неразветвленной части цепи на рис. 19.21, если напряжение $u = 100\sqrt{2} \sin \omega t$, а сопротивления $R = x_L = x_C = 10 \text{ Ом}$?

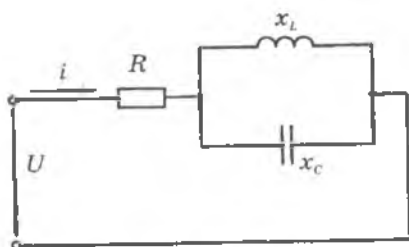


Рис. 19.21.

7. Параллельно соединенные идеальная катушка индуктивности с $L=0,15 \text{ Гн}$, резистор с $R=500 \text{ Ом}$, конденсатор с $C=2 \text{ мкФ}$ подключены к источнику синусоидального напряжения с частотой 400 Гц . Найдите полную проводимость цепи.

Вопросы

1. Как определяется эквивалентная проводимость цепи из двух параллельных ветвей, содержащих R и C элементы?
2. Как определяется эквивалентная проводимость цепи из двух параллельных ветвей, содержащих R и L элементы?
3. Как определяется эквивалентная проводимость цепи из двух параллельных ветвей, содержащих R, L и C элементы?
4. Как определить полную проводимость и сопротивление параллельной цепи, содержащей R, L и C элементы?
5. Каким процессом обусловлен сдвиг фаз между параллельно включенными R и C элементами?
6. Каким процессом обусловлен сдвиг фаз между параллельно включенными L и C элементами?

§20. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

Когда по цепи с последовательным соединением конденсатора и катушки индуктивности (рис. 20.1) протекает один и тот же синусоидальный ток I , напряжение на конденсаторе U_C отстает от тока I на 90° , а напряжение на катушке индуктивности U_L опережает ток на 90° . Эти напряжения находятся в противофазе (повернуты относительно друг друга на 180°).

Если одно из напряжений больше другого, цепь оказывается либо преимущественно индуктивной (рис. 20.2), либо преимущественно емкостной (рис. 20.3). Если напряжения U_L и U_C имеют одинаковые значения и компенсируют друг друга, то суммарное напряжение на участке цепи $L - C$ оказывается равным нулю. Остается только небольшая составляющая напряжения на активном сопротивлении катушки и проводов. Такое явление называется резонансом напряжений (рис. 20.4).

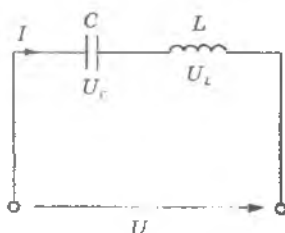


Рис. 20.1

При резонансе напряжений реактивное сопротивление цепи:

$$X = X_L - X_C = 0 \quad (20.1)$$

При заданных значениях L и C резонанс может быть получен путем изменения частоты.

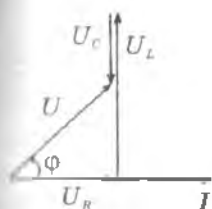


Рис. 20.2.

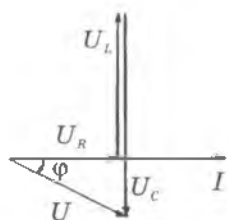


Рис. 20.3.

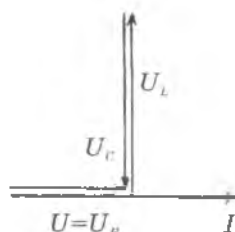


Рис. 20.4.

Поскольку $X_L = \omega L$, а $X_C = 1 / \omega C$, то на основе уравнения (20.1) резонансная частота ω_0 может быть определена из уравнения:

$$\omega_0 L - 1 / \omega_0 C = 0, \quad (20.2)$$

откуда

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ и } f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (20.3)$$

Полное сопротивление цепи при резонансе оказывается равным небольшому активному сопротивлению катушки, поэтому ток в цепи совпадает по фазе с напряжением и может оказаться довольно большим даже при маленьком приложенном напряжении. При этом напряжения U_L и U_C могут существенно (в десятки раз) превышать приложенное напряжение.

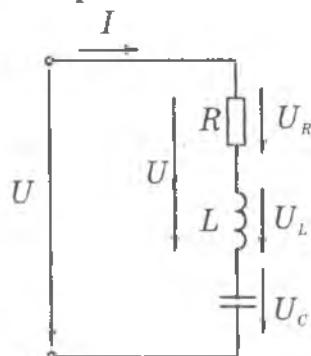


Рис. 20.5. Последовательное соединение R, L и C

При последовательном соединении элементов R, L и C (рис. 20.5) ток в цепи:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (20.4)$$

Резонанс напряжений в такой цепи также возникает при равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений ($X_L = X_C$).

При резонансе напряжения на индуктивном и емкостном элементах в векторной форме $U_L = -U_C$, а по значению $U_L = X_L I = X_C I = U_C$. Следовательно,

$$U_L = X_L I = X_L U/R, U_C = X_C I = X_C U/R. \quad (20.5)$$

Таким образом, напряжения U_L и U_C могут превышать напряжения сети в X_L/R (или X_C/R) раз, если $X_L > R$. Сдвиг по фазе между напряжениями U_L и U_C равен π , т.е. эти напряжения находятся в противофазе. Отношения $X_L/R, X_C/R$ при резонансе одинаковые:

$$X_L/R = X_C/R = \omega_0 L/R = L/(R \cdot \sqrt{LC}) = \sqrt{L}/(R \cdot \sqrt{C}).$$

Эту величину также обозначают Q и называют добротностью контура:

$$Q = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (20.6)$$

Активная мощность цепи при резонансе:

$$P = UI \cos \varphi, \quad (20.7)$$

а реактивная

$$Q = UI \sin \varphi = 0, \quad (20.8)$$

т.к. при резонансе фазовый сдвиг между током и напряжением $\varphi = 0$. Но реактивная мощность индуктивного и емкостного элементов не равны нулю:

$$Q_L = X_L I^2, Q_C = X_C I^2 \quad (20.9)$$

Явление резонанса широко используется в технике: в устройствах радиотехники, телевидения, автоматики и других электронных и электротехнических оборудо-

ниях. Изменяя индуктивность L или емкость C , можно настраивать контур на ту или иную резонансную частоту и усиливать в цепи ток той или иной частоты.

В некоторых случаях необходимо учитывать при резонансе напряжений увеличения напряжения и тока, что может привести к пробое изоляции элементов цепи.

Резонансная частота f_0 определяется исключительно параметрами цепи и поэтому называется частотой собственных колебаний цепи.

Таким образом, в неразветвленной цепи с R , L и C резонанс напряжений возникает в случае, когда частота вынужденных колебаний (частота приложенного напряжения) оказывается равной частоте собственных колебаний цепи.

Резонанс напряжений можно получить путем изменения одной из трех величин L , C или ω при постоянных двух других.

Схема (рис. 20.5) называется последовательным колебательным контуром.

Задачи

1. При частоте $f=50$ Гц сопротивление катушки равно 41 Ом, а при постоянном токе – 9 Ом. При какой частоте наступает резонанс, если последовательно с катушкой включен конденсатор емкостью $C=51$ мкФ?

2. Каковы напряжения U_R , U_L , U_C и U_1 и ток I при резонансе напряжений в цепи на рис. 20.6, если $U=220$ В, $R=22$ Ом, $x_L=200$ Ом?

3. В схеме электрической цепи (рис. 20.6) $R=10$ Ом, $L=10$ мГн, $C=1$ мкФ. Определить резонансную частоту ω_0 , добротность контура Q , а также амплитуду синусоидального напряжения на емкости U_C , если на вход цепи подано синусоидальное напряжение с амплитудой 10 мВ на резонансной частоте.

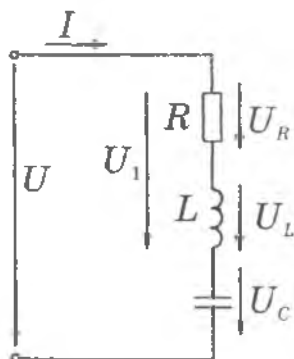


Рис. 20.6

4. Последовательный колебательный контур (R, L, C) подключен к синусоидальной ЭДС с амплитудой $E=1,6$ В и внутренним сопротивлением $r=16$ Ом. При какой величине сопротивления контура R в нем выделится максимальная активная мощность при резонансе напряжений, и чему она будет равна?

5. Если конденсаторы $0,22$ мкФ и $0,47$ мкФ подключены параллельно к катушке индуктивности 10 мГн, чему равна резонансная частота контура?

Вопросы

1. Что понимается под резонансом напряжений?
2. Какие элементы и параметры электрической цепи оказывают влияние на резонанс напряжений?
3. Запишите условие возникновения резонанса напряжений.
4. Где используется явление резонанса напряжений?
5. Почему при резонансе напряжений ток в цепи достигает наибольшего значения?
6. Какая величина называется частотой собственных колебаний цепи?
7. Чему равна добротность контура при резонансе напряжений?

§21. РЕЗОНАНС ТОКОВ

21.1. Принцип действия параллельного контура

Режим цепи при параллельном соединении элементов R , L и C (рис. 21.1), когда индуктивная и емкостная проводимости равны, а токи в ветвях с реактивными элементами I_L и I_C равны по значению и могут превышать полный ток цепи, называется *режимом резонанса токов*.

Состоянию резонанса соответствует резонансная частота, называемая собственной частотой контура:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (21.1)$$

Резонанс токов – процесс, происходящий в параллельном колебательном контуре (схема рисунка 21.1) при его подключении к источнику напряжения, частота которого совпадает с собственной частотой контура.

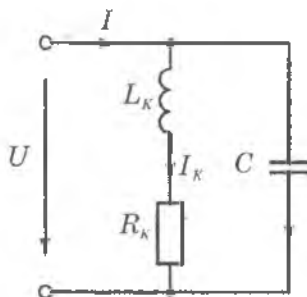


Рис. 21.1.

Колебательный контур – простейшая система, в которой могут происходить свободные электромагнитные колебания.

Пусть конденсатор емкостью C заряжен до напряжения U_0 . Энергия, запасенная в конденсаторе, составляет:

$$E_C = \frac{CU_0^2}{2} \quad (21.2)$$

При соединении конденсатора с катушкой индуктивности в цепи потечет ток I , что вызовет в катушке электродвижущую силу (ЭДС) самоиндукции, направленную на уменьшение тока в цепи. Ток, вызванный этой ЭДС (при отсутствии потерь в индуктивности) в начальный момент будет равен току разряда конденсатора, т.е. результирующий ток будет равен нулю. Магнитная энергия катушки в этот (начальный) момент равна нулю.

Затем результирующий ток в цепи будет возрастать, а энергия из конденсатора будет переходить в катушку до полного разряда конденсатора. В этот момент электрическая энергия конденсатора $EC = 0$. Магнитная же энергия, сосредоточенная в катушке, напротив, максимальна и равна:

$$E_L = \frac{LI_0^2}{2}, \quad (21.3)$$

где L – индуктивность катушки;

I_0 – максимальное значение тока.

После этого начнется перезарядка конденсатора, т.е. заряд конденсатора напряжением другой полярности. Перезарядка будет проходить до тех пор, пока магнитная энергия катушки не перейдет в электрическую энергию конденсатора. Конденсатор, в этом случае, снова будет заряжен до напряжения $-U_0$.

В результате в цепи возникают колебания, длительность которых будет обратно пропорциональна потерям энергии в контуре.

Описанные выше процессы в параллельном колебательном контуре называются резонансом токов, что означает, что через индуктивность и емкость протекают токи больше тока, проходящего через весь контур, при-

чем эти токи больше в определенное число раз, которое называется добротностью. Эти большие токи не покидают пределов контура, т.к. они противофазны и сами себя компенсируют. Стоит также заметить, что сопротивление параллельного колебательного контура на резонансной частоте стремится к бесконечности (в отличие от последовательного колебательного контура, сопротивление которого на резонансной частоте стремится к нулю), а это делает его незаменимым фильтром.

Стоит заметить, что помимо простого колебательного контура, есть ещё колебательные контуры первого, второго и третьего рода, что учитывают потери и имеют другие особенности.

21.2. Параметры процесса резонанса токов

Напряжение, возникающее в катушке при изменении протекающего тока, равно:

$$U_L = -L \frac{di_L}{dt} \quad (21.4)$$

Аналогично для тока, вызванного изменением напряжения на конденсаторе:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad (21.5)$$

Для параллельного контура, в котором индуктивность и емкость включены параллельно:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (21.6)$$

– величина, называемая добротностью контура.

Токи в емкости и индуктивности при резонансе равны между собой $I_{Cp} = I_{Lp} = I_{pQ}$, I_p – общий ток цепи при резонансе.

Средняя мощность при резонансе:

$$P = U^2 g = \frac{I_p^2}{g} \quad (21.7)$$

Реактивная часть мощности отсутствует.

Векторная диаграмма напряжения и токов при резонансе токов показана на рис. 21.2.

Настроить цепь в резонанс с частотой источника питания можно изменением индуктивности или емкости контура, а также с помощью изменения частоты источника питания.

При резонансе токов реактивные процессы ограничиваются лишь контуром из элементов L и C , общий ток цепи совпадает по фазе с напряжением, т.е. является чисто активным. Векторы токов в реактивных элементах равны по величине и противоположны, т.е. компенсируют друг друга.

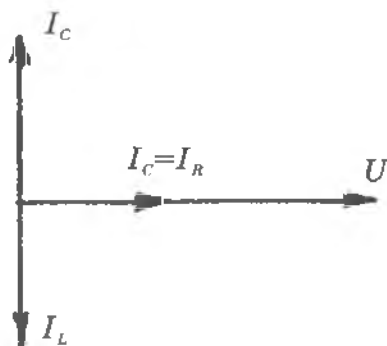


Рис. 21.2.

Пример: Пусть $U=10\text{В}$, $R=1\text{ Ом}$, $b_L=b_C=20\text{ Ом}^{-1}$.

Имеем резонанс токов, при этом общий ток минимален:

$$I=I_{\min}=U/R=10/1=10\text{ А.}$$

Определяем токи в реактивных элементах:

$$I_L=I_C=Ub_L=10\cdot 20=200\text{ А;}$$

Как видно, $I_L \gg I$.

Задачи

1. Идеальная катушка индуктивности ($R_k=0$) L и конденсатор C соединены параллельно и подключены к источнику переменного тока. При некоторой частоте f_0 источника питания в цепи наступил резонанс токов. Чему равен ток в неразветвленной (вне контура) части цепи?

2. Каково полное сопротивление параллельного резонансного контура с $L = 5$ мГн, $C = 0,001$ мкФ и $R = 4$ Ом?

3. Рассчитайте для резонанса тока значения резонансной частоты ω_0 , добротности Q для контура со следующими значениями элементов: $C=0,1$ мкФ; $L=10$ мГн; $R=1$ Ом.

4. Цепь синусоидального тока (рис. 21.3) находится в состоянии резонанса. Ток $I = 6$ А, $R = 3$ Ом, $X_L = 4$ Ом.

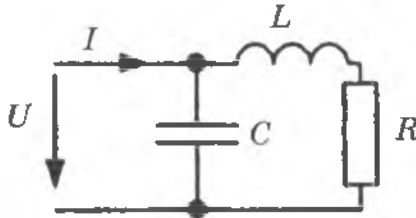


Рис. 21.3.

Найти X_C , напряжение U и токи в ветвях $R-L$ и C .

5. Какая из четырех векторных диаграмм на рис. 21.4, б соответствует цепи, показанной на рис. 21.4, а, при резонансе токов?

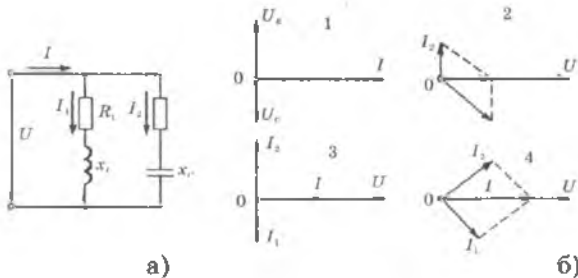


Рис. 21.4.

Вопросы

1. Что понимается под резонансом токов?
2. Какие параметры оказывают влияние на резонанс токов?
3. Запишите условие возникновения резонанса токов.
4. В какой цепи можно получить резонанс токов?
5. Почему при резонансе токов ток в катушке или конденсаторе может быть больше тока в неразветвленной части цепи?
6. Изменяя какую величину можно получить резонанс при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора?
7. Что является основным признаком наличия резонанса в разветвленной цепи параллельного контура?

§22. ОДНОФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

22.1. Процессы, протекающие в трансформаторе

Трансформатор относится к электрическим машинам статического действия (нет подвижных частей). Он представляет собой электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения (например, 220 В) в переменный ток той же частоты другого напряжения (например, 36 В).

Трансформатор состоит из стального сердечника, собранного из тонких листов электротехнической стали, так же как в катушках индуктивности с ферромагнитным сердечником, изолированных друг от друга с целью снижения потерь мощности на гистерезис и вихревые токи. На сердечнике однофазного трансформатора (рис. 22.1) в простейшем случае расположены две обмотки, выполненные из изолированного провода. К первичной обмотке подводится питающее напряжение U_1 . Со вторичной обмотки его снимается напряжение U_2 , которое подводится к потребителю электрической энергии.

Во многих случаях трансформатор имеет не одну, а две или несколько вторичных обмоток, к каждой из которых подключается свой потребитель электроэнергии.

Принцип действия трансформатора основан на законе электромагнитной индукции, который реализуется следующим образом. При протекании переменного тока по первичной катушке в стальном сердечнике возникает переменный магнитный поток Φ (рис. 22.1).

Под действием переменного напряжения U_1 , подведенного к первичной обмотке, в ней возникает ток I_1 , и в сердечнике возбуждается соответственно изменяющийся магнитный поток Φ . Этот поток пересекает витки обеих обмоток трансформатора и индуцирует в них ЭДС:

$$e_1(t) = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad e_2(t) = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (22.1)$$

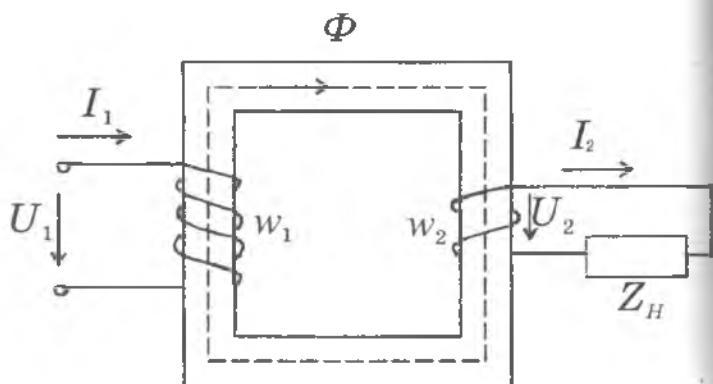


Рис. 22.1. Схема, поясняющая работу трансформатора

В каждый момент времени отношение этих ЭДС пропорционально отношению количества витков обмоток:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2} \quad (22.2)$$

Если цепь вторичной обмотки замкнута, то под действием ЭДС e_2 возникает ток I_2 .

Отношение этих ЭДС:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2} = k_{12} \quad (22.3)$$

принято называть коэффициентом трансформации. Приближенно можно принять, что ЭДС обмоток равны напряжениям на их зажимах, т.е.

$$k_{12} = \frac{e_1}{e_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \quad (22.4)$$

Полученное равенство характеризует основное назначение трансформатора – преобразование одного напряжения в другое, большее или меньшее.

Амплитуда магнитной индукции в сердечнике трансформатора:

$$B_{\max} = \frac{U_1}{4,44 f w_1 S_{CT}}, \quad (22.5)$$

где w_1 – число витков первичной обмотки;

U_1 – ее напряжение;

S_{CT} – площадь сечения магнитопровода (сердечника).

Намагничивающим током трансформатора называют реактивную составляющую тока холостого хода I_{op} , потребляемую из сети для создания магнитного поля.

22.2. Опыт холостого хода трансформатора

Рассмотрим процесс намагничивания однофазного трансформатора для режима холостого хода – испытания трансформатора при разомкнутой вторичной цепи. Намагничивающим током в этом режиме является потребляемый первичной обмоткой ток холостого хода, если пренебречь магнитными потерями в магнитопроводе и электрическими потерями в обмотке. Т.е. потребляемый трансформатором на холостом ходу ток чисто реактивный. Величина этого тока в силу высокой магнитной проницаемости стали магнитопровода невелика, и не превышает 3% номинального тока. При этом падением напряжения на сопротивлении первичной обмотки можно пренебречь. В этом случае приложенное к первичной обмотке напряжение u_1 будет в основном уравновешиваться наведенной в первичной обмотке ЭДС e_1 :

$$u_1 = -e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = U_{1m} \sin \omega t = E_{1m} \sin(\omega t - \pi) \quad (22.6)$$

Выражение (22.6) называют напряжением первичной обмотки идеального трансформатора. В идеальном транс-

форматоре отсутствуют потери активной мощности, т.е. сопротивление обмоток и потери в стали магнитопровода равны нулю, а также отсутствуют потоки рассеяния. Магнитный поток Φ , созданный током первичной обмоткой трансформатора, сцеплен с обеими обмотками и полностью замыкается по магнитопроводу. Согласно (22.6), в идеальном трансформаторе ЭДС должна иметь ту же форму кривой, что и напряжение u_1 , но находиться относительно его в противофазе. Решая (22.6) относительно потока Φ , получим:

$$\Phi = -\frac{E_{1m}}{w_1} \int \sin(\omega t - \pi) \cdot dt = \frac{E_{1m}}{\omega \cdot w_1} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \Phi_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (22.7)$$

$$\Phi_m = \frac{E_{1m}}{\omega \cdot w_1} \quad (22.8)$$

– амплитудное значение магнитного потока.

Из (22.7) с учетом (22.6) следует, что если первичное напряжение трансформатора синусоидально, то и магнитный поток идеального однофазного трансформатора также синусоидален. При этом поток Φ отстает от напряжения сети u_1 на угол $\pi/2$ и опережает наведенную им ЭДС e_1 на угол $\pi/2$.

Согласно (22.8), амплитудные значения ЭДС первичной и вторичной обмоток:

$$E_{1m} = \omega w_1 \cdot \Phi_m = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot \Phi_m \quad (22.9.1)$$

$$E_{2m} = \omega w_2 \cdot \Phi_m = 2 \cdot \omega \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot \Phi_m \quad (22.9.2)$$

Действующие значения ЭДС обмоток трансформатора:

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot \Phi_m, \quad (22.10.1)$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot \Phi_m. \quad (22.10.2)$$

Таким образом, синусоидальный магнитный поток наводит в обмотках идеального трансформатора синусо-

идельные ЭДС, что позволяет записать для значений напряжения и ЭДС:

$$U_1 = E_1 \quad (22.11)$$

Полученное уравнение позволяет оценить многие явления, возникающие в рабочем процессе трансформатора. В соответствии с (22.10.1) и (22.11) амплитудное значение потока в магнитопроводе трансформатора:

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot w_1} = \frac{U_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot w_1} \quad (22.12)$$

По закону полного тока можно найти максимальный ток обмотки трансформатора:

$$I_{0\max} = \frac{H l_{CT}}{w_1}, \quad (22.13)$$

где l_{CT} – длина сердечника трансформатора. А намагничивающий ток трансформатора

$$I_0 = I_{0\max} / \sqrt{2} \quad (22.14)$$

Напряженности магнитного поля H формулы (22.13) определяют по кривой намагничивания стали сердечника – это зависимость магнитной индукции B от H . При расчетах амплитуду магнитной индукции B_{\max} находят по формуле (22.5).

22.3. Коэффициент полезного действия трансформатора

Цепи высшего и низшего напряжения трансформатора электрически изолированы друг от друга и связаны лишь магнитным потоком, замыкающимся в сердечнике трансформатора. Преобразование электрической энергии в трансформаторе сопровождается весьма малыми потерями энергии: величина КПД при номинальной нагрузке изменяется в пределах 0,96-0,996 в зависимости от мощности трансформатора. Этим объясняется ис-

ключительно большое распространение трансформаторов в современной технике.

Коэффициент полезного действия трансформатора можно определить в соответствии с формулой:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + P_M}, \quad (22.15)$$

где P_1, P_2 — мощность первичной и вторичной обмоток;

$\beta = I_2 / I_{2\text{НОМ}}$ — коэффициент загрузки трансформатора;

P_0 — потери в стальном сердечнике трансформатора, определяемые опытом холостого хода трансформатора;

P_M — потери в обмотках трансформатора, определяемые опытом короткого замыкания трансформатора при номинальном токе.

Коэффициент полезного действия современных трансформаторов, особенно повышенной мощности, весьма высок, и процентная разница величин P_2 и P_1 сравнима с погрешностью измерительных приборов, используемых для измерения мощностей P_2, P_1 и мощностей потерь. Поэтому определение КПД трансформатора рекомендуется проводить расчетным путем, пользуясь паспортными данными трансформатора.

22.4. Опыт короткого замыкания

В опыте короткого замыкания вторичная цепь замкнута накоротко (рис. 22.2). Напряжение U_1 плавно повышается от нуля до величины, при которой ток I_1 достигает значения $1,2I_{1\text{НОМ}}$. На основе данных $I_1, P_K, U_1=U_K$, полученных при $I_1=I_{1\text{НОМ}}$, определяются остальные параметры схемы замещения:

$$R_K = \frac{P_{K\text{НОМ}}}{I_{1\text{НОМ}}^2}, \quad Z_K = \frac{U_K}{I_{1\text{НОМ}}}, \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} \quad (22.16)$$

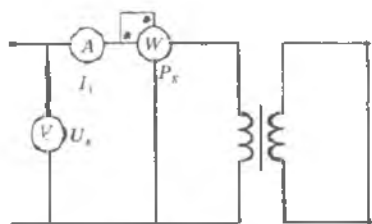


Рис. 22.2.

Данный опыт позволяет также определить паспортные величины РКНОМ (номинальную мощность короткого замыкания) и, так называемое, напряжение короткого замыкания:

$$U_K \% = \frac{U_K}{U_{НОМ}} \cdot 100\% = \frac{I_{НОМ} \cdot Z_K}{U_{НОМ}} \cdot 100\%$$

Величина $U_K \%$ позволяет определить ток короткого замыкания в условиях нормальной эксплуатации (т.е. при $U_1 = U_{НОМ}$).

В этих условиях короткое замыкание является аварийным режимом, токи I_1 и I_2 резко возрастают.

Однако при переходном процессе амплитуда тока $I_{ИК}$ может быть значительно выше амплитуды при установившемся значении, эту величину называют ударным током:

$$I_{удл} = (1,5-2,5) I_{ИК} \quad (22.17)$$

Такой ток не только вызывает быстрый разогрев обмоток, но и приводит к сильным механическим взаимодействиям между витками.

Задачи

1. Каково действующее значение ЭДС E , если $f=100$ Гц $w=100$ витков и $\Phi_{max} = 0,01$ Вб в обмотке?
2. Какова амплитуда магнитной индукции B_{max} в магнитопроводе трансформатора, если число витков его пер-

вичной обмотки $w_1 = 800$, напряжение $U_1 = 400$ В, площадь сечения магнитопровода $S_{ст} = 18$ см², $f = 50$ Гц?

3. Схема какого трансформатора показана на рис. 22.3?

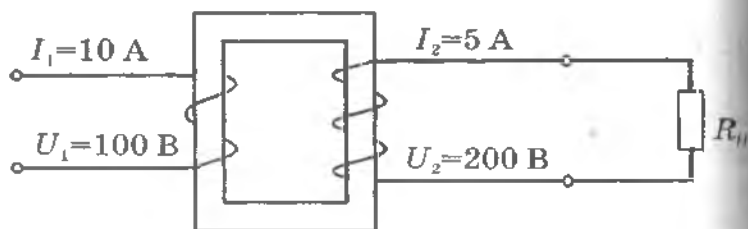


Рис. 22.3.

4. Каково амплитудное значение магнитного потока, если $\Phi = 0,01 \cos \omega t$?

5. Каким будет намагничивающий ток трансформатора (рис. 22.4, а), если $w_1 = 250$ витков, $l_{ст} = 25$ см, $S_{ст} = 18$ см², $U_1 = 120$ В, $f = 50$ Гц? Кривая намагничивания стали сердечника показана на рис. 22.4, б.

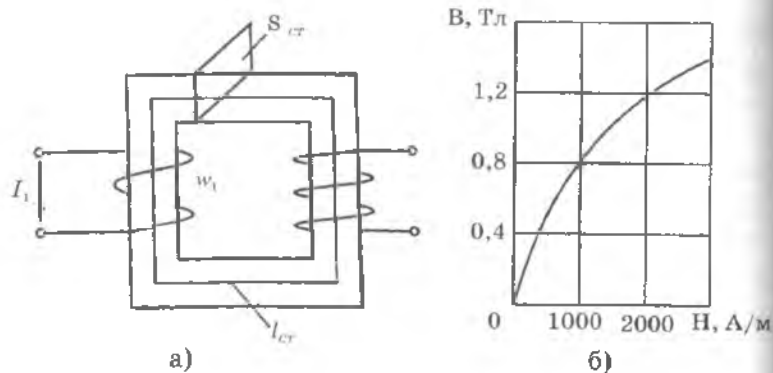


Рис. 22.4.

Вопросы

1. Какой закон лежит в основе принципа действия трансформатора?
2. Какое уравнение выражает зависимость действующего значения ЭДС E в обмотке от магнитного потока Φ в магнитопроводе?
3. Как проводится опыт холостого хода трансформатора?
4. Из каких основных частей состоит трансформатор?
5. Из какого материала изготавливается сердечник трансформатора?
6. Что такое коэффициент трансформации, и как он определяется?
7. Что такое повышающий (понижающий) трансформатор?

§23. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

23.1. Основные процессы, протекающие в машинах постоянного тока

В автоматизированных электроприводах, обеспечивающих управление скоростью и положением различных объектов управления, широко используются машины постоянного тока, в основном, в режиме двигателя.

Для выработки сигналов обратной связи в замкнутых системах автоматического управления используются тахогенераторы постоянного тока.

Машины постоянного тока бывают униполярные, коллекторные, т.е. имеющие скользящий контакт коллектор-щетками, и бесконтактные. Основная масса машин постоянного тока – коллекторные.

Для работы машины постоянного тока необходимо наличие двух обмоток: обмотки возбуждения (индуктор) и обмотки якоря. Первая, как известно, служит для создания в машине основного магнитного потока, а во второй происходит преобразование энергии: электрической энергии в механическую или наоборот.

Обмотка якоря является замкнутой системой проводников, уложенных в пазах. Элементом якорной обмотки является секция, которая может быть одно- или многовитковой. Секция состоит из активных сторон и лобовых частей.

В реальной машине, будь она генератором или двигателем, в наведении или использовании ЭДС участвуют все проводники обмотки якоря. Величина суммарной ЭДС:

$$E = C_p \cdot n \cdot \Phi \quad (23.1)$$

где n – частота вращения якоря (ротора), единица измерения – мин⁻¹;

Φ – магнитный поток полюсов;

C_e – постоянный коэффициент, зависящий от количества витков в секции обмотки.

Независимо от того, работает ли машина как генератор или как двигатель, в витках ее якоря, вращающихся в магнитном поле индуктора, возникает индуцированная ЭДС e , направленная, согласно правилу Ленца, противоположно напряжению внешней сети $U_{\text{ВНЕШ}}$, к которой машина присоединена. Таким образом, в цепи якоря фактически действует напряжение, равное разности $U_{\text{ВНЕШ}} - e$, и по закону Ома ток в якоря:

$$I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{ВНЕШ}} - e}{R_{\text{я}}}, \quad (23.2)$$

где $R_{\text{я}}$ – активное сопротивление якоря.

Если $U_{\text{ВНЕШ}} > e$, то энергия берется из сети, т.е. машина работает как двигатель, если же $U_{\text{ВНЕШ}} < e$, то машина отдает энергию в сеть, т.е. работает как генератор. Индуцированная ЭДС e тем больше, чем больше частота вращения якоря. Пока нагрузка двигателя мала, ротор его вращается быстро, индуцированная ЭДС e велика и почти равна $U_{\text{ВНЕШ}}$, и ток в якоря очень слаб. При увеличении механической нагрузки двигателя частота вращения ротора убывает, индуцированная ЭДС e уменьшается и ток $I_{\text{я}}$ в якоря возрастает.

Машина постоянного тока состоит из двух частей: неподвижной и подвижной, статора и якоря, соответственно (рис. 23.1).

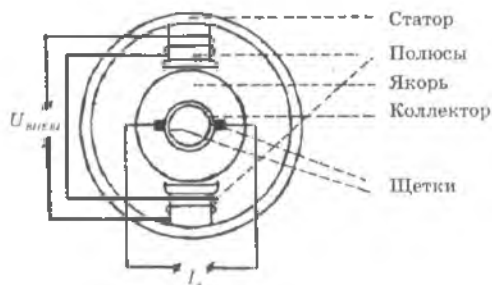


Рис. 23.1. Устройство машины постоянного тока

Статор – неподвижная часть машины – представляет собой цилиндрическую станину, к внутренней поверхности которой крепятся 2, 4 или более полюсов, состоящих из сердечника, полюсных наконечников и обмотки возбуждения.

Подвижная часть – якорь – выполнена в виде цилиндрического пакета, состоящего из большого числа тонких пластин. В продольных пазах якоря размещена обмотка, состоящая из нескольких секций. На валу якоря располагается коллектор, представляющий собой цилиндр из диэлектрика, на котором расположены пластины коллектора, соединенные с секциями обмотки якоря. С внешней электрической схемой коллектор соединяется с помощью графитовых щеток, скользящих по поверхности коллекторных пластин. Щетки установлены так, что переключение секций обмотки якоря (коммутация) происходит в тот момент, когда секция обмотки находится в нейтральной зоне между полюсами.

Основным классификационным признаком машин постоянного тока является способ возбуждения главного магнитного поля, создаваемого током, протекающим через обмотку возбуждения. Все рабочие характеристики машин постоянного тока зависят от способа включения обмотки возбуждения по отношению к цепи якоря. Это включение может быть последовательным, параллельным, комбинированным, также эти цепи могут быть независимы друг от друга.

23.2. Способы возбуждения машин постоянного тока

Возбуждение – это понятие, связанное с созданием основного магнитного поля машины. В машинах с электромагнитным возбуждением основное поле создается обмотками возбуждения. Имеются конструкции, в которых возбуждение создается постоянными магнитами, размещенными на статоре.

Различают четыре схемы включения статорных обмоток: с независимым, параллельным, последовательным и смешанным возбуждением (рис. 23.2).

Изображения под пунктами б, в, г на рис. 23.2 называются схемами с самовозбуждением. Процесс самовозбуждения происходит за счет остаточной намагниченности полюсов и станины. При вращении якоря в этом, небольшом по величине, магнитном поле ($\Phi_{ост} = 0,02-0,03 \Phi_0$) индуцируется ЭДС — $E_{ост}$.

По способу включения обмоток возбуждения различают следующие типы машин:

— с независимым возбуждением, когда обмотка питается от независимого источника постоянного тока (рис. 23.2, а);

— с параллельным возбуждением (шунтовая машина) (рис. 23.2, б);

— с последовательным возбуждением (серийная машина) (рис. 23.2, в);

— со смешанным возбуждением (компаундная машина) (рис. 23.2, г).

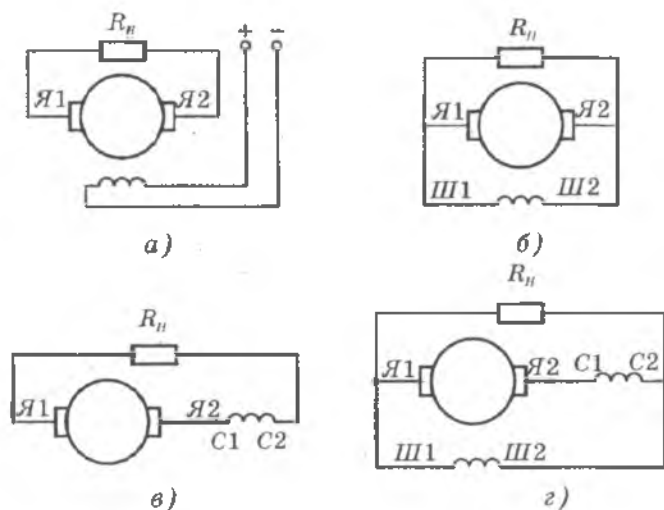


Рис. 23.2.

Схемы включения обмоток статора машины постоянного тока

Три последние типа машин не требуют для питания обмоток возбуждения отдельного источника, поскольку

напряжение подается на эти обмотки непосредственно от обмотки якоря. Такие машины получили название машин с самовозбуждением.

Поскольку обмотка возбуждения подключена через щетки к якорю, то в ней будет протекать ток. Этот ток усилит магнитное поле полюсов и приведет к увеличению ЭДС якоря. Большая ЭДС вновь увеличит ток возбуждения и произойдет нарастание магнитного потока до полного намагничивания машины.

Машины постоянного тока обратимы, и их устройство одинаково как для двигателя, так и для генератора.

В каждом электрическом генераторе или двигателе происходят некоторые бесполезные потери энергии. Они складываются из потерь на нагревание проводов проходящими по ним токами (потери в меди), потерь на вихревые токи и на нагревание стали сердечников при их перемагничивании (потери в стали) и потерь на трение. Поэтому, когда машина работает как генератор, то она отдает в сеть несколько меньшую электрическую мощность $P_{эл}$, чем та механическая мощность $P_{мех}$, которая затрачивается на ее вращение. Коэффициентом полезного действия (КПД) генератора называется отношение отдаваемой электрической мощности к затрачиваемой механической мощности:

$$\eta_{ГЕН} = \frac{P_{ЭЛ}}{P_{МЕХ}} \quad (23.3)$$

Точно так же, когда машина работает как двигатель, она отдает несколько меньшую механическую мощность, чем поглощаемая ею из сети электрическая мощность. КПД двигателя называют отношением отдаваемой механической мощности к затрачиваемой электрической мощности:

$$\eta_{ДВИГ} = \frac{P_{МЕХ}}{P_{ЭЛ}} \quad (23.4)$$

Потери энергии в генераторах и двигателях сравнительно малы, и их КПД близок к единице (к 100%).

§24. ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА

24.1. Генератор синусоидального тока

На рис. 24.1, а показан виток провода $abcd$, вращающийся по часовой стрелке вокруг оси OO' в магнитном поле между северным (N) и южным (S) полюсами магнита. Направление мгновенной наведенной ЭДС показано стрелками ab и cd ; величина и знак ЭДС для положений 1, 2, 3 и 4 приведены на графике (рис. 24.1, б). Когда плоскость витка перпендикулярна полю (положения 1 и 3), ЭДС равна нулю; когда же плоскость витка параллельна полю (положения 2 и 4), ЭДС максимальна. Кроме того, направление ЭДС в боковых частях витка (скажем, ab), когда они проходят мимо северного полюса, противоположно ее направлению при прохождении мимо южного полюса. Поэтому ЭДС меняет знак через каждую половину оборота в точках 1 и 3, так что в витке генерируется переменная ЭДС и, стало быть, течет переменный ток.

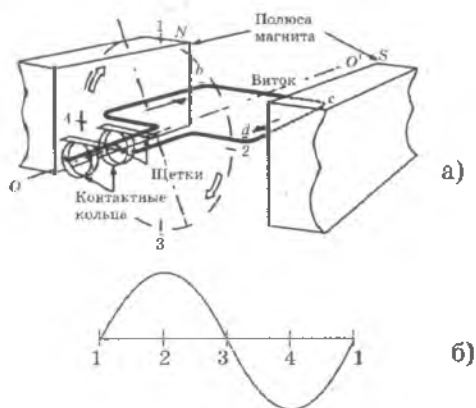


Рис. 24.1. ЭДС генератора синусоидального тока

Если предусмотреть в конструкции токособирающие (контактные) кольца, то переменный ток пойдет во внешнюю цепь.

Если магнитное поле однородное и скорость вращения рамки постоянная, то этот ток имеет синусоидальный вид (рис. 24.1, б).

24.2. Генератор постоянного тока

Генератор постоянного тока должен давать ток, который всегда течет в одном направлении. Для этого нужно переключать контакты внешней цепи в тот момент, когда ЭДС падает до нуля, прежде чем она начнет нарастать в другом направлении. Это делается с помощью коллектора, схематически изображенного на рис. 24.2, а. В показанном простейшем случае он представляет собой кольцо, разрезанное на две части по диаметру. Один конец витка присоединен к одному из полуколец, другой — к другому.

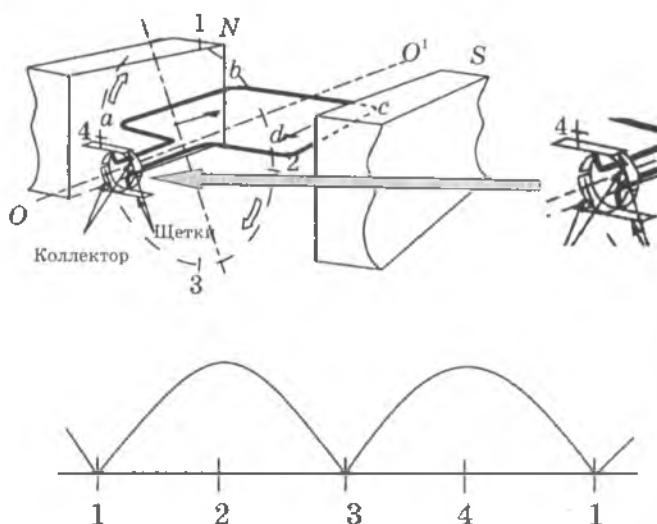


Рис. 24.2. Генератор постоянного тока

Щетки расположены так, что они перекрывают зазоры между полукольцами, когда плоскость витка перпендикулярна магнитному полю (в положениях 1 и 3) и ЭДС равна нулю. Как явствует из рисунка, каждый раз, когда ЭДС меняет знак, переключаются концы внешней цепи, так что ток в ней течет всегда в одном направлении (рис. 24.2, б). Если к витку, показанному на рис. 24.2, а, добавить еще один, перпендикулярный ему, то его ЭДС будет соответствовать кривой bb , сдвинутой относительно первоначальной на 90° (рис. 24.3). Полная ЭДС будет соответствовать сумме двух кривых, т.е. значительно более гладкой кривой e . На практике используется большое число витков и коллекторы, так что пульсации ЭДС незаметны.

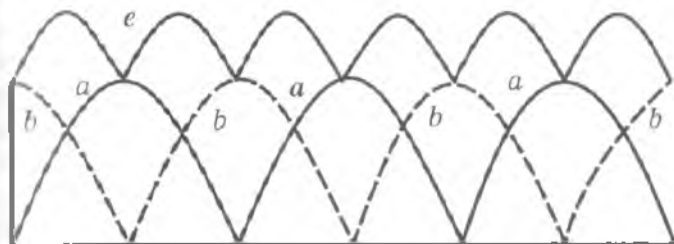


Рис. 24.3. Два вращающихся витка дают кривую тока e , равную сумме тока aaa , даваемого одним витком, и тока bbb , даваемого другим витком, перпендикулярным первому

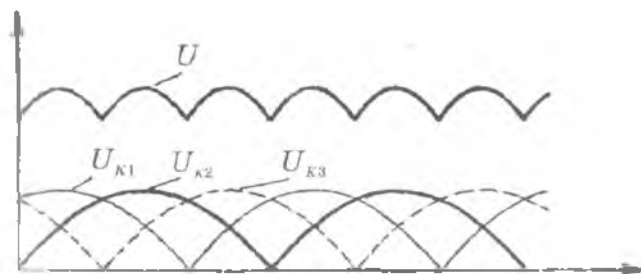


Рис. 24.4.

На рис. 24.4 в качестве примера показаны временные диаграммы выходного напряжения каждого из витков и обмотки в целом U при числе катушек в ветви, равном 3.

24.3. Механические и электрические мощности

Вращая генератор постоянного тока какой-нибудь внешней силой, мы затрачиваем определенную механическую мощность $P_{\text{мех}}$, а в сети получаем соответствующую электрическую мощность $P_{\text{эл}}$.

Когда машина работает как генератор, эти силы по правилу Ленца направлены так, чтобы создаваемый ими вращающий момент тормозил процесс, вызывающий появление индуцированной ЭДС, т.е. был противоположен тому моменту, который приводит генератор во вращение. Таким образом, в этом случае приводящие генератор во вращение внешние силы должны преодолеть, уравновесить те силы, которые действуют на якорь в магнитном поле. Понятно, что эти силы тем больше, чем больше ток в якоре, т.е. чем больше электрическая мощность, потребляемая в сети, которую питает генератор. Поэтому по мере возрастания электрической нагрузки генератора, т.е. отдаваемой им электрической мощности $P_{\text{эл}}$, возрастает и механическая мощность $P_{\text{мех}}$, которую нужно затратить, чтобы поддержать его вращение с прежней частотой. В этом легко убедиться, если попробовать вращать ротор генератора от руки. При работе генератора вхолостую (без нагрузки) или при очень малой нагрузке нам приходится делать лишь очень небольшое усилие, чтобы вращать его. Но если мы подключим к генератору лампочку накаливания мощностью, скажем, 100 Вт и попробуем вращать ротор генератора так, чтобы эта лампочка горела нормальным накалом, то убедимся, что это очень трудно. Приходится затрачивать большое усилие, чтобы преодолевать силы, действующие в магнитном поле индуктора на активные проводники якоря, через которые теперь проходит ток около 1 А. Таким образом,

по мере возрастания нагрузки генератора, т.е. отдаваемой им электрической мощности $P_{эл}$, возрастает и поглощаемая им механическая мощность $P_{мех}$, необходимая для поддержания прежней частоты вращения ротора и прежнего напряжения в сети.

24.4. Устройство генератора постоянного тока

Генератор постоянного тока (ГПТ) представляет собой электрическую машину, предназначенную для преобразования механической энергии в энергию постоянного тока.

Принцип действия ГПТ основывается на законе электромагнитной индукции, суть которого следующая: при движении проводника в магнитном поле в проводнике индуцируется ЭДС, прямо пропорциональная величине магнитной индукции B , длине проводника l и скорости движения v :

$$e = l \cdot v \cdot B. \quad (24.1)$$

ГПТ состоит из следующих основных частей (рис. 24.5):

- станина (корпус), к которой крепятся сердечники полюсов N , S (и дополнительных полюсов $N_{доп}$, $S_{доп}$) и подшипниковые щиты;
- система возбуждения (1), состоящая из обмотки возбуждения, намотанной на полюсные сердечники. Система также называется статором;
- якорь (2), состоящий из обмотки, намотанной на сердечник. Сердечник закреплён на валу;
- коллектор (3), состоящий из медных пластин, изолированных друг от друга и собранных в виде цилиндра. Коллектор находится на валу якоря и вращается вместе с ним;
- щётки, закреплённые на специальной траверзе;
- подшипниковые щиты.

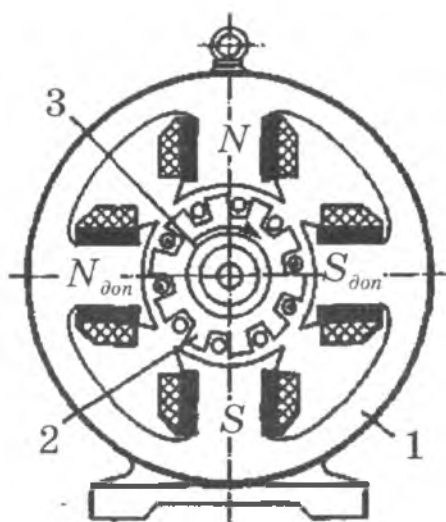


Рис. 24.5. Устройство генератора постоянного тока

На рис. 24.6 изображена принципиальная схема ГПТ с параллельным возбуждением.

При вращении проводников обмотки якоря (ОЯ) в магнитном поле, создаваемой обмоткой возбуждения (ОВ), в обмотке якоря индуцируется ЭДС, и на зажимах обмотки якоря создаётся напряжение U . Под действием этого напряжения по сопротивлению нагрузки $R_{нг}$ протекает ток нагрузки $I_{нагр}$, по якорю – ток якоря $I_{я}$, а по цепи возбуждения протекает ток возбуждения $I_{в}$. Ток возбуждения может регулироваться изменением сопротивления цепи возбуждения с помощью регулировочного резистора R_p . Ток возбуждения обычно значительно меньше тока якоря, т.к. мощность нагрузки значительно больше мощности цепи возбуждения. Поэтому можно допустить, что $I_{я} \approx I_{нагр}$ и измерять ток якоря амперметром в цепи нагрузки.

Начальное возбуждение ГПТ параллельного возбуждения осуществляется благодаря наличию остаточного

магнитного потока в сердечниках полюсов.

Режим работы ГПТ характеризуется следующими основными величинами: напряжением на зажимах якоря U , частотой вращения якоря n , током якоря I_a и током возбуждения I_p . Зависимости между двумя из указанных выше величин при постоянстве остальных называются характеристиками генератора.

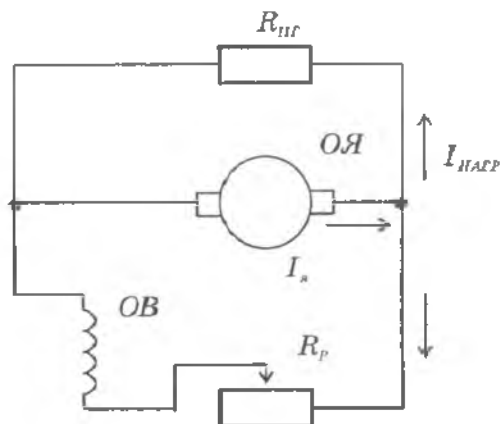


Рис. 24.6. Принципиальная схема ГПТ

24.5. Способы включения обмоток возбуждения генератора

По способу включения обмоток возбуждения различают следующие типы генератора:

– с независимым возбуждением, когда обмотка питается от независимого источника постоянного тока (схема приведена на рис. 23.2, а).

Остальные три типа генератора:

– с параллельным возбуждением (шунтовая машина) (рис. 23.2, б);

– с последовательным возбуждением (сериесная машина) (рис. 23.2, в);

– со смешанным возбуждением (компаундная машина) (рис. 23.2, г) относятся к классам генераторов постоянного тока с самовозбуждением.

Суть самовозбуждения состоит в том, что магнитная система машины, будучи однажды намагниченной, сохраняет остаточную магнитную индукцию. При вращении якоря остаточная индукция наводит в его обмотке ЭДС, которая и создает первоначальный ток в обмотке возбуждения, связанной электрически с обмоткой якоря. Этот ток усиливает магнитное поле возбуждения и тем самым увеличивает ЭДС в обмотке якоря. Увеличение ЭДС вызывает дальнейшее увеличение тока возбуждения, что усиливает магнитный поток полюсов и в свою очередь ведет к увеличению ЭДС якоря и т.д. Процесс этот продолжается до тех пор, пока падение напряжения на обмотке возбуждения $I_B R_B$ (прямая 1 на рис. 24.8, а) не уравновесит напряжение на обмотке якоря $U_A = U_H$. Этому равновесию соответствует точка *P* на характеристике холостого хода (кривая 2).

Наиболее широкое применение в качестве генератора постоянного тока нашла машина с параллельным возбуждением. Она самая экономичная из машин постоянного тока, т.к. ее обмотка возбуждения имеет большое число витков, намотанных тонким проводом, и ток возбуждения не превышает 5% от тока якоря.

24.6. Параметры генератора постоянного тока

При рассмотрении ГПТ используются следующие основные параметры: Φ – магнитный поток, Вб; n – частота вращения якоря, об/мин.; I_A – ток обмотки якоря, А; E – ЭДС якоря генератора.

Напряжение на зажимах генератора:

$$U_r = E - I_A R_A, \quad (24.2)$$

где R_A – сопротивление цепи якоря, Ом.

Полезная мощность, отдаваемая генератором:

$$P_2 = UI, \quad (24.3)$$

где U – напряжение на зажимах, В;

I – ток внешней цепи, А.

Ток якоря генератора $I_{\text{я}} = I + I_B$ (24.4) – для схемы (рис. 23.2, в), где I_B – ток в обмотке возбуждения генератора, А.

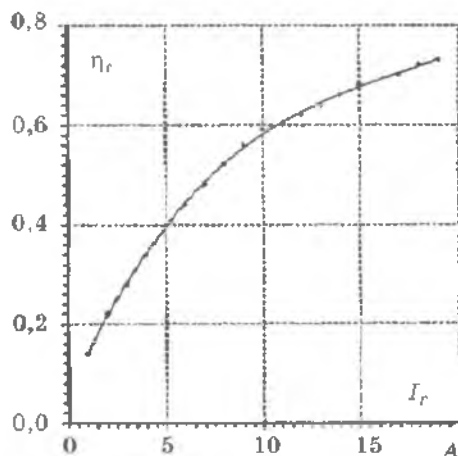


Рис. 24.7.

Зависимость КПД генератора средней мощности от тока якоря показана на рис. 24.7 (η_g – КПД, I_g – ток якоря генератора):

U_H, I_H, n_H – номинальное напряжение, ток, частота вращения ГПТ, указываемые в техническом паспорте генератора.

24.7. Характеристики ГПТ с независимым возбуждением

Нагрузочная характеристика

Нагрузочная характеристика представляет собой за-

зависимость напряжения генератора с независимым возбуждением U от тока возбуждения I_B при неизменных значениях тока нагрузки $I_{НАГР} = const$ и частоты вращения $n = n_H = const$

$$U = f(I_B) \text{ при } I_{НАГР} = const, n = const.$$

Снимается нагрузочная характеристика следующим образом. Установив наибольший ток возбуждения, нагружают генератор номинальным током и делают замеры соответствующих величин. После этого ток возбуждения несколько снижают и, уменьшая сопротивление нагрузочного реостата R_H , увеличивают ток генератора до прежнего значения.

Внешняя характеристика

Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения представляет собой зависимость напряжения на его зажимах от тока нагрузки генератора при постоянной частоте вращения и неизменном токе возбуждения:

$$U = f(I_{НАГР}) \text{ при } I_B = const \text{ и } n = n_H = const$$

Внешняя характеристика снимается при увеличении тока нагрузки $I_{НАГР}$ от нуля до $I_{НАГР} = 1,2 I_H$ (I_H — номинальный ток).

Первой точкой характеристики при холостом ходе является напряжение генератора, равное номинальному. Уменьшая сопротивление R_H , увеличиваем ток нагрузки до значения $I_{НАГР} = 1,2 I_H$.

Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика генератора с независимым возбуждением представляет собой зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при неизменном напряжении на зажимах якоря и постоянной частоте вращения:

$$I_B = f(I_{НАГР}) \text{ при } U = U_H \text{ и } n = n_H = const$$

Регулировочные характеристики снимаются при увеличении нагрузки. Снимают ее следующим образом: при холостом ходе устанавливают номинальное напряжение, изменяя ток возбуждения реостатом R_B , а затем генератор постепенно нагружают (уменьшая сопротивление нагрузки R_H) до номинального тока.

О магнитных свойствах электрического генератора судят по характеристике холостого хода $E_0 = f(I_B)$. Она представляет собой зависимость ЭДС E_0 от тока возбуждения I_B .

Характеристику холостого хода можно рассматривать приближенно и как магнитную характеристику машины $\Phi_0(I_B)$. Увеличение тока возбуждения ведет к увеличению магнитного потока, а следовательно, и ЭДС. Причем в начальной части, пока магнитная цепь машины не насыщена, характеристика $E_0 = f(I_B)$ близка к прямой линии (кривая 3 на рис. 24.8, б). Намагничивающая сила обмотки возбуждения полностью расходуется в воздушном зазоре, т.к. магнитная индукция в ферромагнитном материале невелика. По мере роста тока возбуждения магнитная индукция на ферромагнитных участках растет, что ведет к насыщению этих участков. При этом линейный характер зависимости $E_0 = f(I_B)$ нарушается (кривая 4 на рис. 24.8, б).

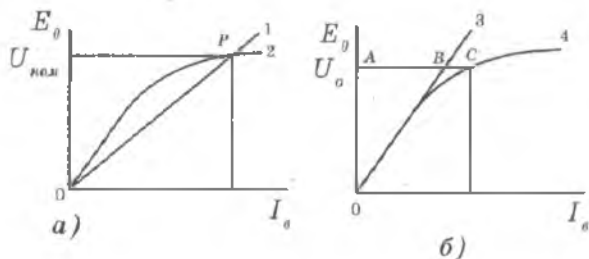


Рис. 24.8. Характеристики холостого хода генератора постоянного тока: а – кривые изменения напряжения на обмотке возбуждения (линия 1) и на обмотке якоря (2); б – кривые изменения ЭДС при ненасыщенной (3) и насыщенной (4) магнитной системе генератора

Задачи

1. Каковы ток якоря $I_{\text{я}}$ и напряжение U генератора с независимым возбуждением, характеристика холостого хода которого изображена на рис. 24.9, при токах возбуждения $I_{\text{в}}$, равных 0,4 и 0,2 А, если сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}}=0,6$ Ом, а нагрузки $R_{\text{н}} = 9,4$ Ом.

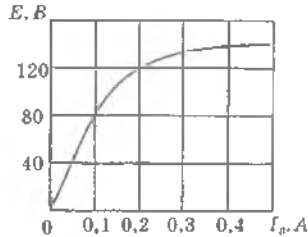


Рис.24.9

2. Каково напряжение на зажимах генератора с независимым возбуждением при токе нагрузки 100 А, если его ЭДС равна 240 В, а сопротивление обмотки якоря 0,1 Ом?

3. Каковы ток возбуждения $I_{\text{в}}$, сопротивление якоря генератора $R_{\text{я}}$ и сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$ при работе генератора (рис. 24.10, а) на внешних характеристиках 1 и 2 (рис. 24.10, б), если в обоих случаях ток нагрузки $I = 20$ А? При этом допустить, что скорость генератора не зависит от нагрузки. Характеристика холостого хода генератора приведена на рис. 24.10, в.

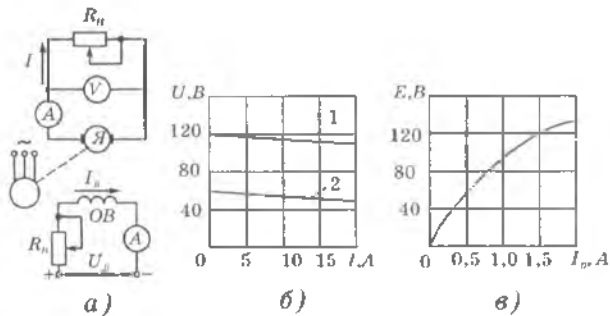


Рис. 24.10

4. Какова полезная мощность генератора смешанного возбуждения с нагрузочным током $I=60$ А, если напряжение на его зажимах $U=230$ В?

5. При увеличении частоты вращения генератора постоянного тока в 1,5 раза ЭДС возросла на 110 В. Вычислить первоначальную ЭДС при неизменном магнитном потоке.

Вопросы

1. Из какого выражения можно определить ЭДС генератора постоянного тока?

2. Что такое «регулировочная характеристика» генератора постоянного тока?

3. Как определяется КПД генератора постоянного тока?

4. Объясните принцип действия и устройство генератора постоянного тока.

5. В чем заключается суть самовозбуждения генератора постоянного тока?

6. Как изменяется напряжение генератора при увеличении тока нагрузки?

7. В чём принципиальная разница между схемами независимого, параллельного и смешанного возбуждения генератора постоянного тока?

8. Как изготовлен коллектор генератора постоянного тока?

9. Какую функцию выполняет щетка ГПТ?

§25. ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

25.1. Принцип действия коллекторного двигателя постоянного тока

Принцип действия коллекторного двигателя постоянного тока наиболее наглядно можно показать на примере модели, состоящей из одного витка обмотки якоря с коллекторными пластинами, помещенного в поле постоянного магнита.

В двигателе (рис. 25.1) к щеткам подводится напряжение U от источника постоянного тока, по катушке протекает ток и употребляется электрическая энергия от источника.

В основу работы электрического двигателя положены законы электромагнитной индукции и электромагнитных сил. В соответствии с законом Ампера на проводник с током I , помещенный в магнитное поле B , действует сила, имеющая следующую форму:

$$F = IlB \sin \alpha, \quad (25.1)$$

где α – угол между проводником и направлением магнитных силовых линий поля B ;

l – длина проводника.

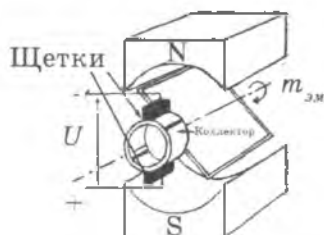


Рис. 25.1. Принцип действия двигателя постоянного тока

Сила создает вращающий момент, и виток начинает поворачиваться. При переходе проводников из зоны одного полюса в зону другого полюса коллектор со щетками изменяет направление тока в витке (линия i на рис. 25.2, а). Одновременное изменение знака индукции (линия B на рис. 25.2, а) и направления тока обеспечивает неизменность направления вращающего момента (линия $m_{эм}$ на рис. 25.2, а) в пределах оборота. На валу якоря появляется механическая энергия, которая может быть передана внешнему устройству. При изменении полярности U , двигатель вращается в другую сторону.

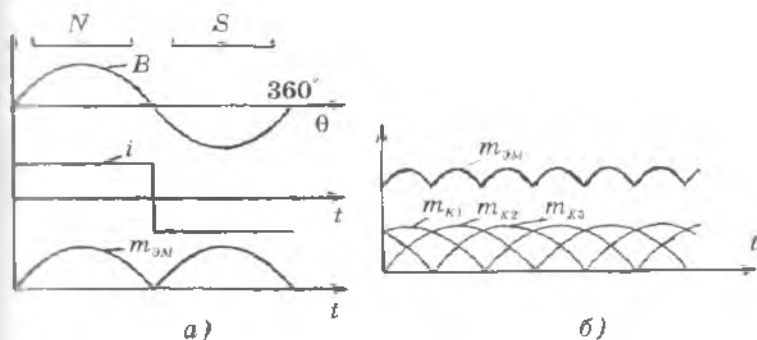


Рис. 25.2.

Значение электромагнитного момента, создаваемого одной катушкой, пульсирует в пределах оборота. В реальной машине моменты отдельных катушек суммируются, и результирующий момент практически не зависит от углового положения ротора; чем больше катушек якоря, тем меньше пульсация момента. На рис. 25.2, б в качестве примера показаны временные диаграммы момента каждой из катушек m_k и обмотки в целом $m_{эм}$ при числе катушек в ветви, равном 3.

Даже при наличии двух взаимно перпендикулярных ринков и четырех коллекторных пластин выходной электромагнитный момент оказывается практически постоянным (рис. 25.2, а, кривая $m_{эм}$).

При вращении витка на магнитном поле на концах витка появляется ЭДС E , которая влияет на остальные параметры двигателя постоянного тока (ДПТ).

Потребляя электрическую энергию из сети, ДПТ развивает вращающий момент, поэтому при увеличении механической нагрузки на валу двигателя вращающий момент оказывается меньше тормозного. Двигатель уменьшает скорость вращения, а это приводит к уменьшению ЭДС самоиндукции и увеличению потребляемого тока. При неизменном магнитном потоке ток нагрузки увеличивается до тех пор, пока не восстановится равенство вращающего и тормозного моментов.

25.2. Устройство двигателя постоянного тока

Двигатель, показанный на рис. 25.4, состоит из одного электромагнита на статоре (двухполюсного статора) с явно выраженными полюсами и с одной обмоткой, трехполюсного ротора с явно выраженными полюсами и с тремя обмотками (обмотки ротора могут быть включены звездой или треугольником), щеточноколлекторного узла с тремя пластинами (ламелями) и с двумя щетками.



Рис. 25.3. Устройство простейшего коллекторного двигателя постоянного тока с двухполюсным статором и с двухполюсным ротором

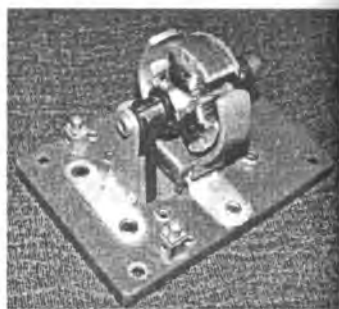


Рис. 25.4. Коллекторный двигатель постоянного тока с двухполюсным статором и с трехполюсным ротором

Статор (индуктор). На статоре ДПТ располагаются, в зависимости от конструкции, или постоянные магниты, или электромагниты (полюсы *N* и *S* на рис. 25.3) с обмотками возбуждения – катушки, наводящие магнитный поток возбуждения. В простейшем случае, статор имеет два полюса, т.е. один магнит с одной парой полюсов. Но чаще ДПТ имеют две пары полюсов.

Ротор (якорь). Ротор состоит из электромагнитов с переключаемой полярностью и переключателя (коллектора). Самой простейшей основой ротора является шток (рис. 25.1).

Ротор реального ДПТ состоит из многих витков.



Рис. 25.5. Ротор



Рис. 25.6. Графитовые щетки

Коллектор (щеточно-коллекторный узел) является переключателем тока со скользящими контактами.

Щеточный узел необходим для подвода электроэнергии к катушкам на вращающемся роторе и переключения тока в обмотках ротора. Щетка – неподвижный контакт (обычно графитовый или меднографитовый) (рис. 25.6).

Щетки с большой частотой размыкают и замыкают пластины-контакты коллектора ротора. Как следствие, при работе ДПТ происходят переходные процессы в обмотках ротора. Эти процессы приводят к искрению на коллекторе, что значительно снижает ресурс ДПТ.

25.3. Параметры двигателя постоянного тока

Работа ДПТ оценивается по совокупности следующих величин:

- напряжение питания U , приложенное двигателю;
- механическая мощность на валу P_2 ;
- активная мощность, подводимая двигателю P_1 ;
- вращающий момент M ;
- частота вращения якоря n ;
- ток якоря $I_{я}$;
- ток возбуждения $I_{в}$;

Номинальное напряжение U_n :

- напряжение постоянного тока на входе двигателя.

Все технические данные двигателя приводятся для номинального напряжения, указанного в техническом паспорте. Тем не менее, двигатели постоянного тока допускают работу в широком диапазоне этого значения, в том числе в сторону увеличения.

Номинальный момент вращения M_n :

– момент вращения, развиваемой на валу, который может развивать двигатель продолжительное время при температуре окружающей среды 20°C . В справочниках приводится значение момента, соответствующее номинальному напряжению питания. С увеличением напряжения питания, момент будет увеличиваться. Однако не следует забывать о возможном перегреве двигателя или электрическом пробое обмотки в этом случае.

Номинальная скорость n_n :

- скорость вращения вала при номинальном моменте.

Номинальный ток I_n :

– ток, потребляемый двигателем от источника питания при номинальном моменте на валу.

Пусковой ток $I_{яп}$:

- ток обмотки якоря в момент пуска двигателя.

Если двигатель включен в сеть постоянного напряжения, то при взаимодействии магнитного поля, созданного обмоткой возбуждения, и тока в проводниках якоря возникает вращающий момент, действующий на якорь:

$$M = K_M \Phi I_A \quad (25.2)$$

ЭДС, индуцируемая в якоре:

$$E = K_E \Phi n, \quad (25.3)$$

где K_E, K_M — коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров машины;

Φ — магнитный поток одного полюса.

Если момент двигателя при $n=0$ (в начале пуска) превышает тормозящий момент, которым нагружен двигатель, то якорь начнет вращаться. При увеличении частоты вращения n возрастает индуцируемая в якоре ЭДС E . Это приводит к уменьшению тока I_A якоря двигателя:

$$I_A = (U - E) / R_A, \quad (25.4)$$

где R_A — сопротивление якоря.

Ток двигателя с параллельной обмоткой возбуждения:

$$I_d = I_A + I_{вд},$$

где $I_{вд}$ — ток в цепи возбуждения двигателя,

$$I_{вд} = U / R_{в.о} = U / (R_B + R_d);$$

$R_{в.о}$ — общее сопротивление цепи возбуждения;

R_B — сопротивление обмотки возбуждения;

R_d — сопротивление реостата в цепи возбуждения.

Следствием уменьшения тока I_A является уменьшение момента двигателя. При равенстве моментов двигателя и нагрузки частота вращения перестает изменяться.

Направление момента двигателя и, следовательно, направление вращения якоря зависят от направления магнитного потока и тока в проводниках обмотки якоря. Чтобы изменить направление вращения двигателя, следует изменить направление тока якоря либо тока возбуждения.

Наведенная ЭДС направлена навстречу приложенному напряжению и стремится уменьшить ток якоря. В момент пуска двигателя $n = 0$ и, соответственно, $E = 0$, ток якоря:

$$I_A = U / R_A \quad (25.5)$$

велик, т.к. его сопротивление R_A мало.

Пусковой ток двигателя постоянного тока может превышать номинальное значение тока якоря в 20-50 раз, что отрицательно влияет на надежность его работы - увеличивается искрение коллектора, перегреваются обмотки якоря и нарушается их изоляция. Поэтому для нормального пуска двигателя используются специальные пусковые реостаты, включаемые последовательно с обмоткой якоря. В этом случае ток якоря:

$$I_{я} = U / (R_{я} + R_{д}), \quad (25.6)$$

где $R_{д}$ - добавочное сопротивление в виде пускового реостата.

Напряжение на зажимах двигателя:

$$U = E + I_{я} R_{я}. \quad (25.7)$$

Активная мощность, подводимая двигателю, Вт:

$$P_1 = UI,$$

где U - напряжение на зажимах двигателя;

I - ток внешней цепи, А.

Уравнение скоростной характеристики двигателя - зависимость частоты вращения двигателя от тока якоря - имеет вид:

$$n = \frac{E}{K_E \Phi} = \frac{U - R_{я} I_{я}}{K_E \Phi} \quad (25.8)$$

Зависимость установившейся частоты вращения двигателя от тормозного момента на валу при постоянном напряжении питания цепей якоря и возбуждения называется механической характеристикой двигателя, которая имеет вид:

$$n = \frac{U}{K_E \Phi} - \frac{M R_{я}}{K_E K_M \Phi^2} \quad (25.9)$$

Как правило, двигатели постоянного тока пускаются в ход с добавочным сопротивлением (пусковым реостатом), включаемым последовательно в цепь якоря. Это связано с тем, что сопротивление цепи якоря у машин сред-

ней и большой мощности очень мало и пусковой ток может достигать значительной величины.

При включении пускового реостата пусковой ток уменьшается:

$$I_{я.п} = \frac{U}{R_{я} + R_{д}} \quad (25.10)$$

Отсюда сопротивление пускового реостата:

$$R_{д} = \frac{U}{I_{я.п}} - R_{я} \quad (25.11)$$

Пусковой реостат **РД** предназначен лишь для кратковременного включения в цепь якоря на время пуска. Пользоваться этим реостатом после запуска двигателя не допускается.

С включением пускового реостата в механическую характеристику (25.9) вводится поправка. Такая механическая характеристика называется реостатной характеристикой ДПТ.

Коэффициент полезного действия является важнейшим показателем двигателей постоянного тока. Чем он больше, тем меньше мощность P и ток I , потребляемые двигателем из сети при одной и той же механической мощности. В общем виде зависимость $\eta (P_2)$ такова:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_1 + \Delta P_{я} + \Delta P_{в} + \Delta P_{с} + \Delta P_{мех}}, \quad (25.12)$$

где

$\Delta P_{я} = I_{я}^2 r_{я}$ — потери в обмотке якоря;

$\Delta P_{в} = I_{в}^2 r_{в}$ — потери в обмотке возбуждения;

$\Delta P_{с}$ — потери в магнитопроводе якоря;

$\Delta P_{мех}$ — механические потери.

Потери мощности $\Delta P_{в}$ не зависят, $\Delta P_{с}$ и $\Delta P_{мех}$ мало зависят от нагрузки двигателя.

25.4. Схемы возбуждения двигателей постоянного тока

В зависимости от способа включения обмоток возбуждения и якоря различают такие схемы возбуждения двигателей постоянного тока:

Двигатель постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением (см. рис. 23.2, а).

При независимом возбуждении обмотка возбуждения (ОВ) питается от независимого источника постоянного тока.

Независимое возбуждение двигателей применяют в случае необходимости регулирования в широких пределах тока возбуждения I_B и напряжения на зажимах машины. У двигателей с независимым возбуждением $I_{\text{я}} = I$, где I – ток, потребляемый из сети.

ДПТ с параллельным возбуждением (см. рис. 23.2, б)

У мощных машин I_B составляет 1-3% тока якоря $I_{\text{я}}$, у малых машин – до нескольких десятков процентов.

В двигателях с параллельным возбуждением общий ток I , потребляемый двигателем из сети, больше тока $I_{\text{я}}$ на значение тока I_B

$$I = I_{\text{я}} + I_B$$

ДПТ с последовательным возбуждением (см. рис. 23.2, в).

У двигателя с последовательным возбуждением $I_{\text{я}} = I_B = I$.

Для ненасыщенной машины основной поток Φ_0 при этом пропорционален току якоря $\Phi_0 = K_{\phi} I_{\text{я}}$,

где K_{ϕ} – коэффициент пропорциональности магнитного потока току.

ДПТ с последовательным возбуждением применяются как тяговые двигатели на электротранспорте и в подъемных устройствах. В этом случае для предотвращения разноса используют небольшую шунтовую обмотку (она называется стабилизирующей).

ДПТ со смешанным возбуждением (см. рис. 23.2, г).

Основной обычно является параллельная обмотка. Последовательная обмотка подмагничивает машину при увеличении тока нагрузки, чем компенсирует падение напряжения в обмотке якоря и размагничивающее влияние реакции якоря.

ДПТ со смешанным возбуждением еще называются компаундными. Последовательная обмотка, как и у генераторов, имеет небольшое число витков и может быть включена согласно и встречно, усиливая или ослабляя поле основной параллельной обмотки.

ДПТ со смешанным возбуждением по своим свойствам является промежуточным между ДПТ параллельного и ДПТ последовательного возбуждения. ДПТ со смешанным возбуждением позволяют получить значительный пусковой момент.

25.5. Характеристики ДПТ независимого возбуждения

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения является наиболее распространенным в регулируемых электроприводах постоянного тока. Его скорость может регулироваться в широких пределах изменением напряжения якоря или тока возбуждения.

Механическая характеристика ДПТ — это зависимость $n = f(M)$ (рис. 25.7), при $U_{\text{я}} = \text{const}$, $I_{\text{в}} = \text{const}$, $R_{\text{д}} = \text{const}$, где $U_{\text{я}}$ — напряжение, подводимое к якорю двигателя;

$I_{\text{в}}$ — ток возбуждения;

$R_{\text{д}}$ — добавочное сопротивление в цепи якоря двигателя. Уравнение механической характеристики двигателя независимого возбуждения:

$$n = \frac{U_{\text{я}}}{c\Phi} - M \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}{c^2\Phi^2}, \quad (25.13)$$

где c — постоянный коэффициент.

Следующие два семейства механических характеристик, где две величины принимают значения номинального режима, а третья может принимать различные значения, называются искусственными механическими характеристиками:

$$1) I_{\text{в}} = I_{\text{вн}}; R_{\text{д}} = 0; U_{\text{я}} \neq U_{\text{н}} \quad (25.14)$$

$$2) U_{\text{я}} = U_{\text{н}}; R_{\text{д}} = 0; I_{\text{в}} \neq I_{\text{вн}} \quad (25.15)$$

Здесь $I_{вн}$ – номинальный ток обмотки возбуждения;
 U_H – номинальное напряжение якоря.

Механическая характеристика, соответствующая $U_я = U_H$; $I_в = I_{вн}$ и $R_д = 0$, называется естественной. Характеристики, получаемые при нарушении этих условий, называются искусственными.

Механическая характеристика двигателей независимого и параллельного возбуждения изображена на рис. 25.7, где M_H – номинальный момент ДПТ.

Как видно из графика, скорость вращения двигателей при изменении тормозного момента в широких пределах (от 0 до номинального) изменяется незначительно. Это означает, что такие двигатели имеют жесткую механическую характеристику.

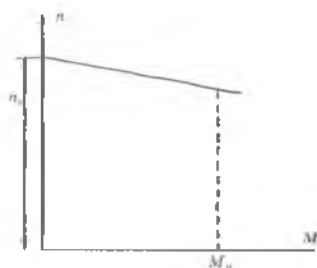


Рис. 25.7. Механическая характеристика двигателя постоянного тока

Соотношение перепадов частот вращения и сопротивлений цепи якоря можно записать в виде:

$$\frac{\Delta n_{e1}}{\Delta n_{p1}} = \frac{n_0 - n_{e1}}{n_0 - n_{p1}} = \frac{R_{с}}{R_{я} + R_{д}}, \quad (25.16)$$

где n_{e1} , n_{p1} – частоты вращения двигателя соответственно на естественной и искусственной (реостатной) механических характеристиках при одинаковом моменте на валу, об/мин.;

$R_{д}$ – сопротивление пускового реостата в цепи якоря двигателя.

Для регулирования частоты вращения изменением напряжения, подводимого к якорю, необходим источник регулируемого напряжения (генератор постоянного тока, управляемый выпрямитель).

Регулирование частоты вращения изменением тока возбуждения производится введением в цепь обмотки возбуждения сопротивления.

Вращающий момент M при установившемся режиме всегда уравновешен тормозным моментом, создаваемым нагрузкой. Поэтому момент нагрузки также обозначается M и есть разность электромагнитного момента $M_{эм}$ (на рис. 25.2 обозначен $m_{эм}$) и момента потерь холостого хода M_0 :

$$M = M_{эм} - M_0 \quad (25.17)$$

Пренебрегая величиной M_0 , получаем:

$$M = M_{эм} = K_M \Phi I_{я'} \quad (25.18)$$

где K_M – конструктивная постоянная машины;

Φ – величина магнитного потока;

$I_{я'}$ – ток якоря.

Произведение $K_M \Phi$ может быть определено по номинальным величинам момента и тока:

$$k_M = K_M \Phi = \frac{M_H}{I_{яH}} \quad (25.19)$$

При получении искусственных механических характеристик изменением тока возбуждения необходимо учесть нелинейность связи между магнитным потоком и током возбуждения. Для получения значений k_M при ослаблении магнитного потока надо воспользоваться характеристикой холостого хода машины, полученной при исследовании генератора постоянного тока (зависимость $E_0 = f(I_B)$, где E_0 – ЭДС при холостом ходе). Взяв значения ЭДС E_1 и E_2 при токах, соответственно, $I_1 = 0,8 I_{BH}$ и $I_2 = 0,75 I_{BH}$, получим для электромагнитного момента следующие выражения:

$$M_1 = k_M \frac{E_1}{E_H} I_{я'} \quad (25.20)$$

для тока $I_B = 0,8 I_{BH}$.

$$M_2 = k_M \frac{E_2}{E_H} I_a \quad (25.21)$$

для тока $I_B = 0,75 I_{BH}$.

где E_H – ЭДС при номинальном токе возбуждения.

Задачи

1. Как изменится вращающий момент двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением, если при неизменном магнитном потоке ток якоря увеличить в два раза?

2. Каковы сопротивление обмотки якоря R_a , частота вращения при идеальном холостом ходе n_0 и ЭДС E , возникающая в обмотке якоря двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением, если в результате двух проведенных опытов его нагрузки ток якоря соответственно составил 60 А при частоте вращения якоря 980 об/мин. и 120 А при частоте вращения 960 об/мин.? Номинальное напряжение двигателя $U_H = 220$ В.

3. На какой из трех схем двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением на рис. 25.9 правильно показаны направления токов и ЭДС?

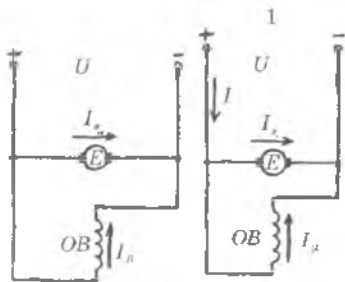


Рис. 25.8.

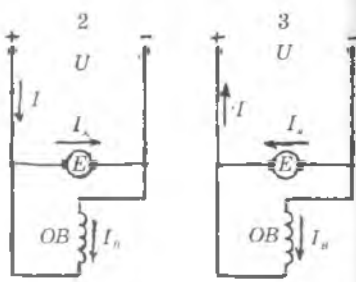


Рис. 25.9.

4. При каком добавочном сопротивлении R_D , включенном в цепь якоря, двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением будет иметь реостатную ха-

рактическую характеристику вида Б, показанную на рис. 25.10, если сопротивление обмотки якоря $R_a = 0,2 \text{ Ом}$, а естественная характеристика имеет вид прямой А?

5. При конструировании двигателя постоянного тока постоянный коэффициент K_M выбирался в диапазоне 140-150. Магнитная цепь позволяла получить магнитный поток в пределах 10^{-2} - $1,2 \cdot 10^{-2}$ Вб. В каком диапазоне будет находиться вращающий момент двигателя при токе якоря 20 А?

6. Каково сопротивление якоря двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением, если при номинальной нагрузке $I_H = 100 \text{ А}$ его номинальная частота вращения $n_H = 800 \text{ об/мин.}$, при нагрузке $I_1 = 50 \text{ А}$ частота вращения $n_1 = 820 \text{ об/мин.}$, а номинальное напряжение двигателя $U_H = 400 \text{ В}$?

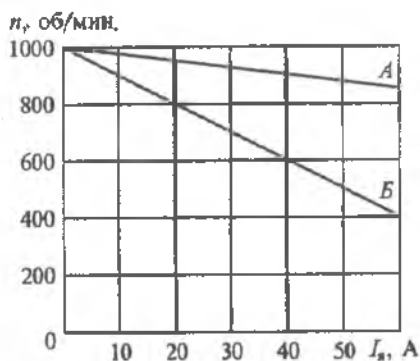


Рис. 25.10.

Вопросы

1. Как изменится ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря, при уменьшении частоты вращения двигателя?

2. Для чего в цепи возбуждения двигателя постоянного тока с независимым и параллельным возбуждением устанавливается регулировочный реостат?

3. Как определяется КПД двигателя постоянного тока?

4. Для чего в цепь якоря двигателя постоянного тока параллельного возбуждения включают пусковой реостат?

5. Как изменятся ток якоря $I_{\text{я}}$ и частота вращения n двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, если момент нагрузки M на валу двигателя увеличится?

6. Какие существуют способы пуска двигателя постоянного тока?

7. Как изменить направление вращения якоря?

8. Как направлена ЭДС в якоре двигателя, схема которого изображена на рис. 25.8?

§26. СОЕДИНЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ «ЗВЕЗДОЙ»

Трехфазная система электрических цепей представляет собой совокупность электрических цепей, в которых действуют три синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые друг относительно друга по фазе и создаваемые общим источником питания.

Если все три ЭДС равны по значению и сдвинуты по фазе на 120° по отношению друг к другу, то такая система ЭДС называется симметричной.

Часть трехфазной системы электрических цепей, в которой может протекать один из токов трехфазной системы, называется фазой. Фазой является обмотка генератора, в которой индуцируется ЭДС и приемник, присоединенный к этой обмотке.

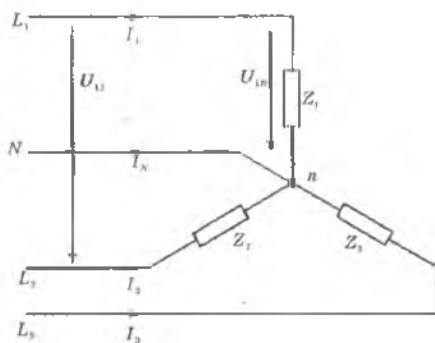


Рис. 26.1.

Трехфазная цепь при соединении приемника звездой (условное обозначение Υ) может быть четырехпроводной (рис. 26.1) или трехпроводной – без линии Nn . Точка N источника трехфазного напряжения и точка n приемника (нагрузки) называются нейтральными точками, а про-

вод, соединяющий эти точки, называется нейтральным (или нейтралью). Три провода L_1, L_2, L_3 , соединяющие потребителей Z_1, Z_2 и Z_3 с трехфазным источником, называются линейными.

На рис. 26.2 приведена система, состоящая из трехфазного источника питания и потребителей, соединенные по схеме «звезда».

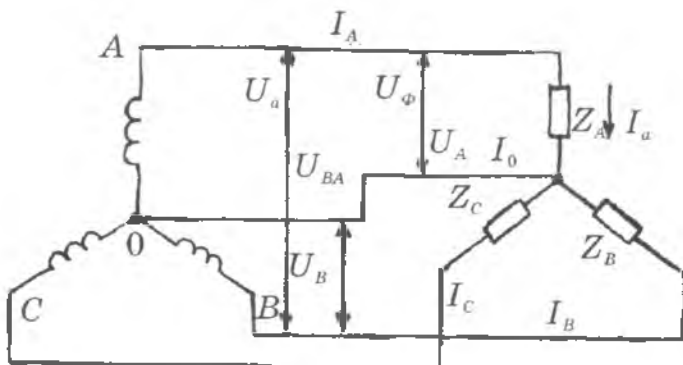


Рис. 26.2.

В схеме использованы следующие обозначения:

1. Токи в проводах, соединяющих фазы нагрузки и источника – I_L – линейные токи (I_A, I_B, I_C)

2. Токи в нагрузках – фазные токи I_a, I_b, I_c (они в схеме не указаны (кроме I_a)). Это токи, протекающие непосредственно через нагрузки.

3. Напряжения на нагрузках называются фазными напряжениями нагрузок.

4. Напряжения между линейными проводами U_{AB}, U_{BC} и U_{CA} называются линейными. В схеме они не указаны (кроме U_{AB}).

5. I_0 – ток нейтрального провода.

6. Z_A, Z_B, Z_C – нагрузки соответствующих фаз.

Токи в линейных проводах называются линейными, а токи в фазах приемника – фазными.

Напряжения U_A, U_B и U_C между нейтральной точкой N источника и соответствующими линейными провода-

ми называются фазными напряжениями источника питания.

При соединении фаз трехфазного источника питания и потребителя энергии «звездой» концы фаз источника A, B, C и приемника объединены в общую нейтральную точку N , а начала фаз подключаются к соответствующим линейным проводам.

При соединении в звезду справедливо равенство линейных и фазных токов, т.е. $I_A = I_a; I_B = I_b; I_C = I_c$.

Если все три нагрузки цепи одинаковые, то она называется симметричной трехфазной цепью.

Для симметричной трехфазной цепи и для трехфазной четырехпроводной цепи номинальное (линейное) напряжение в $\sqrt{3}$ раз больше фазного:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}, \text{ т.е.}$$

$$U_{AB} = \sqrt{3}U_A; U_{BC} = \sqrt{3}U_B; U_{CA} = \sqrt{3}U_C \quad (26.1)$$

Токи в фазах определяются по закону Ома для цепей переменного тока:

$$I_a = \frac{U_A}{Z_A}; I_b = \frac{U_B}{Z_B}; I_c = \frac{U_C}{Z_C} \quad (26.2)$$

Полное сопротивление каждой фазы определяется по формуле:

$$Z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}, \quad (26.3)$$

где R, X_L, X_C — активное, индуктивное и емкостное сопротивление отдельной фазы (индексы принадлежности к фазе опущены).

Активную P , реактивную Q и полную S мощности потребителя электрической энергии определяют как сумму соответствующих фазных мощностей:

$$P = P_a + P_b + P_c \quad (26.4)$$

$$= I_{\text{ф}}^2 R_{\text{ф}}, \quad Q_{\text{гЛ}} = I_{\text{ф}}^2 X_L, \quad Q_{\text{гС}} = I_{\text{ф}}^2 X_C \quad (26.5)$$

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c, \quad (26.6)$$

$$Q_{\phi} = Q_{\phi L} - Q_{\phi C} \cdot$$

$$S_{\phi} = \sqrt{P_{\phi}^2 + Q_{\phi}^2} \quad (26.7)$$

где $X_L, Q_{\phi L}$ – индуктивное сопротивление фазы и мощность на нем;

$X_C, Q_{\phi C}$ – емкостное сопротивление фазы и мощность на нем. Выражения (26.4)-(26.7) относятся каждой фазе.

В трехфазной четырехпроводной цепи ток в нейтральном проводе определяется по формуле:

$$I_N = I_A + I_B + I_C \quad (26.8)$$

как векторная сумма фазных токов. При несимметричной нагрузке обрыв нулевого провода ($Z_N = \infty$) вызывает значительное изменение токов и фазных напряжений, что в большинстве случаев недопустимо. Поэтому в нулевой провод предохранители не устанавливают.

При наличии нулевого провода фазные напряжения будут одинаковы:

$$\vec{U}_A = \vec{U}_B = \vec{U}_C \quad (26.9)$$

Если линейное напряжение, например, равно 380 В, то фазное будет:

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} = 220 \text{ В}$$

Если же фазное напряжение $U_{\phi} = 127 \text{ В}$, то линейное будет:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\phi} = 1,73 \cdot 127 = 220 \text{ В}$$

В промышленности пользуются напряжением 127, 220 и 380 В. В высоковольтных линиях электропередачи применяют напряжение 6 кВ, 10 кВ, 35 кВ, 110 кВ, 220 кВ, 400 кВ, 500 кВ и более. В низковольтных установках применяются, как правило, четырехпроводные линии электропередачи, а в высоковольтных – трехпроводные.

При симметричной нагрузке в соединении звездой можно использовать 3-х проводную схему. Это бывает сравнительно редко, например, при питании 3-х фазного двигателя или трансформатора. Более часто используется 4-х проводная схема.

При осветительной нагрузке, которая часто бывает несимметричной, нулевой провод необходим, и поэтому используется 4-х проводная схема.

На следующем рисунке приведена векторная диаграмма напряжений при соединении потребителей звездой.

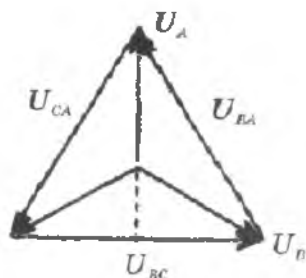


Рис. 26.3.

Между напряжениями имеются следующие векторные связи:

$$\begin{cases} U_{AB} = U_A - U_B \\ U_{BC} = U_B - U_C \\ U_{CA} = U_C - U_A \end{cases} \quad (26.10)$$

В случае несимметричной нагрузки обрыв нулевого провода приводит к изменению фазных напряжений и их несимметричности, что недопустимо.

Обычно нулевой провод имеет сечение $S/2$ от сечения фазных проводов.

Фазный ток определяется по формуле:

$$I_\phi = \frac{U_\phi}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (26.11)$$

где U_ϕ – действующее значение фазных напряжений, R – активное сопротивление фазы, X – реактивное сопротивление фазы. При наличии емкости и индуктивности в фазе $X = X_L - X_C$.

Задачи

1. В какой из трех схем, показанных на рис. 26.4, нагрузка является несимметричной?

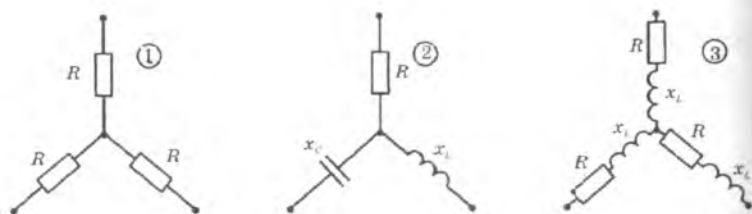


Рис. 26.4.

2. Как изменятся токи при размыкании ключа K на рис. 26.5, если $R_1 = R_2 = R_3$?

3. В трехфазную четырехпроводную сеть включили звездой несимметричную нагрузку: в фазу A – индуктивный элемент с индуктивностью $L_a = 31,8$ мГн, в фазу B – резистор с сопротивлением $R_b = 8$ Ом и емкостный элемент с емкостью $C_b = 530$ мкФ, в фазу C – резистор с сопротивлением $R_c = 5$ Ом. Линейное напряжение сети $U_{\text{ном}} = 380$ В, частота напряжения $f = 50$ Гц. Определить фазные токи I_a, I_b, I_c , активную мощность цепи P , реактивную мощность Q , полную мощность S .

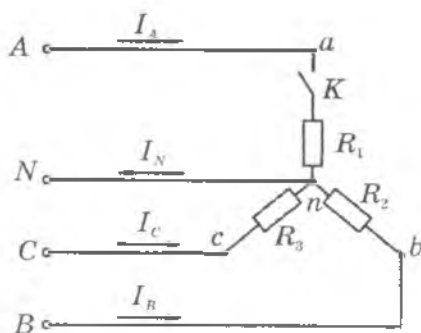


Рис. 26.5.

4. Трехфазный четырехпроводный потребитель соединен по схеме «звезда» (рис. 26.6). Параметры элементов фазы: $r_a = 100$ Ом, $L_b = 318,5$ мГн, $C_c = 31,84$ мкФ. Действующее значение линейного напряжения 173 В, частота 50 Гц. Определить действующее значение тока в нулевом проводе I_0 .

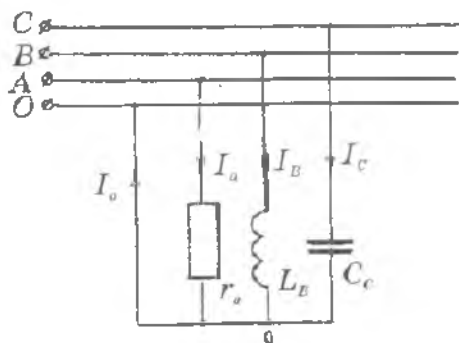


Рис. 26.6.

5. Дана симметричная трехфазная цепь (рис. 26.7). Во сколько раз изменится ток I_B при размыкании ключа Кл?

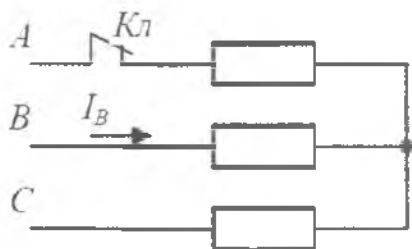


Рис. 26.7.

Вопросы

1. Какое отношение токов применяется в случае симметричной трехфазной нагрузки при соединении их звездой?

2. Каково назначение нейтрального провода?

3. Какие напряжения (токи) называются линейными и фазными?

4. Каким будет соотношение между значениями линейных и фазных напряжений при соединении нагрузки с нейтральным проводом звездой?

5. Как определяется ток нейтрального провода?

6. Как определяется полное сопротивление фазы?

7. Какие векторные связи имеются между линейным и фазным напряжениями при соединении нагрузки с нейтральным проводом звездой?

Лабораторная работа

1. Соединение звездой.

§27. СОЕДИНЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ «ТРЕУГОЛЬНИКОМ»

Если три фазы приемника с фазными сопротивлениями Z_{AB} , Z_{BC} , Z_{CA} включить непосредственно между линейными проводами трехпроводного источника питания (точки A , B , C) цепи, то получим соединение приемников треугольником (рис. 27.1).

В схеме применены следующие определения и обозначения:

1. Токи в нагрузках называются фазными токами, обозначены: I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} .

2. Напряжения на нагрузках – фазные напряжения: U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} .

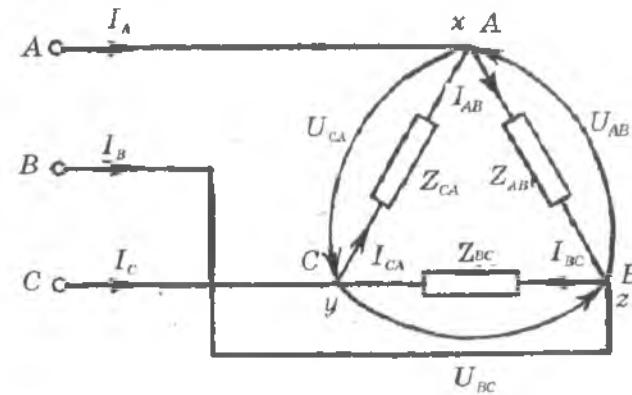


Рис. 27.1. Схема соединения потребителей треугольником

Такой способ соединения реализуется, когда начало каждой фазы потребителя соединяют с концом преды-

дущей, соблюдая прямую последовательность чередования фаз A, B, C .

Провода, подключенные к началам фаз нагрузок, образуют трехпроводную линию электропередачи и также называются линейными проводами.

На рис. 27.2 показаны обмотки трехфазного источника электропитания, которые соединены между собой по схеме «треугольник». При соединении обмоток источника трехфазного тока – генератора «треугольником» конец первой обмотки генератора соединяется с началом второй, конец второй – с началом третьей, конец третьей – с началом первой (рис. 27.2). ЭДС каждой обмотки обозначены E_A, E_B, E_C . Геометрическая сумма ЭДС в треугольнике равна нулю. Поэтому, если к зажимам A, B, C не присоединена нагрузка, то по обмоткам генератора не будет протекать ток.

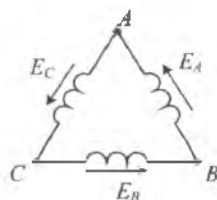


Рис. 27.2.

Совокупность трехфазной системы ЭДС и трехфазной нагрузки называют трехфазной цепью.

На рис. 27.3 показана трехфазная цепь.

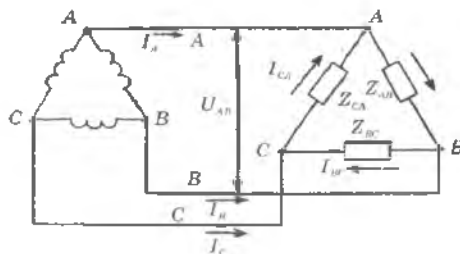


Рис. 27.3. Соединение источника и нагрузки треугольником

Применяются следующие определения и обозначения:

1. Токи в соединительных проводах – линейные токи:

$$I_A, I_B, I_C$$

2. Напряжения между соединительными проводами – линейные напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} .

Из схемы (рис. 27.3) видно, что при соединении фаз источника треугольником (обозначение в схемах – Δ) линейные напряжения тождественно равны фазным.

При подключении к источнику трехфазного потребителя в линейных проводах возникнут линейные токи I_A, I_B, I_C , которые не будут равны фазным токам в обмотках потребителя I_{AB}, I_{BC} и I_{CA} (как в случае соединения звездой), а связаны с ними следующими соотношениями (векторные связи):

$$\begin{aligned} I_A &= I_{AB} - I_{CA} \\ I_B &= I_{BC} - I_{AB} \\ I_C &= I_{CA} - I_{BC} \end{aligned} \quad (27.1)$$

Из уравнений (27.1) следует, что любой из линейных токов равен геометрической разности токов тех двух фаз нагрузки, которые соединяются с данным линейным проводом. Это соотношение учитывается при построении векторной диаграммы токов (рис. 27.4, а).

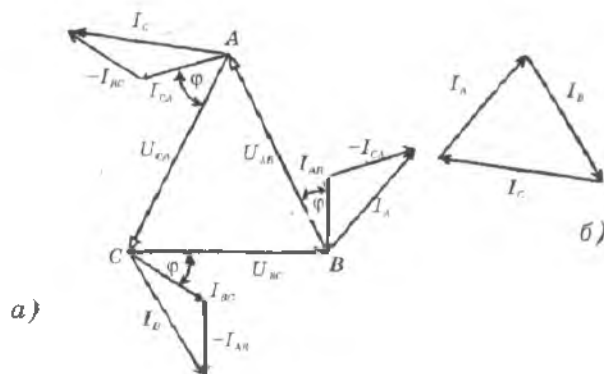


Рис. 27.4. Векторная диаграмма напряжений и токов при несимметричной активно-индуктивной нагрузке

Независимо от характера нагрузки геометрическая сумма линейных токов в трехпроводной цепи равна нулю:

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad (27.2)$$

Это значит, что на векторной диаграмме линейные токи должны образовать замкнутый контур – треугольник (рис. 27.4, б).

Если сопротивления фаз приемника известны, то величину фазных токов определяют по закону Ома:

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{Z_{AB}}, I_{BC} = \frac{U_{BC}}{Z_{BC}}, I_{CA} = \frac{U_{CA}}{Z_{CA}} \quad (27.3)$$

При симметричной нагрузке ($Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$) фазные токи равны по величине и углы сдвига фаз токов по отношению к соответствующим фазным напряжениям одинаковы:

$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_\phi \quad (27.4)$$

$$\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi_\phi$$

где $\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi_\phi$ – фазовые сдвиги в соответствующей фазе нагрузки, в случае симметричности их нагрузок.

Соотношения между модулями фазных и линейных токов определяются выражением:

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi \quad (27.5)$$

Фазовый сдвиг между током и напряжением каждой фазы определяется по формуле (знак принадлежности определенной фазе опущен):

$$\operatorname{tg} \varphi_\phi = X_\phi / R_\phi \quad (27.6)$$

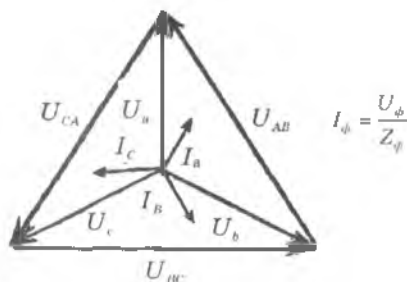


Рис. 27.5.

Обрыв одного линейного провода (линия С, рис. 27.6) приводит трехфазную систему к однофазной с двумя параллельными ветвями.

При этом режим работы фазы АВ не меняется, а в фазах ВС и СА, соединенных последовательно, напряжение распределяется пропорционально сопротивлениям, их геометрическая сумма равна напряжению генератора:

$$U_{AB} = U_{BC} + U_{CA} \quad (27.7)$$

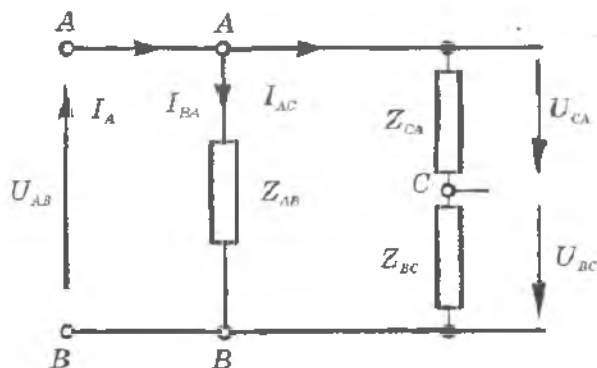


Рис. 27.6. Схема соединения потребителя треугольником с обрывом линии С

Токи в фазах ВС и СА становятся одинаковыми, т.к. теперь они образуют одну ветвь, а ток в линии определится геометрической суммой токов обеих ветвей:

$$I_{AC} = I_{CB}; I_A = I_{AB} + I_{AC} \quad (27.8)$$

Трехфазная цепь, соединенная треугольником, бывает только трехпроводной.

Задачи

1. Как изменятся токи при размыкании ключа $K1$ в схеме на рис. 27.7?
2. Как изменятся токи при размыкании ключа $K2$ в схеме на рис. 27.7?
3. Как изменятся токи, если перегорит предохранитель $\Pi1$ в схеме на рис. 27.8?

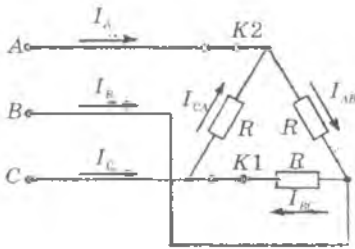


Рис. 27.7.

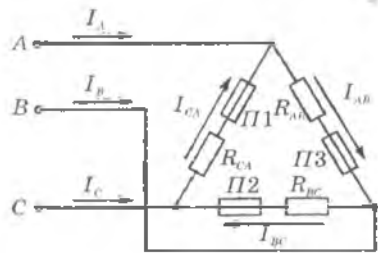


Рис. 27.8.

4. Каковы уравнения, связывающие векторы линейных и фазных токов в схеме на рис. 27.9?

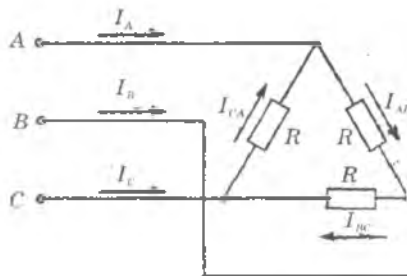


Рис. 27.9.

5. Линейное напряжение 380 В. Каким будет фазное напряжение, если нагрузка симметрична и соединена треугольником?
6. В какой из трех схем, показанных на рис. 27.10, нагрузка является несимметричной?

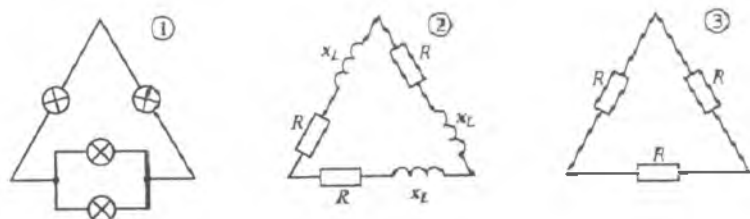


Рис. 27.10.

7. Как изменится векторная диаграмма токов и напряжений, если произойдет обрыв одного линейного провода:

- а) при симметричной нагрузке;
- б) при несимметричной нагрузке?

Вопросы

1. В чем преимущество соединения фаз нагрузки «треугольником»?

2. Каково соотношение между фазными и линейными токами?

3. Как определить линейные токи при несимметричной нагрузке, если известны фазные токи?

4. Что понимается под фазными токами и напряжениями?

5. Каковы особенности режима при обрыве одного из линейных проводов? Как изменится накал ламп, соединенных в треугольник, если произойдет такой обрыв?

6. Как изменятся токи в фазах, если произойдет обрыв одной фазы?

7. Чему равна геометрическая сумма линейных токов при соединении потребителей треугольником?

Лабораторная работа

1. Соединение треугольником.

§28. ТРЕХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

28.1. Устройство трехфазного асинхронного двигателя

Асинхронные двигатели питаются синусоидальным током и преимущественно преобразуют энергию переменного тока в механическую энергию.

Асинхронные двигатели являются самыми распространенными из всех электрических двигателей. Их преимущества:

- простота устройства;
- простота изготовления и эксплуатации;
- большая надежность и сравнительно низкая стоимость.

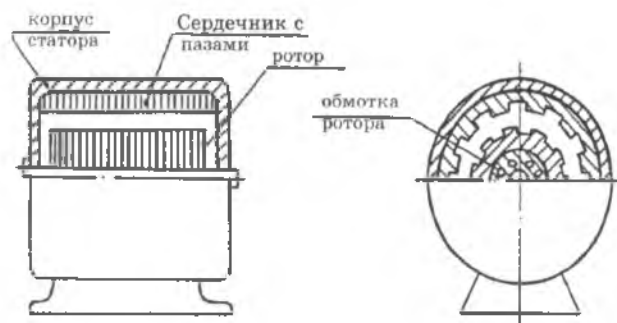


Рис. 28.1. Устройство асинхронного двигателя, срез сбоку и спереди

Асинхронные двигатели являются основным типом приводных двигателей в промышленности (приводы металлорежущих станков, насосов, вентиляторов, подъем-

ных механизмов) и быту (стиральные машины, холодильники, электроинструмент).

В зависимости от типа источника питания асинхронные двигатели могут быть трехфазными и однофазными. Трехфазные машины в основном используются на производстве, однофазные – в быту.

Асинхронный двигатель имеет самое простое конструктивное исполнение из всех электрических машин и состоит из двух основных узлов – неподвижного статора и вращающегося ротора.

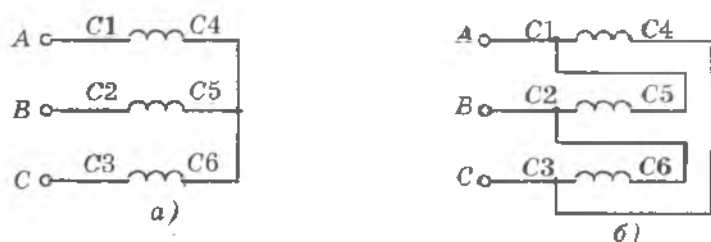


Рис. 28.2. Схемы соединения обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя «звездой» (а) и «треугольником» (б)

Вращающаяся часть двигателя – ротор – помещается внутри статора (рис. 28.1). Это также набранный из отдельных листов стали цилиндр, укрепленный на валу, вместе с которым он может вращаться в подшипниках, находящихся в боковых щитках (крышках) двигателя.

Для трехфазных обмоток принято обозначать начала фаз С1, С2, С3, а концы фаз – С4, С5, С6. Обмотки трехфазной машины могут быть соединены «звездой» или «треугольником». При соединении фаз «звездой» концы С4, С5, С6 объединяют вместе, а начала фаз С1, С2, С3 подключают к линейным проводам А, В, С (рис. 28.2, а). При соединении фаз «треугольником» начало С1 соединяют с концом С5, С2 с С6 и С3 с С4 (рис. 28.2, б). Обмотка ротора может быть короткозамкнутой или фазной.

28.2. Принцип работы асинхронного двигателя

Для лучшего понимания принципа действия асинхронного двигателя примем, что его вращающееся поле создается путем вращения двух полюсов (постоянных магнитов или электромагнитов N и S), как показано на рис. 28.3.

В проводниках замкнутой обмотки ротора при этом будут наводиться токи. Их направления указаны на рис. 28.3 знаками \oplus и \ominus .

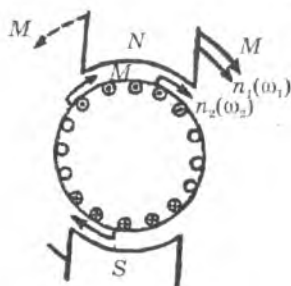


Рис. 28.3. К пояснению принципа действия асинхронного двигателя

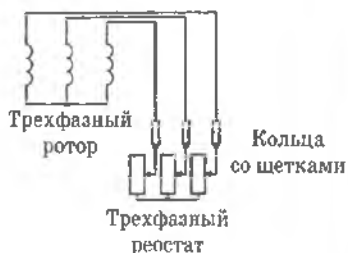


Рис. 28.4. Схема подключения фазной обмотки ротора асинхронного двигателя

Они найдены по правилу правой руки, позволяющему определить направление наведенного тока в проводнике, перемещающемся относительно поля. Пользуясь правилом левой руки, найдем направления электромагнитных сил, действующих на ротор и заставляющих его вращаться. Ротор двигателя будет вращаться в направлении вращения поля. Его частота вращения n_2 (об/мин.), будет меньше частоты вращения поля n_1 , т.к. только в этом случае возможны наведение токов в обмотке ротора и возникновение электромагнитных сил и вращающего момента.

В основу работы трехфазного асинхронного двигателя, как и любой другой электрической машины, поло-

жены законы электромагнитной индукции и электромагнитных сил. Если к трем обмоткам статора, сдвинутым в пространстве на 120° , подвести три напряжения, сдвинутые по фазе также на 120° , то на статоре создается вращающееся магнитное поле. Фазную обмотку укладывают изолированным проводом в виде трех фаз. Начала фаз подключают к трем контактными кольцам, расположенным на оси ротора (рис. 28.4). Подключение обмотки ротора к электрической цепи осуществляется с помощью контактных щеток, располагаемых на корпусе и скользящих по кольцам при вращении ротора.

28.3. Параметры асинхронного двигателя

Частота вращения поля n_1 статора называется синхронной частотой вращения.

Частота вращения поля относительно ротора $n_1 - n_2$ называется частотой скольжения, а отношение этой частоты к частоте поля, обозначаемое через s :

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (28.1)$$

называется скольжением. Его также считают в процентах.

Обозначим через M вращающий момент, который нужно приложить к полюсам (рис. 28.3), чтобы вращать их с частотой n_1 (об/мин.), или с угловой частотой ω_1 (рад/с):

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} \quad (28.2)$$

Тогда мощность, необходимая для вращения полюсов:

$$P_{эм} = M \omega_1. \quad (28.3)$$

На ротор и полюсы действуют одинаковые электромагнитные силы (действие равно противодействию). Они создают одинаковые вращающие моменты, а т.к. момент, действующий на полюсы (на рис. 28.3 показан пунктирной стрелкой), равен M , то и на ротор действует момент

М. Следовательно, механическая мощность, развиваемая ротором:

$$P_2 = M\omega_2, \quad (28.4)$$

ω_2 — где угловая частота ротора, единица измерения — рад/с,

$$\omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60}. \quad (28.5)$$

Частота вращения поля (синхронная частота) определяется по формуле:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (28.6)$$

где f_1 — частота тока статора;

p — число пар полюсов его обмотки.

Частота ЭДС, наводимой в обмотке ротора:

$$f_2 = \frac{(n_1 - n_2)p}{60} \cdot \frac{n_1}{n_1} = s f_1 \quad (28.7)$$

С такой же частотой будет перемагничиваться сталь ротора. При работе машины двигателем частота f_2 мала (при $f_1 = 50$ Гц $f_2 = 0,5 \div 3$ Гц), поэтому магнитными потерями в стали ротора можно пренебречь.

Поскольку в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором обмотки закорочены кольцами по торцам, в них под действием ЭДС E_2 появляется ток ротора I_2 . Само E_2 возникает под действием на обмотки ротора магнитного поля статора. И теперь, по закону электромагнитных сил (закон Ампера), вращающееся магнитное поле начинает действовать на проводник с током, создавая вращающий момент:

$$M_{BP} = c_m \Phi I_2^* \quad (28.8)$$

где c_m — постоянный коэффициент.

Под действием этого момента ротор приходит во вращение в направлении вращения поля, как бы стараясь догнать его. Однако догнать магнитное поле, вращающе-

еся с синхронной частотой n_1 , ротор не может, т.к. в противном случае магнитное поле перестанет пересекать обмотки ротора, не будет наводить в них ЭДС, т.е. не будет тока в обмотках ротора, а, значит, не будет и вращающего момента. Следовательно, ротор всегда будет вращаться с частотой меньше синхронной. Отсюда и название – асинхронный (несинхронный) двигатель.

При вращении ротора с частотой $n_2 < n_1$ он «скользит» относительно поля с частотой $n_1 - n_2$.

При промышленной частоте $f=50$ Гц и одной паре полюсов ($p=1$) максимальная синхронная частота вращения $n_1 = 3000$ об/мин. Вращающееся магнитное поле статора, пересекая обмотки неподвижного ротора, наводит в них ЭДС (в соответствии с законом электромагнитной индукции). ЭДС, наводимые в обмотках статора E_1 , определяются выражением:

$$E_1 = 4,44 f w_1 K_{o1} \Phi_m \quad (28.9)$$

При работе машины в обмотке ее ротора наводится ЭДС:

$$E_2 = 4,44 f w_2 K_{o2} \Phi_m, \quad (28.10)$$

где w_1, w_2 – число витков обмоток статора и ротора соответственно;

Φ_m – амплитуда потока магнитного поле,

$K_{o1} < 1$ и $K_{o2} < 1$ – обмоточные коэффициенты статора и ротора соответственно.

Коэффициент полезного действия (КПД) двигателя:

$$\eta = P_2 / P_1 \cdot 100\%, \quad (28.11)$$

где P_2 – полезная механическая мощность, развиваемая на валу,

P_1 – активная мощность, потребляемая двигателем.

Коэффициент мощности $\cos \varphi = P_1 / S$, где S – полная мощность, получаемая двигателем от сети.

28.4. Рабочие напряжения асинхронного двигателя

Обмотки статора должны быть соединены между собой либо звездой, либо треугольником. В первом случае напряжение на каждой обмотке в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного напряжения сети, а во втором -- равно ему. Если, например, напряжение между каждой парой проводов трехфазной сети (линейное напряжение) равно 220 В, то при соединении обмоток треугольником каждая из них находится под напряжением 220 В, а если они соединены звездой, то каждая обмотка находится под напряжением 127 В.

Таким образом, если обмотки двигателя рассчитаны на напряжение 127 В, то двигатель может работать с нормальной мощностью как от сети 220 В при соединении его обмоток звездой, так и от сети 127 В при соединении его обмоток треугольником. На табличке, прикрепленной к станине каждого двигателя, указываются поэтому два напряжения сети, при которых данный двигатель может работать, например, 127/220 В или 220/380 В. При включении в сеть с меньшим линейным напряжением обмотки двигателя соединяют треугольником, а при питании от сети с более высоким напряжением их соединяют звездой.

В быту широко используются однофазные асинхронные двигатели, работающие по тому же принципу, что и трехфазные. Различие лишь в том, что на статоре однофазного асинхронного двигателя размещаются не три, а две обмотки, сдвинутые на 90° и питаемые токами, сдвинутыми по фазе друг относительно друга также на 90° . Поскольку к статору однофазного двигателя подводится однофазное напряжение, то для сдвига фаз в обмотках применяются дополнительные устройства. Наиболее простым из них является конденсатор, включаемый последовательно с одной из обмоток (рис. 28.5). Он позволяет сдвинуть по фазе токи в обмотках, а следовательно, и магнитные потоки практически на 90° . Машины такой конструкции получили название конденсаторных двигателей.

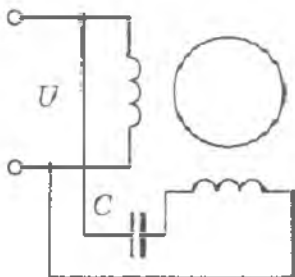


Рис. 28.5. Схема однофазного конденсаторного двигателя

Задачи

1. Сколько полюсов имеет магнитное поле трехфазного тока частотой 50 Гц, вращающееся с частотой 3000 об/мин?

2. Каким будет скольжение при частоте вращения магнитного поля 3000 об/мин. и частоте вращения ротора 2940 об/мин?

3. Какова частота вращения ротора, если скольжение $s=0,05$; число пар полюсов $p=1$, частота подводимого к двигателю напряжения $f=50$ Гц?

4. Частота тока питающей сети равна 50 Гц. Ротор асинхронного двигателя вращается со скольжением, равным 2%. Какова при этом частота тока в обмотке ротора?

5. Асинхронный двигатель развивает на валу полезную механическую мощность 5 кВт, его КПД составляет 0,8, а коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,625$. Какую полную мощность употребляет двигатель от сети?

6. При вращении ротора асинхронного двигателя с частотой 980 об/мин. подводимая к двигателю мощность равна 20 кВт, а суммарная мощность потерь – 1,5 кВт. Найти скольжение двигателя и его КПД, если число пар полюсов 3, а частота сети 50 Гц.

7. Частота вращения магнитного поля асинхронной машины 1000 об/мин. Определить частоту вращения ротора машины при скольжениях 1; 0; -1; -2.

Вопросы

1. Со сколькими значениями напряжения может работать асинхронный двигатель?
2. Чему равен вращающий момент двигателя?
3. Что такое скольжение асинхронного двигателя?
4. Как обозначают начала и концы фаз обмоток статора?
5. Чему равна ЭДС статора асинхронного двигателя?
6. Чему равен КПД асинхронного двигателя?
7. Какие существуют способы соединения обмоток статора двигателя?
8. Объяснить принцип действия трехфазного двигателя.
9. Чему равна ЭДС ротора асинхронного двигателя?
10. Как возникает вращающееся магнитное поле статора?

§29. ТРЕХФАЗНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

29.1. Устройство трехфазного генератора

Трехфазными генераторами называются генераторы переменного тока, одновременно вырабатывающие три ЭДС одинаковой частоты, но с различными начальными фазами. Совокупность таких ЭДС называется трехфазной системой ЭДС.

Если в однородном магнитном поле вращать с равномерной скоростью три одинаковые рамки, сдвинутые в пространстве на 120° друг относительно друга, то в них, в соответствии с законом электромагнитной индукции, будет наводиться трехфазная система ЭДС, состоящая из трех синусоидальных ЭДС, одинаковых по амплитуде и частоте, но сдвинутых друг относительно друга по фазе на 120° (рис. 29.1).

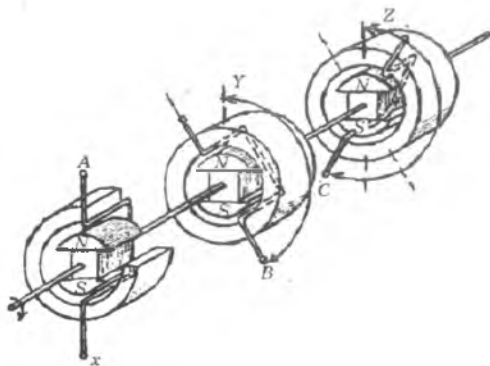


Рис. 29.1.

Следовательно, если изменение ЭДС первой фазы генератора происходит по закону синуса $e_1 = E_m \sin \omega t$, то за-

кон изменения ЭДС второй фазы может быть записан формулой $e_2 = E_m \sin \omega(t - T/3)$, а третьей — формулой $e_3 = E_m \sin \omega(t - 2/3 T)$.

Сказанное иллюстрирует график рисунка 29.2.

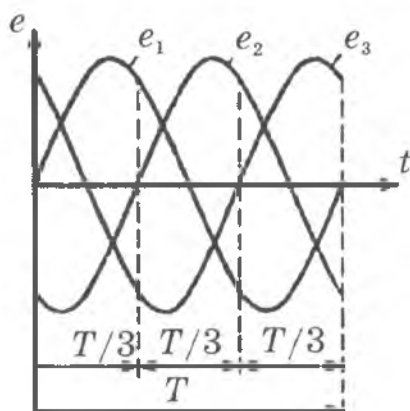


Рис. 29.2. Кривые мгновенных значений трехфазной системы ЭДС

Таким образом, при равномерном вращении полюсов ротора во всех трех фазах генератора наводятся переменные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, периодические изменения которых по отношению друг к другу совершаются с запаздыванием на $1/3$ периода.

Такая система предназначается для питания симметричных трехфазных приемников (асинхронные и синхронные двигатели) и однофазных несимметричных приемников, соединенных «звездой» или «треугольником» (осветительные приборы, бытовая электроаппаратура).

Трехфазный генератор имеет обмотку, состоящую из трех частей. Каждая часть этой обмотки называется фазой. Поэтому эти генераторы и получили название трехфазных.

На рис. 29.3 показана конструктивная схема трехфазного генератора с одной обмоткой фаз статора.

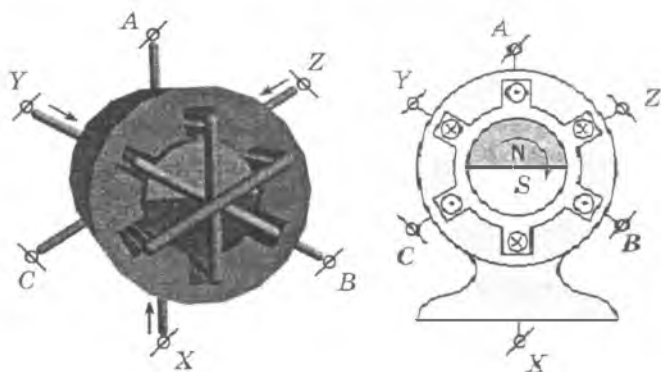


Рис. 29.3. Трехфазный генератор

29.2. Принцип работы трехфазного генератора

Для уяснения принципа действия трехфазного генератора обратимся к модели, схематически изображенной на рисунке 29.4. Модель состоит из статора, изготовленного в виде стального кольца, и ротора – постоянного магнита. На кольце статора расположена трехфазная обмотка с одинаковым числом витков в каждой фазе. Фазы обмотки смещены в пространстве одна относительно другой на угол 120° .

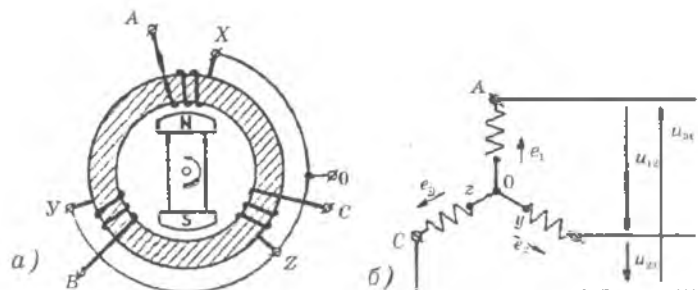


Рис. 29.4. Схема трехфазного генератора (а); вырабатываемые им ЭДС (e_1, e_2, e_3) и линейные напряжения (u_{12}, u_{23}, u_{31}) (б)

Представим себе, что ротор модели генератора приведен во вращение с постоянной скоростью против движения часовой стрелки. Тогда, вследствие непрерывного движения полюсов постоянного магнита относительно проводников обмотки статора, в каждой ее фазе будет наводиться ЭДС.

Применяя правило правой руки, можно убедиться, что ЭДС, наводимая в фазе обмотки северным полюсом вращающегося магнита, будет действовать в одном направлении, а наводимая южным полюсом – в другом. Следовательно, ЭДС фазы генератора будет переменной.

Крайние точки (зажимы) каждой фазы генератора всегда размечают: одну крайнюю точку фазы называют началом, а другую – концом. Начала фаз обозначают латинскими буквами A, B, C , а концы их соответственно – x, y, z . Наименования «начало» и «конец» фазы дают, руководствуясь следующим правилом: положительная ЭДС генератора действует в направлении от конца фазы к ее началу.

ЭДС генератора условимся считать положительной, если она наведена северным полюсом вращающегося магнита. Тогда разметка зажимов генератора для случая вращения его ротора против часовой стрелки должна быть такой, как показано на рис. 29.1.

При постоянной скорости вращения полюсов ротора амплитуда и частота ЭДС, создаваемых в фазах обмотки статора, сохраняются неизменными. Однако в каждое мгновение величина и направление действия ЭДС одной из фаз отличаются от величины и направления действия ЭДС двух других фаз. Это объясняется пространственным смещением фаз. Все явления во второй фазе повторяют явления в первой фазе, но с опозданием. Говорят, что ЭДС второй фазы отстает во времени от ЭДС первой фазы. Они, например, в разное время достигают своих амплитудных значений. Действительно, наибольшее значение ЭДС, наведенной в какой-либо фазе, будет в тот момент, когда центр полюса ротора проходит середину этой фазы. В частности, для момента времени, со-

ответствующего расположению ротора, показанному на рис. 29.1, электродвижущая сила первой фазы генератора будет положительной и максимальной. Положительное максимальное значение ЭДС второй фазы наступит позже, когда ротор повернется на угол 120° . Поскольку за один оборот двухполюсного ротора генератора происходит полный цикл изменения ЭДС, то время T одного оборота является периодом изменения ЭДС. Очевидно, что для поворота ротора на 120° необходимо время, равное одной трети периода ($T/3$).

Следовательно, все стадии изменения ЭДС второй фазы наступают позже соответствующих стадий изменения ЭДС первой фазы на одну треть периода. Такое же отставание в периодическом изменении ЭДС наблюдается в третьей фазе по отношению ко второй. Разумеется, что по отношению к первой фазе периодические изменения ЭДС третьей фазы совершаются с опозданием на две трети периода ($2/3 T$).

Путем придания соответствующей формы полюсам магнитов можно добиться изменения ЭДС во времени по закону, близкому к синусоидальному.

Трехфазный генератор служит источником питания как однофазных, так и трехфазных электрических устройств. Однофазные токоприемники, как известно, имеют два внешних зажима. К ним относятся, например, осветительные лампы, различные бытовые приборы, электросварочные аппараты, индукционные печи, электродвигатели с однофазной обмоткой.

Лабораторная работа

1. Трехфазный генератор.

§30. МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Отдельную фазу нагрузки в трехфазной цепи можно рассматривать как цепь однофазного переменного тока.

Мгновенные активные мощности фаз можно определить согласно выражению:

$$P_{\phi}(t) = u_{\phi}(t) \cdot i_{\phi}(t) \quad (30.1)$$

(в формуле индекс принадлежности определенной фазе опущен).

Суммарная мгновенная активная мощность трехфазной цепи будет равна:

$$P = P_a + P_b + P_c, \quad (30.2)$$

где p_a, p_b, p_c — мощности фаз a, b, c .

При симметричной нагрузке токи и напряжения во всех фазах одинаковые. Одинаковы также фазовые сдвиги между током и напряжением во всех фазах. Т.к. активная мощность определяется выражением, для активной мощности всей цепи получим:

$$P_{\phi}(t) = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi, \quad (30.3)$$

где $P_{\phi}(t)$ — активная мощность одной фазы;

φ — сдвиг между током и напряжением фазы.

Реактивная и полная мощности определяются так:

$$Q = 3 Q_{\phi} = 3 U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi \quad (30.4)$$

$$S = 3 S_{\phi} = 3 U_{\phi} I_{\phi} \quad (30.5)$$

Через линейные токи и напряжения мощности могут быть определены:

$$P = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi \quad (30.6)$$

$$Q = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \sin \varphi \quad (30.7)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \quad (30.8)$$

При несимметричной нагрузке суммарные мощности определяются как алгебраические суммы мощностей отдельных фаз. Активная мощность трехфазного приемника равна сумме активных мощностей фаз, что справедливо и для реактивных мощностей. Полная мощность трехфазной цепи будет равна:

$$S = S_a + S_b + S_c = U_a I_a + U_b I_b + U_c I_c = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (30.9)$$

Измерение активной мощности в трехфазных цепях производят с помощью трех, двух или одного ваттметров, используя различные схемы их включения. Схема включения ваттметров для измерения активной мощности определяется схемой сети (трех- или четырехпроводная), схемой соединения фаз приемника (звезда или треугольник), характером нагрузки (симметричная или несимметричная), доступностью нейтральной точки.

В случае, если нейтральный провод «звездной» схемы отсутствует или схема соединена в виде треугольника, применяют схему рис. 30.1 с использованием искусственной нейтральной точки n' . В этой схеме дополнительно в две фазы включают резисторы с сопротивлением $R = R_v$, (R_v – сопротивление обмотки ваттметра).

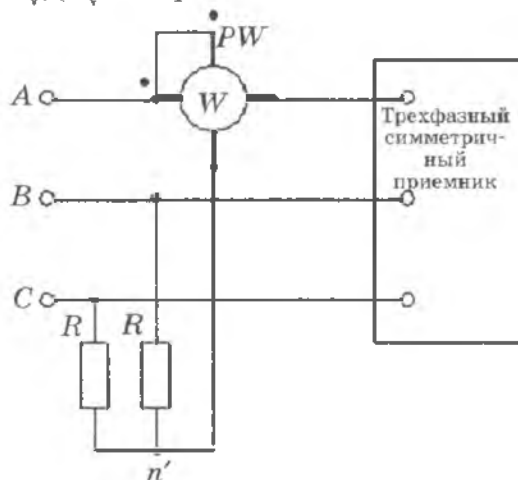


Рис. 30.1.

Измерение активной мощности симметричного приемника в трехфазной цепи одним ваттметром применяют только при полной гарантии симметричности трехфазной системы.

Активная мощность всего трехфазного приемника равна при этом утроенному показанию ваттметра: $P = 3 P_{\phi}$.

В трехпроводных трехфазных цепях при симметричной и несимметричной нагрузках и любом способе соединения приемников широко распространена схема измерения активной мощности приемника двумя ваттметрами (рис. 30.2). Показания двух ваттметров при определенной схеме их включения позволяют определить активную мощность трехфазного приемника, включенного в цепь с симметричным напряжением источника питания. На рис. 30.2 показана одна из возможных схем включения ваттметров: здесь токовые катушки включены в линейные провода с токами I_A и I_B , а катушки напряжения — соответственно на линейные напряжения U_{AC} и U_{BC} .

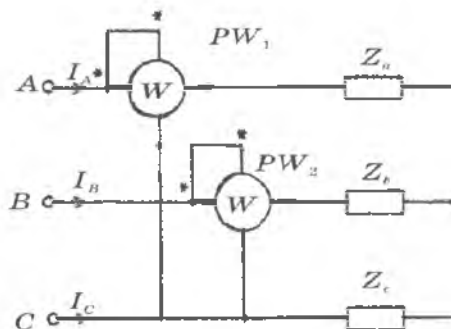


Рис. 30.2.

Сумма показаний ваттметров, включенных по схеме рис. 30.2, равна активной мощности P трехфазного приемника. Мгновенное значение общей мощности трехфазного приемника, соединенного звездой:

$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C. \quad (30.10)$$

Полученное выражение справедливо и при соединении потребителей треугольником.

Вопросы

1. Какой метод применяется для измерения активной мощности в трехфазной цепи при равномерной нагрузке?
2. Какой метод применяется для измерения активной мощности в трехфазной цепи при неравномерной нагрузке?
3. Что означает «искусственная нейтральная точка»?
4. Какова связь между полным и фазными мощностями?

§31. МОЩНОСТЬ ЦЕПИ, СОЕДИНЕННОЙ ПО СХЕМЕ «ЗВЕЗДА»

Активная мощность каждой фазы трехфазной звездной цепи:

$$P_a = U_a I_a \cos \varphi_a; P_b = U_b I_b \cos \varphi_b; P_c = U_c I_c \cos \varphi_c. \quad (31.1)$$

Полная активная мощность трехфазного приемника:

$$P = P_a + P_b + P_c, \quad (31.2)$$

где $U_a, U_b, U_c; I_a, I_b, I_c$ — фазные напряжения и токи;

$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ — углы сдвига фаз между напряжением и током в соответствующей фазе.

Реактивная мощность соответственно равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз:

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c, \quad (31.3)$$

где

$$Q_a = U_a I_a \sin \varphi_a; Q_b = U_b I_b \sin \varphi_b; Q_c = U_c I_c \sin \varphi_c. \quad (31.3)$$

Полная мощность отдельных фаз:

$$S_a = U_a I_a; S_b = U_b I_b; S_c = U_c I_c. \quad (31.5)$$

Полная мощность трехфазного приемника:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (31.6)$$

При симметричной системе напряжений ($U_a = U_b = U_c = U_\phi$) и симметричной нагрузке ($I_a = I_b = I_c = I_\phi; \varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi$) фазные мощности равны $P_a = P_b = P_c = P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi$; $Q_a = Q_b = Q_c = Q_\phi = U_\phi I_\phi \sin \varphi$.

Активная мощность симметричного трехфазного приемника:

$$P = 3 P_\phi = 3 U_\phi I_\phi \cos \varphi. \quad (31.7)$$

Аналогично выражается и реактивная мощность:

$$Q = 3 Q_\phi = 3 U_\phi I_\phi \sin \varphi. \quad (31.8)$$

Полная мощность:

$$S = 3 S_{\phi} = 3 U_{\phi} I_{\phi} \quad (31.9)$$

Соотношения между фазными напряжениями и токами:

$$U_{\phi} = U_{л} / \sqrt{3}, \quad I_{\phi} = I_{л} \quad (31.10)$$

Полная активная мощность:

$$P = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi \quad (31.11)$$

При несимметричной нагрузке в четырехпроводной цепи активную мощность измеряют тремя ваттметрами (рис. 31.1), каждый из которых измеряет мощность одной фазы — фазную мощность.

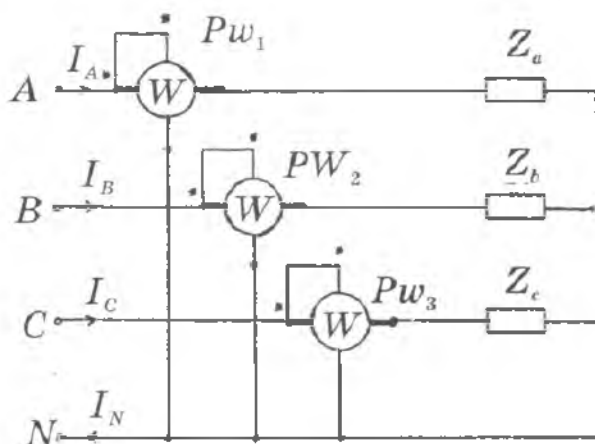


Рис. 31.1.

Активную мощность приемника определяют по сумме показаний трех ваттметров:

$$P = PW_1 + PW_2 + PW_3 \quad (31.12)$$

При симметричном приемнике и доступной нейтральной точке активную мощность приемника определяют

с помощью одного ваттметра, что является безусловным преимуществом по сравнению со схемой без нейтральной точки. Измеряют активную мощность одной фазы P_ϕ по схеме рис. 31.2. Активная мощность всего трехфазного приемника равна при этом утроенному показанию ваттметра: $P = 3 P_\phi$.

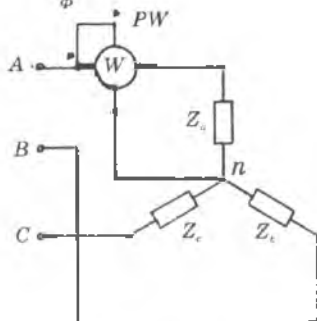


Рис. 31.2.

Задачи

1. Активная мощность потребителя на рис. 31.3 $P=4950$ Вт, линейное напряжение сети $U_\Delta = 380$ В, токи $I_A = 10$ А, $I_B = 5$ А, а коэффициенты мощности фаз соответственно $\cos\varphi_A=1$, $\cos\varphi_B=0,5$, $\cos\varphi_C=0,5$. Каковы ток I_C , сопротивления R_C , x_L и реактивная мощность Q потребителя?

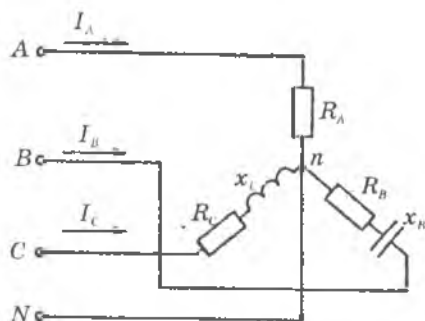


Рис. 31.3.

2. Освещение здания питается от четырехпроводной трехфазной сети с линейным напряжением $U_{л} = 380$ В. Первый этаж питается от фазы «А» и потребляет мощность 1760 Вт, второй – от фазы «В» и потребляет мощность 2200 Вт, третий – от фазы «С», его мощность 2640 Вт. Составить электрическую схему цепи, рассчитать токи, потребляемые каждой фазой, и ток в нейтральном проводе, вычислить активную мощность всей нагрузки.

3. Три одинаковых резистора $R_A = R_B = R_C = 10$ Ом соединены звездой и подключены к источнику с $U_{л} = 220$ В. Найти токи в схеме в исходном режиме и при обрыве провода «А» при работе с нейтральным проводом и без него. Найти активную мощность исходного режима.

4. Трехфазный симметричный потребитель соединен по схеме трехпроводного соединения «звезда» (рис. 31.4). Параметры элементов фазы, соединенных последовательно: $R_{\phi} = 30$ Ом, $L_{\phi} = 254,7$ мГн, $C_{\phi} = 79,6$ мкФ. Действующее значение линейного напряжения $U_{л} = 173$ В, частота 50 Гц. Определить фазные и линейные токи, значения активной, реактивной и полной мощностей в симметричном режиме и при обрыве провода одной из фаз.

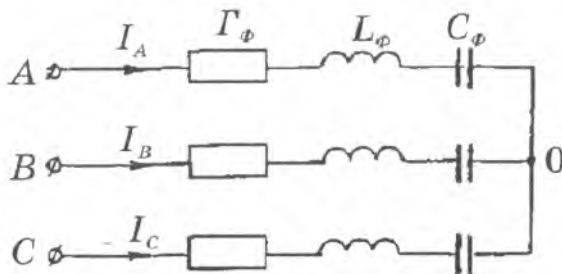


Рис. 31.4.

Вопросы

1. Как определяются активные мощности фаз трехфазной «звездной» цепи?
2. В каких случаях наличие четвертого провода в трехфазной электрической системе дает существенные преимущества?
3. Сколько ваттметров достаточно для измерения активной мощности в симметричной четырехпроводной трехфазной цепи?
4. Сколько ваттметров нужно для измерения активной мощности трехфазной нагрузки в четырехпроводной цепи? Как они включаются?
5. Как определяются реактивные мощности фаз трехфазной «звездной» цепи?

Лабораторная работа

1. Определение мощности.

§32. МОЩНОСТЬ ЦЕПИ, СОЕДИНЕННОЙ ПО СХЕМЕ «ТРЕУГОЛЬНИК»

В несимметричной нагрузке активная мощность трехфазного приемника по схеме «треугольник» равна сумме активных мощностей отдельных фаз:

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}, \quad (32.1)$$

где
$$P_{ab} = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_{ab}; P_{bc} = U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_{bc}$$

$$P_{ca} = U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_{ca}, \quad (32.2)$$

где $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}; I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}$ — фазные напряжения и токи;
 $\varphi_{ab}, \varphi_{bc}, \varphi_{ca}$ — углы сдвига фаз между напряжением и током каждой фазы.

Реактивная мощность соответственно разна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз:

$$Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca}, \quad (32.3)$$

где
$$Q_{ab} = U_{ab} I_{ab} \sin \varphi_{ab}; Q_{bc} = U_{bc} I_{bc} \sin \varphi_{bc}$$

$$Q_{ca} = U_{ca} I_{ca} \sin \varphi_{ca}. \quad (32.4)$$

Полная мощность отдельных фаз:

$$S_{ab} = U_{ab} I_{ab}; S_{bc} = U_{bc} I_{bc}; S_{ca} = U_{ca} I_{ca} \quad (32.5)$$

Полная мощность трехфазного приемника:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (32.6)$$

При симметричной системе напряжений ($U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_{\phi}$) и симметричной нагрузке ($I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_{\phi}; \varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi$) фазные мощности равны между собой:

$$P_{ab} = P_{bc} = P_{ca} = P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi; \quad (32.7)$$

$$Q_{ab} = Q_{bc} = Q_{ca} = Q_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi. \quad (32.8)$$

Активная мощность симметричного трехфазного приемника:

$$P = 3 P_{\phi} = 3 U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi. \quad (32.9)$$

Аналогично выражается и реактивная мощность:

$$Q = 3 Q_{\phi} = 3 U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi. \quad (32.10)$$

Полная мощность:

$$S = 3 S_{\phi} = 3 U_{\phi} I_{\phi}. \quad (32.11)$$

Т.к. за номинальные величины обычно принимают линейные напряжения и токи, то мощности удобнее выражать через линейные величины U_L и I_L .

При соединении фаз симметричного приемника треугольником $U_{\phi} = U_L, I_{\phi} = I_L / \sqrt{3}$. Поэтому независимо от схемы соединения фаз приемника активная мощность при симметричной нагрузке определяется одной и той же формулой:

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi, \quad (32.12)$$

где U_L и I_L — линейное напряжение и ток;
 φ — фазовый сдвиг между ними.

Обычно для симметричной цепи индексы «л» и «ф» не указывают, и формула принимает вид:

$$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi \quad (32.13)$$

Соответственно реактивная мощность:

$$Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi. \quad (32.14)$$

и полная мощность:

$$S = \sqrt{3} U I. \quad (32.15)$$

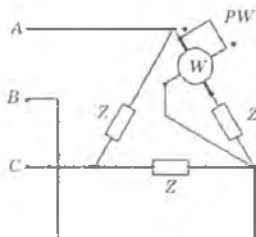


Рис. 32.1.

При симметричном приемнике активную мощность приемника определяют с помощью одного ваттметра, измеряя активную мощность одной фазы P_ϕ по схеме рис. 32.1. Активная мощность всего трехфазного приемника равна при этом утроенному показанию ваттметра: $P = 3PW = 3 \cdot P_\phi$.

Задачи

1. В трехфазную сеть с $U_\Delta = 380$ В включен соединенный треугольником трехфазный асинхронный двигатель мощностью $P = 5$ кВт, КПД двигателя равен $\eta_H = 90\%$, коэффициент мощности $\cos \varphi_H = 0,8$. Определить фазные и линейные токи двигателя, если активное и реактивное сопротивления его фазы соответственно равны: R_ϕ , X_ϕ .

2. К источнику с $U_\Delta = 220$ В подключена соединенная треугольником осветительная сеть. Распределение нагрузки по фазам: $P_{AB} = 2200$ Вт, $P_{BC} = 3300$ Вт, $P_{CA} = 4400$ Вт. Вычислить активную мощность, потребляемую схемой из сети, фазные и линейные токи приемников.

3. В трехфазную сеть с $U_\Delta = 380$ В включен по схеме треугольник асинхронный двигатель, имеющий $Z_\phi = 19$ Ом, $\cos \varphi_\phi = 0,8$. Найти линейные токи и активную мощность, потребляемую двигателем из сети. Построить векторную диаграмму.

4. Трехфазная печь включена в сеть с $U_\Delta = 380$ В по схеме «треугольник». Найти линейный ток и мощность печи, если $R_\phi = 10$ Ом.

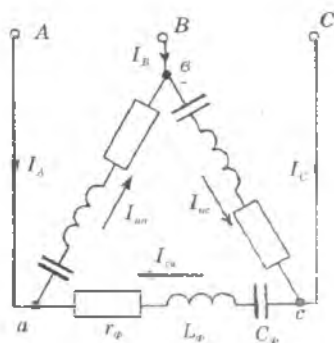


Рис. 32.1

5. Трехфазный симметричный потребитель соединен по схеме «треугольник» (рис. 32.2). Параметры элементов фазы, соединенных последовательно друг с другом: $R_\phi = 30$ Ом, $L_\phi = 127,3$ мГн, $C_\phi = 39,8$ мкФ, линейное напряжение 200 В, частота 50 Гц. Определить фазные и линейные токи, значения активной, реактивной и полной мощностей в симметричном режиме.

Вопросы

1. Как вычислить активную, реактивную и полную мощности симметричной трехфазной нагрузки цепи, соединенной по схеме «треугольник»?

2. Как вычисляются активные, реактивные и полные мощности фаз при несимметричной нагрузке цепи, соединенной по схеме «треугольник»?

3. Сколько ваттметров используют при измерении активной мощности в трехпроводных трехфазных сетях? Как они включаются?

4. В каких случаях можно измерить мощность трехфазной нагрузки одним ваттметром? Как его включить?

5. Как измерить активную мощность трехпроводной цепи?

Лабораторная работа

1. Определение мощности.

§33. СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Синхронный двигатель потребляет энергию из сети и преобразует ее в механическую энергию.

Синхронные двигатели имеют постоянную частоту вращения, поэтому используются там, где нет необходимости в регулировании частоты или где необходимо обеспечить ее постоянство. Двигатели большой мощности применяют на металлургических заводах, в шахтах и т.д. Специальные синхронные микродвигатели используются в автоматике, звукозаписи, в самопишущих приборах и других случаях. Конструкция всех синхронных машин одинакова.

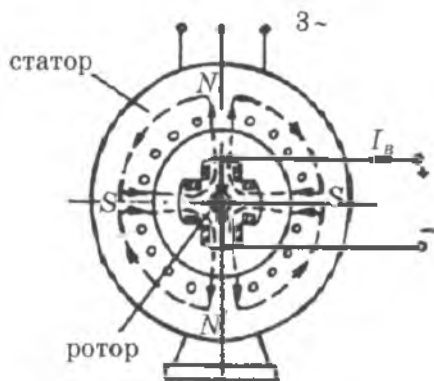


Рис. 33.1.

Отличительная особенность синхронной машины заключается в том, что скорость вращения ее ротора равна скорости вращения магнитного поля статора и сохраняется постоянной независимо от нагрузки. Это достигается тем, что ротор синхронной машины представляет собой электромагнит или постоянный магнит с числом пар полюсов, равным числу пар полюсов вращающегося маг-

нитного поля. Взаимодействие данных полюсов обеспечивает постоянную угловую скорость вращения ротора независимо от момента на валу.

Статор (якорь) – неподвижная часть – устроен подобно статору асинхронной машины. В пазах статора располагается трехфазная распределенная обмотка. Обычно обмотку статора соединяют звездой. Сердечник статора набран из листов стали.

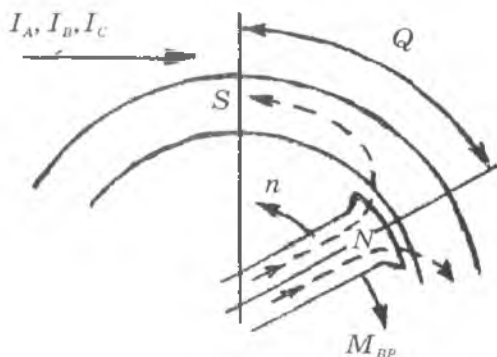


Рис. 33.2.

Ротор синхронной машины представляет собой электромагнит, возбуждаемый постоянным током I_B . Создаваемый этим током магнитный поток вращается с неизменной частотой. Концы обмотки возбуждения ротора выводят к двум контактным кольцам на валу. К ним прижимаются щетки, к которым присоединяется источник питания обмотки возбуждения. Электромагнит представляет собой сердечник с обмоткой возбуждения. Мощность для питания обмотки возбуждения составляет 1-3% от всей мощности машины.

Момент машины при этом является движущим, а не тормозящим, как в режиме генератора. Если к ротору приложить вместо вращающего тормозной момент механической нагрузки противодействующий момент $M_{вp}$, то ось полюсов ротора повернется на некоторый угол Q

относительно оси полюсов статора против направления движения.

Возникшие токи в обмотках статора создадут электромагнитные силы взаимодействия токов статора и магнитного поля ротора в направлении вращения, но на этот раз они содействуют ротору, увлекая его в направлении вращения. При некотором значении $Q = const$ наступает некоторое равновесие $M = M_{вр}$.

Электромагнитный момент синхронного двигателя (Н·м):

$$M = \frac{3E_{оф}U_{\phi}}{\omega_{o}x_c} \sin \theta = M_{max} \sin \theta, \quad (33.9)$$

где $E_{оф}$ – фазная ЭДС обмотки статора, обусловленная магнитным потоком ротора, В;

U_{ϕ} – фазное напряжение сети, В;

ω_o – скорость вращения ротора, 1/с;

x_c – синхронное реактивное сопротивление, Ом;

θ – угол сдвига между напряжением сети и ЭДС;

M_{max} – максимальный момент двигателя, Н·м.

Способы пуска синхронных двигателей

Пуск двигателей непосредственным включением в сеть невозможен. В момент включения ротор неподвижен. Так как разноименные полюса будут стремиться расположиться друг против друга, возникает знакопеременный момент, действующий со стороны статора на ротор. Для пуска необходимо предварительно разогнать ротор до скорости, близкой к скорости вращения поля статора. Для пуска двигателя используют дополнительный двигатель для разгона ротора. Используют также асинхронный пуск синхронного двигателя. С этой целью ротор снабжен пусковой обмоткой, подключаемой во время пуска к резистору (рис. 33.3). При разгоне двигатель работает как асинхронный. Когда ротор разгонится до скорости поля статора, обмотку подключают к источнику постоянного напряжения.

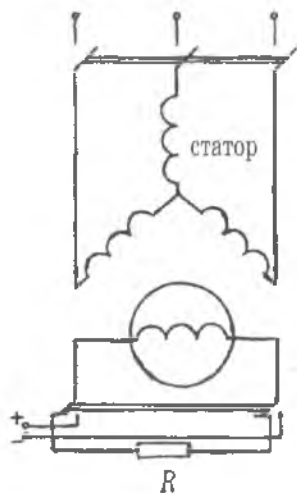


Рис. 33.3.

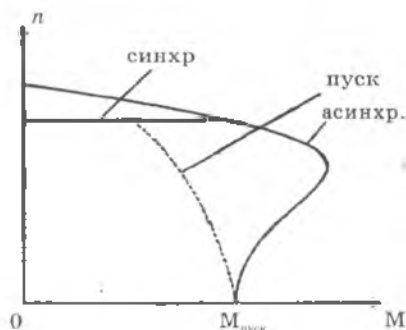


Рис. 33.4.

Выводы:

1. Отличительная особенность синхронного двигателя – скорость вращения ротора равна скорости вращения поля статора.
2. Используется как генератор, преобразующий механическую энергию в электрическую энергию трехфазного напряжения.
3. Скорость двигателя не зависит от момента нагрузки и равна синхронной скорости.

Задачи

1. Синхронный двигатель вращает рабочий механизм (РМ). На рис. 33.5 показано расположение полюсов ротора N_p, S_p и статора S_c, N_c двигателя. (Полюса статора для наглядности изображены в виде постоянных магнитов, на самом деле они являются неявными.) В каком из перечисленных признаков двигательного режима синхронной машины допущена ошибка:

– полюса ротора N_p, S_p отстают на угол θ от полюсов статора S_c, N_c ;

- момент двигателя M является движущим;
- двигатель превращает электрическую энергию в механическую энергию PM ;
- частота вращения ротора π и его полюсов N_p, S_p меньше частоты вращения полюсов статора S_c, N_c .

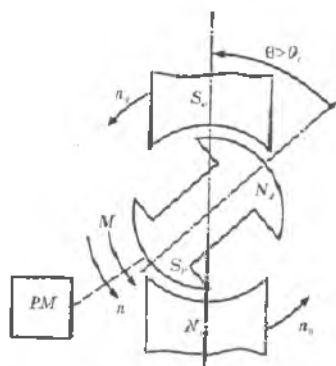


Рис. 33.5.

2. Как зависит максимальный момент M_{max} и угол θ от тока возбуждения I_B при работе синхронного двигателя с номинальным моментом на валу?

3. На рис. 33.6 приведена одна из схем пуска синхронного двигателя. Для чего обмотка возбуждения (ОВ) в этой схеме на время пуска замыкается на резистор R_n ?

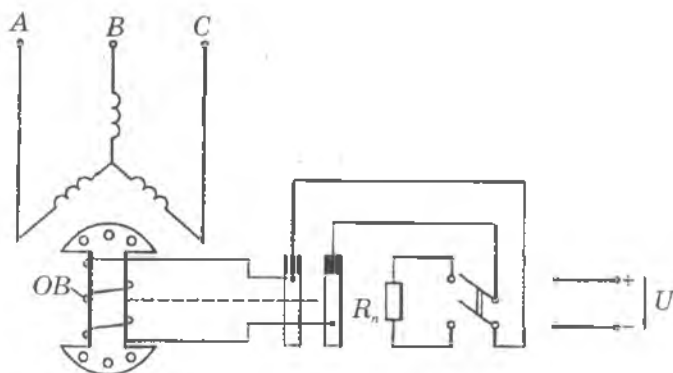


Рис. 33.6.

Вопросы

1. Какая из показанных на рис. 33.7 характеристик 1...3 является механической характеристикой синхронного двигателя?

2. Почему синхронный двигатель без дополнительной пусковой обмотки на роторе не развивает на валу начального пускового момента?

3. Почему невозможен пуск синхронного двигателя непосредственным включением в сеть?

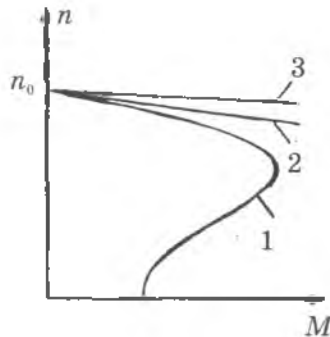


Рис. 33.7.

4. Как вычисляется электромагнитный момент синхронного двигателя?

5. В каком промежутке времени синхронный двигатель показывает свойство асинхронного двигателя?

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов В.Г. Электротехника. – М.: Высшая школа, 1993.
2. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1999.
3. Иванов И.И., Равдоник В.С. Электротехника. – М.: Высшая школа, 1984.
4. Пантюшина В.С. Электротехника. – М.: Высшая школа, 1976.
5. Волынский Б.А., Зейн Е.Н., Шатерников В.Н. Электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
6. Кацман М.М. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 2000.
7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. – М.: Высшая школа, 1978.
8. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. – М.: Энергоатомиздат, 1977.
9. Глебов И.А. и др. Электрические машины. – М., Энергоатомиздат, 1984.
10. Жданов Л.С., Жданов Г.Л. Физика: Учебник для средних специальных учебных заведений. – М.: Высшая школа, 1995.
11. Дмитриева В.Ф. Физика: Учебное пособие для средних специальных учебных заведений. – М.: Высшая школа, 2001.
12. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
13. Нейман Л.Р., Дениргян К.С. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1981.
14. Ионкин П.А. и др. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1981.
15. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушин А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 1989.
16. Матхомов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи. – М.: Высшая школа, 1990.

17. Сборник задач и упражнений по ТОЭ / П.А. Ионкина. – М.: Энергоиздат, 1982.
18. Шебес М.Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. – М.: Высшая школа, 1989.
19. Бахрах В.Н. и др. Теоретические основы электротехники. – Пермь, 2000.
20. Немцов М.В. Электротехника и электроника: Учебник для вузов. – М.: Издательство МЭИ, 2003.
21. Кузовкин В.А. Теоретическая электротехника: Учебник. – М.: Логос, 2002. – 480с.
22. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004.
23. Прянишников В.А. Электроника: Полный курс лекций. – СПб.: КОРОНА принт, 2004.
24. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: Учитель и ученик, КОРОНА принт, 2002.

Содержание

Введение.....	3
§1. Процессы возникновения электрического сопротивления.....	5
§2. Процессы возникновения электрического тока.....	9
§3. Учебные электроизмерительные приборы.....	13
§4. Закон Ома.....	17
§5. Источники постоянного тока.....	21
§6. Различные схемы соединения постоянных источников ЭДС.....	25
6.1. Последовательное соединение источников ЭДС..	25
6.2. Параллельное соединение источников ЭДС.....	27
6.3. Смешанное соединение источников ЭДС ..	29
§7. Первый закон Кирхгофа.....	32
§8. Второй закон Кирхгофа.....	36
§9. Последовательное и параллельное соединение потребителей.....	40
9.1. Последовательное соединение потребителей.....	40
9.2. Параллельное соединение потребителей.....	42
§10. Смешанное соединение потребителей.....	46
§11. Однофазный синусоидальный ток.....	49
11.1. Генерация переменного тока.....	49
11.2. Действующие значения силы тока и напряжения.....	55
11.3. Мощность в цепи переменного тока.....	57
§12. Делитель напряжения.....	62
§13. Делитель напряжения на основе потенциометра.....	67
§14. Одинарный мост.....	72
§15. Цепь синусоидального тока с резистивным сопротивлением.....	76
§16. Цепь синусоидального тока с индуктивным сопротивлением.....	81
16.1. Катушка индуктивности.....	81
16.2. Индуктивное сопротивление.....	86
16.3. Мощность в цепи индуктивного сопротивления.....	88
16.4. Цепь с индуктивным и активным сопротивлениями.....	91

§17. Цепь синусоидального тока с емкостным сопротивлением	97
17.1. Процессы, протекающие в конденсаторе	97
17.2. Параметры процессов, протекающих в конденсаторе	100
17.3. Возникновение сдвига фаз	105
§18. Цепь синусоидального тока с последовательно соединенными резистивным, емкостным и индуктивным элементами	110
§19. Параллельные цепи синусоидального тока	118
19.1. Процессы, протекающие в параллельных цепях.....	118
19.2. Параллельное соединение резистора и конденсатора	123
19.3. Параллельное соединение резистора и катушки индуктивности	125
19.4. Параллельный колебательный контур.....	127
19.5. Сложные параллельные цепи.....	129
§20. Резонанс напряжений	134
§21. Резонанс токов	139
21.1. Принцип действия параллельного контура ...	139
21.2. Параметры процесса резонанса токов	141
§22. Однофазный трансформатор	145
22.1. Процессы, протекающие в трансформаторе ...	145
22.2. Опыт холостого хода трансформатора	147
22.3. Коэффициент полезного действия трансформатора	149
22.4. Опыт короткого замыкания	150
§23. Машины постоянного тока	154
23.1. Основные процессы, протекающие в машинах постоянного тока	154
23.2. Способы возбуждения машин постоянного тока	156
§24. Генератор постоянного тока	159
24.1. Генератор синусоидального тока.....	159
24.2. Генератор постоянного тока.....	160
24.3. Механические и электрические мощности ...	162
24.4. Устройство генератора постоянного тока	163

24.5. Способы включения обмоток возбуждения генератора	165
24.6. Параметры генератора постоянного тока	166
24.7. Характеристики ГПТ с независимым возбуждением.	167
§25. Двигатель постоянного тока	172
25.1. Принцип действия коллекторного двигателя постоянного тока	172
25.2. Устройство двигателя постоянного тока	174
25.3. Параметры двигателя постоянного тока	176
25.4. Схемы возбуждения двигателей постоянного тока	180
25.5. Характеристики ДПТ независимого возбуждения	181
§26. Соединение потребителей электроэнергии «звездой»	187
§27. Соединение потребителей электроэнергии «треугольником»	195
§28. Трехфазный асинхронный двигатель	202
28.1. Устройство трехфазного асинхронного двигателя	202
28.2. Принцип работы асинхронного двигателя	204
28.3. Параметры асинхронного двигателя	205
28.4. Рабочие напряжения асинхронного двигателя.....	208
§29. Трехфазные генераторы	211
29.1. Устройство трехфазного генератора	211
29.2. Принцип работы трехфазного генератора	213
§30. Мощности в трехфазных цепях	216
§31. Мощность цепи, соединенной по схеме «звезда»	220
§32. Мощность цепи, соединенной по схеме «треугольник»	225
§33. Синхронный двигатель	229
Литература	235

Серия «Профессиональное образование»

Айтимов А.

Катаев Е.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Учебное пособие

Редактор И. Бектемирова

Технический редактор Р. Турлынова

Художественный редактор Ж. Казанкапов

Художник-дизайнер Ж. Какенулы

Корректор А. Шаяхметова

Компьютерная верстка А. Скаковой

Подписано к печати 02.10.2010.

Формат 84x108¹/₃₂. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. п.л. 12,6. Тираж 1000 экз. Заказ №280*.

Издательство «Фолиант»

010000, г. Астана, ул. Ш. Айманова, 13

тел./факс: 39-60-70, 39-54-59, 39-72-49

Отпечатано в типографии

ТОО «Издательство «Фолиант»