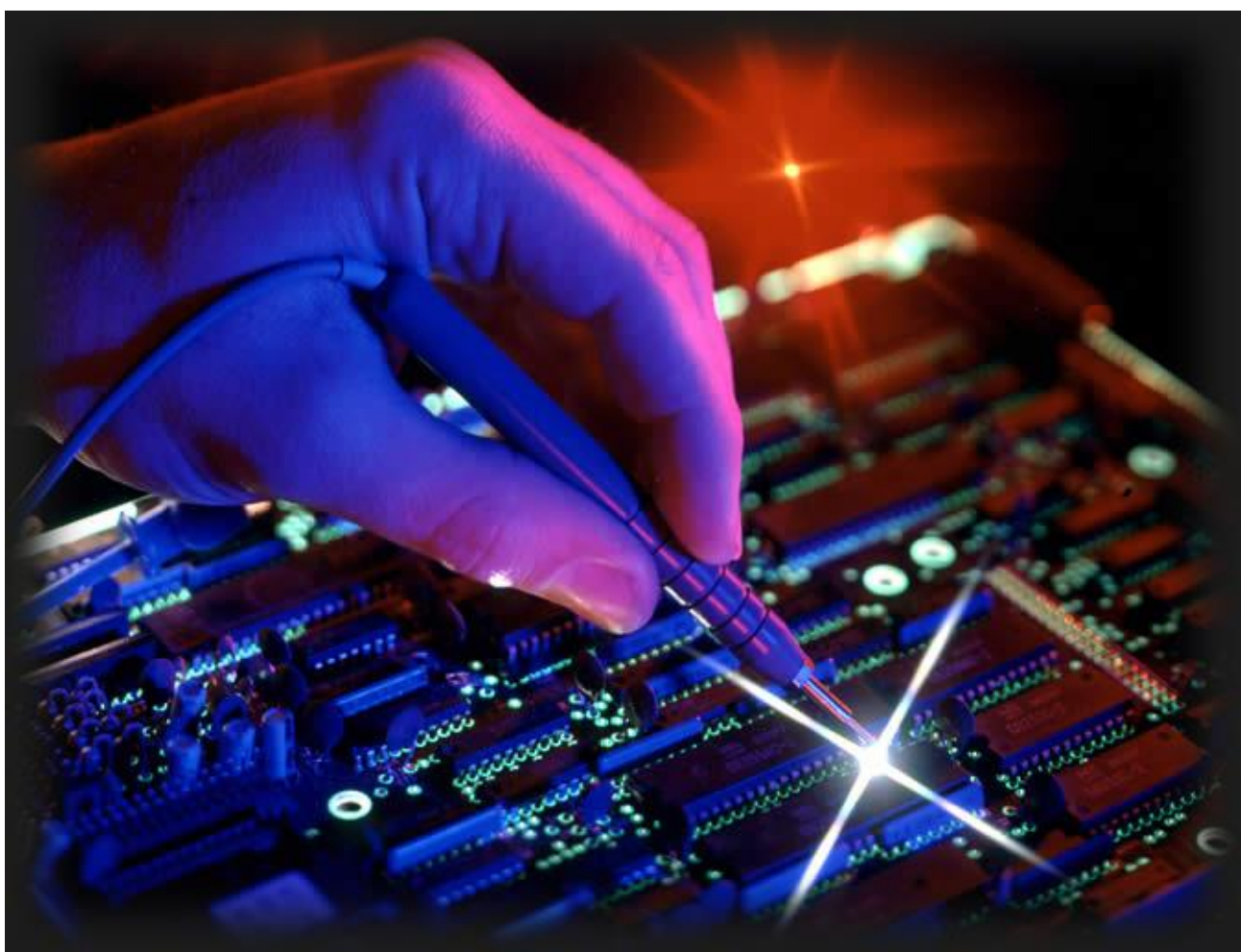


ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ КОМИТЕТ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ИНСТИТУТ ПОГРАНИЧНОЙ СЛУЖБЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ»

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ



Минск 2017

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ КОМИТЕТ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ИНСТИТУТ ПОГРАНИЧНОЙ СЛУЖБЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ»

В.В. Сивцевич
О.И. Луцевич
Ю.А. Гурвич

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Рекомендовано Государственным пограничным комитетом
Республики Беларусь в качестве учебного пособия для курсантов и слушателей
учреждений образования органов пограничной службы

Минск 2017

УДК 340.1
ББК 67.99
И 33

Авторы-составители:

старший преподаватель кафедры дисциплин обеспечения оперативно-служебной деятельности органов пограничной службы ГУО «Институт пограничной службы Республики Беларусь» подполковник *Сивцевич В.В.*

профессор кафедры дисциплин обеспечения оперативно-служебной деятельности органов пограничной службы ГУО «Институт пограничной службы Республики Беларусь», кандидат педагогических наук, доцент *Луцевич О.И.*

профессор кафедры дисциплин обеспечения оперативно-служебной деятельности органов пограничной службы ГУО «Институт пограничной службы Республики Беларусь», кандидат технических наук, доцент *Гурвич Ю.А.*

Рецензенты:

заместитель начальника 1-го Главного управления – начальник 2-го управления Государственного пограничного комитета Республики Беларусь полковник *Гирс А.О.*
кафедра специальных и инженерно-технических дисциплин факультета внутренних войск учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»

Сивцевич, В.В

И 33 Основы электротехники и радиоэлектроники : учеб. пособие / В.В. Сивцевич, О.И. Луцевич, Ю.А. Гурвич. – Минск : ГУО «ИПС РБ», 2017. – 180 с.

ISBN 978-985-6971-41-2.

Учебное пособие разработано в соответствии с учебной программой по дисциплине «Основы электротехники и радиоэлектроники» и предназначено для обучения курсантов и слушателей ГУО «Институт пограничной службы Республики Беларусь». Оно содержит учебный материал, необходимый для дальнейшего изучения технических средств охраны границы, средств связи, вооружения и техники органов пограничной службы.

**УДК 340.1
ББК 67.99**

ISBN 978-985-6971-41-2

Сивцевич В.В., 2017
© ГУО «ИПС РБ», 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.....	11
1.1 Общие сведения об электрических цепях и их элементах	11
1.1.1 Электрическая цепь, ее схема и основные законы электрической цепи	12
1.1.2 Режимы работы электрической цепи. Внешняя характеристика источника электрической энергии	15
1.1.3 Применение сигнальных электрических цепей постоянного тока для охраны локальных участков границы	17
1.2 Эквивалентные преобразования электрических цепей постоянного тока.....	22
1.2.1 Эквивалентные преобразования ЭЦ с последовательным соединением резисторов.....	22
1.2.2 Эквивалентные преобразования ЭЦ с параллельным соединением резисторов.....	24
1.2.3 Эквивалентные преобразования ЭЦ со смешанным соединением резисторов.....	25
1.3 Электрические цепи однофазного синусоидального тока.....	29
1.3.1 Синусоидальный переменный ток, способы его представления и параметры.....	29
1.3.2 Индуктивность, емкость и их свойства	33
1.3.3 Электрические цепи однофазного синусоидального тока с одним элементом R , L или C	35
1.4 Электрические цепи однофазного синусоидального тока с последовательным и параллельным соединением резистора и реактивного элемента.....	41
1.4.1 Цепь с активным сопротивлением и индуктивностью	41
1.4.2 Цепь с активным сопротивлением и емкостью	43
1.5 Электрический резонанс в электрических цепях однофазного синусоидального тока.....	45
1.5.1 Электрические цепи однофазного синусоидального тока с последовательным соединением R , L и C . Резонанс напряжения	46
1.5.2 Электрические цепи однофазного синусоидального тока с параллельным соединением R , L и C , резонанс тока.....	50
1.5.3 Использование резонансных свойств колебательного контура в средствах радиосвязи.....	52
1.6 Трехфазные электрические цепи.....	53
1.6.1 Общие сведения о трехфазной электрической цепи.....	53
1.6.2 Способы соединения фаз трехфазного источника и трехфазной нагрузки.....	56
1.6.3 Трехфазная ЭЦ типа «звезда-звезда», «треугольник-треугольник» и их параметры.....	57
1.7 Электрические измерительные приборы.....	62

1.7.1 Классификация электроизмерительных приборов, погрешности измерений.....	62
1.7.2 Электроизмерительные приборы непосредственной оценки.....	65
1.7.3 Порядок измерения.....	74
1.8 Устройство и принцип действия электрических машин постоянного тока	76
1.8.1 Общие сведения об электрических машинах постоянного тока, их классификация и устройство.....	76
1.8.2 Принцип действия генератора постоянного тока, уравнения, описывающие его работу.....	79
1.8.3 Принцип действия двигателя постоянного тока, уравнения, описывающие его работу.....	86
1.9 Трансформаторы	94
1.9.1 Общие сведения о трансформаторах.....	94
1.9.2 Устройство, принцип действия и параметры трансформаторов.....	95
1.9.3 Применение трансформаторов в сигнализационных комплексах С-175М и КС-185.....	99
1.10 Электрические машины переменного тока	101
1.10.1 Асинхронные машины переменного тока, устройство и принцип действия.....	101
1.10.2 Синхронные машины переменного тока, устройство и принцип действия.....	116
2. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ.....	119
2.1 Полупроводниковые приборы	119
2.1.1 Физические свойства полупроводников	119
2.1.2 Электронно-дырочный переход и его свойства.....	130
2.1.3 Полупроводниковые диоды и стабилитроны, их вольт-амперные характеристики	133
2.2 Транзисторы. Интегральные микросхемы (ИМС)	138
2.2.1 Устройство, режимы работы и схемы включения биполярных и полевых транзисторов.....	138
2.2.2 Интегральные микросхемы. Степени интеграции, функциональное назначение, технология изготовления и система условных обозначений.....	146
2.3 Электрические источники и приемники света.....	154
2.3.1 Электрический разряд в газе	154
2.3.2 Применение тлеющего, искрового и дугового разрядов	158
2.3.3 Полупроводниковые фотоэлектрические приборы (фоторезисторы, фотодиоды, светодиоды).....	159
3. ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМОТЕХНИКИ	164
3.1 Полупроводниковые выпрямители	164
3.1.1 Общие сведения о выпрямителях. Однофазный однополупериодный выпрямитель, принцип работы и его параметры	165

<i>3.1.2 Мостовые выпрямители, схемы, принцип действия и параметры выпрямителей</i>	166
<i>3.1.3 Применение полупроводниковых выпрямителей в системах электропитания</i>	169
<i>3.2 Усилители электрических сигналов</i>	171
<i>3.2.1 Параметры и характеристики усилителей</i>	172
<i>3.2.2 Схемы усилителей на биполярных транзисторах и их свойства</i>	173
<i>3.2.3 Применение усилителей</i>	178
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	181

ВВЕДЕНИЕ

«Позавчера мы ничего не знали об электричестве, вчера мы ничего не знали об огромных резервах энергии, содержащихся в атомном ядре, о чем мы не знаем сегодня?»

Луи де Бройль

Электротехника – область науки и техники, которая занимается изучением электрических и магнитных явлений и их использованием в практических целях.

Можно выделить три основных направления электротехники:
 преобразование различных видов энергии в электрическую и обратно;
 электрохимическое взаимодействие различных веществ;
 обработка и передача информации.

В условиях научно-технического прогресса особенно отчетливо проявилась диалектическая связь науки, техники и производства. Наука стала непосредственной производительной силой, а научные достижения оказались в существенной степени зависящими от уровня развития и возможностей современных технологий.

Электроникой называют область науки, техники и производства, в которой разрабатываются принципы производства и совершенствования электронных приборов, методы их инженерного расчета и технологического обеспечения, способы создания электронных систем для нужд народного хозяйства.

Особое значение имеет применение современных электротехнических и электронных компонентов в системах обеспечения безопасности, в том числе пограничной и военной.

Широкое использование электронной аппаратуры обусловлено ее быстродействием, точностью, высокой чувствительностью, малым потреблением энергии, постоянно возрастающей экономичностью.

Электронные приборы составляют основу современных средств связи, автоматики, измерительной техники, энергообеспечения. Они помогают проникнуть в тайны микромира и космоса, измерить электрические потенциалы живой клетки и атомарные шероховатости обрабатываемой поверхности и передать массивы полученной информации на расстояния в десятки тысяч километров на Земле и за ее пределами. Эти приборы преобразуют солнечное излучение в электрическую энергию, питающую электронное оборудование в труднодоступных местах.

На основе электроники реален переход к полностью автоматизированному производству. Уже сейчас широко применяются станки с числовым программным управлением и промышленные роботы.

Качественным скачком в развитии электроники стало создание микросхем с последовательно и быстро увеличивающейся степенью интеграции электронных элементов: интегральных схем (ИС), больших интегральных схем (БИС), сверхбольших интегральных схем (СБИС). Перевод

цифровой вычислительной техники на электронную, а затем и микроэлектронную базу открыл перспективы дальнейшей автоматизации процессов управления вплоть до создания автоматов, наделенных элементами искусственного интеллекта.

В материалах учебного пособия в развернутом виде рассматриваются явления и процессы, лежащие в основе работы современных электронных устройств, широко используемых в охране Государственной границы. Целью данного учебного издания является формирование у обучающихся целостного представления об основах электротехники, понимания протекающих в электротехнических устройствах физических процессов и явлений.

Предлагаемый учебный материал имеет целью в доступной форме дать обучающимся основные сведения из важнейших разделов электротехники и электроники.

К числу важных областей науки и техники, достижения которых играют ключевую роль в создании инфраструктуры информатизации, относится радиоэлектроника. Именно достижения радиоэлектроники явились основой функциональной и структурной организации современных коммуникационных систем и вычислительных сетей, обеспечивающих пользователям широкий набор информационно-вычислительных услуг с доступом к удаленным машинным ресурсам, технологиям и базам данных.

Современная радиоэлектроника - это собирательное название ряда областей науки и техники, связанных с передачей и преобразованием информации на основе генерирования и преобразования электромагнитных колебаний радиочастотного диапазона. Основными из них являются радиотехника и электроника.

Главная задача радиотехники состоит в передаче информации на расстояние с помощью электромагнитных колебаний. В более широком смысле современная радиотехника - область науки и техники, связанная с генерацией, усилением, преобразованием, обработкой, хранением, излучением и приемом электромагнитных колебаний радиочастотного диапазона, используемых для передачи информации на расстояние. Радиотехника и радиоэлектроника тесно взаимосвязаны, и часто эти термины заменяют друг друга.

Современная радиоэлектроника появилась в результате поисков способов использования электрических явлений для передачи информации. Первые попытки были предприняты сразу после изобретения итальянским физиком и физиологом А. Вольта в 1800 году электрохимического источника тока. В 1801 году испанский инженер Ф. Сольва разработал идею использования электрохимии для телеграфирования, а в 1809 году немецкий врач С.Т. Земмерин построил такой телеграф. Русский электротехник и ученый П.Л. Шиллинг изобрел первый электромагнитный телеграф и продемонстрировал его в действии в 1832 году.

В конце XIX в. начались поиски путей создания электрической связи без проводов. Американец Д. Юз, английский инженер В. Пирс и знаменитый американский изобретатель Т.А. Эдисон применили для этой цели принципы электростатической и электромагнитной индукции. Дальность действия оказалась небольшой, и работы не получили дальнейшего развития.

Беспроволочная связь могла появиться только в результате исследований электромагнитного поля.

Основой радиотехники стали величайшие открытия, сделанные тремя выдающимися учеными. В 1831 году английский ученый Майкл Фарадей открыл закон электромагнитной индукции. Другой английский физик Джеймс Максвелл в 1873 году разработал теорию электромагнитного поля и описал законы распространения радиоволн. Теория Максвелла в 1887-1888 годах была экспериментально подтверждена немецким ученым Генрихом Герцем, доказавшим существование излучения электромагнитных волн и показавшим эффекты их распространения, отражения, преломления, интерференции и поляризации.

Теоретические разработки Фарадея и Максвелла стали основой для создания устройств регистрации электромагнитных волн (первых приемников).

7 мая 1895 года Александр Степанович Попов (1859-1906) на заседании Русского физико-химического общества в Петербурге продемонстрировал изобретенный им грозоотметчик - первый в мире радиоприемник, однако свое изобретение он не запатентовал.

В 1896 году А.С. Попов осуществил телеграфирование без проводов на расстояние 250 м., передав с помощью азбуки Морзе первую в мире радиограмму «Генрих Герц». В том же году А.С. Попов установил радиосвязь между кораблем «Россия» и берегом на расстоянии 5 км. В 1899 году он осуществил радиосвязь на расстоянии 52 км для обеспечения работ по спасению броненосца «Генерал-адмирал Апраксин», севшего на камни. В 1900 году на IV Всемирном электротехническом конгрессе в Париже А.С. Попову за изобретение радио были присуждены почетный диплом и золотая медаль.

Однако, как изобретатель радио в мире широко известен итальянец Гульельмо Маркони (1874-1937), применивший также электромагнитные волны для радиосвязи и запатентовавший грозоотметчик почти такой же конструкции, что и грозоотметчик А.С. Попова. В 1901 г. Маркони осуществил радиосвязь через Атлантический океан.

Изобретение радио вызвало необходимость создания чувствительных индикаторов и устройств усиления электрических колебаний. Работы русских, а также зарубежных ученых в течение XIX в. создали фундамент электроники. В 1904 году английский ученый Д.Э. Флеминг, используя разработки А.Н. Лодыгина и Т.А. Эдисона, изготовил первую электронную лампу - диод, которую начали применять в приемниках вместо механически нестабильных кристаллических детекторов (кристадинов). В 1907 году появилась первая усилительная электронная лампа - триод, которую изобрел Ли де Форест (США). Большое влияние на развитие электроники оказали работы А.Г. Столетова, А.С. Попова, К.Ф. Брауна, Д. Томсона, О.У. Ричардсона, А. Эйнштейна и других, выполненные в XIX-XX вв. В 1907 году русский ученый Б.Л. Розинг предложил использовать электронно-лучевую трубку для воссоздания изображений. Важный вклад в развитие электроники внесли русские ученые В.И. Коваленков, А.Д. Папалекси, М.А. Бонч-Бруевич, О.В. Лосев и другие.

Развитие радиоэлектроники в послевоенные годы (начиная с 50-х годов XX в.) тесно связано с появлением полупроводниковой электроники. В 1947 году американские исследователи Дж. Бардин и У. Браттейн создали и испытали первый германиевый точечный транзистор. В 1951 году У. Шокли продемонстрировал миру первый плоскостной транзистор, который получил впоследствии наиболее широкое распространение как n-p-n - транзистор.

В 1952 году У. Шокли выдвинул идею создания полевого транзистора с p-p-переходом в качестве управляющего затвора. Идею Шокли реализовал в 1958 году польский ученый С. Тешнер, работавший во Франции. В 1960 году Д. Кинг и М.Аттала создали полевой транзистор с изолированным затвором (МОП-транзистор). В 1960 году Д.Килби и Р.Найс (США) сообщили об изобретении интегральных схем, составляющих основу современной микро- и нанoeлектроники. Разработка полупроводниковых микропроцессоров и микроконтроллеров, развитие микропроцессорной техники позволили в конце XX в. Перевести радиоэлектронику на цифровую обработку информации.

Радиоэлектроника сегодня – это не только передача, прием и обработка огромных потоков сообщений (интернет, многоканальная космическая и мобильная связь, цифровое телевидение), но и решение больших по объему и сложных по содержанию вычислительных задач информационно-измерительной техники и автоматического управления производственными процессами, разработка и применение сложнейшей медицинской аппаратуры, разнообразных бытовых приборов и комплексов и т.п. Для эксплуатации и ремонта такой аппаратуры требуются специалисты, обладающие современными знаниями и навыками.

1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

1.1 Общие сведения об электрических цепях и их элементах

Электрической цепью называют совокупность устройств, предназначенных для получения, передачи, преобразования и использования электрической энергии. Электрическая энергия существует в виде электрических зарядов.

Электрическая цепь состоит из отдельных устройств – элементов электрической цепи.

Источниками электрической энергии являются электрические генераторы, в которых механическая энергия преобразуется в электрическую, а также первичные элементы и аккумуляторы, в которых происходит преобразование химической, тепловой, световой и других видов энергии в электрическую.

В потребителях электрической энергии происходит преобразование электрической энергии в полезную работу в виде механического движения, нагревания, излучения электромагнитных колебаний, в том числе света, электрохимических преобразований веществ.

Элементы электрической цепи принято характеризовать параметрами, которые проявляются при электрических взаимодействиях.

Электротехнические параметры определяют свойства элементов поглощать энергию из электрической цепи и преобразовывать ее в другие виды энергии (необратимые процессы), а также создавать собственные электрические или магнитные поля, в которых энергия способна накапливаться и при определенных условиях возвращаться в электрическую цепь.

Элементы электрической цепи постоянного тока задаются только одним параметром – *сопротивлением*. Сопротивление определяет свойство элемента поглощать энергию из электрической цепи и преобразовывать ее в другие виды энергии.

Источники и приемники в электрической цепи связаны между собой проводниками. Идеальный проводник не имеет сопротивления, и в нем не происходит никаких преобразований электрической энергии. Реальные проводники стараются сделать как можно меньшего сопротивления, чтобы по возможности вся энергия от источников поступала в приемники. Кроме электрических проводов, в это звено могут входить аппараты для включения и отключения цепи, приборы для измерения электрических параметров (амперметры, вольтметры), устройства защиты (предохранители), преобразующие устройства (трансформаторы) и др.

Любая электрическая цепь характеризуется величиной протекающего *тока*, *электродвижущей силой* источника (источников) и *напряжением* (напряжениями) на всей цепи и на каждом из ее элементов.

1.1.1 Электрическая цепь, ее схема и основные законы электрической цепи

Электрический ток

Явление направленного движения носителей заряда, сопровождаемое магнитным полем, называют полным электрическим током.

Полный электрический ток принято разделять на следующие основные виды: *ток проводимости, ток переноса и ток смещения.*

Электрическим током проводимости называют явление направленного движения свободных носителей электрического заряда в веществе.

Электрический ток, обусловленный направленным упорядоченным движением электронов, имеет место в проводниках первого рода (металлах) и полупроводниковых приборах. В проводниках второго рода – электролитах (водные растворы солей, кислот и щелочей) – электрический ток обусловлен движением положительных и отрицательных ионов, упорядочено перемещающихся под действием приложенного поля.

Электрическим током переноса называют явление переноса электрических зарядов заряженными частицами или телами, движущимися в свободном пространстве. Основным видом электрического тока переноса является движение в пустоте элементарных частиц, обладающих зарядом (движение свободных электронов в электронных лампах), движение свободных ионов в газоразрядных приборах.

Электрическим током смещения (током поляризации) называют упорядоченное движение связанных носителей электрических зарядов. Этот вид тока можно наблюдать в диэлектриках.

Рассмотрим подробнее ток проводимости.

В большинстве случаев причиной упорядоченного движения электрических зарядов является *электрическое поле*. При отсутствии электрического поля свободные электрические заряды совершают тепловое беспорядочное движение, в результате чего количество электричества, проходящего через любое сечение проводника, в среднем равно нулю.

Для количественной оценки электрического тока служит величина, называемая *силой тока*.

Сила тока численно равна количеству электричества, проходящего через поперечное сечение проводника в единицу времени:
$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Таким образом, сила тока характеризует расход электричества в единицу времени через данное сечение электрической цепи. В дальнейшем наряду с термином «сила тока» будем применять термин «ток». Очевидно, что ток определяется как упорядоченной скоростью носителей заряда (например, электронов), так и плотностью их потока.

Ток, неизменный во времени по значению и направлению, называют постоянным.

Единицей силы тока является ампер (А).

Сила тока равна 1 амперу (А), если через поперечное сечение проводника за 1 секунду (с) проходит электрический заряд в 1 кулон (Кл):

$$I[\text{A}] = \frac{q[\text{Кл}]}{t[\text{с}]}$$

За положительное направление тока принимают направление, в котором перемещаются положительные заряды, т.е. направление, противоположное движению электронов.

Наряду с силой тока важное значение имеет плотность тока J , равная количеству электричества, проходящего за 1 с через единицу поперечного сечения проводника. В однородном проводнике ток равномерно распределяется по сечению:

$$J = \frac{I}{S}$$

где J измеряется в А/мм^2 .

Плотность тока позволяет охарактеризовать проводник с точки зрения способности выдерживать ту или иную нагрузку. При достижении предельной плотности тока в проводнике выделяется столько тепла, что его материал может расплавиться.

Рассмотрим простейшую электрическую цепь (рис. 1) с источником электрической энергии E и потребителем R . Предположим, что в источнике какой-либо вид энергии преобразуется в электрическую. Это происходит за счет так называемых сторонних (не электрических) сил, которые производят внутри источника разделение зарядов. Если цепь оказывается замкнутой через потребителя, то разделенные заряды под действием возникшего электрического поля стремятся объединиться. Вследствие движения зарядов в цепи возникает ток, и в потребителе расходуется энергия, запасенная источником. Для количественной оценки энергетических преобразований в источнике служит величина, называемая *электродвижущей силой* (ЭДС).

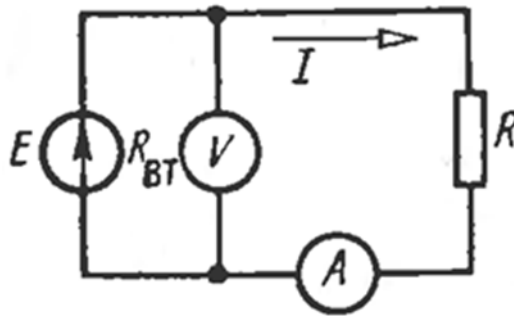


Рис.1 Схема простейшей электрической цепи

ЭДС E численно равна работе, которую совершают сторонние силы при перемещении единичного положительного заряда внутри источника, или сам источник, проводя единичный положительный заряд по замкнутой цепи.

Единицей ЭДС является вольт (В). Таким образом, ЭДС равна 1 В, если при перемещении заряда в 1 Кл по замкнутой цепи совершается работа в 1 Дж:

$$E [\text{В}] = \frac{A[\text{Дж}]}{q[\text{Кл}]}$$

Перемещение зарядов по участку цепи сопровождается затратой энергии.

Величину, численно равную работе, которую совершает источник, проводя единичный положительный заряд по данному участку цепи, называют *напряжением* U . Так как цепь состоит из внешнего и внутреннего участков,

разграничивают понятия напряжений на внешнем $U_{вн}$ и внутреннем $U_{вт}$ участках.

Из определений видно, что ЭДС источника равна сумме напряжений на внешнем и внутреннем участках цепи: $E = U_{вн} + U_{вт}$.

Эта формула выражает закон сохранения энергии для электрической цепи.

Измерить напряжения на различных участках цепи можно только при замкнутой цепи. ЭДС измеряют между зажимами источника при разомкнутой цепи.

Рассмотрим участок цепи длиной l и площадью поперечного сечения S (рис. 2).

Пусть проводник находится в однородном электрическом поле напряженностью $E = \frac{U}{l}$. Под действием этого поля свободные электроны проводника совершают ускоренное движение в направлении, противоположном вектору E . Движение электронов происходит до тех пор, пока они не столкнутся с ионами кристаллической решетки проводника.

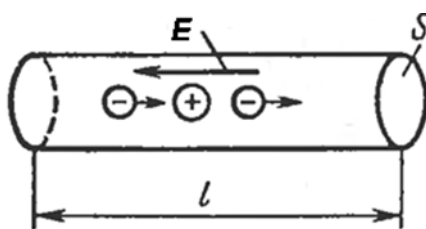


Рис.2 Участок электрической цепи в виде отрезка металлического проводника

При этом скорость электронов падает до нуля, после чего процесс ускорения электронов повторяется снова. Так как движение электронов равноускоренное, то их средняя скорость $v_{cp} = \frac{v_{max}}{2}$, где v_{max} – скорость электронов перед столкновением с ионами.

Очевидно, что скорость v_{max} прямо пропорциональна напряженности поля E , следовательно, и средняя скорость v пропорциональна E . Но ток и плотность тока определяются скоростью движения электронов в проводнике. Таким образом, $J = \gamma E$.

Коэффициент пропорциональности γ называют *удельной электрической проводимостью*. Он зависит от материала проводника и при данной температуре является постоянной величиной.

Преобразуем выражение $J = \gamma E$. Так как $J = \frac{I}{S}$, $E = \frac{U}{l}$,

а $\gamma = \frac{1}{\rho}$ (ρ – удельное сопротивление), то $\frac{I}{S} = \left(\frac{1}{\rho}\right) \left(\frac{U}{l}\right)$, откуда $I = \frac{U}{\rho l / S}$

Введя понятие сопротивления проводника через соотношение,

$\frac{\rho l}{S} = R$ (R – сопротивление проводника), окончательно получим $I = \frac{U}{R}$.

Данное выражение является *законом Ома* для участка цепи: *сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению, приложенному к этому участку и обратно пропорциональна сопротивлению.*

Приведенные рассуждения справедливы при условии, что γ , следовательно, и R – постоянные величины, т. е. для линейной цепи, характеризуемой зависимостью $I = (\frac{1}{R})U$, ток линейно зависит от напряжения.

Отсюда следует важный вывод:

закон Ома справедлив для линейных цепей ($R = const$).

Рассмотрим полную цепь (рис. 3). Согласно закону Ома для участка цепи $U=IR$, $U_{\text{вт}}=IR_{\text{вт}}$. Тогда в соответствии с законом сохранения энергии для электрической цепи $E=IR + IR_{\text{вт}}$. Отсюда $I = \frac{E}{(R + R_{\text{вт}})}$

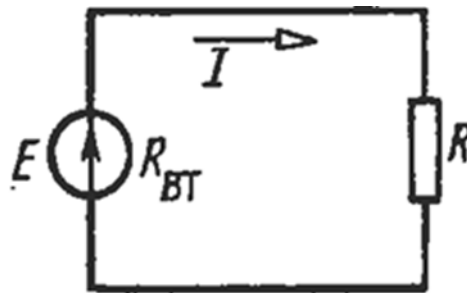


Рис.3 Полная электрическая цепь

Это выражение является законом Ома для всей цепи: *сила тока в цепи прямо пропорциональна ЭДС источника и обратно пропорционально сумме сопротивлений.*

1.1.2 Режимы работы электрической цепи. Внешняя характеристика источника электрической энергии

Из выражения $E = U + U_{\text{вт}}$, следует, что $U = E - IR_{\text{вт}}$, т.е. при наличии тока в цепи напряжение на ее зажимах меньше ЭДС источника на значение падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника.

При наличии электрического тока в проводниках движущиеся свободные электроны, сталкиваясь с ионами кристаллической решетки, испытывают противодействие своему движению. Это противодействие количественно оценивается сопротивлением цепи.

По закону Ома для участка цепи сила тока пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению:

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

За единицу сопротивления, Ом, принято сопротивление такого участка цепи, в котором устанавливается ток в 1 ампер (А) при напряжении в 1 вольт (В):

$$R[\text{Ом}] = \frac{U[\text{В}]}{I[\text{А}]}.$$

Производными единицами сопротивления являются килоом (кОм) и мегаом (МОм):

$$1 \text{ кОм} = 1000 \text{ Ом} = 10^3 \text{ Ом};$$

$$1 \text{ МОм} = 1\,000\,000 \text{ Ом} = 10^6 \text{ Ом} = 10^3 \text{ кОм}.$$

Проводники электрических цепей могут быть величиной сопротивления от десятых долей до десятков Ом. Потребители электроэнергии могут иметь

сопротивление от единиц до сотен Ом в зависимости от требуемой мощности. Сопротивление изоляции цепей должно быть по возможности очень большим, чтобы разделять электрические цепи, однако оно конечно и составляет десятки-сотни Мегаом и зависит от чистоты поверхности изолятора и влажности воздуха.

Сопротивление проводника R от зависит от его геометрии (длины l и поперечного сечения S) и свойств материала, из которого он изготовлен. Причем, с увеличением длины проводника сопротивление возрастает, а с увеличением площади сечения уменьшается. Свойства материала проводника учтем с помощью параметра ρ , который называют удельным сопротивлением:

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

Преобразовав эту формулу, получим $\rho = \frac{RS}{l}$.

По определению, удельное сопротивление ρ численно равно сопротивлению проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м² при температуре 20°С.

Единицей удельного сопротивления является Ом на метр (Ом·м). Значение ρ для металлов при такой единице очень мало. Поэтому для удобства расчетов поперечное сечение проводника берут в квадратных миллиметрах. Тогда единицей ρ будет Ом·мм²/м.

Значения удельных сопротивлений некоторых материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения удельных сопротивлений материалов

Материал	Удельное электрическое сопротивление ρ при температуре 20°С, Ом·мм ² /м	Среднее значение температурного коэффициента сопротивления в диапазоне изменения температуры 0-100°С, 1/°С
Медь	0.0175	0.004
Бронза	0.021-0.4	0.004
Алюминий	0.029	0.004
Вольфрам	0.056	0.00464
Латунь	0.07-0.08	0.002
Сталь	0.13-0.25	0.006
Константан	0.4-0.51	0.000005
Манганин	0.42	0.000006
Нихром	1.1	0.00015
Хромель	1.3	0.00004
Фехраль	1.4	0.00028

Для уменьшения потерь в проводах, соединяющих элементы электрических цепей, целесообразно применять материалы с минимальным удельным сопротивлением (медь, алюминий). При больших токах нагрузки приходится увеличивать сечение проводников. Передача энергии на большие расстояния также требует увеличения сечения проводников, или снижения протекающего в цепи тока за счет повышения напряжения при условии сохранения мощности.

При расчете электрических цепей иногда удобнее пользоваться не сопротивлением, а величиной, обратной сопротивлению, т. е. электрической проводимостью:

$$g = \frac{1}{R} = \frac{\gamma S}{l} = \frac{I}{U},$$

где $\gamma = \frac{1}{\rho}$ – удельная проводимость.

Единицей электрической проводимости является *сименс* (См):

$$g[\text{См}] = \frac{1}{R[\text{Ом}]}$$

Элементы электрической цепи, характеризующиеся сопротивлением R , называют *резистивными*.

1.1.3 Применение сигнальных электрических цепей постоянного тока для охраны локальных участков границы

Электрическая цепь, состоящая из ветвей с определенным сопротивлением, может использоваться как чувствительный элемент для построения приборов сигнализации, применяемых в охране границы.

Применение сигнальных электрических цепей постоянного тока для охраны локальных участков границы рассмотрим на примере сигнализационных приборов «Кристалл», «Трос».

Сигнализационный прибор «Кристалл» предназначен для проверки целостности токопроводящей сигнальной нити и фиксации ее обрыва путем выдачи звуковой и световой сигнализации с возможностью определения поврежденного фланга.

Один из вариантов применения прибора изображен на рис. 4.

Электропитание прибора осуществляется от батареи типа 3336Л напряжением 3,4..4,2 В. В качестве сигнальной нити используется стальной оцинкованный провод диаметром 0,3..0,5 мм, который подвешивается на высоте 70..100 см. над землей, заземляется в конце фланга и маскируется. Ток от источника питания (батареи) для каждого из флангов протекает по цепи: зажим фланга – сигнальная нить – заземлитель фланга – земля – заземлитель прибора – зажим заземления прибора.

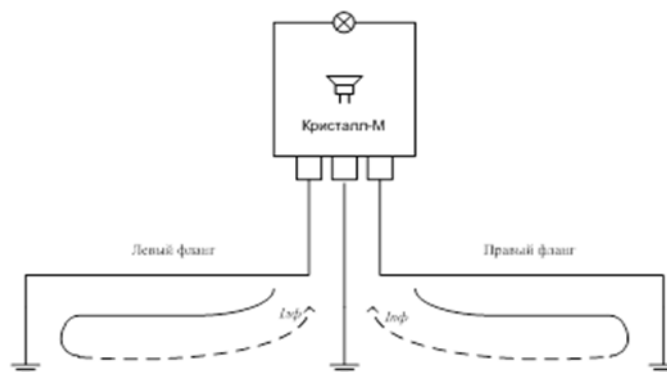


Рис.4 Вариант применения СП «Кристалл-М»

Если сигнальные линии левого и правого флангов целы, то по ним протекает постоянный ток от источника, световая и звуковая сигнализация прибора выключены.

При обрыве нарушителем сигнальной нити любого фланга цепь прохождения постоянного тока разрывается и прибор включает звуковую и световую сигнализацию. Слышимость звукового сигнала составляет до 20 м, видимость светового сигнала в ночное время до 300 м. Длина каждого фланга может достигать 1500 м.

На рисунке 5 представлена принципиальная схема прибора «Кристалл-М».

Схема прибора состоит из вентильного каскада, задающего генератора, двух ключевых каскадов включения световой и звуковой сигнализации и элементов грозозащиты.

Вентильный каскад выполнен на транзисторе МП14А (VT1) и предназначен для запуска блокинг-генератора при обрыве контрольного провода.

Задающий генератор выполнен на транзисторе 2Т203Б (VT2) по схеме генератора без нагрузки с индуктивной связью. Резистор R2 задает необходимый режим работы генератора.

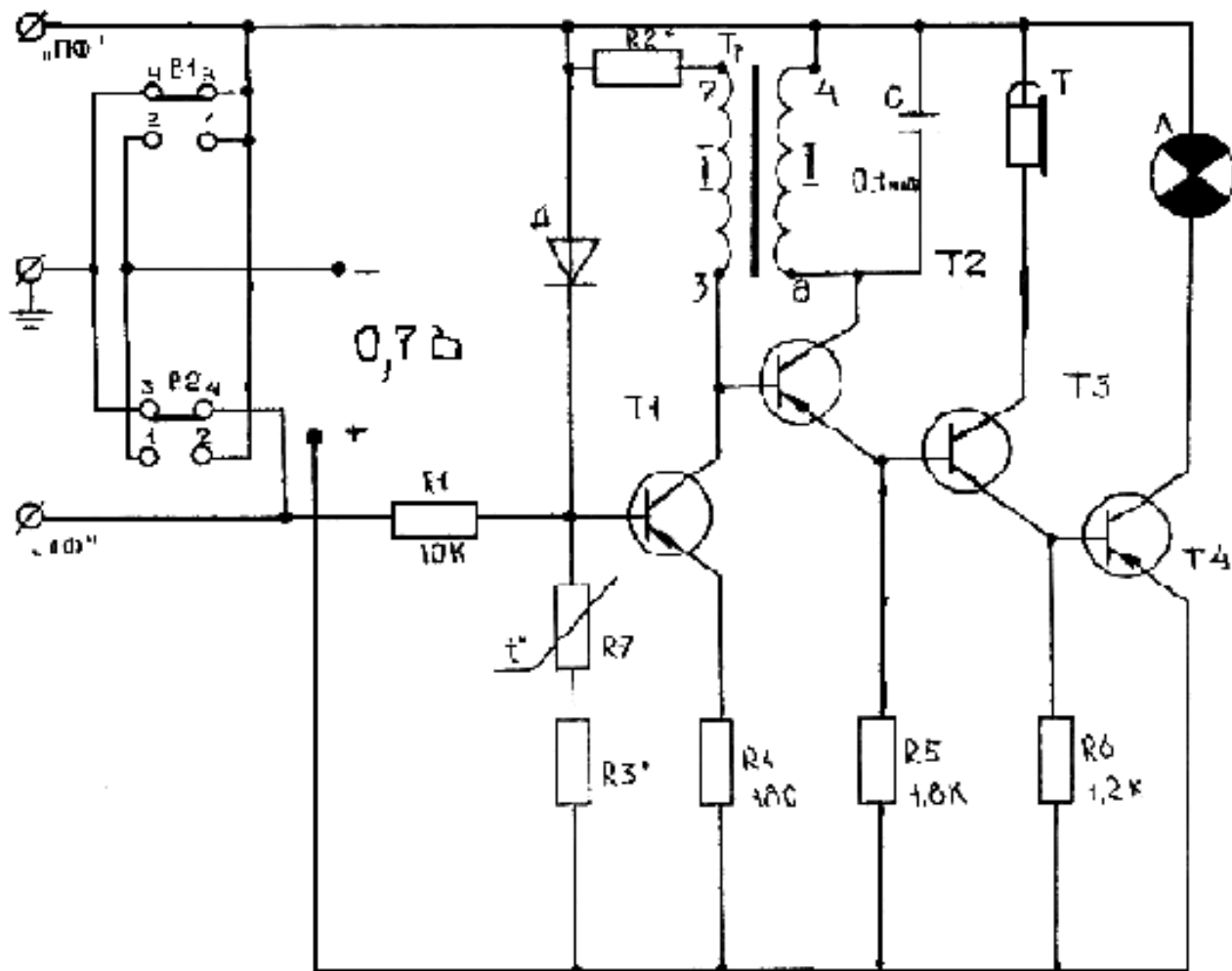


Рисунок 5 – Принципиальная схема прибора «Кристалл-М»

Конденсатор С включен параллельно второй обмотке трансформатора с целью уменьшения пиковых значений напряжений в коллекторной цепи транзистора.

Блокинг-генератор в нормальных климатических условиях обеспечивает частоту генерации в пределах 100 -350 Гц.

Ключевые каскады, выполненные на транзисторах типа МП26А и МП14А (VT3 и VT4), включены последовательно в эмиттерную цепь генератора и работают в режиме насыщения, что обеспечивает устойчивый режим работы при изменении питающего напряжения от 3,4 до 4,2 В.

Грозозащита прибора выполнена на стабилитроне типа 814Б (Д) и резисторе R1.

Резистор R1 является частью делителя, с которого снимается напряжение на базу транзистора VT1. Резистор R1 одновременно выполняет функции предохранителя и ограничителя тока через стабилитрон.

Терморезистор R7, включенный параллельно переходу эмиттер-база вентиляционного каскада, обеспечивает устойчивую работу устройства при изменении рабочей температуры в заданном интервале температур.

Прибор работает при подключении к нему контрольных проводов правого и левого флангов (к клеммам ПФ и ЛФ соответственно) и соединении клеммы « \perp » с заземлением.

Работа прибора характеризуется двумя рабочими состояниями: режимом «Контроля», когда целостность проводов не нарушена, и режимом «Подачи сигналов», когда один из контрольных проводов или оба провода оборваны.

Работа прибора в режиме контроля

Включение питания прибора осуществляется одновременным нажатием тумблеров В1 и В2 в положение «включено» (ВКЛ).

При исправных контрольных проводах обоих флангов на базу транзистора VT1 подается отрицательный относительно эмиттера потенциал по цепи: минус источника электропитания, контакты 1-2 тумблеров В1 и В2, клемма ПФ, контрольный провод правого фланга, контрольный провод левого фланга, клемма ЛФ, резисторы R1, R7, R3, плюс источника питания.

Транзистор VT1 открывается и переходит в насыщенное состояние; сопротивление его коллекторного и эмиттерного переходов уменьшается до незначительной величины и к базе транзистора VT2 прикладывается положительный потенциал источника электропитания, запирающий этот транзистор. Генератор не возбуждается. Звуковой и световой сигналы отсутствуют.

Работа прибора в режиме подачи сигналов

При обрыве контрольного провода одного из флангов подача отрицательного относительно эмиттера потенциала на базу транзистора VT1 прекращается. Транзистор VT1 запирается положительным потенциалом источника электропитания через резисторы R7, R3. Сопротивление переходов транзистора увеличивается, а на базу транзистора VT2 подается отрицательный потенциал. Таким образом создаются условия для самовозбуждения генератора.

Развиваемое генератором напряжение частотой 100 - 350 Гц подается на вход эмиттерного повторителя VT3, затем на базу транзистора VT4, включенного по схеме с общим эмиттером. Транзистор VT4 работает в режиме переключения.

Нагрузкой транзистора VT3 является телефон ТА-56М. Нагрузкой VT4 является сигнальная лампа типа МН 2,5 - 0,68. Звучание телефона и горение сигнальной лампы сигнализируют об обрыве сигнального провода.

Для определения фланга, на котором произошел обрыв контрольного провода, поочередно нажимают тумблеры В1 и В2 в положение ПФ и ЛФ. Через контакты 3 - 4 одного из тумблеров и заземленную клемму искусственно восстанавливается цепь оборванного контрольного провода, и прибор переходит в режим контроля линии, описанный выше.

Прекращение звуковой и световой сигнализации при установке тумблера В1 в положение ПФ или тумблера В2 в положение ЛФ указывает на наличие обрыва контрольного провода соответственно на правом или левом флангах.

Сигнализационный прибор «Трос» (рис. 6, 7) выдает прерывистый звуковой сигнал при обрыве сигнальной нити, рекомендуемая длина которой 30..150 м. Нить представляет собой микропровод, состоящий из двух изолированных лаком тонких медных жил. Цвет лака может быть зеленым или белым, чтобы использовать его в разных условиях (летом в растительности и зимой на снегу).

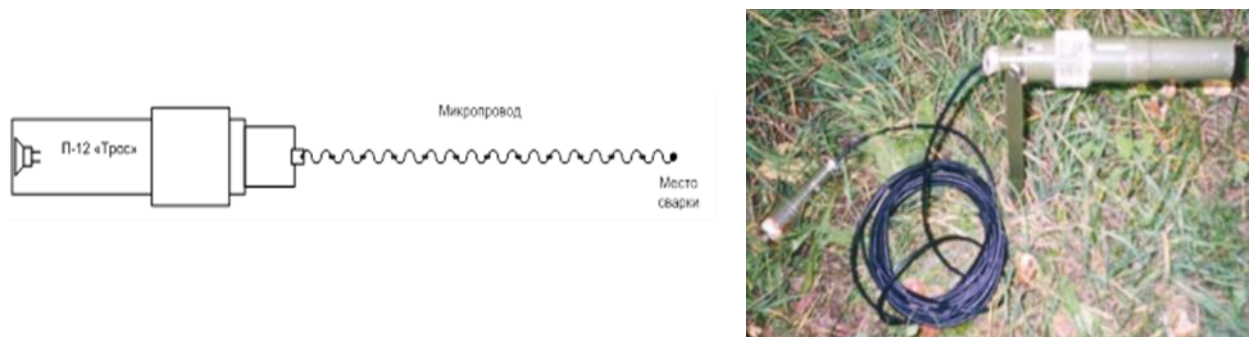


Рисунок 6 – СП «Трос»

Чтобы замкнуть цепь для прохождения тока, необходимо обжечь конец провода пламенем спички или зажигалки. Медные жилы оплавятся и сварятся между собой маленьким шариком меди. Если теперь включить питание прибора, то он выдаст одиночный короткий звуковой сигнал, подтверждающий его работоспособность. Постоянный ток в линии протекает от прибора по одной жиле до места сварки и возвращается по другой. Если нарушитель оборвет микропровод, то протекание тока прекратится и прибор выдаст прерывистый звуковой сигнал. Ток в микропроводе создается источником питания – одним элементом 373 напряжением 1,5 В.

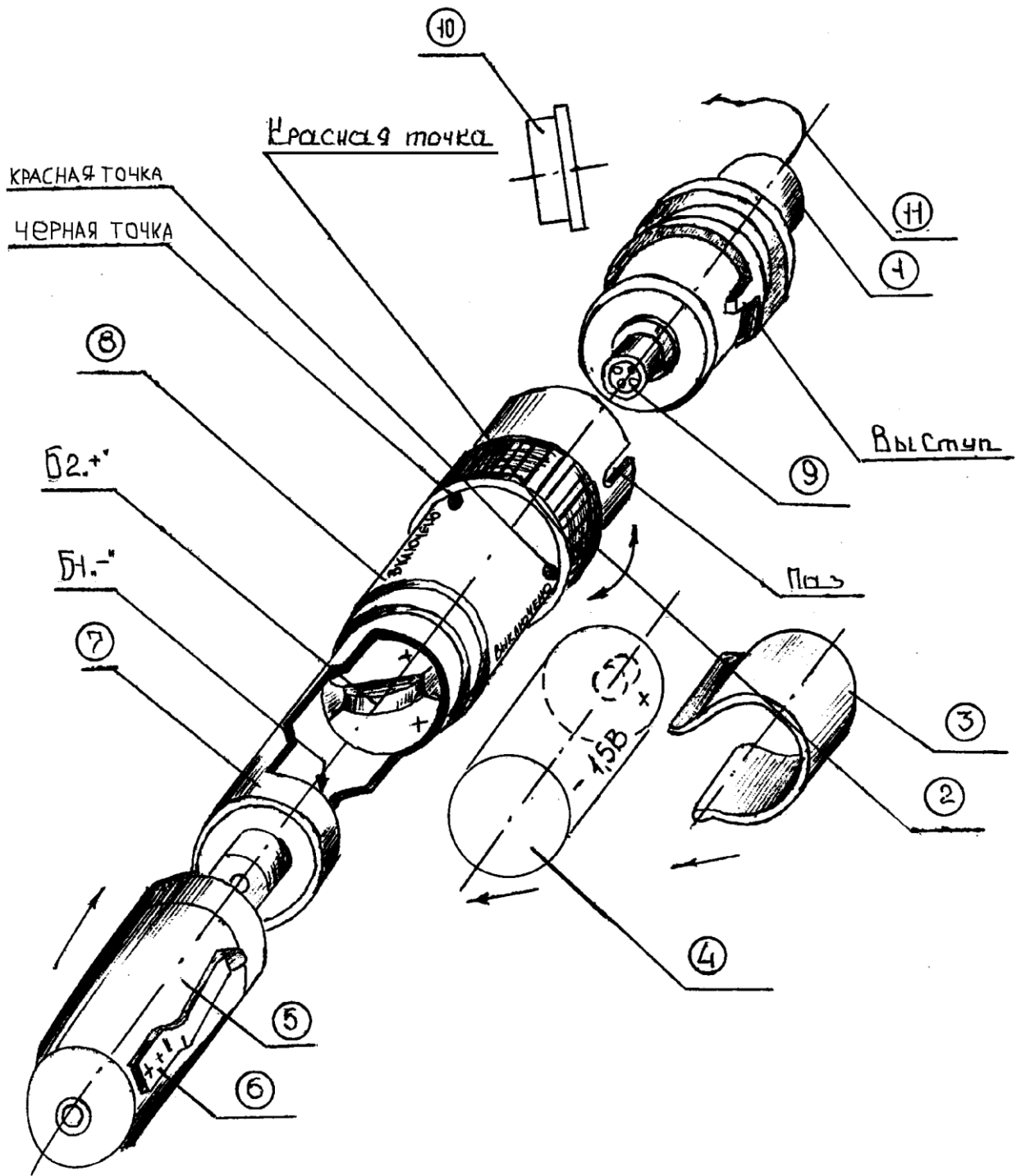


Рисунок 7 – Состав комплекта прибора «Трос»:
 1 – кассета; 2 – кольцевой переключатель; 3 – защелка;
 4 – источник питания; 5 – кожух; 6 – зажим; 7 – блок питания;
 8 – корпус; 9 – розетка; 10 – крышка; 11 – микропровод

Таким образом, знание режимов работы электрических цепей необходимы для успешного изучения технических средств, применяемых для охраны Государственной границы.

Основными законами электрических цепей являются закон Ома, первый и второй законы Кирхгофа. Эти законы связывают между собой главные параметры электрической цепи – ЭДС E , напряжение U , силу тока I и сопротивление R .

Основным режимом работы ЭЦ является номинальный. Режим ХХ применяется для измерения ЭДС источника E . Режим КЗ аварийный и он недопустим.

Реальные источники электрической энергии должны иметь малое внутреннее сопротивление R_i , чтобы уменьшить потери напряжения источника под нагрузкой.

1.2 Эквивалентные преобразования электрических цепей постоянного тока

При расчете цепей приходится сталкиваться с различными схемами соединений потребителей. При использовании цепи с одним источником часто получается смешанное соединение, представляющее собой комбинацию параллельного и последовательного соединений, известных из курса физики. Задача расчета такой цепи состоит в том, чтобы определить токи и напряжения отдельных ее участков.

Соединение, при котором по всем участкам проходит один и тот же ток, называют *последовательным*. Любой замкнутый путь, проходящий по нескольким участкам, называют *контуром электрической цепи*. Например, цепь, показанная на рис. 3, является одноконтурной.

Участок цепи, вдоль которого проходит один и тот же ток, называют *ветвью*, а место соединения трех и большего числа ветвей – *узлом*.

На рис 8 показан участок цепи, состоящей из шести ветвей и трех узлов.

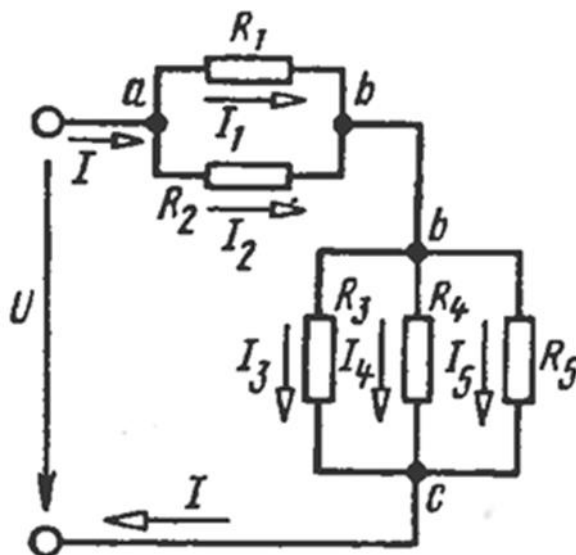


Рис. 8 Смешанное соединение сопротивлений

Соединение, при котором все участки цепи присоединяются к одной паре узлов, т.е. находятся под действием одного и того же напряжения, называют *параллельным*.

Рассмотрим различные способы соединения сопротивлений подробнее.

1.2.1 Эквивалентные преобразования ЭЦ с последовательным соединением резисторов

Как указывалось ранее, схема (рис. 8) представляет собой последовательное соединение участков цепи ab и bc . Эту схему можно представить так, как показано на рис. 9, где R_{ab} – сопротивление, эквивалентное

сопротивлению участка ab : R_{bc} – сопротивление, эквивалентное сопротивлению участка bc .

Полученная схема представляет собой последовательное соединение сопротивлений.

Рассмотрим свойства последовательного соединения сопротивлений.

1. Ток в любом сечении последовательной цепи одинаков. Это объясняется тем, что ни в одной точке такой цепи не может происходить накопления зарядов.

2. Согласно закону сохранения энергии, напряжение на зажимах цепи равно сумме напряжений на всех ее участках: $U = U_{ab} + U_{bc}$. В общем виде $U = \sum U$

3. Согласно закону Ома для участка цепи можно записать $U_{ab} = IR_{ab}$, $U_{bc} = IR_{bc}$. Поделив приведенные равенства одно на другое, получим $\frac{U_{ab}}{U_{bc}} = \frac{R_{ab}}{R_{bc}}$,

т.е. напряжения на участках цепи при последовательном соединении прямо пропорциональны сопротивлениям этих участков.

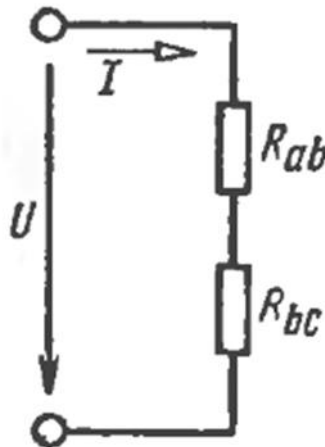


Рис. 9 Последовательное соединение сопротивлений

Из этого очень важного свойства вытекают условия перераспределения напряжений на участках цепи при изменении сопротивлений этих участков.

4. В общем случае, если имеется n последовательно соединенных сопротивлений, согласно второму свойству, $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$. Тогда $IR_{\text{эк}} = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n$ или, сократив на I , $R_{\text{эк}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$.

В общем виде $R_{\text{эк}} = \sum R$.

Это свойство можно использовать при расчете сопротивления цепей, состоящих из одинаковых проводников. Например, в сигнализационном заграждении электроконтактного типа «Балхаш-М» сигнализационного комплекса КС-185К (его конструкция является развитием проекта сигнализационного заграждения «Гардина» системы С-175) длиной до 500 м, предназначенного для охраны протяженных участков границы, используется два отдельных шлейфа, каждый из которых состоит из 12 последовательно включенных нитей колючей проволоки (рис. 10), закрепленной на изоляторах.

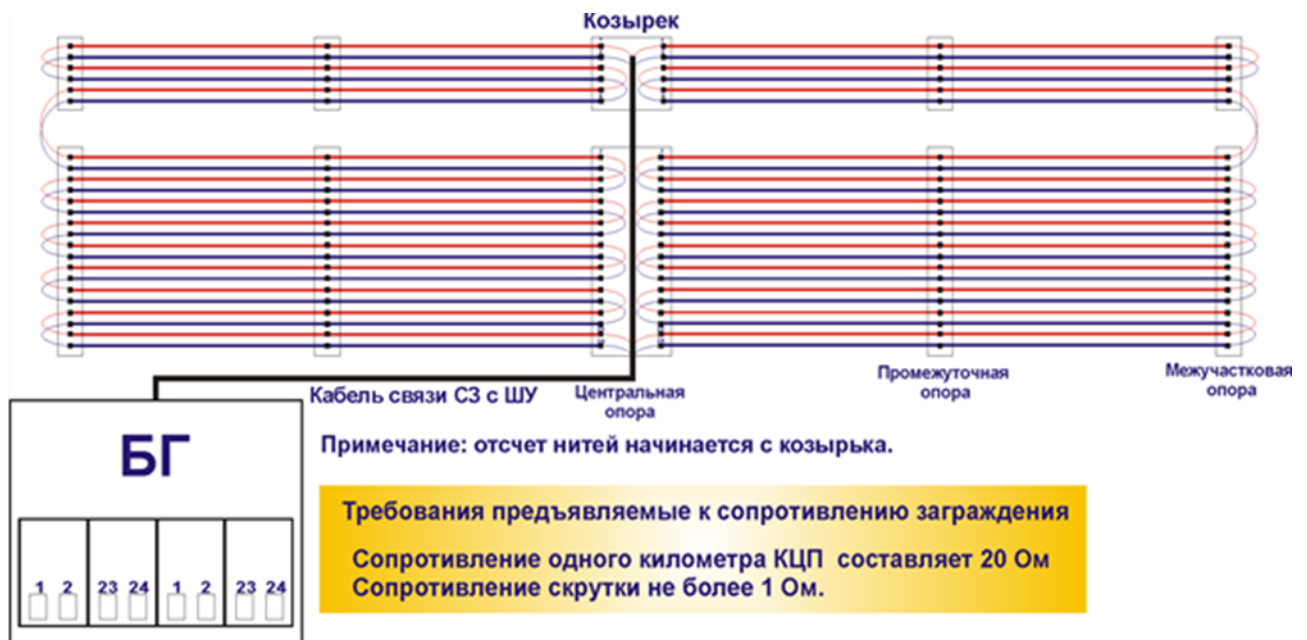


Рис. 10 Сигнализационное заграждение электроконтактного типа

При подключении к исправному сигнализационному заграждению датчика («Бирюса», «Скат») он измеряет сопротивление шлейфов и запоминает их значение. При замыкании или обрыве проволочных нитей заграждения происходит изменение сопротивления шлейфов, и датчик выдает сигнал тревоги. При относительно небольших и плавных изменениях сопротивления шлейфов при изменении температуры проводников или влажности изоляторов датчик остается в дежурном режиме.

1.2.2 Эквивалентные преобразования ЭЦ с параллельным соединением резисторов

Схема (рис. 8) представляет собой последовательное соединение участков цепи ab и bc . В свою очередь, эти участки представляют собой параллельное соединение сопротивлений. Выясним свойства такого соединения сопротивлений.

1. Рассмотрим соотношение токов, например, для узла a цепи. Очевидно, что ток, приходящий к узлу, равен току, уходящему от узла: $I - I_1 - I_2 = 0$ В общем виде $\sum I = 0$.

Это уравнение отражает *первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма токов ветвей для любого узла электрической цепи равна нулю.*

Первый закон Кирхгофа является следствием закона сохранения заряда, согласно которому в узле заряд одного знака не может ни накапливаться, ни убывать.

При составлении уравнения для какого-либо узла цепи необходимо иметь в виду, что токи, направленные к узлу, условились брать со знаком плюс, а токи, направленные от узла - со знаком минус.

2. При параллельном соединении все ветви одним полюсом присоединяют к одному узлу, а другим - к другому. Так как потенциалы этих узлов фиксированы, то и разность их фиксирована и одинакова для всех ветвей, входящих в соединение.

Применительно к схеме (рис. 8) получим $U_1 = U_2 = U_{ab}$, $U_5 = U_4 = U_3 = U_{bc}$, т.е. при параллельном соединении сопротивлений напряжения на ветвях одинаковы.

3. Применим закон Ома для всех ветвей параллельного разветвления на участке bc . Тогда $U_{bc} = I_3 U_3 = I_4 U_4 = I_5 U_5$, откуда $\frac{I_3}{I_4} = \frac{R_4}{R_3}$ и $\frac{I_3}{I_5} = \frac{R_5}{R_3}$.

Таким образом, при параллельном соединении токи ветвей обратно пропорциональны их сопротивлениям.

4. Во многих случаях рассчитывают не исходные сложные, а упрощенные (эквивалентные) схемы замещения. Под схемой замещения понимают такую схему, которая обеспечивает неизменность режимов работы во всех ветвях электрической цепи.

Часто приходится прибегать к замене резистивных элементов, соединенных сложным образом, одним, сопротивление которого равно общему сопротивлению исходных элементов. Найдем эквивалентное сопротивление при параллельном соединении ветвей, подключенных к узлам b и c (рис. 8).

Согласно первому закону Кирхгофа, для узла b справедливо равенство $I = I_3 + I_4 + I_5$.

Вместе с тем, согласно закону Ома и условию эквивалентности можно записать:

$$I_3 = \frac{U_{bc}}{R_3}, \quad I_4 = \frac{U_{bc}}{R_4}, \quad I_5 = \frac{U_{bc}}{R_5}, \quad I = \frac{U_{bc}}{R_{\text{эк}}}$$

Подставляя эти выражения в формулу $I = I_3 + I_4 + I_5$, получим, $\frac{U_{bc}}{R_{\text{эк}}} = \frac{U_{bc}}{R_3} + \frac{U_{bc}}{R_4} + \frac{U_{bc}}{R_5}$ откуда $\frac{1}{R_{\text{эк}}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}$.

Переходя от сопротивлений участков к их проводимостям, определим $g_{\text{эк}} = g_3 + g_4 + g_5$.

В общем виде $g_{\text{эк}} = \Sigma g$.

При параллельном соединении эквивалентная, или общая, проводимость равна сумме проводимостей всех параллельных ветвей.

Определенный интерес для практики представляют два частных случая:

- 1) соединение состоит из двух ветвей с различными сопротивлениями;
- 2) соединение состоит из n ветвей с одинаковыми сопротивлениями.

В первом случае, применяя формулу $\frac{1}{R_{\text{эк}}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}$,

найдем $R_{\text{эк}} = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)}$ во втором $R_{\text{эк}} = \frac{R}{n}$.

1.1.3 Эквивалентные преобразования ЭЦ со смешанным соединением резисторов

Смешанное соединение. Смешанное соединение представляет собой комбинацию параллельного и последовательного соединения сопротивлений. Определим по схеме (рис. 8) токи и напряжения на всех участках цепи. Пусть напряжение на зажимах цепи U и сопротивления ее участков заданы.

Эквивалентное сопротивление цепи

$$R_{\text{эк}} = R_{ab} + R_{bc},$$

где

$$R_{ab} = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)};$$

$$R_{bc} = \frac{R_1 R_2 R_3}{(R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3)}$$

Общий ток источника $I = \frac{U}{R_{\text{эк}}}$, напряжения на участках ab и bc в сумме составят $U = IR_{ab} + IR_{bc}$.

Токи в соответствующих ветвях:

$$I_1 = \frac{U_{ab}}{R_1}, I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2}, I_3 = \frac{U_{bc}}{R_3}, I_4 = \frac{U_{ab}}{R_4}, I_5 = \frac{U_{ab}}{R_5}$$

Практическое значение возможности определить сопротивление электрической цепи в пограничной службе очень велико, так как самые разные задачи охраны границы решаются с помощью электрических цепей.

Например, действие одного из самых распространенных технических средств охраны границы сигнализационного прибора «Кристалл-М» основано на автоматическом контроле сопротивления двух электрических цепей-флангов, расположенных на охраняемом участке местности или объекте (рис. 11).

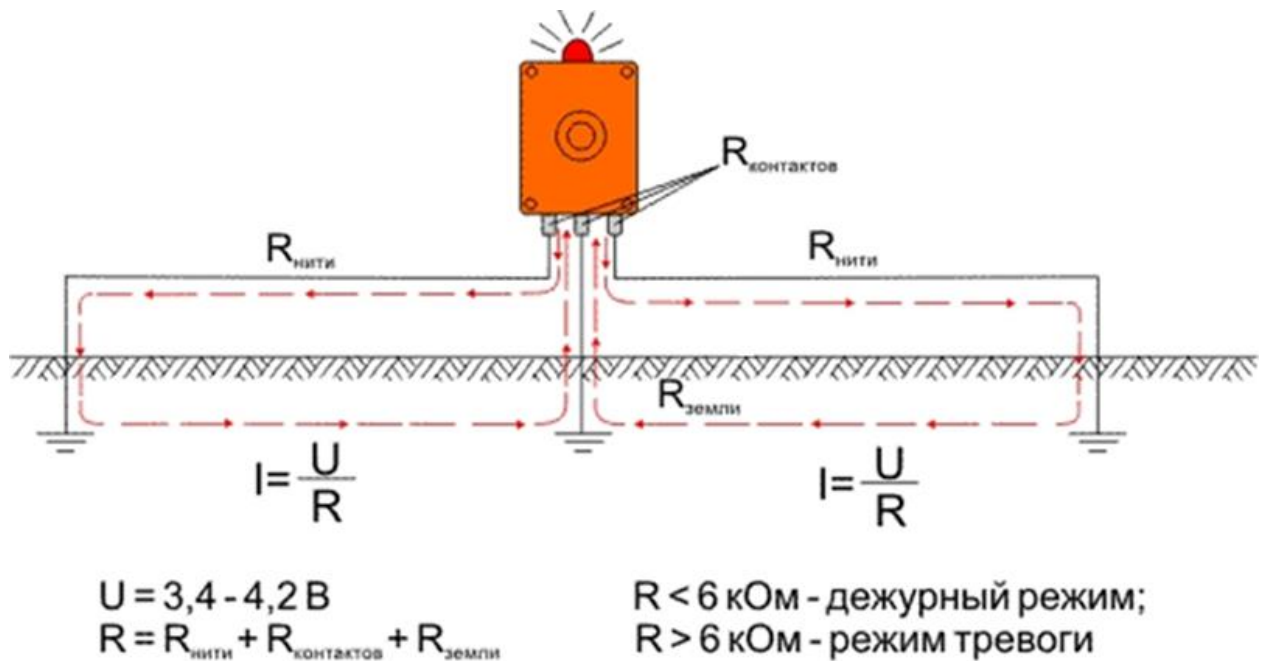


Рис. 11 Принцип действия прибора «Кристалл-М»

Под механическим воздействием движущегося нарушителя происходит разрушение электрической цепи, и ее сопротивление возрастает значительно выше порогового значения 6 кОм. Такой относительно высокий порог выбран из-за того, что в состав электрической цепи входят последовательно соединенные сопротивление провода и сопротивление заземления. На практике применяются стальные или медные проволоки диаметром 0,2-0,4 мм, которые

практически незаметны для нарушителя в траве или кустарнике. Оценим сопротивление такой цепи длиной $l=1,5$ км, используя данные таблицы 1.

Если применить стальной провод с удельным сопротивлением $\rho=0,13 \frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}$ и диаметром $d=0,3$ мм, то его сопротивление составит

$$R = \rho \frac{l}{s} = \rho \frac{l}{\pi r^2} = \rho \frac{4l}{\pi d^2}.$$

Подставим численные значения:

$$R = 0,13 * \frac{4 \cdot 1500}{3,14 \cdot (0,3)^2} = 2760 \text{ (Ом)}$$

Если стальной провод заменить на медный с удельным сопротивлением $\rho=0,0175 \frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}$ при том же диаметре, то сопротивление чувствительной линии составит

$$R = 0,0175 * \frac{4 \cdot 1500}{3,14 \cdot (0,3)^2} = 371,5 \text{ (Ом)}$$

В первом случае допустимое сопротивление заземления составит 2240 Ом, что соответствует очень влажной заболоченной почве и заземлителям длиной более метра. Во втором случае сопротивление земли может быть до 5628,5 Ом, что достижимо на песчаной почве после дождя, а после сухой погоды в течение 2-3 недель сопротивление заземления в песчаном грунте поднимается до 30-100 кОм, и тогда прибор не войдет в дежурный режим. В этом случае заземлители соединяют между собой таким же проводом, что и чувствительная цепь, или любым подходящим проводом, например, полевым кабелем связи.

Реальное сопротивление цепи будет на 10-20 Ом больше, так как чувствительная линия изготавливается из участков провода, соединенных неплотной скруткой в изоляторах-размыкателях. Эти скрутки в сырую погоду склонны к окислению, особенно при использовании стального проводника, и сопротивление контактов-скруток возрастает. Их приходится зачищать и смазывать, чтобы обеспечить надежный дежурный режим прибора.

Если применить нержавеющую нихромовую проволоку (так называемую «кристальную нить») удельным сопротивлением $\rho=1,1 \frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}$, диаметром $d=0,25$ мм, то пороговое сопротивление $R=6000$ Ом будет достигнуто при длине проводника

$$l = \frac{Rs}{\rho} = \frac{R\pi r^2}{\rho} = \frac{R\pi d^2}{4\rho},$$

что дает при подстановке численных значений

$$l = \frac{6000 \cdot 3,14 \cdot 0,25^2}{4 \cdot 1,1} = 267,6 \text{ (м)},$$

и уже не остается запаса на сопротивление заземления.

Если заземление заменить таким же (обратным) проводником, то максимальная длина одного фланга из нихромовой проволоки составит

$$\frac{l}{2} = \frac{267,6}{2} = 133,8 \text{ (м)}.$$

Электрическая работа и мощность. Преобразование электрической энергии в тепловую

Если электрическую цепь замкнуть, то в ней возникнет электрический ток. При этом энергия источника будет расходоваться. Найдем работу, которую совершает источник тока для перемещения заряда q по всей замкнутой цепи. Исходя из определения ЭДС получим $W_u = Eq$, но так как $q = It$, $E = U + U_{em}$, то $W_u = (U + U_{em})It$, $W = UIt + U_{em}It$, где $UIt = W$ – работа, совершаемая источником на внешнем участке цепи; $U_{em}It = W_{em}$ – потеря энергии внутри источника.

Используя закон Ома для участка цепи, можно записать $W = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$.

Величину, характеризующую скорость, с которой совершается работа, называют *мощностью*. $P = \frac{W}{t}$

Соответственно мощность, отдаваемая источником, $P_u = \frac{EIt}{t} = EI$.

Мощность потребителей $P = \frac{UIt}{t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$

Мощность потерь энергии внутри источника $P_{em} = U_{em}I = I^2 R_{em} = \frac{U_{em}^2}{R_{em}}$

Единица мощности — ватт (Вт):

$$P [\text{Вт}] = \frac{W[\text{Дж}]}{t[\text{с}]}$$

т. е. мощность равна 1 Вт, если за 1 с совершается работа в 1 Дж.

Электрическая работа выражается в джоулях, но согласно формуле $P = \frac{W}{t}$

имеем $W = Pt$. Откуда 1 Дж = 1 Вт*1 с = 1 Вт*с.

На практике пользуются такими единицами работы, как киловатт-час, равный 3600 Вт с.

Когда в цепи с сопротивлением R существует ток, электроны, перемещаясь под действием поля, сталкиваются с ионами кристаллической решетки проводника. При этом кинетическая энергия электронов передается ионам, что приводит к увеличению амплитуды колебательного движения ионов, и, следовательно, к нагреванию проводника. Количество теплоты, выделенной в проводнике, $Q = I^2 R t$. Приведенная зависимость носит название закона Ленца – Джоуля: *количество теплоты, выделяемой при прохождении тока в проводнике, пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.*

Преобразование электрической энергии в тепловую имеет большое практическое значение и широко используется в различных нагревательных приборах как в промышленности, так и в быту. Однако часто тепловые потери являются нежелательными, так как они вызывают непроизводительные расходы энергии, например в электрических машинах, трансформаторах и других устройствах, что снижает их КПД.

1.3 Электрические цепи однофазного синусоидального тока

1.3.1 Синусоидальный переменный ток, способы его представления и параметры

Переменным называют ток, изменение которого по значению и направлению повторяется через равные промежутки времени.

Широкое применение переменного тока в различных областях техники объясняется легкостью его получения и преобразования, а также простотой устройства генераторов и двигателей переменного тока, надежностью их работы и удобством эксплуатации. Рассмотрим принцип действия простейшего генератора переменного тока.

Между полюсами электромагнита или постоянного магнита (рис. 12) расположен цилиндрический *ротор (якорь)*, набранный из листов электротехнической стали.

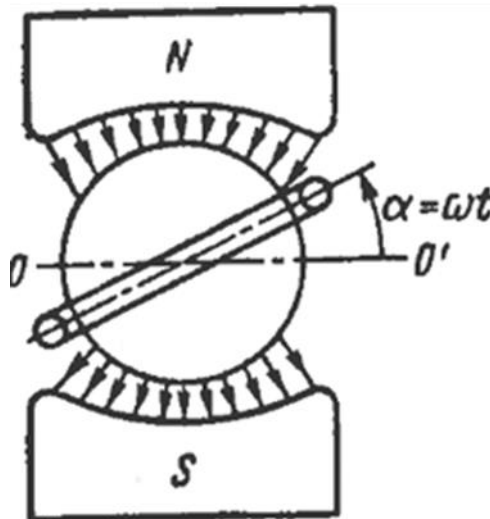


Рис. 12 Модель генератора переменного тока (поперечное сечение)

На якоре укреплен катушка, состоящая из определенного числа витков проволоки, концы этой катушки соединены с контактными кольцами, которые вращаются вместе с якорем. К контактным кольцам пружинами прижаты скользящие контакты (щетки), с помощью которых катушка соединяется с внешней цепью.

Воздушный зазор между полюсами и якорем профилируют так, чтобы индукция магнитного поля в нем изменялась по синусоидальному закону:

$$B = B_m \sin \alpha ,$$

где α – угол между плоскостью катушки и нейтральной плоскостью OO' .

Когда якорь вращается в магнитном поле со скоростью ω , в активных сторонах катушки наводится ЭДС индукции (активными называют стороны, находящиеся в магнитном поле генератора):

$$e_l = Blv \sin \beta ,$$

где β – угол между направлениями векторов индукции магнитного поля B и скорости v ;

l – длина активных сторон витков катушки.

Магнитное поле в зазоре расположено так, что угол $\beta = \frac{\pi}{2}$. Таким образом,

$$e_1 = Blv = B_m l v \cdot \sin \alpha = B_m \cdot \sin \omega t.$$

При числе витков ω число активных сторон катушки равно 2ω . Тогда ЭДС катушки.

$$e = e_1 2\omega = 2B_m \omega l v \cdot \sin \omega t = E_m \cdot \sin \omega t,$$

где $E_m = 2B_m \omega l v$ - максимальное значение ЭДС.

Таким образом, ЭДС генератора меняется по синусоидальному закону. Если к зажимам генератора подключить нагрузку, то через нее пойдет ток, который также будет изменяться по синусоидальному закону. График синусоидального тока $i = I_m \cdot \sin \omega t$ представлен на рис. 13. По оси координат откладывают ток i , по оси абсцисс – угол $a = \omega t$ или время t .

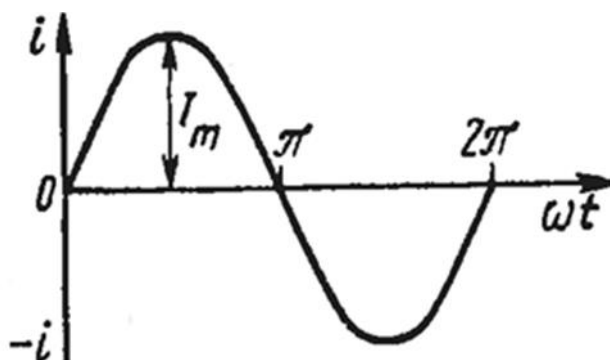


Рис. 13 График синусоидального тока

Для количественной характеристики переменного тока служат следующие параметры:

1. Мгновенные значения тока i , напряжения u . ЭДС e – их значения в любой момент времени: $i = I_m \sin \omega t$; $u = U_m \sin \omega t$; $e = E_m \sin \omega t$,

Амплитудные значения тока I_m , напряжения - U_m , ЭДС- E_m

2. Максимальное значение мгновенных величин i , u и e (рис. 14).

Период T – промежуток времени, в течении которого ток совершает полное колебание и принимает прежнее по величине и знаку мгновенное значение.

3. Период выражают в секундах (с), миллисекундах (мс) и микросекундах (мкс).

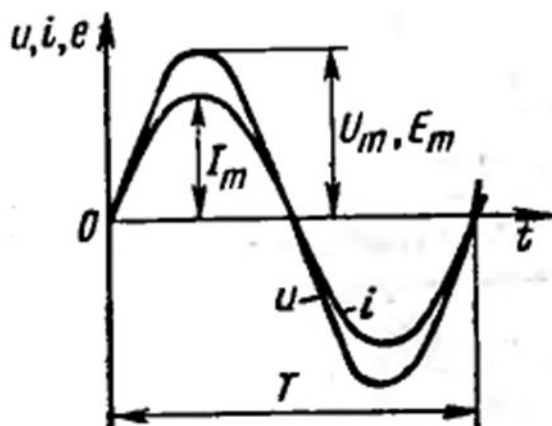


Рис. 14 К определению параметров переменного тока

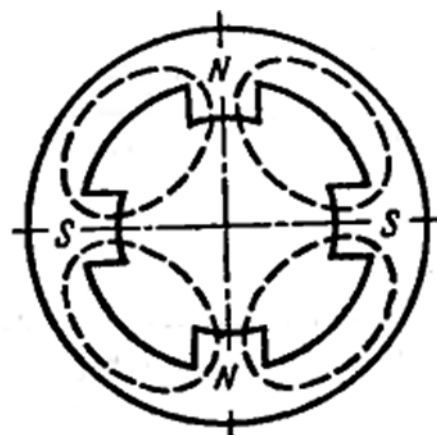


Рис. 15 Схема генератора с двумя парами полюсов

4. Угловая скорость ω характеризует скорость вращения катушки генератора в магнитном поле. На практике для получения нужной частоты при относительно малой угловой скорости генераторы имеют несколько пар полюсов p .

На рис. 15 показан генератор с двумя парами полюсов, в котором за один оборот катушки ЭДС изменяет направление в 4 раза или 2 раза. Следовательно, одному обороту катушки соответствует p периодов переменного тока. Введем понятие электрического угла $\alpha_{\text{эл}}$: $\alpha_{\text{эл}} = pa$. Тогда скорость ω определяет электрическую угловую скорость катушки:

$$\omega = \frac{\alpha_{\text{эл}}}{pT} = \frac{p2\pi}{pT} = \frac{2\pi}{T},$$

где $p2\pi$ - электрический угол, соответствующий одному обороту катушки в пространстве; pT - время, соответствующее p периодам тока.

Таким образом, формула ($\omega = \frac{2\pi}{T}$) определяет электрическую частоту вращения, ее также называют *циклической* или *круговой* частотой.

5. Частота f – величина, обратная периоду T , т. е. $f = \frac{1}{T}$ и характеризующая число полных колебаний ЭДС или тока за 1с.

Единицей частоты является герц (Гц):

$$f [\text{Гц}] = \frac{1}{T[\text{с}]}.$$

Промышленной частотой в СНГ и Европы считается частота 50 Гц, в США 60 Гц. Распространены также производные единицы частоты: килогерц (кГц), мегагерц (МГц) и гигагерц (ГГц): 1 кГц = 10^3 Гц; 1 МГц = 10^6 Гц; 1 ГГц = 10^9 Гц.

Исходя из ранее полученного выражения $\omega = \frac{2\pi}{T}$, получим $\omega = 2\pi f$.

6. Действующие значения тока I напряжения U и ЭДС E . Для измерения переменного тока, напряжения и ЭДС вводят понятие действующего значения. Переменный ток сравнивают с постоянным по тепловому действию (рис. 16). Если положение реостатов подобрано так, что количество теплоты, выделяемой в схемах (рис. 16 а, б) на резисторе R оказывается одинаковым, то можно считать, что и токи в схемах одинаковы.

Таким образом, действующее значение переменного тока равно такому постоянному току, который за время, равное одному периоду, выделяет на данном резисторе одинаковое количество теплоты с переменным током.

Найдем соотношение между действующим и амплитудными значениями тока. Согласно определению. $Q_{\text{д}} = Q_{\text{п}}$, где $(Q_{\text{д}}, Q_{\text{п}})$ – количество теплоты, выделяемое постоянным и переменным токами):

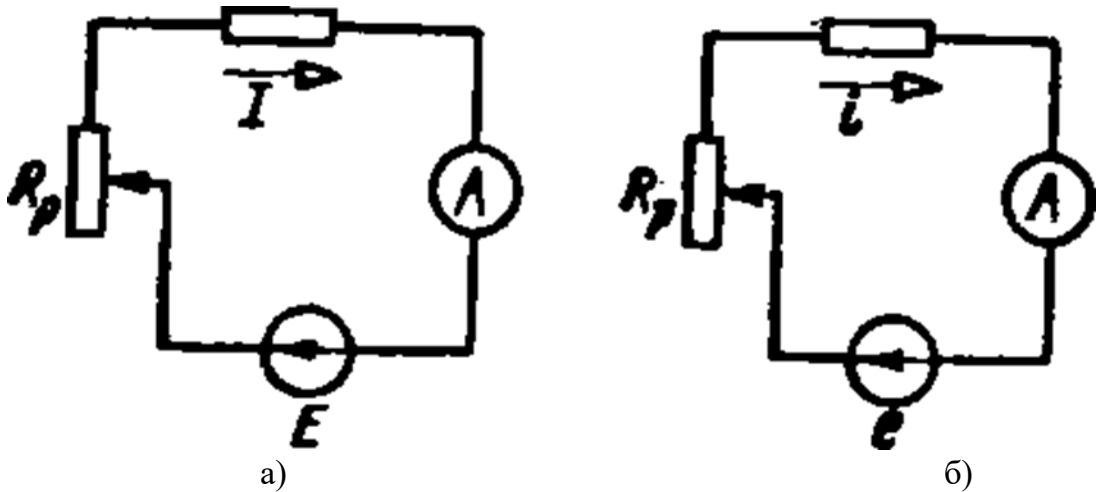


Рис. 16 К определению понятия действующего значения переменного тока

$Q_{\sim} = I^2 RT$; $Q_{\sim} = \int_0^T i^2 R dt$, где $i^2 R dt$ – количество теплоты за время dt выделенное переменным током. Приравнявая эти выражения, получим $I^2 R T = \int_0^T i^2 R dt$. Сократив на общий множитель R и учтя, что $i = i_m \sin \omega t$, найдем выражение для действующего значения тока $I = \frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt$ или после интегрирования $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_m$.

Пусть на якоре генератора укреплены два одинаковых витка 1 и 2, сдвинутых в пространстве на угол φ , как показано на рис. 17 а. При вращении якоря в витках наводится ЭДС индукции одинаковой частоты ω и амплитуды E_m (рис. 17 б), так как витки вращаются с одинаковой частотой в одном и том же магнитном поле.

Положение витков задано углами φ_1 и φ_2 для произвольного момента времени, которое можно считать $t = 0$. Плоскости витков не совпадают с нейтральной плоскостью OO' . Мгновенные значения ЭДС как функции времени определяются выражениями $e_1 = E_m \sin(\omega t + \psi_1)$; $e_2 = E_m \sin(\omega t + \psi_2)$.

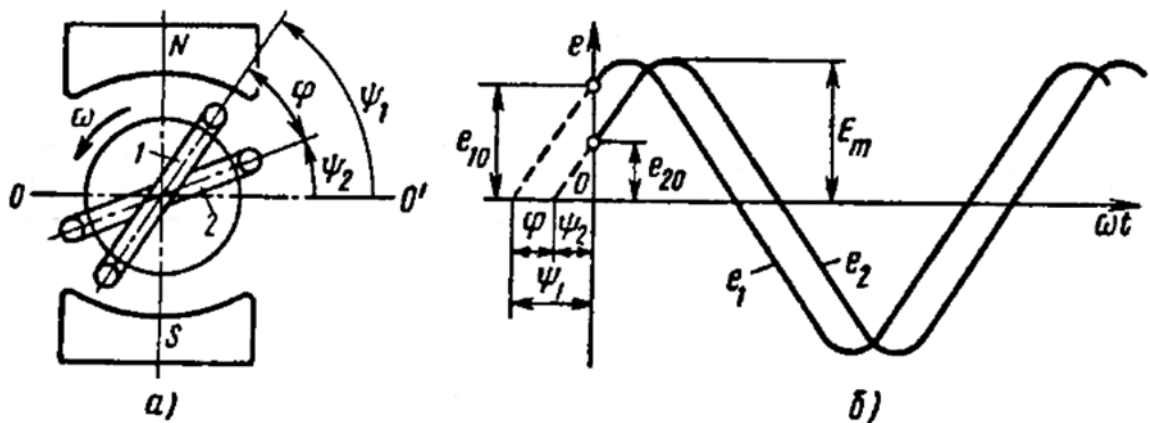


Рис. 17 К объяснению понятия фазы и сдвига фаз при переменном токе

Следовательно, в момент $t = 0$ ЭДС отличны от нуля: $e_{10} = E_m \sin \psi_1$; $e_{20} = E_m \sin \psi_2$.

Электрические углы ψ_1 и ψ_2 характеризуют значения ЭДС в начальный момент времени и называются начальными фазами.

Так как начальные фазы ЭДС различны, максимальные значения ЭДС в витках наступают не одновременно, а с фиксированным сдвигом во времени. Временной сдвиг определяется разностью начальных фаз и называется сдвигом фаз φ (см. рис. 17 б): $\varphi = \psi_1 - \psi_2$

Временной сдвиг Δt рассчитывают в соответствии с равенством

$$\Delta t = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{\varphi T}{2\pi}.$$

В данном случае одна из ЭДС является опережающей, а другая отстающей по фазе. Будем считать опережающей ту ЭДС, максимум которой расположен левее, при условии $\varphi < \pi$. Угол находят по расстоянию между ближайшими максимумами ЭДС одного знака или моментами прохождения нулевого значения.

1.3.2 Индуктивность, емкость и их свойства

Электрический ток создает магнитный поток, величина которого прямо пропорциональна силе тока в проводнике. При одной и той же силе тока проводники различной формы создают не одинаковые по величине магнитные потоки.

Коэффициент пропорциональности L между магнитным потоком Φ и силой тока I проводника называется индуктивностью этого проводника:

$$\Phi = LI$$

Индуктивность проводника остается постоянной, если не изменяется его форма, размеры и магнитная проницаемость окружающей среды, окружающей проводник.

Индуктивность L измеряется в генри (Гн), мГн, мкГн.

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{W\phi}{A} = \text{Гн}$$

Индуктивность проводника характеризует его способность создавать магнитный поток при прохождении электрического тока по этому проводнику: чем больше индуктивность проводника, тем больше создаваемый им магнитный поток при данной силе тока в проводнике.

Проводник может быть различной формы, например в виде катушки или рамки. Суммарный магнитный поток, пронизывающий все витки катушки называется потокосцеплением:

$$\psi = w\Phi$$

где Φ - магнитный поток через один виток,

w - число витков.

$$\text{Для катушки (рамки): } L = \frac{\psi}{I} = \frac{w\Phi}{I}$$

Индуктивность однослойной цилиндрической катушки, длина l которой значительно больше ее диаметра ($l \gg D$), определяется формулой: $L = \frac{w\mu_a S}{l}$,

где μ_a - абсолютная магнитная проницаемость материала внутри катушки;

S - площадь поперечного сечения катушки, м^2 .

Из этой формулы следует, что индуктивность катушки можно регулировать изменением w или μ_a . Для изменения μ_a в катушку вводится

сердечник из ферромагнитного материала: электротехнической стали, магнетита, карбонильного железа, феррита и других.

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

где $B = \frac{F}{I \cdot l}$ - магнитная индукция магнитного поля, Тесла (Тл),

H - напряженность магнитного поля, численно равная намагничивающей силе, приходящейся на единицу длины магнитной силовой линии.

Индуктивность катушек, применяемых в современной технике, изменяется от единиц Генри (низкочастотные дроссели) до десятков нано Генри (колебательные контуры радиоприемных и передающих устройств).

Емкость и ее свойства

Способность проводника накапливать электрические заряды, повышая при этом свой электрический потенциал, называется электрической емкостью.

Электрическая емкость проводника определяется формулой: $C = \frac{Q}{\varphi}$,

где Q – электрический заряд,

φ - электрический потенциал проводника.

Электрическая ёмкость проводника зависит:

от его поверхности: чем больше поверхность проводника, тем больше его емкость;

от диэлектрика, в котором находится проводник; если ёмкость проводника в воздухе равна C_0 , то в диэлектрике с диэлектрической проницаемостью ϵ она будет равна $C = C_0 \epsilon$;

от наличия вблизи него других проводников: чем ближе к проводнику другие проводники, тем больше емкость этого проводника. На этом основано действие электрического конденсатора.

Устройство из двух изолированных друг от друга проводников, которые могут получать равные по величине, но противоположные по знаку заряды, называется конденсатором.

Проводники конденсатора имеют разные потенциалы φ_1 и φ_2 , поэтому между ними имеется напряжение: $u = \varphi_1 - \varphi_2$.

Емкость конденсатора определяется формулой: $C = \frac{q}{u}$,

где q – заряд конденсатора,

u - напряжение между обкладками конденсатора.

Емкость конденсатора зависит от формы и размеров обкладок, расстояния и свойств среды между обкладками. Например, емкость плоского конденсатора определяется формулой: $C = \frac{\epsilon_a S}{d}$,

где ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками конденсатора,

S - площадь одной стороны одной пластины конденсатора, m^2 ,

d - расстояние между пластинами конденсатора, м.

Конденсаторы могут быть постоянной и переменной емкости. Конденсаторы постоянной емкости в зависимости от применяемых в них диэлектриках подразделяются на керамические, слюдяные бумажные, металлобумажные и плёночные. Примером конденсатора переменной емкости является многопластинчатый воздушный, состоящий из двух групп пластин: неподвижные пластины и подвижные пластины. При вращении ручки конденсатора пластины ротора передвигаются относительно пластин статора, при этом изменяется рабочая поверхность пластин, которая образует конденсатор.

Единицей измерения емкости является фарада (Ф) $C = \frac{Q}{U} = \frac{\text{кулон}}{\text{вольт}} = \Phi$

Фарада – очень крупная единица, и конденсаторы такой емкости распространены мало. Электрическая емкость земного шара оценивается в 7 Ф. Конденсаторы, широко применяемые в технике, имеют значительно меньше емкости: мкФ и пФ. $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$, $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$.

Большие емкости применяются в низкочастотных цепях, емкости фильтров в цепях постоянного тока достигают десятков тысяч микрофарад, емкости колебательных контуров высокочастотных приемопередающих устройств составляют единицы пикофарад.

1.3.3 Электрические цепи однофазного синусоидального тока с одним элементом R, L или C

При изучении электрических цепей необходимо помнить, что электрический ток неразрывно связан с магнитным полем. Таким образом, при возникновении тока в электрической цепи и в окружающей среде имеются магнитное и электрическое поля. Кроме того, в электрической цепи происходит преобразование электромагнитной энергии в тепловую.

В реальных цепях электрическое и магнитное поля распределены вдоль всей цепи. Но такое равномерное распределение полей встречается редко, например в линиях передачи энергии. Как правило, магнитное и электрическое поля распределяются вдоль цепи неравномерно, причем на одних участках резко выражены магнитные поля (индуктивные катушки), на других – электрические (конденсаторы). Имеются также участки цепей, где происходит в основном преобразование электромагнитной энергии в тепловую (резисторы). Указанные цепи, называемые цепями с сосредоточенными параметрами, позволяют изучить свойства отдельных участков, а затем рассмотреть работу цепи в целом. Это и является задачей данной главы.

Цепь с активным сопротивлением

На зажимах цепи переменного тока действует напряжение $u = U_m \sin \omega t$. Так как цепь обладает только активным сопротивлением (рис. 18), то, согласно закону Ома для участка цепи: $i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t$, где $I_m = \frac{U_m}{R}$ представляет собой выражение закона Ома для амплитудных значений. Разделив левую и правую части этого выражения на $\sqrt{2}$, получим закон Ома для действующих значений: $I = \frac{U}{R_{\text{эк}}}$.

Сопоставляя выражения для мгновенных значений тока и напряжения, приходим к выводу, что токи и напряжения в цепи с активным сопротивлением совпадают по фазе (рис. 19 и 20).

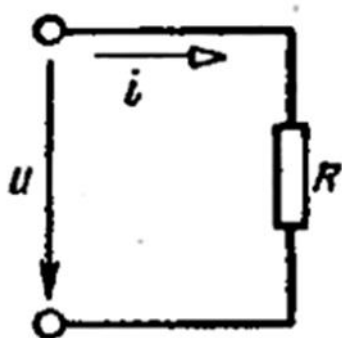


Рис. 18 Схема цепи переменного тока с активным сопротивлением

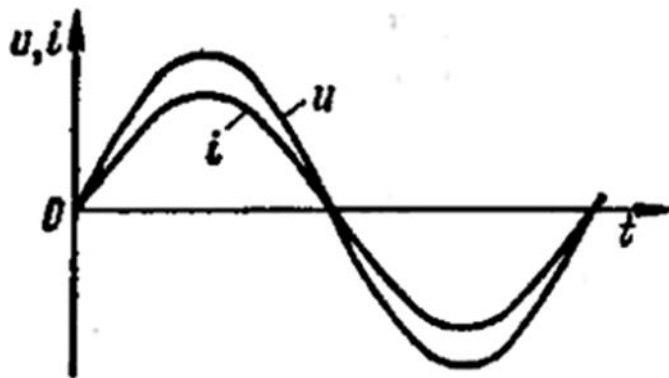


Рис. 19 Временные диаграммы тока и напряжения для цепи с активным сопротивлением

Мгновенная мощность. Как известно, мощность определяет скорость расхода энергии и, следовательно, для цепей переменного тока является переменной величиной. По определению, мощность $p = ui = U_m I_m \sin^2 \omega t$.

Учитывая, что $\sin^2 \omega t = \frac{(1 - \cos 2\omega t)}{2}$ и $\frac{I_m U_m}{2} = \frac{U_m I_m}{\sqrt{2} * \sqrt{2}} = UI$ окончательно получим $P = UI - UI \cos 2\omega t$.

Из анализа этой формулы и рис. 21, соответствующего этой формуле, видно, что мгновенная мощность, оставаясь, все время положительной, колеблется около уровня UI .

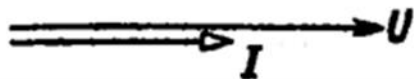


Рис. 20 Векторная диаграмма тока и напряжения для цепи с активным сопротивлением

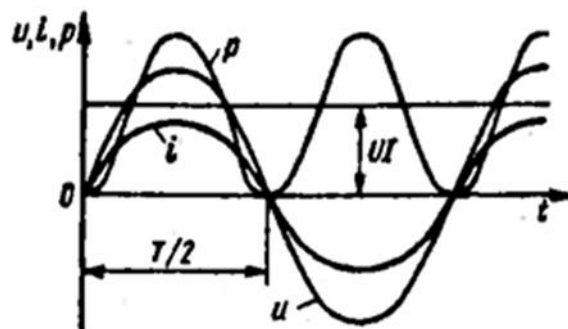


Рис. 21 Временные диаграммы напряжения, тока и мгновенной мощности для цепи с активным сопротивлением

Средняя мощность. Для определения расхода энергии за длительное время целесообразно пользоваться средним значением мощности. Для вывода выражения средней мощности найдем сначала расход энергии в цепи с активным сопротивлением R за время $\frac{T}{2}$:

$$W = \int_0^{T/2} P dt = \int_0^{T/2} (UI - UI \cos 2\omega t) dt = \int_0^{T/2} UI dt - \int_0^{T/2} UI \cos 2\omega t dt. \text{ Так как } \int_0^{T/2} UI \cos 2\omega t dt = 0, \text{ то } W = UI \frac{T}{2}.$$

Разделив полученное выражение для W на $T/2$, получим среднюю скорость расхода энергии или среднюю (активную) мощность: $P = UI$.

Единицами активной мощности являются ватт (Вт), киловатт (кВт) и мегаватт (МВт): $1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ Вт}$; $1 \text{ МВт} = 10^6 \text{ Вт}$.

Цепь с индуктивностью

Под действием синусоидального напряжения в цепи с индуктивной катушкой без ферромагнитного сердечника (рис. 22) проходит синусоидальный ток $I = I_m \sin \omega t$. В результате этого вокруг катушки возникает переменное магнитное поле и в катушке наводится ЭДС самоиндукции. При $R = 0$ напряжение источника целиком идет на уравнивание этой ЭДС, следовательно, $u = -e_i$. Так как $e_i = -L \frac{di}{dt}$, то $u = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = I_m \omega L \cos \omega t$

или $u = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$, где $U_m = I_m \omega L$.

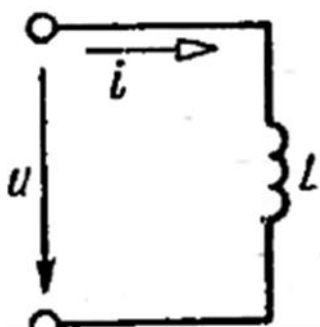


Рис. 22 Схема цепи переменного тока с индуктивностью

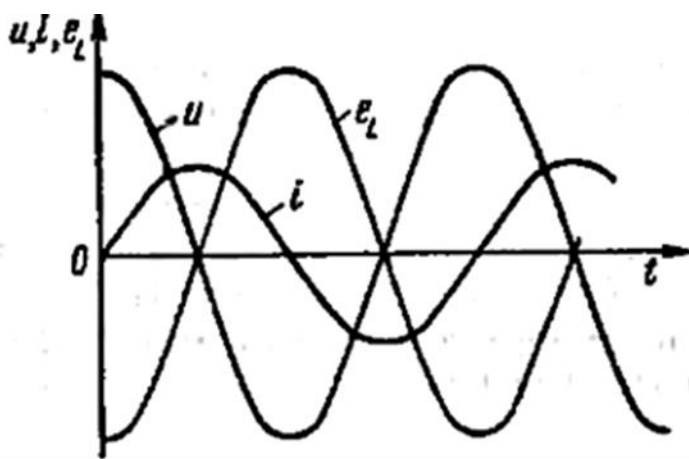


Рис. 23 Временные диаграммы напряжения, тока и ЭДС для цепи с индуктивностью

Сопоставляя выражения для мгновенных значений тока и напряжения, приходим к выводу, что ток в цепи с индуктивностью отстает по фазе от напряжения на угол $\frac{\pi}{2}$. Физически это объясняется тем, что индуктивная катушка реализует инерцию электромагнитных процессов. Индуктивность катушки L является количественной мерой этой инерции. Фазовые соотношения между током, напряжением и ЭДС для цепи с индуктивностью показаны на рис. 23 и 24.

Выведем закон Ома для этой цепи. Из выражения $U_m = I_m \omega L$ следует, что $I_m = \frac{U_m}{\omega L}$. Пусть $\omega L = 2\pi f L = X_L$, где X_L — индуктивное сопротивление цепи. Тогда получим выражение $I_m = \frac{U_m}{X_L}$, которое является законом Ома для амплитудных значений. Разделив левую и правую части этого выражения на $\sqrt{2}$, получим закон Ома для действующих значений: $I = \frac{U}{X_L}$.

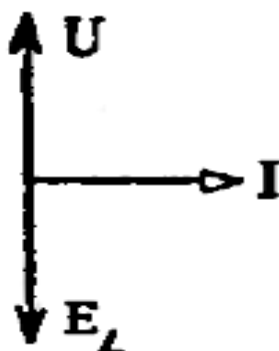


Рис. 24 Векторная диаграмма напряжения, тока и ЭДС для цепи с индуктивностью

Проанализируем выражение для $X_L = 2\pi fL$. С увеличением частоты тока f индуктивное сопротивление X_L увеличивается (рис. 25). Физически это объясняется тем, что возрастает скорость изменения тока, следовательно, и ЭДС самоиндукции.

Рассмотрим энергетические характеристики цепи с индуктивностью.

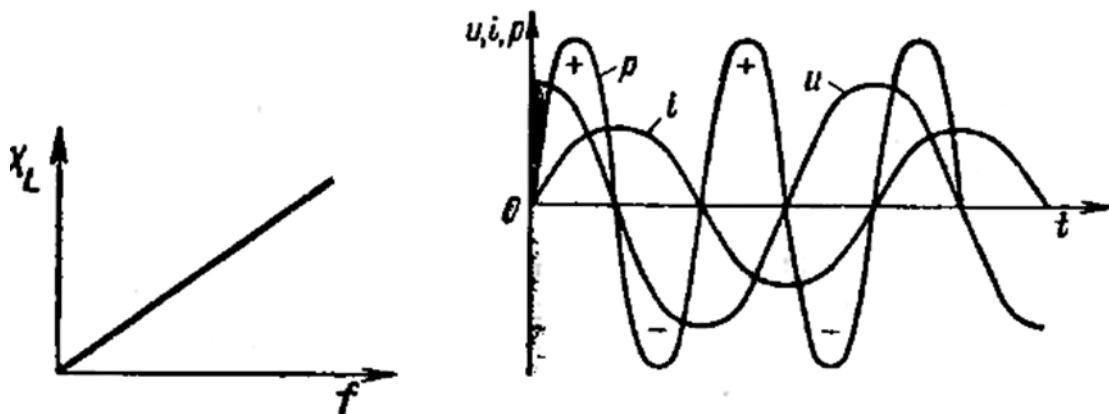


Рис. 25 Зависимость индуктивного сопротивления X_L от частоты

Рис. 26 Временные диаграммы напряжения, тока и мгновенной мощности для цепи с индуктивностью

Мгновенная мощность. Как и для цепи с R , мгновенное значение мощности определяется произведением мгновенных значений напряжения и тока: $p = ui = U_m I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \sin \omega t = I_m U_m \cos \omega t \sin \omega t$. Так как $\sin \omega t \cos \omega t = \frac{\sin 2\omega t}{2}$ и $\frac{U_m I_m}{2}$, то окончательно имеем $P = UI \sin 2\omega t$.

Из графика (рис. 26) видно, что при одинаковых знаках напряжения и тока мгновенная мощность положительна, а при разных знаках - отрицательна. Физически это означает, что в первую четверть периода переменного тока энергия источника преобразуется в энергию магнитного поля катушки. Во вторую четверть периода, когда ток убывает, катушка возвращает накопленную энергию источнику. В следующую четверть периода процесс передачи энергии источником повторяется и т. д.

Таким образом, в среднем катушка не потребляет энергии и, следовательно, активная мощность $P = 0$.

Реактивная мощность. Для количественной характеристики интенсивности обмена энергией между источником и катушкой служит реактивная мощность: $Q = UI$.

Единицей реактивной мощности является вольт-ампер реактивный (ВАр).

Цепь с емкостью

Проанализируем процессы в цепи, представленной на рис. 27. Зададимся напряжением на зажимах источника $u = U_m \sin \omega t$, тогда ток в цепи также будет меняться по синусоидальному закону. Ток определяют по формуле $i = \frac{dQ}{dt}$.

Количество электричества Q на обкладках конденсатора связано с напряжением на емкости и его емкостью: $Q = Cu$. Следовательно,

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt} = C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = U_m \omega C \times \cos \omega t = U_m \omega C \times \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

Таким образом, ток в цепи с емкостью опережает по фазе напряжение на угол $\frac{\pi}{2}$ (рис. 28, 29).

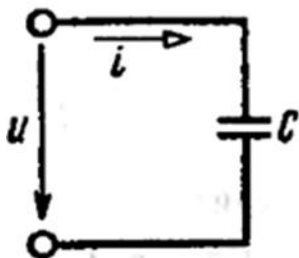


Рис. 27 Схема цепи переменного тока с емкостью

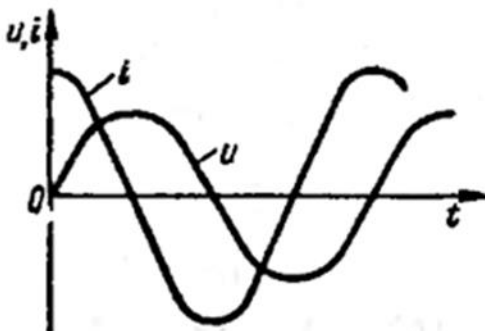


Рис. 28 Временные диаграммы напряжения и тока для цепи с емкостью

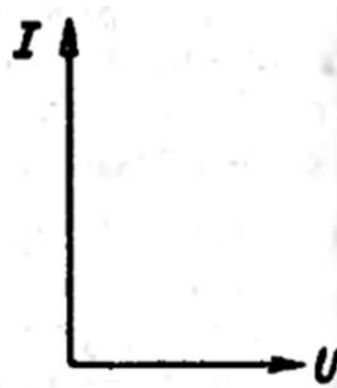


Рис. 29 Векторная диаграмма напряжения и тока для цепи с емкостью

Физически это объясняется тем, что напряжение на емкости возникает за счет разделения зарядов на его обкладках в результате прохождения тока. Следовательно, напряжение появляется только после возникновения тока (сравните процесс появления напряжения на емкости с процессом увеличения уровня жидкости при заполнении бака).

Выведем закон Ома для цепи с емкостью. Из выражения $U_m = \omega C \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ следует, что $I_m = U_m \omega C$ или $I_m = \frac{U_m}{1/(\omega C)}$. Введем обозначение: $\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} =$

X_C , где X_C - емкостное сопротивление цепи.

Тогда выражение закона Ома можно представить в следующем виде: для амплитудных значений $I_m = \frac{U_m}{X_C}$, для действующих значений $I = \frac{U}{X_C}$.

Из формулы $\frac{1}{\omega C} = X_C$ и рис. 30 следует, что емкостное сопротивление X_C уменьшается с ростом частоты ω . Это объясняется тем, что при большей частоте через поперечное сечение диэлектрика в единицу времени протекает большее количество электричества при том же напряжении, что эквивалентно уменьшению сопротивления цепи.

Рассмотрим энергетические характеристики в цепи с емкостью.

Мгновенная мощность. Пусть начальная фаза тока в цепи равна нулю, тогда $I = I_m \sin \omega t$. Так как напряжение на емкости отстает от тока на угол $\pi/2$, то и $u = U_m \sin (\omega t - \frac{\pi}{2})$ или $u = U_m \cos \omega t$. Выражение для мгновенной мощности

$$p = ui = -U_m I_m \sin \omega t \cos \omega t = -UI \sin 2\omega t$$

Анализ данной формулы и диаграммы (рис. 29) показывает, что в цепи с емкостью, так же как и в цепи с индуктивностью, происходит переход энергии от источника к нагрузке, и наоборот. В данном случае энергия источника преобразуется в энергию электрического поля конденсатора. Из сравнения выражений $p = ui = -U_m I_m \sin \omega t \cos \omega t = -UI \sin 2\omega t$ и $P = UI \sin 2\omega t$ и соответствующих им графиков (рис. 30 и 31) следует, что если бы индуктивная катушка и конденсатор были включены последовательно, то между ними происходил бы обмен энергией. Средняя мощность в цепи с емкостью также равна нулю: $P = 0$.



Рис. 30 Зависимость ёмкостного сопротивления X_C от частоты f

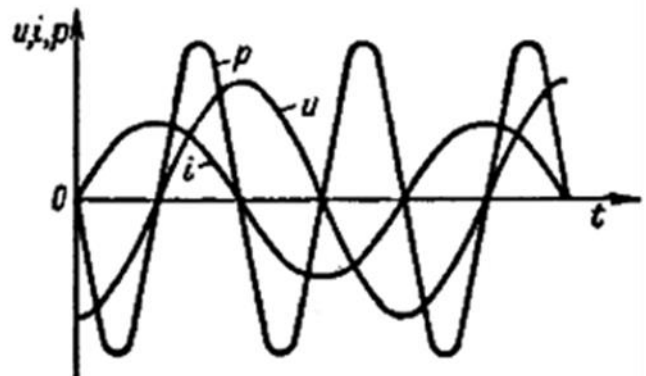


Рис. 31 Временные диаграммы напряжения, тока и мгновенной мощности для цепи с емкостью

В пограничной службе ёмкостное сопротивление применяется для создания чувствительных элементов технических средств охраны границы. Одним из наиболее эффективных датчиков, предназначенных для охраны протяженных участков границы, является ёмкостной датчик «Атлас», который обнаруживает прикосновение (а при определенной настройке даже просто приближение) человека к заграждению (рис. 32).

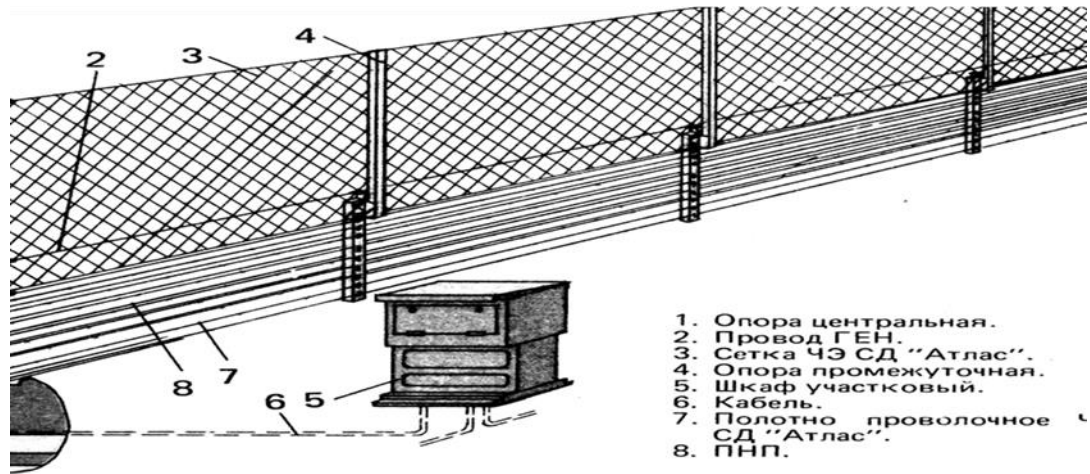


Рис. 32 Сигнализационное ограждение датчика «Атлас»

Заграждение из металлической проволоки или сетки, приподнятое над землей и закрепленное на изоляторах, обладает емкостью по отношению к земле. Если его разделить на две равные по площади части (фланги), то их емкостное сопротивление будет примерно одинаковым. С помощью подключенного к ним генератора переменного синусоидального напряжения контролируется сила тока в каждой из половин заграждения (рис. 33).

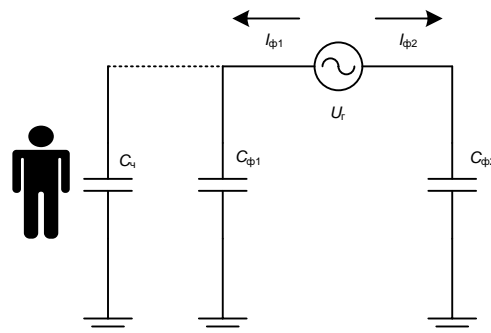


Рис. 33 Емкостный принцип обнаружения нарушителя

При прикосновении человека к одному из флангов заграждения его емкость увеличивается, емкостные токи в половинах заграждения становятся неодинаковыми, и датчик формирует сигнал тревоги. Снег, дождь и другие внешние факторы оказывают примерно одинаковое влияние на обе половины заграждения, и приводят к одинаковым изменениям емкостных токов, протекающих в цепях, поэтому датчик остается в дежурном режиме.

Реактивная мощность. Для количественной характеристики интенсивности обмена энергией между источником и конденсатором служит реактивная мощность $Q = UI$.

1.4 Электрические цепи однофазного синусоидального тока с последовательным и параллельным соединением резистора и реактивного элемента

1.4.1 Цепь с активным сопротивлением и индуктивностью

Цепь (рис. 34) состоит из участков, свойства которых известны. Проанализируем работу данной цепи. Пусть ток в цепи изменяется по закону

$i = I_m \sin \omega t$. Тогда напряжение на активном сопротивлении $u_R = U_{Rm} \sin \omega t$, так как на этом участке напряжение и ток совпадают по фазе. Напряжение на катушке $U_{mL} = U_{mL} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$, поскольку на индуктивности напряжение опережает по фазе ток на угол $\frac{\pi}{2}$.

Построим векторную диаграмму для рассматриваемой цепи (рис. 35). Сначала откладываем вектор тока I , затем вектор напряжения U , совпадающий по фазе с вектором тока.

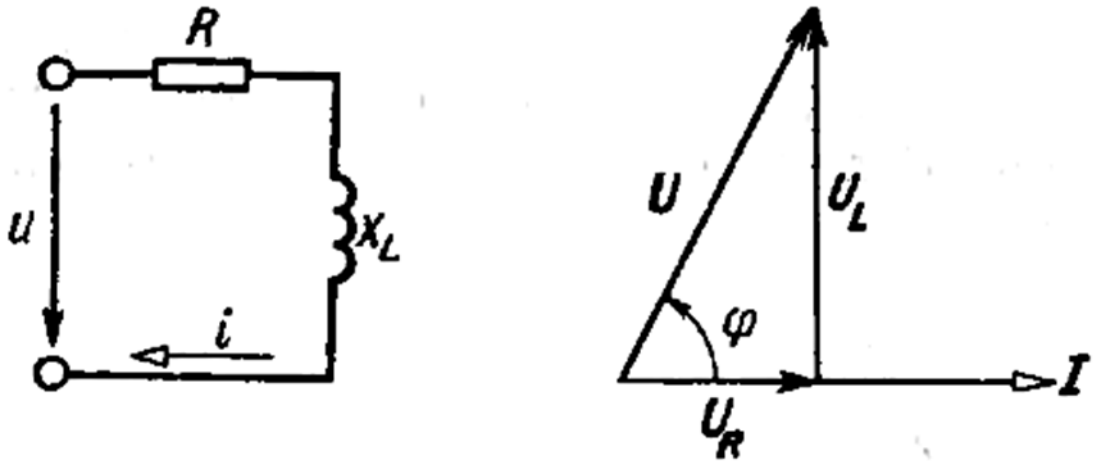


Рис. 34 Схема ЭЦ переменного тока с R и L Рис. 35 Векторная диаграмма для ЭЦ с R и L

Начало вектора U_L , опережающего вектор тока на угол $\pi/2$, соединим с концом вектора U_R для удобства их сложения. Суммарное напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ изображается вектором U , сдвинутым по фазе относительно вектора тока на угол φ . Векторы U_R , U_L и U образуют треугольник напряжений. Выведем закон Ома для этой цепи. На основании теоремы Пифагора для треугольника напряжений имеем $U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$. Но $U_R = IR$, а $U_L = IX_L$, следовательно, $U = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 X_L^2} = I \sqrt{R^2 + X_L^2}$, откуда $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$.

Введем обозначение $\sqrt{R^2 + X_L^2} = Z$, где Z - полное сопротивление цепи. Тогда выражение закона Ома примет вид $I = \frac{U}{Z}$.

Так как полное сопротивление цепи Z определяется по теореме Пифагора, ему соответствует треугольник сопротивлений (рис. 36). Поскольку при последовательном соединении напряжения на участках прямо пропорциональны сопротивлениям, треугольник сопротивлений подобен треугольнику напряжений. Сдвиг фаз φ между током и напряжением определяется из треугольника сопротивлений: $\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L}{R}$, $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$.

Для последовательной цепи условимся отсчитывать угол φ от вектора тока I . Поскольку вектор U сдвинут по фазе относительно вектора I на угол φ против часовой стрелки, этот угол имеет положительное значение. В дальнейшем покажем, что знак угла φ определяется по формальному признаку.

Выведем энергетические соотношения для цепи с активным сопротивлением и индуктивностью.

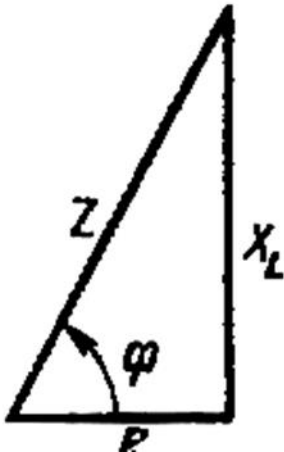


Рис. 36 Треугольник сопротивлений для цепи с R и L

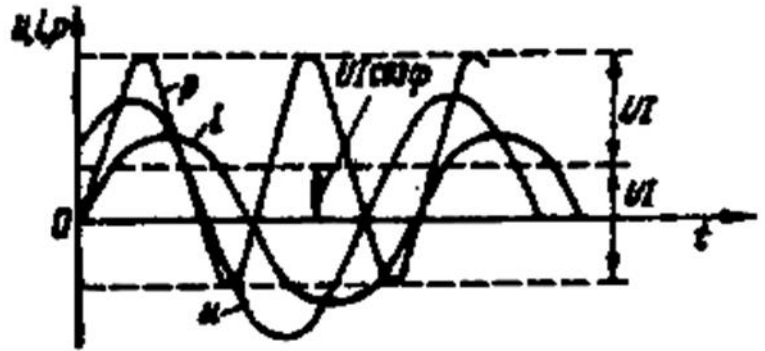


Рис. 37 Временные диаграммы напряжения, тока и мгновенной мощности для цепи с R и L

Мгновенная мощность выражается соотношениями:

$$\begin{aligned} ui &= U_m I_m \sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t = \\ &= U_m I_m (\sin \omega t \times \cos \varphi + \cos \omega t \times \sin \varphi) \sin \omega t = \\ &= U_m I_m (\sin^2 \omega t \times \cos \varphi + \sin \omega t \times \cos \omega t \times \sin \varphi) = \\ &= U_m I_m \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \times \cos \varphi + \frac{\sin 2\omega t}{2} \sin \varphi \right) = \\ &= \frac{U_m I_m}{2} [\cos \varphi - (\cos 2\omega t \times \cos \varphi - \sin 2\omega t \times \sin \varphi)] \end{aligned}$$

или $p = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi)$.

Анализ последнего выражения и диаграммы (см. рис. 37) построенной на его основе, показывает, что мгновенное значение мощности колеблется около постоянного уровня $UI \cos \varphi$, который характеризует среднюю мощность. Отрицательная часть графика определяет энергию, которая переходит от источника к индуктивной катушке и обратно.

Средняя или активная мощность для данной цепи характеризует расход энергии на активном сопротивлении, и следовательно, $P = UR I$. Из векторной диаграммы (см. рис. 36) видно, что $U_R = U \cos \varphi$. Тогда $P = UI \times \cos \varphi$.

Реактивная мощность характеризует интенсивность обмена энергией между индуктивной катушкой и источником:

$$Q = U_L I = UI \sin \varphi.$$

Полная мощность. Понятие полной мощности применяют для оценки предельной мощности электрических машин: $S = UI$, так как $\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1$ то $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

Единицей полной мощности является вольт-ампер (ВА).

1.4.2 Цепь с активным сопротивлением и емкостью

Методика изучения цепи с R и C (рис. 38) аналогична методике изучения цепи с R и L и задается током $i = I_m \sin \omega t$ Тогда напряжение на активном сопротивлении $u_R = U_{Rm} \sin \omega t$. Напряжение на емкости отстает по фазе от тока

на угол $\pi/2$: $u = U_{cm} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$. На основании приведенных выражений построим векторную диаграмму для этой цепи (рис. 39).

Из векторной диаграммы следует, что $U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$, но $U_R = IR$, а $U_C = IX_C$. Таким образом, $U = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 X_C^2} = I \sqrt{R^2 + X_C^2}$, откуда $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$.

Сравните это выражение с $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$. Введя обозначение $\sqrt{R^2 + X_C^2} = Z$, можно записать $I = \frac{U}{Z}$.

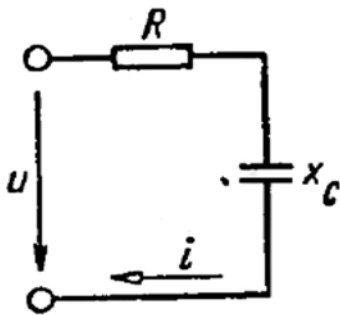


Рис. 38 Схема цепи переменного тока с R и C

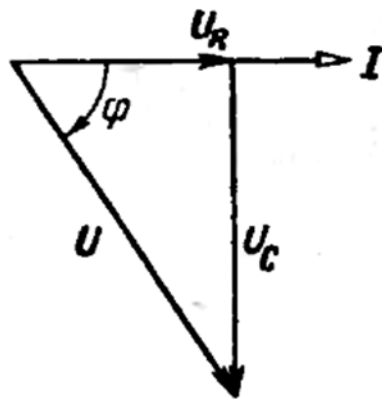


Рис. 39 Векторная диаграмма тока и напряжения для цепи с R и C

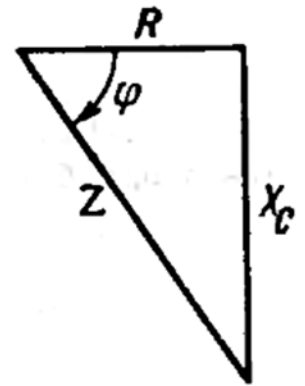


Рис. 40 Треугольник сопротивлений для цепи с R и C

Треугольник сопротивлений для рассматриваемой цепи показан на рис. 40. Расположение его сторон соответствует расположению сторон треугольника напряжений на векторной диаграмме (рис. 39). Сдвиг фаз φ в этом случае отрицателен, так как напряжение отстает по фазе от тока: $\operatorname{tg} \varphi = \frac{-X_C}{R}$,

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}.$$

В энергетическом отношении цепь с R и C формально не отличается от цепи с R и L. Рассмотрим это.

Мгновенная мощность. Так как фаза тока принята нулевой, то $I = I_m \sin \omega t$, напряжение отстает по фазе от тока на угол φ и, следовательно, $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$. Тогда $p = ui = U_m I_m \sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t$.

Опустив промежуточные преобразования, получим $p = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi)$.

Средняя мощность определяется постоянной составляющей мгновенной мощности: $P = UI \cos \varphi$.

Реактивная мощность характеризует интенсивность обмена энергией между источником и емкостью: $Q = UI \sin \varphi$.

Так как $\varphi < 0$, то реактивная мощность $Q < 0$. Физически это означает, что когда емкость отдает энергию, то индуктивность ее потребляет, если они находятся в одной цепи.

1.5 Электрический резонанс в электрических цепях однофазного синусоидального тока

Цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью

Цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью представляет собой общий случай последовательного соединения активных и реактивных сопротивлений и является последовательным колебательным контуром (рис. 41).

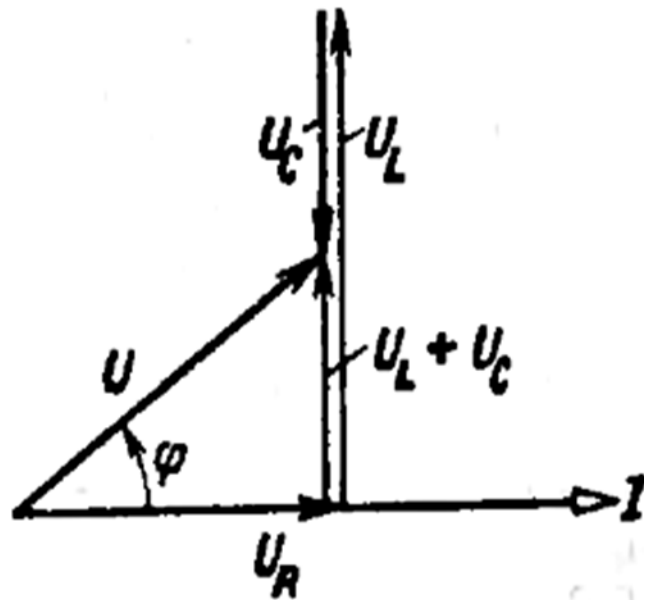
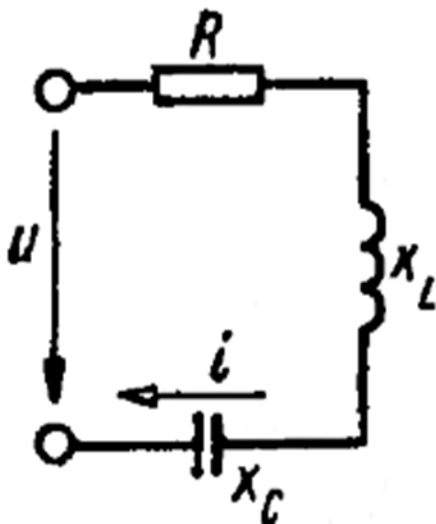


Рис. 41 Схема цепи переменного тока с R , L и C Рис. 42 Векторная диаграмма для цепи с R , L и C

Принимаем фазу тока нулевой: $i = I_m \sin \omega t$ тогда напряжение на активном сопротивлении $u_R = U_{Rm} \sin \omega t$, напряжение на индуктивности $u_L = U_{Lm} \sin (\omega t + \pi/2)$, напряжение на емкости $u_C = U_{Cm} \sin (\omega t - \pi/2)$. Построим векторную диаграмму при условии $X_L > X_C$, т. е. $U_L = IX_L > U_C = IX_C$.

Вектор результирующего напряжения U замыкает многоугольник векторов U_R , U_L и U_C (рис. 42). Вектор $U_L + U_C$ определяет напряжение на индуктивности и емкости. Как видно из диаграммы, это напряжение может быть меньше напряжения на каждом из участков в отдельности. Это объясняется процессом обмена энергией между индуктивностью и емкостью.

Выведем закон Ома для рассматриваемой цепи. Так как модуль вектора $U_C + U_L$ рассчитывают как разность действующих значений $U_L - U_C$, то из диаграммы (рис. 42) следует, что $U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$. Но $U_R = IR$, $U_L = IX_L$, $U_C = IX_C$, следовательно, $U = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$, откуда $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$.

Введя обозначение $\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = Z$, где Z – полное сопротивление цепи, найдём $I = \frac{U}{Z}$.

Разность между индуктивным и емкостным сопротивлениями $X_L - X_C = X$ называют *реактивным сопротивлением цепи*. Учитывая это, получим треугольник сопротивлений для цепи с R , L и C (рис. 43). При $X_L > X_C$ реактивное сопротивление положительное, а сопротивление цепи носит активно-индуктивный характер. При $X_L < X_C$ реактивное сопротивление отрицательное, а сопротивление цепи носит активно-емкостный характер.

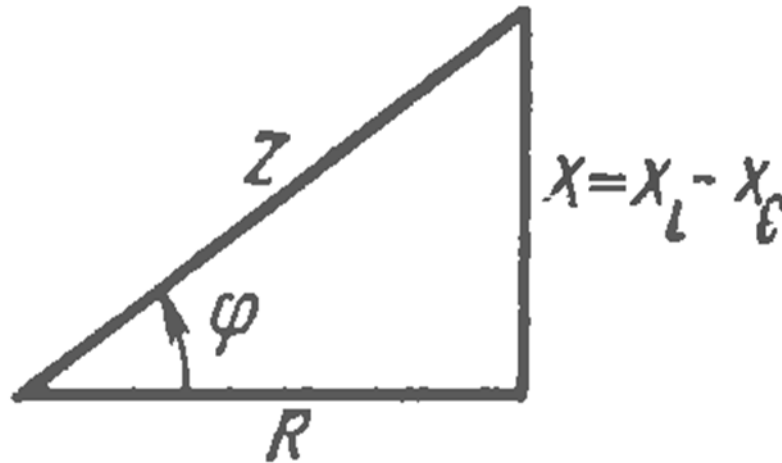


Рис. 43 Треугольник сопротивлений цепи с R , L и C

Знак сдвига фаз между током и напряжением получим автоматически, так как реактивное сопротивление цепи R , L и C – величина алгебраическая: $\operatorname{tg} \varphi = X/R$.

Таким образом, при $X_L \neq X_C$ преобладает или индуктивное, или емкостное сопротивление, т. е. с энергетической точки зрения цепь с R , L и C сводится к цепи с R , L или с R , C . Тогда мгновенная мощность $p = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi)$ причем знак φ определяется по формуле $\operatorname{tg} \varphi = X/R$. Соответственно активная, реактивная и полная мощности характеризуются выражениями $P = UI \cos \varphi$; $Q = UI \sin \varphi$; $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI$.

Допустим, электрическая цепь содержит одну или несколько индуктивностей и емкостей (рис. 44). Под резонансным режимом работы цепи понимают режим, при котором сопротивление является чисто активным. По отношению к источнику питания элементы цепи ведут себя в резонансном режиме как активное сопротивление, поэтому ток и напряжение в неразветвленной части совпадают по фазе. Реактивная мощность цепи при этом равна нулю.

Различают два основных режима: резонанс напряжений и резонанс токов.

1.5.1 Электрические цепи однофазного синусоидального тока с последовательным соединением R , L и C . Резонанс напряжения

Резонансом напряжения называют явление в цепи с последовательным контуром, когда ток в цепи совпадает по фазе с напряжением источника.

На рис. 45 показана схема последовательного колебательного контура.

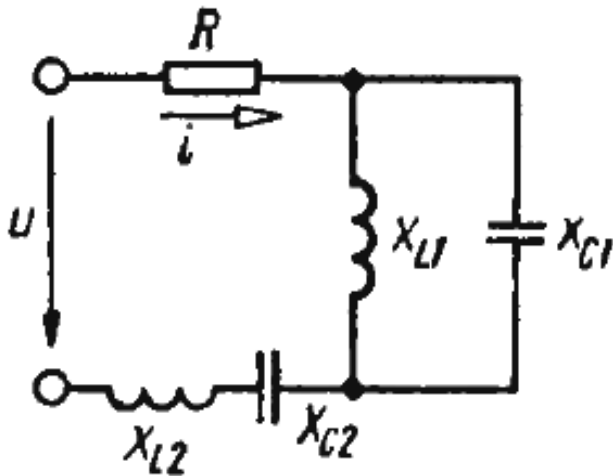


Рис. 44 Резонансный режим работы цепи

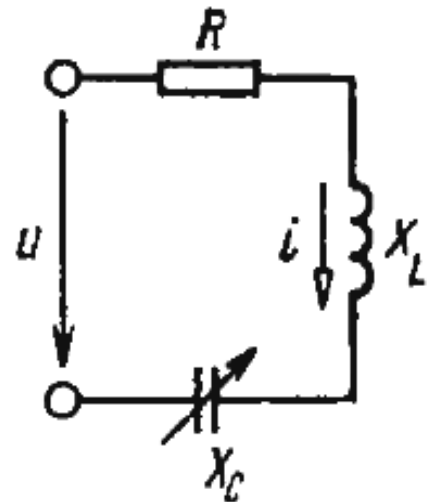


Рис. 45 Схема последовательного колебательного контура

Найдем условие резонанса напряжений. Для того чтобы ток цепи совпадал по фазе с напряжением, реактивное сопротивление должно быть равно нулю, так как $\operatorname{tg}\varphi = \frac{X}{R}$.

Таким образом, условием резонанса напряжений является $X = 0$ или $X_L = X_C$. Но $X_L = 2\pi fL$, а $X_C = 1/(2\pi fC)$, где f — частота источника питания. В результате можно записать $2\pi fL = 1/(2\pi fC)$.

Решив это уравнение относительно f , получим $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_0$.

При резонансе напряжений частота источника равна собственной частоте колебаний контура.

Данное выражение является формулой *Томсона*, определяющей зависимость собственной частоты колебаний контура f_0 от параметров L и C . Следует вспомнить, что если конденсатор контура зарядить от источника постоянного тока, а затем замкнуть его на индуктивную катушку, то в контуре возникнет переменный ток частоты f_0 . Вследствие потерь колебания в контуре будут затухать, причем время затухания зависит от значения возникших потерь.

Резонансу напряжений соответствует векторная диаграмма, приведенная на рис. 46. На основании этой диаграммы и закона Ома для цепи с R , L и C сформулируем *признаки резонанса напряжений*:

- а) сопротивление цепи $Z = R$ минимальное и чисто активное;
- б) ток цепи совпадает по фазе с напряжением источника и достигает максимального значения;
- в) напряжение на индуктивной катушке равно напряжению на конденсаторе и каждое в отдельности может во много раз превышать напряжение на зажимах цепи.

Физически это объясняется тем, что напряжение источника при резонансе идет только на покрытие потерь в контуре. Напряжение на катушке и конденсаторе обусловлено накопленной в них энергией, значение которой тем больше, чем меньше потери в цепи.

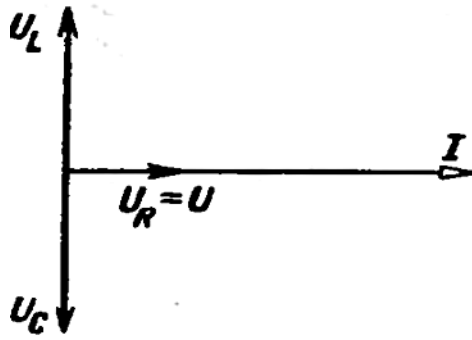


Рис. 47 Векторная диаграмма при резонансе напряжений

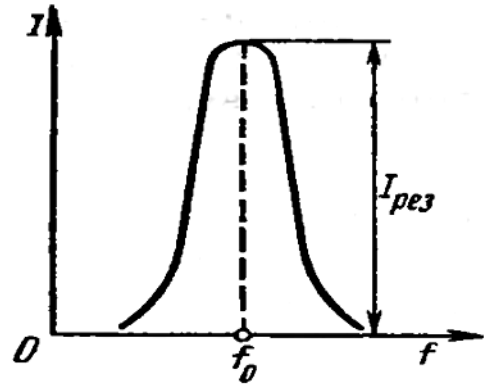


Рис. 48 Резонансная кривая последовательного контура

Количественно указанное явление характеризуется добротностью контура Q , которая представляет собой отношение напряжения на катушке или конденсаторе к напряжению на зажимах цепи при резонансе:

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_L}{U_R} = \frac{IX_L}{IR} = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R}.$$

При резонансе $X_L = 2\pi fL = 2\pi \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} L = \sqrt{LC}$. Величину $\sqrt{\frac{L}{C}} = Z_B$ называют *волновым сопротивлением* контура. Таким образом, $Q = \frac{Z_B}{R}$.

Способность колебательного контура выделять токи резонансных частот и ослаблять токи других частот характеризуется резонансной кривой (рис. 47).

Резонансная кривая показывает зависимость действующего значения тока в контуре от частоты источника при неизменной собственной частоте контура.

Эта зависимость определяется законом Ома для цепи с R , L и C .

Действительно. $I = \frac{U}{Z}$, где $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left[\frac{(2\pi fL - 1)}{(2\pi fC)}\right]^2}$.

На рис. 48 показана зависимость реактивного сопротивления $X = X_L - X_C$ от частоты источника f . Анализ этого графика и рассмотренного выше выражения показывает, что при низких и высоких частотах реактивное сопротивление велико и ток в контуре мал.

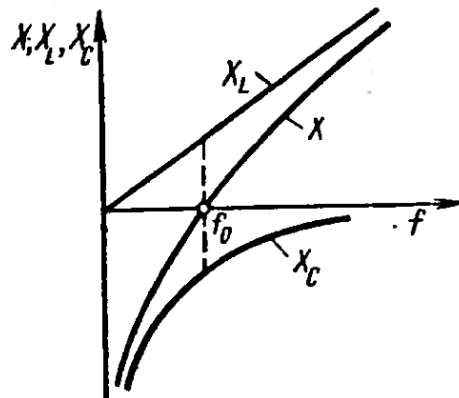


Рис. 48 Зависимость реактивного сопротивления X от частоты источника

При частотах, близких к f_0 , реактивное сопротивление мало и ток контура велик. При этом, чем больше добротность контура Q , тем острее резонансная кривая контура.

Резонанс напряжений широко используется в радиотехнике и электронике для выделения сигналов заданной частоты.

Рассмотрим расчет разветвленной цепи (рис. 49). Токи I_1 и I_2 определяют аналитически, а ток I – с помощью векторной диаграммы. Метод векторных диаграмм, как всякий графический метод, не дает возможности получить высокую точность. Введем метод проводимостей, который позволяет определять все токи в разветвленных цепях аналитически. Построим для этой цели векторную диаграмму (рис. 50). Так как ветви включены параллельно, общим для рассматриваемой цепи является напряжение U . Поэтому сначала строим вектор напряжения U , а затем векторы токов I_1 и I_2 . Разложим эти токи на активные и реактивные составляющие I_{a1} , I_{a2} , I_{p1} , и I_{p2} и выразим их через известное напряжение U и параметры ветвей:

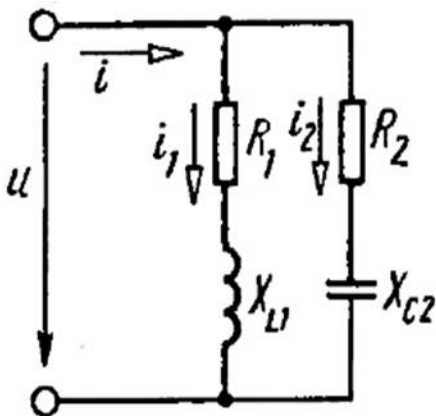


Рис. 49 Схема разветвленной цепи

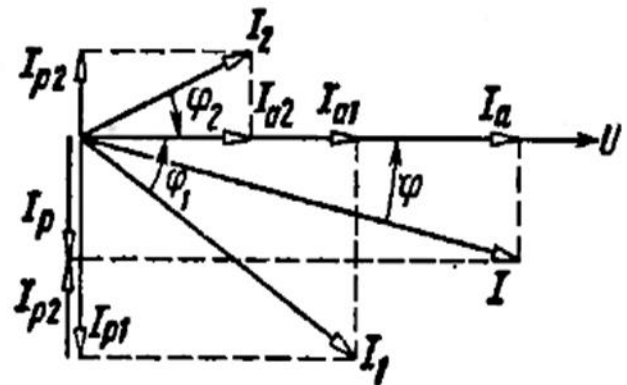


Рис. 50 Векторная диаграмма для разветвленной цепи

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1 = \frac{U R_1}{Z_1 Z_1} = U \frac{R_1}{Z_1^2}; \quad I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2 = \frac{U R_2}{Z_2 Z_2} = U \frac{R_2}{Z_2^2};$$

$$I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1 = \frac{U X_1}{Z_1 Z_1} = U \frac{X_1}{Z_1^2}; \quad I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2 = \frac{U X_2}{Z_2 Z_2} = U \frac{X_2}{Z_2^2};$$

Введем следующие обозначения:

$$\frac{R_1}{Z_1^2} = g_1 \text{ — активная проводимость первой ветви;}$$

$$\frac{R_2}{Z_2^2} = g_2 \text{ — активная проводимость второй ветви;}$$

$$\frac{X_1}{Z_1^2} = b_1 \text{ — реактивная проводимость первой ветви;}$$

$$\frac{X_2}{Z_2^2} = b_2 \text{ — реактивная проводимость второй ветви.}$$

Тогда $I_{a1} = U g_1$; $I_{a2} = U g_2$; $I_{p1} = U b_1$; $I_{p2} = U b_2$.

Необходимо отметить, что знак реактивных проводимостей получается автоматически, так как $X_1 = X_{L1} - X_{C1}$; $X_2 = X_{L2} - X_{C2}$.

В нашем случае $X_{C1} = 0$, $X_{L2} = 0$ и, следовательно, $b_1 > 0$, а $b_2 < 0$. Из векторной диаграммы находим общий ток:

$$I = \sqrt{(I_{a1} + I_{a2})^2 + \frac{(I_{p1} - I_{p2})^2}{(b_1 + b_2)^2}} = U \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 + b_2)^2} = Y,$$

где Y - полная проводимость цепи.

Отсюда $I = UY = \frac{U}{Z}$, $Z = \frac{1}{Y}$ - полное сопротивление цепи.

Токи I_1 и I_2 могут быть выражены аналогично:

$$I_1 = U \sqrt{g_1^2 + b_1^2} = UY_1, I_2 = U \sqrt{g_2^2 + b_2^2} = UY_2,$$

где $Y_1 = \sqrt{g_1^2 + b_1^2}$ - полная проводимость первой ветви;

$Y_2 = \sqrt{g_2^2 + b_2^2}$ - полная проводимость второй ветви.

Этим выражениям соответствуют треугольники проводимостей, представленные на рис. 51.

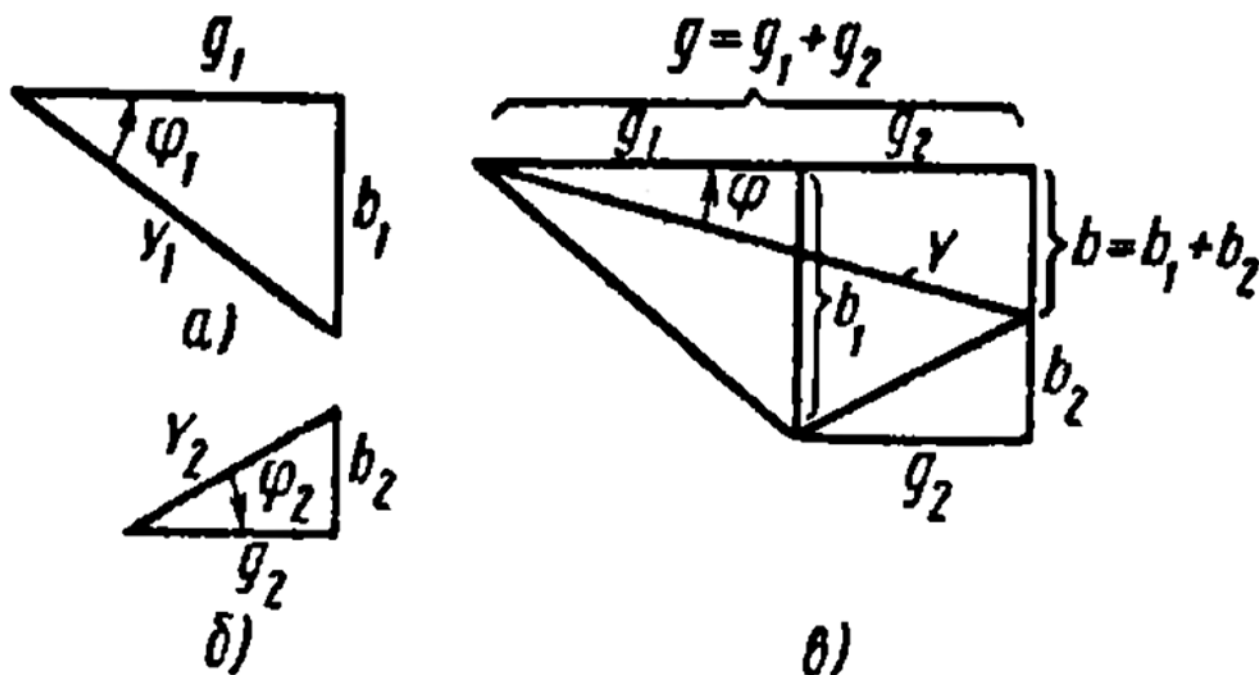


Рис. 51 Треугольники проводимостей

а) - для ветви с R_1 и X_{L1} ; б) - для ветви с R_2 и X_{C2} ; в) - для всей цепи

Функции угла φ определяют так: $\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{g}$; $\cos \varphi = \frac{g}{Y}$.

Выражения для мощностей принимают такой вид:

активная мощность:

$$P = UI_a = Ug^2;$$

Реактивная мощность:

$$Q = UI_p = U^2 b.$$

1.5.2 Электрические цепи однофазного синусоидального тока с параллельным соединением R , L и C , резонанс тока

Резонансом токов называют такое явление в цепи с параллельным колебательным контуром, когда ток в неразветвленной части цепи совпадает по фазе с напряжением источника.

На рис. 52 представлена схема параллельного колебательного контура. Сопротивление R в индуктивной ветви обусловлено тепловыми потерями на активном сопротивлении катушки. Потерями в емкостной ветви можно пренебречь. Найдем условие резонанса токов. Согласно определению, ток совпадает по фазе с напряжением U . Следовательно, проводимость контура должна быть чисто активной, а реактивная проводимость равна нулю

$$b = b_1 + b_2 = 0, \text{ где } b_1 = b_L = \frac{X_L}{(R^2 + X_L^2)}; b_2 = -b_C = -\frac{I}{X_C}.$$

Условием резонанса токов является равенство нулю реактивной проводимости контура.

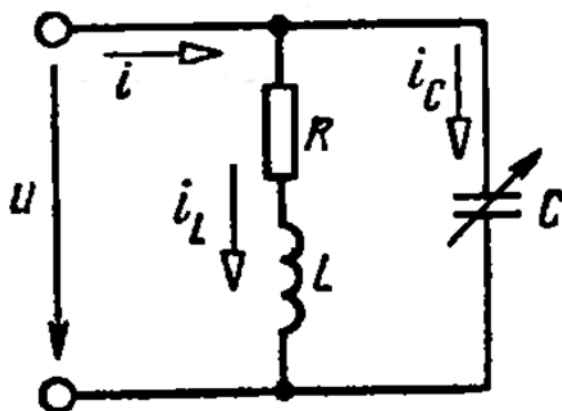


Рис. 52 Схема параллельного колебательного контура

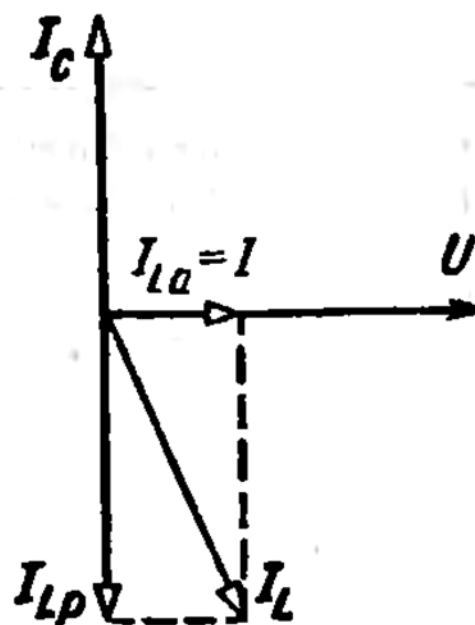


Рис. 53 Векторная диаграмма при резонансе токов

Для выяснения признаков резонанса токов построим векторную диаграмму.

Для того чтобы ток I в неразветвленной части цепи совпадал по фазе с напряжением, реактивная составляющая тока индуктивной ветви I_{Lp} должна быть равна по модулю току емкостной ветви I_C (рис. 53). Активная составляющая тока индуктивной ветви I_{La} оказывается равной току источника I . Определим сопротивление контура в предположении $R \ll X_L$.

Так как сопротивление контура $Z_K = \frac{1}{Y_K}$, найдем сначала Y_K . Согласно

выражению $\sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 + b_2)^2} = Y$, $Y_K = g_1 + g_2$, поскольку $b_1 + b_2 = 0$, но $g_2 \neq 0$ ввиду того, что потери в емкостной ветви пренебрежимо малы. Таким образом, $Y_K = g_1 = \frac{R}{R^2 + X_L^2} \approx \frac{R}{X_L^2}$. В этом случае частота, при которой наступает резонанс

токов, практически совпадает с собственной частотой контура и, следовательно, $X_L = 2\pi fL = 2\pi \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = Z_B$. Окончательно имеем: $Z_K = \frac{Z_B^2}{R}$.

Сформулируем признаки резонанса токов:

а) сопротивление контура максимальное и чисто активное;

б) ток в неразветвленной части цепи совпадает по фазе с напряжением источника и достигает практически минимального значения;

в) реактивная составляющая тока в катушке равна емкостному току, причем эти токи могут во много раз превышать ток источника.

Физически это объясняется тем, что при малых потерях в контуре (при малом R) ток источника требуется только для покрытия этих потерь. Ток в контуре обусловлен обменом энергией между магнитным полем катушки и электрическим полем конденсатора. В идеальном случае (контур без потерь) ток источника отсутствует.

1.5.3 Использование резонансных свойств колебательного контура в средствах радиосвязи

Резонансные цепи используются в средствах радиосвязи для формирования частотных характеристик радиоприемников и радиопередатчиков в интересах защиты средств связи от взаимных помех.

Например, в радиостанции Р-143 (рис. 54) ручками «Настройка антенн», «Грубо», «Связь» изменяются емкость переменного конденсатора и индуктивность катушки резонансного колебательного контура (рис. 55) согласующего устройства антенны.



Рис. 54 Органы управления радиостанции Р-143

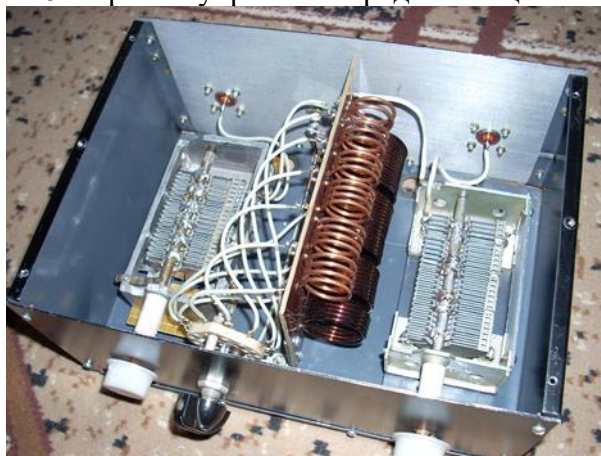


Рис. 55 Регулируемый колебательный контур

Коэффициент мощности

Коэффициентом мощности называют отношение активной (полезной) мощности цепи к полной мощности, присутствующей в цепи, численно равное косинусу угла между их векторами:

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

Технико-экономическое значение коэффициента мощности $\cos\varphi$ заключается в том, что от его значения зависят эффективность использования электрических установок и, следовательно, капитальные и эксплуатационные расходы.

Активная мощность, развиваемая генератором при номинальном режиме,

$$P = U_{ном} I_{ном} \cos\varphi,$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение генератора;

$I_{ном}$ – номинальный ток, который при длительном прохождении вызывает предельно допустимое нагревание генератора.

Полное использование мощности генератора происходит, когда $\cos\varphi = 1$. В этом случае активная мощность P максимальна и равна номинальной полной мощности $S_{ном}$: $S_{ном} = U_{ном} I_{ном}$.

Таким образом, уменьшение $\cos\varphi$, значение которого определяется характером нагрузки, приводит к неполному использованию генератора. Если приемник энергии (нагрузка) работает при неизменных напряжении и мощности, то ток нагрузки генератора будет тем больше, чем меньше $\cos\varphi$. Покажем это. Обозначим через I_0 ток, соответствующий значению $\cos\varphi_0 = 1$. Так как мощность, согласно условию, не меняется, то $UI_0 = UI \cos\varphi$, откуда $I = \frac{I_0}{\cos\varphi}$. Увеличение тока генератора приводит к возрастанию тепловых потерь в линиях передачи энергии.

1.6 Трехфазные электрические цепи

1.6.1 Общие сведения о трехфазной электрической цепи

Три синусоидальные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутые по фазе на 120° , образуют трехфазную симметричную систему. Аналогично получают трехфазные системы напряжений и токов.

В настоящее время трехфазные системы получили широкое распространение, что объясняется, главным образом, следующими причинами:

при одинаковых условиях питание трехфазным током позволяет получить значительную экономию материала проводов по сравнению с тремя однофазными линиями;

при прочих равных условиях трехфазный генератор дешевле, легче и экономичнее, чем три однофазных генератора такой же общей мощности. То же относится к трехфазным двигателям и трансформаторам;

трехфазная система токов позволяет получить вращающееся магнитное поле с помощью трех неподвижных катушек, что существенно упрощает производство и эксплуатацию трехфазных двигателей;

при равномерной нагрузке трехфазный генератор создает на валу приводного двигателя постоянный момент в отличие от однофазного генератора, у которого мощность и момент на валу пульсируют с двойной частотой тока.

На рис. 56 изображена схема простейшего трехфазного генератора, с помощью которой легко пояснить принцип получения трехфазной ЭДС.

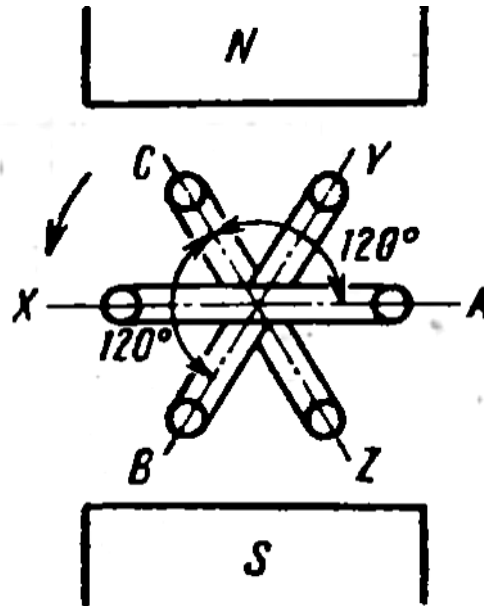


Рис. 56 Принципиальная схема генератора

В однородном магнитном поле постоянного магнита вращаются с постоянной угловой скоростью ω три рамки, сдвинутые в пространстве одна относительно другой на угол 120° .

В момент времени $t = 0$ рамка $AХ$ расположена горизонтально и в ней индуцируется ЭДС $e_A = E_m \sin \omega t$. Точно такая же ЭДС будет индуцироваться и в рамке $ВУ$, когда она повернется на 120° и займет положение рамки $AХ$. Следовательно, при $t = 0$ $e_B = E_m \sin (\omega t - 120^\circ)$.

Рассуждая аналогичным образом, находим ЭДС в рамке CZ :

$$e_C = E_m \sin (\omega t - 240^\circ) = E_m \sin (\omega t + 120^\circ).$$

На рис. 57 представлен график мгновенных значений ЭДС e_A , e_B , e_C и векторная диаграмма трехфазной системы ЭДС.

Если к каждой из рамок $AХ$, $ВУ$ и CZ подсоединить нагрузку (посредством щеток и контактных колец), то в образовавшихся цепях появятся токи.

При симметричной нагрузке, когда все три нагрузочных сопротивления равны по значению и имеют одинаковый характер, синусоиды напряжений и токов изображаются графиками, аналогичными графику ЭДС. При этом начальные фазы токов определяются характером нагрузки, токи I_A , I_B , I_C равны по амплитуде и сдвинуты по фазе на 120° один относительно другого. Векторная диаграмма трехфазных напряжений и токов при симметричной нагрузке изображена на рис. 58.

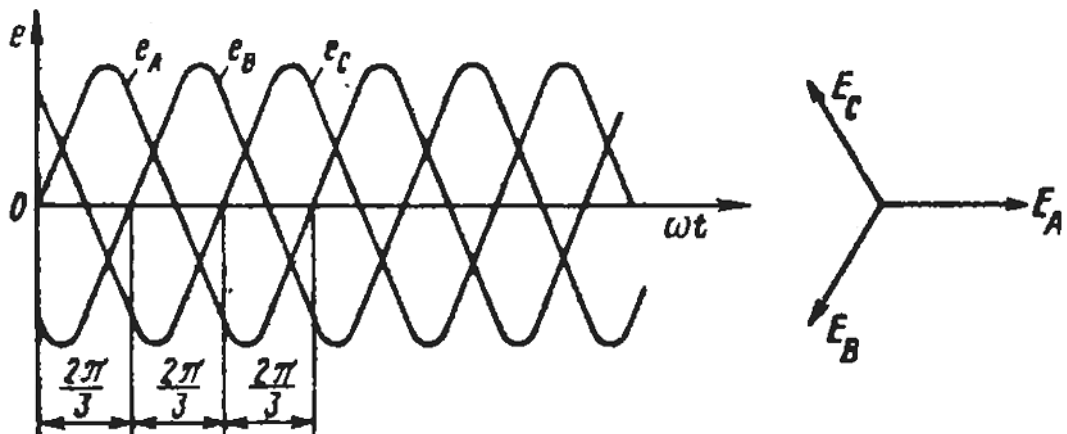


Рис. 57 К принципу получения трёхфазной системы ЭДС

Следует отметить, что в реальном трехфазном генераторе три неподвижные обмотки размещаются на статоре, а магнитное поле, индукция которого распределена по синусоидальному закону, создается вращающимся ротором.

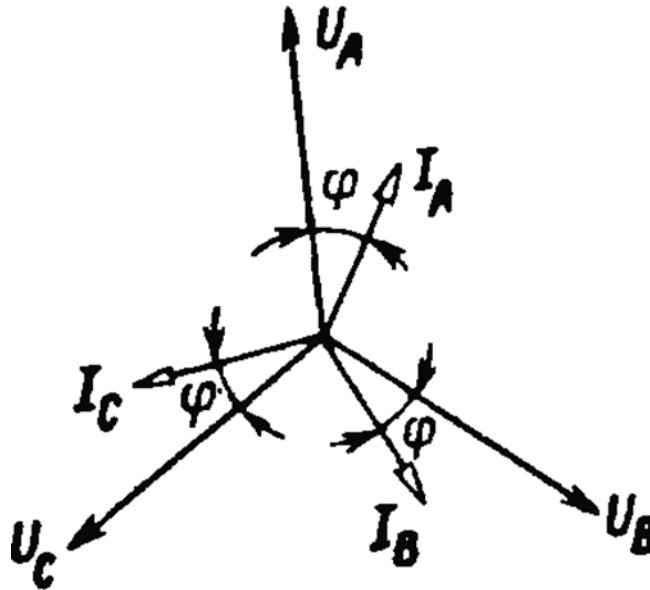


Рис. 58 Векторная диаграмма трёхфазных напряжений и токов при симметричной нагрузке

Трёхфазный генератор, соединенный проводами с трёхфазным потребителем, образует трёхфазную цепь.

В трёхфазной цепи протекает трёхфазная система токов, т. е. синусоидальные токи с тремя различными фазами. Участок цепи, по которому протекает один из токов, называют *фазой трёхфазной цепи*.

Возможны различные способы соединения обмоток генератора с нагрузкой. На рис. 59 показана несвязанная трёхфазная цепь, в которой каждая обмотка генератора питает свою фазную нагрузку. Такую цепь, требующую шести соединительных проводов, практически не применяют.

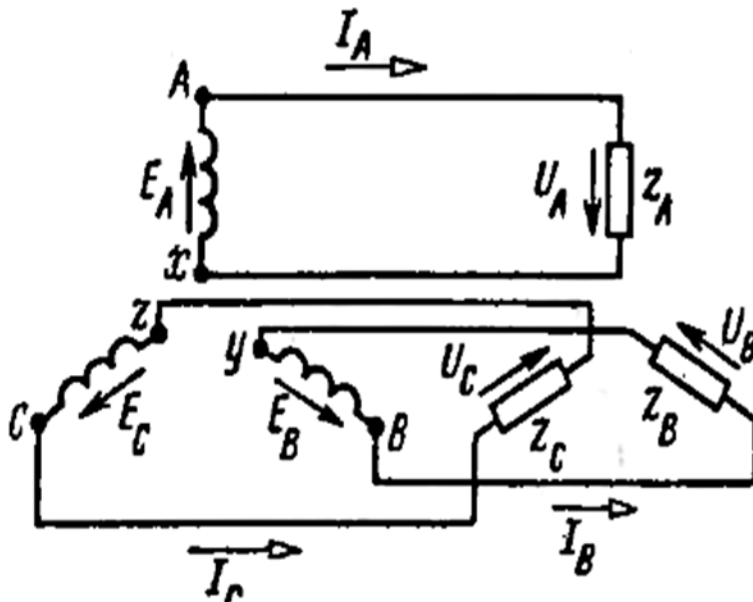


Рис. 59 Схема несвязанной трёхфазной цепи

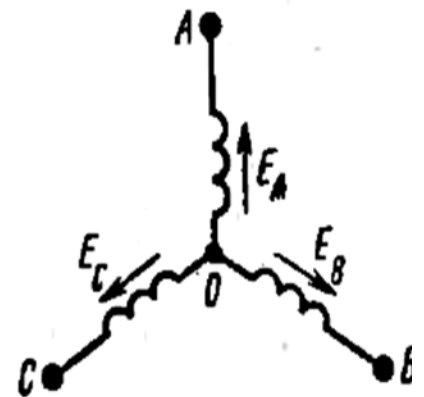


Рис. 60 Схема обмоток генератора, соединённых звездой

1.6.2 Способы соединения фаз трехфазного источника и трехфазной нагрузки

В целях экономии обмотки трехфазного генератора соединяют *звездой* или *треугольником*. При этом число соединительных проводов от генератора к нагрузке уменьшается до трех или четырех.

На электрических схемах трехфазный генератор принято изображать в виде трех обмоток, расположенных под углом 120° друг к другу. При *соединении звездой* (рис. 60) концы этих обмоток объединяют в одну точку, которую называют нулевой точкой генератора и обозначают 0 . Начала обмоток обозначают буквами A, B, C .

При *соединении треугольником* (рис. 60) конец первой обмотки генератора соединяют с началом второй, конец второй – с началом третьей, конец третьей – с началом первой. К точкам A, B, C подсоединяют провода соединительной линии.

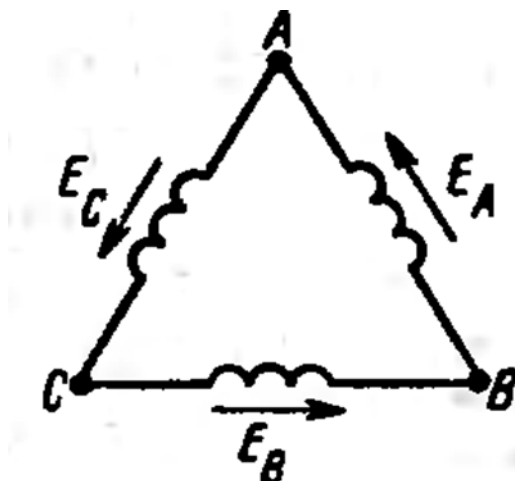


Рис. 60 Схема обмоток генератора, соединенных треугольником

Отметим, что при отсутствии нагрузки ток в обмотках такого соединения отсутствует, так как геометрическая сумма ЭДС E_A, E_B и E_C равна нулю.

Рассмотрим соединение генератора с нагрузкой, включенной *звездой* (рис. 61).

Провод OO' называют нулевым (четырёхпроводная цепь). В соответствии с первым законом Кирхгофа вектор тока в нулевом проводе $I_0 = I_A + I_B + I_C$.

Как отмечалось, при симметричной нагрузке, когда сопротивления Z_A, Z_B и Z_C равны между собой и имеют одинаковый характер, векторы токов I_A, I_B, I_C равны по абсолютному значению и образуют трехлучевую звезду, у которой углы между лучами равны 120° .

Из геометрического построения, показанного на рис. 62, следует, что в этом случае векторная сумма токов равна нулю: $I_A + I_B + I_C = 0$.

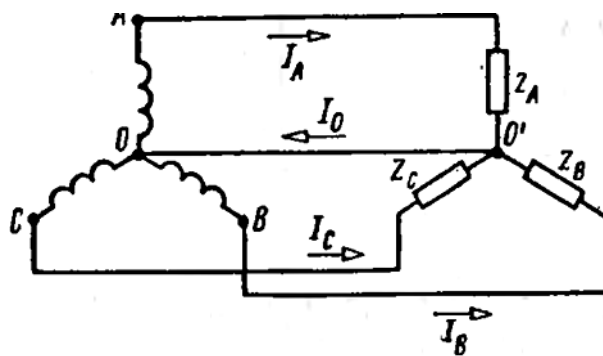


Рис. 61 Схема трёхфазной электрической цепи с нулевым проводом

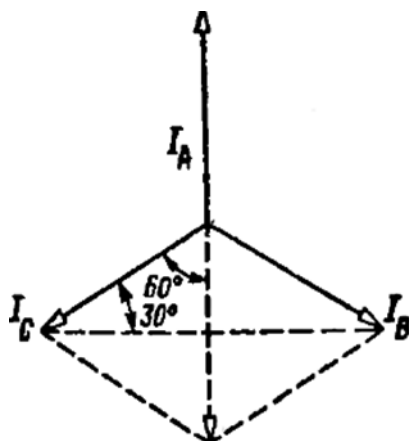


Рис. 62 Векторная диаграмма токов в трёхфазной цепи при симметричной нагрузке

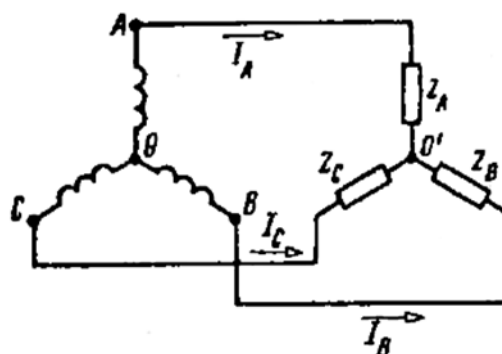




Рис. 63 Схема трёхфазной трёхпроводной цепи

Таким образом, при симметричной нагрузке нулевой провод не нужен. Получается схема трёхфазной трёхпроводной цепи, изображенная на рис. 63. Соединение *звездой* с нулевым проводом принято условно обозначать значком , а соединение *звездой* без нулевого провода – значком .

Площадь поперечного сечения нулевого провода может быть принята равной половине площади поперечного сечения каждого из остальных трех проводов (их сечения равны между собой).

1.6.3 Трёхфазная ЭЦ типа «звезда-звезда», «треугольник-треугольник» и их параметры

Система ЭДС обмоток трёхфазного генератора, работающего в энергосистеме, всегда симметрична: ЭДС поддерживаются строго постоянными по амплитуде и сдвинутыми по фазе на 120° .

Рассмотрим симметричную нагрузку (рис. 64), для которой

$$Z_A = Z_B = Z_C = Z, \quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi.$$

К зажимам A, B, C подходят провода линии электропередачи – линейные провода.

Введем обозначения: I_l – линейный ток в проводах линии электропередачи; I_ϕ – ток в сопротивлениях (фазах) нагрузки; U_l – линейное напряжение между линейными проводами; U_ϕ – фазное напряжение на фазах нагрузки.

В рассматриваемой схеме фазные и линейные токи совпадают: $I_l = I_\phi$. Напряжения U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} являются линейными, а напряжения U_A , U_B , U_C – фазными. Складывая напряжения, находим (рис. 65):

$$U_{AB} = U_A - U_B, U_{BC} = U_B - U_C, U_{CA} = U_C - U_A$$

Векторную диаграмму, удовлетворяющую этим уравнениям (рисунок 1.6.11), начинаем строить с изображения звезды фазных напряжений U_A , U_B , U_C . Затем строим вектор U_{AB} – как геометрическую сумму векторов U_A , и $-U_B$, вектор U_{BC} – как геометрическую сумму векторов U_B и $-U_C$, вектор U_{CA} , – как геометрическую сумму векторов U_C и $-U_A$.

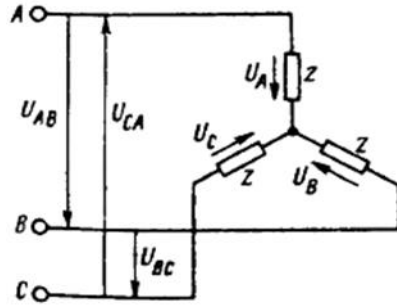


Рис. 64 Соединение нагрузки звездой

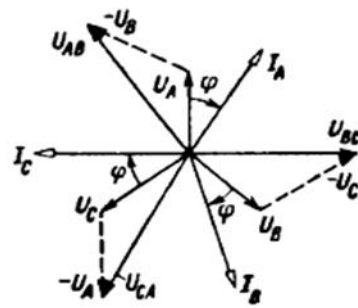


Рис. 65 Полярная векторная диаграмма напряжений

Для полноты картины на векторной диаграмме изображены также векторы токов, отстающих на угол φ от векторов соответствующих фазных напряжений (нагрузку считаем индуктивной).

По построенной векторной диаграмме начала всех векторов совмещены в одной точке (полюсе), поэтому ее называют *полярной*. Основное достоинство полярной векторной диаграммы – ее наглядность.

Уравнениям, связывающим векторы линейных и фазных напряжений, удовлетворяет также векторная диаграмма (рис. 66), которую называют *топографической*.

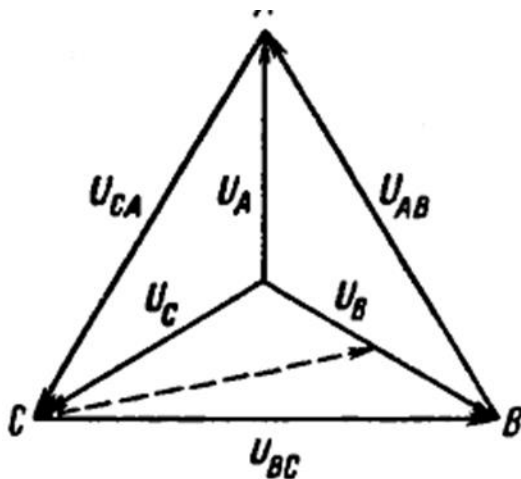


Рис. 66 Топографическая векторная диаграмма напряжений

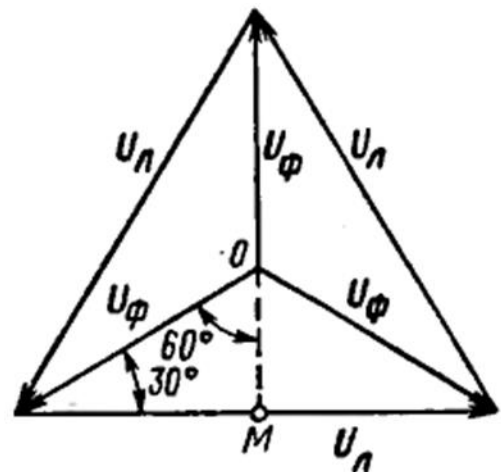


Рис. 67 Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений при симметричной нагрузке

Она позволяет графически найти напряжение между любыми точками схемы, изображенной на рис. 64. Например, для определения напряжения между точкой C и точкой, которая делит пополам сопротивление, включенное в

фазу B , достаточно соединить на векторной диаграмме точку C с серединой вектора U_B . На диаграмме вектор искомого напряжения показан пунктиром.

При симметричной нагрузке модули векторов фазных и (линейных) напряжений равны между собой. Тогда топографическую диаграмму можно изобразить так, как показано на рис. 67.

Опустив перпендикуляр OM , из прямоугольного треугольника находим

$$\frac{U_L}{2} = \sqrt{\frac{U_\phi^2 - U_\phi^2}{4}} = \frac{\sqrt{3}U_\phi}{2}.$$

В симметричной звезде фазные и линейные токи и напряжения связаны соотношениями $I_L = I_\phi$; $U_L = \sqrt{3} * U_\phi$.

Ток в нулевом проводе равен нулю при строго симметричной нагрузке. Если нагрузка несимметричная, т. е. $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$, то неравными будут и токи: $I_A \neq I_B \neq I_C$. Тогда на основе построения, аналогичного приведенному на рисунке 1.6.8 53, нетрудно убедиться, что при симметрии фазных напряжений ток в нулевом проводе не равен нулю: $I_0 \neq 0$ (за исключением некоторых частных случаев).

Таким образом, при симметрии фазных напряжений и симметрии нагрузки в нулевом проводе есть ток. Представим себе, что нулевой провод оборвался: $I_0 = 0$. При этом токи I_A, I_B, I_C должны измениться так, чтобы их векторная сумма оказалась равной нулю: $I_A + I_B + I_C = 0$.

Но при заданных сопротивлениях нагрузки Z_A, Z_B, Z_C токи могут изменяться только за счет изменения фазных напряжений. Следовательно, обрыв нулевого провода в общем случае приводит к изменению фазных напряжений: симметричные фазные напряжения становятся несимметричными.

Рассмотрим топографическую векторную диаграмму, представленную на рис. 68. Для простоты пренебрежем падением напряжения внутри обмоток генератора и на проводах линии и будем считать, что напряжения на нагрузке равны ЭДС генератора.

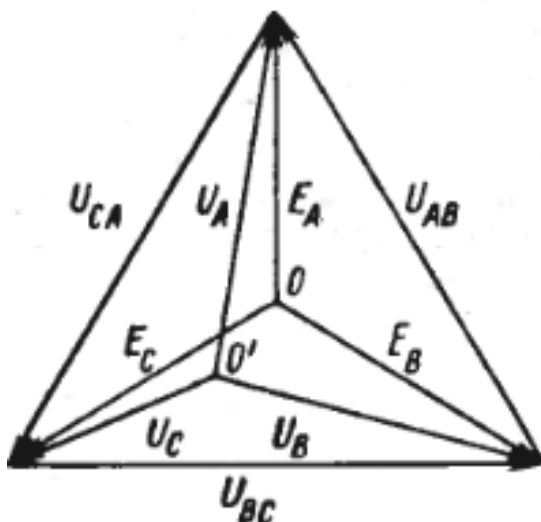


Рис. 68 Топографическая векторная диаграмма ЭДС и напряжений трехфазной цепи при отсутствии нулевого провода

При несимметрии нагрузки и отсутствии нулевого провода фазные напряжения U_A, U_B, U_C будут различными, и точка O' займет на векторной диаграмме положение, отличное от точки O .

Введем нулевой провод с пренебрежимо малым сопротивлением, как показано на рис. 61. При этом потенциалы точек O и O' окажутся одинаковыми. Это означает, что точки O и O' на топографической диаграмме (рис. 68) должны быть совмещены.

Точка u на топографической диаграмме не может изменить своего положения, так как симметрия ЭДС E_A, E_B, E_C обеспечивается конструкцией генератора. Следовательно, точка O' перейдет в точку O , т. е. фазные напряжения на нагрузке станут симметричными.

Таким образом, нулевой провод в четырехпроводной цепи предназначен для обеспечения симметрии фазных напряжений при несимметричной нагрузке.

Несимметрия фазных напряжений недопустима, так как приводит к нарушению нормальной работы потребителей, рассчитанных на определенное рабочее напряжение.

Треугольником могут быть соединены как обмотки генератора, так и фазы нагрузки. При соединении *треугольником* фазные и линейные напряжения равны (рис. 69). Применим первый закон Кирхгофа к узлам A, B и C , найдем связь между линейными I_A, I_B, I_C и фазными I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} токами.

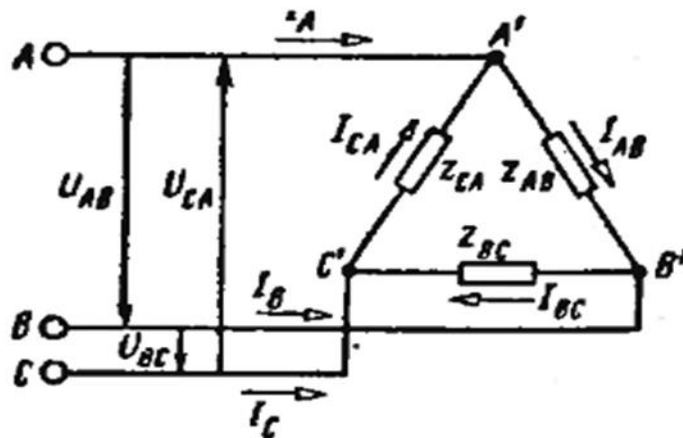


Рис. 69 Соединение нагрузки треугольником

Для векторов токов справедливы соотношения $I_A = I_{AB} - I_{CA}$; $I_B = I_{BC} - I_{AB}$; $I_C = I_{CA} - I_{BC}$. Этим уравнениям удовлетворяют векторные диаграммы, представленные на рис. 70).

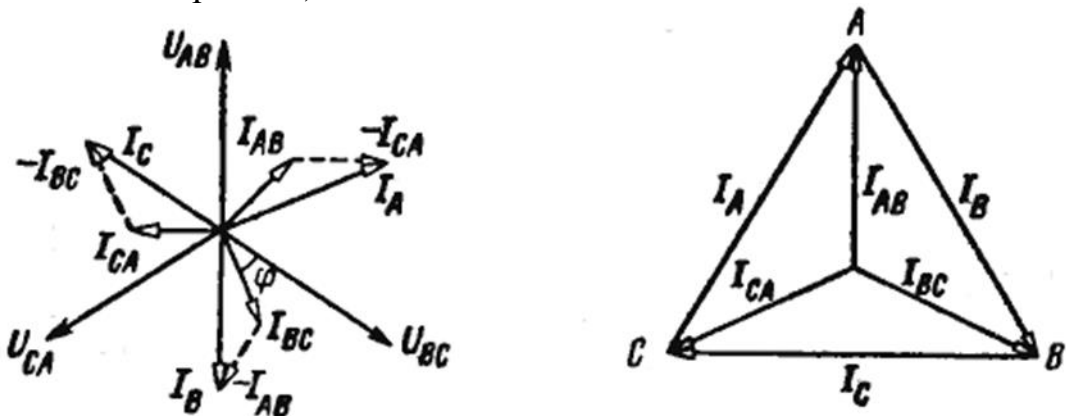


Рис. 70 Векторные диаграммы напряжений и токов трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником

При симметричной нагрузке

$$I_A = I_B = I_C = I_L;$$

$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_\Phi$$

Из треугольника фазных и линейных токов (рис. 71) находим

$I_L = 2I_\Phi \cos 30^\circ = 2I_\Phi \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} * I_\Phi$. Таким образом, при соединении треугольником $U_\Phi = U_L$; $I_L = \sqrt{3} * I_\Phi$.

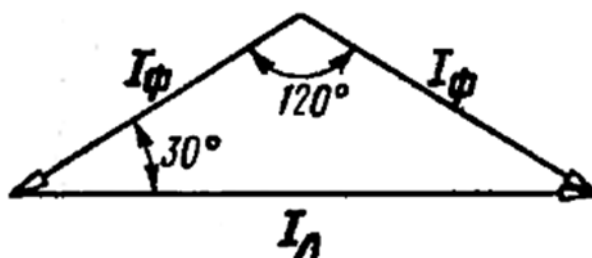


Рис. 71 К определению соотношения между фазными и линейными токами при соединении нагрузки треугольником

Активная мощность трехфазной цепи равна сумме активных мощностей ее фаз: $P = P_A + P_B + P_C$ - Реактивная мощность трехфазной цепи равна сумме реактивных мощностей ее фаз: $Q = Q_A + Q_B + Q_C$,

Очевидно, что в симметричной трехфазной цепи $P_A = P_B = P_C = P_\Phi$; $Q_A = Q_B = Q_C = Q_\Phi$, тогда $P = 3P_\Phi$, $Q = 3Q_\Phi$.

Мощность одной фазы определяется по формулам для однофазной цепи. Таким образом, $P = 3U_\Phi I_\Phi \cos \varphi$; $Q = 3U_\Phi I_\Phi \sin \varphi$.

Эти формулы можно использовать для расчета мощности симметричной трехфазной цепи. Однако измерения фазных напряжений и токов связаны с некоторыми трудностями, так как необходим доступ к нулевой точке, которая не всегда имеет специальный вывод и находится внутри машины. Проще измерить линейные токи и напряжения непосредственно на клеммах щита питания. Поэтому формулы мощности трехфазной системы записывают через линейные токи и напряжения.

При соединении звездой $P = 3U_\Phi I_\Phi \cos \varphi = 3 \frac{U_L}{\sqrt{3}} I_L \cos \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$.

При соединении треугольником $P = 3U_\Phi I_\Phi \cos \varphi = 3U_L \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$.

Таким образом, в обоих случаях активная мощность симметричной цепи $P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$.

Аналогично, реактивная мощность $Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi$.

Полная мощность $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} U_L I_L$.

Коэффициент мощности симметричной трехфазной цепи находят как отношение активной и полной мощностей: $\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{3} U_L I_L}$.

Эти формулы точны для симметричных цепей. Реальные цепи рассчитывают таким образом, чтобы их нагрузка была близка к симметричной, поэтому приведенные формулы имеют широкое применение.

1.7 Электрические измерительные приборы

1.7.1 Классификация электроизмерительных приборов, погрешности измерений

Для измерения электрических величин служат электроизмерительные приборы: амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, частотомеры, а также их комбинации.

Исторически первыми электроизмерительными приборами были электроскопы, электрометры, гальванометры. Их действие основывалось на преобразовании электрических величин (электродвижущей силы, разности потенциалов, силы тока) в механические – угол отклонения легкого металлического лепестка в электроскопе, электрометре, или угол поворота магнитной стрелки в гальванометре.

На современном этапе развития технологий электрические величины преобразуются в цифровые данные, которые могут быть обработаны и сохранены в компьютерной системе и переданы по сети обмена данными, в том числе по Интернету, в другую компьютерную систему для обработки, хранения и отображения.

В общем случае электроизмерительный прибор состоит из входного устройства, измерительного преобразователя и отсчетного устройства (рис. 72).

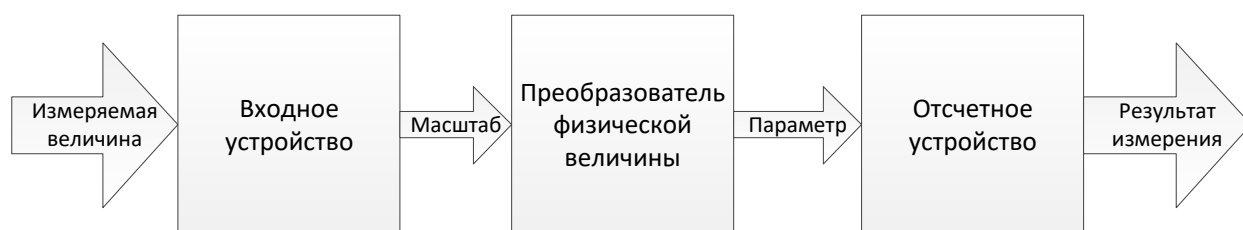


Рис. 72 Общее устройство измерительного прибора

Входное устройство обеспечивает согласование возможностей преобразователя физической величины с объектом измерения по диапазону изменения измеряемой величины. Это позволяет расширить пределы измерения прибора, применяя один и тот же преобразователь физической величины.

При необходимости измерения больших величин используют делители с точно известным коэффициентом ослабления. На рис. 73 приведена схема делителя напряжения, которая позволяет измерять напряжения от 0 до 10 В, от 0 до 100 В и от 0 до 1000 В одним и тем же преобразователем – вольтметром с допустимым входным напряжением до 10 В.

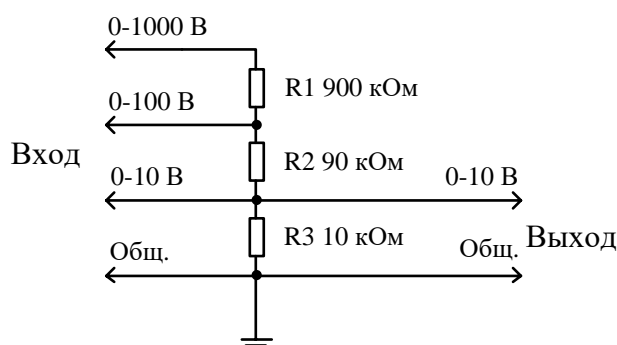


Рис. 73 Входное устройство вольтметра – делитель напряжения

Для измерения малых величин в качестве входных устройств используются специальные измерительные усилители с точно известным коэффициентом усиления.

Измерительный преобразователь обеспечивает перевод уровня измеряемой величины в механическую величину - положение стрелки на шкале отсчетного устройства, или в данные - число на цифровом индикаторе или в определенной ячейке памяти вычислительной системы.

Математические функции, которые связывают измеряемую электрическую величину и ее отображение на отсчетном устройстве, должны быть точно известны. Например, при измерении гальванометром силы тока угол отклонения стрелки определяется законами Ампера и Ньютона (3-й закон), при измерении напряжения действуют законы Ома, Ампера и Ньютона, при измерении сопротивления используется закон Ома.

Отсчетное устройство позволяет определить численный уровень измеряемой величины. Оно может быть реализовано в виде шкалы с оцифрованными делениями и подвижной стрелки, или цифрового индикатора, который периодически отображает измеренное значение.

Универсальные и комбинированные приборы могут содержать в своем составе входные делители, усилители, один или несколько первичных преобразователей, одно или несколько отсчетных устройств.

Процесс измерения состоит в сравнении измеряемой физической величины с ее строго определенным значением, принятым за единицу, и его дробными или кратными значениями. Например, при измерении малых напряжений вольтметр градуируется в милливольтках, а при измерении очень больших – в киловольтах.

Измерительная аппаратура подразделяется на эталонные, образцовые и рабочие измерительные приборы.

Эталонные средства измерения предназначены для обеспечения единства проводимых измерений на государственном и международном уровне. Они имеют специально подготовленный обслуживающий персонал, находятся в контролируемых условиях внешней среды, которые позволяют поддерживать очень высокую точность и повторяемость измерений. Периодически проводятся сличения эталонов, в том числе международные.

По эталонам калибруются и поверяются образцовые средства измерения, которые используются при производстве и контрольных проверках рабочих средств измерения.

Периодический контроль точности измерительных приборов по эталону или образцу называется поверкой.

Поддержание точности и повторяемости результатов измерений обеспечивается метрологической службой.

В охране границы электрические измерения применяются для контроля эксплуатационных параметров и исправности электрического и электронного оборудования систем энергоснабжения, связи, сигнализации, отопления и водоснабжения, бортового электрооборудования наземных, воздушных и плавучих транспортных средств.

Неэлектрические физические величины (время, координаты, масса, температура, давление) могут быть преобразованы в электрические (напряжение, сила тока, сопротивление, частота) и измерены электрическими измерительными приборами. Такой подход позволяет упростить измерительное оборудование при большом количестве измеряемых параметров, а также дает возможность относительно легко проводить измерения на практически любых расстояниях между объектом измерения и отсчетным устройством.

Существует два основных метода электрических измерений: метод непосредственной оценки и метод сравнения.

В методе непосредственной оценки измеряемая величина отсчитывается непосредственно по шкале прибора или цифровому индикатору. При этом шкала измерительного прибора предварительно градуируется по эталонному или образцовому прибору в единицах измеряемой величины. Как правило, такая градуировка производится на заводе при изготовлении прибора. Достоинства этого метода – удобство отчета показаний прибора и малая затрата времени на операцию измерения. Метод непосредственной оценки широко применяется в различных областях техники для контроля и регулирования технологических процессов, в полевых условиях, на подвижных объектах и т.д. Недостаток метода – сравнительно невысокая точность измерений.

В методе сравнения измеряемая величина сравнивается с эталоном, образцовой или рабочей мерой, что увеличивает количество и продолжительность измерений, однако в этом случае точность измерений может быть значительно повышена. Метод сравнения используется, главным образом, в лабораторных условиях, он требует относительно сложной аппаратуры, высокой квалификации операторов и значительных затрат времени. В последнее время в аппаратуре сравнения все шире применяется автоматизация.

При каждом измерении непрерывной величины неизбежна некоторая погрешность Δ – разница между измеренным $A_{из}$ и действительным A значениями измеряемой величины:

$$\Delta = A_{из} - A.$$

Эту разницу называют *абсолютной погрешностью* измерения. Она определяется *систематическими* и *случайными* погрешностями прибора, а также ошибками оператора.

Систематические погрешности изменяются по определенному закону и возникают вследствие факторов, которые могут быть учтены: влияние внешних условий (температура, атмосферное давление, электромагнитные поля, вибрация, электромагнитные или ионизирующие излучения и пр.), несовершенство метода измерения, несовершенство измерительного прибора.

Случайные погрешности возникают вследствие факторов, которые не поддаются непосредственному учету. Оценку параметров случайных погрешностей можно произвести при достаточно большом числе (не менее 30) повторяющихся измерений, используя методы теории вероятностей. Параметрами случайных погрешностей могут быть среднее значение, дисперсия, доверительный интервал.

Ошибки оператора (в записи результата, в определении предела измерения и цены деления прибора, и др.) обычно легко выявляются в ряде наблюдений по значительным отклонениям результата измерения от средних или примерно ожидаемых значений. При обработке результатов измерения их исключают из записей и не учитывают.

Для более полной характеристики измерений вводят понятие относительной погрешности измерения δ :

$$\delta = \frac{A_{из} - A}{A} 100 = - \frac{\Delta}{A} 100\%$$

Величины Δ и δ характеризуют точность измерения. Во многих случаях возникает необходимость охарактеризовать точность прибора. Для этой цели вводится понятие приведенной погрешности измерения:

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_{\max}} 100\%$$

где A_{\max} – максимальное значение шкалы прибора, т.е. предельное значение измеряемой величины.

Наибольшая приведенная погрешность определяет класс точности прибора. Если, например, класс точности амперметра равен 1,5, то это означает, что наибольшая приведенная погрешность $\gamma = \pm 1,5\%$.

Если прибор рассчитан на измерение силы тока до 15 А, то абсолютная погрешность измерения этим прибором составит:

$$\Delta = A_{\max} \frac{\gamma}{100} = 15 \frac{1,5}{100} = 0,225 \text{ А}$$

Если указанным прибором измерить ток 10 А, то относительная погрешность измерения не превысит $\frac{0,225}{10} 100 = 2,25\%$, если тем же прибором измерить ток 1 А, то относительная погрешность измерения не превысит $\frac{0,225}{1} 100 = 22,5\%$.

Этот пример показывает, что при точных измерениях прибор следует подбирать так, чтобы значение измеряемой величины по возможности было близко к пределу измерения прибора. Различают основную и дополнительную погрешности.

Основные погрешности возникают при нормальных условиях работы, указанных в паспорте прибора и условными знаками на шкале.

Дополнительные погрешности возникают при эксплуатации прибора в условиях, отличных от нормальных (повышенная или пониженная температура окружающей среды, сильные внешние электрические или магнитные поля, измененное положение прибора в пространстве и др.).

1.7.2 Электроизмерительные приборы непосредственной оценки

Электроизмерительные приборы классифицируются по роду измеряемой величины:

Вольтметры – для измерения напряжения и ЭДС;

амперметры для измерения силы тока;

омметры, мегаомметры для измерения электрического сопротивления;

ваттметры для измерения электрической мощности;
 счетчики электрической энергии;
 частотомеры для измерения частоты переменного тока;
 фазометры для измерения угла сдвига фаз.

По роду тока различают электроизмерительные приборы постоянного тока, переменного тока и комбинированные.

В зависимости от основной приведенной погрешности электроизмерительные приборы разбиты на классы точности. Класс точности указывается на шкале прибора и обозначает наибольшую приведенную погрешность в процентах.

В зависимости от принципа действия используются следующие системы приборов:

магнитоэлектрическая;
 электромагнитная;
 электродинамическая;
 термоэлектрическая;
 индукционная;
 электростатическая;
 тепловая;
 электронная.

По способу установки различают щитовые приборы, предназначенные для монтажа на приборных щитах и пультах управления, и переносные приборы.

На шкалу электроизмерительного прибора наносятся условные обозначения, которые позволяют определить все перечисленные свойства приборов. Примеры условных обозначений на шкалах электроизмерительных приборов приведены в приложении.

Приборы магнитоэлектрической системы

Приборы магнитоэлектрической системы обладают высокими точностью и чувствительностью, малым собственным потреблением энергии. Эти приборы являются преобразователями силы тока (электрической физической величины) в угол отклонения стрелки (механическую физическую величину). Они имеют равномерную шкалу, их показания почти не зависят от влияния внешних магнитных полей. Магнитоэлектрические амперметры и вольтметры до недавнего времени были основными измерительными приборами в цепях постоянного тока и постепенно вытесняются электронными цифровыми приборами.

Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на механическом силовом взаимодействии магнитных полей рамки (катушки) с током и постоянного магнита, которое уравнивается силой противодействия закрученной спиральной пружины. Когда эти силы равны между собой, стрелка повернута на определенный угол и неподвижна. Колебания стрелки, обусловленные упругостью пружины и инерционностью подвижных деталей, демпфируются (успокаиваются) для повышения точности и ускорения процесса измерения.

Устройство прибора схематически изображено на рис. 74. Между полюсами постоянного магнита NS с помощью полюсных наконечников 3 и цилиндрического сердечника 2 создается воздушный зазор такой формы, что силовые линии магнитного поля при любом положении рамки 1 перпендикулярны ее проводникам.

Сила, действующая на одну сторону рамки в магнитном поле, определяется законом Ампера:

$$F = I l B \omega,$$

где I – сила тока в проводниках рамки;

l – длина той части стороны рамки, которая находится в магнитном поле (активная длина);

B – магнитная индукция в воздушном зазоре;

ω – число витков рамки.

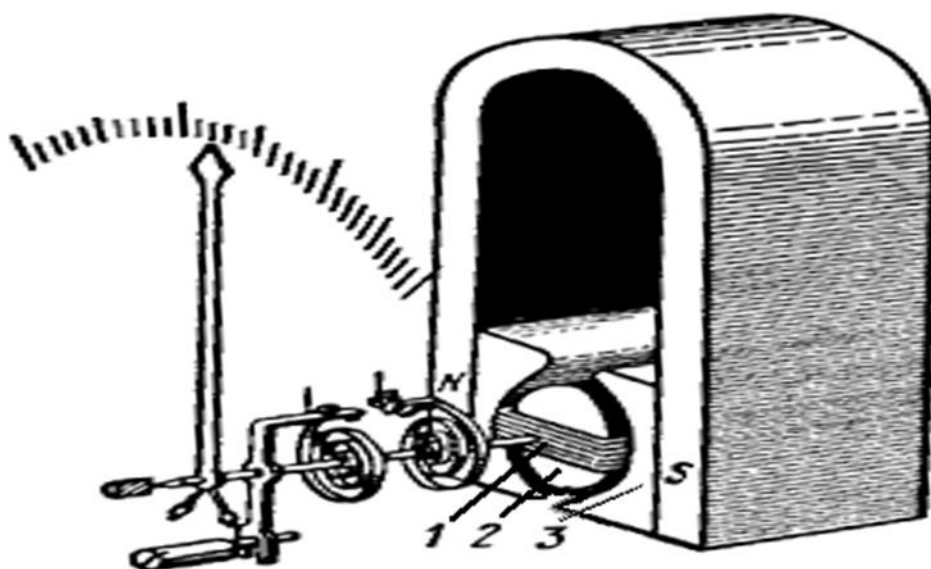


Рис. 74 Устройство прибора магнитоэлектрической системы

На другую сторону рамки действует такая же сила, но противоположно направленная. Момент вращения определяется как произведение силы на длину плеча. Следовательно,

$$M_{вр} = I l B r \omega,$$

где r – ширина рамки;

$S = lr$ – площадь рамки.

Значения B , S , ω для каждого прибора постоянны, поэтому последнюю формулу можно записать в виде

$$M_{вр} = k l I,$$

где $k l$ – постоянный коэффициент, связанный с электрическими и магнитными свойствами прибора.

Ток к рамке подводится через две спиральные пружины, которые одновременно служат для создания противодействующего момента. Момент, создаваемый пружинами, пропорционален углу закручивания, поэтому

$$M_{пр} = k_2 \alpha,$$

где k_2 – постоянный коэффициент, связанный с механическими свойствами прибора;

α – угол поворота рамки (равный углу закручивания пружины).

Учитывая, что во время отсчета, когда стрелка неподвижна, $M_{вр} = M_{пр}$, получаем:

$$k_1 I = k_2 \alpha,$$

из этого равенства находим:

$$\alpha = \frac{k_1}{k_2} I = k I.$$

Таким образом, угол поворота рамки и стрелки-указателя пропорционален силе тока, т.е. прибор может быть отградуирован как амперметр. Благодаря прямой пропорциональности шкала прибора равномерна.

На основании закона Ома имеем:

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

где U – напряжение на зажимах прибора;

R_n – электрическое сопротивление рамки прибора.

После подстановки получаем:

$$a = \frac{k}{R_n} U.$$

Поскольку отношение $\frac{k}{R_n}$ для данного прибора – величина постоянная, то прибор может быть отградуирован как вольтметр.

Демпфирование колебаний подвижной системы прибора происходит за счет вихревых токов (токов Фуко) в каркасе рамки, который выполняют из алюминия. Когда рамка движется в магнитном поле, вихревые токи создают тормозящий движение момент, в результате стрелка плавно поворачивается и останавливается на определенном делении шкалы без колебаний.

Типичными значениями для магнитоэлектрических приборов являются внутреннее сопротивление (сюда входит сумма последовательно соединенных сопротивлений катушки рамки и двух спиральных пружин) порядка одной – двух тысяч Ом, предел измерения по току 50-200 мкА (по напряжению 0,05-0,4 В) и класс точности 1,0-2,5.

Тонкие спиральные пружины магнитоэлектрических приборов не способны выдержать силу тока больше одного ампера, поэтому для измерения больших токов применяют метод шунтирования (рис. 75). Параллельно чувствительному прибору включают небольшое по величине (порядка 0,1-0,001 Ом) точно известное сопротивление, которое называют шунт, и практически весь измеряемый ток протекает по нему, а в прибор ответвляется только малая часть, соответствующая пределу измерения прибора.

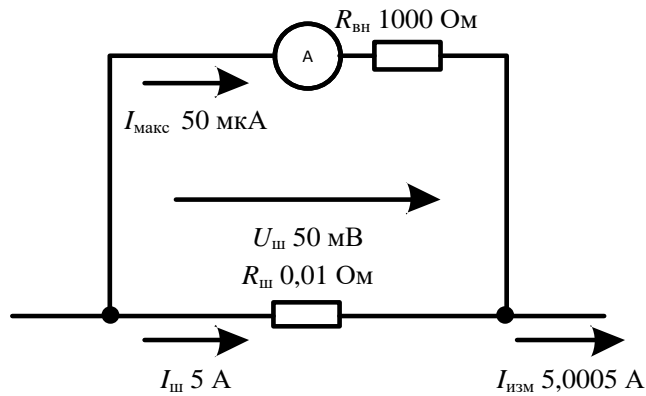


Рис. 75 Применение шунта для расширения предела измерения амперметра

Падение напряжения на сопротивлении шунта нормируется и обычно составляет 50 или 75 мВ. Таким образом, с помощью магнитоэлектрического прибора с пределом измерения, например, 50 мкА, при внутреннем сопротивлении прибора 1 кОм и сопротивлении шунта 0,01 Ом может быть измерен рабочий ток электрической цепи силой до 5 А. При этом падение напряжения на амперметре с шунтом не превысит 50 мВ. Режим электрической цепи по току за счет подключения измерительного прибора изменится на 0,01%.

Для измерения в цепях постоянного тока, где направление тока может изменяться, применяются приборы с нулем в середине шкалы.

Основной недостаток магнитоэлектрических приборов – невозможность проведения измерений в цепях переменного тока, так как стрелка будет незначительно колебаться с частотой тока вблизи нулевого значения.

Для измерений в цепях переменного тока магнитоэлектрические приборы включают через одно- или двухполупериодные выпрямители с соответствующим изменением градуировки шкалы. Высокочувствительный магнитоэлектрический прибор, соединенный с выпрямительной схемой, называют прибором выпрямительной системы. Выпрямительные элементы, как правило, полупроводниковые диоды, монтируют в корпусе прибора.

Приборы выпрямительной системы находят широкое применение. Обычно их изготавливают комбинированными, т.е. предназначенными для измерения тока, напряжения, сопротивления в цепях постоянного и переменного тока с различными пределами измерения.

Нелинейность вольт-амперной характеристики выпрямительных диодов не позволяет измерять напряжения, меньшие напряжения открывания полупроводниковых переходов, которые составляют примерно 0,15 В для германия и 0,55 В для кремния.

Выпрямительные схемы вносят дополнительные погрешности в измерения, поэтому класс точности приборов выпрямительной системы относительно невысок, обычно он составляет 2,5–4,0.

Приборы электромагнитной системы

В основе работы приборов электромагнитной системы лежит принцип механического силового взаимодействия магнитного поля катушки с током и сердечника из ферромагнитного материала.

Устройство прибора схематически изображено на рис. 76. Сердечник 3 из магнитного материала (электротехническая сталь, пермаллой, феррит и др.) вытягивается в катушку 1 при прохождении тока по ее обмотке. Противодействующий момент создается пружиной 2. Демпфирование осуществляется воздушным демпфером 4, представляющим собой гильзу, в которой перемещается легкий поршень, связанный со стрелкой.

Вращающий момент пропорционален квадрату тока, так как магнитные поля катушки и сердечника создаются одним и тем же измеряемым током, проходящим по катушке:

$$\begin{aligned} M_{вр} &= k_1 I^2; \\ M_{пр} &= k_2 \alpha; \\ k_1 I^2 &= k_2 \alpha; \\ \alpha &= \frac{k_1}{k_2} I^2 = k I^2 = \frac{k}{R^2} U^2. \end{aligned}$$

Последнее выражение показывает, что угол отклонения стрелки пропорционален квадрату тока или напряжения. Шкала прибора квадратичная, сжатая в начале.

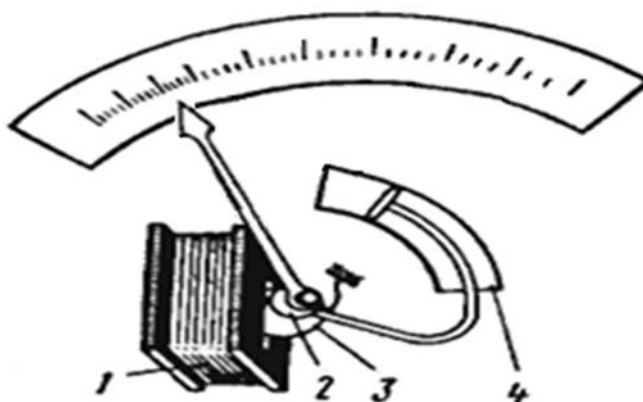


Рис. 76 Устройство прибора электромагнитной системы

Приборы электромагнитной системы широко применяют для измерений в цепях постоянного и переменного токов. Они просты и надежны, обладают высокой перегрузочной способностью и механической прочностью. Основными недостатками этих приборов являются невысокая чувствительность, значительное собственное потребление энергии, невысокая точность, неравномерность шкалы, влияние внешних магнитных полей на показания.

Приборы электродинамической системы

Действие приборов электродинамической системы основано на принципе механического взаимодействия магнитных полей проводников, по которым проходит ток.

Устройство прибора поясняется на рис. 77. Катушка 2 неподвижна, катушка 3 помещается на оси и может поворачиваться вместе с закрепленной на ней стрелкой. Ток к подвижной катушке подводится с помощью пружин 1, которые одновременно служат для создания момента противодействия. Успокоение подвижной системы осуществляется воздушным демпфером 4.

Амперметры и вольтметры электродинамической системы имеют квадратичную шкалу.

Широко распространены электродинамические ваттметры – приборы для измерения электрической мощности в цепях постоянного и переменного токов. Электродинамические ваттметры имеют равномерную шкалу.

Основное достоинство приборов электродинамической системы – большая точность измерений в цепях постоянного и переменного тока. К недостаткам этих приборов следует отнести значительное собственное потребление энергии и подверженность воздействию внешних магнитных полей.

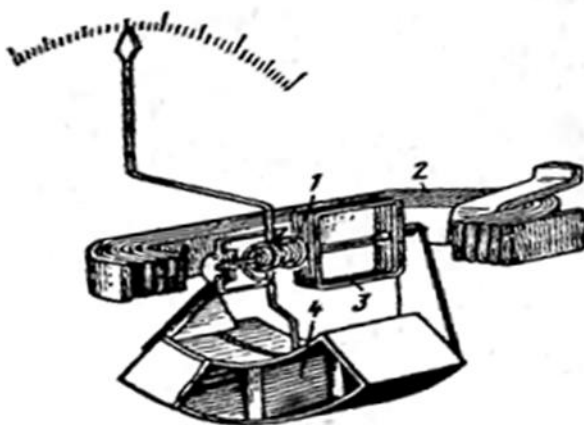


Рис. 77 Устройство прибора электродинамической системы

Разновидностью приборов электродинамической системы являются ферродинамические (лат. ferrum - железо) приборы, у которых для повышения вращающего момента магнитный поток неподвижной катушки создается в специальном магнитопроводе.

Конструкция ферродинамического прибора аналогична конструкции прибора магнитоэлектрической системы, у которого постоянный магнит заменен электромагнитом. Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод ферродинамического прибора изготавливают из тонких листов электротехнической стали или прессуют из ферромагнитного порошка с электроизоляционным наполнителем.

Ферромагнитный сердечник вносит дополнительные погрешности в измерения, однако применение высококачественных материалов и совершенной технологии изготовления позволяет получить ферродинамические ваттметры класса точности 0,2.

Существенным недостатком приборов ферродинамической системы является зависимость их параметров от частоты измеряемого тока.

Цифровые приборы

В настоящее время широко распространены цифровые электроизмерительные приборы. Эти приборы измеряют значения непрерывно изменяющейся величины в отдельные (дискретные) последовательные моменты времени и представляют полученный результат в цифровой форме.

Основными элементами цифровых электроизмерительных приборов (рис. 78) являются устройство управления, входное устройство, аналого-

цифровой преобразователь и устройство отображения - цифровой индикатор, дисплей, дискретная шкала, а также запоминающее устройство.

Устройство управления обычно представляет собой микропроцессор, программа которого обеспечивает функционирование цифрового измерительного прибора, выбор измеряемой величины, предела измерения, способа отображения, в некоторых случаях хранение и обработку результатов измерения.

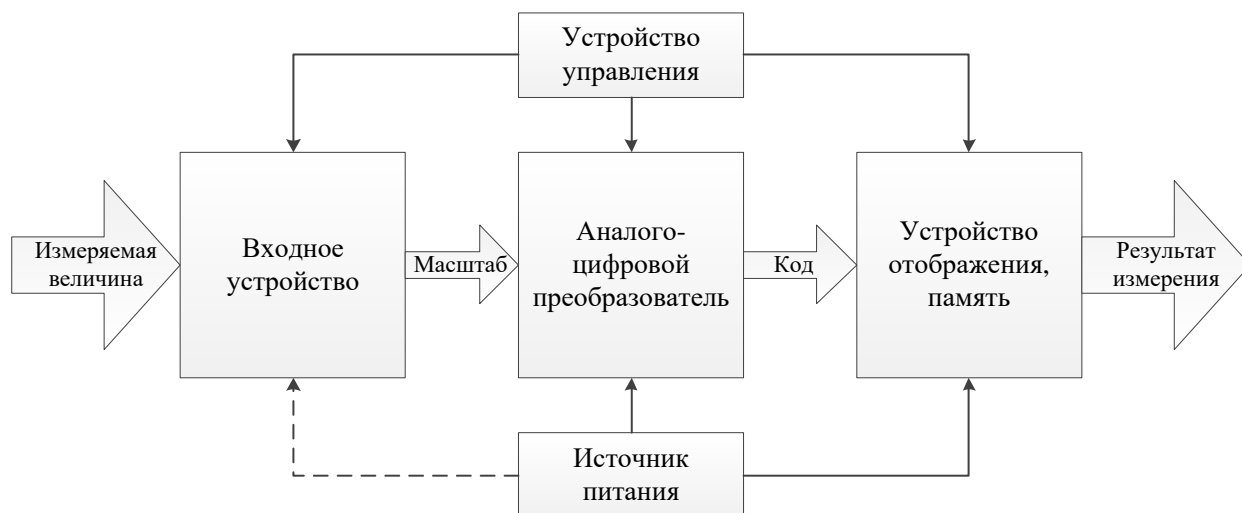


Рис. 78 Структура цифрового электроизмерительного прибора

Входное устройство обеспечивает согласование диапазона измеряемой величины прибора с допустимым входным диапазоном аналого-цифрового преобразователя. Может содержать усилители или делители входных величин для расширения пределов измерения.

Аналого-цифровой преобразователь выполняет представление непрерывно изменяющейся физической величины, чаще всего напряжения, в виде последовательности численных значений в диапазоне от нуля до максимально допустимого входного значения, считываемых через небольшие равные промежутки времени. Этот процесс называется дискретизацией по времени.

Весь диапазон измеряемых значений разбит на фиксированное количество уровней напряжения. Количество уровней определяется количеством двоичных разрядов, назначенных для отображения результата измерения. За величину цифрового отсчета принимают номер уровня с ближайшим большим значением, то есть происходит округление измеренного результата с заданной точностью. Поскольку результат измерения плавно изменяющейся величины представлен в виде фиксированных ступеней уровня, пусть и с малым различием между соседними ступенями, говорят о квантовании измеряемой величины по уровню.

Разность напряжения между соседними уровнями обычно постоянна и называется шагом квантования. Шаг квантования зависит от верхнего предела входного напряжения АЦП и количества уровней.

Чем больше количество уровней принято для представления измеряемого диапазона величины, тем точнее будет измерение. Интервал времени между соседними измерениями выбирают таким, чтобы отклонение изменяющейся величины от фиксированного измеренного значения не превышало заданной

погрешности измерения. При измерениях в цепях постоянного тока частота дискретизации может быть очень малой, достаточной для визуального восприятия отсчетов несколько раз в секунду, а для работы с радиосигналами достигает миллионов и даже миллиардов в секунду.

Количество уровней квантования ограничено снизу требуемой точностью измерения, а сверху представлением максимально допустимого числа в вычислительной системе, которое ограничено разрядностью шины данных или длиной машинного слова.

Чем выше эти параметры, тем точнее может быть представлена измеряемая величина. Последовательность отсчетов измеряемого сигнала может быть сохранена в памяти вычислительной системы и затем неограниченное количество раз воспроизведена, что удобно при проведении научных исследований или расследовании происшествий.

На рис. 79 а, б приведены примеры цифрового представления плавно изменяющегося электрического сигнала с количеством уровней квантования 16 и 256 и частотой дискретизации 1 кГц и 10 кГц.

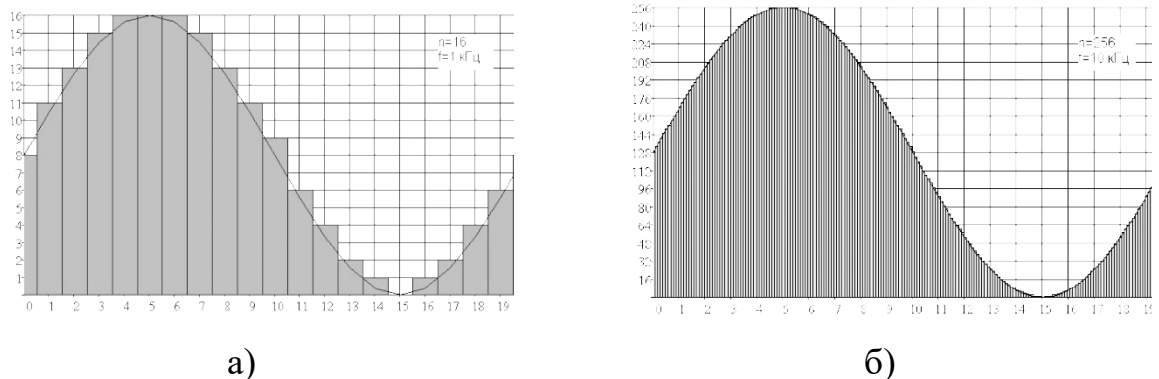


Рис. 79 Представление сигнала с различными параметрами дискретизации

Основное достоинство цифровых приборов заключается в том, что результат измерения может подвергаться дальнейшим преобразованиям (накопление, хранение, передача на расстояние, математическая обработка) без увеличения погрешности.

Применение цифровых приборов с дискретным отсчетом позволяет создать многоканальные автоматические устройства для централизованного контроля многих параметров, характеризующих сложные технологические процессы. Измерение параметров производится поочередно с заданной периодичностью по времени.

Цифровые электроизмерительные приборы имеют высокую точность (погрешность от 0,1 до 1 %), большое быстродействие, широкие пределы измерений, легко комплексируются с компьютерами, позволяют передавать результаты измерений без искажения на неограниченные расстояния.

К недостаткам этих приборов следует отнести сравнительную сложность, относительно высокую стоимость, необходимость электропитания и защиты от внешних электромагнитных воздействий.

1.7.3 Порядок измерения

Перед выполнением электрических измерений нужно подготовить все необходимые измерительные приборы и собрать измерительные электрические цепи в обесточенном состоянии. Соблюдение этого условия позволяет обеспечить безопасные условия труда оператору и сохранить исправность измерительных приборов и элементов исследуемой электрической цепи.

Измерение напряжения

Для измерения напряжения (разности потенциалов) применяется вольтметр. Он включается параллельно участку цепи, напряжение на котором требуется измерить. Схема измерительной цепи приведена на рис. 80.

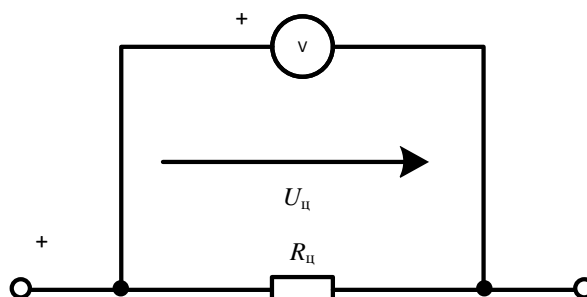


Рис. 80 Цепь для измерения напряжения

Из-за наличия собственного внутреннего сопротивления вольтметр оказывает влияние на измеряемую цепь. Так как общее сопротивление участка цепи при подключении вольтметра уменьшается, измеренное напряжение становится несколько меньше действительного. Поэтому вольтметр должен иметь по возможности большее внутреннее сопротивление, а при необходимости точного измерения требуется расчет смешанной параллельно-последовательной цепи.

При проведении измерений в цепях постоянного тока нужно учитывать полярность прибора. Предел измерения прибора перед измерением нужно выбирать большим, чем ожидаемое значение напряжения в цепи, чтобы не допустить перегрузки прибора.

Измерение силы тока

Для измерения силы тока применяется амперметр. Он включается последовательно с исследуемым участком цепи. Из-за наличия собственного внутреннего сопротивления амперметр оказывает влияние на измеряемую цепь. Так как общее сопротивление участка цепи при подключении амперметра увеличивается, измеренная сила тока становится меньше действительной. Схема измерительной цепи приведена на рис. 81.

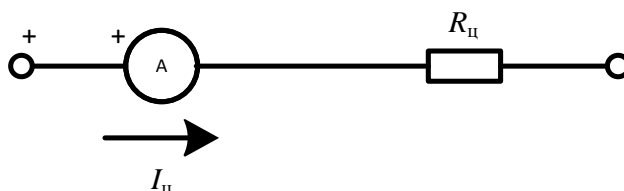


Рис. 81 Цепь для измерения силы тока

При проведении измерений в цепях постоянного тока нужно учитывать полярность прибора. Предел измерения прибора перед нужно выбрать большим, чем ожидаемое значение силы тока в цепи.

Измерение мощности

Для измерения электрической мощности применяется ваттметр (рис. 82 а) или комбинация вольтметра и амперметра (рис. 82 б).

Токовая цепь ваттметра или амперметр включается последовательно с исследуемым участком цепи, потенциальная цепь ваттметра или вольтметр включается параллельно с измеряемой цепью.

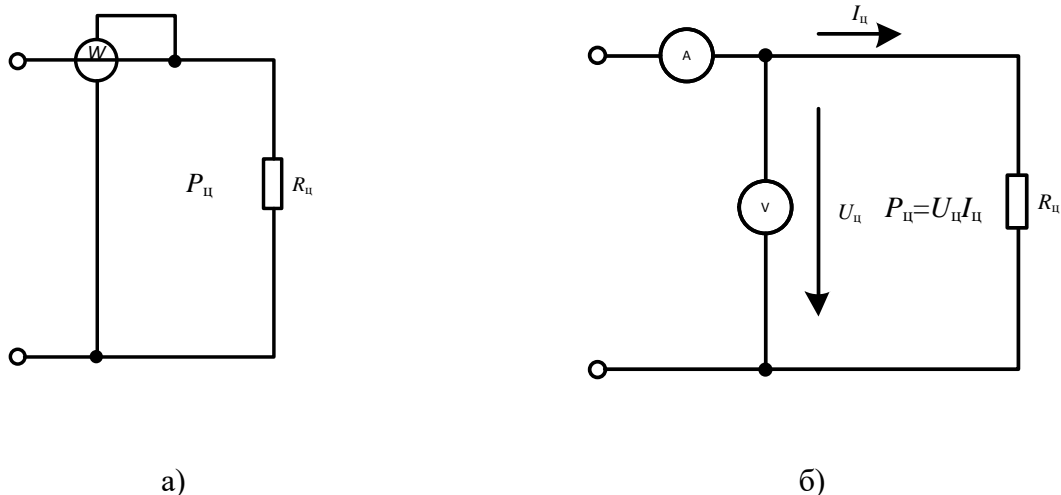


Рис. 82 Цепь для измерения мощности:
а) ваттметром, б) вольтметром и амперметром

При измерениях на переменном токе нужно учитывать возможность присутствия в цепи реактивной мощности.

Измерение сопротивления

Для измерения электрического сопротивления используют омметр (мегаомметр) (рис. 83 а), или комбинацию вольтметра и амперметра с последующим расчетом сопротивления по закону Ома (рис. 83 б).

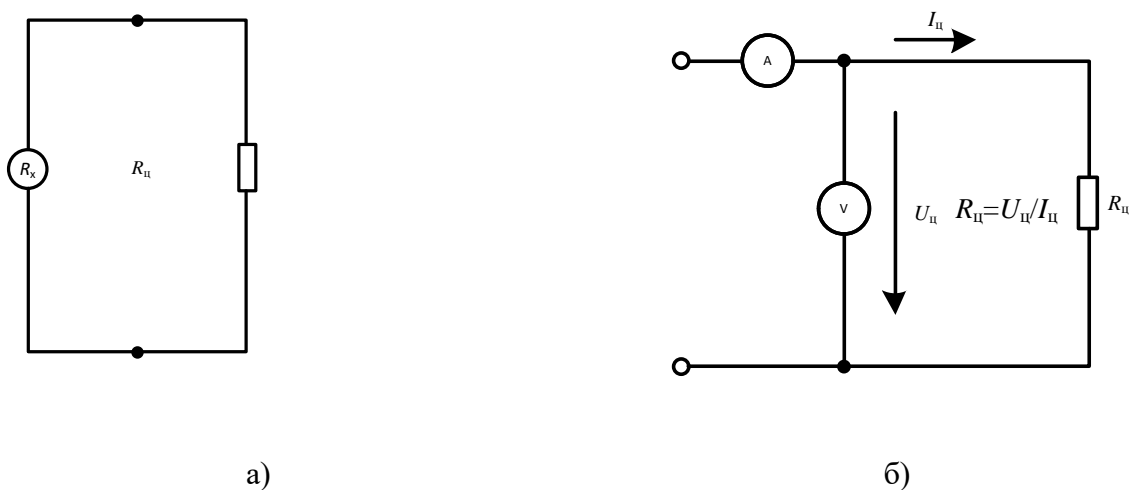


Рис. 83 Цепь для измерения сопротивления:
а) омметром б) вольтметром и амперметром

При измерениях омметром необходимо обесточить измеряемую цепь. Если в цепи кроме пассивных элементов есть полупроводниковые диоды,

транзисторы, микросхемы, то нужно учитывать, что при измерительном напряжении более 0,5 В их полупроводниковые переходы открываются, и результаты измерения могут быть недостоверными. Также с осторожностью нужно применять мегаомметры, так как в их состав входят высоковольтные (500 или 1000 В) источники питания, которые могут повредить низковольтную электронику и представляют опасность для оператора.

1.8 Устройство и принцип действия электрических машин постоянного тока

1.8.1 Общие сведения об электрических машинах постоянного тока, их классификация и устройство

По назначению электрические машины постоянного тока делятся на *генераторы и двигатели*.

Генераторы вырабатывают электрическую энергию, поступающую в энергосистему; *двигатели* создают механический вращающий момент на валу, который используется для привода различных механизмов и транспортных средств.

Электрические машины обратимы. Это значит, что одна и та же машина может работать и как генератор, и как двигатель. Поэтому можно говорить об устройстве машин постоянного тока, не рассматривая отдельно устройство генератора или двигателя.

Свойство обратимости не следует противопоставлять определенному назначению машины, которая обычно проектируется и используется либо как двигатель, либо как генератор. Значительно реже находят применение машины, предназначенные для работы как в генераторном, так и в двигательном режимах. Это *так называемые стартер-генераторы*, которые устанавливаются на некоторых подвижных объектах.

Генератор и двигатель отличаются расчетными и конструктивными особенностями. Поэтому использование двигателя в качестве генератора или генератора в качестве двигателя приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик машин, в частности, к снижению коэффициента полезного действия.

В любой машине постоянного тока четко выделяются подвижная и неподвижная части. Подвижную (вращающуюся) часть машины называют *ротором*, неподвижную – *статором*.

Часть машины, в которой индуцируется ЭДС, принято называть якорем, а часть машины, в которой создается магнитное поле возбуждения, - индуктором. Как правило, в машине постоянного тока статор служит индуктором, а ротор – якорем. Статор машины постоянного тока называют также станиной. Станину изготавливают из магнитопроводящего материала (обычно литая сталь); он выполняет две функции, являясь, во-первых, магнитопроводом, по которому проходит магнитный поток возбуждения машины, и, во-вторых, основной конструктивной деталью, в которой размещаются все остальные детали. Внутри станины крепятся *полюсы*.

Полюс машины состоит из *сердечника, полюсного наконечника и катушки*. При прохождении постоянного тока по катушкам в полюсах

индуцируется магнитный поток возбуждения. Помимо главных полюсов в машинах повышенной мощности (более 1 кВт) устанавливаются дополнительные полюсы меньших размеров, предназначенные для улучшения работы машины. Катушки дополнительных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря.

Обмотка вращающегося якоря соединяется с помощью *коллектора* и *щеток* с неподвижными клеммами, через которые машина включается в электрическую сеть. Сердечник якоря и коллектор крепятся на одном валу. Стальной вал якоря опирается на подшипники, закрепленные в боковых щитах машины, в свою очередь, боковые щиты крепятся болтами к статору.

Для уменьшения вихревых токов и связанных с ними тепловых потерь сердечник якоря набирают из тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга лаковым покрытием. В теле якоря сверлят вентиляционные каналы, по которым проходит охлаждающий воздух. В пазы сердечника якоря укладывают проводники обмотки якоря, соединенные с коллекторными пластинами. Коллектор набирают из медных пластин, разделенных стекловолокнистыми прокладками. Поверхность медных пластин специально обрабатывают, чтобы повысить их устойчивость к истиранию.

Электрическое соединение вращающейся обмотки якоря с неподвижными клеммами машины осуществляется с помощью *щеток*, скользящих по коллектору. Щетки вставляются в специальные обоймы щеткодержателя и прижимаются к коллектору спиральными или пластинчатыми пружинами. Щеткодержатели крепятся к траверсе, которую вместе со щетками можно поворачивать относительно статора на некоторый угол в ту или другую сторону.

В качестве основы для изготовления щетки используют графит. Чтобы получить заданные свойства (определенную электропроводность, повышенную сопротивляемость к истиранию), в щетку добавляют порошки металлов (медь, свинец).

На рис. 84 показан внешний вид машины постоянного тока серии П, выпускаемой отечественной промышленностью. Машины этой серии рассчитывают на различную мощность от 0,3 до 200 кВт. Двигатели серии П рассчитаны на напряжение 110 или 220 В, а генераторы – 115 или 230 В.

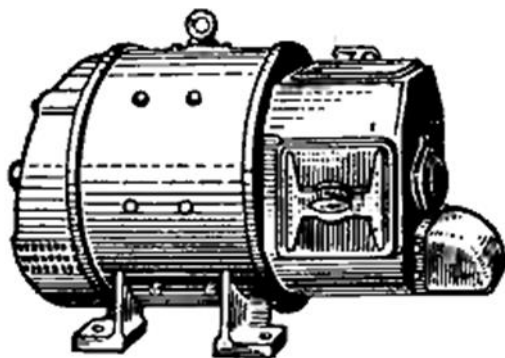


Рис. 84 Внешний вид машины постоянного тока

Поперечный разрез машины постоянного тока схематически изображен на рис. 85, где видны статор, создающий магнитный поток возбуждения, и ротор, в пазах которого размещены проводники обмотки якоря.

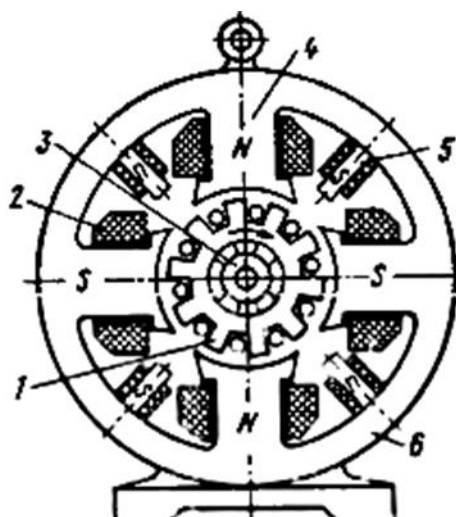


Рис. 85 Поперечный разрез машины постоянного тока:
 1 – сердечник якоря с проводниками обмотки; 2 – катушка обмотки возбуждения;
 3 – вал; 4 – главный полюс; 5 – дополнительный полюс; 6 – статор

Между полюсными наконечниками и якорем имеется воздушный зазор, исключающий трение якоря о статор (рис. 86 а). Магнитная индукция в воздушном зазоре изменяется вдоль окружности по трапецеидальному закону (рис. 86 б).

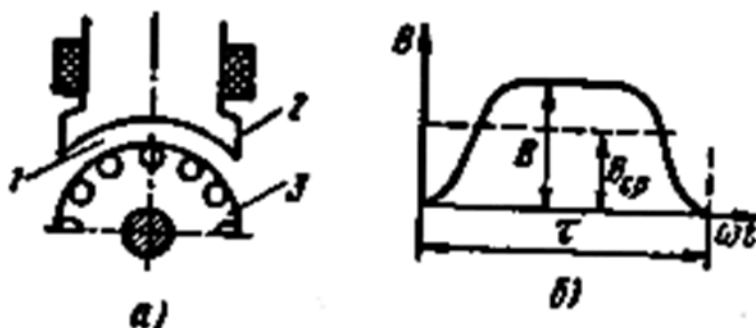


Рис. 86 Воздушный зазор в машинах постоянного тока:
 а) схематическое изображение воздушного зазора 1 между полюсным наконечником 2 и якорем 3; б) магнитная индукция в воздушном зазоре

Устройство машины постоянного тока изображено на рис. 87. Машины постоянного тока имеют принудительное воздушное охлаждение, осуществляемое вентилятором, насаженным на вал якоря. Для мощных машин разработаны системы водородного и водяного охлаждения.

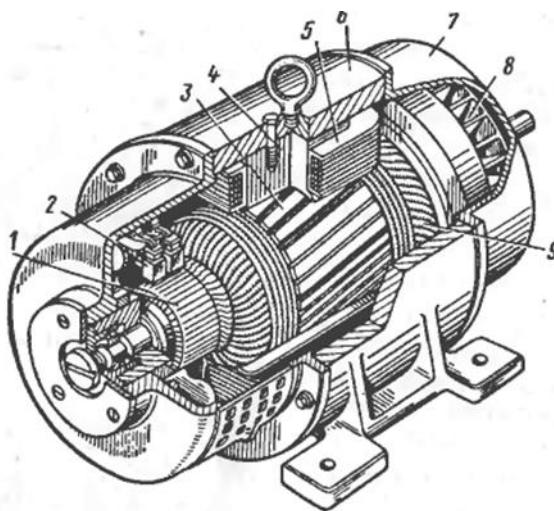


Рис. 87 Устройство машины постоянного тока:

1 – коллектор; 2 – щетки; 3 – сердечник якоря; 4 – сердечник главного полюса; 5 – полюсная катушка; 6 – статор; 7 – подшипниковый щит; 8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря

Для защиты машины от пыли и влаги конструктивные окна, обеспечивающие доступ к коллектору и щеткам, закрывают съемными стальными лентами или пластинами.

Для понимания сущности работы электрической машины необходимо вспомнить физические законы, которыми описываются основные электромагнитные явления: закон электромагнитной индукции, закон Био – Савара, закон Ампера. Эти законы вместе с законами Кирхгофа и Ома позволяют описать основные процессы, происходящие в электрических машинах.

Работа любой электрической машины (генератора или двигателя постоянного и переменного тока) характеризуется взаимодействием двух направленных навстречу друг другу вращающихся моментов, один из которых создается механическими, а другой - электромагнитными силами. Кроме того, работа двигателя и генератора характеризуется взаимодействием напряжения источника питания и ЭДС, возникающей в обмотке якоря.

1.8.2 Принцип действия генератора постоянного тока, уравнения, описывающие его работу

В генераторе энергия механического движения преобразуется в электрическую энергию. Двигатель, в качестве которого обычно используют турбину, или двигатель внутреннего сгорания, вращает якорь в магнитном поле возбуждения.

Вследствие этого вращения изменяется магнитный поток, пронизывающий витки обмотки якоря. При этом индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости изменения магнитного потока $e(t) = w \frac{d\phi}{dt}$, где w – число витков, пронизываемых изменяющимся магнитным потоком Φ ; $\frac{d\phi}{dt}$ – производная магнитного потока по времени, или скорость изменения магнитного потока.

Приведенная формула, выражающая закон электромагнитной индукции, показывает, что для индуцирования постоянной ЭДС E необходимо равномерно (с постоянной скоростью) увеличивать или уменьшать магнитный поток Φ . Однако равномерное увеличение или уменьшение магнитного потока в течение длительного времени технически осуществить невозможно, поэтому получение постоянной ЭДС в устройствах, основанных на законе электромагнитной индукции, невозможно. В реальном генераторе постоянного тока магнитный поток, пронизывающий каждый виток обмотки якоря, периодически изменяется. Соответственно изменяется и ЭДС в каждом витке обмотки по значению и направлению.

Для получения постоянной ЭДС используют различные выпрямители, в частности, генератор постоянного тока снабжается механическим выпрямителем – коллектором. Коллектор автоматически переключает концы витков обмотки при изменении направления ЭДС.

На рис. 88 изображена синусоидальная ЭДС, которая индуцируется в одном витке обмотки якоря, с помощью коллектора эта ЭДС преобразуется в пульсирующую ЭДС e .

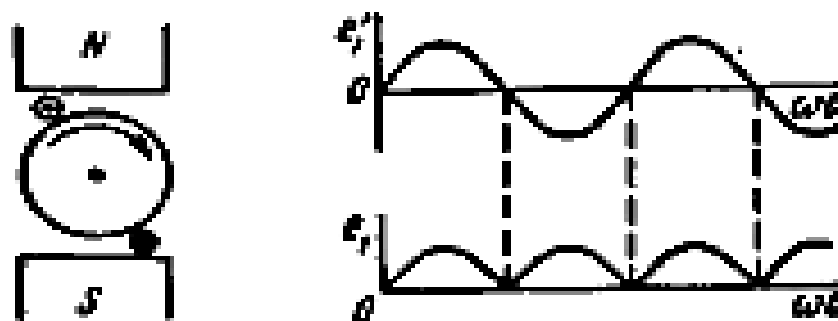


Рис. 88 Зависимость ЭДС, индуцируемой в одном витке обмотки, от ωt

Рассмотрим второй виток обмотки генератора, сдвинутый относительно первого на угол 90° . Индуцируемая во втором витке ЭДС e_2' опережает по фазе на 90° ЭДС e_1 . Форма e_1 , e_2' , а также выпрямленных ЭДС e_1 и e_2 показана на рис. 89.

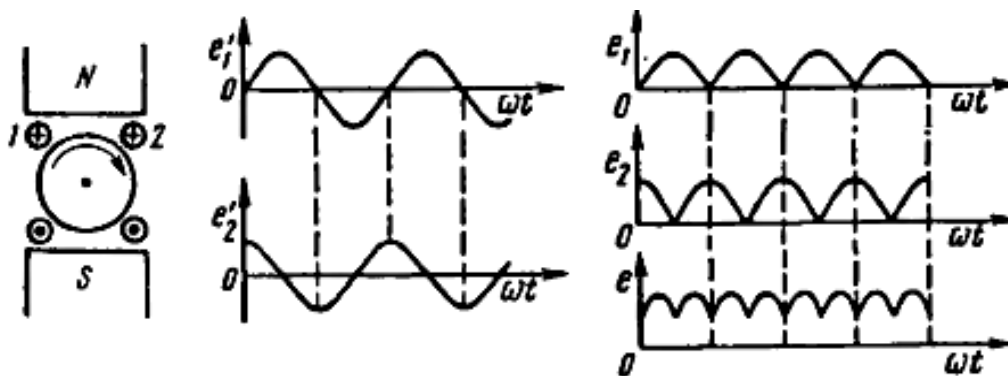


Рис. 89 Уменьшение пульсаций при сложении ЭДС, сдвинутых по фазе

К выходным зажимам генератора подводится ЭДС, равная сумме ЭДС e_1 и e_2 . Из рис. 89 видно, что результирующая ЭДС e имеет значительно меньшие пульсации, чем ЭДС e_1 и e_2 . При большом числе витков, сдвинутых по окружности якоря на небольшие углы, пульсации результирующей ЭДС на зажимах генератора становятся пренебрежимо малыми. В этом случае машина

вырабатывает напряжение, практически постоянное по значению и направлению.

Для повышения уровня вырабатываемой ЭДС поверх первого ряда витков обмотки могут быть уложены без смещения (в те же самые пазы якоря) второй и последующие ряды витков. При разомкнутых выходных зажимах генератора ток в обмотке якоря равен нулю. При этом генератор работает холостую, а приводной двигатель преодолевает только моменты трения, затрачивая минимальную механическую энергию. При подключении к генератору электрической нагрузки по обмотке якоря начинает проходить ток.

Проводники обмотки находятся в магнитном поле. В соответствии с законом Ампера возникают механические силы, направление которых определяется правилом левой руки. Нетрудно убедиться, что эти силы создают вращающий момент, направленный противоположно моменту приводного двигателя.

Чем больше мощность потребителей электрической энергии, подключенных к генератору, тем больше ток в обмотке якоря и больше силы, препятствующие его вращению. Соответственно увеличиваются и затраты механической энергии на вращение якоря генератора.

Генераторы постоянного тока независимого возбуждения

Различают генераторы независимого возбуждения и генераторы с самовозбуждением. В генераторах независимого возбуждения основной магнитный поток создается либо постоянным магнитом, либо электромагнитом (обмотка возбуждения), питаемым от источника постоянного тока. Схема генератора постоянного тока независимого возбуждения показана на рис. 90. Важнейшая особенность данной схемы - это независимость тока возбуждения и магнитного потока главных полюсов от нагрузки генератора.

Физические величины, характеризующие работу электрической машины, связаны между собой определенными зависимостями, которые называют *характеристиками*.

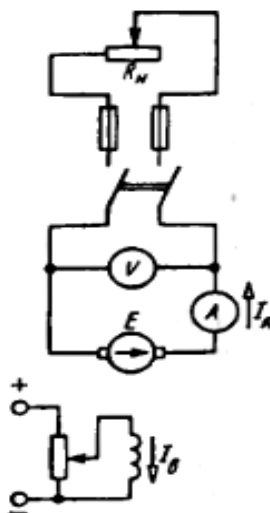


Рис. 90 Схема генератора постоянного тока независимого возбуждения

Рассмотрим основные характеристики генератора независимого возбуждения. *Характеристикой холостого хода* называют зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения при постоянной частоте вращения якоря и отключенной

нагрузке: $E=f(I_e)$ ($I=0$, $n = const$). Ее обычно снимают при номинальной частоте вращения генератора. Характеристика холостого хода (рис. 91) представляет собой изображенную в другом масштабе часть петли гистерезиса магнитной системы генератора. Поскольку ЭДС пропорциональна магнитной индукции, а напряженность магнитного поля - току возбуждения, зависимость $E(I_e)$ имеет такой же вид, как зависимость $B(H)$.

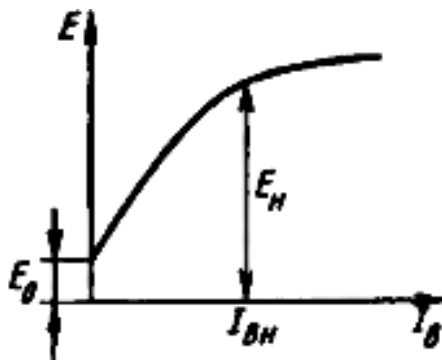


Рис. 91 Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения

Таким образом, характеристика холостого хода отображает свойства магнитопровода. Поскольку после первоначального намагничивания коэрцитивная сила удерживает в магнитопроводе небольшой остаточный магнитный поток, ЭДС генератора не равна нулю при токе возбуждения, равном нулю. Эту ЭДС называют *остаточной*: $E_0 = E$ при $I_e = 0$. Изгиб характеристики холостого хода объясняется насыщением магнитопровода. Номинальный ток возбуждения выбирают таким, чтобы он соответствовал участку перегиба характеристики холостого хода. При этом наилучшим образом используется свойство магнитопровода усиливать магнитный поток обмотки возбуждения.

Характеристика холостого хода может быть рассчитана теоретически или снята экспериментально. В последнем случае ЭДС измеряется вольтметром, подключенным к зажимам генератора.

Внешней характеристикой называют зависимость нагрузки на зажимах генератора от тока нагрузки при постоянной частоте вращения и постоянном сопротивлении цепи возбуждения: $U=f(I)$ ($n=const$, $R_e=const$).

При отсутствии размагничивающего действия реакции якоря внешняя характеристика описывается уравнением $U = E - IR_{я}$, представляющим прямую линию в плоскости координатных осей U , I . При насыщении магнитной системы и наличии размагничивающего действия реакции якоря с увеличением нагрузки ЭДС генератора уменьшается, поэтому напряжение генератора снижается быстрее, чем по закону прямой линии (рис. 92).

Внешняя характеристика позволяет определить, в каких пределах изменяется напряжение генератора при изменении нагрузки.

Регулировочной характеристикой называется зависимость тока возбуждения и напряжения на зажимах генератора: $I_e=f(U)$ ($n=const$, $U=const$).

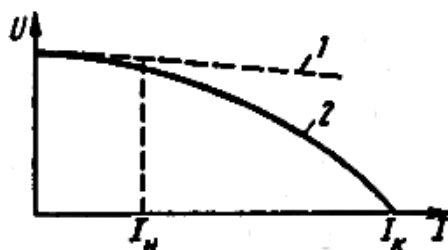


Рис. 92 Внешние характеристики генератора независимого возбуждения при отсутствии (прямая 1) и наличии (прямая 2) размагничивающего действия реакции якоря

Регулировочная характеристика показывает как нужно изменять ток возбуждения, чтобы поддерживать постоянным напряжение генератора при изменении его нагрузки. С увеличением тока нагрузки напряжение генератора уменьшается. Чтобы поддерживать его постоянным, необходимо увеличивать ЭДС. При постоянной частоте вращения это достигается увеличением магнитного потока, следовательно, и тока возбуждения (рис. 93).

Регулируемые характеристики используются при проектировании регуляторов напряжения. Генераторы независимого возбуждения находят применение в схемах автоматики, в двигатель-генераторных агрегатах, когда требуется изменять не только значение, но и полярность напряжения на зажимах, а также в качестве тахогенераторов, предназначенных для дистанционного измерения частоты вращения.

Недостатком этих машин является необходимость иметь отдельный источник энергии для питания обмотки возбуждения или постоянные магниты в статоре.

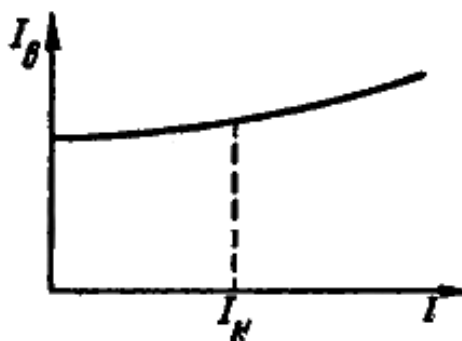


Рис. 93 Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения

Генераторы с самовозбуждением

В генераторах с самовозбуждением питание обмотки главных полюсов осуществляется напряжением самого генератора. При этом отпадает необходимость в отдельном источнике энергии.

Генератор параллельного возбуждения. Схема генератора параллельного возбуждения, или шунтового генератора, изображена на рис. 94. Ток якоря генератора разветвляется на ток нагрузки и ток возбуждения: $I_{я} = I + I_{в}$, причем ток возбуждения составляет 1-3% от номинального тока нагрузки. *Характеристика холостого хода* генератора параллельного возбуждения аналогична характеристике холостого хода генератора независимого возбуждения. Поскольку ток возбуждения невелик, генератор можно считать ненагруженным. При необходимости получить более точную характеристику

применяют включение обмотки возбуждения генератора от отдельного источника питания.

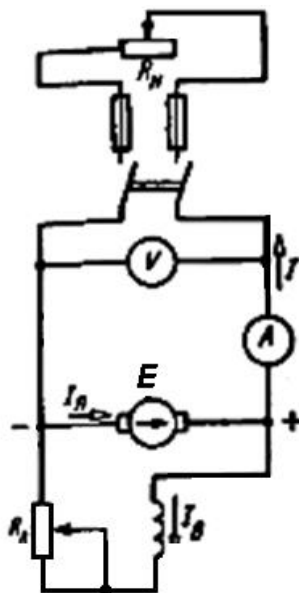


Рис. 94 Схема генератора параллельного возбуждения

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения (рис. 95) показывает, что напряжение на его зажимах с увеличением тока нагрузки падает быстрее, чем при независимом возбуждении.

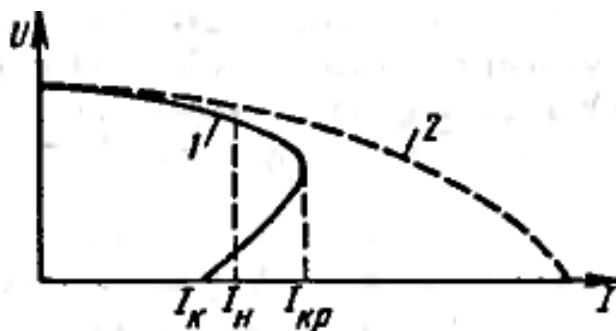


Рис. 95 Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения при самовозбуждении (кривая 1) и независимом возбуждении (кривая 2)

Падение напряжения на зажимах генератора объясняется тремя причинами: 1) уменьшением среднего значения магнитной индукции в машине вследствие реакции якоря; 2) увеличением падения напряжения внутри генератора, пропорционального току нагрузки; 3) уменьшением (вследствие двух первых причин) напряжения, подводимого к цепи возбуждения.

Ток нагрузки генератора может быть определен по закону Ома:

$I = U/R_n$ где U – напряжение на зажимах генератора, равное напряжению на обмотке возбуждения; R_n – сопротивление нагрузки.

При снятии внешней характеристики увеличение тока I осуществляется за счет уменьшения сопротивления R_n . Как указывалось, с увеличением тока I уменьшается напряжение U на зажимах генератора. Следовательно, при уменьшении R_n одновременно уменьшается и U . При некотором значении тока нагрузки скорость уменьшения U сравнивается со скоростью уменьшения R_n и, как следует из формулы закона Ома, увеличение тока прекращается. Это

максимально возможное значение тока называется *критическим* $I_{кр}$. При дальнейшем уменьшении сопротивления R_n напряжение U падает относительно быстрее и ток нагрузки начинает уменьшаться. Поэтому для генераторов параллельного возбуждения не опасны короткие замыкания. Ток короткого замыкания I_k такого генератора меньше номинального тока и создается только за счет остаточного намагничивания, поскольку напряжение на зажимах генератора, а следовательно, и напряжение, подводимое к цепи возбуждения, при коротком замыкании равны нулю.

Регулировочная характеристика рассматриваемого генератора в пределах рабочих токов нагрузки имеет такой же вид, как у генератора возбуждения. Для поддержания неизменного напряжения на зажимах генератора с возрастанием тока нагрузки необходимо увеличивать ток возбуждения, что достигается уменьшением сопротивления R_e цепи возбуждения машины.

Генераторы постоянного тока параллельного возбуждения находят широкое применение, особенно в качестве бортовых источников питания, на подвижных объектах: кораблях, самолетах, автомобилях и т.д.

Генератор последовательного возбуждения, или серийный генератор, назван так потому, что обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены последовательно (рис. 96 а). Для этого генератора $I=I_a=I_e$.

Характеристика холостого хода, отображающая магнитные свойства системы возбуждения, может быть снята только при независимом возбуждении.

Внешняя характеристика изображена на рис. 96 б. Пока магнитная система не насыщена, с увеличением тока нагрузки возрастают магнитный поток и ЭДС генератора.

Однако по мере насыщения магнитопровода рост ЭДС замедляется, а размагничивающее действие реакции якоря проявляется все сильнее. Поэтому напряжение, достигнув максимального значения, начинает снижаться.

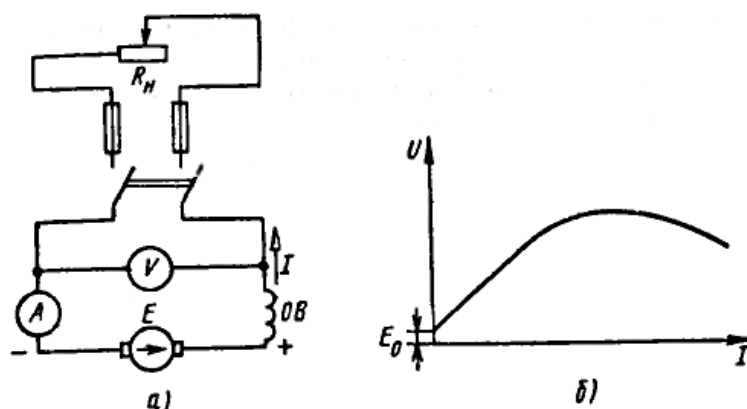


Рис. 96 Генератор последовательного возбуждения:
а) – схема; б) – внешняя характеристика

Генераторы последовательного возбуждения используют сравнительно редко.

Генераторы смешанного возбуждения. Более широкое применение находят генераторы постоянного тока, у которых магнитный поток возбуждения создается двумя обмотками: шунтовой и серийной. Это

генераторы смешанного возбуждения, или компаундные генераторы, которые могут иметь согласно или встречно включенные обмотки возбуждения.

У генераторов с согласным включением обмоток напряжение почти не изменяется при изменении нагрузки. Это объясняется тем, что магнитный поток серийной обмотки создается током нагрузки, и при увеличении возрастает, компенсируя влияние реакции якоря и увеличение падения напряжения внутри машины. Генераторы с согласным включением обмоток применяют в тех случаях, когда требуется высокая стабильность напряжения питания при изменении нагрузки в широких пределах.

Генераторы со встречным включением обмоток имеют крутопадающую внешнюю характеристику. При увеличении тока нагрузки встречный магнитный поток серийной обмотки размагничивает машину, и напряжение генератора резко снижается. Такие машины используют в качестве сварочных генераторов, где требуется относительное постоянство сварочного тока при изменении напряжения в широких пределах вплоть до значений, близких к нулю (когда электрод касается свариваемых деталей при залипании).

1.8.3 Принцип действия двигателя постоянного тока, уравнения, описывающие его работу

Если подключить машину постоянного тока к электрической сети, через обмотку якоря потечет ток. В соответствии с *законом Ампера* на проводники обмотки якоря, находящиеся в магнитном поле возбуждения, действуют механические силы. Эти силы создают вращающий момент, под действием которого якорь начинает раскручиваться.

Вращающийся вал якоря используют для привода в действие различных механизмов: подъемных и транспортных средств, станков, швейных машин и т. д. *Исходя из закона сохранения энергии, можно считать, что мощность, потребляемая двигателем из сети, тем больше, чем больше механическая нагрузка на его валу.* Однако для понимания сущности работы электрического двигателя важно проследить, каким образом изменение механической нагрузки сказывается на электрической мощности, потребляемой двигателем.

Разберемся в этом. Обмотка якоря двигателя вращается в магнитном поле возбуждения. В этих условиях в соответствии с *законом электромагнитной индукции* в обмотке якоря возникает ЭДС. Применяя *правило правой руки*, нетрудно установить, что она направлена навстречу приложенному напряжению сети. Поэтому ее назвали *противо-ЭДС*. Именно *противо-ЭДС* является фактором, регулирующим потребление электрической мощности из сети.

По закону электромагнитной индукции, *противо-ЭДС* прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего витки обмотки якоря. Следовательно, с уменьшением частоты вращения якоря уменьшается и *противо-ЭДС*.

Если механическая нагрузка на валу двигателя отсутствует (двигатель работает вхолостую), вращающему моменту двигателя препятствуют только моменты трения, и частота вращения якоря достигает максимального значения. При этом *противо-ЭДС* почти полностью компенсирует напряжение сети и

через обмотку якоря проходит минимальный ток. Соответственно электрическая мощность, потребляемая из сети, минимальна.

При подключении механической нагрузки частота вращения якоря уменьшается, а следовательно, уменьшится и значение противо-ЭДС. Ток и электрическая мощность, потребляемые двигателем из сети, возрастут.

Таким образом, противо-ЭДС в двигателе выполняет функции дросселя, регулирующего поступление мощности из сети.

Понятие обмотки якоря. Коллектор и его назначение

Основным элементом обмотки якоря является секция – часть обмотки, подсоединенная к двум коллекторным пластинам, которые следуют друг за другом по схеме обмотки (рис. 97).

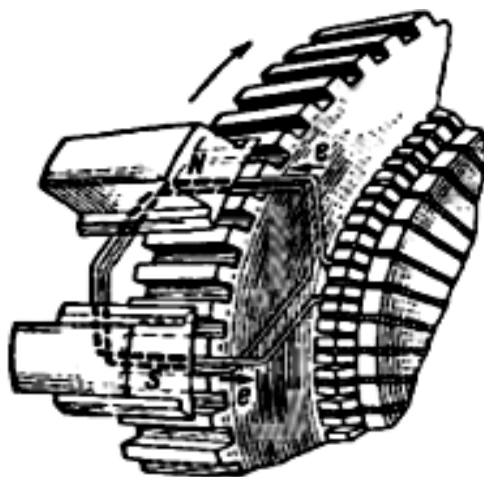


Рис. 97 Общий вид секции обмотки якоря

Секция может состоять из одного или нескольких витков. Активные стороны секции располагаются под разноименными полюсами на расстоянии полюсного деления друг от друга (*полюсным делением* называется часть длины окружности якоря, приходящаяся на один полюс). При этом ЭДС, индуцируемые в активных сторонах секции, суммируются.

В современных машинах постоянного тока применяют двухслойные обмотки якоря, когда в каждом пазу укладывают две активные стороны двух различных секций. Очевидно, что в этом случае число пазов равно числу секций. Для уменьшения пульсаций ЭДС секции обмотки соединяют последовательно: к коллекторной пластине припаивают конец одной секции и начало следующей. Таким образом, число коллекторных пластин также оказывается равным числу секций.

При проектировании и расчете обмоток якорей используют следующие понятия: *первый частичный шаг* y_1 (ширина секции) – число пазов, расположенных между активными сторонами секции;

второй частичный шаг y_2 – число пазов между конечной стороной одной секции и начальной стороной следующей секции;

результатирующий шаг y – число пазов между начальными сторонами двух последовательно соединенных секций;

шаг обмотки по коллектору y_k – число коллекторных пластин между началом и концом секции по ходу обмотки.

В зависимости от формы секции различают *петлевые* и *волновые обмотки*. В петлевой обмотке секция имеет форму петли, а начало и конец секции припаяны к двум соседним коллекторным пластинам (рис. 98).

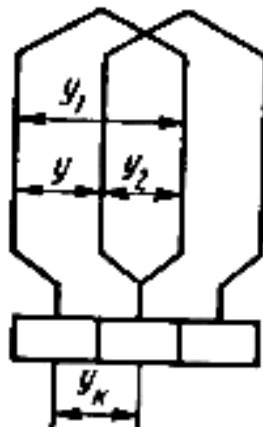


Рис. 98 Принцип построения простой петлевой обмотки

Расчет простой петлевой двухслойной обмотки осуществляют по следующим формулам $y = y_k = 1$; $y_1 = \frac{z}{2p} \pm b$; $y_2 = y_1 - y$, где z – число пазов якоря; p – число пар полюсов машины; b – дробь, которую отнимают или добавляют к значению y , чтобы оно стало целым числом.

Группы секций образуют параллельные ветви, число которых равно числу полюсов машины. Наличие параллельных ветвей позволяет уменьшить токовые нагрузки на щетки, что очень важно, так как коллекторно-щеточный контакт – самый уязвимый и ненадежный элемент электрической машины постоянного тока. В волновой обмотке секция по форме напоминает волну (рис. 99).

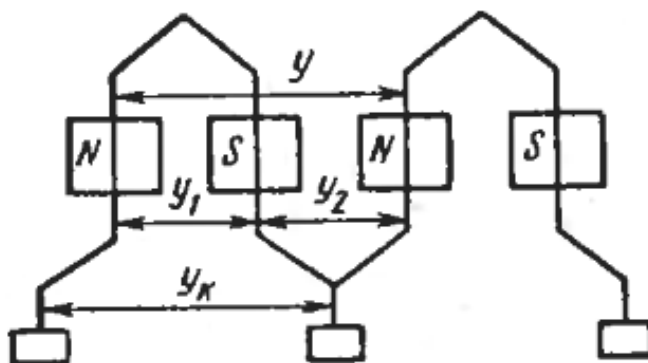


Рис. 99 Принцип построения простой волновой обмотки

Расчет простой волновой двухслойной обмотки осуществляется по формулам: $y = y_k = \frac{k \pm 1}{p}$; $y_1 = \frac{z}{2p} \pm b$; $y_2 = y = y_1$, где k – число коллекторных пластин.

Простая волновая обмотка имеет одну пару параллельных ветвей. Волновую обмотку, в которой половина секций всегда соединена последовательно, применяют в электрических машинах, рассчитанных на высокие напряжения.

В машинах, рассчитанных на сильные токи, используют петлевые обмотки с большим числом пар параллельных ветвей.

Для увеличения числа пар параллельных ветвей разработаны схемы сложных петлевых и волновых обмоток, состоящих из двух или нескольких простых обмоток. Токи, индуцируемые в якорной обмотке, подводятся к потребителю электрической энергии через щеточно-коллекторный узел. Коллектор машины постоянного тока является наиболее важной в эксплуатации деталью, так как его скользящий контакт требует постоянного наблюдения и ухода, очистки от пыли, нагара и грязи, поддержания оптимального давления между трущимися поверхностями. Кроме того, коллектор является механическим выпрямителем переменного тока, который периодически меняет направление тока в каждой секции, сохраняя постоянство направления тока во внешней цепи.

Реакция якоря

В режиме холостого хода магнитное поле машины создается только обмоткой возбуждения (рис. 100 а). При подключении нагрузки через обмотку якоря проходит ток, который создает свое магнитное поле (рис. 100 б).

На рисунках кружками показаны сечения проводников обмотки возбуждения и обмотки якоря. Ток в проводнике, текущий «за плоскость» рисунка, помечен кружком с крестиком, а ток, направленный «к нам», – кружком с точкой, направления магнитных силовых линий определены по правилу буравчика.

Реально существующее в нагруженной машине магнитное поле следует рассматривать как результат наложения магнитных полей обмотки возбуждения и обмотки якоря (рис. 100 в).

Магнитное поле машины, в котором движутся проводники обмотки якоря, создается не только обмоткой возбуждения, но и обмоткой якоря. При этом поле возбуждения стабильно, а поле якоря изменяется при изменении нагрузки машины. Влияние магнитного поля якоря на поле возбуждения машины называют *реакцией якоря*. Вследствие реакции якоря (рис. 100 в) симметрия магнитного поля машины нарушается. Происходит усиление магнитного потока под сбегавшим краем полюса генератора и ослабление - под набегающим краем (якорь генератора вращается по часовой стрелке, следовательно, левый край северного полюса и правый край южного полюса «набегают» на якорь). Вследствие насыщения участков магнитной цепи усиление магнитного потока под одним краем полюса оказывается относительно меньшим, чем ослабление магнитного потока под другим краем. Это приводит к тому, что среднее значение магнитного потока в нагруженной машине становится меньше, чем в ненагруженной. Соответственно уменьшается и ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря. Назовем *геометрической нейтралью* воображаемую линию, которая проходит строго посередине между полюсами и лежит в плоскости, разделяющей магнитную систему машины на две симметричные части. Аналогичную линию, проходящую через диаметрально противоположные точки окружности якоря, в которых магнитная индукция равна нулю, назовем *физической нейтралью*. Магнитная индукция равна нулю в тех точках, где магнитные силовые линии касаются окружности

якоря (не входя в него), а физическая нейтраль перпендикулярна магнитным силовым линиям.

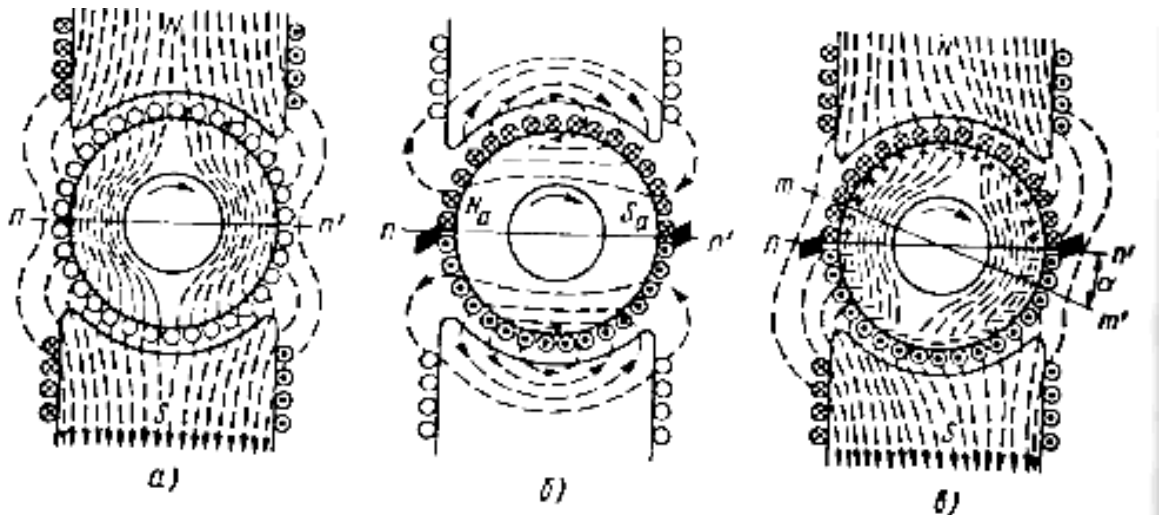


Рис. 100 Реакция якоря в генераторе постоянного тока

В ненагруженной машине физическая нейтраль совпадает с геометрической. В нагруженном генераторе (см. рис. 100 в) физическая нейтраль mm' поворачивается относительно геометрической нейтрали nn' на угол α в сторону вращения якоря.

Мысленно представим себе, что на рис. 100 изображен не генератор, а двигатель. Тогда при тех же направлениях токов в обмотках якоря и возбуждения, ротор двигателя начал бы вращаться в другую сторону (против часовой стрелки), в чем нетрудно убедиться, применив правило левой руки. Правый край северного полюса и левый край южного полюса стали бы набегающими.

Следовательно, в нагруженном двигателе магнитный поток усиливается под набегающим краем полюса и ослабляется под сбегающим краем, а физическая нейтраль поворачивается на угол α против вращения якоря.

Двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения. Вращающий момент

У двигателя параллельного возбуждения цепь обмотки возбуждения, так же как и цепь обмотки якоря, включена под постоянное напряжение сети. Цепь обмотки возбуждения можно питать и от отдельного источника постоянного тока (независимое возбуждение). И в том, и в другом случае ток возбуждения не зависит от тока якоря.

Схема включения в сеть двигателя постоянного тока параллельного возбуждения изображена на рис. 101. Обмотка якоря включается в сеть через ступенчатый пусковой реостат R_n обмотка возбуждения – через реостат $R_{ш}$. Токпроводящая ручка пускового реостата соединена с зажимом L и до запуска двигателя находится на контакте O . При запуске она последовательно перемещается в крайнее левое положение.

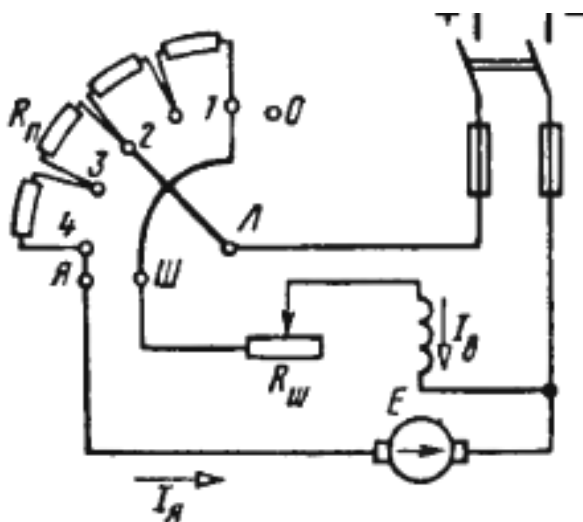


Рис. 101 Схема включения в сеть двигателя постоянного тока параллельного возбуждения:

Л-линия; Я- якорь; Ш- шунт.

При этом цепь возбуждения непосредственно подсоединена к сети через дугообразный контакт Ш, а цепь якоря Я через переключаемые секции пускового реостата.

В процессе пуска число включенных секций уменьшается, а по окончании пуска пусковой реостат полностью выводится. Такая конструкция пускового реостата исключает разрыв цепи якоря при переключении ручки с одного контакта на другой.

Следует иметь в виду, что пусковой реостат не рассчитан на длительное пребывание под током якоря, поэтому при работе двигателя его ручка должна находиться в крайнем левом положении. Вращающий момент M двигателя определяется на основании закона Ампера $F=I_1 l B_{cp}$ и известной из механики формулы $M=F \frac{D}{2} N=I_1 l B_{cp} \frac{D}{2} N$,

где F -сила действующая на один проводник обмотки якоря; D - диаметр якоря; N - общее число проводников в обмотке якоря; I_1 - ток в одном проводнике обмотки; l -действующая длина проводника; B_{cp} - среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре машины.

Напомним, что $B_{cp} = \frac{2p\Phi}{\pi D l}$, $I_1 = \frac{I_я}{2a}$, таким образом, $M = B_{cp} I_1 l \frac{D}{2} N = \frac{2p\Phi}{\pi D l} \frac{I_я}{2a} \frac{D}{2} N = \frac{2p\Phi I_я}{2\pi a} \frac{pN}{2\pi a}$. Постоянный для данного двигателя коэффициент $\frac{pN}{2\pi a}$ обозначают C_m . Таким образом, $M = C_m I_я \Phi$, т. е. вращающий момент двигателя прямо пропорционален току якоря и магнитному потоку возбуждения. Выражение для вращающего момента двигателя можно получить и другим способом.

Электромагнитная мощность $P_э$, за счет которой создается момент, поворачивающий якорь, $P_э = E I_я$, где E - ЭДС в обмотке якоря машины, работающей как генератор, и противо-ЭДС машины, работающей как двигатель.

Из механики известно, что мощность, вращающий момент и угловая частота вращения связаны соотношением $P_3 = M\omega$, следовательно, $M = \frac{EI_a}{\omega}$
 $M\omega = EI_a$.

Угловая скорость ω (рад/с) и частота вращения n (об/мин) легко выражаются друг через друга: $\omega = 2n\pi/60$.

Напомним, что ЭДС машины $E = c_E n \Phi$. Следовательно, $M = \frac{c_E n \Phi I_a}{2\pi n / 60} = \frac{60 c_E}{2\pi} \Phi I_a = c_M \Phi I_a$, где $c_M = 60 c_E / (2\pi)$.

Двигатели постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения

В двигателе последовательного возбуждения обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря (рис. 102 а), поэтому магнитный поток Φ пропорционален току двигателя I (если пренебречь насыщением магнитопровода), и в формуле $M = c_M I \Phi$ следует положить $\Phi = kI$, где k — постоянный коэффициент, тогда $M = c_M k I^2$. Вращающий момент двигателя последовательного возбуждения пропорционален квадрату тока.

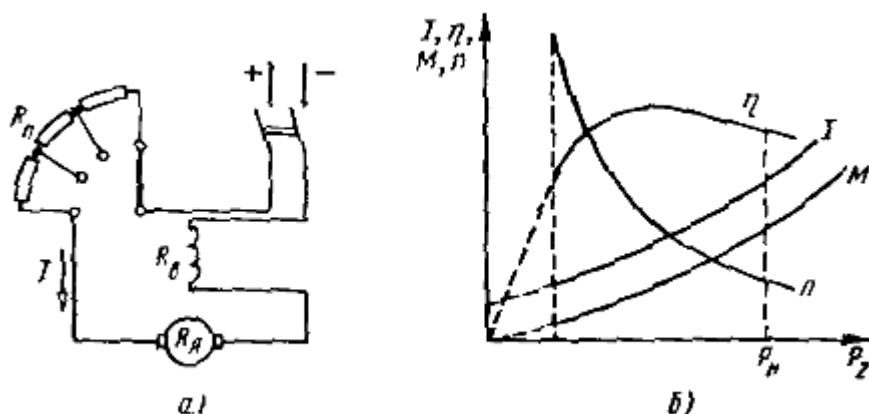


Рис. 102 Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения:
 а) схема; б) рабочие характеристики

Выразим магнитный поток через вращающий момент: $M = \frac{c_M}{k} \Phi^2$; $\Phi = k_1 \sqrt{M}$; $k_1 = \sqrt{k/c_M}$, и составим приближенное выражение для частоты вращения двигателя: $n \approx \frac{U}{c_E \Phi} = \frac{U}{c_E k_1 \sqrt{M}}$. Таким образом, для двигателя последовательного

возбуждения опасен режим холостого хода, так как при уменьшении момента на валу до нуля частота вращения неограниченно увеличивается (рис. 102 б) и двигатель идет «вразнос». Это обстоятельство требует такого сочленения двигателя последовательного возбуждения с рабочей машиной, при котором режим холостого хода был бы исключен. В частности, нельзя применять ременную передачу, так как при ослаблении или обрыве ремня может возникнуть аварийный режим. Частоту вращения двигателя последовательного возбуждения можно регулировать либо изменением подводимого напряжения (рис. 103 а), либо изменением магнитного потока возбуждения за счет

шунтирования обмотки возбуждения (рис. 103 б). Второй способ более экономичен.

Двигатель последовательного возбуждения имеет существенные преимущества вследствие квадратичной зависимости вращающего момента от тока. Так, например, он развивает большой пусковой момент, это очень важно для электропривода на транспорте (благодаря этому электропоезд способен быстро набирать скорость после остановки). Однако резко выраженная зависимость частоты вращения от нагрузки и опасность «разноса» ограничивают область применения этих двигателей.

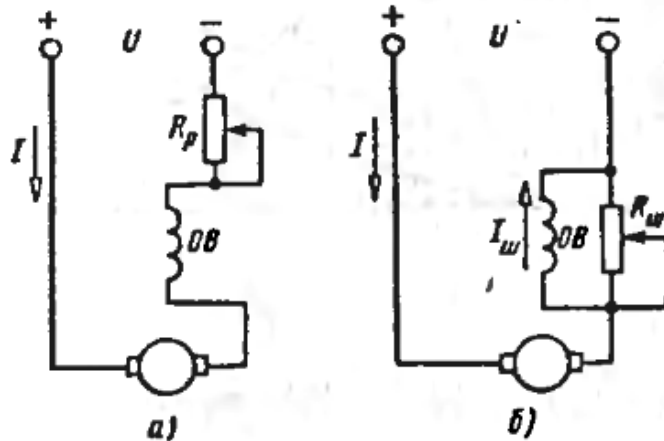


Рис. 103 Семы регулировки частоты вращения двигателя последовательного возбуждения:

а) изменением подводимого напряжения; б) шунтированием обмоток возбуждения

Указанных недостатков лишены двигатели смешанного возбуждения (рис. 104). Характеристики этих двигателей являются промежуточными между характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения.

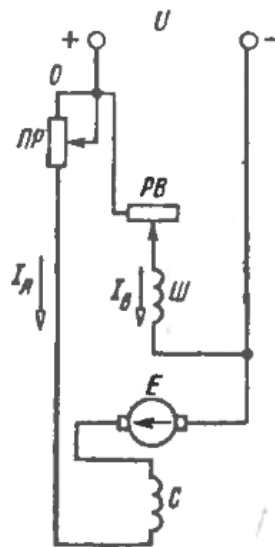


Рис. 104 Электрическая схема двигателя смешанного возбуждения

При согласном включении последовательной и параллельной обмоток возбуждения двигатель смешанного возбуждения имеет большой пусковой момент по сравнению с шунтовым двигателем. При встречном включении обмоток возбуждения двигатель имеет жесткую механическую характеристику.

С увеличением нагрузки магнитный поток серийной обмотки увеличивается, и вычитаясь из потока шунтовой обмотки, уменьшает общий поток возбуждения. При этом частота вращения двигателя не только не уменьшается, а может даже увеличиться (рис. 105).

И в том, и в другом случае наличие магнитного потока шунтовой обмотки исключает режим «разноса» двигателя при снятии нагрузки.

Регулирование частоты вращения двигателя смешанного возбуждения осуществляется регулировочным реостатом в цепи шунтовой обмотки.

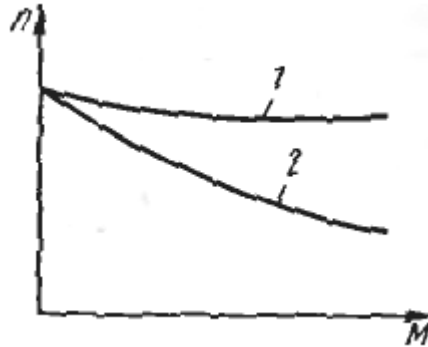


Рис. 105 Механические характеристики компаундного двигателя при встречном (кривая 1) и согласном (кривая 2) включении обмоток возбуждения

Двигатели смешанного возбуждения применяют в качестве тяговых и крановых двигателей, а также для привода прокатных станков, компрессоров, насосов. Машины постоянного тока экономичны. Их КПД при номинальном напряжении составляет 75% и выше. Чем больше номинальная мощность машины, тем выше ее КПД. У машин мощностью порядка 100 кВт КПД достигает 92%.

1.9 Трансформаторы

1.9.1 Общие сведения о трансформаторах

Трансформатор предназначен для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения. Увеличение напряжения осуществляется с помощью *повышающих* трансформаторов, уменьшение — *понижающих*.

Трансформаторы применяют на линиях электропередачи, в технике связи, в автоматике, в измерительной технике и других областях.

В соответствии с назначением различают: силовые трансформаторы для питания электрических двигателей и осветительных сетей; специальные трансформаторы для питания сварочных аппаратов, электропечей и других потребителей особого назначения; измерительные трансформаторы для подключения измерительных приборов.

По числу фаз трансформаторы делятся на одно- и трехфазные трансформаторы, используемые в технике связи, их в свою очередь подразделяют на низко- и высокочастотные. Расчетные мощности трансформаторов различны — от долей вольт-ампер до десятков тысяч киловольт- ампер, рабочие частоты — от единиц герц до сотен килогерц.

Трансформатор – простой, надежный и экономичный электрический аппарат. Он не имеет движущихся частей и скользящих контактных соединений, его КПД достигает 99%. КПД трансформатора η , определяемый как отношение мощности на выходе P_2 к мощности на входе P_1 , зависит от нагрузки. Современные трансформаторы рассчитывают таким образом, что максимум КПД достигается при нагрузке, равной примерно половине номинального значения.

1.9.2 Устройство, принцип действия и параметры трансформаторов

Трансформатор представляет собой замкнутый магнитопровод, на котором расположены две или несколько обмоток. В маломощных высокочастотных трансформаторах, используемых в радиотехнических схемах, магнитопроводом может являться воздушная среда.

Для уменьшения потерь на гистерезис магнитопровод изготавливают из магнитомягкого материала трансформаторной стали, имеющей узкую петлю намагничивания. Для уменьшения потерь на вихревые токи в материал магнитопровода вводят примесь кремния, повышающую его электрическое сопротивление, а сам магнитопровод собирают из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,35–0,5 мм, изолированных друг от друга теплоустойчивым лаком или специальной бумагой.

Различают трансформаторы стержневого (рис. 106 а) и броневые (рис. 106 б) типов. Последний хорошо защищает обмотки катушек от механических повреждений. Верхнюю часть магнитопровода, называемую *ярмом*, крепят после насадки на стержень катушек (обмоток).

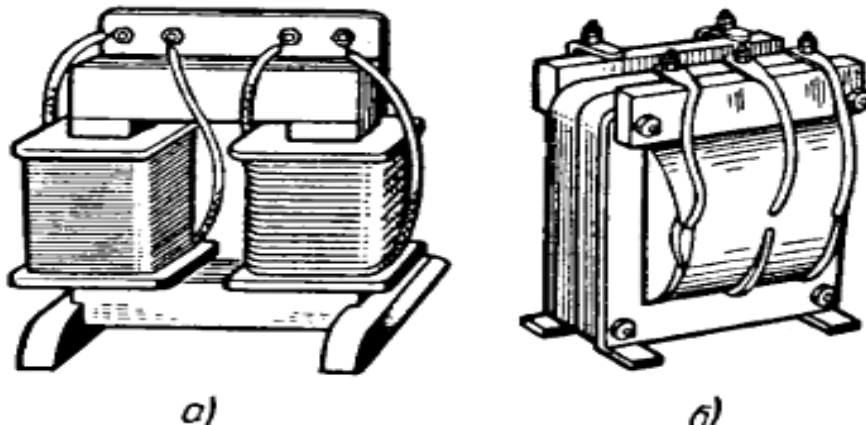


Рис. 106 Конструкция однофазного маломощного трансформатора:
а) стержневого типа; б) броневые типа

Стержни и ярмо соединяют очень плотно, чтобы исключить воздушные зазоры на стыках. В маломощных трансформаторах находят широкое применение кольцевые магнитопроводы, которые собирают из штампованных колец или навивают из длинной ленты. В этих магнитопроводах отсутствует воздушный зазор, поэтому магнитный поток рассеяния мал. В трансформаторах, рассчитанных на повышенные частоты, кольцевые магнитопроводы часто прессуют из ферромагнитного порошка, смешанного с изоляционным лаком.

Обмотки трансформаторов изготовляют из медного провода и располагают на одном и том же или на разных стержнях, рядом или одну под другой. В последнем случае непосредственно к стержню примыкает обмотка низшего напряжения, а поверх нее размещается обмотка высшего напряжения.

Обмотку трансформатора, к которой подводится напряжение питающей сети, называют *первичной*, а обмотку, к которой подсоединяется нагрузка, – *вторичной*. На сердечнике может быть размещено несколько вторичных обмоток с разным числом витков, что позволяет получить различные по значению вторичные напряжения.

При работе трансформатора за счет токов в обмотках, а также вследствие перемагничивания магнитопровода и вихревых токов выделяется теплота. Трансформаторы небольшой мощности (до 10 кВА), для которых достаточно воздушного охлаждения, называют *сухими*.

В мощных трансформаторах применяют масляное охлаждение (рис. 107). Магнитопровод с обмотками 2 и 3 размещается в баке 4, заполненном минеральным (трансформаторным) маслом. Масло не только отводит теплоту за счет конвекции или принудительной циркуляции, но и является хорошим диэлектриком (изолятором). Масляные трансформаторы надежны в работе и имеют меньшие размеры и массу по сравнению с сухими трансформаторами той же мощности. При изменении температуры объем масла меняется. При повышении температуры излишек масла поглощается расширителем 5, а при понижении температуры масло из расширителя возвращается в основной бак.

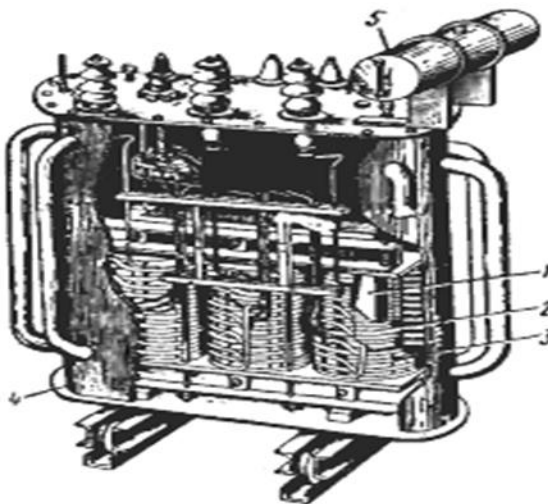


Рис. 107 Трехфазный силовой трансформатор

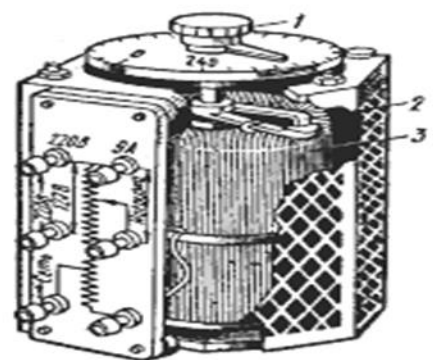


Рис. 108 Общий вид автотрансформатора:

1-ручка скользящего контакта; 2-скользящий контакт; 3-обмотка

В тех случаях, когда требуется плавно изменять вторичное напряжение, применяют скользящий контакт для изменения числа витков обмотки (примерно так же, как это делается в ползунковых реостатах). Скользящий контакт широко используется в автотрансформаторах, рассчитанных на регулирование напряжения в небольших пределах (рис. 108).

Принцип действия однофазного трансформатора. Коэффициент трансформации

Работа трансформатора основана на явлении взаимной индукции, которое является следствием закона электромагнитной индукции. Рассмотрим более подробно сущность процесса трансформации тока и напряжения.

При подключении первичной обмотки трансформатора к сети переменного тока напряжением U_1 по обмотке начнет проходить ток I_1 , (рис. 109) который создает в магнитном поле переменный магнитный поток Φ . Магнитный поток, пронизывая витки вторичной обмотки, индуцирует в ней ЭДС E_2 , которую можно использовать для питания нагрузки.

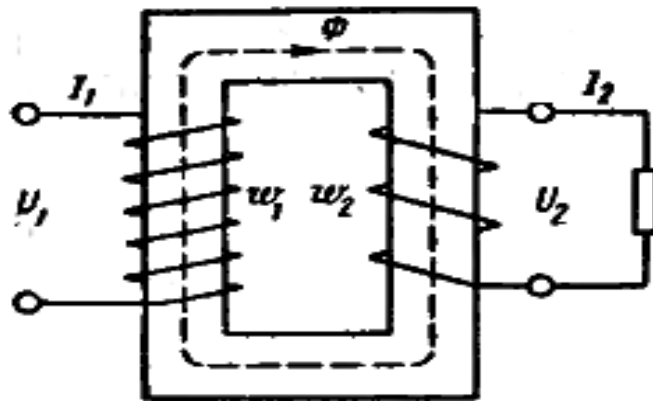


Рис. 109 Принципиальная схема однофазного трансформатора

Поскольку первичная и вторичная обмотки трансформатора пронизываются одним и тем же магнитным потоком Φ , выражения индуцируемых в обмотке ЭДС можно записать в виде $E_1 = 4,44f\omega_1\Phi_m$; $E_2 = 4,44f\omega_2\Phi_m$, где f – частота переменного тока, ω_1, ω_2 – число витков обмоток. поделив одно равенство на другое, получим $\frac{E_2}{E_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = k$. Отношение чисел витков обмоток трансформатора называют *коэффициентом трансформации* k .

Таким образом, коэффициент трансформации показывает, как относятся действующие значения ЭДС вторичной и первичной обмоток. На основании закона электромагнитной индукции можно написать $e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi}{dt}$; $e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi}{dt}$.

Поделив одно равенство на другое, получим $\frac{e_2}{e_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = k$. Следовательно, в любой

момент времени отношение мгновенных значений ЭДС вторичной и первичной обмоток равно коэффициенту трансформации k . Нетрудно понять, что это возможно только при полном совпадении по фазе ЭДС e_1 и e_2 . Если цепь вторичной обмотки трансформатора разомкнута (режим холостого хода), то напряжение на зажимах обмотки равно ее ЭДС: $U_2 = E_2$, а напряжение источника питания почти полностью уравновешивается ЭДС первичной обмотки $U \approx E_1$. Следовательно, можно написать, что $k = \frac{E_2}{E_1} \approx \frac{U_2}{U_1}$.

Таким образом, коэффициент трансформации может быть определен на основании измерений напряжения на входе и выходе ненагруженного трансформатора. Отношение напряжений на обмотках ненагруженного

трансформатора указывается в его паспорте. Учитывая высокий КПД трансформатора, можно полагать, что $S_1 \approx S_2$, где $S_1 = U_1 I_1$ – мощность, потребляемая из сети; $S_2 = U_2 I_2$ – мощность, отдаваемая в нагрузку. Таким образом, $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$, откуда $\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1} = k$. Отношение токов первичной и вторичной

обмоток приближенно равно коэффициенту трансформации, поэтому ток I_2 во столько раз увеличивается (уменьшается), во сколько раз уменьшается (увеличивается) U_2 .

Трехфазные трансформаторы

В линиях электропередачи используют в основном трехфазные силовые трансформаторы. Внешний вид, конструктивные особенности и компоновка основных элементов этого трансформатора представлены на рис. 110. Магнитопровод трехфазного трансформатора имеет три стержня, на каждом из которых размещаются две обмотки одной фазы (рис. 110).

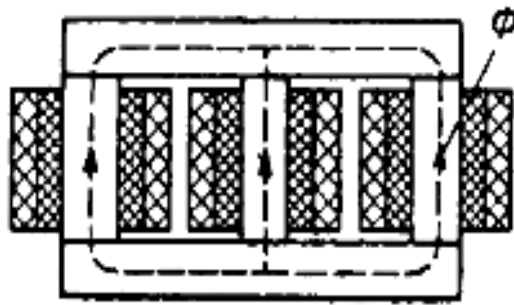


Рис. 110 Размещение обмоток на сердечнике трехфазного трансформатора

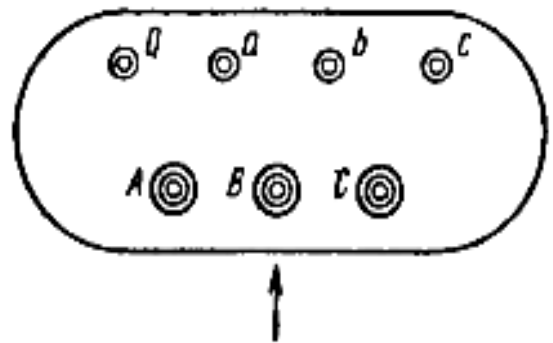


Рис. 111 Расположение и маркировка выводов на крышке бака трансформатора

Для подключения трансформатора к линиям электропередачи на крышке бака имеются вводы, представляющие собой фарфоровые изоляторы, внутри которых проходят медные стержни. Вводы высшего напряжения обозначают буквами A, B, C , вводы низшего напряжения – буквами a, b, c . Ввод нулевого провода располагают слева от ввода a и обозначают 0 (рис. 111).

Принцип работы и электромагнитные процессы в трехфазном трансформаторе аналогичны рассмотренным ранее. Особенностью трехфазного трансформатора является зависимость коэффициента трансформации линейных напряжений от способа соединения обмоток.

Применяются главным образом *три способа соединения обмоток трехфазного трансформатора*:

соединения первичных и вторичных обмоток звездой (рис. 112 а);

соединение первичных обмоток звездой, вторичных – треугольником (рис. 112 б);

соединение первичных обмоток треугольником, вторичных – звездой (рисунок 112 в).

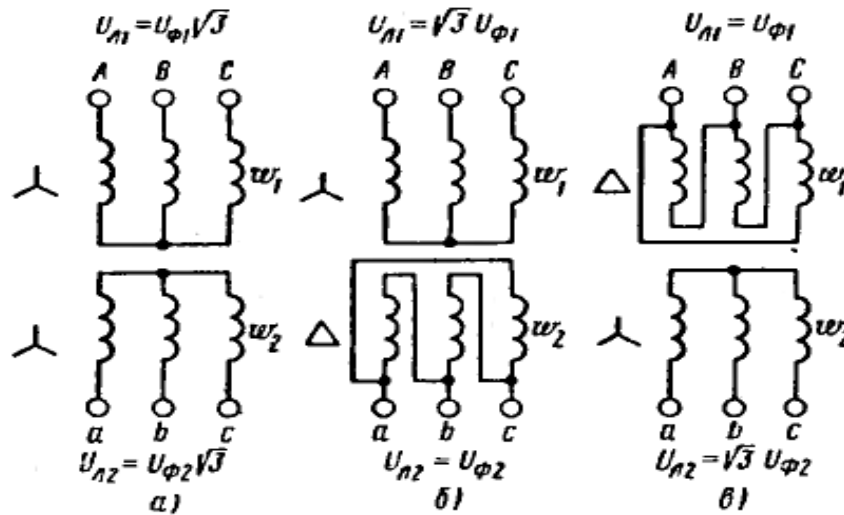


Рис. 112 Способы соединения обмоток трехфазного трансформатора

Обозначим отношение чисел витков обмоток одной фазы буквой k , что соответствует коэффициенту трансформации однофазного трансформатора и может быть выражено через отношение фазных напряжений: $k = \frac{\omega_2}{\omega_1} \approx \frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi 1}}$.

Обозначим коэффициент трансформации линейных напряжений буквой C . При соединении обмоток по схеме звезда – звезда

$$C = \frac{U_{Л2}}{U_{Л1}} = \frac{\sqrt{3}U_{\phi 2}}{\sqrt{3}U_{\phi 1}} = k.$$

При соединении обмоток по схеме звезда – треугольник

$$C = \frac{U_{Л2}}{U_{Л1}} = \frac{U_{\phi 2}}{\sqrt{3}U_{\phi 1}} = \frac{k}{\sqrt{3}}.$$

При соединении обмоток по схеме треугольник – звезда

$$C = \frac{U_{Л2}}{U_{Л1}} = \frac{\sqrt{3} * U_{\phi 2}}{U_{\phi 1}} = \sqrt{3}k.$$

Таким образом, при одном и том же числе витков обмоток трансформатора можно в $\sqrt{3}$ раза увеличить или уменьшить его коэффициент трансформации, выбирая соответствующую схему соединения обмоток.

1.9.3 Применение трансформаторов в сигнализационных комплексах С-175М и КС-185

Рассмотрим применение трансформаторов в технических средствах охраны границы на примере средств охранной сигнализации протяженных участков границы.

Блок сетевой комплекса С-175М (рис. 113) преобразует переменное напряжение 220 В частотой 50 Гц в нестабилизированное постоянное напряжение 25 В и стабилизированное постоянное напряжение 24 В, которые необходимы для нормального функционирования комплекса. Преобразование переменного напряжения в постоянное осуществляется выпрямителем, на входе которого стоит понижающий трансформатор.

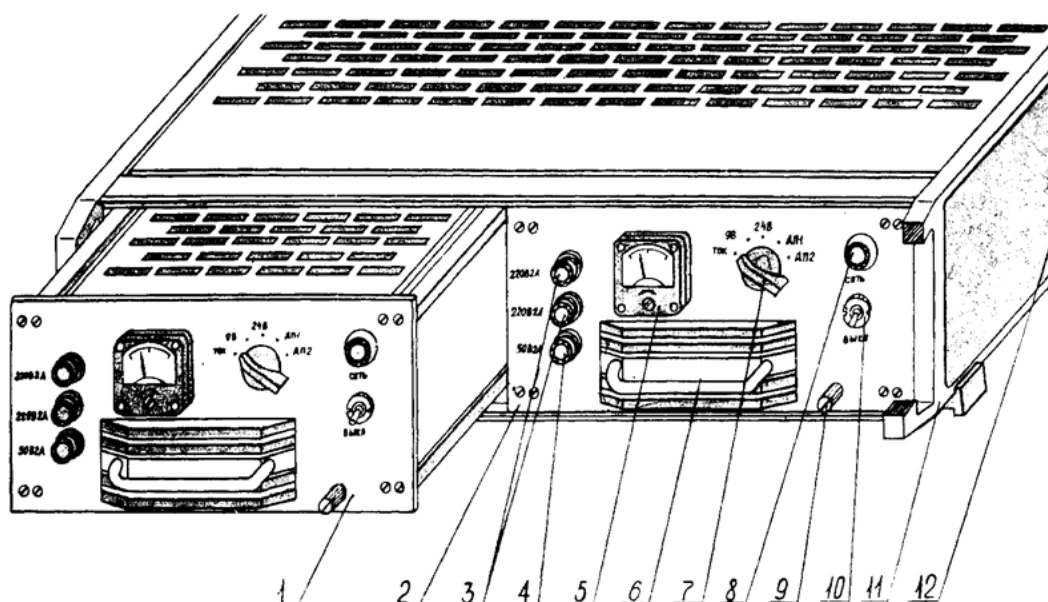


Рис. 113 Блок сетевой С-175М

1 – стабилизатор сетевой (рабочий); 2 – стабилизатор сетевой (резервный); 3 – плавкие предохранители в цепи 220В; 4 – плавкий предохранитель в цепи 50В; 5 – индикаторный прибор для контроля напряжений и тока потребления; 6 – ручка; 7 – переключатель рода измерений; 8 – лампа индикаторная включения сети 220В; 9 – винт-домкрат; 10 – тумблер включения сети 220В; 11 – каркас; 12 – табличка с обозначением блока, заводским номером и датой изготовления.

Выпрямители блока питания комплекса КС-185 (рис. 114, 115), на входе которых стоят понижающие трансформаторы, преобразуют переменное напряжение 220 В частотой 50 Гц в постоянное стабилизированное напряжение 110 В и 28,5 В.

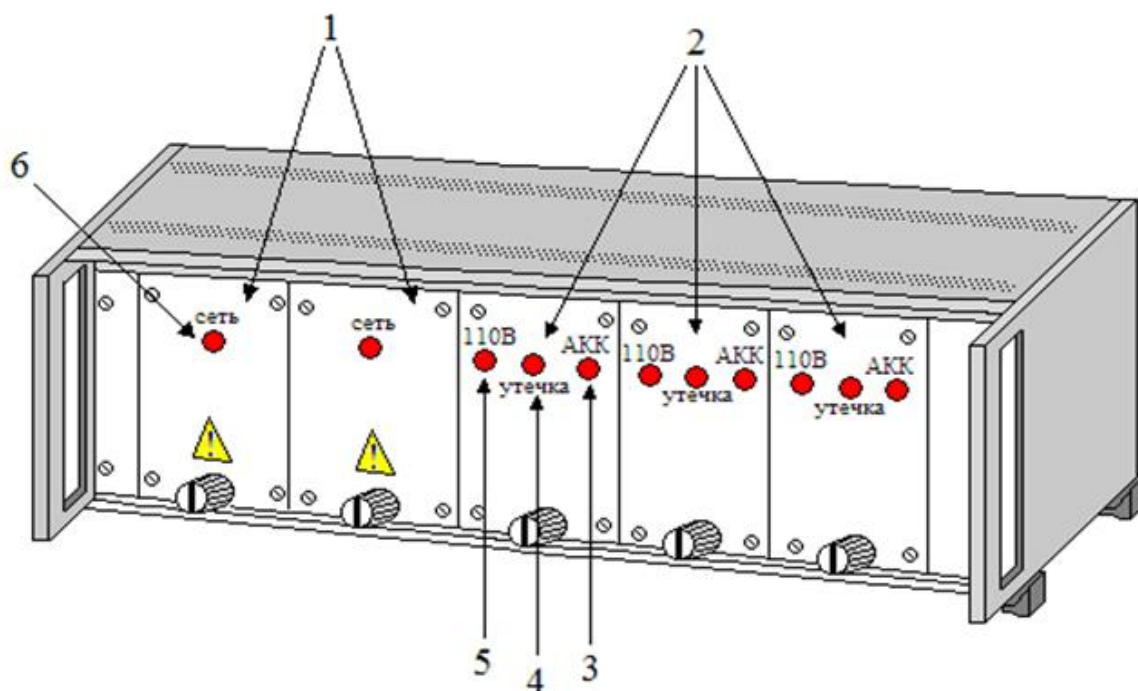


Рис. 114 Блок питания КС-185

1 – устройства входные силовые; 2 – блоки дистанционного питания; 3 – индикатор светодиодный аккумуляторной батареи; 4 – индикатор светодиодный пониженного сопротивления изоляции; 5 – индикатор светодиодный наличия дистанционного питания; 6 – индикатор светодиодный наличия сети 220 В

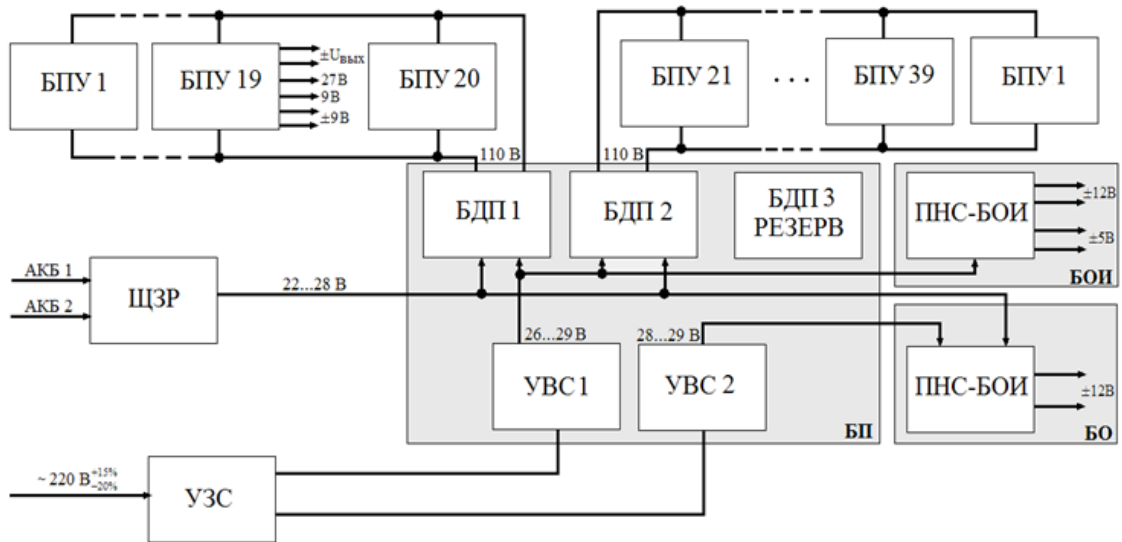


Рис. 24. Структурная схема системы питания КС-185

БП - блок питания; БОИ – блок обработки информации; БО – блок оповещения; БДП – блок дистанционного питания; УВС – устройство входное силовое; ПНС – преобразователь напряжения стабилизированный; БПУ – блок питания участковый; УЗС – устройство защиты по сети; АКБ – аккумуляторная батарея

Импульсный трансформатор применяется в электромеханическом датчике ЭМД комплекса С-175М (рис. 116).

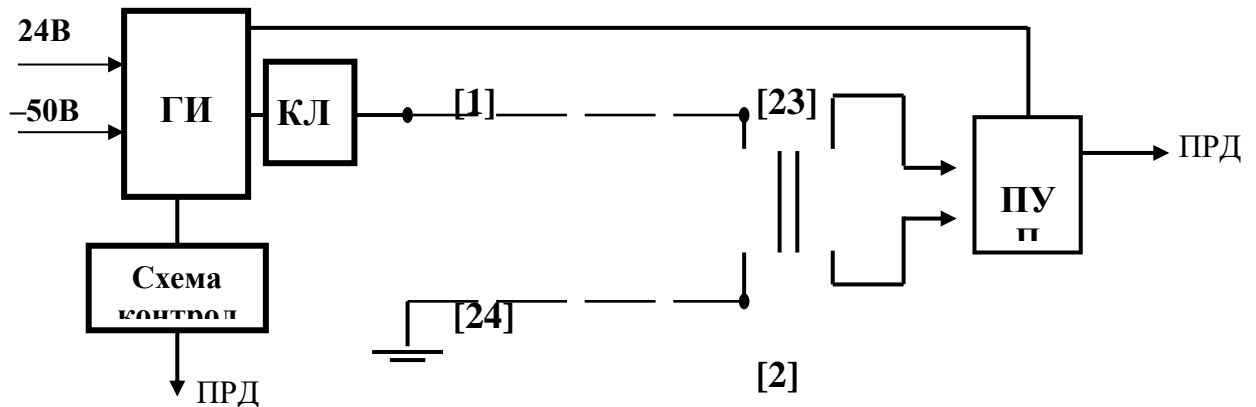


Рис. 116 Структурная схема кассеты ЭМД

Также трансформаторы применяются в радиостанциях, в зарядных устройствах аккумуляторов и в других технических средствах ОПС.

Трансформаторы применяются м во многих других блоках аппаратуры сигнализационных комплексов С-175М и КС-185.

1.10 Электрические машины переменного тока

1.10.1 Асинхронные машины переменного тока, устройство и принцип действия

Рассмотрим образование вращающегося магнитного поля на примере двухфазного синусоидального тока двух катушек, сдвинутых в пространстве одна относительно другой на угол 90^0 . Катушка 1 создает магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны в плоскости. На рис. 117 это

магнитное поле представлено вектором магнитной индукции B_1 . Магнитное поле катушки 2 характеризуется вектором магнитной индукции B_2 . К катушке 1 подводится синусоидальный ток $i = I_m \sin \omega t$, к катушке 2 ток $i_2 = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = I_m \cos \omega t$. Индукция магнитного поля пропорциональна создающему его току; следовательно, $B_1 = B_m \sin \omega t$; $B_2 = B_m \cos \omega t$.

Магнитные поля катушек, налагаясь друг на друга, образуют результирующее поле. Модуль вектора индукции результирующего магнитного поля определим из векторной диаграммы по теореме Пифагора:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = \sqrt{B_m^2 \sin^2 \omega t + B_m^2 \cos^2 \omega t} = B_m.$$

Таким образом, индукция результирующего магнитного поля оказывается не зависящей от времени величиной, равной максимальному значению индукции поля одной катушки. Это значит, что магнитные поля первой и второй катушек меняются так согласованно, что результирующее поле остается постоянным по значению.

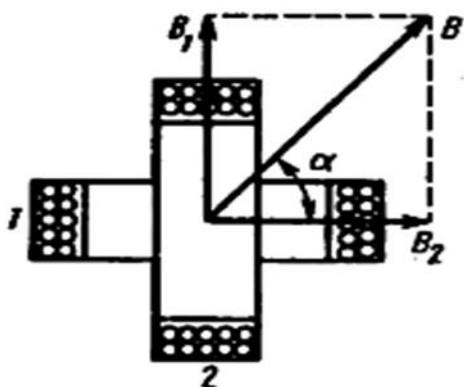


Рис. 117 Образование вращающегося магнитного поля с помощью двух катушек

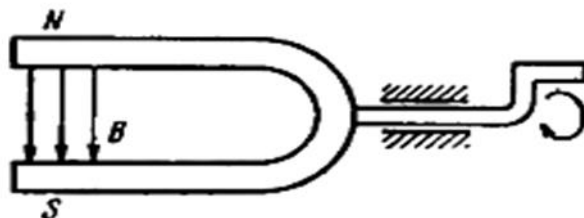


Рис. 118 Модель вращающегося магнитного поля

Направление силовых линий результирующего магнитного поля характеризуется направлением вектора B , который образует угол α с горизонтальной осью, определяемой из выражения $\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_1}{B_2} = \frac{B \sin \omega t}{B \cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t$.

Отсюда $\alpha = \omega t$, т. е. вектор B вращается против часовой стрелки с угловой скоростью ω , равной угловой скорости синусоидального тока.

Результирующее магнитное поле катушек можно представить как поле постоянного магнита, который поворачивается в пространстве (рис. 118). Такое поле называют *вращающимся*. Нетрудно убедиться, что результирующее магнитное поле катушек будет вращаться в обратную сторону, если поменять фазы токов.

Графическое пояснение процесса образования вращающегося магнитного поля изобразим графически с помощью магнитных силовых линий поля двух рассмотренных катушек.

На рис. 119 схематически изображен цилиндрический магнитопровод, в пазах которого размещены катушки $AХ$ и $ВУ$. Буквами A и B обозначены начала и X, Y – концы катушек. По катушке $AХ$ проходит ток i_A , изменяющийся по синусоидальному закону, по катушке $ВУ$ – ток i_B , изменяющийся по косинусоидальному закону. Будем считать положительным ток, проходящий от

начала катушки к ее концу. При $t = 0$ ток i_A в катушке $AХ$ отсутствует, а ток i_B в катушке $ВУ$ положителен. Силовые линии, определенные по правилу буравчика, выходят из верхней части магнитопровода и направлены в нижнюю часть аналогично силовым линиям постоянного магнита, изображенного справа, у которого северный полюс расположен вверху, а южный – внизу.

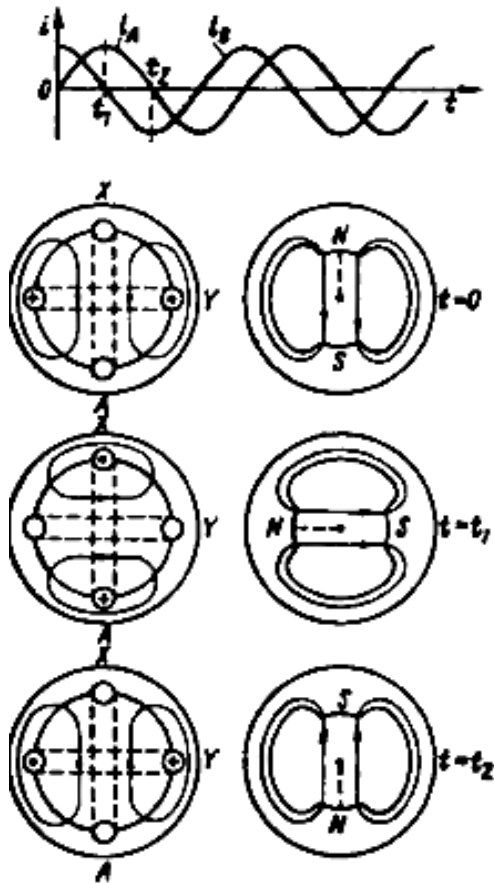


Рис. 119 Образование двухполюсного вращающегося магнитного поля

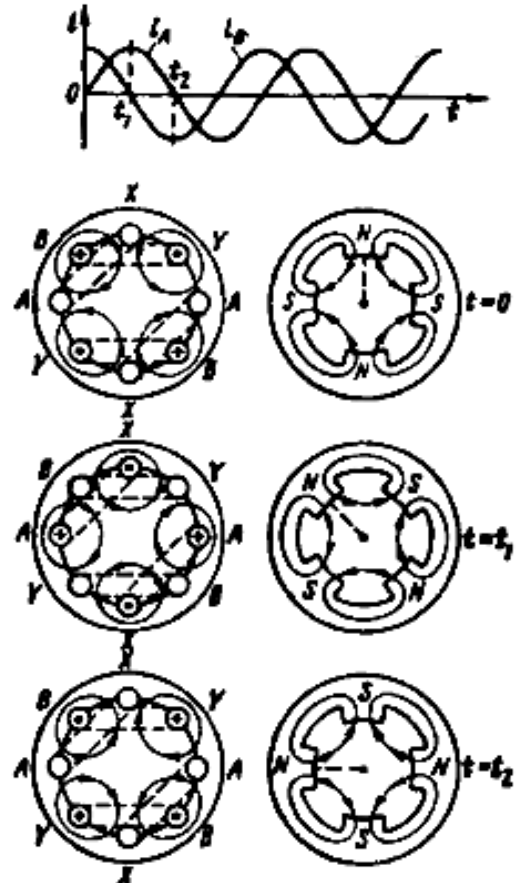


Рис. 120 Образование четырехполюсного вращающегося магнитного поля

При $t = t_1$ ток $i_B = 0$, а ток $i_A > 0$. Силовые линии магнитного поля токов аналогичны силовым линиям постоянного магнита, у которого северный полюс расположен слева, а южный – справа.

При $t = t_2$ ток $i_A = 0$, а ток $i_B < 0$. В этом случае силовые линии магнитного поля токов аналогичны силовым линиям постоянного магнита, у которого северный полюс расположен внизу, а южный – вверху.

Продолжив рассмотрение процессов изменения токов и магнитных потоков для других моментов времени, нетрудно убедиться, что за половину периода тока магнитное поле повернется на 180° , а за период сделает полный оборот. Следовательно, число оборотов вращающегося магнитного поля в секунду равно частоте тока f . Частоту вращения магнитного поля принято выражать числом оборотов в минуту. Тогда $n_1 = 60f$.

Чтобы понять принцип получения многополюсных вращающихся полей, обратимся к рис. 120. Здесь схематически изображен магнитопровод, разделенный на две половины, в каждой из которых размещены катушки $AХ$ и $ВУ$. Таким образом, устройство имеет две катушки $AХ$, через которые проходит ток i_A , и две катушки $ВУ$, через которые проходит ток i_B .

Проводя аналогичные рассуждения, устанавливаем, что магнитное поле токов аналогично полю четырехполюсного постоянного магнита. Причем в течение половины периода тока поле делает только четверть оборота, а полный оборот совершает за два периода. Таким образом, если в два раза увеличить число пар полюсов, то частота вращения поля уменьшится в два раза. Легко показать, что увеличение числа пар полюсов в три раза уменьшило бы частоту вращения поля в три раза, т. е. в общем случае $n_1 = \frac{60f}{p}$, где p – число пар полюсов. При $p=1$ эта формула совпадает с предыдущей.

Вращающееся магнитное поле трехфазного тока

Для создания вращающегося магнитного поля с помощью трехфазной системы токов нужны три катушки, сдвинутые в пространстве на 120° одна относительно другой (рис. 121).

Магнитная индукция, создаваемая при этом каждой катушкой, пропорциональна соответствующему току:

$$B_1 = B_m \sin \omega t; \quad B_2 = B_m \sin(\omega t - 120^\circ); \quad B_3 = B_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

Выберем произвольное направление, повернутое на угол α относительно вектора магнитной индукции B_1 (пунктирная ось), и найдем вектор результирующей магнитной индукции в этом направлении. С этой целью сложим проекции векторов B_1, B_2, B_3 на выбранное направление:

$$B = B_1 \cos \alpha + B_2 \cos(120^\circ - \alpha) + B_3 \cos(120^\circ + \alpha).$$

Подставим в это соотношение выражения для $B_1; B_2; B_3$:

$$B = B_m \sin \omega t \cdot \cos \alpha + B_m \sin(\omega t - 120^\circ) \cos(120^\circ - \alpha) + B_m \sin(\omega t + 120^\circ) \cos(120^\circ + \alpha)$$

После тригонометрических преобразований получим синусоидально изменяющиеся величины в последней квадратной скобке можно представить системой векторов, изображенной на рис. 121.

$$B = \frac{B_m}{2} [\sin(\omega t - \alpha) + \sin(\omega t - \alpha) + \sin(\omega t - \alpha)] + \frac{B_m}{2} [\sin(\omega t + \alpha) + \sin(\omega t + \alpha - 240^\circ) + \sin(\omega t + \alpha + 240^\circ)],$$

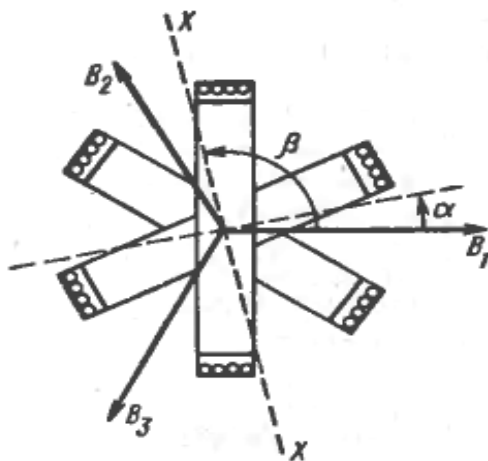


Рис. 120 Образование вращающегося магнитного поля с помощью трех катушек

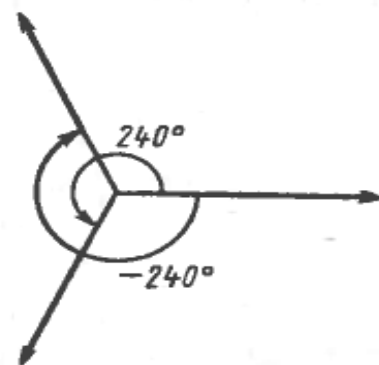


Рис. 121 Система трех векторов, сумма которых равна нулю

Нетрудно убедиться, что сумма этих векторов равна нулю. Таким образом, $B = \frac{3B_m}{2} \sin(\omega t - \alpha)$. Пусть угол $\alpha = \beta + 90^\circ$.

Тогда $B = \frac{3B_m}{2} \sin(\omega t - \beta + 90^\circ)$. При $\beta = \omega t$ получим $B = \frac{3B_m}{2}$, т. е. магнитная индукция вдоль оси XX максимальна, а сама ось XX вращается с угловой частотой ω .

Направление вращения поля определяется порядком следования фаз. Для изменения направления вращения поля достаточно поменять местами любые две фазы из трех.

В заключение отметим, что для получения неискаженного вращающегося магнитного поля система катушек должна быть полностью симметричной, а токи должны быть строго одинаковыми по амплитуде и частоте и сдвинутыми по фазе на 120° один относительно другого.

Устройство асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель является простейшей из электрических машин. Как и любая электрическая машина, он имеет две основные части: *статор* и *ротор*.

Статор (рис. 122) состоит из чугуновой станины 1, в которой закреплен магнитопровод 2 в виде полого цилиндра. Между станиной и сердечником обычно оставляют зазор, через который проходит охлаждающий воздух. Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод набирают из тонких (0,5 мм) листов электротехнической стали, изолированных друг от друга лаком. В пазы, вырезанные по внутренней окружности статора, укладывают обмотку 3. У двухполюсной машины обмотка статора состоит из трех катушек, сдвинутых на углы 120° , у четырехполюсной – из шести катушек, сдвинутых на 60° , у шестиполюсной – из девяти катушек и т. д. Обмотку в пазах статора закрепляют клиньями.

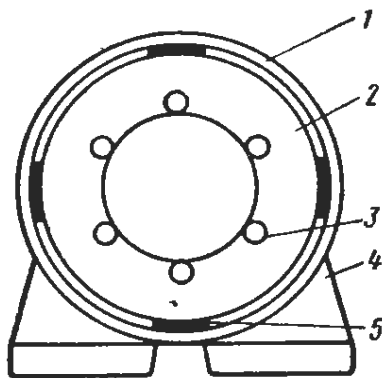


Рис. 122 Конструкция статора асинхронного двигателя:
1 – станина; 2 – сердечник; 3 – обмотка; 4 – лапа; 5 – прокладка

Ротор также набирают из тонких листов электротехнической стали. В пазах ротора размещают обмотку, которая может быть короткозамкнутой или фазной (рис. 123 а, б). Короткозамкнутая обмотка типа «беличья клетка» изображена на рис. 124. Она состоит из толстых хорошо проводящих ток стержней (медь, алюминий), соединенных по торцам медными или алюминиевыми кольцами. Короткозамкнутая обмотка не изолируется от

ротора. Иногда ее изготавливают заливкой расплавленного алюминия в пазы ротора. Устройство фазной обмотки ротора аналогично устройству обмотки статора. Концы фазной обмотки ротора соединяют с контактными кольцами и через щетки соединяют с регулировочными или пусковыми реостатами 3 (рис. 125).

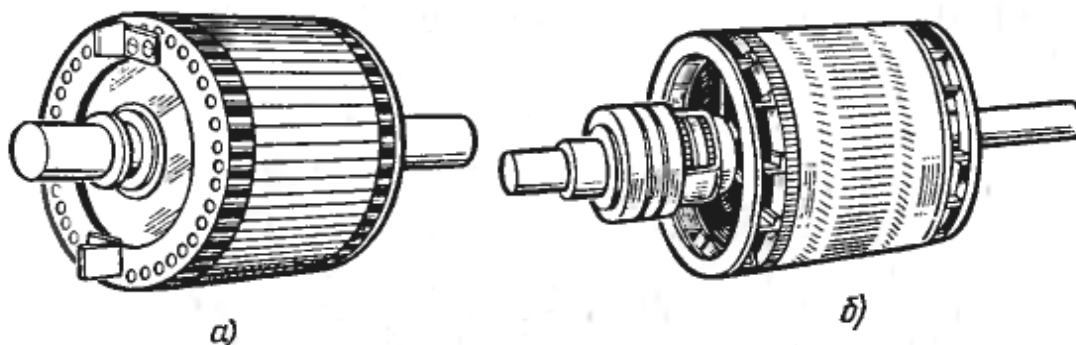


Рис. 123 Общий вид ротора асинхронного двигателя:
а) с короткозамкнутой обмоткой; б) фазной обмоткой

Контактные кольца, изготовленные из латуни или меди, укрепляют на валу двигателя с помощью изолирующих прокладок. Щеткодержатель с угольными или медно-графитовыми щетками 2 крепят на подшипниковом щите.

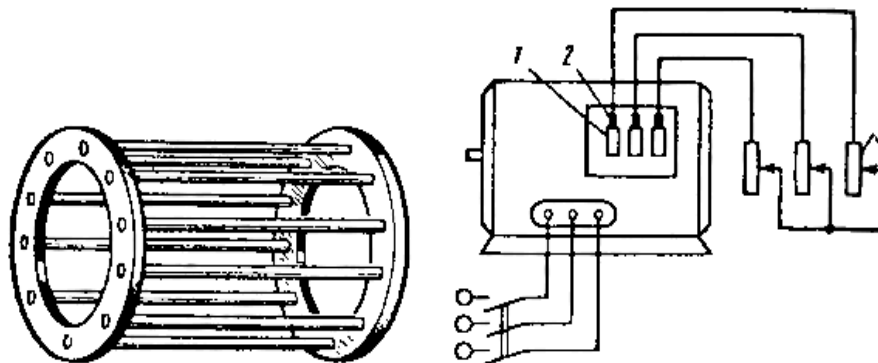


Рис. 124 Общий вид короткозамкнутой обмотки типа «белчья клетка»

Рис. 125 Схема соединения фазной обмотки ротора с регулировочными реостатами:
1 – контактные кольца; 2 – щетки;
3 – реостаты

Общий вид асинхронного двигателя показан на рис. 126.

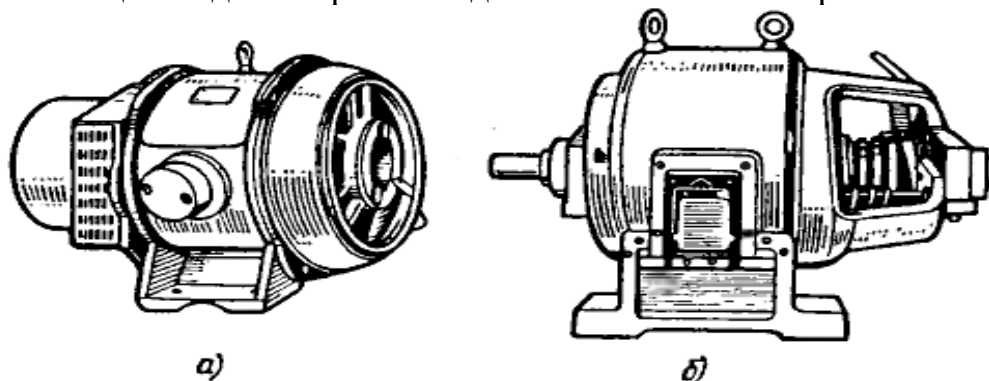


Рис. 126 Общий вид асинхронного двигателя:
а) с короткозамкнутой обмотками ротора б) с фазной обмотками ротора

Принцип действия асинхронного двигателя. Физические процессы, происходящие при раскручивании ротора

Принцип действия асинхронного двигателя основан на использовании вращающегося магнитного поля и основных законов электротехники.

При включении двигателя в сеть трехфазного тока в статоре образуется вращающееся магнитное поле, силовые линии которого пересекают стержни или катушки обмотки ротора. При этом, согласно закону электромагнитной индукции, в обмотке ротора индуцируется ЭДС, пропорциональная частоте пересечения силовых линий. Под действием индуцированной ЭДС в короткозамкнутом роторе возникают значительные токи.

В соответствии с законом Ампера на проводники с током, находящиеся в магнитном поле, действуют механические силы, которые по принципу Ленца стремятся устранить причину, вызывающую индуцированный ток, т. е. пересечение стержней обмотки ротора силовыми линиями вращающегося поля. Таким образом, возникшие механические силы будут раскручивать ротор в направлении вращения поля, уменьшая скорость пересечения стержней обмотки ротора магнитными силовыми линиями.

Достичь частоты вращения поля в реальных условиях ротор не может, так как тогда стержни его обмотки оказались бы неподвижными относительно магнитных силовых линий и индуцированные токи в обмотке ротора исчезли бы. Поэтому ротор вращается с частотой, меньшей частоты вращения поля, т. е. *несинхронно* с полем, или *асинхронно*.

Если силы, тормозящие вращение ротора, невелики, то ротор достигает частоты, близкой к частоте вращения поля. При увеличении механической нагрузки на валу двигателя частота вращения ротора уменьшается, токи в обмотке ротора увеличиваются, что приводит к увеличению вращающего момента двигателя. При некоторой частоте вращения ротора устанавливается равновесие между тормозным и вращающим моментами.

Скольжение и частота вращения ротора

Обозначим через n_2 частоту вращения ротора асинхронного двигателя. Было установлено, что $n_2 < n_1$. Частоту вращения магнитного поля относительно ротора, т. е. разность $n_1 - n_2$, называют *скольжением*. Обычно скольжение выражают в долях частоты вращения поля и обозначают буквой S : $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$

скольжение зависит от нагрузки двигателя. При номинальной нагрузке его значение составляет около 0,05 у машин небольшой мощности и около 0,02 у мощных машин. Из последнего равенства находим, что $n_2 = (1 - S)n_1$.

После преобразования получаем выражение частоты вращения двигателя, удобное для дальнейших рассуждений: $n_2 = (1 - S) \frac{60f}{p}$. Поскольку при нормальном режиме работы двигателя скольжение невелико, частота вращения двигателя мало отличается от частоты вращения поля.

На практике скольжение часто выражают в процентах $b = \frac{n_1 - n_2}{n_1} * 100\%$.

У большинства асинхронных двигателей скольжение колеблется в пределах 2 – 5%. Скольжение является одной из важнейших характеристик

двигателя; через него выражаются ЭДС и ток ротора, вращающий момент, частота вращения ротора.

При неподвижном ($n_2 = 0$) роторе $S = 1$. Таким скольжением обладает двигатель в момент пуска.

Как отмечалось, скольжение зависит от момента нагрузки на валу двигателя; следовательно, и частота вращения ротора зависит от тормозного момента на валу. Номинальное значение частоты вращения ротора n_2 , соответствующее расчетным значениям нагрузки частоты и напряжения сети, указывается на заводском щитке асинхронного двигателя.

При $0 < S \leq 1$ машина работает в *режиме двигателя*, частота вращения ротора n_2 меньше или равна частоте вращения магнитного поля статора n_1 . Но если внешним двигателем раскрутить ротор до частоты вращения, большей синхронной частоты: $n_2 > n_1$, то машина перейдет в *режим работы генератора переменного тока*. При этом скольжение станет отрицательным, а механическая энергия приводного двигателя будет превращаться в электрическую энергию.

Асинхронные генераторы переменного тока практически не применяются.

Влияние скольжения на ЭДС в обмотке ротора

Условия индицирования ЭДС в обмотках трансформатора и асинхронной машины одинаковы. Действительно, в трансформаторе витки обмотки пересекаются переменным магнитным потоком, сохраняющим свое направление в пространстве. В асинхронной машине витки обмотки пересекаются постоянным, но вращающимся магнитным потоком. С точки зрения закона электромагнитной индукции следует отметить, что в обоих случаях магнитный поток, сцепленный с каждым витком обмотки, изменяется во времени по синусоидальному закону.

К асинхронным машинам полностью применима формула для трансформаторной ЭДС. Пока ротор асинхронного двигателя неподвижен, его обмотка пересекается вращающимся магнитным полем с частотой n_1 . Обозначим действующее значение ЭДС одной фазы неподвижного ротора E_{2H} . Тогда формула для трансформаторной ЭДС примет вид:

$$E_{2H} = 4,44 \omega_2 k_2 F_1 \Phi,$$

где ω – число витков одной фазы обмотки ротора;

k_2 – обмоточный коэффициент ротора; f_1 – частота тока питающей сети;

Φ – вращающийся магнитный поток.

Обмоточный коэффициент всегда меньше единицы и в современных асинхронных машинах составляет 0,85–0,95. Он обусловлен тем, что в машине переменного тока витки обмотки распределены по внутренней поверхности статора и неодновременно пересекаются магнитным потоком. Поэтому ЭДС отдельных витков сдвинуты по фазе относительно друг друга и складываются не арифметически, как в трансформаторе, а геометрически.

При неподвижном роторе частота индуцируемой в его обмотке ЭДС равна частоте сети f_1 . По мере раскручивания ротора скорость ($n_1 - n_2$)

пересечения витков обмотки вращающимся магнитным полем уменьшается, а следовательно, уменьшается частота ЭДС в обмотке ротора: $f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}$.

Чтобы ввести скольжение в выражение для f_2 , умножим числитель и знаменатель на n_1 $f_2 = \frac{p(n_1 - n_2) * n_1}{60 n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{pn}{60} = Sf_1$.

Таким образом, частота ЭДС в обмотке ротора прямо пропорциональна скольжению. Теперь можно записать выражение для ЭДС обмотки ротора в общем случае $E_2 = 4,44\omega_2 k_2 f_2 \Phi = 4,44\omega_2 k_2 S f_1 \Phi$.

Сравним выражения для E_{2H} и E_2 , найдем, что $E_2 = S E_{2H}$.

ЭДС E_2 , индуцируемая в обмотке ротора вращающимся магнитным полем, прямо пропорциональна скольжению двигателя.

Вращающий момент асинхронного двигателя

Вращающий момент любого электрического двигателя создается в результате взаимодействия магнитного поля и проводников с током. В двигателе постоянного тока вращающий момент выражается формулой $M = c_m I \Phi$. В асинхронном двигателе вращающий момент выражается аналогичной формулой. Нужно только установить, какое значение тока должно быть использовано. Полный ток I_2 в обмотке ротора состоит из активной $I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2$ и реактивной $I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2$ составляющих. Допустим, что активная составляющая тока ротора равна нулю. Тогда, несмотря на наличие ЭДС E_2 и тока I_2 в обмотке ротора, активная мощность этой обмотки была бы равна нулю. Но ротор, не потребляющий активной мощности, не может создавать вращающего момента, так как момент $M = P/\omega$ и равен нулю при $P = 0$. Следовательно, реактивная составляющая тока ротора не участвует в создании вращающего момента и можно написать $M = c \Phi I_2 \cos \varphi_2$, т. е. вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален результирующему магнитному потоку и активной составляющей тока в обмотке ротора. Коэффициент пропорциональности c зависит от конструктивных параметров двигателя.

Необходимо установить, как зависит вращающий момент от скольжения двигателя. Подставим в формулу для момента значения I_2 и $\cos \varphi_2$:

$$M = c \Phi \frac{s E_{2u}}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{2u})^2}} * \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{2u})^2}} = c \Phi \frac{E_{2u} R_2}{R_2^2 / s + s X_{2u}^2}$$

Как и следовало ожидать, при $S=0$ вращающий момент исчезает. При $S = \infty$ вращающий момент также обращается в нуль. Таким образом, с увеличением скольжения от нуля вращающий момент увеличивается, достигает максимума, а с дальнейшим возрастанием S до бесконечности снова стремится к нулю. Задаваясь различными значениями скольжения, можно построить график зависимости $M(s)$, который представлен на рис. 127. На графике выделены три момента: *номинальный вращающий момент M_n , максимальный момент M_{max} и пусковой момент M_n .*

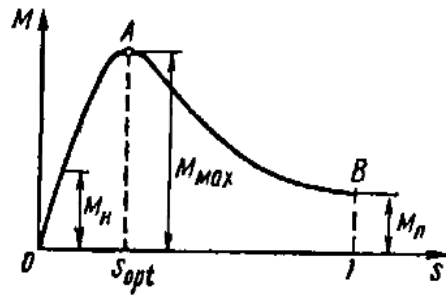


Рис. 127 Зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от скольжения

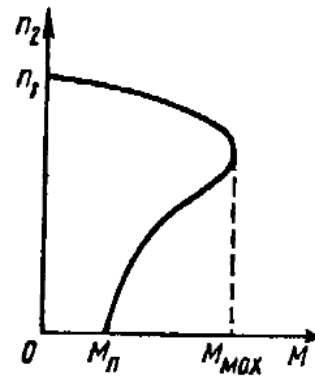


Рис. 128 Механическая характеристика асинхронного двигателя

Номинальный момент обычно соответствует скольжению $S=3\div 5\%$, максимальный момент – $S=10\div 14\%$ (это скольжение называют оптимальным – S_{opt}), пусковой момент – $S=100\%$. Обычно асинхронный двигатель рассчитывают так, чтобы максимальный момент в 2–3 раза превышал номинальный, а пусковой момент примерно был равен номинальному. Небольшое значение пускового момента – один из существенных недостатков асинхронного двигателя. Кривая $M(s)$ разделена на два участка: OA и AB . Участок от точки O до точки A соответствует устойчивым режимам работы асинхронного двигателя: с увеличением момента нагрузки частота вращения двигателя замедляется, скольжение увеличивается и, как видно из графика, возрастает вращающий момент. Новое положение равновесия достигается, когда вращающий момент становится равным тормозному. При этом двигатель устойчиво вращается с уменьшенной частотой.

Участок AB соответствует неустойчивым режимам работы двигателя: с увеличением момента нагрузки скольжение увеличивается, вращающий момент уменьшается, скольжение возрастает еще больше и т. д. Двигатель останавливается и начинает быстро нагреваться, так как при $S = 1$ его пусковой ток в 6–7 раз превышает номинальное значение. Зависимость частоты вращения двигателя n_2 от момента на валу M при постоянных напряжении питания и частоте сети называют *механической характеристикой* (рис. 128). Она может быть снята экспериментально и легко получена на основании графика $M(s)$. С увеличением момента нагрузки частота вращения двигателя уменьшается незначительно. Если момент нагрузки превысит максимальный, то частота вращения двигателя лавинообразно уменьшится до нуля.

Частота вращения асинхронного двигателя зависит от напряжения питания. Можно показать, что вращающий момент M пропорционален квадрату напряжения питания. Поэтому даже небольшие колебания напряжения питания приводят к заметному изменению вращающего момента и частоты вращения двигателя.

Пуск асинхронного двигателя

Прежде чем включить асинхронный двигатель в сеть, нужно определить схему соединения его обмоток, соответствующую номинальному режиму работы.

Предположим, что линейное напряжение сети 220 В, а в паспорте двигателя указано напряжение 220/380 В. При этих условиях обмотки нужно соединить *треугольником*, чтобы напряжение на них соответствовало расчетному.

На практике при пуске асинхронного двигателя для ограничения пусковых токов его обмотки кратковременно соединяют *звездой*. Переключение с треугольника на звезду и обратно осуществляют специальным переключателем. Такое переключение не производят, если рассматриваемый двигатель включают в сеть с линейным напряжением 380 В. В этом случае его обмотки и при пуске, и при номинальном режиме работы должны быть соединены *звездой*. Как было отмечено, пусковой момент асинхронного двигателя невелик, поэтому пуск обычно производят при отключенной нагрузке. Под действием пускового момента ротор начинает раскручиваться, скольжение уменьшается, вращающий момент возрастает (рис. 127), процесс, соответствующий неустойчивому режиму работы (участок *от 1 до S_{opt}*) быстро заканчивается и переходит на участок характеристики, соответствующий устойчивому режиму. Здесь увеличению частоты вращения ротора соответствует уменьшение вращающего момента, поэтому рост частоты быстро прекращается. Ротор устойчиво вращается с частотой, несколько меньшей частоты вращения поля. Теперь с помощью фрикционной муфты можно включить нагрузку. Момент нагрузки не должен превышать максимальный момент.

Если по условиям эксплуатации двигатель должен запускаться при включенной нагрузке, то его следует рассчитать так, чтобы пусковой момент превышал момент нагрузки при номинальном режиме.

В предыдущем параграфе было показано, что, изменяя активное сопротивление обмотки ротора, можно менять форму зависимости $M(s)$ и значение пускового момента. В частности, сопротивление R_2 можно подобрать таким, что максимум вращающего момента будет соответствовать $S=1$, т. е. пусковой момент будет равен максимальному моменту асинхронного двигателя.

У двигателей с фазным ротором пусковой момент увеличивают с помощью пускового реостата, включаемого в цепь обмотки ротора в период запуска (рис. 129), у двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора – за счет перераспределения плотности тока в стержнях обмотки при пусковом и номинальном режимах работы.

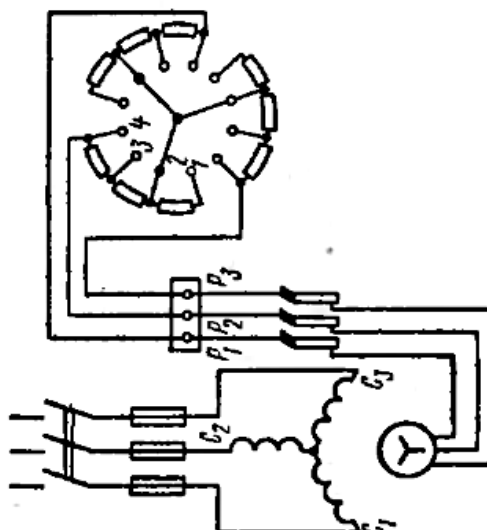


Рис. 129 Схема включения пускового реостата

На практике применяют два типа двигателей с искусственно увеличенным пусковым моментом. *Первый тип* – двигатели с двойной «беличьей клеткой» ротора – рассчитан на большие мощности. *Второй тип* – двигатели с глубоким пазом ротора – получили наибольшее распространение. Стержни короткозамкнутой обмотки таких двигателей имеют вид узких пластин, глубоко врезанных в ротор. Короткозамкнутые двигатели небольшой мощности с увеличенным пусковым моментом включают в сеть непосредственно (без пусковых реостатов и переключателей).

На рис. 130 показано расположение перемычек на соединительной колодке асинхронного двигателя.

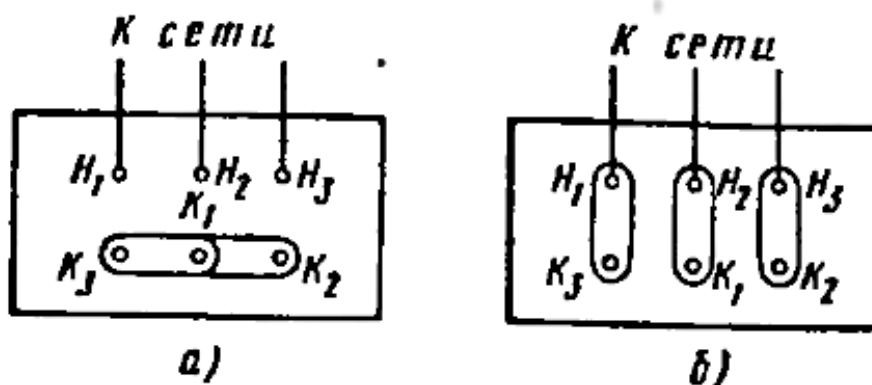


Рис. 130 Расположение перемычек на клеммной колодке асинхронного двигателя при соединении обмоток статора:
а) звездой; б) треугольником

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя

Современные асинхронные двигатели не имеют простых и экономичных устройств для плавного регулирования частоты вращения ротора. Этот существенный недостаток ограничивает область их применения и позволяет двигателям постоянного тока во многих случаях успешно конкурировать с асинхронными двигателями.

Из выведенной формулы частоты вращения асинхронного двигателя $n_2 = (1 - S) \frac{60f}{p}$ видно, что частоту n_2 можно регулировать изменяя скольжение S , число пар полюсов p или частоту питающего напряжения f .

Плавное регулирование частоты вращения двигателя за счет изменения скольжения возможно только в двигателях с фазным ротором. Скольжение при неизменном моменте нагрузки зависит от активного сопротивления обмотки ротора. Поэтому в цепь этой обмотки с помощью контактных колец и щеток включают регулировочный реостат, которым плавно изменяют сопротивление обмотки, скольжение и частоту вращения двигателя. Этот способ связан с большими тепловыми потерями. При $S = 0,5$ половина энергии, передаваемой в ротор вращающимся магнитным полем, расходуется на нагрев ротора и регулировочного реостата. Кроме того, наличие колец щеток усложняет эксплуатацию машины и резко снижает ее надежность.

Скольжение, а следовательно, и частоту вращения двигателя в небольших пределах можно регулировать изменением напряжения, подводимого к двигателю.

Ступенчатое регулирование частоты вращения можно осуществлять изменением числа пар полюсов статора двигателя за счет переключения секций его обмотки. Однако этот экономичный и сравнительно простой способ не позволяет регулировать частоту вращения двигателя плавно. Промышленность выпускает двигатели, частоту вращения которых можно регулировать степенями в 2, 3 и 4 раза.

Частоту вращения двигателя можно регулировать также изменением частоты питающего тока, но этот способ практически не применяют ввиду отсутствия простых и экономичных устройств для регулирования частоты тока в мощных электрических цепях. Частота тока определяется частотой вращения ротора генератора, которую при параллельной работе генераторов необходимо поддерживать строго постоянной. Таким образом, в данном случае необходим отдельный генератор для каждого двигателя, что нецелесообразно.

Разработка и промышленное освоение мощных управляемых полупроводниковых диодов позволяют создать статические устройства с выходным напряжением, частоту которого можно регулировать. Эти простые, экономичные и надежные преобразователи частоты для регулирования частоты вращения короткозамкнутых асинхронных двигателей значительно упрощают привод различных механизмов а также отпадает необходимость в редукторах, коробках скоростей, трансмиссиях.

В некоторых случаях возникает необходимость регулирования не только частоты, но и направления вращения двигателя. Изменение направления вращения ротора двигателя называют *реверсированием*.

Для *реверсирования двигателя необходимо изменить направление вращения магнитного поля статора*. При рассмотрении вращающегося магнитного поля было установлено, что направление его вращения определяется порядком чередования фаз. Поэтому для реверсирования двигателя достаточно поменять местами две любые фазы на клеммной колодке двигателя.

Если реверсирование приходится применять часто, то собирают схему со специальным переключателем (рис. 131).

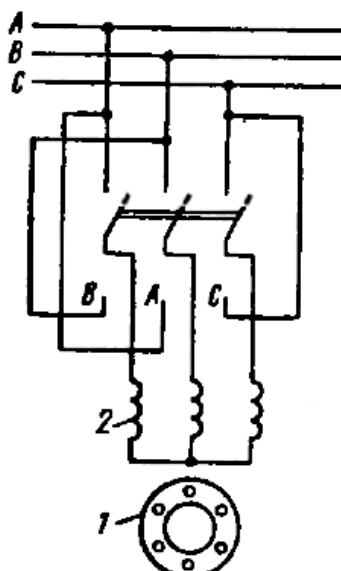


Рис. 131 Схема реверсирования асинхронного двигателя:
1 – ротор; 2 – обмотка статора

Однофазный асинхронный двигатель

На статоре однофазного двигателя размещается одна обмотка, синусоидальный ток в которой создает пульсирующий магнитный поток.

На рис. 132 показано, что пульсирующий магнитный поток может быть разложен на два вращающихся в противоположные стороны потока Φ_1 и Φ_2 . Частота вращения этих потоков равна угловой частоте тока, а амплитуда – половине амплитуды пульсирующего потока Φ .

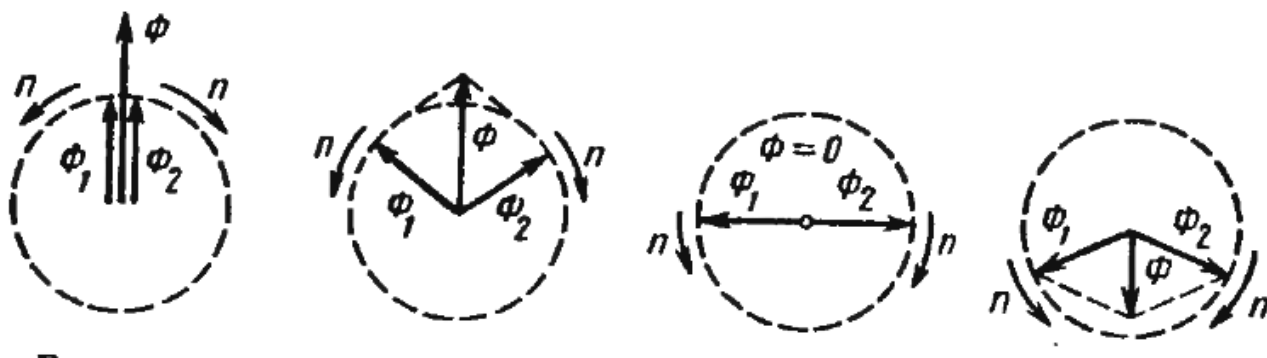


Рис. 132 Разложение пульсирующего магнитного потока на два

При неподвижном роторе возникают два равных по значению и противоположно направленных вращающихся момента M_{np} и $M_{обр}$, вследствие чего результирующий момент остается равным нулю.

Раскрутим принудительно ротор до частоты вращения – n_2 , тогда скольжение ротора относительно прямого поля: $S_{np} = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1}$, относительно

обратного поля: $S_{обр} = \frac{n_1 + n_2}{n_1} = \frac{n_1 + (1 - S_{np})n_1}{n_1} = 2 - S_{np}$.

Частота тока в роторе, создаваемого прямым полем, равна $S_{np}f$, а частота тока, создаваемого обратным полем, – $(2 - S_{np})f$. Так, если частота тока в сети

$f=50$ Гц, а скольжение $S_{np}=0,02$, то $f_{np} = S_{np}f = 50*0,02 = 1$ Гц; $f_{обр}=(2-S_{np})f=1,98*50 = 99$ Гц. Индуктивное сопротивление обмотки ротора пропорционально частоте тока и для прямого тока на два порядка меньше, чем для обратного тока. Вследствие этого прямой ток и прямой вращающий момент M_{np} существенно больше обратного тока и обратного вращающего момента. Следовательно, раскрутив двигатель в любую сторону, можно нагрузить его, и двигатель будет продолжать вращаться в ту же сторону. Вращающий момент раскрученного однофазного двигателя незначительно отличается от вращающего момента аналогичного трехфазного двигателя.

Для создания пускового момента на статоре однофазного двигателя размещают дополнительную пусковую обмотку, рассчитанную на кратковременную работу. Эту обмотку включают через конденсатор, вследствие чего ток в ней сдвинут по фазе относительно тока основной обмотки (рис. 133). Образующееся двухфазное вращающееся магнитное поле раскручивает ротор. По окончании пуска питание пусковой обмотки должно быть отключено.

Однофазные асинхронные двигатели получили наибольшее распространение в бытовых приборах. Их мощность обычно не превышает 500 Вт.

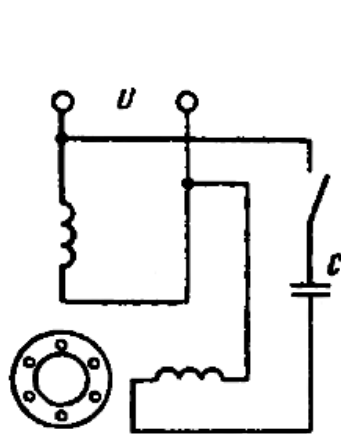


Рис. 133 Схема пуска однофазного асинхронного двигателя.

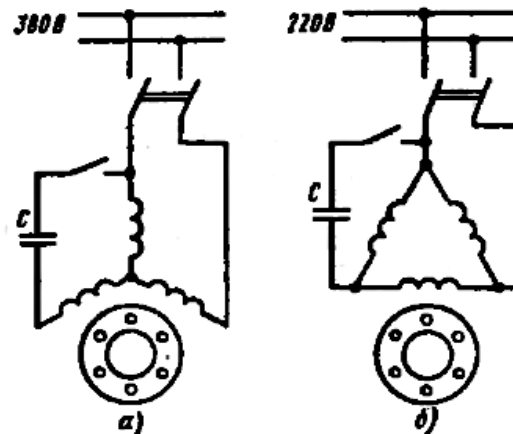


Рис. 134 Схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть при соединении обмоток:
а) звездой; б) треугольником

Иногда в качестве однофазного используют трехфазный асинхронный двигатель, у которого в цепь одной из обмоток статора включен конденсатор (рис. 134). При соединении обмоток звездой пусковую емкость подсчитывают по формуле $C = \frac{P * 10^9}{314U^2}$, где P – мощность двигателя (кВт), U – напряжение сети (В), C – емкость конденсатора (мкФ).

При соединении обмоток треугольником пусковая емкость в три раза больше, чем в предыдущем случае.

При работе в однофазном режиме трехфазный двигатель без перегрева развивает 60-70% номинальной мощности. Недостаток этих схем – необходимость в дорогостоящих конденсаторах большой емкости примерно:

10 мкФ на каждые 100 Вт мощности двигателя при соединении его обмоток треугольником.

1.10.2 Синхронные машины переменного тока, устройство и принцип действия

Синхронный генератор

Ротор синхронных машин вращается синхронно с вращающимся магнитным полем (*отсюда их название*). Поскольку частота вращения ротора и магнитного поля одинакова, в обмотке ротора не индуцируется ток. Поэтому обмотка ротора получает питание от источника постоянного тока.

Устройство статора синхронной машины (рис. 135) практически не отличается от устройства статора асинхронной машины. В пазы статора укладывают трехфазную обмотку, концы которой выводят на клеммную панель. Ротор в некоторых случаях изготавливают в виде постоянного магнита.

Ротор синхронного генератора может быть *явнополюсным* (рис. 136) и *неявнополюсным* (рис. 137).

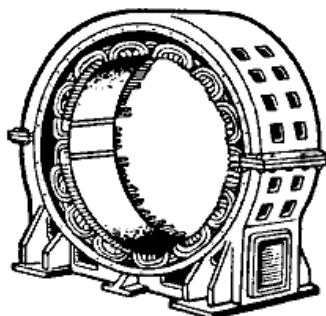


Рис. 135 Общий вид статора синхронного генератора

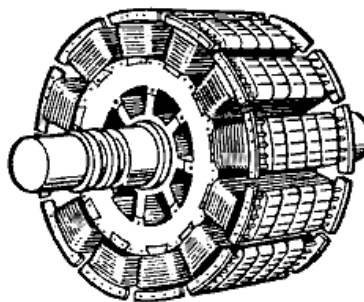


Рис. 136 Общий вид явнополюсного ротора синхронного генератора

В первом случае синхронный генератор приводится в действие тихоходными турбинами гидроэлектростанции, *во втором* – паровыми или газовыми турбинами теплоэлектростанций.

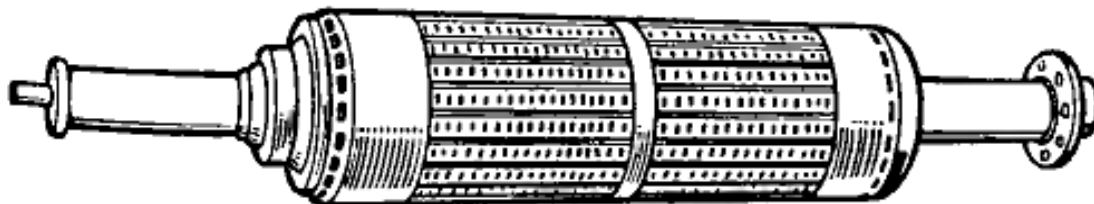


Рис. 137 Общий вид неявнополюсного ротора синхронного генератора

Питание к обмотке ротора подводится через скользящие контакты, состоящие из медных колец и графитовых щеток. При вращении ротора его магнитное поле пересекает витки обмотки статора, индуцируя в них ЭДС. Чтобы получить синусоидальную форму ЭДС, зазор между поверхностью ротора и статором увеличивают от середины полюсного наконечника к его краям.

Частота индуцированной ЭДС (напряжения, тока) синхронного генератора $f = \frac{pn}{60}$, где p – частота вращения ротора генератора. Отношение $\frac{n}{60}$ выражает число оборотов ротора в секунду; при $p=1$ каждый оборот ротора

соответствует полному циклу изменений индуцированного переменного тока (одному периоду); при увеличении p соответственно увеличивается и число периодов тока, индуцируемого за один оборот ротора.

Как и у любого генератора, работающего по закону электромагнитной индукции, индуцированная ЭДС пропорциональна магнитному потоку машины и частоте вращения ротора.

Используют различные способы возбуждения синхронных генераторов. Широкое распространение получил синхронный генератор с машинным возбудителем, представляющим собой генератор постоянного тока, расположенный на одном валу с синхронным генератором. Машинный возбудитель приводится в действие от того же первичного двигателя, что и синхронный генератор. Выходные зажимы возбудителя через щетки и кольца подсоединены к обмотке ротора синхронного генератора. Напряжение синхронного генератора можно регулировать реостатом в цепи обмотки возбуждения возбудителя, что удобно и энергетически выгодно, так как в этой обмотке протекает сравнительно небольшой ток.

Генераторы такого типа применяются в охране границы для обеспечения автономности пограничных нарядов и подразделений.

В полевых условиях для потребителей небольшой мощности (прожектор, радиолокационная станция, ретранслятор системы связи, электроинструмент потребляемой мощностью до 2 кВт) применяются малогабаритные бензиновые агрегаты, например «Ranger-2000» (рис. 138), а для электроснабжения подразделений границы или узлов связи – трехфазные дизельные электростанции стационарного или передвижного исполнения (рис. 139).



Рис. 138 Бензиновая электростанция SDMO RANGER 2000



Рис. 139 Силовая электростанция ЭСД-30-Т/400-А1РП

Синхронный двигатель

Устройство *статора* синхронного двигателя аналогично устройству статора асинхронного двигателя. *Ротор* синхронного двигателя представляет собой электромагнит или постоянный магнит (рис. 140).

Принцип работы синхронного двигателя показан на рис. 141. Внутри магнита N_1S_1 помещен магнит NS . Если магнит N_1S_1 вращать, то он потянет за собой магнит NS . В стационарном режиме частоты вращения обоих магнитов одинаковы. К валу магнита NS можно приложить механическую нагрузку. Чем больше эта нагрузка, тем больше угол отставания оси магнита NS от оси магнита N_1S_1 . При некоторой нагрузке силы притяжения между магнитами будут преодолены и ротор остановится.

В реальном двигателе поле магнита N_1S_1 заменено вращающимся магнитным полем статора; при этом ротор либо вращается синхронно с магнитным полем статора, отставая на угол α , либо останавливается (выпадает из синхронизма) при перегрузке. Таким образом, независимо от нагрузки ротор всегда вращается с постоянной частотой, равной частоте вращения магнитного поля статора: $n_2 = n_1 = \frac{60f}{p}$.

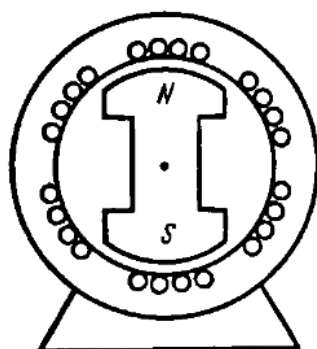


Рис. 140 Схематическое изображение синхронного двигателя

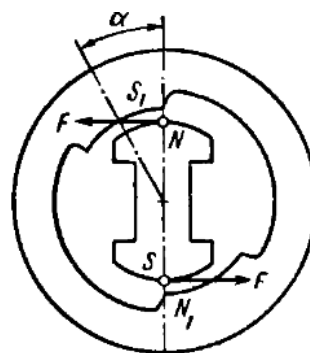


Рис. 141 К пояснению принципа работы синхронного двигателя

Постоянство частоты вращения – важное *достоинство* синхронного двигателя. Строгое постоянство частоты вращения требуется во многих областях техники, например при записи и воспроизведении звука. *Недостаток* синхронного двигателя – трудность пуска, для пуска нужно раскрутить ротор в сторону вращения поля статора. Для этого чаще всего применяют специальную короткозамкнутую обмотку, вделанную в ротор. В момент пуска двигатель работает как асинхронный. Когда частота вращения ротора приблизится к частоте вращения поля статора, ротор входит в синхронизм и двигатель работает как синхронный. Короткозамкнутая обмотка при этом оказывается обесточенной, так как частота вращения ротора равна частоте вращения поля статора и стержни обмотки ротора не пересекаются магнитными силовыми линиями.

На крупных подвижных объектах (корабли, самолеты, вертолеты) практикуется замена электрических цепей постоянного тока цепями переменного тока повышенной частоты (400 Гц) и повышенного напряжения (115 или 220 В). Такой подход позволяет уменьшить сечение проводников бортовой электросети за счет снижения токовой нагрузки при сохранении мощности при повышенном напряжении, дает возможность использования бесколлекторных электродвигателей переменного тока, а также снижения массы и габаритов трансформаторов за счет работы на повышенной частоте. В целом это позволяет повысить надежность работы цепей, а также уменьшить габариты и массу бортовых машин и аппаратов и собственно бортовой электропроводки.

Преимущество асинхронных двигателей переменного тока особенно заметно тогда, когда по условиям работы привода нет необходимости в плавном регулировании частоты вращения в широких пределах и больших пусковых моментах (приводы насосов, вентиляторов, шлагбаумов, ворот и т.д.).

Синхронные двигатели особенно удобны для привода роторов гироскопов, которые являются датчиками сигнала ускорения в инерциальных системах управления. В тех случаях, когда гироскоп используют для особо точных измерений (например в гиростабилизированных платформах наблюдательных приборов или прицельных приспособлений бортового оружия бронеобъектов или летательных аппаратов), приводом ротора гироскопа служит синхронный двигатель. При этом частота вращения ротора зависит только от конструкции двигателя и частоты питающего тока, которую можно стабилизировать с очень высокой степенью точности.

2. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

2.1 Полупроводниковые приборы

2.1.1 Физические свойства полупроводников

Атомы

Химические элементы, из которых состоят простые и сложные вещества, отличаются друг от друга строением атомов – наименьших частиц вещества, которым присущи его физические и химические свойства.

Основы современных представлений об атомах и их внутреннем устройстве были заложены в начале XX в. Выдающуюся роль в изучении структуры и свойств этих «кирпичиков» вещества сыграли Резерфорд, Бор, Шредингер.

Одни из свойств атомов рассматриваются как данные эксперимента, другие могут быть объяснены и теоретически выведены как следствия более фундаментальных свойств материи.

Не останавливаясь на выводах и доказательствах, перечислим известные из курса физики свойства атомов. Вспомнить эти свойства необходимо для понимания сущности физических процессов, происходящих в проводниках, диэлектриках и полупроводниках.

Микромир отличается от макромира не только количественно, но и качественно. Как правило, объектам и процессам микромира не удается придать адекватные образы окружающего нас макромира. Но наглядная интерпретация теоретических и экспериментальных результатов столь существенно помогает их осмысливанию, что ученые всегда стремятся создать из привычных человеку элементов макромира некоторые модели, хотя бы приближенно соответствующие объектам микромира. С развитием науки научные модели не отбрасываются, они уточняются, совершенствуются и, к сожалению, обычно усложняются. Поэтому при изучении тех или иных разделов электротехники и электроники важно выбрать такие модели молекул, атомов и элементарных частиц, которые сохраняя возможную простоту и наглядность, отражали бы все существенные для изучаемой области науки отношения между элементарными частицами.

Говоря о частицах или волновых процессах микромира, следует понимать, что речь идет не об элементарных шариках или кусочках вещества, не об электромагнитных колебаниях, с помощью которых осуществляется, например, радиосвязь, а о некоторых свойствах микромира, которые можно описать поведением корпускул или волновой функцией.

Как волны на поверхности пруда, разбегающиеся от брошенного камня, не обладают всеми свойствами звуковых или сейсмических волн, а звуковые волны - свойствами электромагнитных волн, точно так же и электромагнитные волны не отражают всех свойств волновых процессов, связанных с элементарными частицами.

Согласно планетарной модели, атом состоит из ядра и электронов, движущихся вокруг ядра по круговым или эллиптическим орбитам.

За атомную единицу массы, примерно равную массе атома водорода, принято значение, близкое к $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг.

Массы других атомов выражают через атомную единицу массы. Округленное до целого значения число, показывающее, сколько атомных единиц массы содержится в массе атома, называется атомным числом этого атома и обозначается буквой A . Атомное число водорода равно 1. Атомные числа других элементов больше единицы, например для одного из двух изотопов урана $A=238$, а для курчатовия $A=260$.

Суммарная масса электронов, движущихся вокруг ядра, составляет несколько десятитысячных долей массы атома. Поэтому практически масса атома равна массе его ядра.

Радиус R_j ядра атома может быть приближенно определен по эмпирической формуле $R_j \approx 1,5\sqrt[3]{A \times 10^{-15}} \text{ м}$. Следовательно, радиус ядра атома водорода (радиус протона) равен $1,5 \cdot 10^{-15} \text{ м}$, а радиус ядра атома алюминия ($A=27$) - в три раза больше. Если представить электрон в виде шарика, то можно показать, что его радиус примерно в два раза больше радиуса протона.

Размеры атома можно определить как геометрическое место наиболее удаленных от ядра точек, в которых обнаруживаются электроны, принадлежащие атому. Размеры атома зависят не только от его принадлежности к тому или иному элементу, но и от состояния (возбужден, ионизован, изолирован или входит в состав молекулы и т. д.). Радиус атома водорода имеет порядок 10^{-10} м . Таким образом, размеры атома примерно в 10^5 , а его объем в 10^{15} раз превышают размеры и объем составляющих атом частиц.

Природа двух форм существования материи: электромагнитного поля и вещества - двойственна, противоречива. В ней диалектически соединены противоположные свойства: волновые и корпускулярные. Волновые свойства электромагнитного поля отчетливее проявляются с уменьшением частоты колебаний, корпускулярные - с увеличением частоты.

В 1924 г. французский физик Луи де Бройль постулировал положение (в дальнейшем подтвержденное всем опытом физики) о том, что с каждой движущейся массой вещества связан особый волновой процесс, а длина волны λ определяется соотношением $\lambda = h/(mv)$, где h - постоянная Планка; m - масса; v - скорость движения.

Постоянная Планка, через которую определяется квант энергии, $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$.

Волновой процесс, связанный с макроскопическим телом, обнаружить нельзя, потому что, например, длина волны де Бройля для пули массой 10 г, летящей со скоростью 1000 м/с,

$$\lambda = \frac{6,62 \times 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}}{10 \times 10^{-3} \text{ кг} \times 10^3 \text{ м} / \text{с}}$$

Такая длина волны лежит далеко за пределами возможностей методов измерений или наблюдений.

Однако с уменьшением массы длина волны возрастает и массам элементарных частиц соответствуют волны де Бройля, длина которых соизмерима с размерами атомов. Так, длина волны электрона составляет несколько ангстрем.

Волны де Бройля существенно ограничивают подвижность электронов в атомах. Установлено, что электрон может двигаться только по такой орбите, вдоль которой укладывается целое число его волн. Остальные орбиты для электрона запрещены.

В изолированном атоме с одним электроном скорость движения электрона по разрешенной орбите устанавливается такой, при которой центробежная сила уравнивает силу притяжения отрицательно заряженного электрона к положительно заряженному ядру. Каждой

разрешенной орбите соответствует своя скорость и, следовательно, своя кинетическая энергия электрона.

Установлено, что, двигаясь по разрешенной орбите, электрон не расходует (не излучает) энергии. В противном случае, излучая энергию, электрон по спирали упал бы на ядро. Отсутствие излучения на разрешенных орбитах - особенность микромира, не имеющая аналогов и необъяснимая на основании известных законов макромира.

Под действием внешних факторов или спонтанно (самопроизвольно) электрон может переходить с одной разрешенной орбиты на другую. Чтобы перейти с низкой орбиты на более высокую, электрон должен получить порцию (квант) энергии, строго равную разности его энергий для двух разрешенных орбит. Такая энергия доставляется атомам главным образом световыми, ультрафиолетовыми или рентгеновскими лучами, а также при тепловых столкновениях атомов.

Атом, поглотивший один или несколько квантов лучистой энергии, называется *возбужденным*. Иногда поглощенная энергия столь велика, что электрон переходит на очень удаленную орбиту и практически отрывается от атома. Такой атом называется *ионизированным*.

Через некоторое время ионизированный атом захватывает встретившийся ему свободный электрон и становится нейтральным. Возбужденный атом самопроизвольно переходит в нормальное состояние, т. е. электрон, находившийся в состоянии с более высокой энергией, переходит в основное или какое-либо другое разрешенное состояние, имеющее меньшую потенциальную энергию. При этом атом излучает квант энергии, равный разности энергий электрона на этих двух орбитах. Энергия электрона, не связанного в атоме (свободного), считается равной нулю.

Так как при возвращении электрона на одну из разрешенных орбит атом излучает квант энергии, то энергия связи электрона в атоме становится отрицательной. Атом, находящийся в нормальном (не возбужденном) состоянии, излучать энергию не способен, он может только ее поглощать.

Энергетические уровни и зоны

Полная энергия электронов, равная сумме его кинетической (движения по орбите) и потенциальной (притяжения к ядру) энергий, называется *энергетическим состоянием атома*. Каждой разрешенной орбите соответствует свое энергетическое состояние, которое на диаграмме представляют в виде энергетического уровня. Так как орбиты и их энергии делятся на разрешенные и запрещенные, то и энергетические уровни могут быть также разрешенными и запрещенными. Разрешенные уровни изолированного атома водорода имеют следующие значения энергий: при $n=1$ $E_1=-13,53$ эВ; при $n=2$ $E_2=-3,38$ эВ; при $n=3$ $E_3=-1,5$ эВ и т. д. Здесь n - порядковый номер разрешенной орбиты, начиная от ближайшей к ядру. Энергия электрона E выражена в электрон-вольтах. Электрон-вольт - это энергия, которую приобретает электрон, разгоняясь в электрическом поле с разностью потенциалов в 1 В.

Видно, что с увеличением номера орбиты абсолютное значение энергии уменьшается, т. е. энергетический уровень атома возрастает (так как энергия связи электрона в атоме отрицательна).

Радиус ближайшей к ядру (первой) орбиты электрона в атоме водорода $r_1 = 0,529 \cdot 10^{-10}$ м. Радиусы других разрешенных орбит связаны с r_1 простым соотношением $r_n = n^2 r_1$

Энергия электрона на первой орбите связана с энергией электрона на других орбитах формулой $E_n = E_1/n^2$.

Величина n принимает только положительные целые значения: $n=1,2,3$. Ей придавали смысл номера разрешенной орбиты (рис. 142), номера энергетического уровня (рис. 143), но следует иметь в виду, что в общем случае n характеризует некоторое свойство дискретности (квантованности) процессов и характеристик атома, не имеющее точных аналогов в макромире. Величину n называют *главным квантовым числом* и используют для описания дискретных свойств микромира.

Картина существенно усложняется, если обратиться к атомам, содержащим несколько электронов. В этом случае при подсчете энергии электрона надо учитывать не только его взаимодействие с ядром, но и взаимодействие с другими электронами. Разрешенный энергетический уровень, характеризуемый главным квантовым числом n , расщепляется на ряд близко расположенных подуровней.

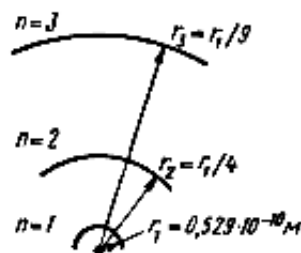


Рис. 142 Разрешенные орбиты электрона в атоме водорода

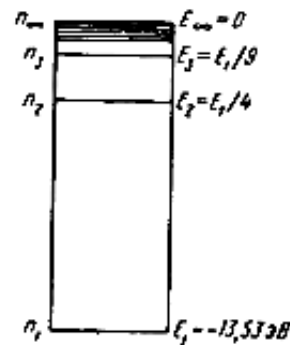


Рис. 143 Энергетические уровни атома водорода

Еще сложнее энергетическая картина многоэлектронного атома, входящего в состав молекулы или расположенного в узле кристаллической решетки. Взаимодействие атомов в решетке приводит к тому, что их энергетические уровни расщепляются на большое количество почти сливающихся подуровней, образующих *энергетические зоны*. Энергетическая зона, заполненная подуровнями, тем шире, чем ближе расположены атомы и чем выше энергетический уровень. Сохраняя единство терминологии, будем говорить о *разрешенных и запрещенных энергетических зонах*. Всегда существует некоторая, не равная нулю, вероятность того, что энергия электрона совпадает с подуровнем одной из разрешенных энергетических зон.

Вероятность «пробывания» электрона в запрещенной зоне равна нулю.

Проводники, изоляторы и полупроводники

Разрешенные энергетические зоны кристаллов состоят из большого количества близких друг к другу подуровней. Количество таких подуровней в

несколько раз превышает количество атомов в кристалле, число которых достигает 10^{23} в одном кубическом сантиметре. Если ширину разрешенной зоны разделить на количество подуровней, то окажется, что разница в энергии подуровней имеет порядок 10^{-23} эВ.

Если к кристаллу приложена разность потенциалов, электроны под действием внешнего напряжения разгоняются в направлении к положительного полюса источника электропитания, приобретают дополнительную энергию и переходят на более высокие энергетические уровни. Направленное движение электронов – это электрический ток. Поэтому, казалось бы, все твердые тела должны быть проводниками электричества. В действительности же это не так. В микромире существует ряд запретов, механизм которых не ясен, но само их существование подтверждено опытом. Один из таких запретов, названный по имени его открывателя *принципом Паули*, устанавливает, что на любом энергетическом уровне может находиться не более двух электронов, отличающихся моментами импульса или *спинами*. В силу принципа минимизации энергии системы электроны стремятся занять низшие энергетические уровни, излучив кванты избыточной энергии. В результате электроны не скапливаются на отдельных энергетических уровнях, а равномерно заполняют разрешенные энергетические зоны, начиная с нижних.

Верхнюю из заполненных энергетических зон принято называть *валентной*, так как ее электроны способны взаимодействовать с соседними атомами обеспечивая молекулярные связи вещества. Разрешенные энергетические зоны, располагающиеся ниже валентной, заполнены электронами полностью. Валентная зона может быть заполнена полностью или частично. Например, в кристалле натрия валентная зона заполнена наполовину.

Вернемся к процессу возникновения электрического тока. Под действием напряжения в электрических схемах электроны, разгоняясь на расстоянии, равном длине свободного пробега, способны приобрести дополнительную энергию порядка 10^{-6} эВ. Такой энергии с избытком достаточно для перехода электрона с одного подуровня энергетической зоны на другой, и если валентная энергетическая зона имеет свободные (незаполненные) энергетические подуровни, то электроны действительно переходят на них; образуя электрический ток.

Эти рассуждения подтверждаются тем фактом, что все кристаллы, у которых не полностью занята валентная зона, являются проводниками электрического тока.

Кристаллы, у которых валентная зона заполнена электронами полностью, а в следующей по порядку более высокой разрешенной энергетической зоне электронов нет, не проводят электрический ток, и представляют собой идеальные изоляторы. Действительно, упорядоченное движение электронов к плюсу источника привело бы к увеличению их энергии и к переходу на более высокие подуровни. Но в силу *принципа Паули* это невозможно, так как все подуровни валентной зоны заняты, на каждом из них уже разместились два электрона.

Разрешенная энергетическая зона, расположенная непосредственно над валентной зоной, называется зоной проводимости. Она совершенно лишена

электронов только при температуре $T=0$ К (абсолютный ноль). С повышением температуры тепловая энергия атомов кристаллов возрастает, что приводит к их возбуждению. При этом часть электронов валентной зоны перебрасывается в зону проводимости. Кристалл приобретает свойства проводника, так как, во-первых, освобождается часть разрешенных энергетических подуровней в валентной зоне и, во-вторых, электроны, попавшие в зону проводимости, получают возможность перемещаться с одного подуровня на другой.

Легко понять, что проводящие свойства кристалла зависят от ширины запрещенной зоны, разделяющей валентную зону и зону проводимости. Чем шире запрещенная зона, тем меньше (при заданной температуре) количество электронов, которые проникнут в зону проводимости, тем меньше проводимость кристалла.

Кристаллы могут быть хорошими проводниками даже в том случае, когда валентная зона заполнена целиком, если она непосредственно примыкает к зоне проводимости или пересекается с ней (в результате размытия зон при образовании решетки). С увеличением ширины запрещенной зоны кристаллы приобретают свойства изоляторов. Средним значениям ширины запрещенной зоны соответствуют полупроводниковые кристаллы (рис. 144).

Так как валентная зона и зона проводимости у кристаллических проводников не разделены, электроны свободно переходят с одного разрешенного подуровня на другой, приобретая упорядоченную скорость под действием приложенного напряжения (рис. 144 а). При этом с увеличением температуры сопротивление проводника увеличивается вследствие уменьшения длины свободного пробега электронов в кристалле.

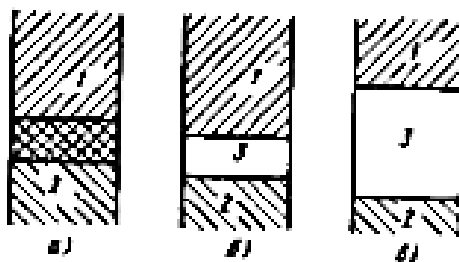


Рис. 144 Зонные энергетические диаграммы различных кристаллов:
а) проводник; б) полупроводник; в) изолятор

У полупроводниковых кристаллов проводимость определяется прежде всего количеством электронов, преодолевших запрещенную зону и проникших в зону проводимости. Поэтому сопротивление полупроводниковых материалов уменьшается с увеличением температуры. Кристаллы с удельным сопротивлением 10^{-6} - 10^{-8} Ом·м относятся к проводникам, а с сопротивлением 10^8 - 10^{13} Ом·м к изоляторам (диэлектрикам). Удельное сопротивление полупроводников находится в пределах от 10^{-5} до 10^7 Ом·м.

Электропроводность полупроводников

Вследствие малой ширины (1 эВ) запрещенной зоны полупроводника тепловые колебания атомов способны сообщить валентным электронам энергию, достаточную для перехода из заполненной валентной зоны в свободную зону проводимости. Каждый такой переход приводит к

возникновению пары носителей заряда: *свободного электрона* в зоне проводимости и *свободного энергетического состояния - дырки* в валентной зоне. Под действием приложенного к кристаллу напряжения электрон проводимости движется «навстречу» электрическому полю, а электрон в валентной зоне занимает свободный уровень, освобождая свой уровень для другого электрона. Это можно рассматривать как движение положительного заряда (*дырки*) в направлении электрического поля.

Генерация пар свободных, т. е. способных перемещаться под действием приложенного напряжения, зарядов делает кристалл способным проводить электрический ток, а электропроводность такого кристалла называется *собственной*.

Одновременно с образованием пар носителей часть электронов из зоны проводимости спонтанно переходит обратно в валентную зону, излучая кванты энергии. Этот процесс называется *рекомбинацией пар*. При постоянной температуре устанавливается динамическое равновесие, определяющее концентрацию свободных электронов и дырок (при данной температуре).

Чем выше температура, тем выше концентрация свободных носителей заряда, тем больше собственная электропроводность кристалла.

При температуре 0 К пары носителей не образуются и кристалл полностью теряет собственную электропроводность. При этом электроны внутри кристалла хаотически движутся с большими скоростями (порядка 10^6 м/с), но на приложенное внешнее напряжение не реагируют.

До сих пор мы рассматривали кристаллы, имеющие идеальную структуру, которая в природных кристаллах практически не встречается.

Реальные кристаллы содержат многочисленные дефекты кристаллической решетки: *точечные, линейные, объемные и поверхностные*. В местах нарушения периодической структуры кристалла (внедрения атомов в междоузлия) энергия связи электронов с ядрами изменяется, в результате чего возникают новые энергетические уровни, которые могут выходить за пределы валентной зоны и размещаться в запрещенной зоне вблизи зоны проводимости. Это облегчает переход электронов в зону проводимости.

Дефекты кристаллической решетки вызываются также примесями, когда в структуру кристалла внедряются атомы другого вещества. Электроны примесных атомов образуют свои энергетические уровни, которые также располагаются в запрещенной энергетической зоне. Взаимодействие примесных атомов с основными приводит к расщеплению энергетических уровней в примесные энергетические зоны.

Переход носителей заряда в свободное состояние при наличии примесных уровней существенно облегчается, так как сокращается участок запрещенной зоны, который электронам надо преодолеть. Проводимость кристалла возрастает.

Электропроводность, возникающую за счет примесных атомов, называют примесной. Характером носителей зарядов и значением примесной электропроводности можно управлять, подбирая состав и концентрацию примесей.

В современной технике для изготовления полупроводниковых кристаллов используют элементы четвертой группы периодической системы Д.И. Менделеева германий и кремний, атомы которых имеют по четыре электрона на внешних валентных оболочках. Кристаллические решетки этих элементов строятся таким образом, что каждый атом связан с соседними двумя ковалентными связями, что можно представить как движение двух электронов по одной орбите, охватывающей ядра двух соседних атомов (рис. 145).

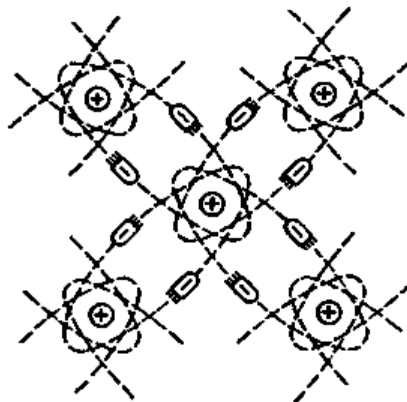


Рис. 145 Плоская планетарная модель кристаллов германия и кремния

В качестве регулирующих примесей, придающих кристаллам германия и кремния требуемые свойства, применяют либо пентавалентные элементы (сурьма, мышьяк, фосфор), либо тривалентные (бор, индий, галлий, алюминий).

Количество атомов примеси обычно на несколько порядков меньше количества атомов основного элемента, так что на многие десятки тысяч атомов германия или кремния приходится только один атом примеси.

На рис. 146 изображена кристаллическая решетка германия, в которую «внедрился» атом примеси - пентавалентный атом мышьяка.

Четыре электрона валентной оболочки атома мышьяка образуют прочные ковалентные связи с четырьмя соседними атомами германия, а пятый, валентный, электрон мышьяка оказывается «лишним». Размер орбиты, по которой он вращается вокруг ядра атома мышьяка, увеличивается в десятки раз, а связь его с ядром резко уменьшается. Расчеты показывают, что в рассматриваемом случае энергия, необходимая для отрыва «лишнего» электрона от атома мышьяка (энергия перехода в зону проводимости), составляет примерно 0,05 эВ. Учитывая, что ширина запрещенной зоны германия несколько превышает 1 эВ, нетрудно понять, что энергетический уровень электрона мышьяка расположен рядом с зоной проводимости кристалла. При относительно большой концентрации примесных атомов мышьяка образуется примесная зона, которая может даже перекрыться с энергетической зоной проводимости германия.

Энергетическая диаграмма кристаллического германия с достаточно высокой концентрацией примеси мышьяка изображена на рис. 147.

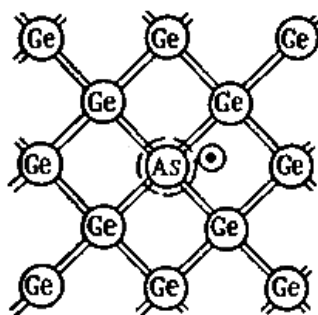


Рис. 146 Замещение в узле кристаллической решетки атома германия атомом мышьяка

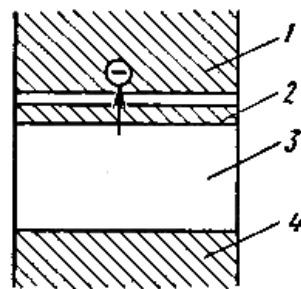


Рис. 147 Энергетическая диаграмма полупроводникового кристалла с электронной электропроводностью: 1 - зона проводимости; 2-примесная зона; 3 - запрещенная зона; 4 - валентная зона

Так как примесная зона и зона проводимости размещаются рядом, а иногда и перекрываются, уже при небольших температурах значительная часть электронов примесной зоны переходит в зону проводимости. При каждом таком переходе образуется пара носителей зарядов: электрон в зоне проводимости и дырка в примесной зоне. Предположим, что к кристаллу приложено внешнее напряжение, обычно составляющее несколько десятков вольт. Под действием этого напряжения положительно заряженные дырки, переходя с одного энергетического подуровня примесной зоны на близко расположенный другой подуровень, практически мгновенно «прижмутся» к дну примесной зоны. Дальнейшее движение дырок, связанное с увеличенным значением их энергии, будет невозможным, так как они не смогут преодолеть широкую запрещенную зону. Что касается электронов, то они беспрепятственно движутся навстречу приложенному напряжению, переходя в зоне проводимости с одного энергетического подуровня на другой.

Таким образом, в рассмотренном случае прохождение тока через кристалл обеспечивается электронами. Электропроводность кристалла называется *электронной*, а примесь, поставляющая электроны в зону проводимости, - *донорной*. Пятивалентная донорная примесь в четырехвалентном кристалле создает *электронную электропроводность*.

Рассмотрим процессы, возникающие при легировании четырехвалентного кристалла трехвалентной примесью.

На рис. 148 изображена кристаллическая решетка германия, в которую «внедрился» атом примеси - трехвалентный атом индия.

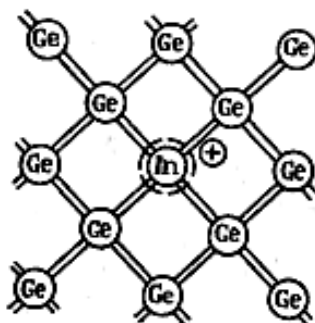


Рис. 148 Замещение атома германия атомом индия в узле кристаллической решетки

Три электрона внешней оболочки атома индия вступают в ковалентную связь с тремя соседними атомами кремния. При этом каждый электрон движется вместе с электроном соседнего атома по орбите, охватывающей два соседних ядра. На четвертой орбите движется только один электрон (хотя в соответствии с *принципом Паули* их может быть два). Отсутствие другого электрона равноценно присутствию положительного заряда - дырки.

Под действием теплового (или иного) возбуждения электроны соседних орбит легко переходят на незаполненную орбиту, что приводит к хаотическому (или упорядоченному) движению дырок. В рассматриваемом случае для перехода валентного электрона на незаполненную соседнюю орбиту требуется примерно 0,01 эВ. Поэтому энергетический уровень дырки размещается в непосредственной близости от валентной зоны кристалла. Взаимодействие атомов примеси приводит к тому, что энергетический уровень размывается в примесную зону (рис. 149).

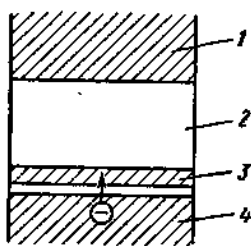


Рис. 149 Энергетическая диаграмма полупроводникового кристалла с дырочной электропроводностью:

1 - зона проводимости; 2 - запрещенная зона; 3 - примесная зона; 4 - валентная зона

Так как примесная и валентная зоны размещаются рядом, а иногда и перекрываются, уже при небольших температурах значительная часть электронов валентной зоны переходит в примесную зону. При каждом таком переходе образуется пара носителей зарядов: *электрон* в примесной и *дырка* в валентной зонах. Предположим, что к кристаллу приложено внешнее напряжение в несколько десятков вольт. Под действием этого напряжения электроны практически мгновенно «прижмутся» к потолку примесной зоны и потеряют способность проводить ток, соответствующий приложенному напряжению.

Что касается дырок, то они упорядоченно движутся по направлению приложенного напряжения, приобретая добавочную энергию, соответствующую этому напряжению, и беспрепятственно переходя с одного на другой энергетический подуровень широкой валентной зоны.

Таким образом, в рассмотренном случае прохождение тока через кристалл обеспечивается дырками. Электропроводность такого кристалла называется *дырочной*, а примесь, отбирающая электроны из валентной зоны - *акцепторной*. Трехвалентная акцепторная примесь в четырехвалентном кристалле создает дырочную электропроводность.

Кристаллы с электронной электропроводностью, в которых электрический ток создается упорядоченным движением отрицательных зарядов, называются *кристаллами типа n* (от *negative* - отрицательный).

Кристаллы с дырочной электропроводностью, в которых электрический ток создается упорядоченным движением положительных зарядов, называются *кристаллами типа p* (от *positive* - положительный).

Тепловое возбуждение электронов приводит к тому, что уже при нормальных температурах некоторая часть электронов, находящихся у «потолка» валентной зоны, преодолевает запрещенную зону.

Итак, наряду с основными носителями зарядов некоторую роль в создании электропроводности играют неосновные носители, количество которых существенно возрастает при загрязнении кристалла посторонними примесями. В кристаллах *n*- типа основными носителями являются *электроны* неосновными - *дырки*. В кристаллах *p*-типа основные - *дырки*, неосновные - *электроны*.

2.1.2 Электронно-дырочный переход и его свойства

Изолированный кристалл *n*-типа электрически нейтрален, сумма положительных и отрицательных зарядов в нем равна нулю. Количество атомов, лишившихся одного электрона и превратившихся в положительные ионы, строго равно количеству оторвавшихся от атомов электронов. Чем выше температура, тем больше образуется свободных электронов. В частности, при комнатной температуре практически все «лишние» электроны донорной пятивалентной примеси отрываются от атомов и движутся хаотически. Положительные ионы находятся в узлах кристаллической решетки.

Также электрически нейтрален и изолированный кристалл *p*-типа. Однако в нем в хаотическом тепловом движении находятся дырки, а атомы акцепторной примеси, захватившие лишний электрон и превратившиеся в отрицательные ионы, - в узлах кристаллической решетки.

Приведем кристаллы *n*- и *p*-типов в плотное соприкосновение и рассмотрим процессы на границе раздела (рис. 150 а). На рисунке ионы обозначены кружками, а свободные носители - знаками «+» и «-».

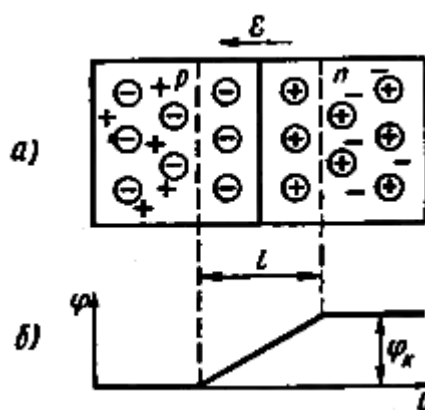


Рис. 150 Возникновение контактной разности потенциалов в электронно-дырочном переходе:
 а) распределение ионов и свободных носителей заряда в областях, близких к *p-n*-переходу;
 б) изменение потенциала в направлении, перпендикулярном плоскости *p-n*-перехода

Сразу после соприкосновения кристаллов начнется диффузия дырок из *p*-области в *n*-область и диффузия электронов в обратном направлении. Встречаясь, электроны и дырки рекомбинируют, при этом вблизи граничной плоскости образуются два слоя: слева слой «обнаженных» отрицательных

ионов, справа - слой «обнаженных» (нескомпенсированных) положительных ионов. Между двумя разноименно заряженными слоями возникает электрическое поле, напряженность которого ε препятствует диффузии дырок и электронов. Чем больше нескомпенсированных ионов, т. е. чем больше ширина «обнаженных» слоев, тем выше напряженность электрического поля. При некотором значении напряженности диффузионный ток прекратится. Этому значению напряженности соответствуют определенная контактная разность потенциалов (рис. 150 б) и определенная ширина слоя l , в котором рекомбинировали подвижные носители зарядов.

Эта общая картина требует некоторого уточнения. Выше говорилось о существовании в кристаллах неосновных носителей заряда. Под действием напряженности ε неосновные носители начнут дрейфовать навстречу диффундирующим зарядам, возникает дрейфовый ток, направленный навстречу току диффузии. Динамическое равновесие наступит при равенстве диффузионного и дрейфового токов, при этом слой l сильно обеднен свободными носителями заряда, хотя и не лишен их полностью. С приближением к плоскости раздела кристаллов обеднение слоя l носителями зарядов будет все более выраженным.

Ширина обедненного слоя связана с контактной разностью потенциалов, которая, в свою очередь, зависит от выбора материалов и концентрации примесей. Чем выше контактная разность потенциалов φ_k , тем шире обедненный слой l . У германия и кремния контактная разность потенциалов составляет десятые доли вольт, а ширина обедненного слоя - десятые и сотые доли микрометра.

Контактная разность потенциалов придает p - n -переходу свойство односторонней проводимости, которое широко применяется в современной технике.

Обозначим через φ_k собственную контактную разность потенциалов обедненного слоя. Если к p - n -переходу подключить источник напряжения U , то разность потенциалов на границах контактного слоя кристаллов n - и p -типов изменится. Включение p - n -перехода в электрическую цепь, когда плюс источника подсоединен к области p , а минус к области n , называется *прямым*. Разность потенциалов контактного слоя в этом случае обозначим $\varphi_{k,n}$. Включение, при котором к области p подсоединен минус источника, а к области n плюс, называется *обратным*. Соответствующую разность потенциалов обозначим $\varphi_{k,o}$ (рис. 151).

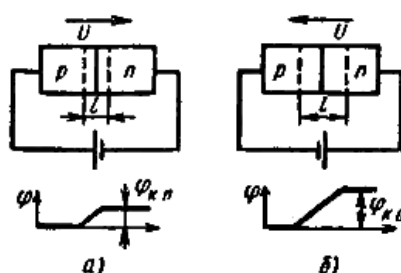


Рис. 151 Прямое (а) и обратное (б) включение p - n - перехода

Имея в виду, что сопротивление кристаллов невелико и все приложенное напряжение практически падает на обедненном слое, можем записать:

$$\varphi_{к.п} = \varphi_{к.0} - U; \quad \varphi_{к.0} = \varphi_{к.0} + U.$$

Таким образом, при прямом включении $p-n$ -перехода разность потенциалов на границах обедненного слоя (потенциальный барьер) уменьшается, а при обратном включении увеличивается.

Уменьшение потенциального барьера приводит к возрастанию диффузионного тока и уменьшению встречного дрейфового тока. Результирующий ток (его называют прямым) совпадает с диффузионным.

Увеличение потенциального барьера приводит к уменьшению диффузионного тока и увеличению дрейфового. Результирующий ток $p-n$ -перехода и всей замкнутой цепи совпадает с дрейфовым током. Это ток называют обратным.

Напомним, что диффузионный ток создается основными носителями зарядов, а дрейфовый - неосновными. Так как концентрация основных носителей на несколько порядков выше концентрации неосновных, прямой ток в сотни и тысячи раз превышает обратный.

Таким образом, $p-n$ -переход, включенный в прямом направлении, пропускает электрический ток, а включенный в обратном - не пропускает.

Чтобы уменьшить обратный ток, надо уменьшить количество неосновных носителей заряда. Это достигается уменьшением посторонних (не легирующих) примесей и улучшением структуры кристалла (уменьшением числа дефектов кристаллической решетки).

Вентильные свойства $p-n$ -перехода отображаются его вольт-амперной характеристикой, представляющей зависимость значения и направления тока от значения и полярности напряжения (рис. 152). При достижении обратным напряжением некоторого критического значения $U_{кр}$ обратный ток резко возрастает. Этот режим называется *пробоем $p-n$ -перехода*.

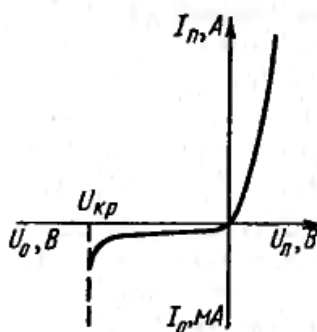


Рис. 152 Вольт-амперная характеристика электронно-дырочного перехода

С практической точки зрения целесообразно различать два вида пробоя: *электрический* и *тепловой*. *Электрический* пробой не опасен для $p-n$ -перехода: при отключении источника обратного напряжения вентильные свойства электронно-дырочного перехода полностью восстанавливаются. *Тепловой* пробой необратим. Он приводит к разрушению кристалла и является аварийным режимом.

Электрический пробой вызывается совместным действием двух факторов: *ударной ионизацией атомов* и *туннельным эффектом*. *Ударная*

ионизация возникает, когда под действием обратного напряжения электроны проводимости приобретают на расстоянии, равном длине свободного пробега, энергию, достаточную для отрыва других электронов при столкновении с атомами кристалла. При этом происходит лавинообразное увеличение количества носителей заряда и ток возрастает.

Туннельный эффект выражается в том, что электрон с энергетического уровня области *p* проникает сквозь потенциальный барьер без потерь энергии на такой же энергетический уровень области *n*. При увеличении напряжения до $U_{кр}$ вероятность таких переходов возрастает, что и приводит к увеличению обратного тока.

Туннельный эффект связан с волновыми свойствами электрона. Для электронов, у которых волна де Бройля соизмерима с размерами атомов, есть вероятность проникнуть сквозь стенку потенциального барьера (или потенциального ящика), если за барьером имеется уровень, энергия которого равна энергии исходного уровня (нет запрещенной зоны). Коэффициент «прозрачности» барьеров зависит от многих факторов.

Тепловой пробой возникает при недостаточном охлаждении кристалла. В этом случае температура *p-n*-перехода повышается, что приводит к увеличению генерации носителей зарядов, увеличению тока и дальнейшему повышению температуры. В конечном счете кристалл разрушается. Для борьбы с тепловым пробоем полупроводниковые приборы снабжаются устройствами, повышающими теплоотдачу.

В области *p-n*-перехода нарушается равномерное распределение носителей заряда в кристалле и образуется два объемных заряда разного знака. Значения этих зарядов зависят от приложенного напряжения. Эту зависимость характеризуют емкостью *p-n*-перехода ($Q=CU$), которая увеличивается с увеличением прямого тока.

Электронно-дырочный переход составляет основу полупроводникового прибора.

2.1.3 Полупроводниковые диоды и стабилитроны, их вольт-амперные характеристики

Полупроводниковые диоды

Полупроводниковым диодом называют прибор с двумя выводами и одним электронно-дырочным переходом. Различают *точечные* (рис. 153) и *плоскостные* (рис. 154) *диоды*. В стеклянном или металлическом корпусе 2 точечного диода крепится германиевый или кремниевый кристалл *n*-типа 3 площадью порядка 1 мм² и толщиной 0,5 мм, к которому прижимается стальная или бронзовая игла 4, легированная акцепторной присадкой. Прибор включается в схемы через выводы 1.

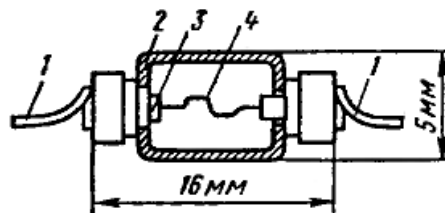


Рис. 153 Конструкция точечного германиевого диода типа Д103:
1 – вывод; 2 - стеклянный корпус;
3 - полупроводниковый кристалл;
4 - стальная пружина

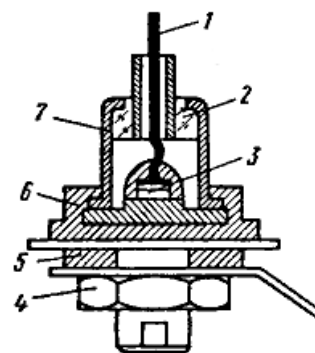


Рис. 154 Конструкция плоскостного выпрямительного диода типа Д242:
1 – вывод; 2 - стеклянная втулка;
3 - полупроводниковый кристалл; 4 – гайка; 5 – шайба; 6 – основание;
7 - металлический корпус

В процессе формовки через контакт иглы с кристаллом пропускают мощные импульсы тока. При этом кончик иглы оплавляется и часть акцепторной примеси внедряется в кристалл. Вокруг иглы образуется микроскопическая (точечная) область с дырочной электропроводностью. На полусферической границе этой области с кристаллом n -типа возникает электронно-дырочный переход.

Малая площадь p - n -перехода в точечном диоде обеспечивает ему минимальное значение межэлектродной емкости.

Площадь p - n -перехода плоскостных диодов достигает десятков и сотен квадратных миллиметров. Для получения таких площадей используют методы сплавления или диффузии. При методе сплавления на пластинку кристалла с донорной примесью помещают таблетку акцепторной примеси, которая расплавляется при нагреве в печи. Расплав частично проникает в кристалл и образует область p -типа, граничащую с массой кристалла. У этой границы возникает p - n -переход.

При изготовлении диода *методом диффузии* кристалл с донорной примесью помещают в газовую среду акцептора (кристалл с акцепторной примесью – в газовую среду донора) и выдерживают длительное время при заданной температуре. Диффундируя в поверхность кристалла, молекулы акцептора (или донора) образуют область с типом электропроводности, противоположным типу электропроводности кристалла.

Метод сплавления позволяет получить p - n -переход с резким изменением концентрации примеси. При методе диффузии концентрация примесных атомов в области p - n -перехода изменяется плавно.

Мощные плоскостные полупроводниковые диоды, рассчитанные на большие токи, изготавливают в массивных металлических корпусах, обеспечивающих поглощение и отвод теплоты, выделяющейся в p - n -переходе. С помощью массивных гаек и шайб корпус диода плотно прижимается к монтажной металлической панели-радиатору.

Основной характеристикой диода служит его вольт-амперная характеристика, вид которой совпадает с видом характеристики p - n -перехода (рис. 152). Вольт-амперная характеристика диода существенно зависит от

температуры окружающей среды, с повышением которой прямой ток диода при одном и том же напряжении может увеличиться в несколько раз. При заданном прямом токе с увеличением температуры снижается прямое напряжение между электродами диода.

Температура окружающей среды существенным образом влияет и на обратный ток, который тоже возрастает с увеличением температуры. При увеличении температуры окружающей среды выше определенного значения уже при небольших обратных напряжениях развивается тепловой пробой p-n-перехода и диод выходит из строя. Работоспособность германиевых диодов теряется при температуре около 70°C, а кремниевых – при 200°C. Высокая термическая устойчивость кремния – важнейшее его преимущество по сравнению с другими полупроводниковыми материалами. Кремниевые диоды допускают плотность тока в прямом направлении 10 А/мм² и более, что позволяет изготавливать мощные полупроводниковые устройства относительно небольших массы и габаритов.

Одна из важных характеристик диода – *обратное пробивное напряжение*. Это напряжение зависит от ширины обедненного слоя и у современных плоскостных диодов равно сотням и тысячам вольт. Оно несколько увеличивается с повышением температуры, не выходящим за пределы работоспособности диода.

Внутреннее сопротивление плоскостных диодов прямому току при номинальных режимах работы составляет десятые доли Ом, с повышением температуры оно уменьшается.

Применение полупроводниковых диодов в современной технике весьма разнообразно. Рассмотрим наиболее характерные случаи.

Полупроводниковые диоды, предназначенные для выпрямления переменного тока, называются *выпрямительными*. Плоскостные диоды малой и средней мощности широко используют в схемах питания радиоаппаратуры, в устройствах автоматики и вычислительной техники. Диоды большой мощности используют в силовых установках для питания тяговых электродвигателей, привода станков и механизмов, обеспечения технологических процессов в химическом и металлургическом производствах, зарядки аккумуляторов.

Для характеристики выпрямительных свойств диодов вводится *коэффициент выпрямления*, равный отношению прямого и обратного токов при одном и том же напряжении (например, 1 В). Чем выше коэффициент выпрямления, тем меньше потери и выше КПД выпрямителя.

Диоды, предназначенные для работы в устройствах высокой и сверхвысокой частот (ультракоротковолновая и космическая радиосвязь, радиолокация, телеметрия), называют *сверхвысокочастотными*. СВЧ-диоды используются для модуляции и детектирования сверхвысокочастотных колебаний в диапазоне сотен и тысяч мегагерц, а также в каскадах преобразования частоты радиоприемных устройств. В качестве высокочастотных обычно применяют точечные диоды, емкость электронно-дырочного перехода в которых составляет десятые и сотые доли пикофард.

Детекторные свойства СВЧ-диода, определяемые коэффициентом выпрямления, зависят от емкости p - n -перехода. Чем меньше эта емкость, тем больше коэффициент выпрямления.

Ранее установили, что ширина обедненного слоя и, следовательно, емкость электронно-дырочного перехода зависят от напряжения, приложенного в непроводящем направлении. Такая зависимость дает возможность, варьируя обратное напряжение на закрытом p - n -переходе диода, изменять его емкость. Диоды, применяемые в качестве конденсаторов с управляемой емкостью, называют *варикапами*.

Наличие у диода критического обратного напряжения, при котором наступает электрический (не тепловой) пробой (рис. 152), позволяет использовать полупроводниковый диод в схемах стабилизации напряжения. Одна из возможных схем стабилизации представлена на рис. 155.

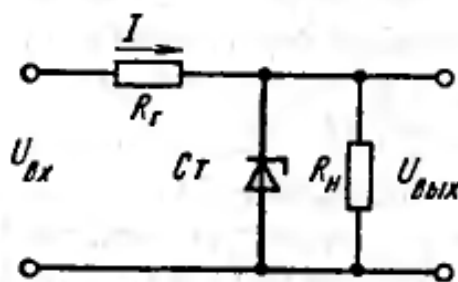


Рис. 155 Схема стабилизации напряжения

Выходное напряжение схемы с большой степенью точности поддерживается на заданном уровне $U_{вых} = const$, равном критическому (пробивному) напряжению диода $U_{Cт}$. Разница между входным и выходным напряжениями гасится на сопротивлении R_r .

Если входное напряжение возрастает, то увеличивается обратный ток диода, возрастает ток I и падение напряжения на гасящем сопротивлении R_r . Приращения напряжений $\Delta U_{вх}$ и $\Delta I R_r$ взаимно компенсируются, а $U_{вых}$ сохраняется на заданном уровне.

Диод, используемый для стабилизации напряжения, называется *стабилитроном*. Недостаток рассмотренной схемы – зависимость пробивного напряжения стабилитрона, а следовательно, и выходного напряжения $U_{вых}$ от температуры. Эту зависимость можно существенно уменьшить, включив последовательно со стабилитроном компенсирующий диод в прямом направлении.

Для стабилизации малых напряжений (порядка 1 В) используют диод, включенный по той же схеме, но в прямом направлении. При этом для повышения степени стабильности выходного напряжения структуру электронно-дырочного перехода формируют так, чтобы вольт-амперная характеристика диода в прямом направлении по возможности круто поднималась вверх при возрастании напряжения стабилизации (рис. 156).

При больших концентрациях легирующих примесей заметно усиливается туннельный эффект p - n -перехода. При этом в вольт-амперной характеристике диода появляется участок с отрицательным сопротивлением (прямой ток увеличивается с уменьшением прямого напряжения), что позволяет

использовать его в схемах генерации и усиления электрических колебаний. Такие диоды называют *туннельными*.

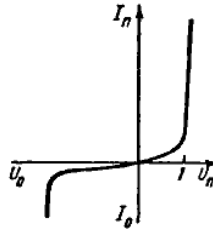


Рис. 156 Вольт-амперная характеристика стабилитрона

Для работы в импульсных схемах изготавливают *импульсные диоды*, у которых перераспределение носителей зарядов в *p-n*-переходах при смене полярности напряжения (переходные процессы) происходит в десятые доли наносекунды. Чем меньше время переходных процессов, тем меньше искажается форма импульсов. Для ускорения переходных процессов уменьшают до возможного предела межэлектродную емкость, а также легируют область *p-n*-перехода небольшой присадкой золота.

Условные обозначения некоторых полупроводниковых диодов изображены на рис. 157.

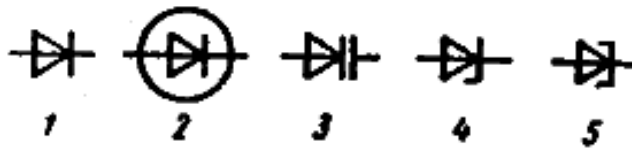


Рис. 157 Условные обозначения полупроводниковых диодов:

1 — выпрямительный диод, 2 — СВЧ диод, 3 — варикап, 4 — стабилитрон, 5 — туннельный диод

Маркировку диодов, выпускаемых на территории СНГ, осуществляют с помощью цифр и букв русского алфавита. Первая цифра или буква обозначает материал полупроводникового кристалла. Цифрой 1 или буквой Г обозначают германий, цифрой 2 или буквой К кремний, цифрой 3 или буквой А — арсенид галлия. На втором месте ставят букву, обозначающую класс диода: Д — выпрямительный, А — СВЧ-диод, В — варикап, С — стабилитрон, И — туннельный диод. Три последующие цифры характеризуют тип или область применения прибора: если цифры лежат в пределах 101-399, то диод предназначен для выпрямления переменного тока, если в пределах 401-499, то для работы в высокочастотных и сверхвысокочастотных цепях, если в пределах 501-599, то для работы в импульсных схемах. Диоды, маркируемые цифрами 601-699, используют в качестве конденсаторов с управляемой приложенным обратным напряжением емкостью (варикапы). Последняя буква указывает на некоторые или другие особенности диода (конструкция, разновидность прибора, интервал рабочих напряжений или токов, емкость перехода, частота и пр.).

Например, маркировка КС196В расшифровывается следующим образом: кремниевый стабилитрон плоскостного типа малой мощности, напряжение стабилизации 9,6 В, разновидность В.

2.2 Транзисторы. Интегральные микросхемы (ИМС)

2.2.1 Устройство, режимы работы и схемы включения биполярных и полевых транзисторов

Биполярным транзистором называют полупроводниковый прибор, основу которого составляют два взаимодействующих электронно-дырочных перехода, который имеет три вывода.

Биполярный транзистор является твердотельным функциональным аналогом лампового триода. Он способен усиливать или генерировать переменное напряжение (ток), а также замыкать и размыкать цепь постоянного тока – работать в качестве электронного ключа.

Устройство биполярного транзистора, изготовленного методом сплавления, схематически представлено на рис. 158.

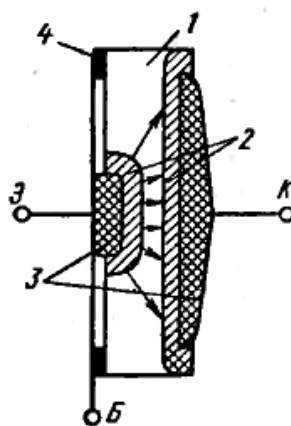


Рис. 158 Схематическое изображение транзистора типа *p-n-p*:

1 - кристалл германия типа *n*; 2 - области типа *p*; 3 - вплавленные пластинки индия; 4 - контактное кольцо базы; Э - эмиттерный вывод; К - коллекторный вывод; Б - вывод базы (стрелками показано движение дырок)

В пластинку германия 1, легированного донорной примесью (с электронной проводимостью), вплавлены две таблетки трехвалентного индия 3 (акцептор). В объеме германия возле пластинок индия образуются две области с дырочной электропроводностью 2, разделенные тонким слоем базовой пластины. У границ, разделяющих *p*-области и базу, образуются два электронно-дырочных перехода. Переход, изображенный на рисунке слева, называется *эмиттерным*, справа - *коллекторным*. Эмиттерный, коллекторный переходы и база имеют выводы (э, к, б) для включения прибора в электрическую цепь

Толщина базового слоя, разделяющего эмиттерный и коллекторный переходы, на рисунке значительно преувеличена. Для того чтобы переходы взаимодействовали, толщина базовой прослойки между ними должна быть меньше диффузионной длины носителей заряда (т. е. меньше расстояния, которое проходят носители заряда до рекомбинации). У современных приборов толщина базы имеет порядок единиц микрометров. Кроме того, концентрацию легирующей примеси базы делают на два-три порядка меньше концентрации примесей в эмиттерной и коллекторной областях.

Материалы, методы получения *p-n*-переходов параметры и конструктивное оформление современных транзисторов весьма разнообразны.

Мы рассмотрели сплавной германиевый транзистор, у которого тип электропроводности областей меняется в следующем порядке: p (эмиттер), n (база), p (коллектор). Такой прибор называют *транзистором типа $p-n-p$* . Он может быть изготовлен и на основе кремния n -типа.

Если в качестве базы использовать германий или кремний p -типа, а эмиттерный и коллекторный переходы образовать с помощью донорных материалов то получим транзистор типа $n-p-n$. Такие транзисторы применяют в высокочастотных схемах.

Принцип действия транзисторов обоих типов одинаков. Разница в том, что полярность включения источников питания для них противоположна (рис. 159).

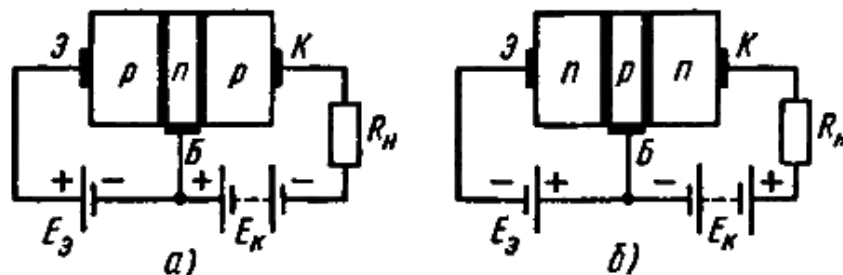


Рис. 159 Включение источников питания транзистора:
а) типа $p-n-p$, б) типа $n-p-n$

В соответствии с этим в транзисторе типа $p-n-p$ коллекторный ток создается движением дырок, а в транзисторе типа $n-p-n$ - движением электронов.

Рассмотрим принцип действия транзистора типа $p-n-p$.

Разомкнем цепь эмиттера, а коллектор оставим под напряжением указанной полярности. Коллекторный переход, как видно из рисунка, находится под обратным напряжением, при этом через него протекает небольшой ток, образованный движением неосновных носителей. Этот начальный ток у германиевых транзисторов составляет десятки, а у кремниевых - единицы микроампер.

Замкнем цепь эмиттера. Эмиттерный переход окажется под прямым напряжением. Через него потечет прямой ток, образованный диффузией дырок в базу и диффузией электронов в эмиттер. Ранее было отмечено, что концентрация электронов в базе значительно меньше, чем концентрация дырок в эмиттере, поэтому ток через переход практически создается эмиттированием дырок в базу.

Так как толщина базы невелика, то дырки пройдут ее без рекомбинации и диффундируют в область коллектора, где, перемещаясь под действием коллекторного напряжения, создадут коллекторный ток.

Небольшая часть дырок, комбинировавших в базе, а также электроны, диффундирующие из базы в эмиттер, создадут небольшой ток базы, примерно на два порядка меньший токов эмиттера и коллектора.

Таким образом, коллекторный ток и пропорциональное ему напряжение на нагрузке коллектора R_n почти полностью определяются количеством эмиттированных дырок, т. е. током эмиттера.

Отношение приращения тока коллектора к вызвавшему его приращению тока эмиттера при постоянном напряжении на коллекторе называется *коэффициентом усиления по току* $\alpha = \Delta I_k / \Delta I_э$ при $U_k = const$.

Коэффициент усиления по току тем выше, чем больше эмиттированных дырок диффундирует через коллекторный переход. Конструкция транзистора обеспечивает экстракцию (улавливание) коллектором до 99% дырок, эмиттированных в базу.

В рассмотренной схеме включения коэффициент усиления транзистора по току меньше единицы (0,95-0,99). Схема может быть использована для усиления сигнала по *напряжению* или *мощности*.

Действительно, несмотря на то что токи эмиттера и коллектора примерно равны, напряжение в цепи коллектора, а следовательно, и мощность, могут в десятки раз превышать напряжение и мощность в цепи эмиттера.

Отметим, что названия «*эмиттер*» (инжектор, излучатель носителей заряда), «*коллектор*» (собираатель носителей) и «*база*» отвечают функциональному назначению этих частей биполярного транзистора.

Полярность электродов транзисторов показана на рис. 160, причем база заземлена (потенциал равен нулю).

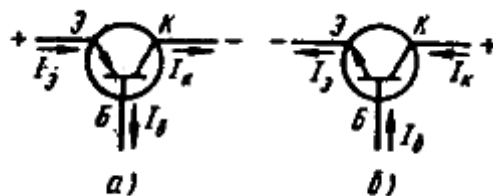


Рис. 160 Условные обозначения биполярных транзисторов:
а) - типа *p-n-p*; б) - типа *n-p-n*

Рассматривая последовательность слоев биполярного транзистора, нетрудно убедиться, что в принципе работоспособность прибора сохранится, если эмиттер и коллектор поменять местами. Однако инверсное включение неравноценно нормальному вследствие несимметричности конструкции (рис. 160) транзистора.

Так как размеры эмиттера меньше размеров коллектора, то при инверсном включении эмиттер не сможет уловить значительную часть носителей заряда, инжектированных коллектором в базу. Кроме того, из-за малых размеров эмиттер, используемый в роли коллектора, будет быстрее нагреваться. При неправильном включении триода эффективность его работы заметно снизится. Итак, включать транзистор в схему следует в строгом соответствии с обозначением его выводов согласно типу транзистора.

Независимо от типа транзистора (*p-n-p* или *n-p-n*) применяют три основные; схемы его включения: *с общей базой*, *с общим эмиттером*, *с общим коллектором*.

Схема включения транзистора с общей базой изображена на рис. 161.

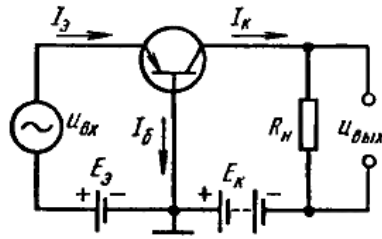


Рис. 161 Включение транзистора по схеме с общей базой

Коэффициентом усиления сигнала назовем отношение его приращения на выходе к приращению на входе $k_x^{\delta} = \Delta x_{\text{вых}} / \Delta x_{\text{вх}}$ (индекс справа вверху соответствует схеме включения). Следовательно, коэффициент усиления:

$$\text{по току } k_i^{\delta} = \Delta I_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{вх}} = \Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{э}} = \alpha;$$

$$\text{по напряжению } k_a^{\delta} = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}} = R_H \Delta I_{\text{к}} / (R_{\text{вх}}^{\delta} \Delta I_{\text{э}}) = \alpha R_H / R_{\text{вх}}^{\delta};$$

$$\text{по мощности } k_p^{\delta} = k_i^{\delta} k_u^{\delta} = \alpha^2 R_H / R_{\text{вх}}^{\delta}.$$

Здесь R_H - сопротивление нагрузки; $R_{\text{вх}}^{\delta} = \Delta U_{\text{вх}} / \Delta I_{\text{э}}$ - входное сопротивление транзистора, включенного по схеме с общей базой. Значения $R_{\text{вх}}^{\delta}$ лежат в пределах от единиц до десятков Ом.

Наиболее распространенной и универсальной по параметрам является схема с общим эмиттером, изображенная на рис. 162.

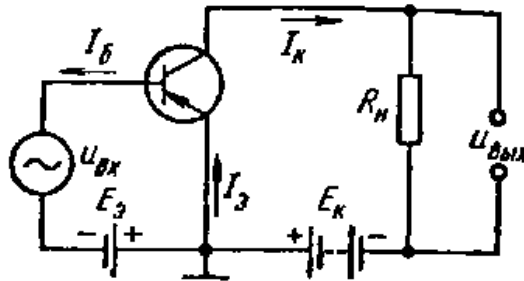


Рис. 162 Включение транзистора по схеме с общим эмиттером

Для этой схемы входным является ток базы, выходным - ток коллектора, следовательно:

$$k_i^{\varepsilon} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{э}} - \Delta I_{\text{к}}} = \frac{\Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{э}}}{\Delta I_{\text{э}} / \Delta I_{\text{э}} - \Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{э}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha};$$

$$k_u^{\varepsilon} = \frac{\Delta u_{\text{вых}}}{\Delta u_{\text{вх}}} = \frac{\Delta I_{\text{к}} R_H}{\Delta I_{\text{б}} R_{\text{вх}}^{\varepsilon}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{R_H}{R_{\text{вх}}^{\varepsilon}};$$

$$k_p^{\varepsilon} = k_i^{\varepsilon} k_u^{\varepsilon};$$

$$R_{\text{вх}}^{\varepsilon} = \Delta U_{\text{вх}} / \Delta I_{\text{б}}.$$

Так как ток базы в десятки раз меньше тока эмиттера, то при прочих равных условиях входное сопротивление схемы с общим эмиттером $R_{\text{вх}}^{\varepsilon}$ в десятки раз больше входного сопротивления схемы с общей базой $R_{\text{вх}}^{\delta}$. Действительно, $\Delta I_{\text{б}} = \Delta I_{\text{э}} - \Delta I_{\text{к}} = \Delta I_{\text{э}}(1 - \alpha)$, следовательно,

$$R_{\text{вх}}^{\varepsilon} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta I_{\text{б}}} = \frac{R_{\text{вх}}^{\delta}}{1 - \alpha}.$$

На рис. 163 изображена схема включения транзистора с общим коллектором.

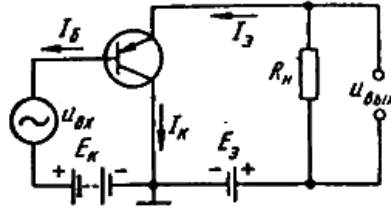


Рис. 163 Включение транзистора по схеме с общим коллектором

Для этой схемы:

$$K_i^k = \frac{\Delta I}{\Delta I_б} = \frac{\Delta I_э}{\Delta I_э - \Delta I_к} = \frac{\Delta I_э / \Delta I_э}{(\Delta I_э / \Delta I_э - (\Delta I_к / \Delta I_э))} = \frac{1}{1 - \alpha}.$$

Коллекторный переход смещен источником ЭДС E в обратном направлении, поэтому приращение напряжения входного сигнала $\Delta U_{вх}$ будет действовать не через переход база-коллектор, а через переход эмиттер-база и сопротивление нагрузки R_n . Имея в виду, что сопротивление эмиттерного перехода, включенного в прямом направлении, мало, им можно пренебречь и считать, что

$$\Delta U_{вх} \approx \Delta I_э R_n.$$

Поэтому

$$K_u^k = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вх} \approx \Delta I_э R_n / (\Delta I_э R_n) = 1;$$

$$k_p^k = k_i^k k_u^k = k_i^k;$$

$$R_{вх}^k = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta I_б} \approx \frac{\Delta I_э R_n}{\Delta I_э} = \frac{1}{1 - \alpha} R_n.$$

Таким образом, транзистор с общим коллектором практически не меняет значения напряжения сигнала. Его называют эмиттерным повторителем. Подбирая R_n , входное сопротивление эмиттерного повторителя можно сделать достаточно большим.

Приведенные соотношения позволяют найти все рассмотренные параметры любой из трех схем, если из опыта определены или рассчитаны всего два параметра: α и $R_{вх}$.

Подчеркивая аналогию между биполярным транзистором и ламповым триодом, следует отметить и их существенное различие: ламповый триод может работать (и обычно работает) без тока в цепи управляющей сетки, в управляющей же цепи транзистора (в цепи базы) всегда протекает ток.

Чем больше входное сопротивление схемы, тем меньше ток в управляющей цепи.

Характеристики выражают зависимость между напряжениями и токами в цепях транзистора. Наибольшее значение получили входные, выходные и переходные характеристики. Обычно характеристики снимают по схеме с общей базой или с общим эмиттером.

В качестве примера рассмотрим статические (снятые при постоянном напряжении) характеристики транзистора типа $p-n-p$ в схеме общей базой.

Входной характеристикой называется зависимость тока эмиттера от напряжения между эмиттером и базой при неизменном напряжении между коллектором и базой. Устанавливая различные значения напряжения между

коллектором и базой ($U_K = const$), получим семейство входных характеристик (рис. 164 а).

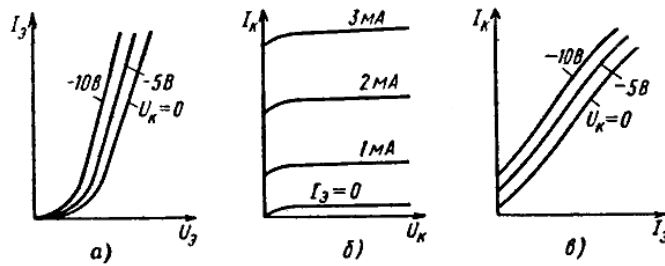


Рис. 164 Характеристика биполярного транзистора в схеме с общей базой:
а) входные; б) выходные; в) переходные

Выходной (коллекторной) характеристикой называется зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и базой при постоянном токе эмиттера. Задавая различные значения тока эмиттера ($I_E = const$), получают семейство выходных характеристик (рис. 164 б).

Проходной характеристикой (характеристикой прямой передачи) называют зависимость тока коллектора от тока эмиттера при постоянном напряжении между коллектором и базой. Семейство таких характеристик приведено на рис. 164 в.

Входные и выходные характеристики получают экспериментально, проходные характеристики могут быть построены на основе семейства выходных характеристик.

Характеристики транзистора можно использовать для определения его параметров. Так, коэффициент α легко находят по проходным, а входное сопротивление $R_{вх}^{\delta}$ - по входным характеристикам.

При расчете цепей широко используют представление транзисторов в виде *четырёхполюсников*. При этом параметры транзистора характеризуют *коэффициентами четырёхполюсника*. Для биполярного транзистора эти коэффициенты принято называть *h-параметрами*, их можно определить расчетом или экспериментально.

Для сравнительной оценки транзисторов при различных схемах включения их основные параметры сведены в таблице 2.

Таблица 2

Основные параметры транзисторов

Параметры	Схема включения		
	с общей базой	с общим эмиттером	с общим коллектором
k_i	около единицы	десятки	десятки
k_u	тысячи	тысячи	около единицы
$R_{вх}$	десятки	тысячи	сотни тысяч

Следует отметить, что одним из существенных недостатков транзисторов является относительно высокая нестабильность их параметров и характеристик. Причины нестабильности следующие: разброс параметров в процессе изготовления однотипных транзисторов, влияние температуры окружающей среды; влияние радиоактивных излучений, изменение параметров с изменением частоты усиливаемых сигналов, изменение параметров при старении транзисторов с течением времени.

Для транзисторов характерен также относительно высокий *уровень собственных шумов*, вызываемых тепловыми флуктуациями плотности носителей зарядов.

Полевые транзисторы

Физические принципы, положенные в основу полевых транзисторов, были известны давно, однако их реализация встретила существенные технические трудности. Только в 60-х годах полевые транзисторы начали широко применять в различных областях электроники.

В полевых транзисторах используют эффект воздействия поперечного электрического поля на проводимость канала, по которому движутся носители электрического заряда.

Полевые каналные транзисторы имеют существенные преимущества, к которым, прежде всего, относятся большое входное сопротивление приборов (10^{10} - 10^{15} Ом), большая устойчивость к проникающим излучениям (допускается уровень излучений на 3-4 порядка больший, чем для биполярных транзисторов), малый уровень собственных шумов, малое влияние температуры на усилительные свойства.

Полевые транзисторы изготавливают двух типов: с затвором в виде *p-n*-перехода и с изолированным затвором.

Устройство транзистора с затвором в виде *p-n*-перехода схематично представлено на рис. 165.

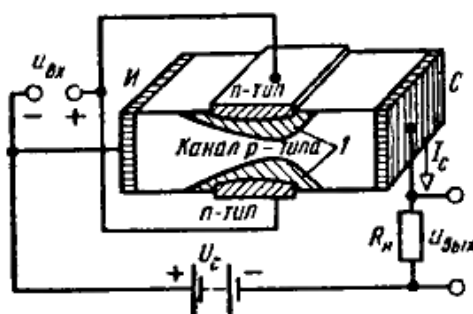


Рис. 165 Схематическое изображение полевого транзистора с *p-n*-переходами:
И - исток; С - сток; 1 - обедненный слой

Основу прибора составляет слаболегированная полупроводниковая пластина *p*-типа, к торцам которой приложено напряжение U_c , создающее ток I_c через сопротивление нагрузки R_n . В полупроводниковой пластине этот ток обеспечивается движением основных носителей заряда. Торцев пластины, от которого движутся носители заряда, называется *истоком*. Торцев к которому движутся носители заряда, - *стоком*. В противоположные боковые поверхности основной *p*-пластины вплавлены пластинки типа *n*. На границе раздела пластин *n*- и *p*- возникают электронно-дырочные переходы. К этим переходам в обратном направлении приложено входное напряжение $u_{вх}$. Значение напряжения $u_{вх}$ можно менять при обязательном сохранении указанной на рисунке полярности. Обычно $u_{вх}$ состоит из двух составляющих: переменного напряжения управляющего сигнала и постоянной составляющей начального смещения, значение которой превышает амплитуду сигнала. Пластинки *n*-типа образуют *затвор*. При указанной полярности напряжения на затворе вокруг этих пластин образуется слой, обедненный носителями заряда, и,

следовательно, имеющий малую проводимость. Между обедненными слоями сохраняется канал с высокой проводимостью.

Принцип действия полевого транзистора основан на изменении ширины обедненного слоя (и, как следствие, канала) при изменении обратного напряжения p - n -перехода.

С увеличением напряжения на затворе ширина обедненных слоев увеличивается, а поперечное сечение канала и его проводимость уменьшаются.

Таким образом, изменяя напряжение $u_{вх}$ на затворе, можно менять ток через сопротивление нагрузки R_n и выходное напряжение $u_{вых}$.

Работу полевого транзистора принято характеризовать зависимостью тока стока I_c от напряжения между истоком и стоком U_c при различных значениях напряжения на затворе U_3 . Эта зависимость аналогична анодной характеристике усилительной лампы.

Семейство характеристик полевого транзистора с затвором в виде p - n -перехода изображено на рис. 166.

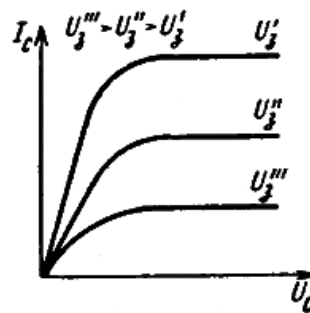


Рис. 166 Семейство характеристик полевого транзистора с затвором в виде p - n -перехода

Сначала с увеличением U_c ток I_c нарастает практически линейно. Затем наступает режим насыщения, и увеличение U_c не приводит к росту тока. Это объясняется тем, что при насыщении напряженность продольного поля в канале складывается с напряженностью поперечного поля, и канал в области стока сужается. Причем чем больше напряженность продольного поля (чем больше U_c), тем больше сужается канал в области стока. Ток при этом остается постоянным. Ток насыщения тем меньше, чем больше напряжение на затворе (обратное напряжение p - n -перехода).

Устройство полевого транзистора с изолированным затвором схематически показано на рис. 167.

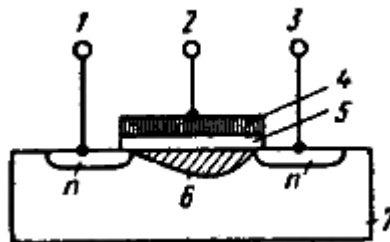


Рис. 167 Схематическое изображение полевого транзистора с изолированным затвором:

1 – исток; 2 – затвор; 3 – сток; 4 – металл;
5 – диэлектрик; 6 – канал n -типа; 7 – полупроводник p -типа

Основу прибора составляет пластина полупроводника p -типа (в основном, кремния, а для сверхвысокочастотных транзисторов – арсенида

галлия). На небольшом расстоянии друг от друга в поверхность основной пластины вплавляют донорную примесь. Затем поверхность пластины подвергают термической обработке, в результате чего на ней наращивается тонкий (0,1 мкм) слой диоксида кремния, являющегося хорошим изолятором. На слой изолятора накладывают (напыляют в вакууме) металлическую пластину затвора, перекрывающую области донорной примеси n .

Транзисторы с изолированным затвором чаще называют транзисторами типа МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) или МОП (металл-оксид-полупроводник). Упрощенно принцип его работы можно представить следующим образом: при отсутствии напряжения на затворе области n истока и стока разделены непроводящей прослойкой основной пластины; при подаче на затвор положительного напряжения электроны вытягиваются из основной пластины и скапливаются под изолирующей прослойкой. При определенной разности потенциалов концентрация электронов под диэлектриком превысит концентрацию дырок, и области n будут соединены проводящим электронным каналом.

В рассмотренном случае проводящий канал между истоком и стоком индуцируется напряжением затвора. Такую разновидность МДП-транзисторов называют транзисторами с индуцированным каналом. Есть также конструкции, при которых канал «встраивается» в объем полупроводника в процессе изготовления прибора путем введения соответствующих примесей. Напряжение затвора меняет концентрацию носителей и, соответственно, проводимость встроенного канала.

Полевые транзисторы могут быть изготовлены аналогичным образом на основе пластин полупроводника n -типа. Их работа отличается от транзисторов p -типа только полярностью питающего и управляющего напряжений.

2.2.2 Интегральные микросхемы. Степени интеграции, функциональное назначение, технология изготовления и система условных обозначений

Развитие электроники определяется постоянным совершенствованием характеристик элементной базы и аппаратуры по следующим направлениям: уменьшение габаритов и массы (миниатюризация); повышение надежности за счет сокращения соединительных линий, совершенствования контактных узлов и взаимного резервирования элементов; уменьшение потребляемой мощности; усложнение задач и соответствующих им схемных решений при одновременном удешевлении каждого отдельного элемента.

Существенные изменения в полупроводниковой технике связаны, во-первых, с переходом к интегральным микросхемам (ИМС) и, во-вторых, с переходом к большим интегральным схемам (БИС)

Интегральной называют микросхему с определенным функциональным назначением, изготовленную не сборкой и распайкой отдельных активных и пассивных элементов, а целиком, в едином технологическом процессе. Примерами интегральных схем могут служить усилители различных сигналов, логические схемы вычислительной техники, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, генераторы синусоидальных, импульсных или

пилообразных напряжений, функциональные узлы обработки радиосигналов, изготовленные как единое целое в объеме одного полупроводникового кристалла или в тонких пленках. Эти схемы обычно дополняют навесными компонентами, подключенными к выводам кристалла. Они позволяют изменять режимы работы интегральной схемы, не изменяя ее внутреннее устройство, в зависимости от области применения и решаемых задач.

К *пассивным* элементам электронных схем относят резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, трансформаторы. К *активным* элементам - диоды, транзисторы, тиристоры и другие, как правило, требующие источников питания или предназначенные для преобразования сигналов.

Интегральные микросхемы могут содержать десятки и сотни пассивных и активных элементов. Показатель степени сложности микросхемы характеризуется числом содержащихся в ней элементов и компонентов.

Полупроводниковые большие и сверхбольшие интегральные схемы изготовляют в объеме одного кристалла. Они характеризуются большей сложностью и служат в качестве отдельных блоков электронной аппаратуры, например запоминающего устройства, процессора и т. д.

Степень и характер интеграции элементов микросхем определяются прежде всего уровнем технологии – точностью исполнения элементов, чистотой применяемых материалов, точностью создания концентрации легирующих добавок. Например, в современных многоядерных быстродействующих микропроцессорах размеры транзисторов составляют сотые доли ангстрема (10^{-9} м), что сравнимо с размерами длины волны видимого света, и составляет несколько десятков атомов кремния в одном транзисторе. Для создания областей проводимости таких транзисторов с заданными значениями плотности носителей требуется буквально подсчет отдельных примесных атомов, а в технологических процессах фотолитографии используется ультрафиолетовое излучение, так как свет с большей длиной волны не позволяет получить четких отпечатков фотошаблона из-за явлений дифракции.

Гибридные интегральные микросхемы

Технология гибридных интегральных микросхем базируется на использовании *толстых* и *тонких* пленок, нанесенных на керамическое основание. Пленки изготавливаются из специальных паст на основе металлических порошков.

Пассивные элементы формируются в пленке, а *активные* в виде миниатюрных бескорпусных полупроводниковых приборов размещаются над пленкой и соединяются с пленочными элементами продольными выводами (рис. 168).

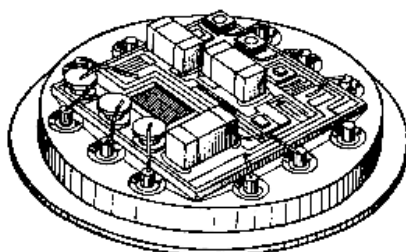


Рис. 168 Гибридная микросхема

Навесными могут изготавливаться также и некоторые пассивные элементы: конденсаторы относительно большой емкости, катушки индуктивности, трансформаторы. При создании схемы на круглую или квадратную подложку по специальной технологии наносят различные пленки, из которых формируются резисторы, конденсаторы, соединительные линии и контактные площадки.

Навесные элементы располагают на подложке или над подложкой. Иногда их помещают в углублениях сквозных окон и заливают эпоксидной смолой. Размеры навесных элементов выбирают возможно минимальными. Диоды и транзисторы обычно изготавливают в виде кристаллов объемом около 1 мм^3 .

Важную роль в обеспечении надежности микросхемы и снижения ее собственных шумов играет качество контактных соединений. Для получения хорошего контакта широко применяют лазерную технику, термокомпрессию, ультразвуковую сварку.

Контакты навесных элементов изготавливают в виде тонких проволок, балок или шариков. Для проволочных контактов (рис. 169) применяют золотую, позолоченную медную или алюминиевую проволоку диаметром в несколько десятков микрометров.



Рис. 169 Проволочный монтаж кристаллов

Балочные контакты имеют вид плоских консолей длиной 100 мкм . Жесткие шариковые и балочные контакты удобны при автоматизации процесса сборки и пайки схемы.

Наибольшие технологические сложности возникают при изготовлении индуктивных катушек и трансформаторов. Поэтому микросхемы стремятся проектировать так, чтобы они содержали минимум таких элементов. В случае необходимости микроиндуктивности могут быть сформированы из пленки, а элементы с относительно большой индуктивностью (более 1 мкГн) - в виде навесных катушек. Таким катушкам часто придают плоскую форму, а сердечники их делают разомкнутыми.

Материалом для сердечника обычно служат ферриты и карбонильное железо. Добротность пленочных индуктивных катушек невелика. У навесных катушек она достигает десятков единиц.

Современная технология гибридных интегральных микросхем позволяет получить плотность пассивных и активных элементов порядка 100 см^{-2} , при этом более высокую плотность имеют тонкопленочные схемы.

Собранную гибридную микросхему заключают в металлический или пластмассовый корпус, изолирующий ее от внешних воздействий (влаги, пыли и др.). Размеры корпуса составляют единицы или десятки миллиметров. Контактные выводы размещают в определенном порядке, а корпус нередко имеет срез или выступ для обеспечения ориентировки при монтаже.

Толсто пленочные микросхемы

Толстыми принято называть пленки, толщина которых превышает 1 мкм. Чаще всего используют пленки толщиной в несколько десятков микрометров. Иногда толщина пленки достигает 150-200 мкм.

Основанием толсто пленочной схемы служит отполированная пластинка из специального стекла, кварца или керамики. На эту подложку методом трафаретной печати наносят слой пасты, состав которой зависит от характера изготавливаемых элементов. После снятия трафарета (маски) подложку с рисунком из нанесенной пасты подвергают термической обработке при температуре порядка 1000 К. В результате образуется фигурная пленка, толщина которой зависит от толщины фольги, из которой изготовлен трафарет. На полученный рисунок накладывают другой трафарет и с помощью пасты другого состава наносят новую пленку. При изготовлении сложных схем эти процессы могут повторяться многократно. Процесс нанесения пасты на подложку показан на рис. 170.



Рис. 170 Нанесение пасты на подложку:
1 - паста; 2 - трафарет; 3 - подложка

Для обеспечения необходимой точности и воспроизводимости параметров схемы, а также повышения производительности труда этот процесс автоматизирован. Толщина подложки 1 мм, ширина и длина - несколько сантиметров.

Для изготовления проводников и контактных площадок толсто пленочных схем применяют пасту, содержащую порошки металлов с высокой проводимостью, устойчивых к химическим и температурным воздействиям (платина, золото, серебро, палладий) и стекло, которое в составе пасты обеспечивает прочное сцепление пленки с подложкой после обжига. Ширина толсто пленочных проводников, получаемых этой технологией, от 100 мкм до 0,5 мм.

Толсто пленочные резисторы изготавливают из смеси порошков серебра и палладия со стеклом. Чем больше содержание стекла, тем выше сопротивление пасты. На значение сопротивления влияют также размеры и форма резистора (рис. 171).

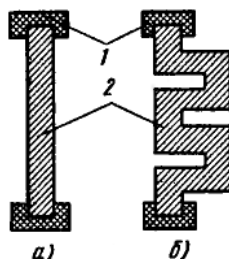


Рис. 171 Пленочные резисторы с малым (а) и большим (б) сопротивлениями:
1 - контактная площадка; 2 - резистор

Сопротивление изготовленных резисторов может существенно отличаться от номинального значения, поэтому после контроля его «доводят», до требуемого, уменьшая толщину пленки с помощью абразивов или делая надрезы лазером.

Толсто пленочные конденсаторы (рис. 172) получают последовательным формированием пленок из проводниковой и диэлектрической паст.

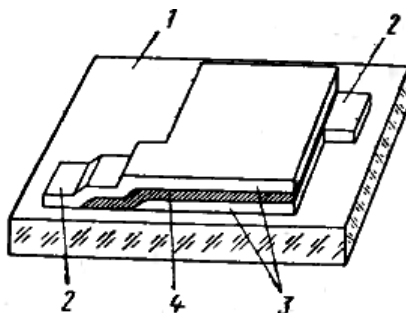


Рис. 172 Пленочный конденсатор:

*1 - подложка; 2 - контактная площадка; 3 - проводящий слой;
4 - диэлектрический слой*

Для диэлектрической пасты используют порошки титаната бария и сегнетокерамических материалов с высоким значением диэлектрической проницаемости.

Конденсаторы повышенной емкости, а также индуктивные катушки и трансформаторы в толсто пленочных схемах обычно делают навесными

Толсто пленочные схемы имеют ряд преимуществ, обеспечивающих им широкое применение прежде всего в устройствах, требующих большой точности и стабильности параметров пассивных элементов. Они надежны и сравнительно недороги, а использование навесных элементов позволяет уменьшить число пересечений в одной плоскости и количество выходных контактов.

Сформированную схему помещают в герметичный корпус или заливают компаундом.

Тонко пленочные микросхемы

К тонким относят пленки, толщина которых составляет десятые и сотые доли микрометра.

При изготовлении ИМС по тонко пленочной технологии для токопроводящих линий, с помощью которых соединяются пленочные эле микросхемы, и контактных площадок для подсоединения навесных элементов применяют различные металлы, имеющие высокую электропроводность: алюминий, медь, серебро, золото, никель, хром, олово, их соли и сплавы. Металлы должны быть устойчивы к химическим воздействиям и иметь хорошую адгезию к подложке.

Для изготовления обкладок конденсаторов чаще всего применяют алюминий и медь; индуктивные элементы (рис. 173) изготавливают из никеля, серебра или хрома.

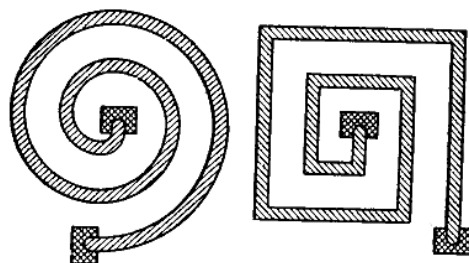


Рис. 173 Пленочные индуктивные катушки

Для получения резистивных элементов используют тантал, титан, никель, хром и их сплавы, а также углерод и кремний.

Изолирующие диэлектрические пленки получают окислением внешних слоев металлических пленок или нанесением покрытий из диэлектрических материалов. Для нанесения тонких пленок на подложку применяют различные методы: вакуумное напыление, катодное распыление, химическое осаждение и электролитическое анодирование.

Метод вакуумного напыления иллюстрируется рис. 174.

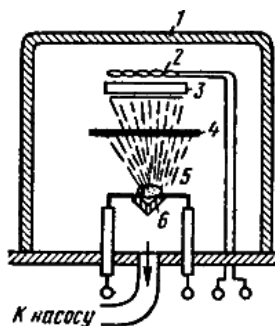


Рис. 174 Схема вакуумного напыления:

1 - колпак; 2 - подогреватель подложки; 3 - подложка; 4 - экран; 5 - испаряемый материал;
6 - подогреватель

Материал для изготовления пленки помещают в тугоплавкий тигель из платины или вольфрама.

Эту систему плотно закрывают колпаком, давление под которым понижают до 10^{-3} Па, затем тигель нагревают до температуры примерно 1000 К. Материал начинает интенсивно испаряться, осаждаясь на более холодной подложке.

Осажденная пленка должна быть однородной и плотно соединяться с подложкой, для чего ее поверхность должна быть хорошо очищена от посторонних примесей. Для этого подложку подогревают. Между испарителем и подложкой устанавливают экран, который поглощает молекулы, не попадающие на нее. Осаждающиеся на экране дорогостоящие металлы в дальнейшем смывают и используют вторично.

Для создания композитных пленок в камере размещают несколько испарителей.

Если в рассмотренной схеме нагрев испарителей осуществляется электрическим током, то для создания пленок из тугоплавких материалов, например вольфрама, титана, молибдена, нагрев производят электронным лучом, направленным непосредственно на испаряющуюся поверхность.

Вакуумное напыление можно использовать во всех случаях, однако испарение материалов с высокой температурой кипения - достаточно трудная задача. Поэтому широкое применение находит также метод катодного распыления (рис. 175).

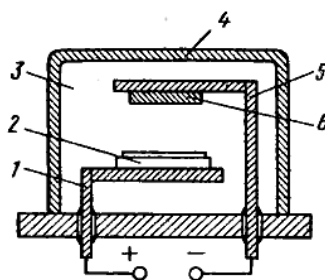


Рис. 175 Схема катодного распыления:

1 - анод; 2 - подложка; 3 - объем, заполненный газом; 4 - колпак; 5 - катод; 6 - распыляемый материал

При катодном распылении рабочим объем камеры заполняют инертным газом при давлении около 1 Па, а к электродам подводят постоянное напряжение в несколько тысяч вольт. Газ в камере ионизируется, и положительные ионы газа, устремляясь к катоду, выбивают из распыляемого материала молекулы, которые осаждаются на подложке, образуя пленку. Так как разгон ионов осуществляется электрическим полем, процесс распыления может идти при относительно низких температурах распыляемого материала. Метод катодного распыления применяют для создания пленок из таких материалов, как тантал, титан, молибден, вольфрам, платина.

При химическом осаждении в камеру, где помещается подложка, по различным трубопроводам подают газообразные реагенты. В результате химической реакции выделяются молекулы металла или его солей, которые и осаждаются на подложке. Ненужные продукты реакции откачиваются.

Электролитическое анодирование производят в жидком электролите, куда помещают подложку и материал пленки, растворяющийся в электролите. Подложку (анод) подсоединяют к плюсу источника постоянного тока, а материал пленки (катод) - к минусу.

Так как при изготовлении микросхемы нанесение пленок на подложку производят многократно, для получения определенной строго рассчитанной конфигурации каждого слоя применяют *фотолитографию*.

Фотолитография

Процесс фотолитографии начинается с изготовления негатива. На двухслойной пленке с прозрачной основой и зачерненной поверхностью вычерчивают необходимый рисунок. Делается это с помощью ручного или автоматического координатографа, который снимает непрозрачный слой в местах, где должны быть «белые» контуры. С негатива размером 1 м делают уменьшенный отпечаток с помощью специальной камеры. Обычно уменьшение производится в две-три ступени, пока отпечаток не достигнет нужных размеров. Окончательный отпечаток делают на фотопластинке и называют фотошаблоном. Стеклоянная основа фотошаблона должна быть идеально чистой и плоскопараллельной.

Следующий этап фотолитографии состоит в нанесении фоторезиста на подложку микросхемы или на напыленную ранее пленку. Фоторезистами называют вещества (обычно эмульсии на основе высокомолекулярных соединений), имеющие свойство после облучения светом менять способность к растворению в специально подобранных средах.

Фоторезисты делятся на негативные и позитивные. В первых под действием облучения образуются нерастворимые, а во вторых, наоборот, растворимые участки. Фоторезист можно наносить окунанием подложки в эмульсию, с помощью пульверизатора или центрифугированием. В последнем случае получают прочную пленку фоторезиста.

При центрифугировании на подложку наносят каплю фоторезиста и помещают в центрифугу. Под действием центробежной силы фоторезист равномерно и плотно (без пузырьков и щелей) распределяется по всей поверхности.

Нанесенный фоторезист просушивают сначала при температуре окружающей среды, а затем в сушильном шкафу при 400 К.

После этого на поверхность, покрытую пленкой фоторезиста, накладывают фотошаблон и экспонируют в ультрафиолетовом свете. В пленке из негативного фоторезиста образуются нерастворимые участки, которые после проявления остаются на подложке и экранируют ее от напыления. В позитивном фоторезисте облучение формирует растворимые участки, на месте которых после проявления образуются окна. Через эти окна напыляемый материал достигает подложки и оседает на ней.

После напыления проводящей или резистивной пленки фоторезист смывают и на поверхности остаются необходимые элементы тонкопленочной схемы. Для получения микросхем высокого качества последовательно применяют два вида фоторезистов.

Это позволяет получить хорошее совмещение пассивных элементов схемы, контактных площадок и токопроводящих дорожек.

Полупроводниковые интегральные микросхемы

Полупроводниковые интегральные микросхемы изготавливают на одном кристалле введением легирующих примесей в определенные микрообласти. Современные технологии позволяют создавать в приповерхностном объеме кристалла весь набор активных и пассивных элементов, а также межэлементные соединения в соответствии с топологией схемы.

В качестве активных элементов ИМС наряду с биполярными широко применяются транзисторы типа МДП. МДП-транзисторы проще в изготовлении, дают больший процент выхода годных изделий, позволяют получить более высокую плотность размещения приборов, потребляют меньшую мощность, дешевле биполярных.

Однако у микросхем на основе МДП-транзисторов есть существенный недостаток - сравнительно высокая инерционность. Поэтому там, где требуется высокое быстродействие, в частности в электронных вычислительных машинах, предпочтение отдают ИМС на биполярных транзисторах.

Один из важных критериев оценки ИМС, характеризующий уровень интеграции,- это отношение числа *p-n*-переходов к числу внешних выводов

(вентиль/контакт). Чем больше это отношение и чем меньше потребляемая мощность (лучше условия теплоотдачи), тем надежнее электронные блоки на базе микросхем (сравнивать следует блоки одинаковой функциональной сложности). У простых логических схем это отношение меньше единицы. С повышением сложности ИМС отношение вентиль/контакт достигает десяти и более.

Основой полупроводниковых интегральных микросхем чаще всего служит кремний. На одной пластинке кремния диаметром 75 мм и толщиной 0,2 мм можно сформировать до 10 000 полупроводниковых ИМС

Широкое применение кремния для производства полупроводниковых ИМС обусловлено, прежде всего, способностью кремния сохранять полупроводниковые свойства при относительно высоких температурах (до 400 К).

Существенным является и то, что при нагревании пластины кремния в кислородной среде на ее поверхности образуется пленка SiO_2 . Она защищает кристалл и сформированные в нем области с заданным типом электропроводности от загрязнений, из нее формируется маска для локальной диффузии примесей, она может выполнять роль диэлектрика в схеме.

ИМС в отполированной пластине кремния изготавливают групповым методом: тысячи одинаковых схем формируют одновременно. Затем на пластине алмазным резцом делают насечки по границам схем и разламывают ее на кристаллы. Полученные заготовки снабжают внешними выводами, герметизируют, помещают в корпуса и оформляют в виде серийных электронных приборов.

Групповая обработка обеспечивает высокую стандартизацию и экономичность производства.

Возможность серийного производства ИМС была подготовлена созданием и совершенствованием планарно-эпитаксиальной технологии.

2.3 Электрические источники и приемники света

2.3.1 Электрический разряд в газе

Понятие электрического разряда в газах включает все случаи перемещения в газах под действием электрического поля заряженных частиц (электронов и ионов), возникших в результате ионизационных процессов. Обязательным условием возникновения разряда в газах является наличие в нем свободных зарядов – электронов и ионов.

Газ, состоящий только из нейтральных молекул, совершенно не проводит электрического тока, т. е. является идеальным диэлектриком. В реальных условиях за счет воздействия естественных ионизаторов (ультрафиолетовое излучение Солнца, космические лучи, радиоактивное излучение Земли и т. п.) в газе всегда имеется некоторое количество свободных зарядов – ионов и электронов, которые сообщают ему определенную электропроводность.

Мощность естественных ионизаторов очень мала: в результате их воздействия в воздухе ежесекундно образуется около одной пары зарядов в каждом см^3 , что соответствует приращению объемной плотности зарядов $\rho = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$. Такое же количество зарядов подвергается ежесекундно

рекомбинации. Число зарядов в 1 см^3 воздуха при этом остается постоянным и равным 500 - 1000 парам ионов.

Таким образом, если к пластинам плоского воздушного конденсатора с расстоянием S между электродами приложить напряжение, то в цепи установится ток, плотность которого $J=2\rho_0S = 3,2 \times 10^{-19} \text{ S A/cm}^2$.

Применение искусственных ионизаторов во много раз увеличивает плотность тока в газе. Например, при освещении газового промежутка ртутно-кварцевой лампой плотность тока в газе возрастает до 10 - 12 A/cm^2 , при наличии искрового разряда вблизи ионизируемого объема создаются токи порядка 10-10 A/cm^2 и т. д.

Рассмотрим зависимость тока, проходящего через газовый промежуток с однородным электрическим полем, от величины приложенного напряжения (рис. 176).

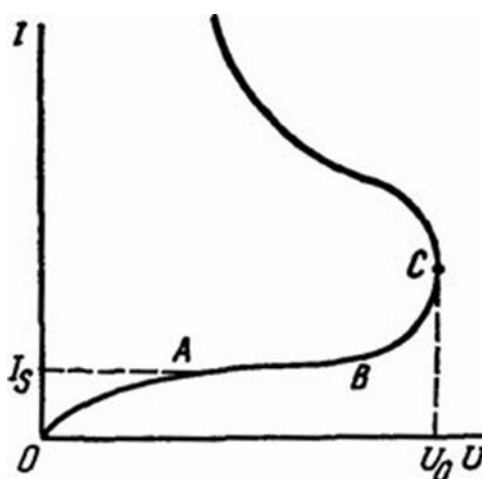


Рис. 176 Вольт-амперная характеристика газового разряда

Вначале по мере увеличения напряжения ток в промежутке возрастает за счет того, что все большее количество зарядов попадает под действием электрического поля на электроды (участок OA). На участке AB ток практически не меняется, так как все образующиеся за счет внешних ионизаторов заряды попадают на электроды. Величина тока насыщения I_s определяется интенсивностью воздействующего на промежуток ионизатора.

При дальнейшем увеличении напряжения ток резко возрастает (участок BC), что свидетельствует об интенсивном развитии процессов ионизации газа под действием электрического поля. При напряжении U_0 происходит резкое увеличение тока в промежутке, который при этом теряет свойства диэлектрика и превращается в проводник.

Явление, при котором между электродами газового промежутка возникает канал высокой проводимости, называют *электрическим пробоем* (пробой в газе часто называют электрическим разрядом, имея в виду весь процесс образования пробоя).

Электрический разряд, соответствующий участку OABC характеристики, называют *несамостоятельным*, так как на этом участке ток в газовом промежутке определяется интенсивностью воздействующего ионизатора. Разряд на участке после точки C называют *самостоятельным*, так как ток разряда на этом участке зависит только от параметров самой электрической цепи (ее сопротивления и мощности источника питания) и для его поддержания

не требуется образования заряженных частиц за счет внешних ионизаторов. Напряжение U_0 при котором начинается самостоятельный разряд, называют *начальным напряжением*.

Формы самостоятельного разряда в газах в зависимости от условий, в которых протекает разряд, могут быть различными.

При малых давлениях, когда из-за небольшого числа молекул газа в единице объема промежутков не может приобрести большую проводимость, возникает тлеющий разряд (рис. 177). Плотность тока при тлеющем разряде невелика ($1-5 \text{ mA/cm}^2$), разряд охватывает все пространство между электродами.



Рис. 177 Тлеющий разряд в газе

При давлениях газа, близких к атмосферному и выше, в случае, если мощность источника питания невелика или напряжение прикладывается к промежутку на короткое время, имеет место *искровой разряд* (рис. 178). Примером искрового разряда является разряд в виде молнии. При длительном действии напряжения искровой разряд имеет вид искр, последовательно возникающих между электродами.

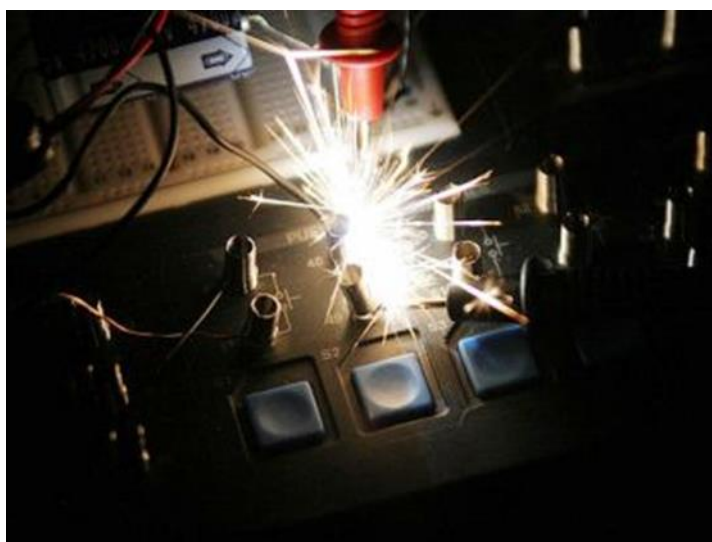


Рис. 178 Искровой разряд

В случае значительной мощности источника питания искровой разряд переходит в *дуговой* (рис. 179), при котором через промежуток может протекать ток, достигающий сотен и тысяч ампер. Такой ток способствует разогреву

канала разряда, увеличению его проводимости, и в результате происходит дальнейшее увеличение тока. Так как этот процесс требует для своего завершения некоторого времени, то при кратковременном приложении напряжения искровой разряд в дуговой не переходит.



Рис. 179 Дуговой разряд

В резко неоднородных полях самостоятельный разряд начинается всегда в виде коронного разряда, который развивается только в той части газового промежутка, где напряженность поля наиболее высока (около острых краев электродов). При коронном разряде между электродами не возникает сквозного канала высокой проводимости, т. е. промежуток сохраняет свои изолирующие свойства. При дальнейшем увеличении приложенного напряжения коронный разряд переходит в искровой или дуговой.

Коронный разряд (рис. 180) – вид стационарного электрического разряда в газе достаточной плотности, возникающего в сильном неоднородном электрическом поле. Ионизация и возбуждение нейтральных частиц газа лавинами электронов локализованы в ограниченной зоне (чехол короны или зона ионизации) сильного электрического поля вблизи электрода с малым радиусом кривизны. Бледно-голубое или фиолетовое свечение газа в зоне ионизации по аналогии с ореолом солнечной короны дало повод к названию данного вида разряда.

Помимо излучения в видимой, ультрафиолетовой (главным образом), а также в более коротковолновых частях спектра, коронный разряд сопровождается движением частиц газа от коронирующего электрода – т.н. «электрическим ветром», шелестящим шумом, иногда радиоизлучением.

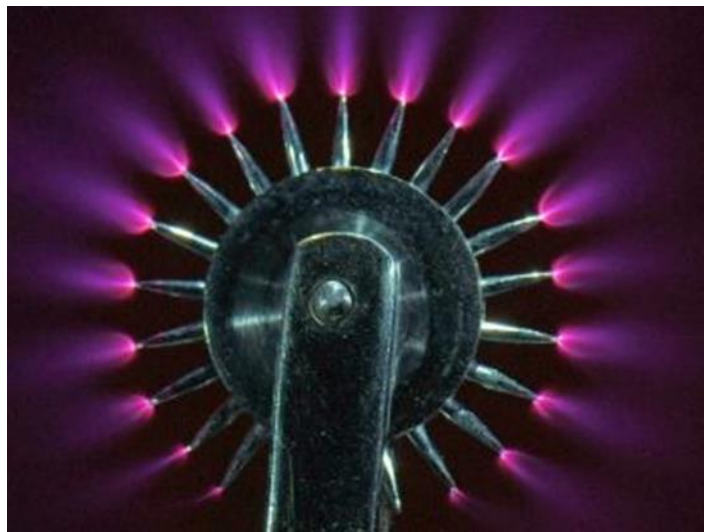


Рис. 180 Коронный разряд в газе

Закономерности возникновения электрического разряда в различных газах одинаковы, разница заключается в значениях коэффициентов, характеризующих процесс.

2.3.2 Применение тлеющего, искрового и дугового разрядов

Применение тлеющего разряда

Тлеющий разряд используется в газосветных трубках, лампах дневного света, стабилизаторах напряжения, для получения электронных и ионных пучков.

Если в катоде сделать щель, то сквозь нее в пространство за катодом проходят узкие ионные пучки, часто называемые каналовыми лучами.

Широко используется явление катодного распыления, т.е. разрушение поверхности катода под действием ударяющихся о него положительных ионов. Ультрамикроскопические осколки материала катода летят во все стороны по прямым линиям и покрывают тонким слоем поверхность тел (особенно диэлектриков), помещенных в трубку.

Таким способом изготавливают зеркала для ряда приборов, наносят тонкий слой металла на селеновые фотоэлементы.

Применение искрового разряда

При малой длине разрядного промежутка искровой разряд вызывает специфическое разрушение анода, называемое эрозией. Это явление было использовано в электроискровом методе резки, сверления и других видах точной обработки металла.

Искровой промежуток применяется в качестве предохранителя от перенапряжения в электрических линиях передач (например, в телефонных линиях).

Электрическая искра применяется для измерения больших разностей потенциалов с помощью шарового разрядника, электродами которого служат два металлических шара с полированной поверхностью.

Характерным примером искрового разряда является молния.

Главный канал молнии имеет диаметр от 10 до 25 см., а длина молнии может достигать нескольких километров. Максимальная сила тока импульса молнии достигает десятков и сотен тысяч ампер.

Применение дугового разряда

Вследствие высокой температуры электроды дуги испускают ослепительный свет, и поэтому электрическая дуга является одним из лучших источников света. Она потребляет всего около 0,3 ватта на каждую свечу и является значительно более экономичной чем лампы накаливания. Электрическая дуга впервые была использована для освещения П.Н. Яблочковым в 1875 г. и получила название «русского света», или «северного света». Электрическая дуга также применяется для сварки металлических деталей (дуговая электросварка). В настоящее время электрическую дугу очень широко применяют в промышленных электропечах. В мировой промышленности около 90% инструментальной стали и почти все специальные стали выплавляются в электрических печах.

Большой интерес представляет ртутная дуга, горящая в кварцевой трубке, так называемая кварцевая лампа. В этой лампе дуговой разряд происходит не в воздухе, а в атмосфере ртутного пара, для чего в лампу вводят небольшое количество ртути, а воздух выкачивают. Свет ртутной дуги чрезвычайно богат невидимыми ультрафиолетовыми лучами, обладающими сильным химическим и физиологическим действием. Ртутные лампы широко применяют при лечении разнообразных болезней («искусственное горное солнце»), а также при научных исследованиях как сильный источник ультрафиолетовых лучей.

2.3.3 Полупроводниковые фотоэлектрические приборы (фоторезисторы, фотодиоды, светодиоды)

Фотоэлектрическими приборами называют преобразователи лучистой энергии, благодаря которой изменяются электрические свойства вещества, образующего данный прибор.

Эти приборы делятся на два типа: с *внешним и внутренним фотоэффектом*. Суть внешнего фотоэффекта состоит в том, что при облучении фотокатода светом возникает явление *фотоэлектронной эмиссии*. При этом ток фотоэмиссии прямо пропорционален световому потоку (закон Столетова): $I_{\phi} = k\Phi$

где I_{ϕ} - ток фотоэмиссии, мкА;

Φ - световой поток, лм;

k - интегральная чувствительность фотокатода.

Интегральная чувствительность равна значению фототока, вызванного световым потоком стандартного источника белого света в 1 лм.

Главные закономерности фотоэффекта были выведены А. Эйнштейном на основе фотонной теории света. Согласно этой теории, лучистая энергия излучается и поглощается не как непрерывный поток, а определенными порциями - квантами. Каждый квант (фотон) в зависимости от частоты излучения ν обладает определенным количеством энергии: $W = h\nu$,

где $h = 6,66 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка.

Когда поток фотонов падает на фотокатод, энергия фотонов передается свободным электронам, которые, совершая определенную работу выхода W_0 , покидают катод с начальной скоростью v_0 . Этот процесс описывается уравнением Эйнштейна $h\nu = W_0 + (m_e \cdot v_0^2) / 2$.

Из этого уравнения следует, что электрон может покинуть катод, если работа выхода меньше энергии кванта.

Суть *внутреннего фотоэффекта* состоит в том, что в полупроводнике под действием световой энергии возникают подвижные носители зарядов: пары электронов и дырок. При этом энергия фотона идет на перемещение электрона из валентной зоны в зону проводимости и сопротивление полупроводника уменьшается.

Фоторезисторы

Фоторезисторы - приборы, принцип действия которых основан на *фоторезистивном эффекте* - изменении сопротивления полупроводникового материала под действием электромагнитного излучения.

Устройство фоторезистора показано на рис. 181 а. Пленка 2 из полупроводникового материала (сульфид свинца, соединения сернистого кадмия, висмут и т. д.) закреплена на диэлектрической подложке 3 (стекло, кварц, керамика). Световой поток Φ попадает на полупроводник через специальное отверстие в пластмассовом корпусе. Электроды, выполненные из благородных материалов (золото, платина), обеспечивают хороший контакт с полупроводником и не подвержены коррозии. Поверхность полупроводника покрыта защитным слоем прозрачного лака.

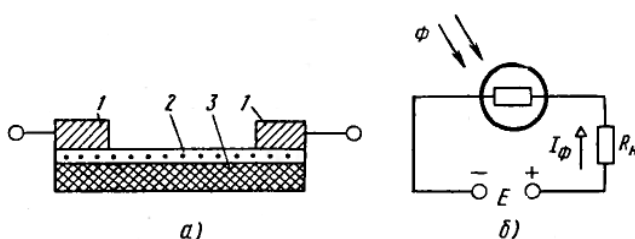


Рис. 181 Устройство (а) и схема включения (б) фоторезистора

В схеме (рис. 181 б) при отсутствии светового потока по цепи проходит так называемый темновой ток, обусловленный собственной проводимостью полупроводника. Этот ток весьма мал, и его значение определяется темновым сопротивлением R_T , имеющим широкий диапазон значений: 10^2 - 10^{10} Ом. Наибольшее значение R_T имеют фоторезисторы, выполненные из сернистого кадмия.

При освещении фоторезистора в нем возникают дополнительные свободные электрические заряды - электроны и дырки, в результате чего ток в цепи возрастает.

Разность между световым током I_{cv} и темновыми токами называется *фототоком*: $I_\phi = I_{cv} - I_m$.

Зависимость фототока I_ϕ от лучистого потока Φ иллюстрируется энергетической характеристикой (рис. 182). Нелинейность этой характеристики является недостатком фоторезисторов.

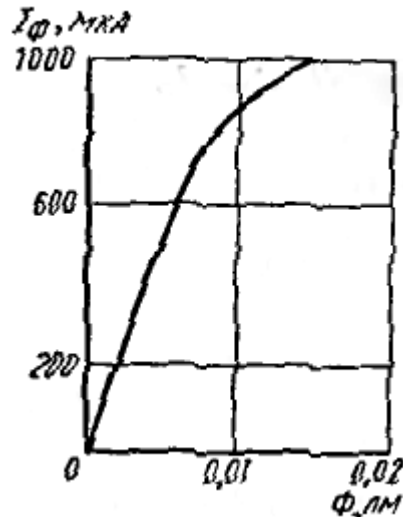


Рис. 182 Энергетическая характеристика фоторезистора

Значения фототока сильно зависят от спектрального состава светового потока. Эта зависимость видна из спектральной характеристики, вид которой для фоторезистора, выполненного из сульфида кадмия приведен, на рис. 183, где $I_{\phi max}$ - фототок, соответствующий максимуму спектральной чувствительности.

Интегральная чувствительность фоторезисторов на два порядка выше, чем электронных фотоэлементов.

Важным параметром фоторезисторов является *пороговый световой поток* Φ_n - минимальный поток излучения, который вызывает появление в цепи фоторезистора электрического напряжения, превышающего в 2-3 раза шумовое напряжение.

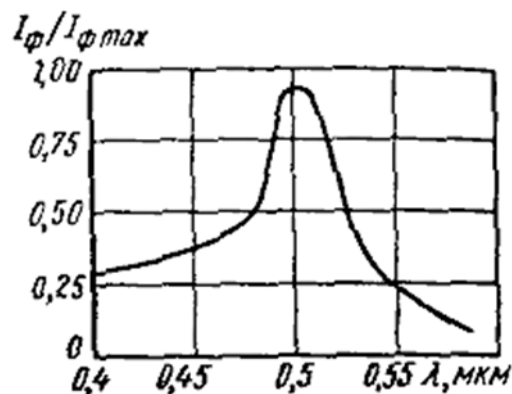


Рис. 183 Спектральная характеристика фоторезистора, выполненного из сульфида кадмия

Существенным недостатком фоторезистора является большая инерционность, обусловленная значительным временем генерации и рекомбинации электронов и дырок при изменении освещенности фоторезистора.

Фоторезисторы обозначают буквами ФС или СФ, затем следует буква и цифра, которые определяют состав и конструктивное оформление: А - Pb; К - CdS, Г - герметизированный корпус.

Например, ФСК-Г1 обозначает: фоторезистор из сернистого кадмия в герметизированном корпусе.

Фоторезисторы широко применяются в автоматике, вычислительной технике и промышленной электронике.

В частности, фоторезисторы используют в автоматах для сортировки изделий по их окраске, размерам или каким-нибудь другим признакам, которые можно контролировать в отраженном или проходящем свете.

Фотодиоды

Фотодиод представляет собой полупроводниковый диод, обратный ток которого зависит от освещенности p - n -перехода.

Фотодиоды могут работать в двух режимах: в режиме *фотогенератора* (фотоэлемента) без внешнего источника питания и в режиме *фотопреобразователя* с внешним источником.

В режиме *фотогенератора* используется фотогальванический эффект, суть которого заключается в создании разности потенциалов на зажимах неоднородного полупроводника при его освещении.

Фотодиоды образованы двумя примесными полупроводниками с различными типами электропроводности. Конструктивно фотодиоды выполнены так, что световой поток падает на плоскость p - n -перехода под прямым углом (рис. 184 а).

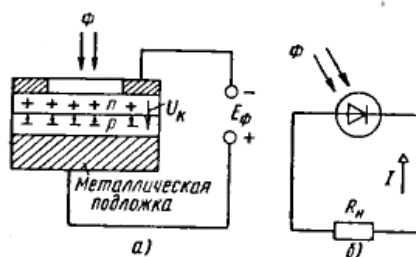


Рис. 184 Устройство (а) и схема включения (б) фотодиода в генераторном режиме

При отсутствии светового потока в области p - n -перехода существует потенциальный барьер с напряжением U_k (контактная разность потенциалов), обусловленный взаимной диффузией электронов в область p -типа и дырок в область n -типа.

При освещении p - n -перехода фотоны, попавшие на полупроводники, образуют пары свободных зарядов электрон-дырка. В результате в областях p - и n -типов увеличивается концентрация свободных электронов и дырок соответственно.

Под действием электрического поля, обусловленного контактной разностью потенциалов U_k (рис. 184 а), неосновные носители p -области - электроны - переходят в n -область, а неосновные носители n -области - дырки - в p -область. В результате этого процесса в n -области возникает избыток электронов, а в p -области - избыток дырок. Таким образом, на зажимах фотодиода возникает фото-ЭДС E_ϕ , равная контактной разности потенциалов и имеющая значение около 1 В.

При замыкании освещенного фотодиода на внешнюю нагрузку R_n (рис. 184 б) в цепи возникает ток I , обусловленный движением неосновных носителей зарядов. Следовательно, в данной схеме происходит преобразование лучистой энергии света в электрическую.

Фотодиоды, работающие в генераторном режиме, довольно широко используют в качестве источников, преобразующих солнечную энергию. Такие источники именуют фотоэлементами или солнечными элементами. Из них строят солнечные батареи, которые используют на различных объектах в качестве электростанций. Фотоэлементы отличаются от фотодиодов только своими конструктивными особенностями. Современные энергетические фотоэлементы изготавливают из монокристаллического кремния, тонкого и гибкого.

Фотодиоды и фотоэлементы изготавливают из германия, кремния, селена, сернистого серебра, арсенида индия и т. д.

В режиме фотопреобразователя в цепь последовательно с нагрузкой включают источник напряжения в запирающем направлении (рис. 185).

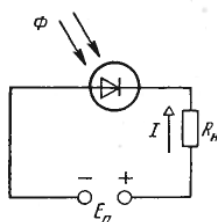


Рис. 185 Схема включения фотодиода в преобразовательном режиме

Когда фотодиод не освещен, в цепи проходит темновой ток. При освещении фотодиода происходит генерация электронов и дырок. Под действием электрического поля источника E_a неосновные носители слоев p - и n -типа полупроводника создают в цепи ток, значение которого практически определяется только световым потоком Φ и равно приблизительно току короткого замыкания в генераторном режиме. Поэтому чувствительность фотодиодов в обоих режимах принято считать одинаковой. Для германиевых фотодиодов интегральная чувствительность достигает 20 мА/лм.

Более точно ток можно определить по вольт-амперным характеристикам (рис. 186) графическим способом.

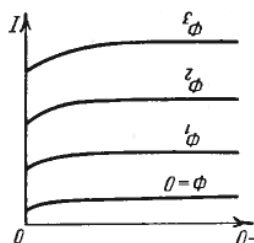


Рис. 186 Вольт-амперные характеристики фотодиода в преобразовательном режиме

Фотодиоды широко применяются в промышленности: в вычислительной технике, в системах передачи данных, построенных на лазерных атмосферных и оптоволоконных линиях связи, в регистрирующих и измерительных приборах фотометрии, в видеоаппаратуре, системах автоматизации производственных процессов и т. д.

Фотодиоды обозначают буквами ФД. затем следуют буквы обозначающие материал, из которого изготовлен прибор. Например, ФД-ГЗ-001 означает: фотодиод германиевый, легированный золотом, номер разработки 001.

Фотодиоды применяются в охране границы при необходимости обработки информации, передаваемой по оптоволоконным линиям связи и в оптико-электронных системах охраны протяженных участков границы, например, ВОСС «ВОРОН» (рис. 187).



Рис. 187 Модуль фотоприемников ВОСС «ВОРОН»

3. ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМОТЕХНИКИ

3.1 Полупроводниковые выпрямители

Выпрямители - это устройства, которые служат для преобразования переменного тока в постоянный. Они широко применяются в различных электронных аппаратах, так как большинство блоков этих аппаратов требует питания постоянным током.

На рис. 188 показана структурная схема выпрямителя, в состав которого входят: силовой трансформатор, служащий для преобразования переменного питающего напряжения; вентиль, обладающий односторонней проводимостью и обеспечивающий преобразование переменного тока в выпрямленный (ток одного направления); сглаживающий фильтр, который служит для преобразования выпрямленного тока в ток, близкий по форме к постоянному.

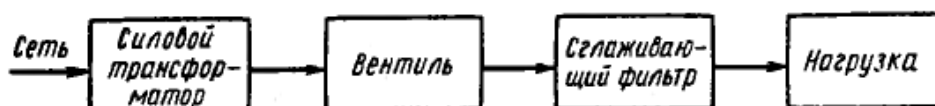


Рис. 188 Структурная схема выпрямителя

Современные выпрямители различают по типу вентилей, схеме их включения и числу фаз источника переменного напряжения. Выпрямители подразделяют также на управляемые и неуправляемые. Для питания блоков электронной аппаратуры, как правило, применяют выпрямители малой мощности с питанием от однофазных сетей переменного тока. В тех случаях, когда необходимо получить повышенное постоянное напряжение, а первичный источник также вырабатывает постоянное напряжение, применяют специальные преобразователи - инверторы.

3.1.1 Общие сведения о выпрямителях. Однофазный однополупериодный выпрямитель, принцип работы и его параметры

На рис. 189 представлена схема однополупериодного выпрямителя. Переменное синусоидальное напряжение u_2 (рис. 190 а) подают на диод D . За счет односторонней проводимости диодов ток i_2 (рис. 190 б) проходит только в положительные полупериоды напряжения u_2 и, следовательно, имеет импульсную форму.

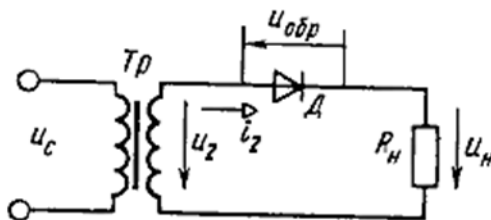


Рис. 189 Схема однополупериодного выпрямителя

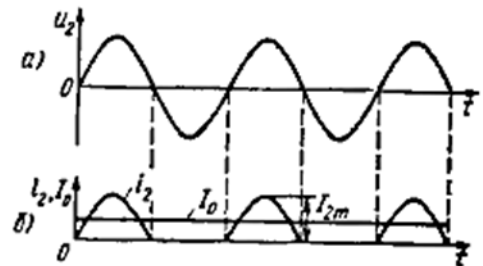


Рис. 190 Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора (а); выпрямленный ток i_2 , постоянная составляющая тока I_0 (б)

Постоянная составляющая этого тока I_0 определяет средним значением тока i_2 , проходящего через нагрузку R_n за полупериод.

Средним значением тока i_2 называется среднее арифметическое значение из всех мгновенных значений за полупериод:

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i_2 dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i_2 dt.$$

Так как $i_2 = I_{2m} \sin \omega t$, то

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_{2m} \sin \omega t dt,$$

или

$$I_0 = \frac{I_{2m}}{\omega T} \int_0^{T/2} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2I_{2m}}{\omega T}.$$

Так как $\omega T = 2\pi$, то

$$I_0 = I_{2m} / \pi = 0,318 I_{2m}.$$

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения на R_n определяется законом Ома:

$$U_0 = I_0 R_n = 0,318 I_{2m} R_n.$$

Найдем соотношение между U_0 и действующим значением напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора u_2 .

Так как $R_H \gg R_{np.d}$ ($R_{np.d}$ - прямое сопротивление диода), то

$$U_{2m} = I_{2m} R_H.$$

Следовательно,

$$U_0 = 0,318 U_{2m} = U_{2m} / \pi.$$

Но $U_{2m} = \sqrt{2U_2}$, откуда

$$U_0 = \sqrt{2U_2} / \pi = 0,45 U_2.$$

Значения U_0 задают при расчете выпрямителя. На основании этого значения определяют U_2 и по известному значению напряжения сети U_c определяют коэффициент трансформации $k = U_2 / U_c$.

Ранее было установлено, что полупроводниковые диоды характеризуются допустимым обратным напряжением $U_{обр.д}$. Во время отрицательного полупериода напряжения u_2 диод D находится под действием обратного напряжения, максимум которого равен U_{2m} , так как $R_{обр.д} \gg R_H$. Следовательно,

$$U_{обр.д} = U_{2m} = 3,14 U_0.$$

Отсюда следует, что при выборе диода для работы в схеме однополупериодного выпрямления надо соблюдать неравенство $U_{обр.д} > 3,14 U_0$.

Если такой диод подобрать не удастся, прибегают к последовательному включению нескольких диодов.

Среднее значение тока, проходящего через диод, не должно превышать $I_{ср.д}$. Для однополупериодного выпрямителя $I_{ср} = I_0$ и, следовательно, $I_0 \leq I_{ср.д}$.

Если последнее неравенство не выполняется для диодов имеющихся типов, необходимо включить несколько диодов параллельно.

Важным параметром, характеризующим работу выпрямителя, является коэффициент пульсации:

$$k_n = U_{1m} / U_0$$

где U_{1m} - амплитуда первой гармоники переменного напряжения на нагрузке выпрямителя (импульсное напряжение на нагрузке может быть разложено в ряд Фурье). Так как для однополупериодного выпрямителя $U_{1m} = U_{2m} / 2 = \pi U_0 / 2 = 1,57 U_0$, то получаем $k_n = 1,57$.

Таким образом, k_n для однополупериодного выпрямителя велик, что является главным недостатком данной схемы.

Наряду с этим, в таком выпрямителе плохо используются обмотки трансформатора. Действительно, согласно выражения $I_0 = 0,318 I_{2m}$, так как при однополупериодном выпрямлении $I_{2m} = 2 I_2$, то $I_0 = 0,636 I_2$, т. е. постоянная составляющая значительно меньше действующего значения тока во вторичной обмотке.

3.1.2 Мостовые выпрямители, схемы, принцип действия и параметры выпрямителей

Наиболее широкое распространение получила мостовая схема двухполупериодного выпрямителя (рис. 191). Схема состоит из силового трансформатора T_p и четырех диодов D_1-D_4 . К диагонали моста ac подключена вторичная обмотка трансформатора, к диагонали bd - сопротивление нагрузки R_H .

В положительный полупериод напряжения u_2 (рис. 192 а), когда потенциал точки a выше потенциала точки c (рисунок 3.1.4), открыты диоды D_1

и D_3 и ток проходит по цепи: точка a , диод D_1 сопротивление нагрузки R_n диод D_3 , точка c . В отрицательный полупериод напряжения u_2 открыты диоды D_2 и D_4 и теперь ток проходит по цепи: точка c , диод D_2 , R_n диод D_4 , точка a . Через сопротивление нагрузки R_n ток проходит все время в неизменном направлении. Таким образом, ток в нагрузке имеет форму, показанную на рис. 192 б, что и соответствует двухполупериодному выпрямлению.

Постоянная составляющая тока нагрузки I_0 определяется, как и в схеме однополупериодного выпрямителя, средним значением тока I_n и, согласно выражения $I_0 = I_{2m}/\pi = 0,318I_{2m}$, получим $I_0 = 2I_{2m}/\pi = 0,636I_{2m}$, т. е. в двухполупериодном выпрямителе постоянная составляющая тока в два раза больше, чем в однополупериодном.

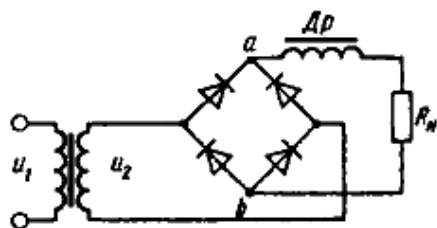


Рис. 191 Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя

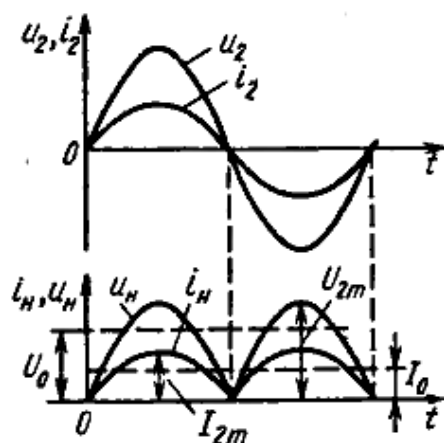


Рис. 192 Графики напряжения и токов в мостовой схеме выпрямителя

Так как в мостовой схеме через вторичную обмотку трансформатора проходит синусоидальный ток i_2 то $I_{2m} = \sqrt{2} \times I_2$ и, согласно выражения $I_0 = 2I_{2m}/\pi = 0,636 \times I_{2m}$, получим $I_0 = 0,9I_2$.

Сравнив это значение тока с I_0 для однополупериодного выпрямителя, приходим к выводу, что в данной схеме гораздо лучше используются обмотки трансформатора по току. Это позволяет значительно уменьшить габариты трансформатора.

Найдем теперь соотношение между U_0 и U_2 . Так как постоянная составляющая напряжения $U_0 = I_0 R_n$ то $U_0 = 0,636 I_{2m} R_n$. Если учесть, что $R_n \gg R_{np,д}$, то $I_{2m} R_n = U_{2m}$, т.е. $U_0 = 0,636 U_{2m}$, но так как $U_{2m} = \sqrt{2} U_2$, то получим $U_0 = 0,9 U_2$.

Обратное напряжение, действующее на каждый диод в данной схеме такое же, как в схеме однополупериодного выпрямителя. Действительно, когда диоды D_1 и D_3 открыты, к диоду D_2 приложено полное обратное напряжение вторичной обмотки через открытый диод D_1 . Точно такое же обратное напряжение приложено и к диоду D_4 . Следовательно, $U_{обр.м} = U_{2m} = \sqrt{2} U_2$ и, соответственно:

$$U_{обр.м} = 1,57 U_0$$

Малое значение коэффициента пульсации $k_n = 0,67$ также является преимуществом данной схемы.

Трехфазный выпрямитель

Трехфазные выпрямители применяют в устройствах большой и средней мощностей. Рассмотрим одну из возможных схем трехфазного выпрямителя, представленную на рис. 193 а.

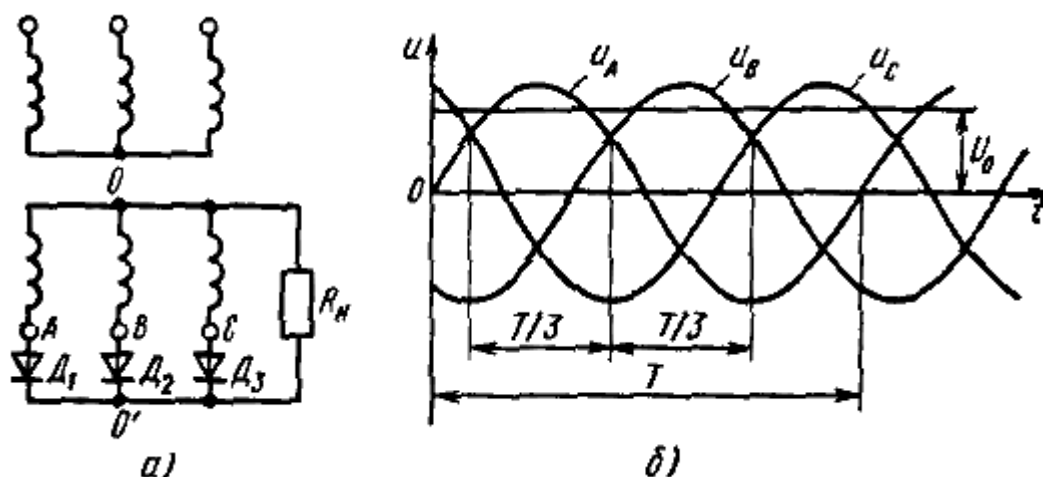


Рис. 193 Схема трехфазного выпрямителя (а) и фазные напряжения в нем (б)

Вторичные обмотки трехфазного трансформатора соединены звездой. К фазам *A*, *B* и *C* трансформатора подключены диоды D_1 , D_2 , D_3 , катоды которых присоединяют к точке *O*. Между нейтральной точкой трансформатора *O* и точкой *O'* включена нагрузка R_n .

Ток через каждый диод может проходить только тогда, когда потенциал на его аноде выше потенциала на катоде. Это возможно в течение $1/3$ периода, когда напряжение в данной фазе выше напряжений в двух других фазах. Так, например, когда открыт диод D_1 , через него и нагрузку проходит ток, определяемый u_A . В это время диоды D_2 и D_3 заперты, так как потенциалы их катодов выше потенциалов анодов. В следующую треть периода открыт диод D_2 и т.д.. Характер изменения напряжения фаз соответствует открытому состоянию диодов, показан на рисунке 3.1.6, б. Если считать диоды идеальными, то на нагрузке R_n равно напряжению фазы с открытым диодом и, следовательно, ток в нагрузке изменяется по тому же закону, т.е. ток проходящий через нагрузку, не падает до нуля, как это имело место в схемах одно и двухполупериодного выпрямителей. Таким образом, пульсация тока в трехфазном выпрямителе относительно не велика и коэффициент пульсации $k_n=0,25$.

Среднее значение выпрямленного тока в нагрузке $I_0=0,827I_m$. В каждом диоде ток проходит в течение $T/3$ и поэтому его среднее значение $I_{cp}=I_0/3$. Выпрямленное напряжение на нагрузке $U_0=0,827U_m$, но так как $U_m=\sqrt{2}U$, где U - действующее значение фазного напряжения на вторичной обмотке трансформатора, то $U_0=1,17U$.

Очевидно, что максимальное значение обратного напряжения на каждом диоде определяется амплитудой линейного напряжения $U_{обр.м} = \sqrt{3} U_m$, а так как $U_m=1,21U_0$, то $U_{обр.м} = 2,09U_0$.

Приведенная на рис. 193 а схема выпрямления широко используется в автомобильных генераторах постоянного тока. В качестве первичной обмотки

трансформатора выступает обмотка возбуждения, размещенная на роторе генератора. Напряжение на выходе генератора поддерживается в пределах 14,2-14,6 В для автомобилей с 12-вольтовой бортовой электросетью (ВАЗ, УАЗ, другие типы легковых и внедорожных автомобилей) и 28,6-29 В («Садко», «Волат», другие грузовые или бронированные транспортные средства) путем изменения тока обмотки возбуждения с помощью электронного регулятора.

3.1.3 Применение полупроводниковых выпрямителей в системах электропитания

Для питания ряда узлов электронной аппаратуры обычно требуется постоянное напряжение. Напряжение же, получаемое на выходе рассмотренных выпрямительных схем, является или пульсирующим (трехфазный выпрямитель), или импульсным (одно- и двухполупериодный выпрямитель). Для того чтобы выпрямленное напряжение было практически постоянным, применяют *сглаживающие фильтры*.

Количественно работа фильтра характеризуется *коэффициентом сглаживания пульсации q* , который показывает, во сколько раз уменьшается пульсация при прохождении сигнала через данный фильтр: $q = k_n / k'_n$, здесь k_n и k'_n - коэффициенты пульсации сигнала до и после.

Наряду с малым значением коэффициента пульсации в фильтре не должно быть значительных потерь постоянной составляющей выпрямленного напряжения.

Сглаживающие фильтры подразделяются на емкостные, индуктивные, индуктивно-емкостные и резисторно-емкостные.

Наиболее простым является *емкостный фильтр*, который состоит из конденсатора C_ϕ , включенного параллельно с нагрузкой (рис. 194 а).

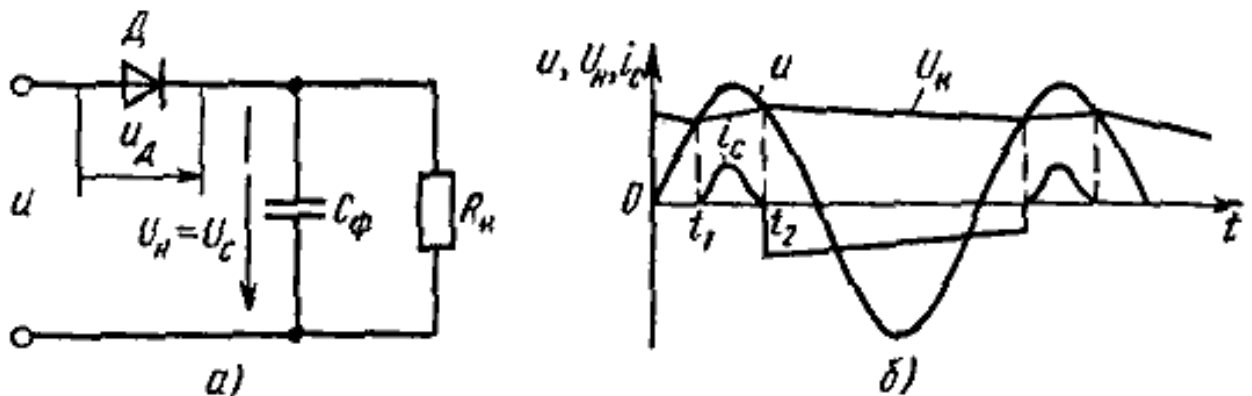


Рис. 194 Схема емкостного фильтра (а); графики напряжений и токов в нем (б)

Работа фильтра основана на способности конденсатора быстро запасать электрическую энергию, а затем относительно медленно отдавать ее в нагрузку.

Когда напряжение на диоде D , равное разности напряжения на конденсаторе, положительно, т.е. $U_D = u - U_C > 0$, то диод открыт и C_ϕ заряжается. Как это видно из графика над Рисунок 4.7.б, зарядка происходит в интервале времени от t_1 до t_2 .

Так как сопротивление диода D весьма мало, то конденсатор успевает зарядиться почти до u . Затем, когда $u - U_C < 0$, диод заперт, и конденсатор

медленно разряжается через R_n до тех пор, пока напряжение источника u снова не станет больше U_c . Время разрядки зависит от постоянной времени $\tau = C_f R_n$, которая показывает, в течение какого времени напряжение на конденсаторе уменьшится в 2,72 раза.

Емкостные фильтры, как правило, используют в выпрямителях малой мощности.

Типичной схемой выпрямителя с применением емкостных фильтров, являются умножитель напряжения. На рис. 195 показана схема удвоителя напряжения.

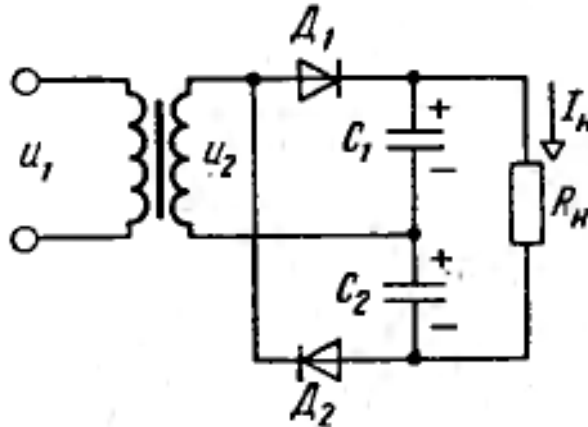


Рис. 195 Схема удвоителя напряжения

В один из полупериодов напряжения, когда открыт диод D_1 , конденсатор C_1 заряжается почти до u_2 . В это время диод D_2 закрыт. В следующий полупериод открывается D_2 и происходит зарядка конденсатора C_2 . Диод D_1 закрыт. Так как конденсаторы C_1 и C_2 включены последовательно, напряжение на нагрузке R_n удваивается. При соответствующем выборе параметров схемы разрядка конденсаторов через R_n происходит достаточно медленно.

В выпрямителях с большими токами применяют индуктивные фильтры (рис. 196), которые являются индуктивной катушкой (дросселем) с относительно большой индуктивностью.

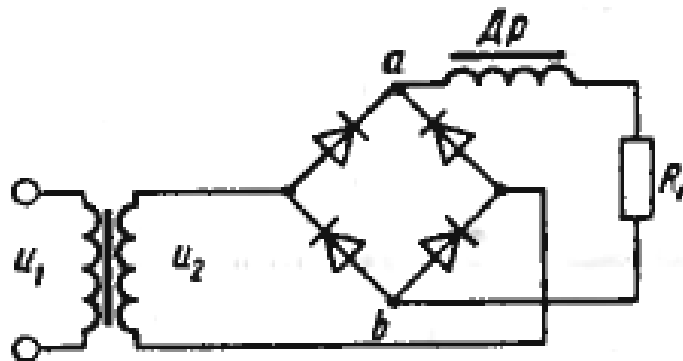


Рис. 196 Схема индуктивного фильтра в цепи выпрямителя

Индуктивные фильтры работают достаточно эффективно в двухполупериодных выпрямителях, так как за счет явления самоиндукции ток в

нагрузке i_n не падает до нуля при нулевом напряжении между точками a и b цепи, и коэффициент пульсации заметно уменьшается (рис. 197).

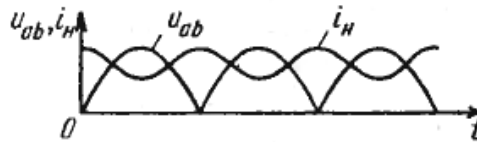


Рис. 197 График напряжения и тока в двухполупериодном выпрямителе с индуктивным фильтром

В однополупериодном выпрямителе применение индуктивного фильтра нецелесообразно, так как во время отрицательного полупериода ток в нагрузке падает до нуля, и коэффициент пульсации практически не снижается.

На практике, как правило, применяют *комбинированные фильтры*: *Г-образные* и *П-образные* (рис. 198).

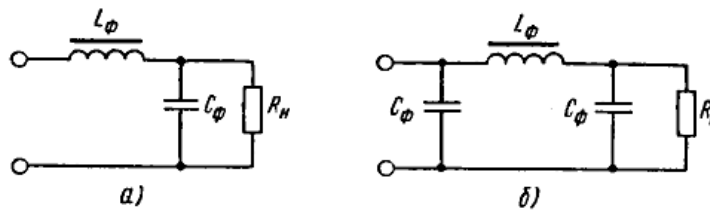


Рис. 198 Схемы фильтров:
а) Г-образного; б) П-образного

Эти фильтры обеспечивают хорошее сглаживание тока в нагрузке. Их работу удобно объяснять, представляя напряжение на входе фильтра как сумму постоянной составляющей и целого ряда гармоник (переменных составляющих). Тогда индуктивность и емкость фильтра представляют собой *делитель*. На индуктивном сопротивлении делителя выделяется большая часть переменной, а на емкостном — большая часть постоянной составляющей напряжения выпрямителя.

В маломощных схемах дроссель может быть заменен резистором. Это дает возможность уменьшить массу, габариты и стоимость фильтра, однако сглаживание при этом ухудшается.

3.2 Усилители электрических сигналов

В промышленной электронике очень часто возникает необходимость в усилении электрических сигналов, например, при измерениях неэлектрических величин электрическими методами, контроле и автоматизации технологических процессов. Для решения этих задач используют *электронные усилители* — устройства, которые служат для усиления напряжения, тока или мощности слабых электрических сигналов.

В настоящее время в усилителях широко применяют транзисторы, которые заменили электронные лампы.

Классификация усилителей. Усилители могут быть классифицированы по ряду признаков: *по роду усилительных элементов* (ламповые, транзисторные); *по роду усиливаемой величины* (усилители напряжения, тока и мощности); *по числу каскадов* (одно-, двух- и многокаскадные). Одним из наиболее важных признаков является *диапазон частот усиливаемых сигналов*, в котором

усилитель обеспечивает нормальную работу. По данному признаку различают следующие типы усилителей.

Усилители низкой частоты (УНЧ) которые служат для усиления непрерывных периодических сигналов в диапазоне низких частот (от десятков герц до десятков килогерц). Особенностью УНЧ является то, что отношение верхней усиливаемой частоты f_v к нижней f_n велико и имеет значение от нескольких сотен до нескольких тысяч.

Усилители постоянного тока (УПТ) предназначены для усиления медленно меняющихся напряжений и токов в диапазоне частот от нуля до некоторой наибольшей частоты. УПТ широко применяются в устройствах автоматики и вычислительной техники.

Избирательные усилители, характеризующие небольшими значениями отношения верхней и нижней частот ($1 < f_v/f_n \leq 1,1$). Как правило, это *усилители высокой частоты* (УВЧ).

Импульсные, или широкополосные усилители работают в диапазоне от нескольких килогерц до нескольких десятков мегагерц и используются в устройствах импульсной связи, радиолокации и телевидения.

3.2.1 Параметры и характеристики усилителей

Коэффициент усиления в соответствии с видом усиливаемой величины называют коэффициентом усиления по напряжению, току или мощности.

Коэффициент усиления показывает, во сколько раз напряжение, ток или мощность на выходе усилителя больше, чем на входе, и обозначается соответственно K_U (K_I , K_P). Так коэффициент усиления по напряжению $K_U = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ (обычно K_U обозначают просто K).

Для *многокаскадного усилителя* структурная схема приведена на рис. 199, Общий коэффициент усиления $K = K_1 K_2 \dots K_n$, где $K_1 K_2 \dots K_n$ коэффициент усиления соответствующих каскадов.

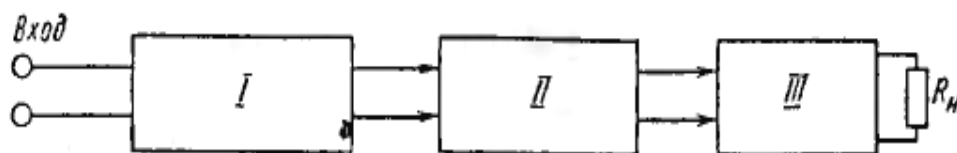


Рис. 199 Структурная схема трехкаскадного усилителя

Коэффициенты усиления часто выражают в логарифмических единицах - белах и децибелах, ($1\text{Б} = 10\text{дБ}$).

Коэффициент усиления, выраженный в децибелах, $K_{\text{дБ}} = 10 \lg(U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})$.

Общий коэффициент усиления, например, трехкаскадного усилителя в логарифмических единицах $K_{\text{дБ}} = K_{1\text{дБ}} + K_{2\text{дБ}} + K_{3\text{дБ}}$.

В тех случаях, когда в децибелах необходимо определить усиление по мощности, применяют формулу $K_{P,\text{дБ}} = 20 \lg(U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})$, где числовой множитель появляется потому, что мощность пропорциональна квадрату напряжения. Действительно, $K_{P,\text{дБ}} = 10 \lg(P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}) = 10 \lg(U_{\text{вых}}^2/U_{\text{вх}}^2) = 20 \lg(U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})$.

Последнее выражение справедливо при равенстве входного и выходного сопротивлений.

Выходная мощность - это мощность, которая развивается на выходном нагрузочном сопротивлении усилителя: $P_{\text{вых}} = U_{\text{ВЫХ}}^2 / R_H = U_{\text{т вых}} \cdot I_{\text{т вых}} / (2R_H)$.

Обычно используют значения номинальной выходной мощности - наибольшей мощности, развиваемой в нагрузке, при которой искажения не превышают заданных значений.

Коэффициент полезного действия определяется отношением полезной выходной мощности к мощности, потребляемой всеми источниками питания:

$$\eta = P_{\text{вых}} / P_{\text{общ}}$$

Частотные искажения - это искажения, вызванные различной степенью усиления на различных частотах из-за присутствия в схемах усилителей реактивных элементов (индуктивных катушек и конденсаторов).

Фазовые искажения - это искажения, вызванные нелинейной зависимостью сдвига фазы между входным и выходным напряжениями усилителя от частоты. Причиной этих искажений является присутствие реактивных элементов в схемах усилителя.

Нелинейные искажения возникают из-за нелинейности вольтамперных характеристик усилительных элементов (электронных ламп, транзисторов) и проявляются в искажении формы усиливаемого сигнала.

В промышленной электронике наиболее распространены усилители низкой частоты. В связи с этим рассмотрение работы усилителей в данной главе в основном связано с УНЧ.

3.2.2 Схемы усилителей на биполярных транзисторах и их свойства

Усилители низкой частоты в основном предназначены для обеспечения заданной мощности на выходном устройстве, в качестве которого может быть громкоговоритель, записывающая головка магнитофона, обмотка реле, катушка измерительного прибора и т. д. Источниками входного сигнала являются микрофон, звукозаписывающий аппарат, фотоэлемент и всевозможные преобразователи неэлектрических величин в электрические. Как правило, входной сигнал очень мал, его напряжение недостаточно для нормальной работы усилителя. В связи с этим перед усилителем мощности включают один или несколько каскадов предварительного усиления, выполняющих функции усилителей напряжения.

В предварительных каскадах УНЧ в качестве нагрузки чаще всего используют резисторы, иногда трансформаторы.

Усилители на биполярных транзисторах обычно собирают по схеме с общим эмиттером. Рассмотрим работу такого каскада (рис. 200).

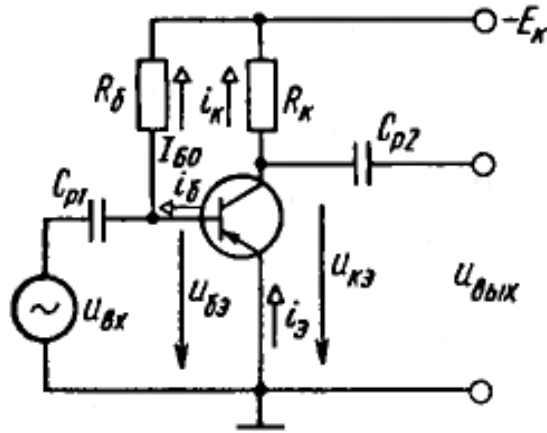


Рис. 200 Схема резистивного усилителя с общим эмиттером

Напряжение синусоидального сигнала $u_{вх}$ подают на участок база-эмиттер через разделительный конденсатор C_{p1} , что создает пульсацию тока базы относительно постоянной составляющей $I_{б0}$. Значение $I_{б0}$ определяется напряжением источника E_k и сопротивлением резистора R_b . Изменение тока базы вызывает соответствующее изменение тока коллектора, проходящего по сопротивлению нагрузки R_n . Переменная составляющая тока коллектора создает на сопротивлении нагрузки R_k усиленное по амплитуде падение напряжения $u_{вых}$.

Расчет такого каскада можно произвести графически с использованием приведенных на рис. 201 входных и выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с ОЭ.

Если сопротивление нагрузки R_n и напряжение источника E_k заданы, то положение линии нагрузки определяется точками C и D . При этом точка D задана значением E_k , а точка C - током $I_k = E_k/R_n$. Линия нагрузки CD пересекает семейство выходных характеристик. Выбираем рабочий участок на линии нагрузки так, чтобы искажения сигнала при усилении были минимальны. Для этого точки пересечения линии CD с выходными характеристиками должны находиться в пределах прямолинейных участков последних. Этому требованию соответствует участок AB линии нагрузки.

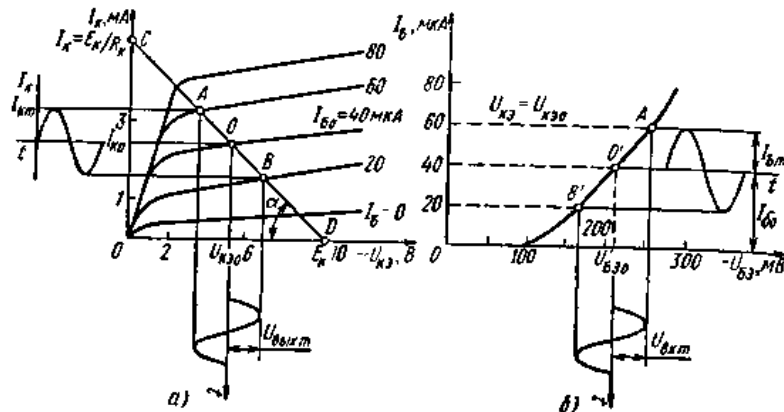


Рис. 201 Графический анализ работы схемы с ОЭ

Рабочая точка при синусоидальном входном сигнале находится в середине этого участка - точка O . Проекция отрезка AO на ось ординат

определяет амплитуду коллекторного тока, а проекция того же отрезка на ось абсцисс - амплитуду переменной составляющей коллекторного напряжения. Рабочая точка O определяет ток коллектора $I_{к0}$ и напряжение на коллекторе $U_{кэ0}$, соответствующие режиму покоя.

Кроме того, точка O определяет ток покоя базы $I_{б0}$, а следовательно, и положение рабочей точки O' на входной характеристике (рис. 201 а, б).

Точкам A и B выходных характеристик соответствуют точки A' и B' на входной характеристике. Проекция отрезка $A'O'$ на ось абсцисс определяет амплитуду входного сигнала $U_{вхт}$, при которой будет обеспечен режим минимальных искажений.

Строго говоря, $U_{вхт}$ необходимо определять по семейству входных характеристик. Но так как входные характеристики при различных значениях напряжения $U_{кэ}$ отличаются незначительно, на практике пользуются входной характеристикой, соответствующей среднему значению $U_{кэ} = U_{кэ0}$.

В устройствах автоматики нагрузкой выходного каскада усилителя низкой частоты может быть электромагнитное реле, электродвигатель или какой-нибудь иной исполнительный механизм. В радиоприемнике или проигрывателе нагрузкой является обмотка динамика.

Выходной каскад, так же как и предварительный каскад УНЧ, может быть собран на транзисторе по схеме с общим эмиттером. Следует отметить, что так как сопротивление нагрузки R_H обычно гораздо меньше внутреннего сопротивления коллекторной цепи $R_{вн.к}$ мощность, которая выделяется на нагрузке включенной непосредственно в цепь коллектора, будет весьма мала. Для того чтобы эта мощность была максимально возможной, необходимо выполнить условие $R_H = R_{вн.к}$, т. е. сопротивление нагрузки должно быть равно внутреннему сопротивлению источника полезного сигнала. Для этого на практике применяют согласующие трансформаторы (рис. 202).

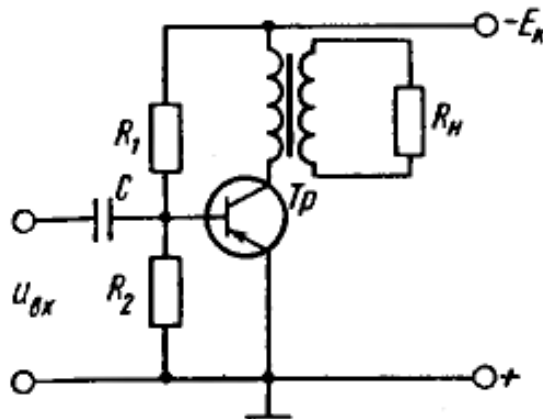


Рис. 202 Схема однотактного транзисторного усилителя мощности

Подобные схемы однотактного транзисторного усилителя мощности с общим эмиттером применяются в том случае, если выходная мощность не превышает 3-5 Вт. Нагрузка R_H включена через согласующий трансформатор Tr .

Смысл согласования состоит в том, чтобы вносимое в первичную обмотку трансформатора из вторичной обмотки сопротивление R_H было равно внутреннему сопротивлению коллекторной цепи $R_{вн.к}$ или соизмеримо с ним.

Тогда при заданных R_H и $R_{вн.к.}$ задача сводится к определению коэффициента трансформации k .

Известно что $U_2/U_1=W_2/W_1=k$, а $I_2/I_1=W_2/W_1=k$. Таким образом, вносимое в первичную цепь сопротивление

$$R_H = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2/k}{I_2k} = \frac{U_2}{I_2k^2} = \frac{R_H}{k^2}.$$

Если принять $R_H=R_{вн.к.}$, то коэффициент трансформации $k = \sqrt{R_H/R_{вн.к.}}$, т. е. трансформатор должен быть *понижающим*, так как $R_H < R_{вн.к.}$.

Рассмотренные схемы предварительного и выходного каскадов УНЧ работают в режиме *A*. При таком режиме начальное положение рабочей точки O выбирают в середине нагрузочной прямой CD . Амплитуда переменной составляющей коллекторного тока при этом меньше тока покоя коллектора. Работа в режиме *A* характеризуется минимальными нелинейными искажениями и низким КПД (порядка 40%). В этом режиме обычно работают все предварительные и маломощные выходные каскады УНЧ, собранные на одном транзисторе или одной электронной лампе. В том случае, когда необходимо получить выходную мощность более 5 Вт, применяют двухтактные усилители, собранные на двух транзисторах.

Рассмотрим работу такого усилителя (рис. 203).

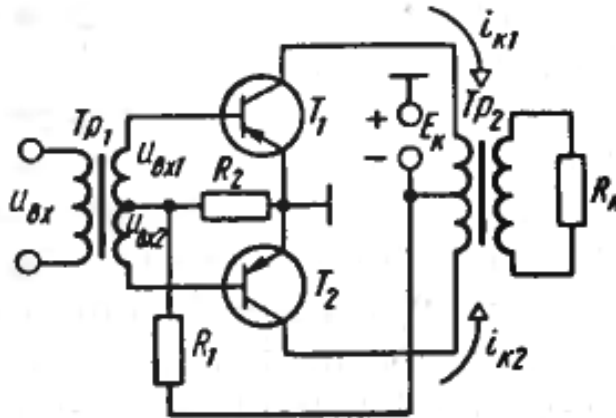


Рис. 203 Схема двухтактного транзисторного усилителя мощности

Усилитель состоит из двух одинаковых половин, каждая из которых аналогична усилителю, представленному на рис. 202. Особенность двухтактной схемы состоит в том, что ее можно использовать в таком режиме, когда ток покоя коллекторных цепей близок к нулю. Этот режим называется режимом *B*. При работе в таком режиме КПД усилителя может достигать 70 %.

Рабочая точка O' на входной характеристике должна располагаться в области токов базы, близких к нулю (рис. 204 а).

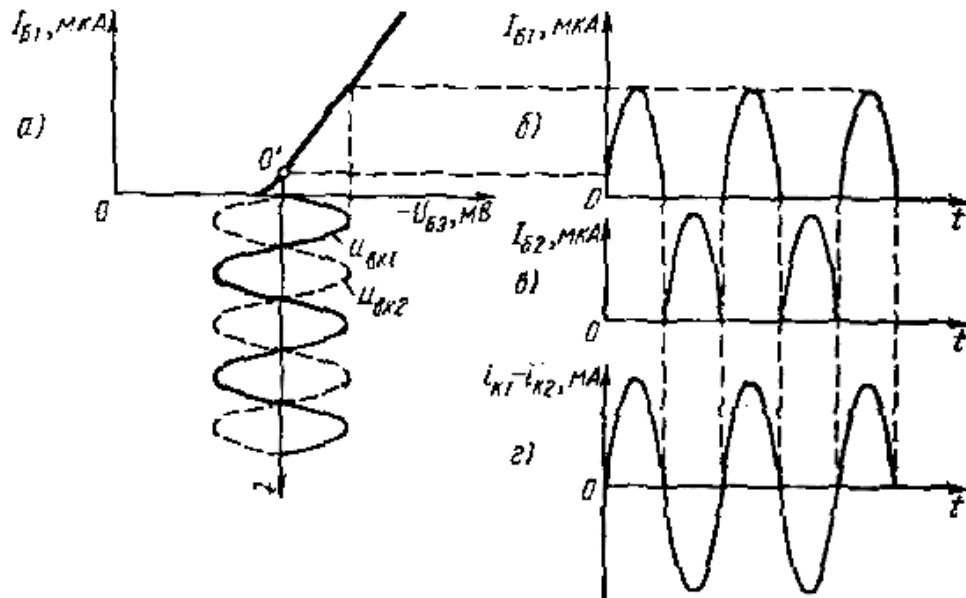


Рис. 204 Графики, поясняющие работу усилителя в режиме В

В результате этого обе половины схемы работают поочередно, причем каждая открывается во время действия положительных полупериодов входных напряжений $u_{вх1}$ и $u_{вх2}$, так как они сдвинуты по фазе на 180° . Импульсы тока баз и коллекторов также сдвинуты на 180° (рис. 204 б, в). При этом в магнитопроводе Tr_2 образуется магнитный поток, близкий к синусоидальному, так как через первичную обмотку трансформатора проходит ток $i = i_{К1} - i_{К2}$ (рис. 204 г).

В современных усилителях стараются отказаться от применения выходного трансформатора, который имеет большие габариты и массу, превышающие общие размеры всех остальных вместе взятых элементов усилителя, а также вносит нелинейные искажения в усиливаемый сигнал. В этом случае выходной каскад строят по двухтактной схеме (рис. 205). Для формирования положительной и отрицательной полуволн сигнала используются транзисторы различной проводимости $n-p-n$ и $p-n-p$ с близкими параметрами, которые называют комплементарной парой транзисторов.

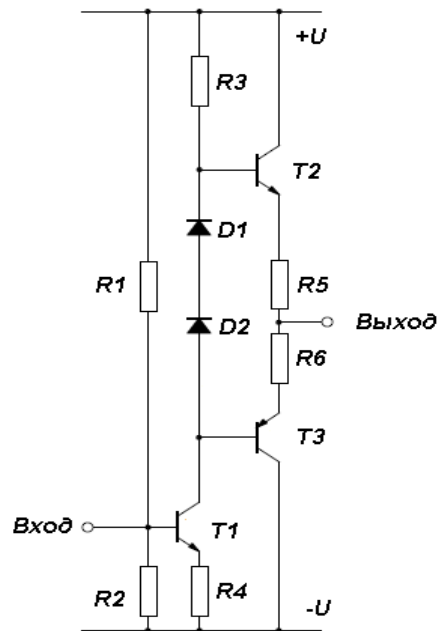


Рис. 205 Бестрансформаторный выходной каскад

На транзисторе $T1$, включенном по схеме ОЭ, выполнен усилитель напряжения, к которому подключен усилитель тока на транзисторах $T2$, $T3$, каждый из которых представляет собой эмиттерный повторитель (схема включения ОК). В таком включении они открываются поочередно, пропуская ток в нагрузку то от положительного, то от отрицательного полюса источника питания. Сопротивление резисторов $R5$, $R6$ выбираются небольшим, они предназначены для стабилизации начального тока транзисторов и совместно с диодами $D1$, $D2$ обеспечивают работу выходного каскада в режиме B .

Такой подход позволяет выполнить усилитель в виде интегральной микросхемы, в которой объединены все необходимые предварительные и выходные каскады.

3.2.3 Применение усилителей

Обратной связью называется такая связь между выходом и входом усилителя, при которой часть энергии полезного усиленного сигнала с его выхода подается на вход.

Обратную связь можно применять специально для повышения стабильности в работе усилителя, и тогда она является полезной. Однако, когда обратная связь возникает в результате взаимного влияния различных цепей, она может оказаться паразитной.

Различают *положительную* и *отрицательную* обратные связи. Положительную обратную связь, как правило, применяют в генераторных каскадах. В усилителях положительная обратная связь обычно является паразитной, а отрицательная применяется довольно часто.

На рис. 206 показана структурная схема усилителя с обратной связью.

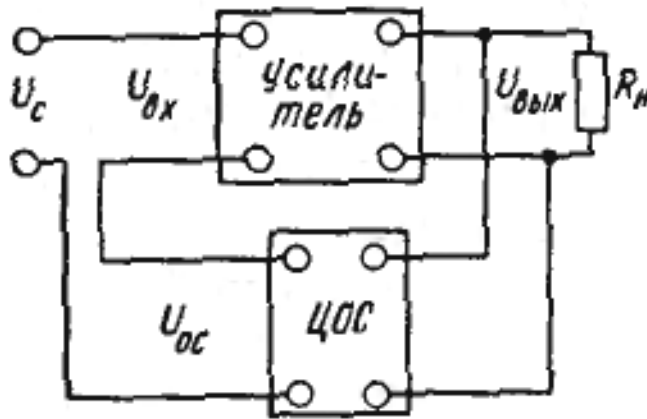


Рис. 206 Структурная схема усилителя с обратной связью

Напряжение обратной связи U_{oc} составляет часть выходного напряжения $U_{вых}$, вырабатывается цепью обратной связи (ЦОС) и подается на вход усилителя вместе с напряжением сигнала U_c . Цепь обратной связи может быть выполнена в виде *делителя напряжения*. Обратная связь характеризуется *коэффициентом обратной связи* $\beta = U_{oc}/U_{вых}$.

В усилителе с отрицательной обратной связью входное напряжение $U_{вх}$ определяется как разность между напряжением сигнала и напряжением обратной связи U_{oc} : $U_{вх} = U_c - U_{oc}$.

Необходимо иметь в виду, что это выражение всегда справедливо для постоянного напряжения. Для действующего значения синусоидального сигнала равенство сохраняется только при условии, что напряжение сигнала и обратной связи находятся в противофазе (в случае положительной обратной связи - в фазе).

Найдем выражение для коэффициента усиления усилителя, охваченного обратной связью:

$$K_{oc} = U_{вых}/U_c.$$

Так как

$$\begin{aligned} U_{вх} &= U_c - U_{oc}, \\ U_c &= U_{вых}/K_{oc}, \\ \text{а } U_{oc} &= \beta U_{вых}, \end{aligned}$$

тогда

$$U_{вх} = U_{вых}/K_{oc} - \beta U_{вых}.$$

Отсюда

$$U_{вх} = U_{вых}(1/K_{oc} - \beta) = U_{вых}(1 - K_{oc}\beta)/K_{oc},$$

или

$$K_{oc}/(1 - K_{oc}\beta) = U_{вых}/U_{вх} = K,$$

где K - коэффициент усиления усилителя, не охваченного обратной связью. Тогда $K_{oc}/(1 - K_{oc}\beta) = K$, откуда окончательно получаем

$$K_{oc} = K/(1 + K\beta).$$

Анализ этого выражения показывает, что K_{oc} при отрицательной обратной связи всегда меньше K . В таком случае повышается стабильность работы усилителя. Покажем это на примере.

Допустим, что усилитель с $K=100$ охвачен отрицательной обратной связью, $\beta=0,2$. Тогда, согласно выражения $K_{oc} = K/(1 + K\beta)$, получим

$$K = \frac{K}{1 + \beta K} = \frac{100}{1 + 0,2 \times 100} \approx 4,76$$

Пусть K увеличится на 10%. Новое значение

$$K_{oc} = \frac{K + \Delta K}{1 + \beta(K + \Delta K)} = \frac{100 + 10}{1 + 0,2(100 + 10)} \approx 4,8$$

Таким образом, K_{oc} изменился всего лишь на 1%.

Физическая сущность стабилизации коэффициента усиления усилителя, охваченного отрицательной обратной связью, состоит в том, что при увеличении K увеличивается напряжение обратной связи, и входное напряжение падает. В то же время, при уменьшении K входное напряжение увеличивается, т. е. отрицательная обратная связь автоматически поддерживает стабильность работы усилителя.

При положительной обратной связи $K_{oc} = K / (1 - \beta K)$.

В этом случае устойчивость работы усилителя ухудшается, что может привести к самовозбуждению усилительного каскада.

В заключение рассмотрим схему усилителя с отрицательной обратной связью, приведенную на рис. 207.

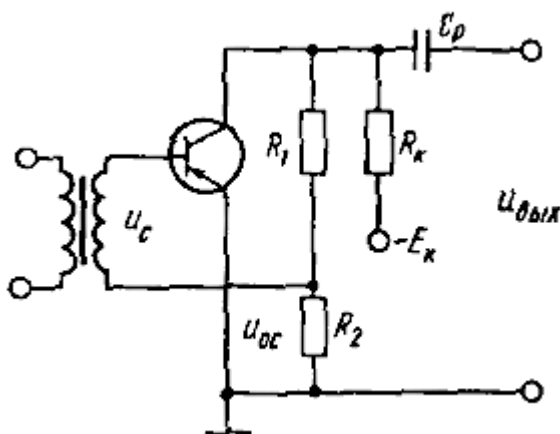


Рис. 207 Схема усилителя с отрицательной обратной связью

Здесь напряжение отрицательной обратной связи снимается с резистора R_2 делителя напряжения $R_1 R_2$. Легко убедиться в том, что обратная связь в данном случае - *отрицательная*. Действительно, если при изменении u_c потенциал базы увеличивается, то потенциал коллектора уменьшается. Это уменьшение потенциала через цепь обратной связи передается на базу транзистора и напряжения сигнала и обратной связи оказываются в противофазе.

Современные технические средства охраны границы (датчики электроконтактного, емкостного, сейсмического, инфракрасного, радиоволнового принципа действия) содержат в своем составе усилители, построенные в основном по бестрансформаторным схемам на интегральных микросхемах операционных усилителей с широким применением положительной и отрицательной обратной связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровик, С.С. Ремонт и регулировка радиоэлектронной аппаратуры / С.С. Боровик, М.А. Бродский. – Мн.: «Высшая школа», 1989.
2. Вайсбург, Ф.И. Электронные приборы и усилители / Ф.И. Вайсбург [и др.]. – М.: «Радио и связь», 1987.
3. Волынский, В.А. Электротехника / В.А. Волынский. – М.: «Энергоатомиздат», 1987.
4. Ворсин, Н.Н. Основы радиоэлектроники / Н.Н. Ворсин. – Мн.: «Высшая школа», 1992.
5. Гершунский, Б.С. Основы электроники / Б.С. Гершунский. – Киев: «Высшая школа», 1977.
6. Данилов, И.А. Общая электротехника с основами электроники / И.А. Данилов, П.М. Иванов. – М.: «Высшая школа», 2005.
7. Евдокимов, Ф.Е. Теоретические основы электротехники / Ф.Е. Евдокимов. – М.: «Высшая школа», 1975.
8. Иванов, И.М. Электротехника / И.М. Иванов [и др.]. М.: Воениздат, 1966.
9. Куликовский, А.А. Радиоэлектроника / А.А. Куликовский. – М.: «Энергия», 1978.
10. Ломоносов, В.Ю. Электротехника / В.Ю. Ломоносов, К.М. Поливанов, О.П. Михайлов. – М.: «Энергоатомиздат», 1990.
11. Ляшко, М.Н., Маркевич, К.М. Основы радиоэлектроники / М.Н. Ляшко, К.М. Маркевич. – Мн.: «Народная асвета», 1991.
12. Морозов, А.Г. Электротехника, электроника и импульсная техника / А.Г. Морозов. – М.: «Высшая школа», 1987.
13. Пачинин, В.И. Радиоэлектроника: учебное пособие / В.И. Пачинин. – Минск: Беларусь, 2010.
14. Поджаров, В.Н., Луцевич О.И., Горбат А.А. Основы электротехники и радиоэлектроники: практикум В 2 ч. Ч 1. Сборник вопросов и задач / В.Н. Поджаров. О.И. Луцевич, А.А. Горбат – Минск: ГУО «ИПС РБ», 2013. – 80 с.
15. Поджаров, В.Н., Луцевич О.И., Горбат А.А. Основы электротехники и радиоэлектроники: практикум В 2 ч. Ч 2. Ответы и консультации / В.Н. Поджаров. О.И. Луцевич, А.А. Горбат – Минск: ГУО «ИПС РБ», 2013. – 62 с.
16. Поджаров, В.Н. Основы электротехники: пособие / В.Н. Поджаров [и др.], под общ. ред. А.Е. Виноградова – Минск: ГУО «ИПС РБ», 2012. – 104 с.
17. Поджаров, В.Н. Основы электротехники и радиоэлектроники: альбом схем / В.Н. Поджаров. [и др.] – Минск: ГУО «ИПС РБ», 2013. – 89 с.
18. Поляков, В.Т. Посвящение в радиоэлектронику / В.Т. Поляков. – М.: «Радио и связь», 1988.
19. Редель А.А. Пособие радиотелемеханика / А.А. Редель. – Алма-Ата: «Казахстан», 1989.
20. Сивцевич, В.В. Основы электротехники и радиоэлектроники: учебное пособие / В.В. Сивцевич [и др.] – Минск: ГУО «ИПС РБ», 2017. – 168 с.

21. Федотов, В.И. Основы электроники / В.И. Федотов. – М.: «Высшая школа», 1987.
22. Яцкевич, В.В. Электротехника / В.В. Яцкевич. – Мн.: «Ураджай», 1981.
23. Федотов, В.И. Основы электроники / В.И. Федотов. – М.: «Высшая школа», 1987.
24. Яцкевич, В.В. Электротехника / В.В. Яцкевич. – Мн.: «Ураджай», 1981.