

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(национальный исследовательский университет)»

С. А. Борминский

Электротехника и электроника

Электронное учебное пособие

САМАРА
2012

Автор: Борминский Сергей Анатольевич

Борминский С. А. Электротехника и электроника [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / С. А. Борминский; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (3,5 Мбайт). - Самара, 2012. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В пособии изложены основы расчета электрических цепей постоянного и переменного тока, трехфазных цепей, дано описание электрических машин и трансформаторов. Рассмотрена основная элементная база электроники: диоды, тиристоры, транзисторы, аналоговые и цифровые микросхемы, а также создание на их базе схем усилителей и генераторов

Пособие разработано на кафедре электротехники СГАУ для направления подготовки для специальности 220700 «Автоматизация технологических процессов и производств»

© Самарский государственный аэрокосмический университет, 2012

1. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Электротехника - это фундаментальная наука, базирующаяся на исследованиях в области электрических и магнитных явлений. В том виде, как мы ее знаем, она возникла сравнительно недавно – в начале XX века, однако путь, который она прошла, был достаточно долгим и трудным. Потребовалось достаточно много творческих усилий как наших, так и зарубежных ученых, чтобы внешне разрозненные явления природы были систематизированы и выстроены в строгую теорию.

Без электрической энергии сегодня невозможно представить нашу жизнь. Она применяется повсюду и потребность в ней неуклонно возрастает. Столь широкое распространение этого вида энергии не случайно, так как ее можно передавать на огромные расстояния от источника до потребителя. Она способна легко трансформироваться в другие виды, такие как: механическую, химическую, световую и др. При этом возможен и обратный ее переход, что подтверждает универсальность данного вида энергии.

Развитие электроэнергетики, как науки, потребовало больших усилий в области изучения электромагнитных явлений и их практического применения. Работы в этом направлении начались давно. Первый трактат по электричеству вышедший в 1753 г., принадлежит нашему великому соотечественнику М. В. Ломоносову – «Слово о явлениях воздушных, от электрической силой происходящих», посвященный теории атмосферного электричества.

Потребовалось более чем полвека, прежде чем А. Вольт изобрел свой гальванический столб. Все это позволило впервые получить реальный электрический ток.

Первые годы XIX века явились началом развития теории и практики цепей постоянного тока. В этой связи приведем хронологическую последовательность открытий, положивших начало систематическому изучению электрических и магнитных явлений.

Рассматривая хронологию развития данной науки, выделим основные ее даты.

1802 г. – В. В. Петров обнаружил и исследовал явление электрической дуги между двумя угольными электродами. Он указал на возможность ее использования для освещения, плавки и сварки металлов.

1819 г. – Эрстед обнаружил механическое воздействие электрического тока на магнитную стрелку.

1820 г. – Ампер открыл магнитные свойства соленоида с током.

1831 г. – Фарадей открыл и впервые описал явление электромагнитной индукции.

1833 г. – Э. Х. Ленц (русский академик) открыл фундаментальный принцип электродинамики – принцип электромагнитной инерции; он же в 1844 г., независимо от Джоуля, открыл закон о тепловом действии электрического тока.

1845 г. – Кирхгофф сформулировал основные законы для разветвленных электрических цепей, имеющие фундаментальное значение.

1876 г. – П. Н. Яблочков (русский инженер) изобрел электрическую свечу, которая положила начало электрическому освещению; он же был и автором реализации использования переменного электрического тока, а так же создал первый в мире трансформатор.

Период времени с 1800 по 1880 гг. можно считать периодом становления теории и практики цепей постоянного тока.

С открытием П. Н. Яблочковым переменных токов начался новый этап развития электротехники. Переменный ток получил исключительно широкое практическое применение благодаря изобретениям русского инженера М. О. Доливо-Добровольского.

1889 г. – М. О. Доливо-Добровольский построил первый 3-х фазный электрический двигатель и разработал все основные звенья 3-х фазной электрической цепи, он же в 1891 г. осуществил передачу электроэнергии 3-х фазным током на расстояние 175 км.

Применение переменных токов потребовало решения целого ряда теоретических и практических задач, существенно отличающихся от задач по расчету цепей постоянного

тока. Важнейшим этапом здесь можно считать введение американским инженером Штейнметцем комплексного метода расчета цепей переменного тока.

Создание первых электрических машин (электрических двигателей и трансформаторов), а так же линии электропередач потребовало исследований по расчету электрических и магнитных полей, а так же их совокупности – единого электромагнитного поля.

1.1 Основные определения

Электротехника — область технических наук, изучающая получение, распределение, преобразование и использование электрической энергии. Электротехника выделилась в самостоятельную науку из физики в конце XIX века. Основное отличие от электроники заключается в том, что электротехника изучает проблемы, связанные с силовыми крупногабаритными электронными компонентами: линии электропередачи, электрические приводы, в то время как в электронике основными компонентами являются полупроводники и интегральные схемы. В другом смысле, в электротехнике основной задачей является передача электрической энергии, а в электронике — информации.

Электрический ток — упорядоченное некомпенсированное движение свободных электрически заряженных частиц, например, под воздействием электрического поля. Такими частицами могут являться: в проводниках — электроны, в электролитах и газах — ионы, в полупроводниках — электроны и дырки (электронно-дырочная проводимость).

Условиями возникновения электрического тока являются: 1) наличие источника электрической энергии; 2) замкнутость пути, по которому перемещаются заряды.

Обозначается величина постоянного тока буквой I . Измеряется ток в амперах, [А]. Величина тока I определяется количеством электричества (зарядов) q , проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени t :

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

Постоянный электрический ток — вид тока, величина и направление которого не изменяется с течением времени.

За направление постоянного тока в замкнутой электрической цепи принимается направление от положительного полюса источника к его отрицательному полюсу по внешнему участку цепи, т. е. от «+» к «-».

Силу электрического тока измеряют с помощью амперметра. Амперметр включается в цепь последовательно. Причем в цепях постоянного тока клемма со знаком «+» подключается в направлении положительного полюса источника энергии, а клемма со знаком «-» в сторону отрицательного полюса источника энергии.

Помимо силы тока в электротехнике существует понятие плотности тока. Обозначается плотность тока буквой J . Отношение величины тока в проводнике I к площади его поперечного сечения S характеризует плотность тока в этом проводнике.

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

Единицей измерения плотности тока является А/м^2 .

Электрическое поле — особый вид материи, существующий вокруг тел, обладающих электрическим зарядом, а также при изменении магнитного поля (в электромагнитных волнах). Электрическое поле непосредственно невидимо, но может быть обнаружено благодаря его силовому воздействию на заряженные тела.

Силовой характеристикой электрического поля является напряженность. Обозначается напряженность E , измеряется в В/м. Напряженность каждой точки электрического поля характеризуется силой, с которой поле действует на единицу заряда, помещенного в эту точку и определяется по формуле:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

где, E – напряженность электрического поля, F – сила действующая на заряд, q – электрический заряд.

Электрический заряд — это физическая скалярная величина, определяющая способность тел быть источником электромагнитных полей и принимать участие в электромагнитном взаимодействии. Единица измерения заряда в Международной системе единиц (СИ) — кулон [Кл] — электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника при силе тока 1А за время 1с.

Электрический заряд — численная характеристика носителей заряда и заряженных тел, которая может принимать положительные и отрицательные значения. Эта величина определяется таким образом, что силовое взаимодействие, переносимое полем между зарядами, прямо пропорционально величине зарядов, взаимодействующих между собой частиц или тел, а направления сил, действующих на них со стороны электромагнитного поля, зависят от знака зарядов.

Электрический заряд любой системы тел состоит из целого числа элементарных зарядов, равных примерно $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Носителями электрического заряда являются электрически заряженные элементарные частицы- электрон (отрицательно заряженная частица) и протон (положительно заряженная частица).

Закон сохранения электрического заряда гласит, что алгебраическая сумма зарядов электрически замкнутой системы сохраняется.

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$$

В зависимости от концентрации свободных зарядов тела делятся на проводники, диэлектрики и полупроводники.

Проводники (металлы, соли) — это тела, в которых электрический заряд может перемещаться по всему его объему.

Диэлектрики (стекло, пластмассы) — тела, в которых практически отсутствуют свободные заряды.

Полупроводники (германий, кремний) занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками.

Электрический потенциал – работа, которую нужно выполнить, чтобы перенести единицу заряда (1Кл) из данной точки в бесконечность или

$$\varphi = \frac{A}{q}$$

Потенциал — скалярная величина. Если электрическое поле создано несколькими зарядами, то потенциал в каждой точке поля определяется алгебраической суммой потенциалов, созданных в этой точке каждым зарядом. Заряд перемещается из точки с большим потенциалом в точку с меньшим потенциалом. Между двумя точками с равными потенциалами заряд перемещаться не будет. Для перемещения заряда между двумя точками электрического поля должна быть разность потенциалов в этих точках.

Напряжение – разность потенциалов между двумя точками.

$$U = \varphi_1 - \varphi_2$$

Напряжение является скалярной величиной, измеряется в вольтах [В]. Кроме того, напряжение между двумя точками электрического поля характеризуется энергией, затраченной на перемещение единицы положительного заряда между этими точками, т. е.

$$U = \frac{A}{q}$$

Между напряжением и напряженностью в однородном электрическом поле существует зависимость

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q} = \frac{\vec{F}l}{q} = \vec{E}l$$

Отсюда видно, что напряжение - это работа, затрачиваемая на перенос единицы заряда (1Кл) из одной точки поля напряженностью $\vec{E}$ в другую точку по произвольному пути.

Электродвижущая сила (ЭДС). - величина, характеризующая способность сторонних сил вызывать электрический ток, Единицей измерения ЭДС также является вольт.

ЭДС характеризуется энергией, которую затрачивает или может затратить источник на перемещение единицы положительного заряда по всей замкнутой цепи:

$$E = \frac{A_{ум}}{q}$$

Скорость распространения электрического тока равна скорости распространения электромагнитных волн (в вакууме она составляет 299 792 458 метров в секунду или примерно 300 000 км/с). Несмотря на это скорость направленного движения частиц в проводниках намного меньше и зависит от материала проводника, массы и заряда частиц. За 1 с электроны в проводнике перемещаются за счет упорядоченного движения меньше чем на 0,1 мм.

Электрическое сопротивление – физическая величина, характеризующая свойства вещества препятствовать прохождению электрического тока. Единицей сопротивления является Ом, в электротехнике сопротивление обозначается буквой R .

Помимо сопротивления часто используется проводимость – величина обратная сопротивлению. $G = \frac{1}{R}$ Единицей проводимости является сименс (См).

Резистор — пассивный элемент электрической цепи, в идеале характеризующийся только сопротивлением электрическому току, то есть для идеального резистора в любой момент времени должен выполняться закон Ома для участка цепи. Резистор преобразует большинство электрической энергии в тепловую. На принципиальных схемах резистор рисуется в виде прямоугольника (рисунок 1.1) с двумя выводами и обозначается буквой R , поскольку основной параметр резистора – его сопротивление.

Закон Ома для участка цепи. Закон Ома для участка электрической цепи устанавливает зависимость между током, напряжением и сопротивлением на этом участке цепи. Математическое выражение закона Ома для участка имеет вид:

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

Для проводимости закон Ома можно записать

$$I = UG$$

1.2 Электрические цепи и их классификации.

Электрическая цепь - совокупность устройств или элементов, предназначенных для протекания электрического тока. Электрическая цепь содержит источники и приемники электрической энергии, а также устройства коммутации (провода и переключатели) и измерительные приборы (вольтметры, амперметры, ваттметры и др.).

В источниках электрической энергии осуществляется преобразование в электрическую энергию каких-либо других видов энергии.

В приемниках электрической энергии электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии, например в механическую, тепловую, световую.

Элементом электрической цепи называют идеализированное устройство, отображающее какое-либо из свойств реальной электрической цепи.

Простейшая электрическая цепь состоит из источника, приемника и проводников.

В электрической цепи различают два участка: внутренний и внешний. Источник является внутренним участком цепи. Все остальные элементы относятся к внешним участкам электрической цепи.

Электрической схемой называют изображение электрической цепи с помощью условных знаков. Наиболее распространены три вида схем: монтажные, принципиальные и замещения.

На монтажных схемах элементы цепи и их соединение показываются в виде рисунков или эскиза. Эта схема часто используется при соединении кабелей и проводов приборов или установок.

Принципиальная схема определяет состав элементов входящих в цепь и связь между этими элементами. С помощью принципиальной схемы получают детальное представление о принципах работы электрического изделия, установки.

Схема замещения — это схема, в которой реальные объекты и устройства замещаются идеализированными моделями. Эти схемы используют для облегчения расчетов. В схеме замещения электрические соединения между элементами такое же, как и в принципиальной схеме.

Все элементы электрической цепи на схемах указывают с помощью условных обозначений (исключение составляют монтажные схемы). Условные обозначения для электрических схем установлены стандартами системы ЕСКД.

Элементы электрической цепи делятся на линейные и нелинейные, в зависимости от их вольтамперной характеристики.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) — это зависимость напряжения на зажимах элемента или участка цепи от тока, протекающего через него.

Линейными называются элементы и цепи, вольтамперные характеристики которых представляют собой линейную зависимость. Примерами линейных элементов (как правило, в очень хорошем приближении) является резистор, конденсатор и катушка индуктивности. Соответственно линейными являются цепи, содержащие только резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности.

Нелинейными называются элементы и цепи, у которых параметры существенно зависят от тока или напряжения, т.е. графики ВАХ этих элементов имеют криволинейный характер. Если электрическая цепь содержит хотя бы один нелинейный элемент, то она является нелинейной электрической цепью.

Простыми электрическими цепями называют цепи, содержащие один источник энергии. Цепь, содержащая два и более источника, называется **сложной**.

Активным участком цепи называется участок, содержащий источник электрической энергии, не содержащий источника — **пассивным**.

Ветвью называется участок электрической цепи, по которому проходит ток одного и того же значения и направления.

Узлом называется место соединения трех и более ветвей. Узел электрической цепи на схеме отмечают жирной точкой (при соединении на схеме трех узлов по ГОСТ точку ставить необязательно). Если на схеме место скрещивания ветвей точкой не отмечено, это означает, что электрического соединения между ними в точке пересечения нет.

Контуром называют замкнутую электрическую цепь, образуемую одной или несколькими ветвями. Контур, внутри которого не лежат другие ветви, связывающие между собой его узлы, называют простым.

На рисунке 1.1 показана принципиальная схема, состоящая из одного источника ЭДС и семи резисторов. Каждый вид элементов (источники, резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности) имеют свое графическое обозначение, свою букву с порядковым номером. На схемах источники ЭДС обозначаются буквой E , источники тока — I , резисторы — R , катушки индуктивности — L , конденсаторы — C . В случае, если элемент встречается на схеме один раз (например источник E на рисунке 1.1), то порядковый номер можно не использовать. Буквами a, b, c , обозначены узлы схемы, то есть точки, в которых соединяется

три и более проводника (ветви). Необходимо отметить, что при подключении четырех ветвей и более в один узел на схеме обязательна жирная точка (узел а), в противном случае это будет просто пересечение проводников. Для удобства отображения разрешается разбивать узел на несколько отдельных соединений (узел с в примере разделен на три части).

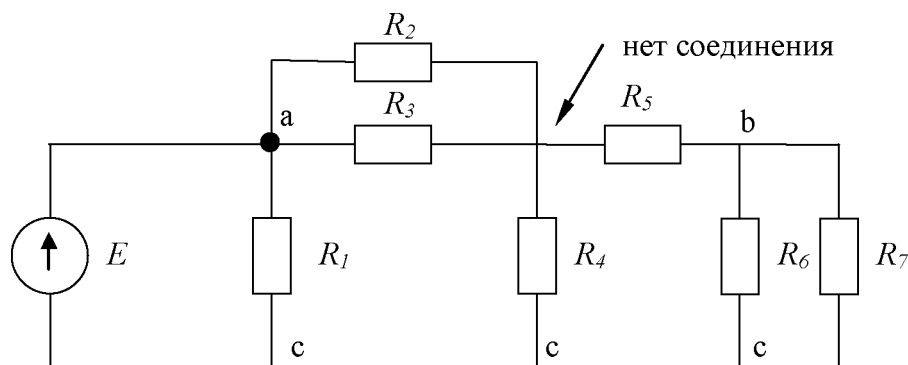


Рисунок 1.1 – пример электрической принципиальной схемы

Ветвями в приведенной схеме являются ветви, состоящие из резисторов R_3 и R_5 , из резисторов R_2 и R_4 , а также резисторов по одному – R_1 , R_6 , R_7 . Пример контура – $R_2R_4R_1$.

Двухполюсником называется часть электрической цепи, которая имеет два зажима, называемых полюсами. Любую ветвь электрической цепи можно рассматривать как двухполюсник. Двухполюсники бывают пассивные и активные.

Двухполюсник, не содержащий источника энергии, называется пассивным. Двухполюсники условно изображают в виде прямоугольника, при этом для обозначения пассивного двухполюсника в прямоугольнике либо ставят букву **П**, либо не ставят никакой буквы

Двухполюсники, в которых содержатся источники электрической энергии, называются активными В этом случае при обозначении двухполюсника в прямоугольнике ставят букву **А**.

При анализе электрической цепи, в которую входит пассивный двухполюсник, достаточно знать его характеристику. Так как пассивный двухполюсник является потребителем энергии, то в качестве характеристики можно взять его сопротивление, которое в этом случае называется внутренним или входным. Следовательно, на схеме замещения пассивный двухполюсник можно представить в виде одного элемента с сопротивлением, равным входному сопротивлению двухполюсника. Для активного двухполюсника наряду с сопротивлением важной характеристикой является внешняя, или вольтамперная, характеристика, которая полностью определяет его свойства.

1.3 Источники электрической энергии. Источники ЭДС и тока

В настоящее время для получения электрической энергии используется несколько видов источников. Наибольшее распространение получили химические, электромеханические источники, фотоэлементы и термопары.

В **химических источниках** энергия протекающих в нём химических реакций непосредственно превращается в электрическую энергию. Химические источники тока характеризуются бесшумностью (отсутствуют движущиеся части), относительной простотой, могут накапливать энергию (например - аккумуляторы). Основным недостатком химических источников является низкая энергетическая емкость.

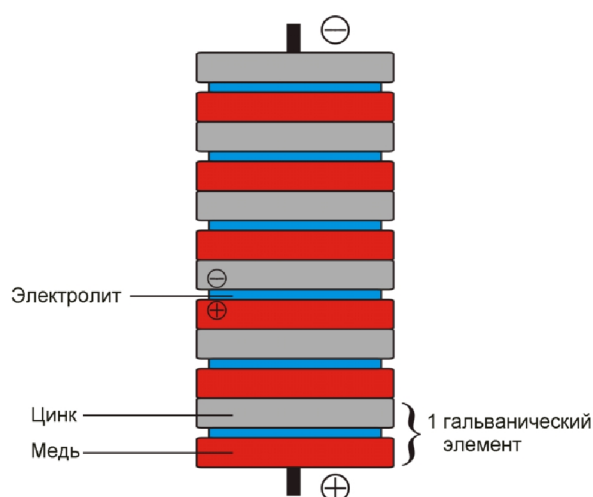


Рисунок 1.2 – химический источник

Основу химических источников тока составляют два электрода (анод, содержащий окислитель, и катод, содержащий восстановитель), контактирующих с электролитом. Между электродами устанавливается разность потенциалов — электродвижущая сила, соответствующая свободной энергии окислительно-восстановительной реакции. Действие химических источников тока основано на протекании при замкнутой внешней цепи пространственно-разделённых процессов: на катоде восстановитель окисляется, образующиеся свободные электроны переходят, создавая разрядный ток, по внешней цепи к аноду, где они участвуют в реакции восстановления окислителя.

В современных химических источниках тока в качестве восстановителя (на катоде) используются следующие материалы — свинец *Pb*, кадмий *Cd*, цинк *Zn* и другие металлы; в качестве окислителя — оксид свинца *PbO₂*, гидроксооксид никеля *NiOOH*, оксид марганца *MnO₂* и другие; в качестве электролита — растворы щелочей, кислот или солей.

Химические элементы подразделяются на одноразовые гальванические элементы, где химические процессы необратимы и на аккумуляторы — источники электрического тока, в которых химические процессы носят обратимый характер.

Электромеханический генератор - это электрическая машина, в которой механическая работа (обычно вращение вала) преобразуется в электрическую энергию. Принцип работы электромеханического генератора основан на возникновении ЭДС самоиндукции в проводниках при воздействии переменного магнитного поля. В большинстве случаев проводники (обмотка ротора) вращаются в постоянном магнитном поле, создаваемом статором (рисунок 1.3).

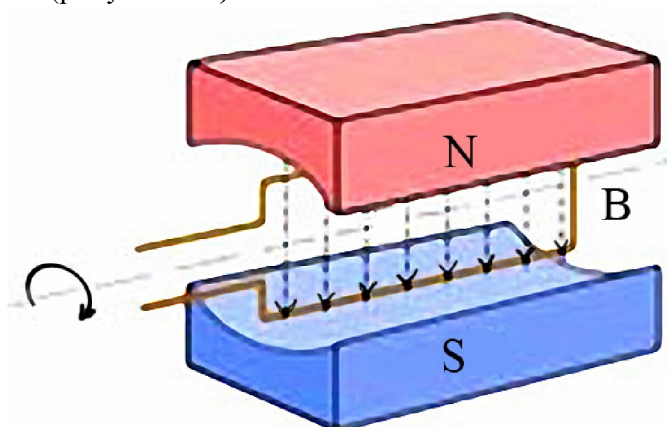


Рисунок 1.3 – электромеханический генератор

Электромеханические генераторы имеют мощность от единиц ватт до гигаватт. Активно применяются для получения электричества на теплоэлектростанциях, атомных, ветряных и гидроэлектростанциях. В настоящее время 98-99% всей электрической энергии вырабатывается с помощью электромеханических генераторов. Благодаря возможности вырабатывать большое количество электроэнергии при относительно компактных габаритах, данный вид генераторов используется на теплоэлектростанциях, гидроэлектростанциях, атомных и ветряных станциях.

Прямым способом получения электричества из световой энергии являются фотоэлементы, которые чаще называют солнечными батареями.

Фотоэлемент — электронный прибор, который преобразует энергию фотонов в электрическую энергию. Наиболее эффективными, с энергетической точки зрения, устройствами для превращения солнечной энергии в электрическую являются полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи, поскольку это прямой, одноступенчатый переход энергии. КПД производимых в промышленных масштабах фотоэлементов в среднем составляет 16%, у лучших образцов до 25%.

Преобразование энергии основано на фотоэлектрическом эффекте, который возникает в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них солнечного излучения. Эффективность преобразования зависит от электрофизических характеристик неоднородной полупроводниковой структуры, а также оптических свойств фотоэлемента, среди которых наиболее важную роль играет фотопроводимость.

Преимуществами фотоэлементов является надежность, бесшумность, недостатками — низкий КПД и высокая цена изготовления. Именно эти недостатки обуславливают низкое распространение данного источника электроэнергии.

Термопара — источник электрической энергии, принцип действия которого основан на возникновении термо-ЭДС (эффект Зеебека). Между соединёнными проводниками имеется контактная разность потенциалов. Если стыки связанных в кольцо проводников находятся при одинаковой температуре, сумма таких разностей потенциалов равна нулю. Когда же стыки находятся при разных температурах, разность потенциалов между ними зависит от разности температур. Коэффициент пропорциональности в этой зависимости называют коэффициентом термо-ЭДС. Помещая спай из металлов с отличными коэффициентами термо-ЭДС в среду с температурой T_1 , мы получим напряжение между противоположными контактами, находящимися при другой температуре T_2 , которое будет пропорционально разности температур T_1 и T_2 .

Термопара как электрический источник применяется редко, поскольку имеет низкий КПД. Преимуществом является высокая надежность и компактность устройства.

В настоящее время термопары значительно чаще применяются в измерительных устройствах температуры в качестве датчика, позволяющего получить точность измерения до 0.01°C .

В большинстве случаев при расчетах электрической цепи неважно, каким образом происходит получение электроэнергии. Для расчетов гораздо важнее знать, какими электрическими свойствами обладает источник.

Источник ЭДС — это источник электрической энергии, характеризующийся электродвижущей силой E и внутренним электрическим сопротивлением $R_{вн}$. Идеальный источник ЭДС характеризуется нулевым внутренним сопротивлением $R_{вн} = 0$. Напряжение между выводами идеального источника ЭДС не зависит от тока, а его внешняя характеристика определяется выражением: $U = E = \text{const}$. Внешней характеристикой источника питания называется зависимость напряжения на его выходе от тока, выдаваемого в цепь.

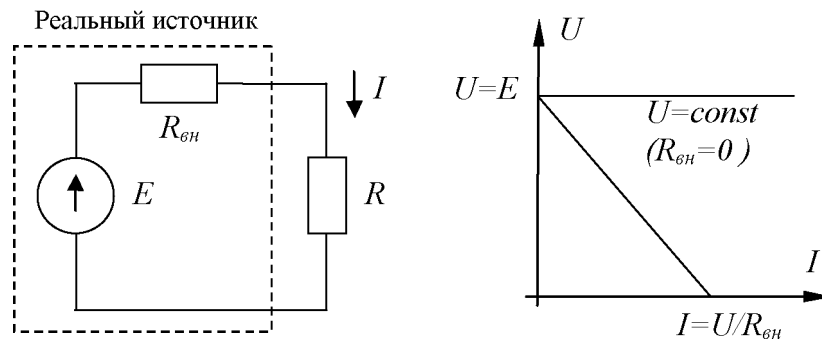


Рисунок 1.4 – простейшая цепь с источником ЭДС и вольтамперная характеристика

Внутреннее сопротивление $R_{\text{вн}}$ показывает, что часть энергии, вырабатываемой источником, остается внутри источника. Поэтому, напряжение на выходах источника равно разности между ЭДС источника и падением напряжения на внутреннем сопротивлении и определяется по формуле:

$$U = E - U_{\text{вт}} = E - R_{\text{вт}} I \quad \text{или} \quad I = \frac{E}{R_{\text{вн}} + R}$$

При напряжении $U = 0$ ток источника равен току короткого замыкания ($R=0$):

$$I_{\text{к}} = \frac{E}{R_{\text{вн}}}$$

Источник тока — источник электрической энергии, с большим внутренним сопротивлением. В идеальном случае, когда $R_{\text{вн}} \gg R$, источник создаёт ток, не зависящий от сопротивления нагрузки, к которой он присоединён. Реальный источник тока - устройство, которое лишь старается поддерживать в цепи, к которой он подключен, ток заданного уровня, пока это позволяют его возможности (максимальный выходной ток и напряжение).

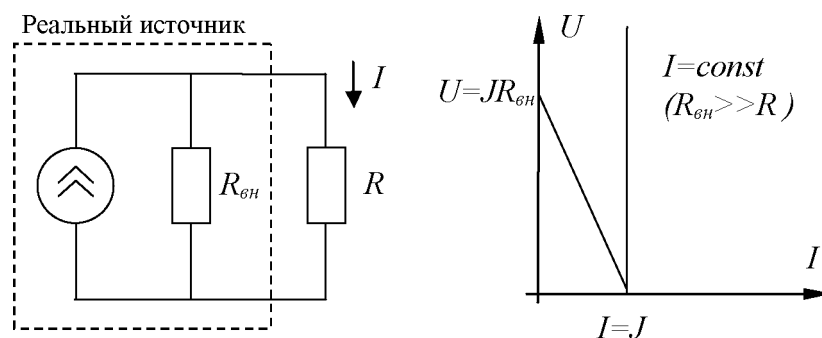


Рисунок 1.5 - простейшая цепь с источником тока

У реальных источников внутреннее сопротивление имеет конечное значение. Если сопротивление нагрузки R стремится к бесконечности, то максимальное напряжение на выводах источника тока будет $U=JR_{\text{вн}}$.

Необходимо особо подчеркнуть, что эквивалентное внутреннее сопротивление источника тока подключается параллельно, а у источника ЭДС - последовательно с нагрузкой.

2. Расчет цепей постоянного тока

2.1 Первый закон Кирхгофа.

Алгебраическая сумма токов в любом узле электрической цепи равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0, \text{ где } n \text{ — число ветвей, сходящихся в узле.}$$

Первый закон Кирхгофа говорит о том, что в любой момент времени количество электрических зарядов, направленных к узлу, равно количеству зарядов, направленных от узла, откуда следует, что электрический заряд в узле не накапливается.

До написания уравнения по первому закону Кирхгофа необходимо задать условные положительные направления токов в ветвях, обозначив эти направления на схеме стрелками. Токи, направленные к узлу, записывают с одним знаком (например, с минусом), а токи, направленные от узла, с противоположным знаком (с плюсом).

2.2 Второй закон Кирхгофа.

Алгебраическая сумма напряжений участков любого контура электрической цепи равно нулю:

$$\sum_{k=1}^m U_k = 0,$$

где m – число участков контура.

В данном выражении со знаком плюс записываются напряжения, положительные направления обхода которых совпадают с произвольно выбранным направлением обхода контура, а со знаком минус – противоположно направленным.

В частности, для контура, содержащего только источники ЭДС и резистивные элементы, алгебраическая сумма напряжений на резистивных элементах равна алгебраической сумме ЭДС:

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m R_k I_k$$

где n – число ЭДС в контуре; m – число элементов с сопротивлением R_k в контуре.

2.3 Применение законов Ома и Кирхгофа для расчетов электрических цепей

Пусть схема имеет B ветвей и Y узлов. Расчет такой схемы сводится к нахождению токов в B ветвях. Для этого необходимо составить $Y-1$ независимых уравнений по первому закону Кирхгофа и $K=B-Y+1$ независимых уравнений по второму закону Кирхгофа.

На рисунке 2.1 приведен пример, в котором $Y=2$ узла и $B=3$ ветви, т.е. $K=B-Y+1=2$ независимых контура (1 и 2, или 1 и 3, или 2 и 3).

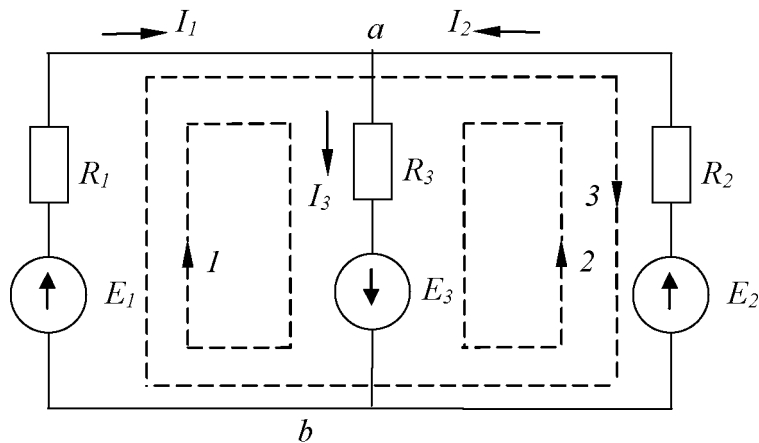


Рисунок 2.1 – Расчет цепей с помощью законов Кирхгофа

Произвольно выбираем положительное направление токов ветвей I_1 , I_2 , I_3 . По первому закону Кирхгофа можно составить одно ($\sum I = 0$) независимое уравнение, например для узла а:

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

И по второму закону Кирхгофа – два ($K=2$) независимых уравнения, например для контуров 1 и 2:

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 = E_1 + E_3$$

$$R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_2 + E_3$$

Решение системы уравнений (три уравнения с тремя неизвестными) определяет токи всех трех ветвей.

Систему алгебраических уравнений сложной цепи, составленную на основе законов Ома и Кирхгофа, целесообразно решать в матричной форме:

$$AI = BE$$

где A и B – квадратные матрицы коэффициентов при токах и ЭДС, а I и E – матрицы-столбцы неизвестных токов и заданных ЭДС. Решением системы в матричном виде будет

$$I = A^{-1}BE$$

Для приведенного примера уравнение в матричной форме примет вид:

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & +1 \\ R_1 & 0 & R_3 \\ 0 & R_2 & R_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_1 + E_3 \\ E_2 + E_3 \end{bmatrix}$$

Решение данного уравнения можно записать в следующем виде:

$$I = \begin{bmatrix} -1 & -1 & +1 \\ R_1 & 0 & R_3 \\ 0 & R_2 & R_3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ E_1 + E_3 \\ E_2 + E_3 \end{bmatrix}$$

Систему алгебраических уравнений сложной цепи, составленную на основе законов Ома и Кирхгофа, целесообразно решать численными методами с применением ЭВМ, например с помощью программ Mathcad, Matlab или аналогичных.

2.4 Метод узловых потенциалов

В случае, когда в схеме присутствуют два узла или исходную схему можно преобразовать в схему с двумя узлами, наипростейшим является расчет с применением метода узлового напряжения.

На рисунке 2.2 приведена схема, состоящая из n ветвей, сходящихся в двух узлах. Для любой из ветвей разность потенциалов между узлами a и b может быть представлена соотношением:

$$\phi_b = \phi_a + I_k R_k - E_k.$$

Преобразуем ее:

$$\phi_b - \phi_a = U_{ab} = E_k - I_k R_k,$$

где U_{ab} — узловое напряжение для данной схемы.

В этом случае ток в каждой из ветвей будет находиться по формуле:

$$I_k = (E_k - U_{ab})g_k, \text{ где}$$

$$g_k = \frac{1}{R_k} \text{ — проводимость данной ветви.}$$

Направление токов в общем случае может быть произвольным (как и направление ЭДС). Это нужно учитывать при записи ответа.

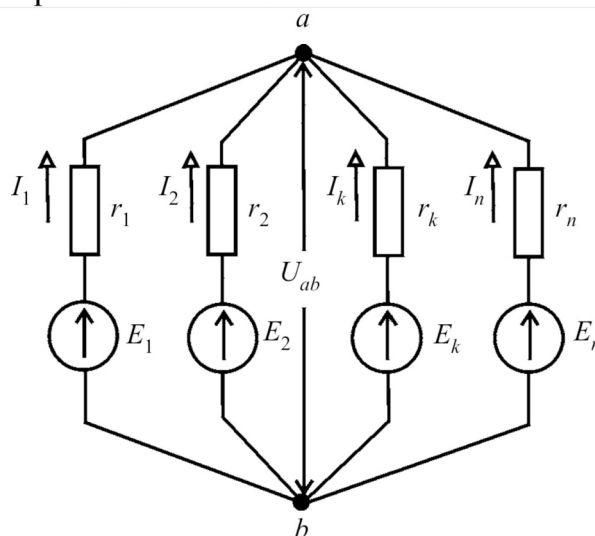


Рисунок 2.2 - Схема цепи с двумя узлами

Применив первый закон Кирхгофа, для данной схемы получаем:

$$I_1 + I_2 + \dots + I_k + \dots + I_n = \sum_{k=1}^n I_k = 0 = \sum_{k=1}^n (E_k - U_{ab})g_k.$$

Следовательно, узловое напряжение можно выразить формулой:

$$U_{ab} = \frac{\sum_{k=1}^n E_k g_k}{\sum_{k=1}^n g_k}.$$

Практическое применение метода узловых потенциалов возможно по нижеописанному алгоритму. Перед началом расчёта выбирается один из узлов (базовый узел), потенциал которого считается равным нулю. Затем узлы нумеруются, после чего составляется система уравнений. Уравнения составляются для каждого узла, кроме базового. Слева от знака равенства записывается:

- потенциал рассматриваемого узла, умноженный на сумму проводимостей ветвей, примыкающих к нему;
- минус потенциалы узлов, примыкающих к данному, умноженные на проводимости ветвей, соединяющих их с данным узлом.

Справа от знака равенства записывается:

- сумма всех источников токов, примыкающих к данному узлу;
- сумма произведений всех ЭДС, примыкающих к данному узлу, на проводимость соответствующего звена.

Если источник направлен в сторону рассматриваемого узла, то он записывается со знаком «+», в противном случае — со знаком «-».

Рассмотрим пример, изображенный на рисунке 2.3

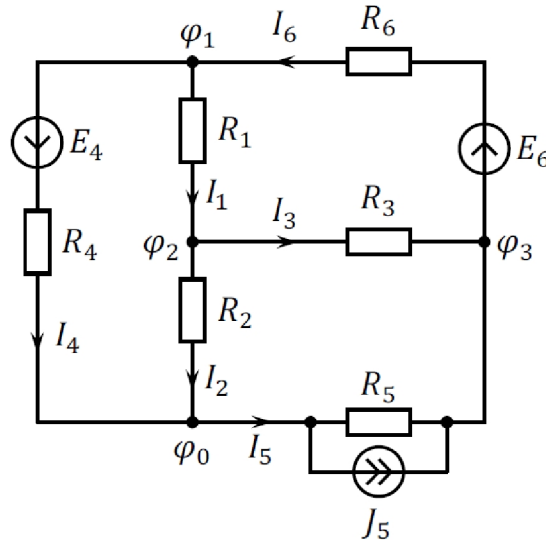


Рисунок 2.3 - пример для расчета методом узловых потенциалов

На приведенной схеме четыре узла. Потенциал в узле 0 принят равным нулю ($\varphi_0 = 0$). Записываем уравнения для узлов 1, 2 и 3:

$$\varphi_1 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6} \right) + \varphi_2 \left(-\frac{1}{R_1} \right) + \varphi_3 \left(-\frac{1}{R_6} \right) = E_6 \frac{1}{R_6} - E_4 \frac{1}{R_4}$$

$$\varphi_1 \left(-\frac{1}{R_1} \right) + \varphi_2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) + \varphi_3 \left(-\frac{1}{R_3} \right) = 0$$

$$\varphi_1 \left(-\frac{1}{R_6} \right) + \varphi_2 \left(-\frac{1}{R_3} \right) + \varphi_3 \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} \right) = J_5 - E_6 \frac{1}{R_6}$$

После определения узловых потенциалов находятся токи в каждой ветви по закону Ома.

2.5 Метод контурных токов

Метод контурных токов позволяет уменьшить число совместно-решаемых уравнений до $K=B-Y+I$ и основан на применении второго закона Кирхгофа. Суть метода описана ниже

1) Выбирается $K=B-Y+I$ независимых контуров и положительных направлений так называемых контурных токов, каждый из которых протекает по всем элементам соответствующего контура.

Для планарных схем, т. е. допускающих изображение на плоскости без пересечения ветвей, достаточным условием выделения K независимых контуров является наличие в каждом из них хотя бы одной ветви, принадлежащей только этому контуру;

2) для K независимых контуров составляем уравнения по второму закону Кирхгофа, совместное решение которых определяет все контурные токи;

3) ток каждой ветви определяем по первому закону Кирхгофа как алгебраическую сумму контурных токов в соответствующей ветви.

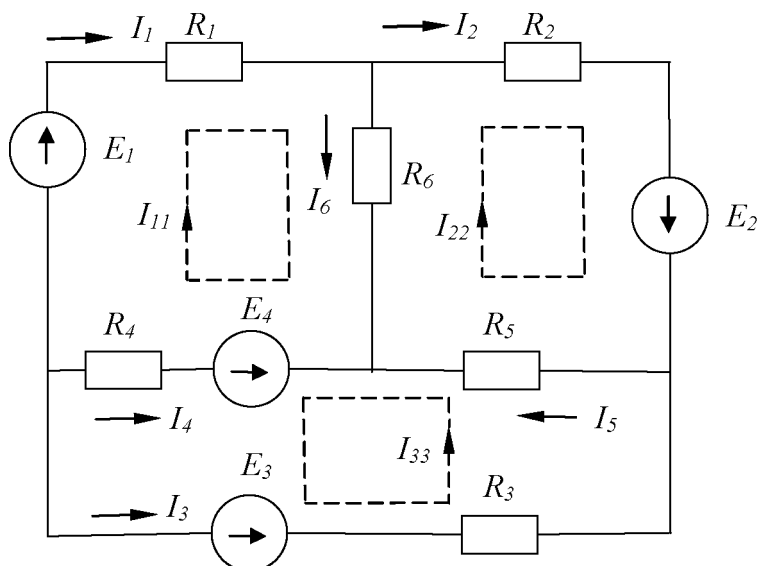


Рисунок 2.4 – Расчет цепей методом контурных токов

В качестве примера рассмотрим расчет цепи с числом ветвей $B = 6$, узлов $U = 4$, независимых контуров $K = B - U + 1 = 6 - 4 + 1 = 3$ (рисунок 1.7). Выберем независимые контуры 1–3 и положительные направления контурных токов в них I_{11} I_{22} I_{33} . В отличие от токов ветвей каждый контурный ток обозначим двойным индексом номера контура. Уравнения по второму закону Кирхгофа:

контур 1:

$$(R_1 + R_4 + R_6)I_{11} - R_6 I_{22} + R_4 I_{33} = E_1 - E_3$$

контур 2:

$$-R_6 I_{11} + (R_2 + R_5 + R_6)I_{22} + R_5 I_{33} = E_2$$

контур 3:

$$R_4 I_{11} + R_5 I_{22} + (R_3 + R_4 + R_5)I_{33} = E_3 - E_4$$

Или в матричной форме:

$$\begin{vmatrix} R_1 + R_4 + R_6 & -R_6 & R_4 \\ -R_6 & R_2 + R_5 + R_6 & R_5 \\ R_4 & R_5 & R_3 + R_4 + R_5 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} E_1 - E_2 \\ E_2 \\ E_3 - E_4 \end{vmatrix}$$

Решение данной системы уравнений определяет контурные токи I_{11} , I_{22} , I_{33} . Токи ветвей находим по первому закону Кирхгофа $I_1 = I_{11}$, $I_2 = I_{22}$, $I_3 = I_{33}$, $I_4 = -I_{11} - I_{33}$, $I_5 = I_{22} + I_{33}$, $I_6 = I_{11} + I_{22}$.

2.6 Последовательное и параллельное соединение элементов электрической цепи.

Если несколько резисторов соединены один за другим без разветвлений и по ним протекает один и тот же ток, такое соединение называется последовательным.

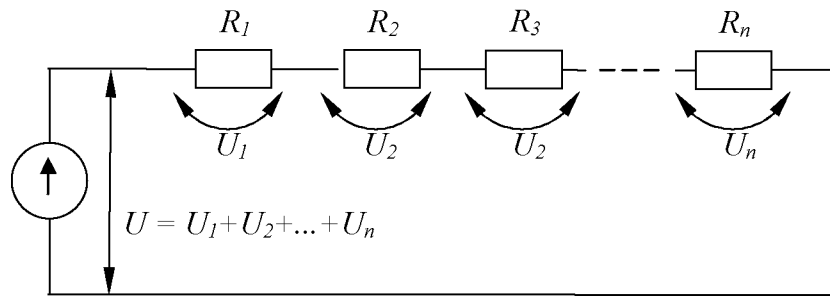


Рисунок 2.5 – Последовательное соединение резисторов

При таком соединении ток во всех элементах цепи одинаковый, а напряжения на резисторах и общее сопротивление цепи складывается:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n = \sum_{k=1}^n U_k, \quad R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{k=1}^n R_k, \quad I = \frac{U}{R} \text{ или } I = \frac{U_k}{R_k}$$

Параллельным соединением приемников называется такое соединение, при котором к одним и тем же двум узлам электрической цепи присоединяется несколько ветвей.

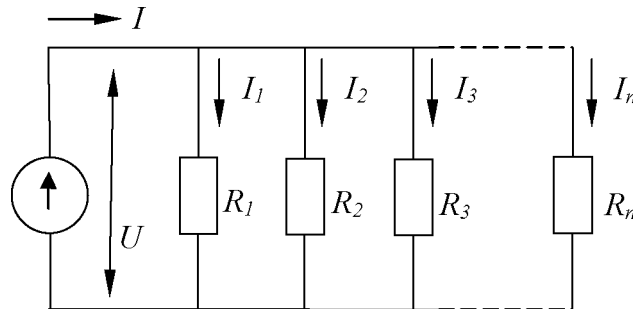


Рисунок 2.6 – Параллельное соединение резисторов

При таком соединении складываются токи и проводимости:

$$U = const, \quad I = I_1 + I_2 + \dots + I_n = \sum_{k=1}^n I_k, \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}.$$

При **комбинированном соединении** элементов можно воспользоваться **методом эквивалентного преобразования схем**. Суть метода заключается в том, что группу резистивных элементов можно заменить одним или группой резистивных элементов, включенных другим способом.

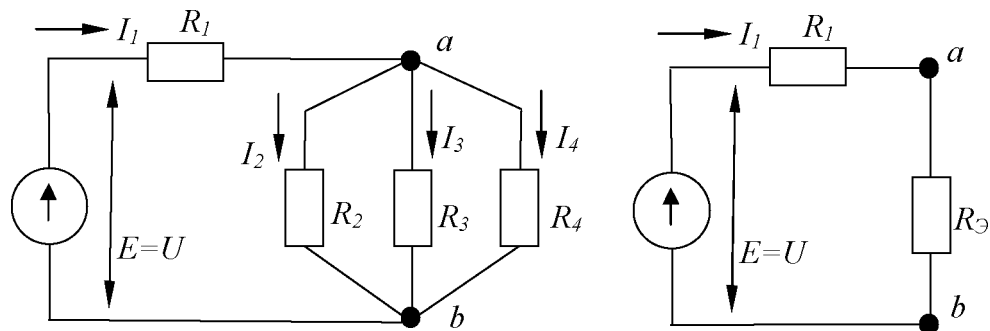


Рисунок 2.7 – эквивалентная замена группы резисторов

Группа резисторов R_2, R_3, R_4 заменяется резистором с эквивалентным сопротивлением

$$\frac{1}{R_9} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \quad \text{или} \quad R_9 = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}},$$

что не изменяет общего тока в цепи. Общее сопротивление цепи может быть найдено как

$$R = R_1 + R_9 = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}.$$

Общий ток в цепи определится как $I_1 = E/R$, напряжение $U_{ab} = I_1 R_9$, а токи $I_2 = U_{ab}/R_2$, $I_3 = U_{ab}/R_3$, $I_4 = U_{ab}/R_4$.

2.7 Последовательное и параллельное соединение ЭДС

На практике достаточно часто встречается последовательное соединение источников ЭДС. Последовательно включенные источники можно рассматривать как один эквивалентный источник с ЭДС, равной сумме ЭДС отдельных источников и внутренним сопротивлением, равным сумме внутренних сопротивлений отдельных источников. При этом, если источники включены согласованно, то напряжение складывается, если встречно – то вычитается.

Последовательное включение источников используется для увеличения напряжения питания схем. Например, один элемент химического источника питания (батареи) имеет $E = 1.5B$, что в большинстве случаев недостаточно для питания электронных схем. Применение нескольких батарей позволяет увеличить напряжение до необходимых значений.

Параллельное включение источников ЭДС на практике встречается редко и применяется, как правило, для уменьшения внутреннего сопротивления, и как следствие – увеличения максимального тока в нагрузке. Однако, все источники имеют разную ЭДС. Из-за существующей разницы между источниками возникает ток, не идущий в полезную нагрузку, вследствие чего снижается общий КПД цепи.

2.8 Работа и мощность электрического тока. Энергетический баланс

Работа, совершаемая электрическим полем при перемещении положительного заряда Q вдоль неразветвленного участка электрической цепи, не содержащего источников электрической энергии, равна произведению этого заряда на напряжение U между концами участка: $A = QU$. При равномерном движении заряда в течение времени t , т.е. при постоянном токе, заряд

$$Q = It$$

и работа

$$A = UI t$$

Для оценки энергетических условий важно знать, сколь быстро совершается работа, т.е. определить мощность

$$P = UI.$$

Основная единица работы в СИ — джоуль (Дж), мощности — ватт (Вт). Практической единицей измерения электрической энергии служит киловатт-час (кВт-ч), т.е. работа, совершаемая при неизменной мощности 1 кВт в течение 1 ч. Так как $1 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 1 \text{ Дж}$, то $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3\,600\,000 \text{ Дж}$.

Для резистивных элементов, воспользовавшись законом Ома $U = RI$, можно также записать:

$$P = UI = I^2 R = \frac{I^2}{G} = U^2 G = \frac{U^2}{R}$$

Для источника ЭДС, направление которой совпадает с направлением тока, мощность сторонних сил $P_E = EI$. Если направления ЭДС и тока противоположны, то мощность $P_E = -EI$ (например, при зарядке аккумулятора). Аналогично, мощность источника тока $P_j = U_{ab}J$.

Потери мощности во внутреннем сопротивлении источника ЭДС составят:

$$P_{вн} = I^2 R_{вн}$$

2.9 Баланс мощностей

В любой электрической цепи должен соблюдаться энергетический баланс — баланс мощностей: алгебраическая сумма мощностей всех источников энергии (в частности, источников тока и источников ЭДС) равна арифметической сумме мощностей всех приемников энергии (в частности, резистивных элементов):

$$\sum U_{ист} I_{ист} = \sum R I_R^2 \text{ или } \sum P_{ист} = \sum P_R.$$

В качестве примера составим баланс мощностей цепи, представленной на рис 2.4:

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 + E_4 I_4 = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2 + R_6 I_6^2$$

2.10 Условие передачи приёмнику максимальной энергии

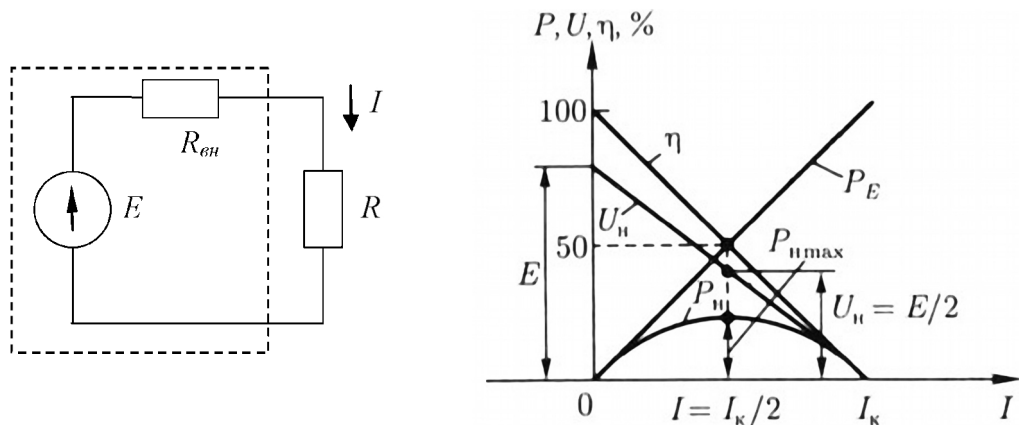


Рисунок 2.8 – Условие передачи максимальной мощности в нагрузку

Отношение мощности приемника (полезной мощности) к мощности источника энергии $P_{ист}$ называется его коэффициентом полезного действия (КПД). Для цепи, приведенной на рисунке 2.8, можно записать:

$$\eta = \frac{P}{P_{г}} = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E} = \frac{IR}{IR + IR_{вн}} = \frac{R}{R + R_{вн}}.$$

Мощность, выделяемая на нагрузке, будет равна:

$$P_H = UI = I^2 R = \frac{E^2}{(R + R_{вн})^2} R$$

При двух предельных значениях сопротивления $R = 0$ и R стремящемся к бесконечности, мощность приемника равна нулю, так как в первом случае равно нулю напряжение между выводами приемника, а во втором случае — ток в цепи. Следовательно, некоторому определенному значению соответствует наибольшее возможное (при данных E и $R_{вн}$) значение мощности приемника. Чтобы определить это значение сопротивления,

достаточно приравнять нулю первую производную от мощности P по R . При этом получается, что максимум мощности передается в нагрузку при $R=R_{вн}$.

Таким образом, источник ЭДС развивает максимальную полезную мощность, когда внешнее сопротивление равно внутреннему сопротивлению источника, при этом мощность будет равна:

$$P_{\max} = \frac{E^2}{4R_{вн}}$$

Такой режим является невыгодным, так как 50 % энергии теряется во внутреннем сопротивлении источника

$$\eta = \frac{R}{R + R_{вн}} = \frac{R}{2R} = 0,5.$$

Режим цепи, при котором внешнее сопротивление цепи равно внутреннему сопротивлению источника энергии, называется режимом согласованной нагрузки.

При согласованном режиме $\eta_{\text{согл}} = 0,5$, при холостом ходе $R = \infty$, а при коротком замыкании $R = 0$ $\eta_k = 0$. Таким образом, более высокие значения КПД достигаются при $R > R_{вн}$.

2.11 Пример решения задачи, с цепями постоянного тока

Дана схема, изображенная на рисунке 2.9:

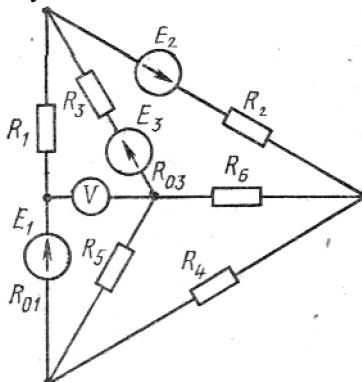


Рисунок 2.9 – принципиальная схема задачи

Даны следующие числовые значения параметров:

E_1	E_2	E_3	R_{01}	R_{02}	R_{03}	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
20	22	9	0,1		1,1	1	2	6	3	8	4

Отсутствующие значения в таблице принимаем за нуль.

Для приведенной схемы необходимо найти:

1. токи во всех ветвях с помощью законов Кирхгофа;
2. токи во всех ветвях методом узловых потенциалов;
3. токи во всех ветвях методом контурных токов;
4. составить баланс мощностей;
5. определить показания вольтметра

По классификации данная цепь является сложной цепью постоянного тока с тремя источниками ЭДС. Цепь имеет четыре узла и шесть ветвей. Следует отметить, что если не оговаривается отдельно, то в задачах применяются идеальные измерительные приборы (амперметры, вольтметры, ваттметры). Таким образом, в схеме, приведенной на рисунке 2.12, используется идеальный вольтметр с бесконечным внутренним сопротивлением,

поэтому точку его подсоединения (левый вывод вольтметра по схеме) рассматривать в роли узла не имеет смысла.

1. Для составления уравнений по законам Кирхгофа необходимо выбрать направления токов и отметить узлы схемы. Направления токов выбираются произвольным образом.

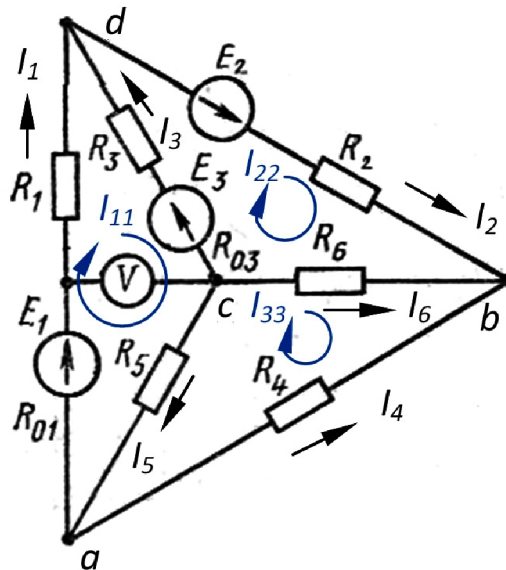


Рисунок 2.10 – выбор направления токов в цепи

Далее необходимо написать три уравнения по первому закону и три уравнения по второму закону Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа:

Узел *a*: $I_4 + I_1 - I_5 = 0$

Узел *b*: $-I_4 - I_2 - I_6 = 0$

Узел *c*: $I_3 + I_5 + I_6 = 0$

Второй закон Кирхгофа:

abc: $R_4 I_4 - R_6 I_6 + R_5 I_5 = 0$

abd: $R_4 I_4 - R_2 I_2 - R_1 I_1 - R_{01} I_1 = -E_2 - E_1$

cdb: $R_3 I_3 + R_{03} I_3 + R_2 I_2 - R_6 I_6 = E_2 + E_3$

В матричном виде система уравнений примет вид:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & R_5 & -R_6 \\ -R_1 - R_{01} & -R_2 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & R_3 + R_{03} & 0 & 0 & -R_6 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -E_2 - E_1 \\ E_2 + E_3 \end{vmatrix}$$

Решение данного матричного уравнения целесообразно проводить с помощью персонального компьютера.

Подставив числа, получим:

$I_1 = 7.175 \text{ A}$; $I_2 = 8.081 \text{ A}$; $I_3 = 0.907 \text{ A}$; $I_4 = -5.982 \text{ A}$; $I_5 = 1.193 \text{ A}$; $I_6 = -2.100 \text{ A}$

Знак «минус» у токов I_4 и I_6 означают, что они протекают в направлении, противоположном выбранному.

2. Для метода узловых потенциалов выберем базисным (нулевым) узел а. Тогда система уравнений примет вид:

$$\begin{aligned}\phi_b \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6} \right) + \phi_c \left(\frac{-1}{R_6} \right) + \phi_d \left(\frac{-1}{R_2} \right) &= \frac{E_2}{R_2} \\ \phi_b \left(\frac{-1}{R_6} \right) + \phi_c \left(\frac{1}{R_3 + R_{03}} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} \right) + \phi_d \left(\frac{-1}{R_3 + R_{03}} \right) &= \frac{E_3}{R_3 + R_{03}} \\ \phi_b \left(\frac{-1}{R_2} \right) + \phi_c \left(\frac{-1}{R_3 + R_{03}} \right) + \phi_d \left(\frac{1}{R_1 + R_{01}} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3 + R_{03}} \right) &= \frac{E_1}{R_1 + R_{01}} - \frac{E_2}{R_2} + \frac{E_3}{R_3 + R_{03}}.\end{aligned}$$

Решив систему, получим потенциалы узлов: $\phi_b=17.945$; $\phi_c=9.545$; $\phi_d=12.108$.

Далее вычисляем токи по закону Ома с учетом выбранных направлений токов и направлением источников ЭДС:

$$\begin{aligned}I_1 &= \frac{E_1 - \phi_d}{R_{01} + R_1} = 7.175; \quad I_2 = \frac{\phi_d - \phi_b + E_2}{R_2} = 8.081; \quad I_3 = \frac{\phi_c - \phi_d + E_3}{R_3 + R_{03}} = 0.907; \\ I_4 &= \frac{-\phi_b}{R_4} = -5.982; \quad I_5 = \frac{\phi_c}{R_5} = 1.193; \quad I_6 = \frac{\phi_c - \phi_b}{R_6} = -2.1.\end{aligned}$$

Результаты расчетов совпадают с предыдущим методом.

3. Для решения задачи методом контурных токов выберем три независимых контура, как показано на рисунке 2.10 синим цветом. Контурные токи будут иметь значения I_{11} , I_{22} , I_{33} .

Система уравнений примет вид:

$$\begin{aligned}I_{11}(R_1 + R_{01} + R_3 + R_{03} + R_5) - I_{22}(R_3 + R_{03}) - I_{33}R_5 &= E_1 - E_3 \\ -I_{11}(R_3 + R_{03}) + I_{22}(R_2 + R_3 + R_{03} + R_6) - E_{33}R_6 &= E_3 + E_2 \\ -I_{11}R_5 - I_{22}R_6 + I_{33}(R_4 + R_5 + R_6) &= 0\end{aligned}$$

В результате решения системы контурные токи получаются $I_{11}=7.175$; $I_{22}=8.081$; $I_{33}=5.982$.

Токи в каждой ветви можно определить следующим образом:

$$I_1 = I_{11} = 7.175; \quad I_2 = I_{22} = 8.081; \quad I_3 = I_{22} - I_{11} = 0.907; \quad I_4 = -I_{33} = -5.982; \quad I_5 = I_{11} - I_{33} = 1.193; \quad I_6 = I_{33} - I_{22} = -2.1.$$

4. Для баланса мощностей рассчитаем мощность, вырабатываемую источниками ЭДС:
 $I_1 E_1 + I_2 E_2 + I_3 E_3 = 329.448$ Вт

Мощность на приемниках энергии составит:

$$(R_1 + R_{01})I_1^2 + R_2 I_2^2 + (R_3 + R_{03})I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2 + R_6 I_6^2 = 329.448 \text{ Вт}$$

5. Напряжение на вольтметре вычисляем по второму закону Кирхгофа, для чего можно представить вольтметр как источник ЭДС с напряжением V . Тогда:

$$V + E_1 = I_1 R_{01} + I_5 R_5, \text{ откуда } V = I_1 R_{01} + I_5 R_5 - E_1 = -9.737 \text{ В.}$$

Знак «минус» означает, что напряжение противоположно выбранному обходу контура, т.е. плюс вольтметра будет слева по схеме.

3. Магнитное поле. Индуктивность и ёмкость в электрических цепях

3.1 Общие сведения

Магнитное поле — особая форма материи, образующаяся вокруг проводника, по которому протекает ток. Электрический ток обладает намагничивающей силой, и в магнитном поле существуют магнитные силы. С помощью намагничивающей силы создается определенная, пропорциональная ей напряженность магнитного поля H , которая определяется изменением магнитного состояния среды.

Если среда способна намагничиваться в магнитном поле, т.е. создавать собственное магнитное поле, то такая среда называется магнетиком. В самом деле, если ненамагниченный магнетик поместить в магнитное поле с индукцией $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$, то он намагничивается и дает добавочную индукцию поля $\vec{B}'$, которая векторно складывается с первоначальной индукцией $\vec{B}$, т.е. $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$.

Векторная сумма $\vec{B}$ называется вектором магнитной индукции внутри магнетика.

Вещества, для которых $\vec{B}'$ совпадает по направлению с $\vec{B}_0$, называются парамагнетиками. Внутри парамагнетиков магнитное поле усиливается.

Вещества, для которых $\vec{B}'$ и $\vec{B}_0$ противоположны по направлению, называются диамагнетиками. Магнитное поле внутри диамагнетиков ослабляется. Для парамагнетиков (алюминий, платина и др.) магнитная проницаемость $\mu > 1$. Для диамагнетиков (медь, поваренная соль и др.) $\mu < 1$.

Наряду с пара- и диамагнетиками существуют ферромагнетики (железо, никель, кобальт и др.), для которых $\mu \gg 1$, т.е. они способны сильно намагничиваться.

Для всех магнетиков $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ - магнитная постоянная,

μ - напряженность магнитного поля.

Для пара- и диамагнетиков зависимость между $\vec{B}$ и $\vec{H}$ линейная, так как $\mu = \text{const}$. Для ферромагнетиков эта зависимость носит нелинейный характер (рисунок 3.1), потому что $\mu \neq \text{const}$, а зависит от H , т.е. $\mu = f(H)$

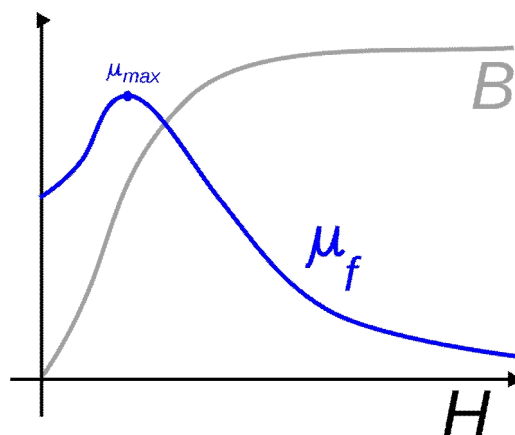


Рисунок 3.1

Характерной особенностью ферромагнетиков является гистерезис (рисунок 3.2). Явление гистерезиса заключается в том, что магнитная индукция B зависит не только от

мгновенного значения H , но и от того, какова была напряженность поля раньше. При этом происходит отставание изменения индукции B при изменении H . Если ненамагниченный ферромагнетик поместить в магнитное поле, которое увеличивается от нуля, то зависимость B от H (кривая намагничивания) выразится кривой A . Точка S на рисунке соответствует магнитному насыщению.

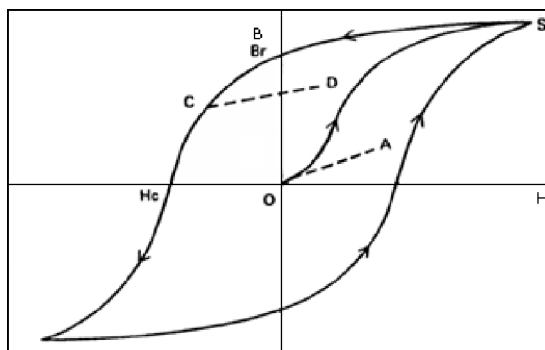


Рисунок 3.2 - Петля гистерезиса для стали при синусоидальном изменении полей

Если же затем уменьшить H до 0, то кривая намагничивания не совпадает с A . В результате, когда H станет равной нулю, намагничивание не исчезнет и будет характеризоваться величиной B_r , которая называется остаточной индукцией. Намагничивание обращается в нуль лишь под действием поля с напряженностью H_c , имеющего направление, противоположное полю, вызывающему намагничивание. Напряженность магнитного поля H_c называется коэрцитивной силой.

При воздействии переменного магнитного поля напряженностью H индукция B ферромагнетика меняется минуя начало координат в соответствии с кривой, которая называется петлей гистерезиса. Петля гистерезиса может быть объяснена наличием в ферромагнетиках отдельных областей самопроизвольного намагничивания, называемых доменами.

Магнитной цепью называется совокупность магнитодвижущих сил (МДС), ферромагнитных тел или других сред, по которым замыкается магнитный поток.

Если магнитный поток во всех сечениях магнитной цепи одинаков, то такая цепь называется неразветвленной. Магнитные цепи, в которых магнитные потоки на разных участках неодинаковы, называются разветвленными.

Для расчета магнитных цепей пользуются законом полного тока. Закон полного тока гласит, что циркуляция вектора напряженности магнитного поля H по замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов, которые охвачены этим контуром

$$\oint H \, dl = \sum I.$$

Если контур интегрирования охватывает w витков катушки, по которым протекает ток I , то закон полного тока принимает вид

$$\oint H \, dl = Iw.$$

В том случае если напряженность имеет постоянную величину по всему контуру, а направление по магнитной линии, то уравнение принимает вид:

$$Hl = \sum I$$

Для разветвленных магнитных цепей справедливы законы Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа – алгебраическая сумма магнитных потоков в узле равна нулю

$$\sum \Phi_k = 0,$$

где Φ_k - магнитный поток, который определяется как интеграл вектора магнитной индукции $\vec{B}$ через конечную поверхность S . При $B = const$ можно записать:

$$\Phi_k = BS \cos \alpha,$$

где α - угол между вектором магнитной индукции и нормалью к плоскости площади.

Второй закон Кирхгофа – алгебраическая сумма ЭДС в замкнутом контуре равна алгебраической сумме падений магнитных напряжений на участках этого контура

$$\sum Iw = \sum U_M = \sum HI$$

Произведение числа витков катушки на протекающий в ней ток называют **магнитодвижущей силой (МДС)**

$$F = Iw, [A].$$

МДС вызывает в магнитной цепи магнитный поток. На схемах МДС указывают стрелкой, направление стрелки определяют по правилу правого винта.

3.2 ЭДС самоиндукции и индуктивность. Энергия магнитного поля.

Индукцией называется явление возникновения электрического тока в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, пронизывающий этот контур (закон Фарадея).

ЭДС индукции в замкнутом контуре пропорциональна скорости изменения магнитного потока:

$$E_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Знак минус следует из правила Ленца, которое утверждает, что индукционный ток имеет такое направление, при котором создаваемое им магнитное поле, противодействует изменению магнитного потока, вызывающего этот ток.

Если магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, меняется в связи с изменением тока, протекающего по контуру, то в контуре возникает ЭДС самоиндукции:

$$E_{si} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Отношение магнитного потока через контур, созданного магнитным полем тока в контуре, к силе этого тока называют индуктивностью контура. Обозначается индуктивность L , в системе СИ измеряется генри (Гн). Отсюда ЭДС самоиндукции находится как

$$E_{si} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

При произвольном изменении силы ток в контуре ЭДС самоиндукции определяется как

$$E_{si} = -L \frac{dI}{dt}$$

Индуктивность бесконечно длинного соленоида может быть вычислена по формуле:

$$L = \mu_0 \mu n^2 V$$

или

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2}{l} S$$

где $n = \frac{N}{l}$; N – число витков соленоида, на единице длины l ; V – объем соленоида.

Энергия магнитного поля выражается следующей формулой

$$W_{\text{магн}} = \frac{LI^2}{2}$$

3.3 Емкость проводящих тел. Конденсаторы. Энергия электрического поля.

Электрическая емкость уединенного заряженного проводника называется отношение

$$c = \frac{q}{\varphi}$$

Если два изолированных друг от друга проводника зарядить равными по величине и противоположными по знаку зарядами, то они образуют конденсатор, емкость которого

$$c = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}$$

Емкость плоского конденсатора вычисляется по формуле

$$c = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$$

Для вычисления емкости уединенного шара применяют формулу

$$c = 4\pi\varepsilon_0 \varepsilon R$$

Если n конденсаторов соединены последовательно, то их общая емкость вычисляется из формулы:

$$\frac{1}{c_{\text{общ}}} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \dots + \frac{1}{c_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{c_i}$$

Если последовательно включено n одинаковых конденсаторов, то общая емкость определяется по формуле:

$$c_{\text{общ}} = \frac{c}{n}$$

Если n конденсаторов соединены параллельно, то их общая емкость вычисляется из формулы:

$$c_{\text{общ}} = c_1 + c_2 + \dots + c_n = \sum_{i=1}^n c_i$$

Если параллельно включено n одинаковых конденсаторов, то общая емкость определяется по формуле:

$$c_{\text{общ}} = nc$$

Энергия уединенного заряженного проводника вычисляется по формуле:

$$W = \frac{q\varphi}{2} = \frac{c\varphi^2}{2} = \frac{q^2}{2c}$$

Энергия заряженного конденсатора вычисляется по формуле:

$$W = \frac{qU}{2} = \frac{cU^2}{2} = \frac{q^2}{2c}$$

4. Однофазные электрические цепи синусоидального тока

4.1 Общие сведения

Если в однородном магнитном поле с индукцией B равномерно со скоростью v вращать рамку, то в каждой стороне этой рамки индуцируется ЭДС электромагнитной индукции, которая равна:

$$e = Bvl \sin \alpha$$

Если к рамке подключить нагрузку, то в замкнутой цепи пойдет ток, изменяющийся по синусоидальному закону.

Значения, при которых ЭДС достигает своих максимальных величин, называются амплитудными, обозначается E_m . При амплитудном значении ЭДС этом $\sin \alpha = 1$ и $e = E_m$, следовательно $E_m = Bvl$, а $e = E_m \sin \alpha$.

Промышленный ток изменяется по синусоидальному закону, также как изменяются ЭДС и напряжения:

$$\begin{array}{lll} i = I_m \sin \omega t & \text{или} & i = I_m \sin (\omega t + \alpha) \\ e = E_m \sin \omega t & \text{или} & e = E_m \sin (\omega t + \alpha_1) \\ u = U_m \sin \omega t & \text{или} & u = U_m \sin (\omega t + \alpha_2) \end{array}$$

где i, e, u – мгновенные значения тока, ЭДС и напряжения соответственно;
 I_m, E_m, U_m – амплитудные (максимальные) значения тока, ЭДС и напряжения;
 $\omega = 2\pi f$ – угловая частота;
 $\alpha, \alpha_1, \alpha_2$ – начальные фазы.

4.2 Среднее и действующее значение переменного тока

Среднее значение переменного тока равно величине постоянного тока, при котором через поперечное сечение проводника проходит такое же количество электричества, что и при переменном токе. Обозначается среднее значение тока, напряжения и ЭДС соответственно I_c, U_c, E_c .

Определяются средние значения по формулам:

$$U_c = \frac{2}{\pi} U_m = 0,637 U_m$$

$$E_c = \frac{2}{\pi} E_m = 0,637 E_m$$

$$I_c = \frac{2}{\pi} I_m = 0,637 I_m$$

Эффективным или действующим значением переменного тока называется такой ток, который за одинаковый промежуток времени выделит в одном и том же проводнике такое же количество теплоты, что и данный переменный ток. Определяется действующее значение переменного тока, напряжения и ЭДС по формулам:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2 dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707 U_m$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0,707 E_m$$

В цепях переменного тока принято использовать действующие значения. Например, напряжение 220В в электрической сети – действующее. Максимальное напряжение при этом составляет $U_m = 220\sqrt{2} = 311$ В, что необходимо учитывать при выборе изоляционных материалов.

4.3 Векторные диаграммы.

При расчете цепей переменного тока часто приходится суммировать (или вычитать) несколько однородных синусоидально изменяющихся величин одной и той же частоты f , но имеющих разные амплитуды (I_m, E_m, U_m) и начальные фазы ($\alpha, \alpha_1, \alpha_2$).

Такую задачу можно решать аналитическим путем тригонометрических преобразований или геометрически.

Геометрический метод более прост и нагляден, чем аналитический.

Синусоидальную величину (например, $u = U_m \sin(\omega t + \alpha)$) изображают в виде радиуса-вектора $\overline{OA} = U_m$ с декартовыми координатами $x = a, y = b$ (см. рисунок 4.1).

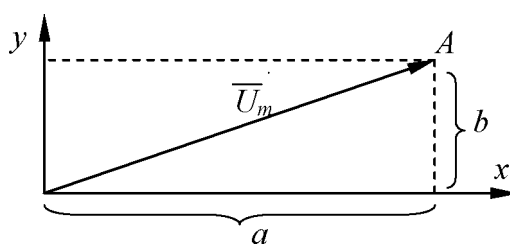


Рисунок 4.1 – Построение векторных диаграмм

α – угол, образованный $\overline{OA}$ с осью X в начальный момент времени, называемый начальной фазой. Вектор $\overline{OA}$ вращается в заданной плоскости вокруг точки O с постоянной угловой скоростью, равной угловой частоте ω , против часовой стрелки. Направление вектора $\overline{OA}$ не указывает направление действия напряжения (или тока и ЭДС). Это его отличие от векторов в механике, которыми обозначаются величина и направление силы, скорости, ускорения. Сумма двух синусоидальных величин изображается суммой векторов, изображающих отдельные слагаемые, а линейная комбинация нескольких синусоидальных величин – соответствующей линейной комбинацией векторов. Такое изображение синусоидальных величин называется векторной диаграммой. При построении векторных диаграмм один из векторов – исходный располагают произвольно, другие векторы – под соответствующими углами к исходному.

Пусть необходимо сложить две синусоидальные функции с одинаковым периодом, но разными начальными фазами (см. рисунок 4.2):

$$U = U_{m1} \sin(\omega t + \alpha_1) \quad \text{и} \quad U_2 = U_{m2} \sin(\omega t + \alpha_2).$$

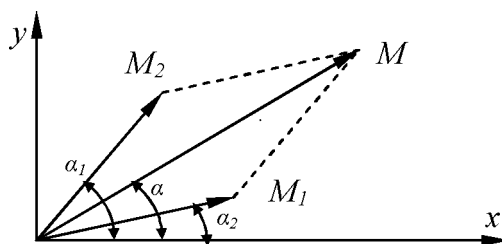


Рисунок 4.2 – сложение на векторных диаграммах

По известному правилу сложения векторов можно получить вектор $\overline{OM}$, изображающий сумму обеих функций $U_1(t)$ и $U_2(t)$, как геометрическую сумму векторов $\overline{OM_1}$ и $\overline{OM_2}$, изображающих эти функции. Все три вектора вращаются одновременно с угловой скоростью ω и легко непосредственно проверить, что ордината точки М представляет собой сумму функций $U_{m1}\sin(\omega t + \alpha_1)$ и $U_{m2}\sin(\omega t + \alpha_2)$. Аналогично абсцисса точки М равна сумме функций $U_{m1}\cos(\omega t + \alpha_1)$ и $U_{m2}\cos(\omega t + \alpha_2)$.

Вместо того, чтобы вращать векторы с угловой скоростью, можно предположить, что они неподвижны, а оси координат вращаются с угловой скоростью ω .

На рисунке 4.2 изображено относительное расположение векторов и осей в момент $t=0$.

Геометрическое построение, описанное выше, определяет амплитуду $OM = U_m$, фазу α и тем самым позволяет найти выражение $U_m\sin(\omega t + \alpha) = U_{m1}\sin(\omega t + \alpha_1) + U_{m2}\sin(\omega t + \alpha_2)$, причем амплитуда U_m будет равна

$$U_m = \sqrt{U_{m1}^2 + U_{m2}^2 + 2U_{m1}U_{m2}\cos(\alpha_2 - \alpha_1)},$$

фаза α может быть определена через $\tan \alpha$

$$\tan \alpha = \frac{U_{m1}\sin \alpha_1 + U_{m2}\sin \alpha_2}{U_{m1}\cos \alpha_1 + U_{m2}\cos \alpha_2}.$$

Аналогично линейная комбинация нескольких синусоидальных функций времени и той же частоты есть синусоидальная функция времени той же частоты:

$$\sum_{i=1}^n U_{m_i} \sin(\omega t + \alpha_i) = U_m \sin(\omega t + \alpha)$$

Часто нужно вычислять производную или интегралы синусоидальных функций времени типа $U(t) = U_m\sin(\omega t + \alpha)$. Имеем

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dt} &= \omega U_m \cos(\omega t + \alpha) = \omega U_m \sin(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{2}) \\ \int U dt &= -\frac{U_m}{\omega} \cos(\omega t + \alpha) = -\frac{U_m}{\omega} \sin(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2}). \end{aligned}$$

Производные и первообразные от функции $U(t)$ изображаются векторами, повернутыми к исходному вектору соответственно на углы $+\frac{\pi}{2}$ и $-\frac{\pi}{2}$, а длины этих векторов равны ωU_m и $\frac{U_m}{\omega}$.

Изложенное выше применимо в тех случаях, когда требуется произвести сложение, дифференцирование, интегрирование синусоидальных напряжений и токов, либо линейные комбинации этих операций. Но это не применимо, если нужно подвергнуть напряжения или токи нелинейным алгебраическим операциям, как, например, умножению или возведению в степень. При таких операциях возникают круговые частоты, отличные от ω , что делает невозможным их векторное сложение как на рисунке 4.2.

Построение векторов, изображенное на рисунке 4.2, называется векторной диаграммой. Обычно при построении векторных диаграмм вместо амплитудных значений синусоидальных величин берут их действующие значения.

4.4 Расчёт цепей синусоидального тока символическим методом

Величины постоянного тока исчерпывающе определяются одним числом. Для определения величин переменного тока заданной частоты одного числа уже не достаточно, здесь необходимо два числа: амплитуда и начальная фаза. Однако и переменный ток может быть определён не 2-мя величинами, а одним комплексным числом, если воспользоваться символическим методом.

При его использовании для расчёта цепей переменного тока воспользуемся законами, методами и приёмами, рассмотренными ранее для цепей постоянного тока. Символический метод удобен и тем, что позволяет избежать построения векторных диаграмм. Он основан на использовании комплексных чисел.

Комплексное число состоит из 2-х частей действительной и мнимой, и может изображаться вектором на комплексной плоскости.

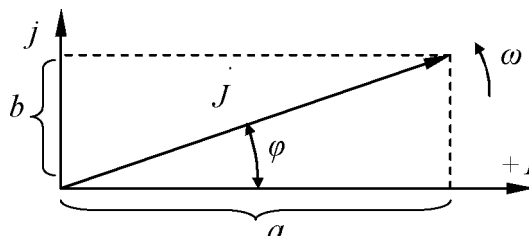


Рисунок 4.3 – представление вектора на комплексной плоскости

Алгебраическая форма записи комплексного числа:

$$\dot{Y} = a + jb$$

В электротехнике во избежание путаницы с мгновенными токами мнимая единица обозначается буквой j . Комплексные величины изображаются заглавными буквами латинского алфавита с точкой над чертой.

$$|\dot{Y}| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \text{или} \quad Y = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \sin \varphi = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}; \cos \varphi = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}; \operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{a}$$

подставляя значения a и b в предыдущие выражения, получим тригонометрическую формулу записи комплексного числа:

$$\dot{Y} = Y(\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

очевидно, что 2-й член, стоящий в скобках, представляет собой мгновенное значение тока.

Формула Эйлера связывает тригонометрию и показательную форму записи

$$\dot{Y} = Y(\cos \varphi + j \sin \varphi) = Y \times e^{j\varphi}$$

Таким образом, комплексное значение тока запишется в трёх формах:

1. алгебраическая	}	$\dot{Y} = a + jb = Y(\cos \varphi + j \sin \varphi) = Y \times e^{j\varphi}$
2. тригонометрическая		
3. показательная		

Из изложенного выше вытекает, что символический метод равносильен методу векторных диаграмм.

Операции $+$ и $-$ векторов эквивалентны операциям $+$ и $-$ комплексов.

Умножение комплексного числа на действительное означает изменение длины вектора без изменения его положения на плоскости.

Умножение 1-го комплексного числа на другое приводит к образованию нового числа, изображается новым вектором, повернутым на новый угол относительно оси координат.

$$\dot{A}\dot{B} = a \cdot e^{j\varphi} \times b \cdot e^{j\varphi} = ab \cdot e^{j(\varphi+\varphi)} = c \cdot e^{j\gamma} = \dot{c}$$

Поскольку при перемножении комплексных чисел изменяется и угол поворота, то множитель e^{+j} называют оператором поворота, если $\gamma = \frac{\pi}{2}$, то $e^{\pm j\frac{\pi}{2}} = \pm j$

Следовательно, умножение комплексного числа на $(+j)$ означает поворот вектора

на $+\frac{\pi}{2}$ в положительном направлении, т.е. против часовой стрелки, а умножение на $(-j)$ означает поворот на $\frac{\pi}{2}$ в противоположном направлении.

$$\dot{E} = \frac{Em}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_e} = E(\cos \varphi_e + j \sin \varphi_e)$$

$$\dot{U} = \frac{Um}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_u} = U(\cos \varphi_u + j \sin \varphi_u) (-j)$$

$$\dot{Y} = \frac{Ym}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_i} = Y(\cos \varphi_i + j \sin \varphi_i)$$

4.5 Закон Ома в комплексной форме

1. Рассмотрим цепь, состоящую только из активного сопротивления R . По закону Ома ток в такой цепи

$$i = \frac{u}{R}$$

Т.к. $U = U_m \sin \omega t$, то $i = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t$

Отсюда следует, что напряжение и ток совпадают по фазе.

В комплексном виде закон Ома для резистивного элемента запишется как и при постоянном токе:

$$\check{U} = R\check{I}$$

Мощность, выделяемая за период синусоиды на резистивном элементе, составит $P = I^2 R$

2. Пусть в цепи только индуктивность L . Допустим, что ток в цепи

$$i = I_m \sin \omega t.$$

Этот ток в индуктивности вызывает ЭДС самоиндукции

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -\omega L I_m \cos \omega t$$

По 2-му закону Кирхгофа: $e_L = -U_L$,

отсюда получаем $u_L = \omega L I_m \cos \omega t$. Из этого следует, что напряжение на индуктивности опережает ток на угол $\pi/2$. В символическом виде можно записать:

$$\check{U} = j\omega L \check{I} \text{ или } \check{U} = jX_L \check{I}, \text{ где } X_L = \omega L - \text{индуктивное сопротивление.}$$

Активная мощность, выделяемая на индуктивном элементе за период синусоиды равна нулю.

3. Если электрическая цепь содержит электрическую емкость, то в ней проходит заряд и разряд конденсатора. Это вызывает поступательное и возвратное движения зарядов в проводниках, соединяющих емкость с источником переменного напряжения. Рассуждая аналогично предыдущему случаю, для цепи с емкостью C выявим, что напряжение на емкости отстает от тока на угол $\pi/2$:

$$i = C \frac{du}{dt} = C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = U_m \omega C \cos \omega t$$

Выразив из последнего выражения напряжение, в комплексном виде можно записать:

$$\dot{U} = \frac{1}{j\omega C} \dot{I} = \frac{-j}{\omega C} \dot{I} \text{ или } \dot{U} = -jX_c \dot{I}, \text{ где } X_c = \frac{1}{\omega C} - \text{емкостное сопротивление.}$$

Активная мощность, выделяемая на индуктивном элементе за период синусоиды равна нулю.

В общем случае, если цепь содержит $R L C$ элементы, общее сопротивление цепи можно записать как $\underline{Z}=R+jX$, где R – активное сопротивление. X – реактивное сопротивление.

Величина полного сопротивления может быть представлена и в показательной форме.

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = z \cdot e^{j\varphi}; |\underline{Z}| = \sqrt{r^2 + x^2}$$

Комплексное сопротивление цепи $\underline{Z}$ не зависит от начальных сдвигов фаз, токов и напряжений. $\underline{Z}$ определяется R, C, L , она не является синусоидальной функцией времени и поэтому точка над $\underline{Z}$ не ставится.

4.6 Законы Кирхгофа в комплексной форме

1) В любой узловой точке цепи алгебраическая сумма сил токов равна нулю.

Для цепей переменного тока этот закон выполняется для мгновенных значений.

$$\sum i = 0$$

2) В любом замкнутом контуре сумма действующих ЭДС= сумме падений напряжения переменного тока.

В цепях переменного тока для мгновенных значений е.д.с. токов и напряжений запишется:

$$\sum e = \sum u = \sum iz$$

4.7 Мощность в цепи синусоидального тока

Мгновенной мощностью называют произведение мгновенного напряжения на входе цепи на мгновенный ток. Пусть мгновенные напряжение и ток определяются по формулам:

$$u = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad i = I_m \cdot \sin \omega t$$

Тогда

$$\begin{aligned} p &= u \cdot i = U_m \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \cdot \sin \omega t = \\ &= U_m \cdot I_m \cdot \frac{1}{2} \cdot [\cos(\omega t + \varphi - \omega t) - \cos(\omega t + \varphi + \omega t)] = \\ &= \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] = U \cdot I \cdot \cos \varphi - U \cdot I \cdot \cos(2\omega t + \varphi). \end{aligned}$$

Среднее значение мгновенной мощности за период составит:

$$\begin{aligned} P_{cp} &= \frac{1}{T} \int_0^T [U \cdot I \cdot \cos \varphi - U \cdot I \cdot \cos(2\omega t + \varphi)] \cdot dt = \\ &= \frac{1}{T} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \int_0^T dt - \frac{1}{T} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \int_0^T \cos(2\omega t + \varphi) \cdot dt = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \\ \cos \varphi &= \frac{R}{Z}, \end{aligned}$$

Из треугольника сопротивлений

Среднее арифметическое значение мощности за период называют активной мощностью и обозначают буквой P . Эта мощность измеряется в ваттах и характеризует необратимое преобразование электрической энергии в другой вид энергии, например, в тепловую, световую и механическую энергию. Возьмем реактивный элемент (индуктивность или

емкость). Активная мощность в этом элементе $P = U \cdot I \cdot \cos 90^\circ = 0$, так как напряжение и ток в индуктивности или емкости различаются по фазе на 90° . В реактивных элементах отсутствуют необратимые потери электрической энергии, не происходит нагрева элементов. Происходит обратимый процесс в виде обмена электрической энергией между источником и приемником. Для качественной оценки интенсивности обмена энергией вводится понятие реактивной мощности Q .

$$p = U \cdot I \cdot \cos \varphi - U \cdot I (\cos 2\omega t \cdot \cos \varphi - \sin 2\omega t \cdot \sin \varphi) = \\ = U \cdot I \cdot \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t) + U \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t = p_1 + p_2,$$

где $p_1 = U \cdot I \cdot \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t)$ - мгновенная мощность в активном сопротивлении;

$p_2 = U \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t$ - мгновенная мощность в реактивном элементе (в индуктивности или в емкости). Максимальное или амплитудное значение мощности p_2 называется реактивной мощностью

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad \sin \varphi = \frac{x}{z},$$

где x - реактивное сопротивление (индуктивное или емкостное). Реактивная мощность, измеряемая в вольтамперах реактивных (Var), расходуется на создание магнитного поля в индуктивности или электрического поля в емкости. Энергия, накопленная в емкости или в индуктивности, периодически возвращается источнику питания. Амплитудное значение суммарной мощности $p = p_1 + p_2$ называется полной мощностью. Полная мощность, измеряемая в вольтамперах, равна произведению действующих значений напряжения и тока:

$$S = U \cdot I = I^2 \cdot z \quad (BA) \quad U = I \cdot z,$$

где z - полное сопротивление цепи. Полная мощность характеризует предельные возможности источника энергии. В электрической цепи можно использовать часть полной мощности

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = S \cdot \cos \varphi,$$

где $\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{P}{S}$ - коэффициент мощности или "косинус "фи".

Коэффициент мощности является одной из важнейших характеристик электротехнических устройств. Принимают специальные меры к увеличению коэффициента мощности. Возьмем треугольник сопротивлений и умножим его стороны на квадрат тока в цепи. Получим подобный треугольник мощностей (рисунок 4.4).

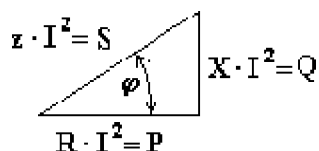


Рисунок 4.4

Из треугольника мощностей получим ряд формул:

$$P = S \cdot \cos \varphi, \quad Q = S \cdot \sin \varphi, \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad \cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

Активная мощность всегда положительна. Реактивная мощность в цепи, имеющей индуктивный характер, - положительна, а в цепи с емкостным характером - отрицательна.

Активная мощность расходуется на преобразование в тепловую энергию. Реактивная мощность характеризует интенсивность обмена энергии между источником и реактивными нагрузками. Полная мощность $\underline{S}$ не является синусоидальной функцией времени, поэтому над символом не ставится точка. Значение полной мощности обозначается на щитках и в паспортах электрогенераторов переменного тока. Распределение её на активную и реактивную части зависит от характера нагрузок. В промышленных электроустановках переменного тока реактивную мощность стремятся свести к минимальной величине, и тем самым повысить коэффициент полезного действия той или иной электроэнергетической установки.

4.8 Цепи с последовательным соединением элементов $R L C$

Для последовательной цепи, состоящей из нескольких элементов, строится векторная диаграмма напряжений.

За исходный вектор принимается вектор тока, т.к. при последовательном соединении через все элементы цепи протекает один и тот же ток. Таким образом, векторная диаграмма напряжений для цепи с последовательно соединенными элементами R, L, C (см. рисунок 4.4а) будет иметь вид, как показано на рис.4.4б.

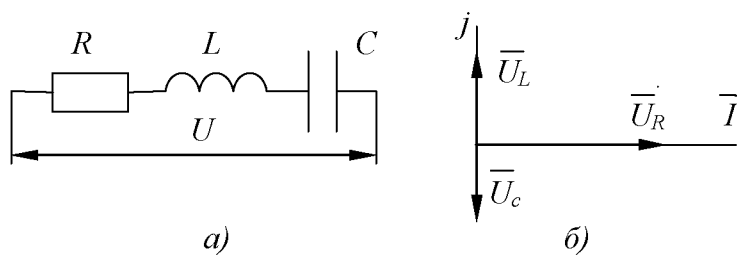


Рисунок 4.4 - последовательная $R L C$ цепь

Вектор напряжения $\bar{U}$, приложенного к цепи, определяется как сумма векторов $\bar{U} = \bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C$, а его величина равна

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

Построим векторную диаграмму напряжений для цепи на рисунке 4.4а. Для произвольных значений сопротивлений R, X_L и X_C и тока I она будет иметь вид, показанный на рисунке 4.5а.

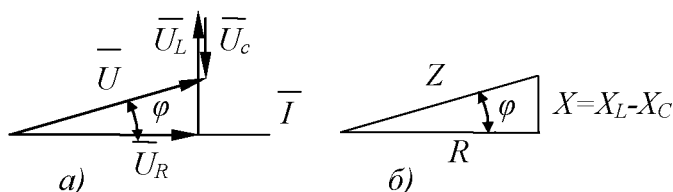


Рисунок 4.5 – построение векторной диаграммы для послед. цепи

Если модули векторов треугольника напряжений разделить на модуль вектора тока, то получим сопротивления последовательной цепи R, X, Z :

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

Эти сопротивления соотносятся как стороны прямоугольного треугольника. Прямоугольный треугольник, стороны которого численно равны величинам R, X, Z , называется треугольником сопротивлений (см. рисунок 4.5б).

Таким образом, $U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$ или $U = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = IZ$

- это выражение является законом Ома для последовательной цепи переменного тока.

На рисунках 4.4, 4,5 рассмотрен случай, когда $X_L > X_C (U_L > U_C)$. Если $X_L < X_C$, то треугольники напряжений и сопротивлений будут располагаться ниже оси абсцисс. В этом случае вектор напряжения отстает от вектора тока на угол φ . Возможен частный случай, когда $X_L = X_C$. В цепи при этом наступает режим, называемый резонансом напряжений.

Обычно для расчета электрических цепей используют комплексные числа. В комплексной форме полное напряжение записывается следующим образом

$$\vec{U} = \vec{U}_a + \vec{U}_L + \vec{U}_C$$

Для цепи на рисунке 4.4а

$$\vec{U}_a = \vec{U}_{R1} + \vec{U}_{R2}, R = R_1 + R_2 \text{ или}$$

$$\vec{U} = \vec{I}R + j\omega L\vec{I} + \vec{I}/j\omega C$$

$$\vec{U} = (R + j(\omega L - 1/\omega C)) \vec{I}.$$

Это соотношение есть закон Ома, записанный в комплексной форме. Сомножитель перед $\vec{I}$ есть полное сопротивление последовательной цепи в комплексной форме

$$\underline{Z} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = R + j(X_L - X_C).$$

$$\text{Полное напряжение } \vec{U} = \underline{Z} \vec{I}$$

Все комплексные величины можно записать в показательной форме. В общем случае ток равен:

$$\vec{I} = I e^{j\psi},$$

где Ψ – угол между током и вещественной осью.

В нашем примере направление тока совпадает с вещественной осью, угол $\psi = 0$, тогда $\vec{I} = I$.

Полное сопротивление $\underline{Z} = Ze^{j\varphi}$, где

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}.$$

Комплекс напряжения в показательной форме

$$\vec{U} = \underline{z} \vec{I} = z I e^{j\varphi}.$$

4.9 Цепи с параллельным соединением ветвей

Для расчета цепи с параллельным соединением ветвей применяется метод проводимостей.

Рассмотрим применение этого метода на примере расчета цепи, показанной на рисунке 4.6а. Нужно определить общий ток I в неразветвленной цепи. Он равен векторной сумме токов параллельных ветвей.

При построении векторных диаграмм в случае параллельного соединения элементов в качестве исходного вектора используется вектор напряжения $\vec{U}$, так как напряжение в этом случае одно и то же для всех ветвей (см рисунок 4.6б).

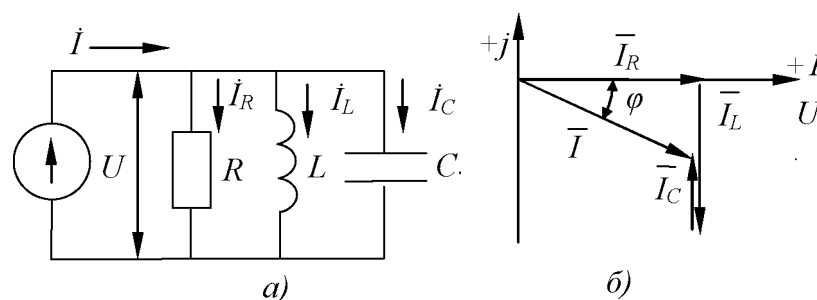


Рисунок 4.6 - цепь с параллельным соединением ветвей

Вектор тока $\vec{I}$ представляет собой сумму векторов тока $\vec{I}_R$, который совпадает с вектором напряжения $\vec{U}$ по фазе с вектором тока $\vec{I}_L$, отстающего от вектора напряжения $\vec{U}$ на угол $\pi/2$ и вектором тока $\vec{I}_C$, опережающим напряжение на угол $\pi/2$.

Определим ток в цепи по первому закону Кирхгофа с учетом закона Ома для проводимостей:

$$\vec{I} = \vec{I}_R + \vec{I}_L + \vec{I}_C = (G - jB_L + jB_C) \vec{U} = \underline{Y} \vec{U},$$

где $G = 1/R$; $B_L = 1/\omega L$; $B_C = \omega C$ - проводимости активного, индуктивного и емкостного элементов; $\underline{Y}$ - суммарная комплексная проводимость цепи, которая является обратной величиной комплексного сопротивления:

$$\underline{Y} = G - jB_L + jB_C = G + j(B_C - B_L) \quad Y = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}$$

$$\text{Таким образом, ток в цепи будет равен } I = U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}.$$

4.10 Резонанс напряжений

Рассмотренные выше электрические цепи представляют собой последовательный и параллельный колебательные контуры соответственно. Цепь, в которой индуктивность, емкость и активное сопротивление соединены последовательно, называется последовательным колебательным контуром. Цепь, в которой индуктивность, емкость и активное сопротивление соединены параллельно, называется параллельным колебательным контуром.

В колебательных контурах при определенных условиях могут возникать особые явления, которые называют резонансными. Резонанс в последовательном колебательном контуре называют резонансом напряжений, резонанс в параллельном колебательном контуре - резонансом токов.

В цепях переменного тока резонанс наступает тогда, когда частота источника напряжения равна резонансной частоте контура (собственной частоте колебаний контура, если $R_k = 0$). При резонансе ток и напряжение совпадают по фазе, т.е. угол $\varphi = 0$.

Рассмотрим цепь, состоящую из последовательно соединенных резистора, катушки индуктивности и конденсатора. Закон Ома для последовательной цепи, состоящей из активного, индуктивного и емкостного сопротивлений (см. рисунок 4.4а), выражается формулой

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

где R - активное сопротивление контура;

X_L и X_C - индуктивное и емкостное сопротивления контура соответственно.

Угол сдвига фаз между током и напряжением

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$$

Резонанс наступает тогда, когда цепь ведет себя как чисто активная, т.е. когда ток и напряжение совпадают по фазе, угол $\varphi = 0$.

Условием возникновения резонанса в последовательном колебательном контуре является равенство реактивных сопротивлений контура $X_L = X_C$.

Тогда полное сопротивление цепи будет равно его активной составляющей:

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

Сдвига фаз между током и напряжением не будет, угол $\varphi = 0$, $\cos \varphi = 1$.

При резонансе напряжений действующие значения реактивных составляющих напряжения U_L и U_C равны по величине, мгновенные значения равны и противоположны по знаку.

Результирующее напряжение при резонансе равно его активной составляющей $U = U_a$.

Следовательно, мощность, развиваемая источником, является активной мощностью, она поддерживает в цепи R, L, C незатухающие колебания, несмотря на то, что в цепи есть активное сопротивление. Энергия магнитного поля при резонансе полностью переходит в энергию электрического поля и наоборот:

$$\frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}$$

Частота, при которой в контуре наступает резонанс, называется резонансной.

Значение резонансной частоты можно определить из условия резонанса $X_L = X_C$.

Т.к. $X_L = \omega L$ и $X_C = \frac{1}{\omega C}$,

то резонансная частота контура

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Резонанс напряжений можно получить изменяя в цепи индуктивность, емкость или частоту напряжения источника питания контура, всего, если хотят настроить контур в резонанс, используют конденсатор переменной емкости. С этого конденсатора снимают выходное напряжение.

Если $X_L = X_C > R$, напряжение на индуктивности U_L и емкости U_C могут достигать значительной величины и во много раз превышать общее напряжение U , приложенное к цепи. Ток в цепи I также значительно возрастает: $I_{рез} = \frac{U}{R}$. Для исключения перегрузки

источника питания в схему иногда вводят ограничивающее сопротивление. Поскольку резонанс сопровождается значительными перенапряжениями и сверхтоками, в мощных установках он является аварийным. Свойства колебательного контура характеризуются рядом величин:

а) Характеристическое сопротивление контура (или волновое)

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Эта величина имеет размерность сопротивления - величину ρ можно получить из уравнения $\frac{U_m}{I_m} = \sqrt{\frac{L}{C}}$.

б) Добротность последовательного контура $Q = \frac{\rho}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$

Добротность контура служит характеристикой реального контура, когда $R \neq 0$. При резонансе добротность контура равна отношению напряжения на емкости или индуктивности к напряжению на активном сопротивлении.

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{U_L}{U_a} \quad \text{и} \quad Q = \frac{X_C}{R} = \frac{U_C}{U_a}$$

Добротность радиотехнических контуров обычно составляет 50-200.

в) Затухание контура $d = \frac{1}{Q}$

4.11 Резонанс токов

Резонансом токов в цепи с параллельно соединенными индуктивностью и ёмкостью называется режим, при котором ток в неразветвленном участке цепи и напряжение, приложенное к этой цепи, совпадают по фазе.

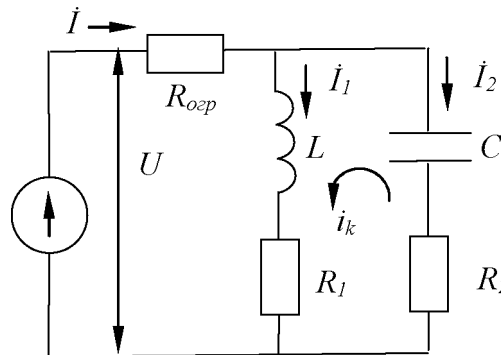


Рисунок 4.7 – схема с параллельным включением L и C

На рисунке 4,7 приведена схема с параллельным включением L и C , в которой возможен резонанс токов. Резисторы R_1 и R_2 в идеальном случае могут отсутствовать, однако в реальных расчетах они обозначают потери энергии в емкостном и индуктивном элементе. $R_{сер}$ включают для исключения перегрузки источника питания.

Закон Ома для параллельного соединения активного сопротивления, емкости, индуктивности в общем случае выражается формулой:

$$I = yU = U \sqrt{g^2 + (b_c - b_L)^2},$$

где g - активная проводимость;

b_L и b_c - реактивные проводимости, индуктивная и емкостная соответственно.

Угол сдвига фаз между током в неразветвленной части цепи I и приложенным напряжением равен

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

Если $b_L = b_c$, цепь будет вести себя так, будто она содержит только активное сопротивление. В этом случае в неразветвленной части цепи ток I будет совпадать по фазе с приложенным к контуру напряжением, $\varphi = 0$, $\cos \varphi = 1$. Такое состояние цепи называется резонансом токов.

Резонансная частота контура определяется следующим образом

$$b_L = \frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2} = \frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2}$$

$$b_c = \frac{X_c}{R_2^2 + X_c^2} = \frac{1}{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Т.к. при резонансе

$$b_C = b_L, \quad \frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} = \frac{\frac{1}{\omega C}}{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Отсюда

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_1^2}{\frac{L}{C} - R_2^2}}$$

При малых значениях активных сопротивлений R_1 и R_2 выражение для $f_{рез}$ для последовательного колебательного контура

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Векторная диаграмма цепи для случая, когда $b_C = b_L$ показана на рисунке 4.8а (значения величин взяты произвольно).

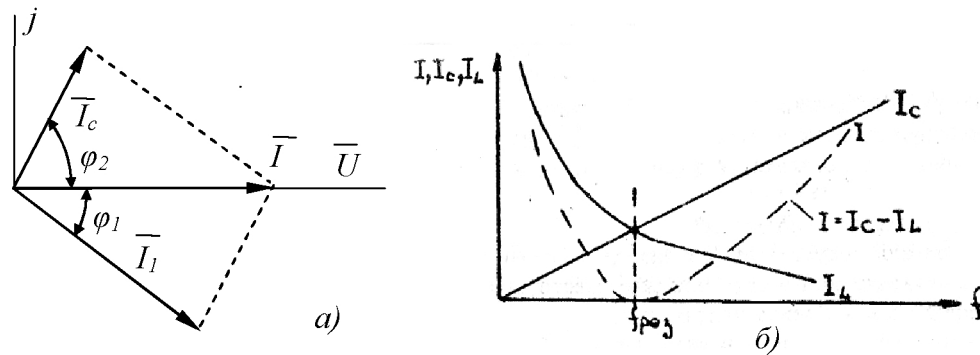


Рисунок 4.8 – векторная диаграмма и резонансные кривые цепи с параллельными LC

Общий реактивный ток, равный разности реактивных токов ветвей, при резонансе токов равен 0. Общий ток цепи имеет только активную составляющую, таким образом, его величина в момент резонанса имеет наименьшее значение. В идеальном случае, если $R_1 = R_2 = 0$, резонанс токов эквивалентен размыканию цепи.

Свойства параллельного колебательного контура характеризуются теми же величинами, что и последовательный колебательный контур.

Добротность $Q = \rho / R$ для параллельного контура равна отношению тока в индуктивности I_L или емкости I_C к току в неразветвленной части цепи при резонансе

$$Q = \frac{I_C}{I} = \frac{I_L}{I}$$

Резонансные кривые для параллельного колебательного контура показаны на рисунке 4.8б ($R \approx 0$).

Резонанс токов в отличие от резонанса напряжений не является опасным для электрических установок, поскольку в реальных условиях реактивные проводимости редко бывают высокими.

Явления резонанса напряжений и токов широко используются в технике связи, автоматике и телемеханике, для улучшения $\cos \phi$ в промышленных установках.

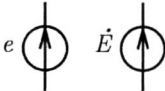
Путем настройки колебательного контура в резонанс с частотой передаваемого сигнала можно выделить полезный сигнал.

4.12 Пример задачи по расчету цепей переменного тока

При расчете цепей переменного тока наиболее удобным является комплексный (символьный) метод расчета, поскольку при его применении можно рассчитывать цепь, как при постоянном токе.

Выше было обосновано применение комплексного метода. Соберем основной материал в таблицу.

Таблица 4.1. Представление величин в комплексном виде

Источник	Мгновенное значение	Комплексное значение	Условное изображение
ЭДС	$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e)$	$\dot{E} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_e}$	
Тока	$J(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_J)$	$\dot{J} = \frac{J_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_J}$	
Элемент	Параметр	Комплексное сопротивление	Комплексная проводимость
Резистивный	R	R	$\frac{1}{R} = G$
Индуктивный	L	$j\omega L = jX_L$	$\frac{1}{j\omega L} = -jB_L$
Емкостный	C	$\frac{1}{j\omega C} = -jX_C$	$j\omega C = jB_C$

Необходимо подчеркнуть, что расчеты с помощью комплексного метода или с помощью векторных диаграмм возможны лишь в том случае, когда в цепи действуют источники ЭДС или тока одинаковой частоты. Фактически данные методы отслеживают лишь фазы и не в состоянии оперировать с источниками разных частот.

Для примера проведем расчет цепи с одним источником ЭДС, схема которой приведена на рисунке 4.9.

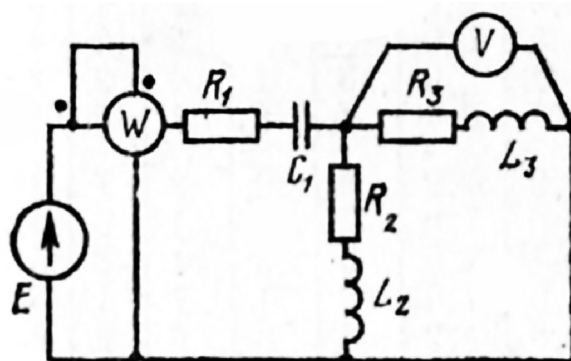


Рисунок 4.9 –электрическая цепь переменного тока

Дано $E=50В$, $F=50Гц$, $C_1=100мкФ$; $L_2=15мГн$; $L_3= 5мГн$;
 $R_1=10 Ом$; $R_2=4 Ом$; $R_3=100 Ом$.

Найти:

1. Сопротивление цепи в комплексном виде
2. Токи в цепи

3. Напряжение на вольтметре
4. Активную, реактивную и полную мощности

Для решения задачи схему разделим на три ветви, как показано на рисунке 4.10

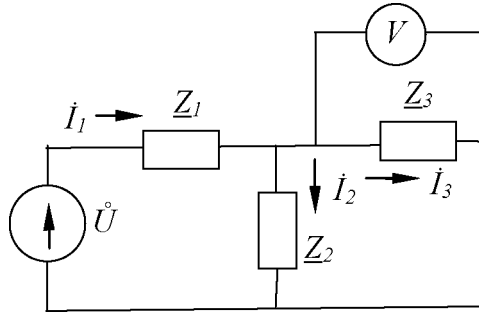


Рисунок 4.10 – эквивалентная схема цепи

Поскольку сопротивления последовательно соединенных элементов складываются, получаем:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}, \quad \underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2, \quad \underline{Z}_3 = R_3 + j\omega L_3.$$

Для получения численных имеет смысл использовать математические программные продукты. Необходимо также учесть, что в заданиях величины часто даются с размерностью мкФ, мГн, то есть 10^{-6} Ф и 10^{-3} Гн. Подставив значения с учетом $\omega = 2\pi f$, получаем

$$\underline{Z}_1 = 10 - 31.83j; \quad \underline{Z}_2 = 4 + 4.71j; \quad \underline{Z}_3 = 100 + 1.57j$$

Общее сопротивление цепи будет равно

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 14.038 - 27.483j$$

Общий ток в цепи вычисляется по закону Ома: $\dot{I} = \dot{I}_1 = E/\underline{Z} = 0.737 + 1.443j$

Взяв модуль числа, получаем ток в цепи $I_1 = 1.62$ А

Токи I_2 и I_3 можно получить несколькими способами, в том числе и по законам Кирхгофа. С учетом конкретной схемы, имеет смысл сначала найти напряжение на вольтметре. По второму закону Кирхгофа получаем:

$$\dot{U} = \dot{I}\underline{Z}_1 + \dot{V}; \quad \dot{V} = \dot{U} - \dot{I}\underline{Z}_1 = -3.297 + 9.03j. \quad \text{Вольтметр покажет } V = 9.61 \text{ В.}$$

Оставшиеся токи в цепи можно определить как:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{V}}{\underline{Z}_2} = 0.769 + 1.352j \quad \dot{I}_3 = \frac{\dot{V}}{\underline{Z}_3} = -0.032 + 0.091j$$

Взяв модуль комплексных чисел, получим $I_2 = 1.555$ А $I_3 = 0.096$ А

Для нахождения активной, реактивной и полной мощности цепи достаточно перемножить в комплексном виде $\underline{S} = E \dot{I} = 36.848 + 72.143j$.

Значит активная мощность $P = 36.848$ Вт, реактивная $Q = 72.143$ Вар и полная $S = 81$ ВА

5. Трехфазные электрические цепи

5.1 Общие сведения

Три взаимно связанные электрические цепи с ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, но сдвинутые по фазе одна относительно другой на $1/3$ периода называется трехфазной системой переменного тока.

Участок трехфазной системы, по которому протекает одинаковый ток, называется фазой.

Трехфазная цепь состоит из трехфазного генератора, соединительных проводов и приемников или нагрузки, которые могут быть однофазными или трехфазными.

Мгновенные значения действующих значений ЭДС имеют следующий вид:

$$e_1 = E_m \sin \omega t, \quad e_2 = E_m \sin(\omega t - 120^\circ), \quad e_3 = E_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

Отсюда видно, что сумма электродвижущих сил симметричной трехфазной системы в любой момент времени равна нулю.

Если концы трех обмоток соединить в один узел, а начала будут служить для подключения нагрузки, то такой вид соединения называют соединения обмоток генератора **звездой**. При этом три обратных провода сливаются в один, называемый нулевым или нейтральным.

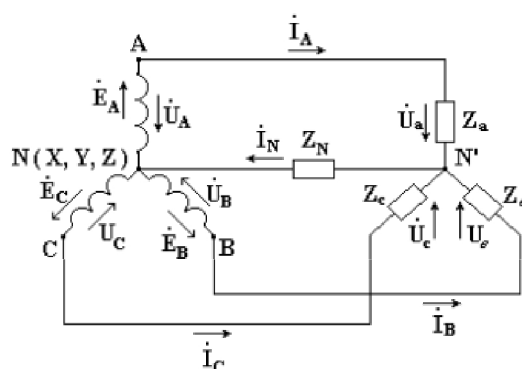


Рисунок 5.1 - трехфазная цепь, соединенная звездой

При таком способе соединения напряжение между каждой фазой и нулевым проводом называют **фазным напряжением**. Напряжение между фазами А-В, В-С, С-А называют **линейным напряжением**.

Соотношение между напряжениями имеет следующую формулу:

$$U_\phi = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}}$$

Внизу представлена векторная диаграмма фазных и линейных напряжений симметричного источника.

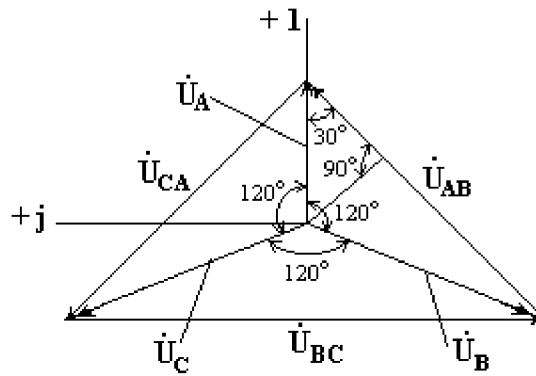


Рисунок 5.2 - векторная диаграмма фазных и линейных напряжений

Если соединить конец первой обмотки с началом второй, конец второй – с началом третьей, конец третьей – с началом первой, то получим соединение треугольником. При этом узлы соединения являются отводами.

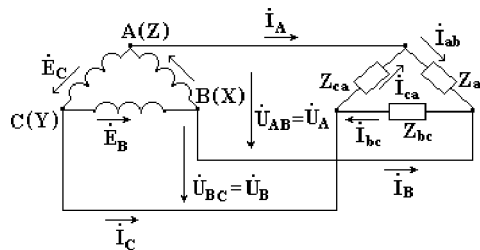


Рисунок 5.3 - схема соединения треугольником

При таком соединении нет различия между фазным и линейным соединением. Здесь появляется различие между фазными и линейными токами приемника.

Соотношение между фазными и линейными токами имеет следующую формулу:

$$I_{\phi} = \frac{I_n}{\sqrt{3}}$$

Внизу представлена векторная диаграмма фазных и линейных токов симметричного источника

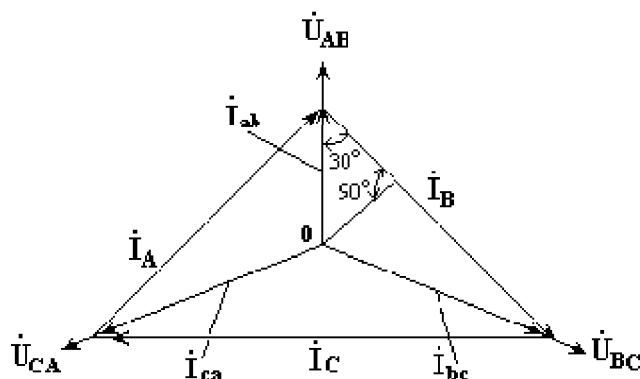


Рисунок 5.4 - векторная диаграмма фазных и линейных токов

Активная мощность трехфазного генератора равна сумме активных мощностей всех фаз:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = I_{\phi 1} U_{\phi 1} \cos \varphi_1 + I_{\phi 2} U_{\phi 2} \cos \varphi_2 + I_{\phi 3} U_{\phi 3} \cos \varphi_3$$

При симметричной нагрузке:

$$P = 3I_{\phi}U_{\phi} \cos \varphi_{\phi}$$

Когда цепь соединена звездой $U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$, и $I_{\phi} = I_{\text{л}}$, когда цепь соединена треугольником,

$$U_{\text{л}} = U_{\phi} \text{ и } I_{\phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}.$$

Если в формулах заменить фазные величины линейными, получим выражения для мощности:

$$P = 3I_{\phi}U_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3}I_{\text{л}}U_{\text{л}} \cos \varphi$$

Данная формула применима для трехфазных симметричных цепей или для почти симметричных.

Реактивную мощность создают колебания энергии электромагнитных полей цепи. Если протекающие колебания происходят одинаково во всех фазах трехфазной системы, реактивная мощность этой системы определяется соотношением фазных величин:

$$Q = 3I_{\phi}U_{\phi} \sin \varphi = \sqrt{3}I_{\text{л}}U_{\text{л}} \sin \varphi$$

Трехфазные цепи обладают следующими **преимуществами**:

- Экономичность передачи электроэнергии на значительные расстояния из-за меньшей материалоемкости силовых кабелей, так как при одинаковой потребляемой мощности снижаются токи в фазах (по сравнению с однофазными цепями).

- Меньшая материалоемкость 3-фазных трансформаторов.
- Уравновешенность системы. Это свойство является одним из важнейших, так как в неуравновешенной системе возникает неравномерная механическая нагрузка на энергогенерирующую установку, что значительно снижает срок её службы.
- Возможность простого получения кругового вращающегося магнитного поля, необходимого для работы электрического двигателя и ряда других электротехнических устройств. Двигатели 3-фазного тока (асинхронные и синхронные) устроены проще, чем двигатели постоянного тока, одно- или 2-фазные, и имеют высокие показатели экономичности.
- Возможность получения в одной установке двух рабочих напряжений — фазного и линейного, и двух уровней мощности при соединении на «звезду» или «треугольник».

Благодаря этим преимуществам, трёхфазные системы наиболее распространены в современной электроэнергетике.

5.2 Расчет трехфазных цепей

При расчете цепей, в которых трехфазная нагрузка симметрична или близка к симметричной, расчет токов и частичных напряжений выполняют для одной фазы.

Несимметричная нагрузка наиболее часто рассматривается как соединение потребителей звездой без нулевого провода или с нулевым проводом (рис. 5.5), который обладает некоторым сопротивлением z_0 . При задании линейного напряжения нагрузки $U_{\text{л}}$ можно к данной схеме добавить воображаемый трехфазный источник, который соединен по схеме «звезда». В итоге исходная схема имеет две нулевые точки: генератора O и нагрузки O' , которые представляют собой два узла схемы.

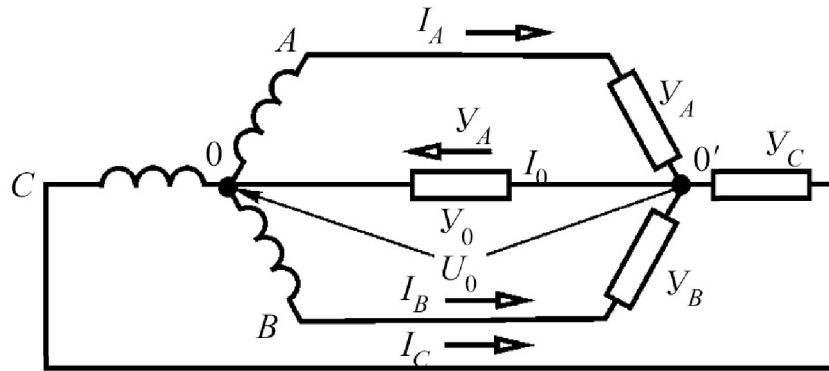


Рисунок 5.5 - Несимметричная нагрузка

Исходя из этого при расчетах следует использовать метод узлового напряжения. В этом случае проводимости постоянного тока заменяются комплексными величинами, соответствующими

полным проводимостям переменного тока $Y = 1 / Z$. При этом постоянные э. д. с. и токи заменяются на комплексные выражения соответствующих переменных напряжений и токов.

При этом в качестве узлового напряжения принимается напряжение U_0 между нулевыми точками генератора (O) и нагрузкой (O').

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}.$$

Если учесть соотношение между линейными и фазными напряжениями и сдвиги фаз между линейными напряжениями трехфазной цепи, получаем:

$$\dot{U}_A = U_\phi;$$

$$\dot{U}_B = U_\phi a^2 = U_\phi e^{-j\frac{2\pi}{3}} = U_\phi \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right);$$

$$\dot{U}_C = U_\phi a = U_\phi e^{j\frac{2\pi}{3}} = U_\phi \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right).$$

Таким образом, формула примет вид:

$$\dot{U}_0 = U_\phi \frac{Y_A + a^2 Y_B + a Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0}.$$

Применяя метод узловых потенциалов, получаем выражение для фазных напряжений и токов нагрузки:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{An} &= \dot{U}_A - \dot{U}_0; & \dot{U}_{Bn} &= \dot{U}_B - \dot{U}_0; & \dot{U}_{Cn} &= \dot{U}_C - \dot{U}_0; \\ \dot{I}_A &= (\dot{U}_A - \dot{U}_0) Y_A; & \dot{I}_B &= (\dot{U}_B - \dot{U}_0) Y_B; & \dot{I}_C &= (\dot{U}_C - \dot{U}_0) Y_C; \end{aligned}$$

Нулевой ток определится выражением:

$$\dot{I}_0 = -\dot{U}_0 Y_0.$$

На рисунке 5.6 показана векторная диаграмма данной ситуации. Из нулевой точки строят три вектора фазных напряжений, по ним строятся линейные напряжения.

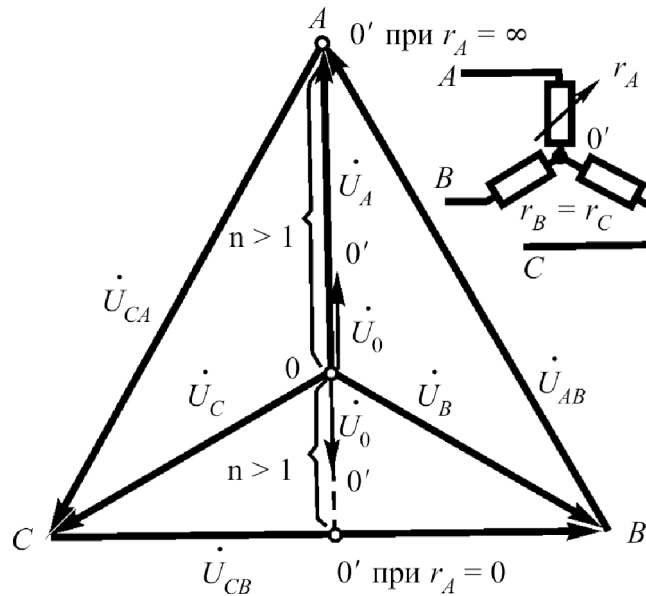


Рисунок 5.6 – Смещение нейтрали

Если нулевой провод отсутствует, фазные напряжения нагрузок не будут связанными с фазными напряжениями генератора, потому что на нагрузку действуют только линейные напряжения генератора. В этом случае за счет несимметричности нагрузки возникают несимметричность ее фазных напряжений и смещение нулевой точки от центра треугольника линейных напряжений.

В простейшем случае, когда вся нагрузка, причем две из трех фаз имеют равные проводимости $g_B = g_C = g$ и g_A , равна от нуля до бесконечности режимы фазы переходят из режима холостого хода к режиму короткого замыкания. Введем обозначение:

$$n = g_A / g.$$

При этом выражение примет вид:

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_A \frac{(n + a^2 + a)g}{(n - 2)g} = \dot{U}_A \frac{n - 1}{n + 2},$$

откуда получаем:

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_A \frac{1 - \frac{1}{n}}{1 + \frac{2}{n}}.$$

Если g_A изменяется от нуля до бесконечности, U_A принимает действительные значения, поэтому напряжение смещения нейтрали совпадает по фазе с $\dot{U}_A$. Геометрическое место точки $0'$ на диаграмме является перпендикуляром, опущенным из вершины A треугольника на противоположающую сторону. Например, при холостом ходе фазы A

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_A \left(-\frac{1}{2} \right).$$

При этом напряжения нагрузки будут определяться выражениями:

$$\dot{U}_{Ai} = \dot{U}_A - \dot{U}_0 = U_{\delta} \left(1 + \frac{1}{2} \right) = 1,5 U_{\delta};$$

$$\dot{U}_{Bi} = \dot{U}_B - \dot{U}_0 = U_{\delta} \left(\dot{a}^2 + \frac{1}{2} \right) = -j \frac{U_{\epsilon}}{2};$$

$$\dot{U}_{Ci} = \dot{U}_C - \dot{U}_0 = U_{\delta} \left(\dot{a} + \frac{1}{2} \right) = j\sqrt{3} \frac{U_{\delta}}{2} = j \frac{U_{\epsilon}}{2}.$$

Когда сопротивления фаз различаются по характеру, направление смещения нейтрали определяется последовательностью фаз системы.

6. Трансформаторы

6.1 Общие сведения

Трансформатором называется статичный (т.е. без движущихся частей) прибор, предназначенный чаще всего для преобразования одного переменного напряжения в другое напряжение той же частоты.

Трансформатор состоит из двух или более обмоток, которые связаны между собой через общий магнитный поток. Обмотки изолированы друг от друга (за исключением автотрансформаторов). Магнитная связь усиливается за счет сердечника, который состоит из листов электротехнической стали (6.1).

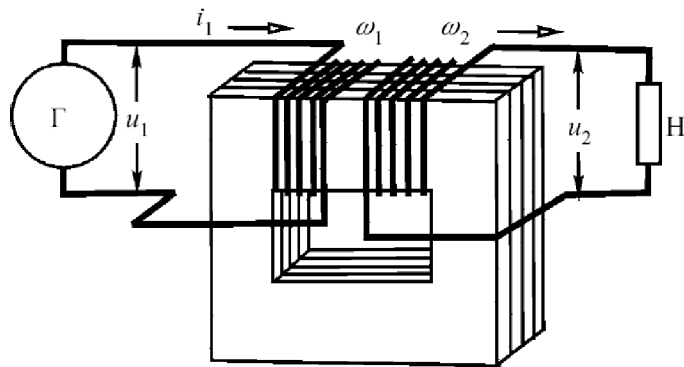


Рисунок 6.1 – Трансформатор

Обмотку трансформатора, которая соединяется с источником энергии, называют первичной. Обмотку, отдающую электроэнергию, а также величины, которые относятся к ней, называют вторичными. Соответственно все величины, характеризующие первичную обмотку, обозначают индексами 1, а вторичную — индексом 2.

Трансформаторы могут быть однофазным или трехфазным. Для трехфазного трансформатора первичной или вторичной обмоткой называют три фазные обмотки одного напряжения. По способу охлаждения трансформаторы могут быть сухими или масляными.

Щиток трансформатора содержит информацию о его номинальных напряжениях — высших и низших, номинальной и полной мощности, линейных токах, частоте, числе фаз, схеме и группе соединений и др. В случае, когда первичное напряжение U_1 меньше вторичного U_2 , трансформатор называют повышающим, если $U_1 > U_2$, его называют понижающим. Для трансформатора отношение амплитудных, мгновенных и действующих значений э. д. с. соответствует отношению количеств витков обмоток трансформатора:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2},$$

$$\frac{E_{1m}}{E_{2m}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = k_{12},$$

k_{12} называют коэффициентом трансформации.

Существует несколько видов потерь в трансформаторе. Часть полезной мощности тратится на нагрев обмоток, так как их сопротивление не равно нулю. Существуют также потери в сердечнике, связанные с затратами энергии на перемагничивание, на рассеивание магнитного поля и вихревые токи. Несмотря на большое количество видов потерь, коэффициент полезного действия трансформатора очень высок и составляет 98-99.5%.

6.2 Холостой ход трансформатора

Холостым ходом называется такой режим трансформатора, при котором к зажимам его первичной обмотки подключено переменное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута. Схема холостого хода показана на рисунке 6.2.

Этот режим применяется при испытании готового трансформатора. При холостом ходе первичное напряжение U_1 создается током холостого хода I_{10} , который создает магнитный поток $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$. Вместе с тем происходит частичное рассеяние магнитного потока Φ_{p1} .

На векторной диаграмме трансформатора при холостом ходе изображаются соотношения, подобные соотношениям в катушке со стальным сердечником, т. е. она повторяет векторную диаграмму катушки.

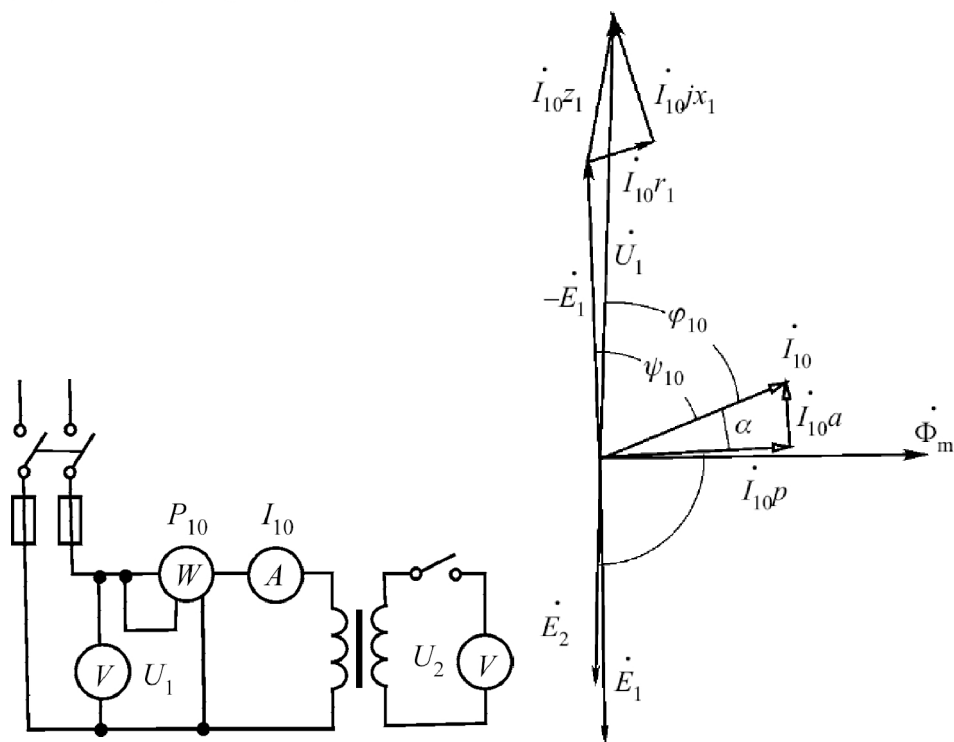


Рисунок 6.2 – Холостой ход трансформатора

Построение ее начинают с вектора Φ_m магнитного потока сердечника. Ток холостого хода I_{10} опережает вектор потока на угол магнитного запаздывания. Под прямым углом к вектору Φ_m в сторону отставания откладываем два вектора E_1 и E_2 . К вектору $\dot{E}$ прибавляем вектор $\dot{I}_{10}E_1$ который направлен параллельно $\dot{I}_{10}$, а также $\dot{I}_{10}jx_1$, который опережает $\dot{I}_{10}$ на $\pi/2$. Замыкается прямоугольный треугольник внутреннего падения напряжения, катетами которого являются векторы активного и реактивного падения напряжения на первичной обмотке, вектором полного внутреннего падения напряжения в обмотке — $I_1 Z_1$.

По опыту холостого хода можно вычислить коэффициент трансформации:

$$k_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_{20}}.$$

Мощность, которая потребляется трансформатором при холостом ходе, тратится на потери в сердечнике и потери в проводах только первичной обмотки $i_{10}^2 R_1$. При этом почти все потери сводятся к потерям в стали, поэтому опыт холостого хода применяется для расчета потерь стали трансформатора.

6.3 Построение векторных диаграмм нагруженного трансформатора

С помощью векторных диаграмм нагруженного трансформатора (рис. 6.3) наглядно показывается соотношение первичных и вторичных напряжений, а также токов. Диаграмму начинают строить с вектора главного магнитного потока $\dot{\Phi}_m$, после чего строится вектор тока холостого хода $\dot{I}_{10}$, который опережает вектор $\dot{\Phi}_m$ на угол магнитного запаздывания α . Вектор отстаёт от вектора на угол 90° .

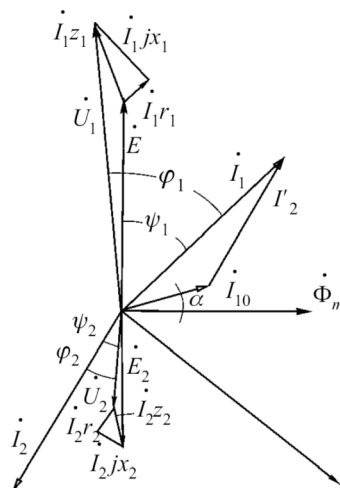


Рисунок 6.3 – диаграмма нагруженного трансформатора

Угол между ЭДС $\dot{E}_2$ и током во вторичной обмотке $\dot{I}_2$ определяется условиями нагрузки, которая включена во вторичную цепь. Если нагрузка носит активно-емкостный характер, этот угол определяется соотношением:

$$\psi_2 = \arctg \frac{x_2 + x_n}{R_2 + R_n}$$

Для построения вектора вторичного напряжения $\dot{U}_2$ из $\dot{E}_2$ вычитают оба падения напряжения на каждом из сопротивлений $\dot{I}_2 jx_2$ и $\dot{I}_2 R_2$. Образуется прямоугольный треугольник, катетами которого являются $\dot{I}_2 jx_2$ и $\dot{I}_2 R_2$, а гипотенузой — вектор $\dot{I}_2 Z_2$. Для построения вектора вторичного напряжения $\dot{U}_2$ соединяют начало координат с началом вектора $\dot{I}_2 Z_2$, учитывая, что $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$.

Для построения вектора первичного тока $\dot{I}_1$ находят векторную сумму тока холостого хода и приведенного вторичного тока $\dot{I}' = -\dot{I}_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}$. Вектор первичного напряжения строится исходя из соотношения $\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 R_1 + \dot{I}_1 jx_1$. В итоге полученный вектор первичного опережает вектор $\dot{I}_1$ на угол φ_1 ; при этом $\varphi_1 > \varphi_2$, так как проявляется влияние намагничивающего тока и внутреннего индуктивного сопротивления трансформатора.

6.4 Эквивалентная схема трансформатора и ее векторная диаграмма

Эквивалентная схема трансформатора — это комбинация сопротивлений, которая потребляет ту же мощность при том же токе и сдвиге фаз при включении ее вместо трансформатора. Можно преобразовать систему уравнений трансформатора таким образом, что параметры эквивалентной схемы можно будет определить через параметры трансформатора:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}Z_1 + (-\dot{E}_1) = \dot{I}_1Z_1 - k_{12}\dot{E}_2; \\ \dot{E}_2 = \dot{I}_2R_2 + \dot{U}_2 = \dot{I}_2Z_2 + \dot{I}_2Z_i. \end{cases}$$

Во втором уравнении, заменяя $\dot{I}_2 = -k_{12}\dot{I}_2'$, получаем:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1Z_1 + \dot{I}_2k_{12}^2Z_2 + \dot{I}_2'k_{12}^2Z_i$$

где $k_{12}^2Z_2 = Z_2'$ является приведенным полным внутренним сопротивлением вторичной обмотки; $k_{12}^2Z_i = Z_1'$ - приведенным полным сопротивлением нагрузки, включенной во вторичную обмотку трансформатора.

Таким образом, получаем уравнение, которое является первым уравнением напряжения эквивалентной схемы:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1Z_1 + \dot{I}_2'Z_2' + \dot{I}_2'Z_1'.$$

Если учесть, что для трансформатора $-\dot{E}_1 = \dot{I}_{10}Z_{12}$, при применении этого выражения к первому уравнению системы можно получить второе уравнение напряжений для составления эквивалентной схемы:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1Z_1 + \dot{I}_{10}Z_{12}.$$

Третьим уравнением может служить уравнение первичного тока:

$$\dot{I}_1' = \dot{I}_{10} + \dot{I}_2'.$$

При анализе полученных уравнений получаем эквивалентную схему трансформатора, которая является т-образной. При этом Z_1 заменяет первичную обмотку, Z_2' — вторичную обмотку и Z_{12} является магнитной цепью. При этом Z_1' заменяет нагрузку, замыкающую вторичную обмотку (рис. 6.4). Данное сопротивление находится вне эквивалентной схемы трансформатора.

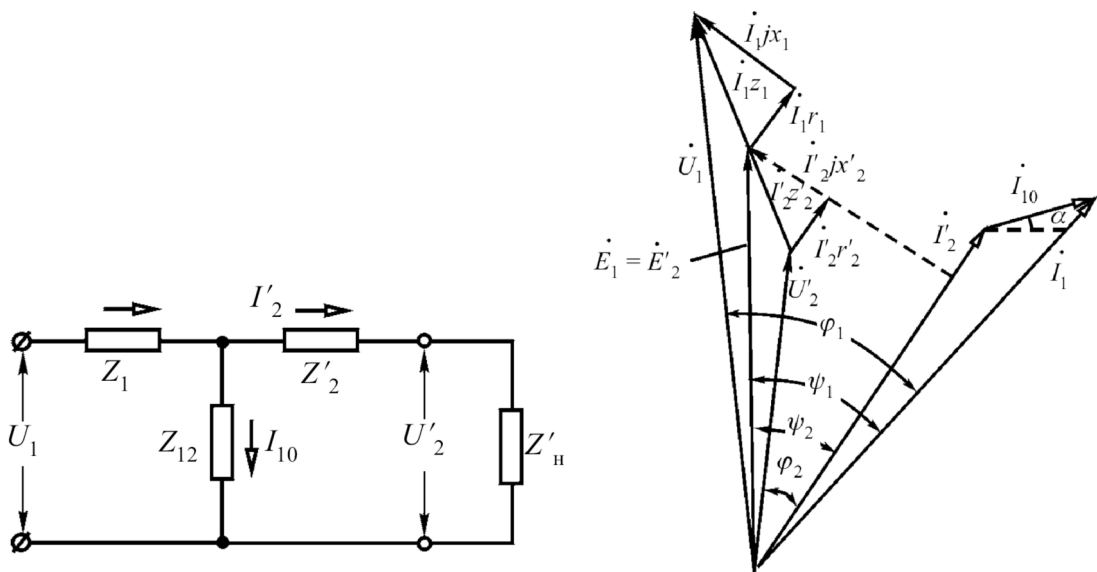


Рисунок 6.4 – Эквивалентная схема и векторная диаграмма трансформатора

Векторная диаграмма эквивалентной схемы (рис.6.4) отличается от диаграммы трансформатора тем, что в ней векторы вторичных напряжений и токов приведены к первичной обмотке и смещены на 180° . Строить данную диаграмму начинают с вектора $\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$. Приведенный вторичный ток строится под углом ψ_2 к $\dot{E}_1$ в сторону отставания:

$$\psi_2 = \arctg \frac{x_2' + x_1'}{R_2' + R_1'}$$

6.5 Короткое замыкание трансформатора

Режим короткого замыкания трансформатора характеризуется тем, что вторичная обмотка замкнута накоротко или на очень малое сопротивление. Опыт короткого замыкания используют для нахождения параметров трансформатора: внутреннего падения напряжения, потерь в проводниках и т. п. При проведении этого опыта зажимы вторичной обмотки трансформатора накоротко замыкают и напряжение на первичной обмотке значительно понижают, при этом сила тока I_{1k} в первичной обмотке равна номинальной. В цепи (рис. 6.5) измеряются U_{1k} , I_{1k} и P_{1k} . При этом в опыте должно выполняться:

$$\dot{E}_{2k} = \dot{I}_2 Z_2$$

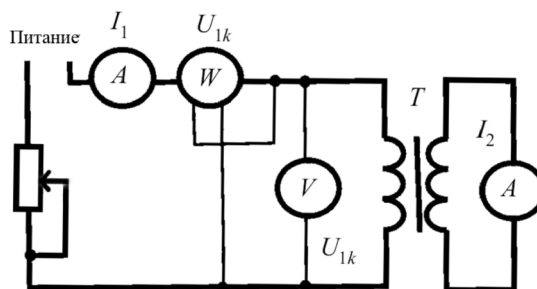


Рисунок 6.5 - Схема опыта короткого замыкания

В опыте короткого замыкания потеря в проводниках обмоток не изменяется относительно рабочего режима, и потери сердечника малы, т. е. при опыте короткого замыкания вся мощность P_{1k} тратится на электрические потери в проводниках обмоток трансформатора, т. е. $P_{1k} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$.

И если учесть, что намагничивающим током можно пренебречь, то получаем $I_1 = I_2$, т. е.

$$P_{1k} = I_1^2 R_1 + I_1'^2 R_2 = I_1^2 (R_1 + R_2') = I_1^2 R.$$

Из последнего выражения $R = \frac{P_{1k}}{I_1^2}$ и называется активным сопротивлением короткого замыкания трансформатора. Оно определяется по результатам опыта и ориентировочно определяет сопротивление нагруженного трансформатора. Для определения минимальных размеров трансформатора выбирается плотность тока в проводниках и индукция в сердечниках величины, соответствующей при работе предельно допустимой температуры нагревания. Подобное нагревание изменяет активное сопротивление проводников обмоток трансформатора и потери в них.

6.6 Особенности трехфазных трансформаторов

Для трехфазных трансформаторов можно применять формулы однофазного трансформатора для каждой из фаз. При трансформировании трехфазной системы токов возможно использование трансформаторной группы, т. е. трех однофазных трансформаторов, которые работают как единый агрегат.

Можно так соединить три трансформатора, чтобы при этом сэкономить материал. Три однофазных трансформатора (рис. 6.6) соединяем в один прибор, при этом в сердечнике остаются без изменения части, в которых намотана катушка, свободные же части сердечников соединяются в общий. В средней части общее магнитное поле равно нулю, поэтому ее можно убрать. Симметричные сердечники неудобны в применении и изготовлении, поэтому заменяются другим магнитопроводом (рис. 6.6г).

Симметричной трехфазной системой первичных напряжений трансформатора возбуждается в магнитопроводе симметричная система магнитных потоков. Однако вследствие неравенства магнитных сопротивлений намагничивающие токи в отдельных

фазах не равны. Но данная асимметрия для основных соотношений большого значения не имеет. С физической точки зрения в каждый момент поток одного стержня замыкается через два других стержня магнитопровода. Для фазных напряжений и токов отношения для однофазных трансформаторов применимы и для трехфазных. Это нарушается только при несимметричной нагрузке трехфазного трансформатора.

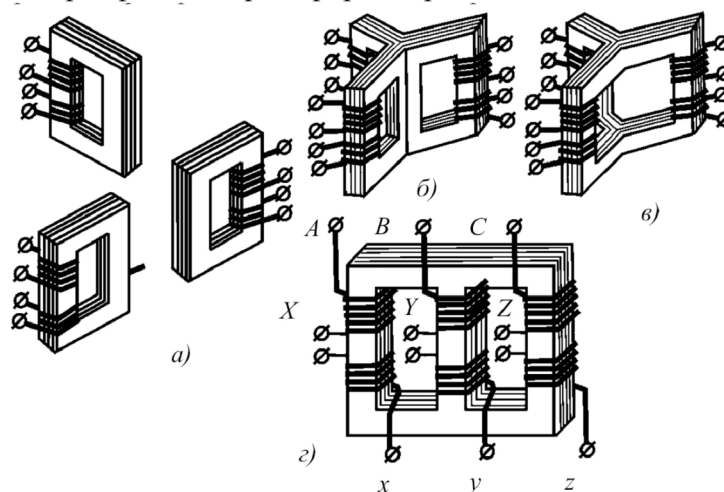


Рисунок 6.6 - Преобразование трех однофазных трансформаторов в трехфазный

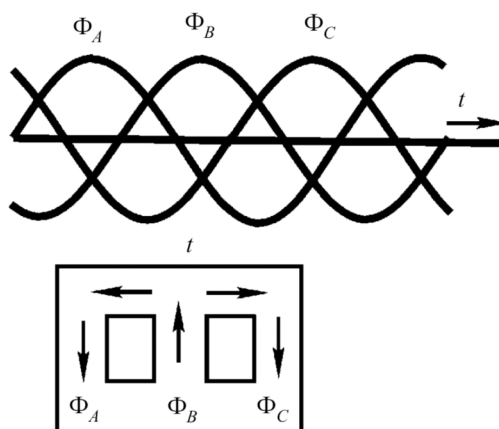


Рисунок. 6.7 - Магнитные потоки в сердечнике

Трехфазные группы характеризуются большей надежностью при эксплуатации по сравнению с однофазными и при этом обладают меньшими размерами при той же мощности, поэтому более удобны. Обмотки трехфазного трансформатора могут соединяться по схеме «звезда» Y или схеме «треугольник» Δ . Более просто и дешево соединять обмотки трансформатора звездой. При этом обмотки и их изоляция при глухом заземлении нулевой точки должны быть рассчитаны только на фазное напряжение и линейный ток. Это объясняется тем, что число витков обмотки трансформатора пропорционально напряжению, а при соединении звездой требуется меньшее количества витков, но большее сечение проводников с изоляцией, которые рассчитаны только на фазное напряжение. Такое соединение применяется для трансформаторов малой и средней мощности. Соединение треугольником более удобно при больших токах.

7. Электрические измерения

7.1 Измерительные приборы и методы измерений

Измерением называется сравнение физической величины с принятым за единицу значением через физический эксперимент. В общих случаях для такого сравнения измеряемой величины с мерой, которая называется вещественным воспроизведением единицы измерения, необходимо применить специальный прибор сравнения. Для упрощения процесса измерения применяется прибор непосредственного отсчета, который показывает численное значение измеряемой величины на шкале или циферблате. При этом не применяется мера, но она учитывалась при градуировании шкалы данного прибора.

По способу получения результата измерения называют прямыми, косвенными и совокупными.

Измерения называются прямыми, если результаты измерений непосредственно определяют значение величины.

Измерения называются косвенными, если измеряемую величину определяют через прямые измерения других физических величин, связанных с определяемой известной зависимостью. При косвенных измерениях вероятно снижение точности по сравнению с точностью при прямом измерении, так как наблюдается сложение погрешностей прямых измерений величин, которые входят в расчетные уравнения.

Измерения называются совокупными, если конечный результат измерений определяется из результатов нескольких групп прямых или косвенных измерений отдельных величин, от которых исследуемая величина зависит некоторым образом.

По способу применения приборов и мер различают следующие основные методы измерения: метод непосредственного измерения, нулевой и дифференциальный.

Метод непосредственного измерения характеризуется тем, что измеряемая величина определяется путем непосредственного отсчета показания измерительного прибора или сравнения с мерой имеющейся физической величины. При данном методе пределом точности измерения считается точность измерительного прибора непосредственного отсчета.

Нулевой метод заключается в том, что образцовая величина регулируется и доводится до равенства с измеряемой величиной. При этом измерительный прибор, который должен обладать высокой чувствительностью, устанавливает факт осуществления равенства. Из числа подобных методов электрических измерений выделяются мостовые и компенсационные.

Дифференциальные методы измерения обладают еще большей точностью. При этом измеряемую величину уравнивают известной величиной, однако до полного равновесия измерительная цепь не доводится, а путем прямого отсчета измеряется разность измеряемой и известной величин. Примером применения такого метода является измерение Э. Д. С. через сравнение ее с известной и близкой к ней по значению ЭДС другого источника.

7.2 Виды погрешностей измерения и классы точности

Погрешности делятся на основные и дополнительные.

Основная погрешность характеризует точность измерений. Различают абсолютные, относительные и приведенные погрешности. Абсолютной погрешностью ΔA называют разность между измеренными $A_{из}$ и действительными A значениями искомой величины:

$$\Delta A = A_{из} - A$$

Относительной погрешностью называется отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины

$$\gamma_0 = \frac{\Delta A}{A}$$

Если учесть, что A и $A_{из}$ приблизительно малы, то можно записать:

$$\gamma_0 \approx \frac{\Delta A}{A_{из}}$$

Часто для относительную погрешность указывают в процентах:

$$\gamma_0 = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\%$$

Для того чтобы оценить точность стрелочных измерительных приборов применяют приведенную погрешность. Это выраженная в процентах величина, равная отношению абсолютной погрешности к наибольшему показанию прибора A_M :

$$\gamma_{np} = \frac{\Delta A}{A_M}$$

Погрешность зависит от качества прибора и внешних условий. Основной называется такая приведенная погрешность, которая определяется в нормальных рабочих условиях, т. е. зависит только от недостатков прибора. К нормальным рабочим условиям относят температуру 20 °С, положение прибора, указанное условным знаком на его шкале, изоляцию от внешних магнитных полей и др.

Допускаемая основная погрешность данных приборов относит их к тому или иному классу точности. Класс точности — допускаемая основная погрешность приборов. По ГОСТ 1845-59 электроизмерительные приборы делятся на восемь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4. Класс точности указывает максимально допустимую основную погрешность прибора на всех делениях рабочей части шкалы.

Отклонения внешних условий от нормальных приводит к дополнительным погрешностям.

7.3 Системы электроизмерительных приборов

Приборы прямого отсчета включают в себя измерительный механизм и измерительную цепь.

Измерительный механизм предназначен для преобразования подводимой к нему электрической энергии в механическую энергию, которая необходима для перемещения подвижной части и связанного с ней указателя. Измерительная цепь предназначена для преобразования измеряемой электрической величины в пропорциональную ей величину, которая непосредственно воздействует на измерительный механизм.

По виду физического явления, которое используется для измерения, измерительные приборы разделяют по системам. Среди них самыми распространенными являются магнитоэлектрические, электромагнитные, индукционные, электродинамические и ферродинамические системы.

Магнитоэлектрические измерительные механизмы применяют для измерений постоянного тока. В этих механизмах вращающий момент создается при взаимодействии измеряемого тока, который проходит по катушке механизма, с полем постоянного магнита. Применяются два основных типа приборов магнитоэлектрической системы: приборы с подвижной катушкой (подвижной рамкой) и приборы с подвижным магнитом. Приборы, содержащие подвижную катушку, применяются чаще, чем приборы, содержащие подвижный магнит.

В приборах с подвижной катушкой ее устанавливают на опорах таким образом, что она была способна поворачиваться в воздушном зазоре магнитной цепи постоянного магнита 1 (рисунок 7.1). Ток к катушке подводится посредством пружины или растяжки, с их же помощью получается противодействующий момент.

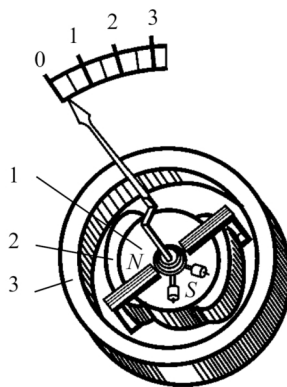


Рисунок 7.1 - Магнитоэлектрический механизм с внутрирамочным магнитом

На рисунке 7.1 показаны механизмы с внутрирамочным магнитом. В этом случае магнитная цепь образуются магнитопроводом 2, полюсными наконечниками 3 и цилиндрическим сердечником 4. В таких механизмах в качестве сердечника применяется сам магнит 1, а его охватывает цилиндрический магнитопровод 3, изготовленный из магнитно-мягкого материала.

На каждый проводник в таких механизмах действует электромагнитная сила:

$$F = BIl,$$

при этом l — активная длина проводника, которая приблизительно равна высоте катушки h . Так как катушка имеет ω витков и диаметр d , то для определения вращающего момента, который действует на подвижную часть механизма,

$$M_{BP} = \frac{f2\omega d}{2} = \omega h d B I$$

Если учесть, что $S = h d$, получим:

$$M_{BP} = \omega S B I.$$

Отсюда видно, что вращающий момент прямо пропорционален току. Так как противодействующий момент, который создается спиральными пружинами, прямо пропорционален углу закручивания, можно сделать вывод, что сила тока пропорциональна углу поворота механизма.

Приборы магнитоэлектрической системы с подвижным магнитом обладают вращающим моментом, который создается действием на подвижный магнит магнитного поля измеряемого тока, проходящего через катушку 1. Пружину заменяют направляющей силой неподвижного постоянного магнита 2. Этот прибор прост по устройству и устойчив к перегрузкам, но обладает низкой точностью из-за влияний гистерезиса.

Измерительные приборы электродинамической природы обладают вращающим моментом, который образуется при взаимодействии проводников, по которым протекают токи. Подобные измерительные механизмы состоят из неподвижной и подвижной катушек. Противодействующий момент создается спиральными пружинами 3, которые вместе с тем используются для подвода тока в подвижную катушку, занимающую под действием электродинамических сил положение, при котором ее магнитное поле совпадает по направлению с направлением поля неподвижной катушки.

Электродинамические приборы применяются для измерения как постоянного, так и переменного токов, при этом шкала у приборов для обоих родов тока одна и та же. Из-за присутствия подвода тока в подвижную часть и плохого охлаждения электродинамические механизмы не выдерживают значительной перегрузки, к тому же они дороги. При этом класс точности электродинамических приборов может достигать 0,1.

В настоящее время всё большее распространение получают цифровые измерительные приборы. Основным недостатком стрелочных измерительных устройств является необходимость зрительно определять положение стрелки на шкале. Для повышения

точности требуется увеличивать размер шкалы, чтобы разместить больше делений. Кроме того, механический принцип действия делает затруднительным получение точности измерений свыше 0.1%. В цифровых измерительных приборах отсутствуют движущиеся части и шкала; измерительным элементом является аналогово-цифровой преобразователь, который входное напряжение преобразует в цифровой код, который после обработки выводится на дисплей. Погрешность современных цифровых измерителей достигает 0,0001% и постоянно улучшается.

8. Асинхронные машины

8.1 Общие сведения

Электрические двигатели — машины, преобразующие электрическую энергию в механическую. Электрические генераторы—машины, преобразующие механическую энергию в электрическую.

Среди большого числа электрических машин самой распространенной является асинхронная бесколлекторная машина, которую применяют как двигатель. Асинхронная машина характеризуется тем, что при ее работе возбуждается вращающееся магнитное поле, которое вращается асинхронно относительно скорости вращения ротора. В состав асинхронной машины входят три неподвижные катушки, которые размещены на общем сердечнике, и помещенная между ними четвертая вращающаяся катушка. В подобных машинах отсутствуют легко повреждающиеся или изнашивающиеся электрические части (коллектор).

Трехфазные асинхронные машины должны иметь на статоре три фазные обмотки, которые оставляют обмотку статора. Токи трехфазной системы проходят по этим обмоткам и возбуждают в машине вращающееся магнитное поле. Усиление этого поля и придание ему нужной конфигурации осуществляется с помощью магнитной системы машины, в состав которой входят два цилиндра, полый цилиндр и сердечник ротора (рисунок 8.1). Сердечники собраны из пластин электротехнической стали и изолированы друг от друга слоем лака, что обеспечивает уменьшение потерь от вихревых токов. Фазные обмотки, которые возбуждают вращающееся магнитное поле, размещаются в пазах на внутренней стороне сердечника статора. Обмотка ротора располагается в пазах на внешней поверхности цилиндра ротора. Она не соединена с сетью и с обмоткой статора, так как токи в ней индуцируются вращающимся магнитным полем.

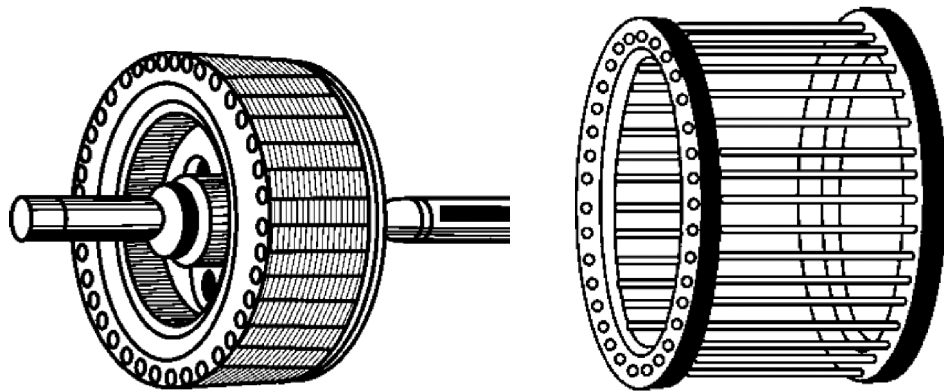


Рисунок 8.1 Сердечник ротора

Машина также состоит из неэлектрических частей: вала, на который насажен сердечник ротора, массивного корпуса, в котором укрепляется сердечник статора, подшипниковых щитов, на подшипники которых опирается вал машины.

Асинхронная машина может работать как двигатель или как генератор, т. е. она обратима, но чаще всего она используется как асинхронный двигатель.

В асинхронных двигателях фазные обмотки статора получают энергию из трехфазной сети, токи которой в обмотках статора возбуждают в машине вращающееся магнитное поле, индуцирующее ток в замкнутой обмотке ротора. Ротор вращается по направлению вращения поля вследствие взаимодействия токов ротора с вращающимся магнитным полем. Вращение ротора должно осуществляться асинхронно и медленнее поля. В этом случае токи, которые индуцируются в роторе, создают вращающий момент, который уравнивает

тормозящий момент от сил трения и нагрузки на валу. Электродвижущая сила, которая индуцируется в обмотке ротора, пропорциональна частоте вращения поля по отношению к ротору. Такая относительная скорость определяется как разность частот вращения поля n_1 и ротора n , т. е. равна $n_1 - n$ оборотов в минуту. Скольжение является отношением относительной скорости к частоте вращения поля:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

ЭДС, которая индуцируется в роторе, пропорциональна скольжению. Если нагрузка возрастает, тормозящий момент на валу двигателя становится больше вращающего, в результате ротор уменьшает скорость. Однако при увеличении скольжения возрастает величина индуцируемых в роторе э. д. с. и токов, поэтому увеличивается вращающий момент. При возрастании скольжения восстанавливается динамическое равновесие вращающих и тормозящих моментов. При этом увеличение токов ротора приводит к увеличению токов статора и возрастанию мощности, которую потребляет двигатель из сети.

Чаще всего в двигателях применяется короткозамкнутый ротор. Он отличается дешевизной и простотой обслуживания. Обмотку короткозамкнутого ротора изготавливают в виде цилиндрической клетки из медных или алюминиевых стержней, вставляемых без изоляции в пазы сердечника ротора (рисунок 8.1). Концы стержней замыкают накоротко кольцами, которые изготавливают из того же материала.

Обмотка статора предназначена для возбуждения магнитного потока машины. Потоки фазных обмоток должны быть распределены синусоидально вдоль окружности статора, так как в этом случае вращающееся магнитное поле индуцирует в обмотках синусоидальные э. д. с. Для лучшего использования окружности статора стороны катушек обмотки распределены по нескольким пазам (рис. 8.2) вдоль внутренней окружности статора.

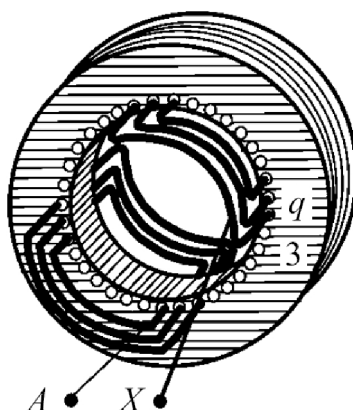


Рисунок 8.2 -Катушка распределенной обмотки статора

С помощью распределения обмотки по пазам достигается распределение магнитной индукции по окружности статора. Магнитное сопротивление по окружности статора считается постоянным, так как магнитная система симметрична, и магнитное насыщения сердечника влияет мало, так как большая часть магнитного сопротивления образует магнитное сопротивление воздушного зазора между статором и ротором. Так как магнитное сопротивление по закону Ома для магнитной цепи постоянно, поток и индукцию фаз считают пропорциональными намагничивающим силам. Однако по краям фазных катушек магнитная индукция изменяется пропорционально возбуждающей намагничивающей силе. Кривая распределения магнитной индукции катушки показана на рисунке 8.3. Зная характер данного распределения обмотки, можно получать практически синусоидальное распределение индукции в воздушных зазорах машины.

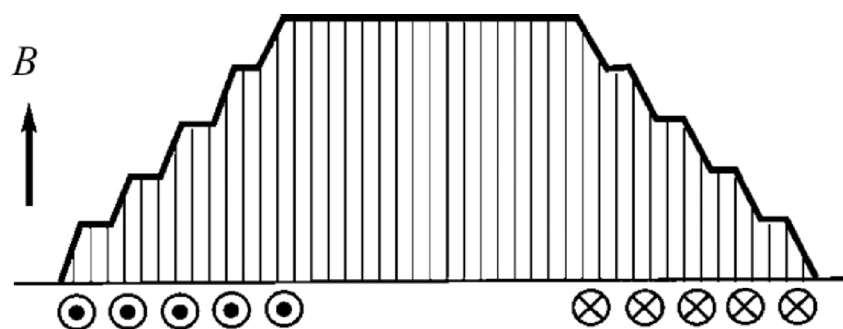


Рисунок 8.3 – Кривая магнитной индукции

Для распределения многовитковой катушки по нескольким пазам необходимо ее разделить на некоторое число соединенных последовательно секций. При этом каждая из секций состоит из нескольких витков. Схемы обмоток показывают не отдельные витки, а стороны секций.

При создании асинхронного двигателя необходимо уменьшить скорость вращения поля. Для этого применяется многополюсные обмотки статора. В этом случае каждой паре полюсов вращающегося поля ставятся в соответствие три катушки.

При этом в случае, когда поле имеет p пар полюсов, число катушек обмотки статора должно быть $k = 3p$.

На рисунке 8.4 показана упрощенная схема шестиполусной ($p = 3$) обмотки статора. Для двухполюсных обмоток характерно расстояние между сторонами катушки, равное 180° , в многополюсной — $180/p$ т. е. в шестиполусной катушке оно равно 60° . В этой обмотке $3p = 9$ катушек, т. е. каждая фаза имеет три катушки. Для упрощения изображения схем каждую катушку изображают в виде одновитковой секции и соединения наносят только для фазы **A**, при этом соединения на тыльной торцевой стороне сердечника показывают пунктиром. На рисунке также показаны кривые для мгновенных значений трехфазной системы токов статора.

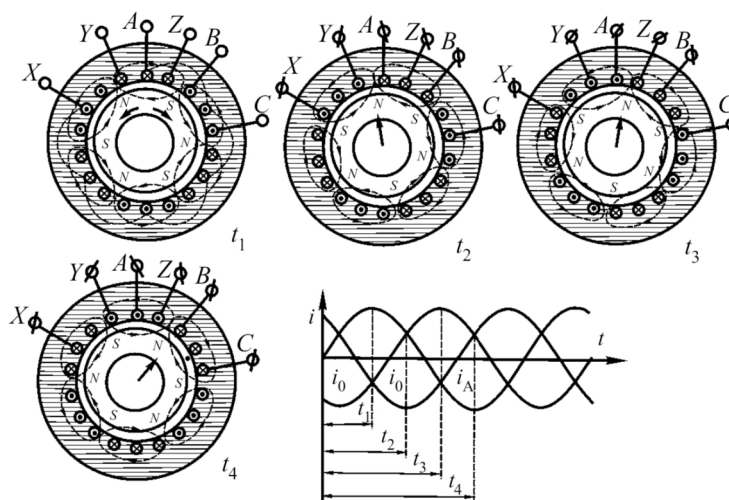


Рисунок 8.4 - Схема шестиполусной обмотки статора

Для того чтобы изменить направление вращения двигателя, т. е. совершить реверсирование, нужно изменить соединения обмотки статора с сетью – для этого достаточно поменять местами любые две фазы двигателя.

8.2 Эквивалентная схема двигателя

При расчетах рабочих процессов асинхронных двигателей удобно использовать эквивалентную схему двигателя (рисунок 8.2). Она представляет собой несколько электрически соединенных активных и индуктивных сопротивлений и изменяющееся активное сопротивление, которое заменяет на эквивалентной схеме нагрузку вала двигателя. Обоснование эквивалентной схемы обеспечивается с помощью преобразования основных уравнений двигателя. Если учесть, что эквивалентную схему включают в сеть вместо статора, все роторные величины нужно привести к числу витков, обмоточному коэффициенту, а также числу фаз статора.

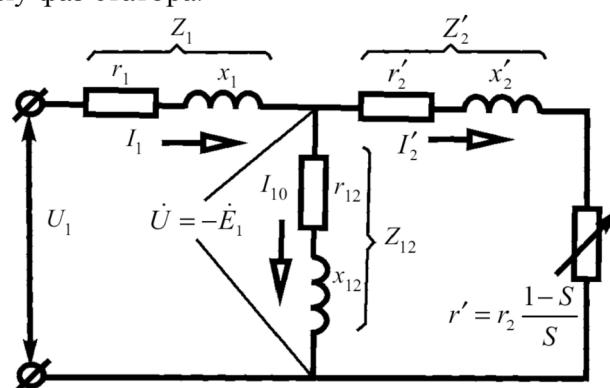


Рисунок 8.5 - Эквивалентная схема двигателя

Асинхронный двигатель — трехфазное устройство, в котором фазы являются симметричными. Следовательно, при составлении эквивалентной схемы можно ограничиться одной фазой двигателя. Электродвижущая сила статора E_1 связана с ЭДС неподвижного ротора $E_{2н}$:

$$E_1 = \frac{E_{2н} \omega_1 k_{об2}}{\omega_2 k_{об2}} = E_{2н} k_{об}$$

где $k_{об}$ — коэффициент трансформации напряжений асинхронной машины.

С учетом векторной диаграммы двигателя:

$$\dot{E}_{2н} = \dot{I}_2 \left(\frac{R_2}{s} + j\omega L_2 \right) = \dot{I}_2 (R_2 + R + j\omega L_2) = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_2 R,$$

Отсюда

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_2 (Z_2 + R) k_e.$$

Для тока ротора можно записать выражение через приведенный ток:

$$\dot{I}_2 = -\frac{\dot{I}'_2 3\omega_1 k_{об1}}{m_2 \omega_2 k_{об2}} = -\dot{I}'_2 k_i,$$

где k_i — коэффициент трансформации токов асинхронной машины.

В результате подстановки получаем:

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}'_2 (Z_2 + R) k_e k_i.$$

Выражение $k_e k_i = k$ называется коэффициентом трансформации асинхронной машины.

Применим выражение для приведенных сопротивлений:

$$Z_2 k_e k_i = Z'_2 \text{ и } R k_e k_i = R'.$$

Данные сопротивления при включении в цепь статора потребляют такую же мощность, как и при соответствующих сопротивлениях, которые находятся в цепи ротора.

Подставляя в выражение для ЭДС статора, получаем:

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}'(Z'_2 + R').$$

При этом напряжение статора находится соотношением:

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 Z_1 = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}'(Z'_2 + R').$$

Если учесть, что ЭДС E_1 пропорциональна току намагничивания I_{10} , можно записать соотношение:

$$(-\dot{E}_1) = \dot{I}_{10} Z_{12},$$

где Z_{12} имеет размерность сопротивления и изображает в эквивалентной схеме магнитную цепь двигателя. Отсюда получаем выражение для напряжения статора:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_{10} Z_{12}.$$

Учтем также уравнение тока статора:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + \dot{I}_2.$$

Если рассмотреть два уравнения напряжения статора на основании законов Кирхгофа для схемы на рисунке, то в ней Z_1 — обмотка статора, — обмотка ротора, Z_{12} — магнитная цепь машины, R' — механическая нагрузка.

В случае синхронного вращения двигателя, т. е. когда $s = 0$, по нему проходит ток I'_{10} холостого хода и определяется из опыта холостого хода. В этих условиях сопротивление, которое изображает механическую нагрузку, можно выразить соотношением:

$$R' = \frac{R_2}{s} - R_2 = R_2 \frac{1-s}{s} = \infty.$$

Когда происходит торможение двигателя, $s = 1$, поэтому $R' = 0$. Поэтому опыт торможения двигателя называют опытом короткого замыкания, который осуществляется при понижении напряжения на статоре асинхронного двигателя.

8.3 Рабочие характеристики двигателя

С помощью механических характеристик можно показать свойства двигателя как части электропривода. Рабочие характеристики двигателя более полно выявляют свойства самого двигателя. К ним относят зависимость частоты вращения n , от мощности P_2 , которую отдает двигатель на вал, вращающих моментов M и т. д.

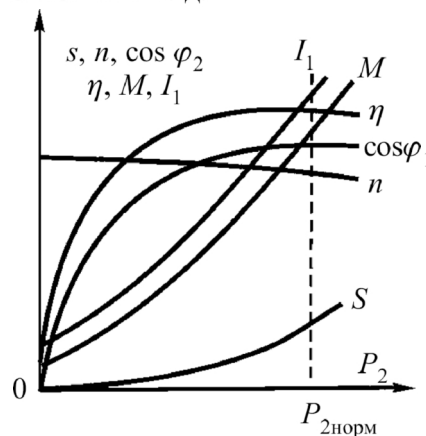


Рисунок 8.6 - Рабочие характеристики двигателя

Для снятия рабочих характеристик применяются цепи с номинальными частотами сети f и напряжениями на статоре U . Вращающий момент M , который развивает двигатель, получается при сложении полезного момента M_2 , который отдается валу двигателя, и момента холостого хода M_0 , который затрачивается на механические потери двигателя. M_0 приближенно считают не зависящим от нагрузки двигателя. Для полезного момента $M_2 = F(P_2)$, т. е. при постоянной скорости вращения двигателя зависимость является линейной. Но в реальных условиях M_2 отклоняется вверх.

Для построения кривой $M = F(P_2)$ необходимо сложить момент холостого хода и полезный момент. Она пересечет ось ординат в точке M_0 , после чего почти прямолинейно направляется вверх (рисунок 8.6).

Для выяснения зависимости $\cos\phi_1$ двигателя от нагрузки необходимо учесть некоторые соотношения. Ток намагничивания двигателя почти не зависит от нагрузки, поскольку ее увеличение приводит к возрастанию только потоков рассеяния, которые пропорциональны токам статора и ротора. При этом главный магнитный поток двигателя при увеличении нагрузки слабо уменьшается, а активный ток двигателя зависит от его механической нагрузки. Следовательно, увеличение нагрузки двигателя приводит к убыванию относительного значения реактивного тока. При этом $\cos\phi_1$ увеличивается. В режиме холостого хода двигателя его коэффициент мощности низок. Увеличение нагрузки приводит к его увеличению до максимальных значений (0,7—0,9), когда нагрузка близка к номинальной, т. е. даже полностью загруженный двигатель обладает реактивным током, который составляет 70—40% тока статора.

Магнитный поток двигателя прямо пропорционален напряжению на статоре. Намагничивающий ток, который возбуждает этот поток, при известном значении потока обратно пропорционален магнитному сопротивлению на пути потока. В данном магнитном сопротивлении основную часть составляет сопротивление воздушных зазоров между статором и ротором. Поэтому величину воздушных зазоров стремятся уменьшить, что положительно влияет на величину коэффициента мощности. Для нахождения коэффициента полезного действия применяется формула:

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

При этом подводимую мощность находят как сумму полезной мощности и мощностей всех потерь двигателя:

$$P_1 = P_2 + P_{\text{пот}}$$

Потери принято разделять на постоянные, которые почти не зависят от нагрузки, и переменные, которые от нее зависят.

Постоянные потери — потери в стали сердечника статора на гистерезис и вихревые токи, а также на механические потери. Для их определения применяют опыт холостого хода двигателя.

Переменные потери — потери на нагревание проводников в статоре и роторе. Переменными потерями считают и добавочные потери, возникающие при изменении вращения ротора относительного положения зубцов статора. Для снижения данных потерь применяют скос пазов ротора относительно пазов статора. КПД является максимальным при условии, что переменные потери равны постоянным. Максимальный КПД асинхронной машины составляет примерно 75%.

9. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

9.1 Общие сведения

Машина называется синхронной, если частота вращения связана постоянным отношением с частотой f сети переменного тока, в которую эта машина включается. Такие машины применяют в качестве генераторов переменного тока промышленной частоты, а также, когда нужен двигатель, который работает при постоянной частоте вращения. Синхронная машина состоит из статора и ротора, при этом статор похож на статор асинхронной машины. Сердечник статора собирается из листов электротехнической стали, которые изолированы друг от друга, и укрепляется внутри массивного корпуса. В пазах внутри статора размещается обмотка переменного тока, чаще всего трехфазная. Ротор синхронной машины является электромагнитом. На обмотку возбуждения ток поступает через контактные кольца и щетки от внешнего источника постоянного тока, который называют возбудителем. Многополюсная синхронная машина содержит ротор с p парами полюсов. Токи в обмотке статора формируют p пар полюсов магнитного поля, совершающего вращения. Ротор вращается с частотой вращения магнитного поля, т. е. его скорость

$$n = \frac{f}{p}$$

Синхронные двигатели широко применяют для разных видов привода, которые работают с постоянной частотой вращения. Чаще всего данные двигатели являются явно полюсными мощностью от 40 до 7500 кВт, с частотами вращения от 125 до 1000 об/мин. Двигатели и генераторы отличаются наличием на роторе дополнительной короткозамкнутой обмотки или подобного приспособления. Также различие выражается в меньшем воздушном зазоре между статором и ротором. Синхронные двигатели имеют КПД выше, чем асинхронный двигатель той же массы.

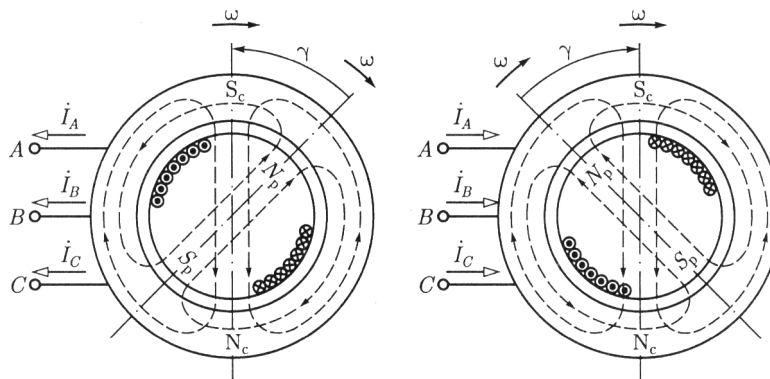


Рисунок 9.1 - принцип действия синхронной машины

Для синхронных машин иногда используются те же названия, как и в машинах постоянного тока: якорем называют часть, в обмотке которой индуцируется э. д. с., т. е. в синхронных машинах статор является якорем. Индуктором, который возбуждает главный магнитный поток, в синхронной машине является ротор. Важное отличие синхронной и асинхронной машин заключается в том, что главный магнитный поток в ней создает намагничивающая сила постоянного тока возбуждения, получаемого машиной от возбудителя. Поэтому синхронная машина при работе в режиме двигателя может не загружать сеть намагничивающим током. Чаще всего в качестве возбудителей применяются небольшие генераторы постоянного тока с самовозбуждением или генераторы с независимым возбуждением от подвозбудителя.

Синхронная машина является обратимой, т. е. может работать как двигатель и как генератор. Машина переходит из режима генератора к режиму двигателя в зависимости от

действия на ее вал вращающей или тормозящей механической силы. Если действует вращающая сила, машина получает на валу механическую энергию, которую он перерабатывает в электрическую. Если действует тормозящая сила, машина потребляет из сети электрическую энергию перерабатывает ее в механическую.

Для синхронного генератора рабочий процесс определяется тем, связана ли его частота и э. д. с. с частотой тока в сети, которая питается другими синхронными генераторами, или он работает независимо и сам задает частоту тока в сети. При независимой работе частота сети изменяет значение вместе с частотой вращения первичного двигателя, который вращает синхронный генератор. При этом э. д. с., которые индуктируются в обмотках статора, при подключении нагрузки создают токи в обмотках статора. Эти токи взаимодействуют с магнитным полем машины и создают тормозящую силу, преодолевающую первичный двигатель. При увеличении нагрузки генератора увеличивается и тормозящая сила, приводящая к преобразованию механической мощности первичного двигателя в электрическую мощность, которая отдается в сеть.

Когда синхронный генератор работает параллельно с сетью, которая питается другими генераторами, частота машины соответствует частоте сети. Однако для того чтобы частота машины была постоянной, необходимо постоянно синхронизировать частоту вращения ротора, чтобы индуктируемая им ЭДС совпадала с изменениями напряжения внешней сети.

Поле ротора, которое является главным магнитным полем, возбуждается постоянным током, но, кроме него, трехфазная система переменных токов статора образует свое магнитное поле. Угловую скорость данного поля определяет частота переменного тока:

$$\omega_n = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p}$$

где ω — частота переменного тока;

p — количество пар полюсов вращающегося поля.

Генераторный режим машины характеризуется опережением ротором поля статора, при котором взаимодействие токов статора и поля машины создает механическую силу, которая тормозит вращение ротора; эту силу необходимо преодолевать первичному двигателю машины.

В случае параллельной работы синхронной машины с другими синхронными машинами, для того чтобы включить машины в общую сеть, нужна предварительная синхронизация. Она заключается в том, чтобы приравнять частоту вращения машины с частотой сети. При этом э. д. с. машины должна быть равна по величине и противоположна по фазе напряжению сети. В случае идеальной синхронизации машины и сети токи в обмотках статора после включения машины на параллельную работу станут равными в результате того, что поле ротора индуктирует в обмотках статора э. д. с., которые уравнивают полностью напряжение сети. При этом синхронная машина не будет отдавать энергию в сеть и не будет потреблять ее. Таким образом, машина не является ни генератором, ни двигателем. Потери такой машины, механические и магнитные, при этих условиях покрывает первичный двигатель, т. е. чтобы синхронная машина, которая включена в сеть, работала как генератор, отдавая в эту сеть энергию, нужно увеличить механический момент, приложенный первичным двигателем к валу машины.

9.2 Асинхронный пуск синхронного двигателя

При пуске синхронного двигателя его вращающий момент равен нулю, т. е. двигатель нужно раскрутить до частоты вращения, которая близка к синхронной. Иногда для этого применяется специальный разгонный асинхронный двигатель малой мощности, а двигатель синхронизируется с сетью по примеру генератора при включении на параллельную работу.

Чаще всего применяется другой вид пуска. Для приспособления двигателя к такому пуску при явно полюсном роторе в полюсные наконечники закладывают пусковую короткозамкнутую обмотку, которая состоит из медных или латунных стержней. Она

похожа на беличье колесо асинхронной машины и занимает небольшую часть окружности ротора.

Пуск двигателя можно разделить на два этапа: I — асинхронный набор частоты вращения без возбуждения постоянным током; II — втягивание в синхронизм после включения постоянного тока возбуждения. Первый этап такого пуска характеризуется тем, что обмотку возбуждения отключают от источника постоянного тока и замыкают её на активное сопротивление $R_{\text{пуск}}$, которое во много раз превышает активное сопротивление обмотки возбуждения. Нельзя оставлять обмотку возбуждения разомкнутой, потому что вращающееся поле способно индуцировать в ней большую ЭДС которая опасна для целостности изоляции. Однако не следует замыкать эту обмотку накоротко, из-за того что в ней возникает большой однофазный ток, способный тормозить ротор при достижении им половины синхронной частоты вращения. Чаще всего для уменьшения пусковых токов применяют включение двигателя через пусковой автотрансформатор либо через реактивную катушку. Двигатель приобретает синхронную частоту вращения под действием электромагнитных сил и развивает необходимый вращающий момент. Такой пуск не требует операций по синхронизации двигателя с сетью и может быть автоматизирован.

Для пуска мощных синхронных двигателей можно улучшить условия пуска и работы через применение для питания цепи возбуждения управляемых кремниевых вентилей — тириستоров.

10. Машины постоянного тока

10.1 Общие положения

Двигатель постоянного тока — электрическая машина, машина постоянного тока, преобразующая электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию.

В состав некоторых электрических машин входит коллектор, который представляет собой полый цилиндр, набранный из изолированных клинообразных медных пластин. Пластины коллектора изолируют от вала машины. Для соединения с витками обмотки, которые размещены в пазах ротора, применяются проводники. В коллекторных щеткодержателях помещаются неподвижные щетки, служащие для соединения с внешней цепью вращающейся обмотки.

Коллекторы применяются в генераторах постоянного тока. Они предназначены для выпрямления переменной ЭДС, которая индуцируется по вращающейся обмотке. В двигателях постоянного тока коллектор применяется для образования постоянного тока по направлению вращающего момента.

При применении коллектора в двигателях переменного тока проявляются ценные свойства двигателей постоянного тока: возможность плавно и в широких пределах регулировать скорость вращения; коллекторные генераторы переменного тока позволяют получать переменный ток постоянной частоты при переменной частоте вращения первичного двигателя.

Коллекторный одноякорный преобразователь применяется в качестве преобразователя переменного тока в постоянный, или постоянного тока — в переменный, или для изменения частоты переменного тока. В некоторых специальных установках используют каскадное соединение коллекторных машин с бесколлекторными крупными асинхронными двигателями, что позволяет плавно и экономично регулировать частоту вращения и коэффициент мощности данных двигателей.

Но присутствие коллектора удорожает машину, усложняет ее эксплуатацию и уменьшают надежность.

В состав машины постоянного тока входят неподвижная часть, которая служит для возбуждения главного магнитного поля, и вращающаяся часть, которая индуцирует ЭДС и токи, создает тормозящий момент в генераторе и вращающий момент в двигателе.

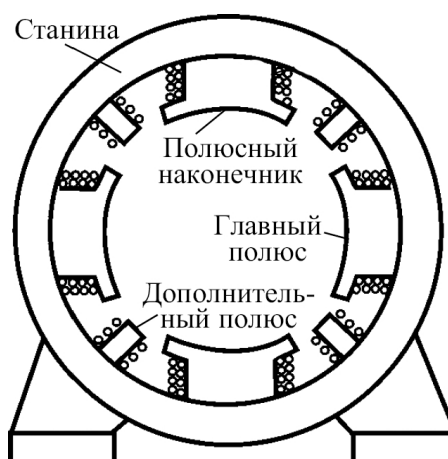


Рисунок 10.1 – Станина машины постоянного тока

Неподвижную часть иногда называют статором, и она состоит из станины (рис. 10.1) с укрепленными в ней основными полюсами возбуждения главного магнитного потока и дополнительными полюсами для лучшей коммутации машины.

Главный полюс содержит сердечник, набранный из листов электротехнической стали и укрепленный болтами на станине, а также катушку обмотки возбуждения. На свободном конце сердечника укрепляются полюсные наконечники для равномерного распределения магнитной индукции по окружности якоря.

Станина играет роль ярма машины, т. е. она замыкает магнитную цепь главного потока. Ее изготавливают из литой стали, так как магнитный поток в ней относительно постоянен. На станине между основными полюсами помещаются дополнительные, сердечники которых крепятся болтами к станине, а катушки их обмоток соединяются последовательно с якорем.

Якорь — часть машины, в обмотке которой при вращении ее относительно главного магнитного поля индуцируется ЭДС. Якорь в машинах постоянного тока имеет в составе зубчатый сердечник, обмотку, которая уложена в пазах сердечника, и коллектор, который насажен на вал якоря. Сердечник состоит из листов электротехнической стали, изолированных друг от друга. В пазах сердечника якоря располагается обмотка якоря, которая обычно состоит из отдельных секций. Для отведения тока от коллектора применяют угольные или медные щетки, которые устанавливают в щеткодержателях. Щетка прижимается к коллектору пружиной. Ток от щетки отводят через специальный гибкий кабель. Щеткодержатели надевают на щеточную траверсу, от которой они изолируются. Траверсу устанавливают на подшипниках машины, и она способна поворачиваться и при этом изменять положение щеток по отношению к полюсам машины.

Машина постоянного тока является обратимой, т. е. она работает в режиме генератора, когда ее вращает двигатель. При этом главное магнитное поле возбуждается, а цепь якоря замкнута через щетки на нагрузку. В таких условиях обмотка якоря индуцирует ЭДС, посылающую ток через коллектор и щетки во внешнюю цепь. Внутри машины взаимодействует ток якоря с главным магнитным полем, в результате чего создается тормозящий момент, который должен преодолевать первичный двигатель. Таким образом, машина из механической энергии получает электрическую.

Если цепь якоря и цепь возбуждения машины присоединить к источнику, то напряжение создает ток в обмотках машины и ток якоря, которые при взаимодействии с главным магнитным полем формируют вращающий момент. Под его действием якорь приходит во вращение, т. е. машина работает в режиме двигателя.

По способу возбуждения главного магнитного поля машины постоянного тока разделяют на группы. Машины независимого возбуждения имеют обмотку возбуждения, которая получает ток от независимого источника (рисунок 10.2а). При этом сила тока возбуждения не зависит от напряжения на зажимах якоря машины.

При выборе сечений проводов обмотки возбуждения необходимо учитывать напряжение источника тока возбуждения. Для таких машин характерна независимость главного магнитного потока от нагрузки машины.

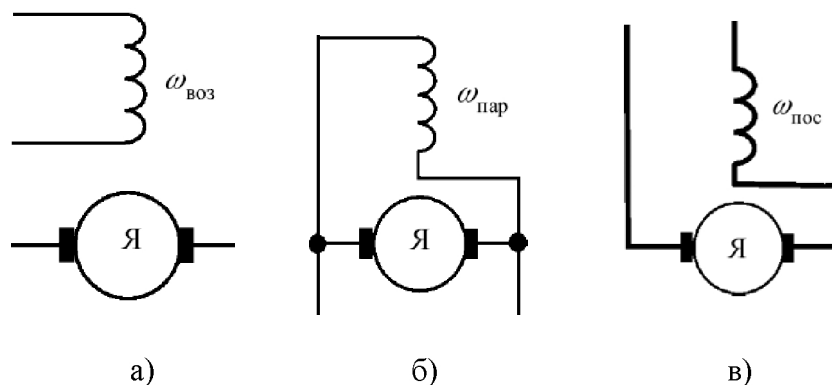


Рисунок 10.2 – Схемы подключения обмоток возбуждения

Машины параллельного возбуждения обладают цепью обмотки возбуждения, которая соединяется параллельно с цепью якоря (рисунок 10.2б). При такой схеме возбуждения ток

I_b в несколько раз меньше силы тока якоря, и напряжение U на зажимах цепей якоря и возбуждения сохраняется, т. е. сопротивление обмотки возбуждения должно принимать большое значение. В обмотке возбуждения такой машины содержится большое число витков тонкого провода, и поэтому его сопротивление значительно. В машинах параллельного возбуждения главный магнитный поток является независимым.

Машины последовательного возбуждения обладают полным током якоря, который проходит через обмотку возбуждения (рисунок 10.2в). По этой причине для обмотки используется провод большого сечения. Обмотка последовательного возбуждения имеет большую силу тока I_a , поэтому для получения намагничивающей силы ($I\omega$) достаточно небольшого числа витков, которые обладают небольшим сопротивлением. В таких машинах изменения главного магнитного потока возможны в широких пределах применениях нагрузки машины. Это является следствием изменений силы тока якоря, являющегося одновременно и током возбуждения.

10.2 Выпрямление переменной ЭДС посредством коллектора и щеток

ЭДС, которая индуцируется в обмотках, имеет вид:

$$E_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Таким образом при продолжительном процессе ЭДС должна быть переменной, так как потокосцепление не может возрастать неограниченно, а при убывании ЭДС меняется знак производной. Поэтому во вращающейся обмотке машины индуцируется переменная ЭДС, для выпрямления которой необходим коллектор. Выпрямление этой ЭДС можно проследить на примере устройства кольцевого якоря.

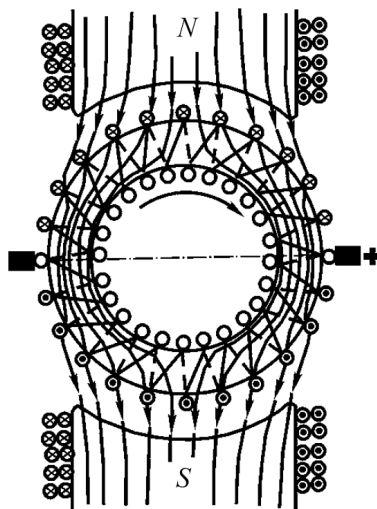


Рисунок 10.3 – Схема кольцевого якоря с обмоткой

Сердечник кольцевого якоря выполнен в виде полого цилиндра (рис. 10.3), который собран из пластин электротехнической стали. Обмотка кольцевого якоря обвивает цилиндр и образует замкнутый контур из большого числа витков. Главные полюсы образуют магнитный поток, который проходит по сердечнику якоря, не проходя во внутреннюю полость цилиндра якоря. Поэтому при вращении якоря магнитное поле воздействует только на проводники обмотки, которые лежат на внешней поверхности якоря, и ЭДС индуцируется только в них. По правилу правой руки определяем, что э. д. с., которые индуцируются в проводниках, лежат под разноименными полюсами, поэтому имеют противоположное направление. Вследствие симметричного построения машины ЭДС не создают внутреннего уравнительного тока.

Для использования ЭДС двух половин обмотки при рассмотрении двухполюсной машины можно наложить на якорь две неподвижные щетки, при этом освободив от изоляции ту часть поверхности проводников якоря, которая касается щеток при вращении якоря. Ставить щетки необходимо посередине между главными полюсами. Таким образом, обмотка разделяется на две параллельные ветви, которые являются двумя источниками ЭДС. Эти ЭДС способны совместно посылать токи во внешнюю цепь.

ЭДС, образующиеся в витках параллельных ветвей обмотки, должны иметь одинаковые направления, которые зависят от направлений магнитного поля и вращения якоря. Щетки стоят между главными полюсами машины в области, где магнитная индукция является практически равной нулю (рис. 89). Данное пространство называется нейтральной зоной машины. По окружности якоря магнитная индукция будет распределяться в зависимости от магнитного сопротивления. Для равномерности распределения применяются полюсные наконечники. Когда щетки сдвинуты из нейтральной зоны, в одной и той же параллельной ветви помещаются секции с противоположным направлением ЭДС, поэтому напряжение между щетками уменьшается. Оно станет равным нулю при помещении щеток под середины полюсов.

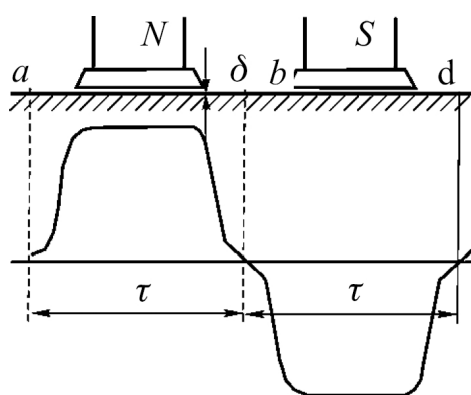


Рисунок 10.4 - Магнитная индукция

За счет щеток напряжение на зажимах машины является постоянным, несмотря на то что в каждом из проводников обмотки ее якоря индуцируется переменная ЭДС. Проводники, которые движутся непрерывно, переходят от северного к южному полюсу, поэтому направление индуцируемой в них э. д. с. изменяется.

При этом по отношению к полюсам машины положение группы проводников остается постоянным. Одни проводники из этой группы уходят, но то же количество проводников в нее поступает.

Когда число пар полюсов машины больше 1, спиральная обмотка кольцевого якоря должна иметь увеличенное число щеток, чтобы соединять параллельно все ветви обмотки.

Рассмотренная схема машины не имела коллектора, так как его роль выполняла сама обмотка якоря. Однако при контакте щеток с обмоткой якоря условия работы контактов неблагоприятны вследствие высокой скорости на поверхности якоря. Такие контакты можно сделать надежнее, если перенести щетки на пластины коллектора. Пластины необходимо соединить проводниками (петушками) с соответствующими секциями якоря. Щетки соединяют параллельно ветви обмотки так же, как при прямом контакте с якорем. Так как диаметр коллектора намного меньше диаметра якоря, его окружная скорость значительно уменьшается. При этом пластины коллектора механически значительно прочнее проводников обмотки якоря.

В генераторах щетки и коллектор применяют для выпрямления переменной ЭДС витков обмотки. В двигателях коллектор и щетки призваны обеспечивать непрерывность вращения. Через все проводники параллельной ветви обмотки якоря протекают одинаковые токи. Когда на все эти проводники действует электромагнитная сила одинакового

направления, двигатель развивает максимальный вращающий момент. Если проводник переходит от одного полюса к другому полюсу, то и щетки, и коллектор производят переключение направления тока, проходящего по проводнику. За счет этих переключений направление вращающего момента сохраняется постоянным.

10.3 Реакция якоря

Реакция якоря — воздействие намагничивающей силы якоря на магнитное поле машины. Реакция якоря чаще всего признается нежелательным явлением, которое искажает основное магнитное поле и ухудшает условия работы машины. Поэтому при конструировании машины стремятся уменьшить влияние реакции якоря.

При прохождении тока по обмотке возбуждения ($I_a = 0$) магнитное поле машины является симметричным относительно оси сердечников полюсов и под полюсами почти равномерно. На рисунке 10.5а схематически показано поле двухполюсной ($p = 1$) машины.

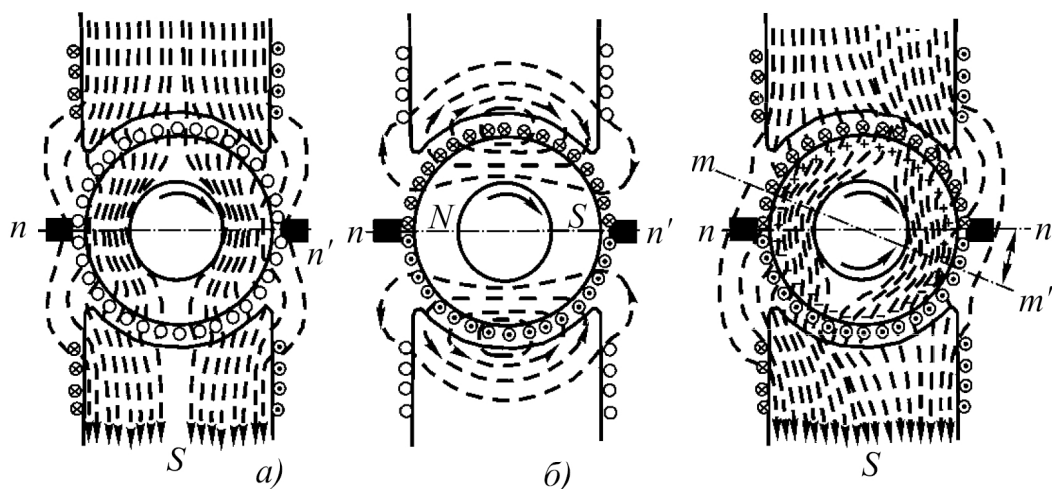


Рисунок 10.5 - Магнитное поле машины

Геометрической нейтралью $n - n'$ называется линия, которая перпендикулярна оси полюсов и разделяет на дуге якоря северный и южный полюсы. Геометрическая нейтраль является физической нейтралью, т. е. линией, которая проходит через такие точки окружности якоря, где магнитная индукция равна нулю.

В момент прохождения тока по обмотке якоря он становится электромагнитом (рисунок 10.5б) с направлением оси по оси щеток. Ось поля якоря направлена перпендикулярно относительно оси поля главных полюсов. При таких условиях поле якоря является поперечным. Если нагрузить машину, реакция якоря воздействует на основное поле и создает результирующее поле. Характер этого поля изображен на рисунке 10.5в. В машине поток смещается в направлении ее вращения в генераторном режиме или против — в двигательном режиме. В этом случае поток распределен несимметрично относительно оси полюсов. Он ослабляется у одного края и усиливается у другого. При этом под влиянием реакции якоря физическая нейтраль $m - m'$ сместится относительно геометрической нейтрали и щетки.

Для того чтобы ослабить реакцию якоря в машинах, увеличивают магнитное сопротивление на пути потока якоря. Это обеспечивается созданием относительно большого воздушного зазора между якорем и полюсными наконечниками, а также выбором сечения зубцов якоря таким образом, чтобы увеличить их индукцию. При дальнейшем увеличении индукции происходит возрастание магнитного сопротивления зубцов, что соответствует увеличению воздушного зазора на пути потока якоря. Но для поддержания необходимого

полезного потока в машине нужно соответственно увеличить намагничивающие силы главных полюсов, т. е. увеличить габариты и массу машины.

Еще одним способом уменьшения смещения физической нейтральной точки из-за реакции якоря является снабжение машины дополнительными полюсами, которые необходимы и для улучшения коммутации. Их устанавливают на станине машины по линии геометрической нейтральной точки (рис. 10.6).

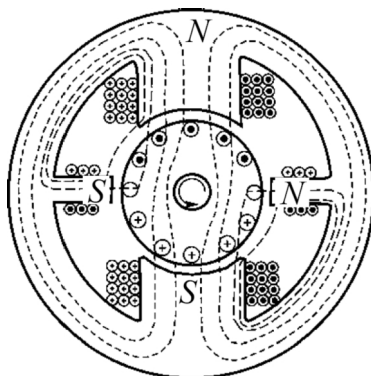


Рисунок 10.6 - Устройство дополнительных полюсов

Обмотки этих полюсов соединяют через щетки последовательно с обмоткой якоря. При этом направление намагничивающей силы дополнительных полюсов должно быть противоположно направлению намагничивающих сил реакции якоря, т. е. дополнительные полюсы экранируют поле реакции якоря в небольшой зоне коммутируемых секций. Благодаря этому предупреждается смещение физической нейтральной точки относительно геометрической.

Так как намагничивающую силу дополнительных полюсов создает ток якоря, компенсация реакции якоря происходит при любых нагрузках машины, при этом важно, чтобы магнитная цепь дополнительных полюсов не была насыщена.

Когда машина работает в режиме генератора, дополнительные полюсы должны иметь полярность тех главных полюсов, на которые набегает якорь, а при работе в режиме двигателя — полярность тех полюсов, из-под которых якорь выбегает.

С помощью дополнительных полюсов не устраняются создаваемые реакцией якоря неравномерное распределение индукции под полюсами и уменьшение полезного потока. В крупных машинах значительное повышение индукции под полюсами приводит к перекрытию изоляционного промежутка между пластинами коллектора и вызывает круговой огонь. Для предупреждения такой аварии нужно полностью компенсировать реакцию якоря. Для этого применяют компенсационные обмотки.

Под щетками на коллекторе происходит искрообразование, способное вызвать быстрое разрушение коллектора из-за высокой температуры искры, которая способна разрушить металлы и сплавы. Поэтому для увеличения срока службы машины постоянного тока необходимо устранить искрение под щетками, так как искры быстро разрушают пластины коллектора и щетки.

Среди причин искрообразования можно выделить механические и электрические. Среди механических причин основной является ухудшение контакта коллектора со щетками, что возникает вследствие неровности коллектора, дрожания щеток и т. п.

Электрической причиной является неудовлетворительная коммутация. Коммутация — это совокупность явлений при изменении направления тока в секциях обмотки якоря в течение замыкания щетками этих секций накоротко.

10.4 Режим двигателя

Так как электрические машины обратимы, генераторный режим машины можно изменить на двигательный. Подобное изменение режима чаще всего осуществляется для генератора параллельного возбуждения, который работает от сети постоянного тока. Для этого нужно уменьшить силу тока возбуждения так, чтобы ЭДС якоря стала меньше напряжения сети. Преобладание напряжения сети приведет к изменению направления тока обмотки якоря, создаваемого разностью напряжения сети и ЭДС якоря, т. е.

$$E_{\text{я}} = i_{\text{в}} R_{\text{в}} + L \frac{di_{\text{в}}}{dt}.$$

При взаимодействии этого тока с магнитным полем машины создается вращающий электромагнитный момент. Под его действием якорь придет во вращение без помощи первичного двигателя, и двигатель можно расцепить с машиной. Этим способом машина из режима генератора переводится в режим двигателя и при работе потребляет из сети мощность $P = U(I_{\text{я}} + I_{\text{в}})$.

Энергетическую диаграмму можно представить в виде, показанном на рисунке 10.7. Мощность, которая подводится из сети, разделяется между цепью якоря и цепью возбуждения. Небольшой процент мощности, которая потребляется цепью якоря, тратится на нагревание обмотки; оставшаяся мощность преобразуется в механическую $P_{\text{мех}}$. Но для определения полезной мощности, которая отдается валу машины, необходимо отнять от механической мощности потери в стали $P_{\text{с}}$ и механические потери.

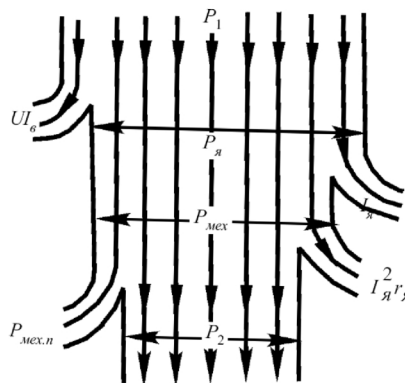


Рисунок 10.7 - Энергетическая диаграмма двигателя

ЭДС якоря при таком режиме работы направлена против тока, поэтому ее называют противоэлектродвижущей силой. Напряжение на якоре определяется выражением:

$$U = I_{\text{я}} R_{\text{я}} + E_{\text{я}}.$$

Умножим это уравнение на ток якоря и, если учесть, что $UI_{\text{я}} - I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} = P_{\text{мех}} = E_{\text{я}} I_{\text{я}}$, получим:

$$UI_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + P_{\text{мех}}$$

Данное уравнение показывает, что мощность, которую потребляет цепь якоря, складывается из мощности тепловых потерь $I_{\text{я}} R_{\text{я}}$ и механической мощности.

Присутствие противо-ЭДС, характеризует преобразование электрической энергии в механическую электромагнитным устройством. Отсюда ясно, что при увеличении $E_{\text{я}}$ увеличивается КПД двигателя.

Чаще всего режим двигателя осуществляется пуском машины в ход, для чего ее включают под напряжение питающей сети постоянного тока. При этих условиях, пока якорь покоится ($\omega = 0$), ЭДС в нем не появляется, поэтому напряжение $U_{\text{я}} = I_{\text{я}} R_{\text{я}}$. Так как сопротивление не изменяется, сила тока $I_{\text{я}}$ в момент пуска двигателя должна превышать рабочее значение в 25—40 раз, что недопустимо ни для коллектора и обмотки якоря, ни для сети, которая питает двигатель.

Для устранения пускового тока последовательно к якору всех двигателей постоянного тока включают пусковой реостат

Вращающий момент, который создает пусковой ток, приводит в движение якорь, и в его обмотках индуцируется противоЭДС $E_{я}$, которая ограничивает силу тока якоря, двигателя. С помощью равенства моментов определяется частота вращения якоря, пропорциональная противо-э. д. с. $E_{я}$.

Если учесть, что частота вращения двигателя обратно пропорциональна главному магнитному потоку Φ и прямо пропорциональна напряжению U якоря, то регулировать ее можно изменением магнитного потока или изменением напряжения якоря.

Для того чтобы реверсировать двигатель постоянного тока, нужно изменить направление тока в одной цепи двигателя, либо в цепи возбуждения, либо в цепи якоря. Если изменить направление тока в обеих цепях двигателя, изменения направления вращающего момента не произойдет.

Вид рабочих характеристик двигателей зависит от способа возбуждения их главного магнитного поля.

11 Электробезопасность

Широкое применение электрической энергии привело к тому, что практически все население в своей жизни каждодневно соприкасается с различными электроустановками. Как и все машины и механизмы, электроустановки при их неисправности или неправильной эксплуатации могут являться источником травматизма. Чтобы уменьшить опасность поражения человека электрическим током, нужно знать правила безопасной эксплуатации электроустановок и технику безопасности проведения работ на них.

Электрический ток, проходя через тело человека, оказывает тепловое, химическое и биологическое воздействия. Тепловое действие проявляется в виде ожогов участков кожи тела, перегрева различных органов, а также возникающих в результате перегрева разрывов кровеносных сосудов и нервных волокон. Химическое действие ведет к электролизу крови и других содержащихся в организме растворов, что приводит к изменению их физико-химических составов, а значит, и к нарушению нормального функционирования организма. Биологическое действие электрического тока проявляется в опасном возбуждении живых клеток и тканей организма. В результате такого возбуждения они могут погибнуть.

Различают два основных вида поражения человека электрическим током: электрический удар и электрические травмы. Электрическим ударом называется такое действие тока на организм человека, в результате которого мышцы тела начинают судорожно сокращаться. При этом в зависимости от величины тока и времени его действия человек может находиться в сознании или без сознания, но при нормальной работе сердца и дыхания. В более тяжелых случаях потеря сознания сопровождается нарушением работы сердечно-сосудистой системы, что ведет даже к смертельному исходу. В результате электрического удара возможен паралич важнейших органов (сердца, мозга и пр.).

Электрической травмой называют такое действие тока на организм, при котором повреждаются ткани организма: кожа, мышцы, кости, связки. Особую опасность представляют электрические травмы в виде ожогов. Такой ожог появляется в месте контакта тела человека с токоведущей частью электроустановки или электрической дугой. Бывают также такие травмы, как металлизация кожи, различные механические повреждения, возникающие в результате резких произвольных движений человека. В результате тяжелых форм электрического удара человек может оказаться в состоянии клинической смерти: у него прекращается дыхание и кровообращение. При отсутствии медицинской помощи клиническая смерть (мнимая) может перейти в смерть биологическую. В ряде случаев, однако, при правильной медицинской помощи (искусственном дыхании и массаже сердца) можно добиться оживления мнимоумершего.

Непосредственными причинами смерти человека, пораженного электрическим током, является прекращение работы сердца, остановка дыхания вследствие паралича мышц грудной клетки и так называемый электрический шок.

Прекращение работы сердца возможно в результате непосредственного действия электрического тока на сердечную мышцу или рефлекторно из-за паралича нервной системы. При этом может наблюдаться полная остановка работы сердца или так называемая фибрилляция, при которой волокна сердечной мышцы приходят в состояние быстрых хаотических сокращений. Остановка дыхания (вследствие паралича мышц грудной клетки) может быть результатом или непосредственного прохождения электрического тока через область грудной клетки, или вызвана рефлекторно вследствие паралича нервной системы. Электрический шок представляет собой нервную реакцию организма на возбуждение электрическим током, которая проявляется в нарушении нормального дыхания, кровообращения и обмена веществ. При длительном шоковом состоянии может наступить смерть. Если оказана необходимая врачебная помощь, то шоковое состояние может быть снято без дальнейших последствий для человека.

Основным фактором, определяющим величину сопротивления тела человека, является кожа, ее роговой верхний слой, в котором нет кровеносных сосудов. Этот слой обладает очень большим удельным сопротивлением, и его можно рассматривать как диэлектрик. Внутренние слои кожи, имеющие кровеносные сосуды, железы и нервные окончания, обладают сравнительно небольшим удельным сопротивлением. Внутреннее сопротивление тела человека является величиной переменной, зависящей от состояния кожи (толщины, влажности) и окружающей среды (влажности, температуры и т. д.). При повреждении рогового слоя кожи (ссадина, царапина и пр.) резко снижается величина электрического сопротивления тела человека и, следовательно, увеличивается проходящий через тело ток. При повышении напряжения, приложенного к телу человека, возможен пробой рогового слоя, отчего сопротивление тела резко понижается, а величина поражающего тока возрастает.

Из вышесказанного становится понятно, что на тяжесть поражения человека электрическим током влияет много факторов. Наиболее неблагоприятный исход поражения будет в случаях, когда прикосновение к токоведущим частям произошло влажными руками в сыром или жарком помещении.

Поражение человека электрическим током в результате электрического удара может быть различным по тяжести, т. к. на степень поражения влияет ряд факторов: величина тока, продолжительность его прохождения через тело, частота, путь, проходимый током в теле человека, а также индивидуальные свойства пострадавшего (состояние здоровья, возраст и др.). Основным фактором, влияющим на исход поражения, является величина тока, которая, согласно закону Ома, зависит от величины приложенного напряжения и сопротивления тела человека. Большую роль играет величина напряжения, т. к. при напряжениях около 100 В и выше наступает пробой верхнего рогового слоя кожи, вследствие чего и электрическое сопротивление человека резко уменьшается, а ток возрастает.

Обычно человек начинает ощущать раздражающее действие переменного тока промышленной частоты при величине тока 1—1,5 мА и постоянного тока 5—7 мА. Эти токи называются пороговыми ощутимыми токами. Они не представляют серьезной опасности, и при таком токе человек может самостоятельно освободиться от воздействия. При переменных токах 5—10 мА раздражающее действие тока становится более сильным, появляется боль в мышцах, сопровождаемая судорожным их сокращением. При токах 10—15 мА боль становится трудно переносимой, а судороги мышц рук или ног становятся такими сильными, что человек не в состоянии самостоятельно освободиться от действия тока. Переменные токи 10—15 мА и выше и постоянные токи 50—80 мА и выше называются неотпускающими токами, а наименьшая их величина 10—15 мА при напряжении промышленной частоты 50 Гц и 50—80 мА при постоянном напряжении источника называется пороговым неотпускающим током.

Переменный ток промышленной частоты величиной 25 мА и выше воздействует не только на мышцы рук и ног, но также и на мышцы грудной клетки, что может привести к параличу дыхания и вызвать смерть. Ток 50 мА при частоте 50 Гц вызывает быстрое нарушение работы органов дыхания, а ток около 100 мА и более при 50 Гц и 300 мА при постоянном напряжении за короткое время (1—2 с) поражает мышцу сердца и вызывает его фибрилляцию. Эти токи называются фибрилляционными. При фибрилляции сердца прекращается его работа как насоса по перекачиванию крови. Поэтому вследствие недостатка в организме кислорода происходит остановка дыхания, т. е. наступает клиническая (мнимая) смерть. Токи более 5 А вызывают паралич сердца и дыхания, минуя стадию фибрилляции сердца. Чем больше время протекания тока через тело человека, тем тяжелее его результаты и больше вероятность летального исхода.

Большое значение в исходе поражения имеет путь тока. Поражение будет более тяжелым, если на пути тока оказывается сердце, грудная клетка, головной и спинной мозг. Путь тока имеет еще то значение, что при различных случаях прикосновения будет различной величина сопротивления тела человека, а следовательно, и величина

протекающего через него тока. Наиболее опасными путями прохождения тока через человека являются: «рука — ноги», «рука — рука». Менее опасным считается путь тока «нога — нога». Как показывает статистика, наибольшее число несчастных случаев происходит вследствие случайного прикосновения или приближения к голым, незащищенным частям электроустановок, находящихся под напряжением. Для защиты от поражения током голые провода, шины и другие токоведущие части либо располагают в недоступных местах, либо защищают ограждениями. В некоторых случаях для защиты от прикосновения применяют крышки, короба и т. п.

Поражение током может возникнуть при прикосновении к нетоковедущим частям электроустановки, которые оказываются под напряжением при пробое изоляции. В этом случае потенциал нетоковедущей части оказывается равным потенциалу той точки электрической цепи, в которой произошло нарушение изоляции. Опасность поражения усугубляется тем, что прикосновение к нетоковедущим частям в условиях эксплуатации является нормальной рабочей операцией, поэтому поражение всегда является неожиданным. В отношении поражения людей электрическим током в «Правилах устройства электроустановок» различают:

1. Помещения с повышенной опасностью, которые характеризуются наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность:
 - a. сырости или проводящей пыли;
 - b. токопроводящих полов (металлических, земляных, железобетонных, кирпичных и т. п.);
 - c. высокой температуры;
 - d. возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т. п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования — с другой.
2. Особо опасные помещения, которые характеризуются наличием одного из следующих условий, создающих особую опасность:
 - a. особой сырости;
 - b. химически активной среды;
 - c. одновременного наличия двух или более условий повышенной опасности.
3. Помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную опасность и особую опасность.

В качестве защитных мер при прикосновении к нетоковедущим частям применяют защитное заземление, зануление или отключение, двойную изоляцию, пониженное напряжение, защитные средства и др.

Защитным заземлением называют металлическое соединение с землей нетоковедущих металлических частей электрической установки (корпуса электрических машин, трансформаторов, реостатов, светильников, аппаратов, каркасы щитов, металлические оболочки кабелей, фермы, колонны и др.). Защитное заземление применяют в сетях с изолированной нейтральной точкой. В четырех проводных сетях напряжением до 1000 В с заземленной нейтралью применяют защитное зануление — присоединение нетоковедущих металлических частей к многократно заземленному нейтральному проводу. В случае пробоя изоляции создается режим короткого замыкания (аварийный режим), и электроустановка отключается аппаратами защиты. Зануление не требуется для установок малой мощности в жилых, офисных, торговых отапливаемых помещениях с сухими плохо проводящими полами.

Защитное отключение — автоматическое отключение электроустановки системой защиты при возникновении опасности поражения человека электрическим током. Так как в случае повреждения электроустановки изменяются значения некоторых величин

(напряжение корпуса относительно земли, ток замыкания на землю и др.), то если эти изменения окажутся воспринимаемыми чувствительными датчиками, аппараты защиты сработают и отключат электроустановку. В настоящее время распространены различные устройства защитного отключения (УЗО), помогающие повысить безопасность эксплуатации электрических приборов.

Под двойной понимается дополнительная, кроме основной, изоляция, которая ограждает человека от металлических нетоковедущих частей, могущих случайно оказаться под напряжением. Наиболее надежную двойную изоляцию обеспечивают корпуса из изолирующего материала. Обычно они несут на себе всю механическую часть. Этот способ защиты чаще всего применяют в электрооборудовании небольшой мощности (электрифицированный ручной инструмент, бытовые приборы и ручные электрические лампы).

В помещениях с повышенной опасностью и особо опасных, даже при одновременном контакте человека, с токоведущими частями разных фаз или полюсов, применяют пониженное напряжение (12 и 36 В). Источником такого напряжения являются батареи гальванических элементов, аккумуляторы, выпрямительные установки, преобразователи частоты и трансформаторы (применение автотрансформаторов в качестве источника пониженного напряжения запрещено). Так как мощность этих источников незначительна, область применения пониженных напряжений ограничивается ручным инструментом, ручными и станочными лампами местного освещения.

Важным фактором обеспечения безопасности является знание устройства и правил эксплуатации электроустановок, поддержание в исправном состоянии электрооборудования, исправность сигнализации и блокировок, наличие средств пожаротушения.

Если несмотря на все принятые меры все же происходит поражение человека электрическим током, то спасение пострадавшего в большинстве случаев зависит от быстроты освобождения его от действия тока, а также от быстроты и правильности оказания пострадавшему первой помощи.

Может оказаться, что пострадавший сам не в состоянии освободиться от действия электрического тока. В этом случае ему немедленно нужно оказать помощь, приняв меры предосторожности, чтобы самому не оказаться в положении пострадавшего. Необходимо отключить установку ближайшим выключателем или прервать цепь тока, перерезав провод ножом, кусачками, топором и др. Если пострадавший лежит на земле или на проводящем ток полу, следует изолировать его от земли, подсунув под него деревянную доску или фанеру.

После освобождения пострадавшего от действия электрического тока ему немедленно нужно оказать доврачебную помощь в соответствии с его состоянием. Если пострадавший не потерял сознания и может самостоятельно передвигаться, отвести его в помещение, удобное для отдыха, успокоить, дать выпить воды, предложить полежать. Если при этом у пострадавшего оказались какие-либо травмы (ушибы, порезы, вывихи суставов, переломы костей и т. п.), то оказать на месте соответствующую помощь, а при необходимости напавить в медицинский пункт или вызвать врача.

Если после освобождения от электрического тока пострадавший находится в бессознательном состоянии, но дышит нормально и прослушивается пульс, надо немедленно вызвать врача, а до его прибытия оказывать помощь на месте — привести пострадавшего в сознание: дать понюхать нашатырный спирт, обеспечить поступление свежего воздуха. Если после освобождения от действия электрического тока пострадавший находится в тяжелом состоянии, т. е. не дышит или дышит тяжело, прерывисто, то, вызвав врача, необходимо, не теряя ни минуты, приступить к искусственному дыханию. Перед началом искусственного дыхания необходимо:

- a. не теряя ни секунды, освободить пострадавшего от стесняющей одежды — расстегнуть ворот, развязать шарф, снять пояс и т. д.;
- b. раскрыть рот пострадавшего, если он судорожно сжат;

- с. быстро освободить рот пострадавшего от посторонних предметов, вынуть зубные протезы.

После этого можно начинать выполнение искусственного дыхания методом «рот в рот». Техника вдувания воздуха заключается в следующем. Пострадавший лежит на спине, под лопатками — валик из одежды. Голову его запрокидывают назад, для чего подкладывают одну руку под шею, а другой рукой надавливают на темя. Этим обеспечивается отхождение корня языка от задней стенки гортани и восстановление проходимости дыхательных путей. При таком положении головы обычно рот раскрывается. Если во рту есть слизь, то ее вытирают платком или краем рубашки, натянутым на указательный палец, проверяют, нет ли во рту посторонних предметов (зубных протезов, мундштука и т. д.), которые надо удалить. После этого приступают к вдуванию воздуха. Оказывающий помощь делает глубокий вдох, плотно (можно через марлю или платок) прижимает свой рот ко рту пострадавшего и с силой вдувает воздух.

Во время вдувания воздуха следует пальцами закрыть нос у пострадавшего, чтобы полностью обеспечить поступление всего вдуваемого воздуха в легкие. При невозможности полного охвата рта у пострадавшего следует вдувать воздух в нос (при этом надо у него закрывать рот). Вдувание воздуха производят каждые 5—6 с, что соответствует частоте дыхания 10—12 раз в минуту. После каждого вдувания освобождают рот и нос пострадавшего для свободного выхода воздуха из легких.

При отсутствии пульса следует продолжать искусственное дыхание и одновременно приступить к проведению наружного массажа сердца. Наружный массаж сердца поддерживает кровообращение как при остановившемся, так и при фибриллирующем сердце. Общеизвестно, что такой массаж может привести к возобновлению самостоятельной нормальной деятельности сердца. Оказывающий помощь накладывает на нижнюю часть грудины пострадавшего обе руки друг на друга ладонями вниз. Ритмично 60—80 раз в минуту надавливают на нижнюю часть грудины вертикально вниз. Грудная клетка во время клинической смерти человека из-за потери мышечного тонуса становится очень подвижной, что позволяет при массаже смещать нижний конец грудины на 3—4 см. Сердце, таким образом, сдавливается и из него выдавливается кровь в кровеносные сосуды. После каждого надавливания следует отнимать руки от грудины для того, чтобы грудная клетка полностью расправилась, а сердце наполнилось кровью. Лучше всего проводить оживление пострадавшего вдвоем, поочередно выполняя наружный массаж сердца и искусственное дыхание.

12. Введение в электронику

Электроника зародилась в начале XX века после создания основ электродинамики (1856-73 г.г.), исследования свойств термоэлектронной эмиссии (1882-1901 г.г.), фотоэлектронной эмиссии (1887-1905 г.г.), рентгеновских лучей (1895-97 г.г.), открытия электрона (Дж. Дж. Томсон, 1897 г.), создания электронной теории (1892-1909 г.г.).

Развитие электроники началось с изобретения лампового диода (Дж. А. Флеминг, 1904 г.); трехэлектродной лампы – триода (Л. Де Форест, 1906 г.); использования триода для генерирования электрических колебаний (нем. инж. А. Мейснер, 1913 г.); разработки мощных генераторных ламп с водяным охлаждением (М.А. Бонч-Бруевич, 1919-25 г.г.) для радиопередатчиков, используемых в системах дальней радиосвязи и радиовещания.

В течение короткого времени были созданы основные электронные приборы. Вакуумные фотоэлементы (экспериментальный образец создал А.Г. Столетов, 1888 г., пром. образец – нем. ученые Ю. Эльстер и Г. Хейтель, 1910 г.), фотоэлектронные умножители – однокаскадные (П.В. Тимофеев, 1928 г.) и многокаскадные (Л.А. Кубецкий, 1930 г.) – позволили создать звуковое кино, послужили основой для разработки передающих телевизионных трубок – видикона (идея предложена в 1925 г. А.А. Чернышевым), икonosкопа (С.И. Катаев, независимо от него В.К. Зворыкин, 1931-32 г.), суперикonosкопа (П.В. Тимофеев, П.В. Шмаков, 1933 г.), суперортикона (двухсторонняя мишень для такой трубки была предложена сов. ученым Г.В. Брауде в 1939 г., впервые суперортикон описан амер. учеными А. Розе, П. Веймером и Х. Лоу в 1946 г.) и др.

Создание многорезонаторного магнетрона (Н.Ф. Алексеев и Д.Е. Маляров под рук. М.А. Бонч-Бруевича, 1936-37 г.г.), отражательного клистрона (Н.Д. Деятков и др. и независимо от них В.Ф. Коваленко, 1940 г.) послужило основой для развития радиолокации в сантиметровом диапазоне волн. Пролетные клистроны (идея предложена в 1932 г. Д.А. Рожанским, развита в 1935 г. А.Н. Арсеньевой и нем. физиком О. Хайлем, реализована в 1938 г. амер. физиками Р. и З. Варианами и др.) и лампы бегущей волны (амер. ученый Р. Компфнер, 1943 г.) обеспечили дальнейшее развитие систем радиорелейной связи, ускорителей элементарных частиц и способствовали созданию систем космической связи.

Одновременно с разработкой вакуумных электронных приборов создавались и совершенствовались газоразрядные приборы (ионные приборы), например, ртутные вентили, используемые главным образом для преобразования переменного тока в постоянный в мощных промышленных установках, тиратроны для формирования мощных импульсов электрического тока в устройствах импульсной техники, газоразрядные источники света.

Использование кристаллических полупроводников в качестве детекторов для радиоприемных устройств (1900-1905 г.г.), создание купроксных и селеновых выпрямителей тока и фотоэлементов (1920-1926 г.г.), изобретение кристадина (О.В. Лосев, 1922 г.), изобретение транзистора (У. Шокли, У. Браттейн, Дж. Бардин, 1948 г.) определили становление и развитие полупроводниковой электротехники.

Разработка планарной технологии полупроводниковых структур (конец 50-х, начало 60-х г.г.) и методов интеграции многих элементарных приборов (транзисторов, диодов, конденсаторов, резисторов) на одной монокристаллической полупроводниковой пластине привело к созданию нового направления – микроэлектроники. Основные разработки в области интегральной электроники направлены на создание интегральных схем – микроминиатюрных электронных устройств (усилителей, преобразователей, процессоров ЭВМ, электронных запоминающих устройств и т. п.), состоящих из сотен и тысяч электронных элементов, размещаемых на одном полупроводниковом кристалле площадью в несколько мм².

Микроэлектроника открыла новые возможности для решения таких проблем, как автоматизация управления технологическими процессами, переработка информации, совершенствование вычислительной техники и других, выдвигаемых развитием современного производства.

Создание квантовых генераторов (Н.Г. Басов, А.М. Прохоров и независимо от них Ч. Таунс, 1955 г.) – приборов квантовой электроники – определило качественно новые возможности электроники, связанные с использованием источников мощного когерентного излучения оптического диапазона (лазеров) и построением сверхточных квантовых стандартов частоты.

Фундаментальные исследования в области физики и технологии электронных приборов выполнили М.А. Бонч-Бруевич, Л.И. Мандельштам, Н.Д. Папалекси, С.А. Векшинский, А.А. Чернышев, М.М. Богословский и многие другие.

По проблемам возбуждения и преобразования электрических колебаний, излучения, распространения и приема радиоволн, их взаимодействия с носителями тока в вакууме, газах и твердых телах работали Б.А. Введенский, В.Д. Калмыков, А.Л. Минц, А.А. Расплетин, М.В. Шулейкин и др.

В области физики полупроводников – А.Ф.Иоффе, люминесценции и по др. разделам физической оптики – С.И. Вавилов, квантовой теории рассеяния света излучения, фотоэффекта в металлах – И.Е. Тамм и многие другие.

Области, основные разделы и направления электроники

Электроника включает в себя три области исследований:

1. вакуумную электронику;
2. твердотельную электронику;
3. квантовую электронику.

Каждая область подразделяется на ряд разделов и ряд направлений.

Раздел объединяет комплексы однородных физико-химических явлений и процессов, которые имеют фундаментальное значение для разработки многих классов электронных приборов данной области. Направление охватывает методы конструирования и расчетов электронных приборов, родственных по принципам действия или по выполняемым ими функциям, а также способы изготовления этих приборов.

Перспективы развития электроники

Одна из основных проблем, стоящих перед электроникой, связана с требованием увеличения количества обрабатываемой информации вычислительными и управляющими электронными системами с одновременным уменьшением их габаритов и потребляемой энергии.

Эта проблема решается путем:

- создания полупроводниковых интегральных схем, обеспечивающих время переключения до 10^{-11} сек;
- увеличения степени интеграции на одном кристалле до миллиона и более транзисторов размером менее 1-2 мкм на основе использования нанотехнологий и в перспективе – молекулярной электроники;
- использования в интегральных схемах устройств оптической связи и оптоэлектронных преобразователей, сверхпроводников;
- разработки запоминающих устройств емкостью несколько гигабайт на одном кристалле;
- применения лазерной и электронно-лучевой коммутации;
- расширения функциональных возможностей интегральных схем (например, переход от микропроцессора к мини-ЭВМ на одном кристалле);

- перехода от двумерной (планарной) технологии интегральных схем к трехмерной (объемной) и использования сочетания различных свойств твердого тела в одном устройстве;
- разработки и реализации принципов и средств стереоскопического телевидения, обладающего большей информативностью по сравнению с обычным;
- создания электронных приборов, работающих в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн, для широкополосных (более эффективных) систем передачи информации, а также приборов для линий оптической связи;
- разработки мощных, с высоким к.п.д., приборов СВЧ и лазеров для энергетического воздействия на вещество и направленной передачи энергии (например, из космоса).

Одна из тенденций развития электроники – проникновение ее методов и средств в биологию (для изучения клеток и структуры живого организма и воздействия на него) и медицину (для диагностики, терапии, хирургии).

Элементы схем

Современные электронные схемы содержат в качестве нелинейных элементов большое количество функциональных компонентов, основанных на использовании свойств полупроводниковых материалов.

Полупроводниковые материалы (германий, кремний) по своему удельному электрическому сопротивлению ρ занимают место между проводниками и диэлектриками ($\rho=10^{-3} \dots 10^8 \text{ Ом-см}$). Разная величина проводимости у металлов, полупроводников и диэлектриков обусловлена разной величиной энергии, которую надо затратить на то, чтобы освободить валентный электрон от связей с атомами, расположенными в узлах кристаллической решетки. Причем проводимость полупроводников в значительной степени зависит от наличия примесей и температуры.

В полупроводниках присутствуют подвижные носители зарядов двух типов: отрицательные электроны и положительные дырки.

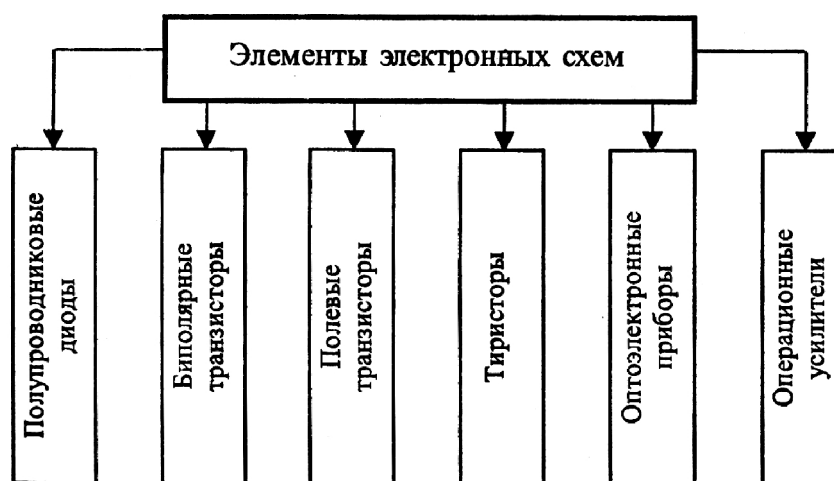


Рис. 12.1. Классификация электронных полупроводниковых приборов

Чистые (собственные) полупроводники в полупроводниковых приборах практически не применяются, так как обладают малой проводимостью и не обеспечивают односторонней проводимости. Подвижные носители заряда в собственных полупроводниках возникают обычно в результате термогенерации. Техническое применение получили так называемые

примесные полупроводники, в которых в зависимости от рода введенной примеси преобладает либо электронная, либо дырочная проводимость. В зависимости от типа проводимости (основных носителей заряда) полупроводники подразделяются на полупроводники *p*-типа (дырочного типа) и *n*-типа (электронного типа). Концентрация основных носителей определяется концентрацией примеси и практически не зависит от температуры, так как уже при комнатной температуры все атомы примеси ионизированы, а число основных носителей, возникающих за счет генерации пар электрон-дырка, пренебрежительно мало по сравнению с общим числом основных носителей. В то же время концентрация неосновных носителей мала и сильно зависит от температуры, увеличиваясь в 2-3 раза при увеличении температуры на каждые 10°C.

13. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковым диодом называется электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом, имеющим два вывода.

Структура полупроводникового диода с электронно-дырочным переходом и его условное графическое обозначение приведены на рис. 13.1.

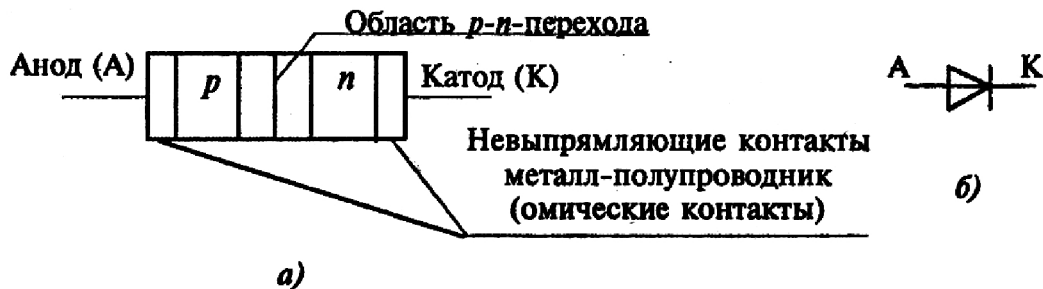


Рис. 13.1. Схема структуры полупроводникового диода (а) и его графическое обозначение (б)

Буквами p и n обозначены слои полупроводника с проводимостями соответственно p -типа и n -типа. В контактирующих слоях полупроводника (область p - n -перехода на рис. 13.1) имеет место диффузия дырок из слоя p в слой n , причиной которой является то, что их концентрация в слое p значительно больше их концентрации в слое n . В итоге в приграничных областях слоя p и слоя n возникает так называемый обедненный слой, в котором мала концентрация подвижных носителей заряда (электронов и дырок). Обедненный слой имеет большое удельное сопротивление. Ионы примесей обедненного слоя не компенсированы дырками или электронами. В совокупности ионы образуют некомпенсированные объемные заряды, создающие электрическое поле с напряженностью E . Это поле препятствует переходу дырок из слоя p в слой n и переходу электронов из слоя n в слой p . Оно создает так называемый дрейфовый поток подвижных носителей заряда, перемещающий дырки из слоя n в слой p и электроны из слоя p в слой n . Таким образом, в зависимости от полярности проходящего через диод тока, проводимость диода существенно изменяется, приводя к изменению величину проходящего тока.

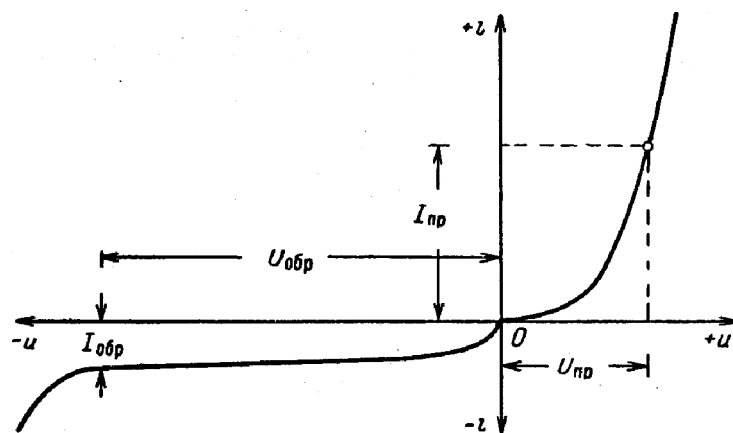


Рис. 13.2. Вольт-амперная характеристика и основные параметры полупроводникового диода

Основные характеристики полупроводникового диода представляются его вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Вольт-амперная характеристика – это зависимость тока i , протекающего через диод, от напряжения u , приложенного к диоду. Вольт-амперной характеристикой называют и график этой зависимости (рис. 13.2).

Диоды обычно характеризуются следующими параметрами (рис. 13.2):

1. обратный ток при некоторой величине обратного напряжения $I_{обр}$, мкА;
2. падение напряжения на диоде при некотором значении прямого тока через диод $U_{пр}$, в;
3. емкость диода при подаче на него обратного напряжения некоторой величины C , пФ;
4. диапазон частот, в котором возможна работа без снижения выпрямленного тока $f_{зр}$, кГц;
5. рабочий диапазон температур.

Техническими условиями задаются обычно максимальные (или минимальные) значения параметров для диодов каждого типа. Так, например, задается максимально возможное значение обратного тока, прямого падения напряжения и емкости диода. Диапазон частот задается минимальным значением граничной частоты $f_{зр}$. Это значит, что параметры всех диодов не превышает (а в случае частоты – не ниже) заданного техническими условиями значения. Общий вид диодов показан на рис. 13.3.

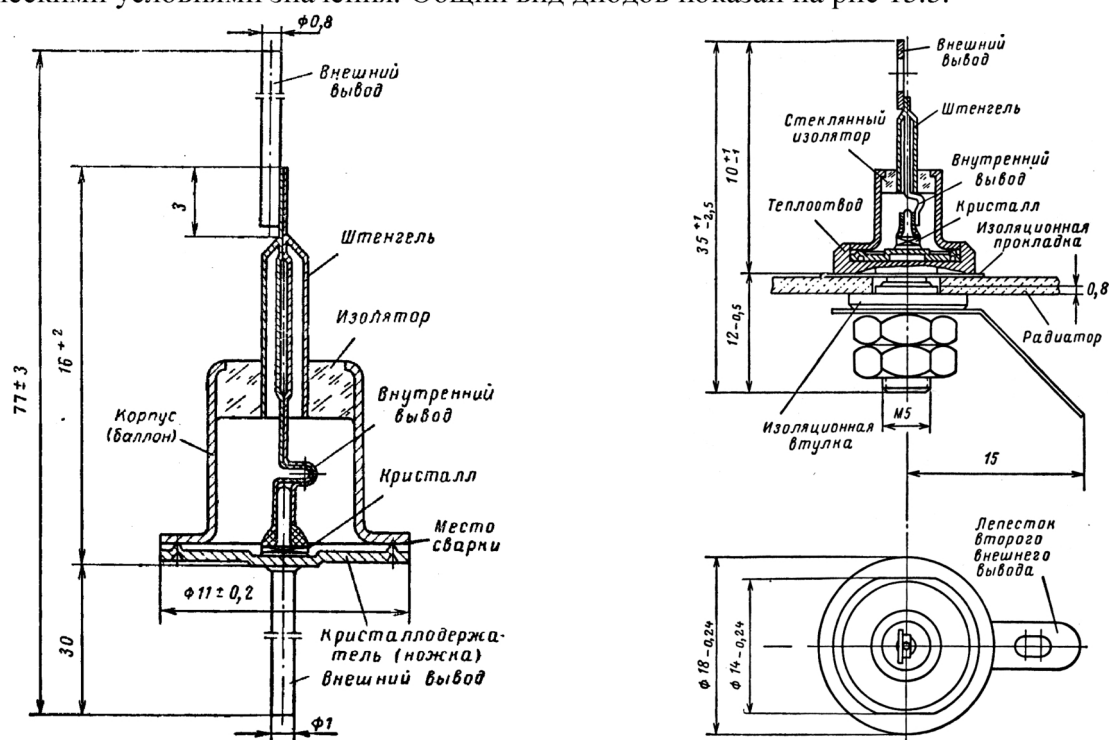


Рис. 13.3. Конструкция диодов малой мощности (а) и средней мощности (б)

Стабилитрон. Это полупроводниковый диод, сконструированный для работы в режиме электрического пробоя. Условное графическое обозначение стабилитрона представлено на рис. 2.5,а.

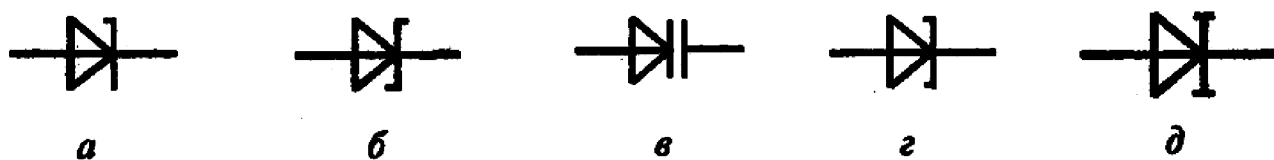


Рис. 13.4. Графическое изображение полупроводниковых диодов:
а) стабилитрон; б) диод Шоттки; в) варикап; г) туннельный диод;
д) обращенный диод

В указанном режиме при значительном изменении тока стабилитрона напряжение изменяется незначительно, т. е. стабилитрон стабилизирует напряжение. Вольт-амперная характеристика кремниевого стабилитрона Д814Д представлена на рис. 13.5.

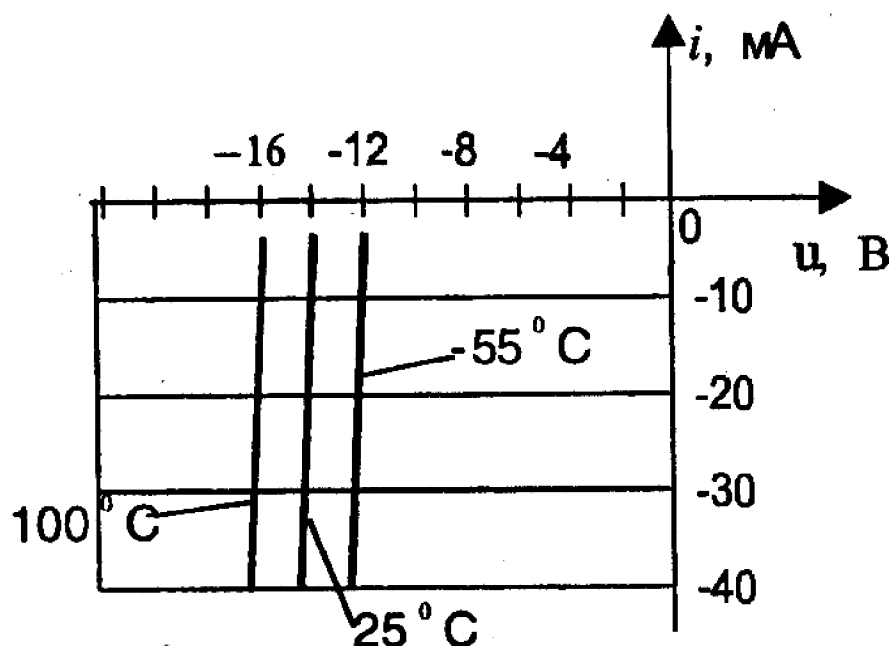


Рис. 13.5. Вольт-амперная характеристика кремниевого стабилитрона Д814Д

В стабилитронах может иметь место и туннельный, и лавинный, и смешанный пробой в зависимости от удельного сопротивления базы.

В стабилитронах с низкоомной базой (низковольтных, до 5,7 В) имеет место туннельный пробой, а в стабилитронах с высокоомной базой (высоковольтных) – лавинный пробой.

Основными являются следующие параметры стабилитрона:

1. $U_{ст}$ – напряжение стабилизации (при заданном токе в режиме пробоя);
2. $I_{ст.мин}$ – минимально допустимый ток стабилизации;
3. $I_{ст.макс}$ – максимально допустимый ток стабилизации;
4. $r_{ст}$ – дифференциальное сопротивление стабилитрона (на участке пробоя),

$$r_{ст} = du/di$$
;
5. $\alpha_{U_{ст}}$ (ТКН) – температурный коэффициент напряжения стабилизации.

Величины $U_{ст}$, $I_{ст.мин}$ и $I_{ст.макс}$ принято указывать как положительные.

Для примера применения стабилитрона обратимся к схеме так называемого параметрического стабилизатора напряжения (рис. 13.6.). Легко заметить, что если напряжение $u_{вх}$ настолько велико, что стабилитрон находится в режиме пробоя, то

изменения этого напряжения практически не вызывают изменения напряжения $u_{вых}$ (при изменении напряжения $u_{вх}$ изменяется только ток i , а также напряжение $u_R = i \cdot R$).

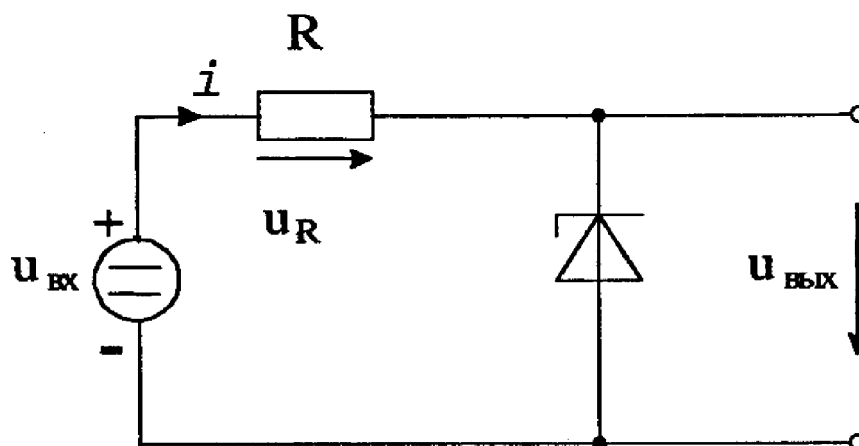


Рис. 13.6. Схема параметрического стабилизатора напряжения

Стабилитрон является быстродействующим прибором и хорошо работает в импульсных схемах.

Стабистор. Это полупроводниковый диод, напряжение на котором при прямом включении (около $0,7\text{ В}$) мало зависит от тока (прямая ветвь на соответствующем участке почти вертикальная). Стабистор предназначен для стабилизации малых напряжений.

Диод Шоттки. В диоде Шоттки используется не $p-n$ -переход, а выпрямляющий контакт металл-полупроводник. Условное графическое обозначение диода Шоттки представлено на рис. 13.4, б.

В обычных условиях прямой ток, образованный электронами зоны проводимости, переходящими из полупроводника в металл, имеет очень малую величину. Это является следствием недостатка электронов, энергия которых позволила бы им преодолеть данный барьер.

Для увеличения прямого тока необходимо «разогреть» электроны в полупроводнике, поднять их энергию. Такой разогрев может быть осуществлен с помощью электрического поля.

Если подключить источник внешнего напряжения плюсом к металлу, а минусом к полупроводнику n -типа, то потенциальный барьер понизится и через переход начнет протекать прямой ток. При противоположном подключении потенциальный барьер увеличивается и ток оказывается весьма малым.

Диоды Шоттки – очень быстродействующие приборы, они могут работать на частотах до десятков гигагерц ($1\text{ ГГц} = 1 \cdot 10^9\text{ Гц}$). У диода Шоттки может быть малый обратный ток и малое прямое напряжение (при малых прямых токах) – около $0,5\text{ В}$, что меньше, чем у кремниевых приборов. Максимально допустимый прямой ток может составлять десятки и сотни ампер, а максимально допустимое напряжение – сотни вольт.

Варикап. Это полупроводниковый диод, предназначенный для работы в качестве конденсатора, емкость которого управляется напряжением. Условное графическое обозначение варикапа представлено на рис. 13,4, в.

На варикап подают обратное напряжение. Барьерная емкость варикапа уменьшается при увеличении (по модулю) обратного напряжения. Характер изменения емкости у варикапа такой же, как и у обычного диода.

Туннельный диод. Это полупроводниковый диод, в котором используется явление туннельного пробоя при включении в прямом направлении. Характерной особенностью туннельного диода является наличие на прямой ветви вольт-амперной характеристики

участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Условное графическое обозначение диода представлено на рис. 13.4,г.

Для примера изобразим (рис. 13.7) прямую ветвь вольт-амперной характеристики германиевого туннельного усилительного диода 1И104А ($I_{пр.макс}=20\text{ мА}$ – постоянный прямой ток, $U_{обр.макс}=20\text{ мВ}$), предназначенного для усиления в диапазоне волн 2...10 см (это соответствует частоте более 1 ГГц).

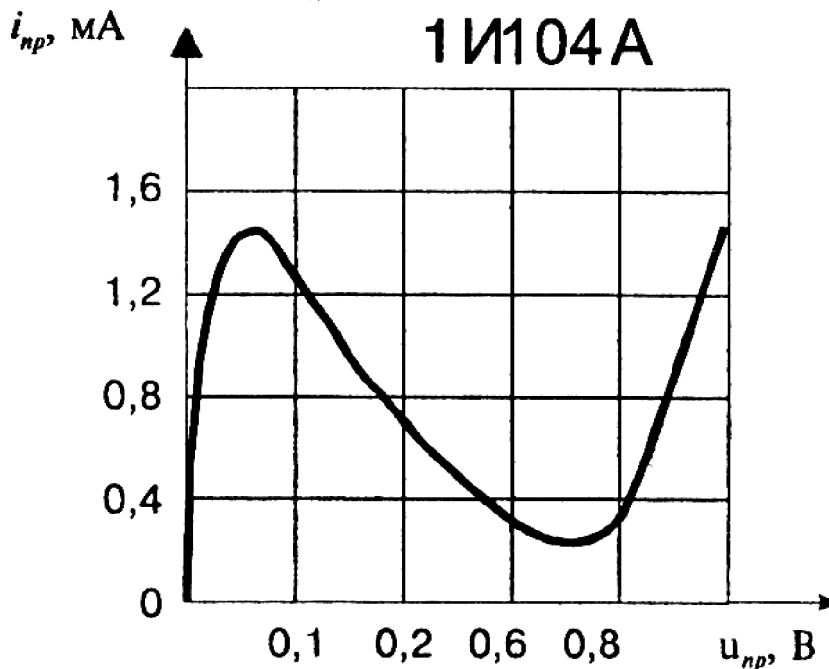


Рис. 13.7. Вольт-амперная характеристика германиевого туннельного диода

Общая емкость диода в точке минимума характеристики составляет 0,8...1,9 пФ. Полезно отметить, что проверка диода тестером не допускается. Туннельные диоды могут работать на очень высоких частотах – более 1 ГГц.

Наличие участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением на вольт-амперной характеристике обеспечивает возможность использования туннельных диодов в качестве усилительного элемента и в качестве основного элемента генераторов.

В настоящее время туннельные диоды используются именно в этом качестве в области сверхвысоких частот.

Обращенный диод. Это полупроводниковый диод, физические явления в котором подобны физическим явлениям в туннельном диоде, поэтому зачастую обращенный диод рассматривают как вариант туннельного диода. При этом участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением на вольт-амперной характеристике обращенного диода отсутствует или очень слабо выражен.

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики обращенного диода (отличающаяся очень малым падением напряжения) используется в качестве прямой ветви «обычного диода», а прямая ветвь – в качестве обратной ветви. Отсюда и название – обращенный диод.

Условное графическое обозначение обращенного диода представлено на рис.13.4,д.

Рассмотрим для примера вольт-амперные характеристики германиевого обращенного диода 1И104А (рис. 13.8), предназначенного, кроме прочего, для работы в импульсных устройствах (постоянный прямой ток – не более 0,3 мА, постоянный обратный ток – не более 4 мА (при $t \leq 35^\circ\text{C}$), общая емкость в точке минимума вольт-амперной характеристики 1,2...1,5 пФ).

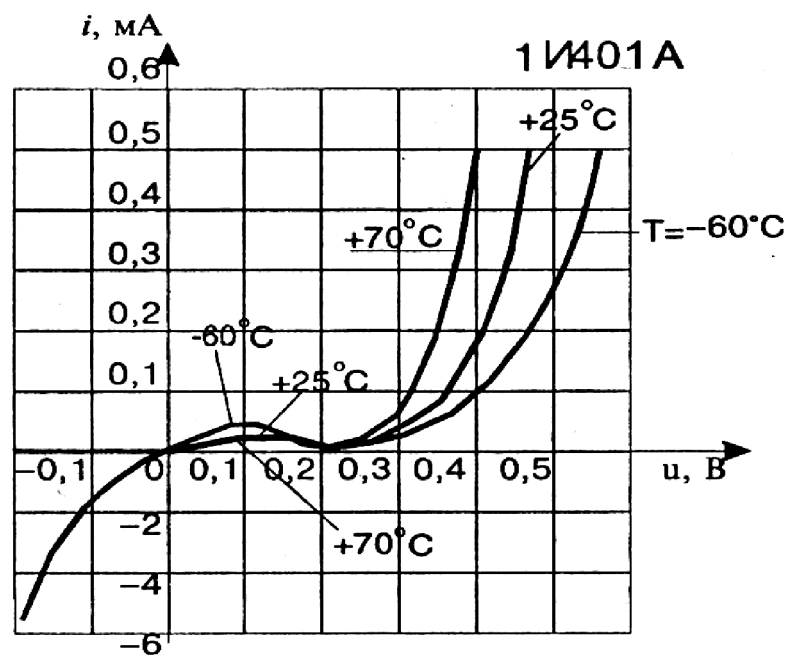


Рис. 13.8. Вольт-амперная характеристика обращенного диода

Как видно из графика (рис. 13.8), обе ветви вольт-амперной характеристики практически симметричны (в зеркальном отражении) относительно начала координат. Участок отрицательного дифференциального сопротивления размещен на участке положительного напряжения между 0,1 и 0,3 В. При этом амплитуда тока на участке с отрицательным дифференциальным сопротивлением не превышает 0,05 мА.

14. Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор с двумя p - n -переходами, имеющий три вывода. Действие биполярного транзистора основано на использовании носителей заряда обоих знаков (дырок и электронов), а управление протекающим через него током осуществляется с помощью управляющего тока.

Биполярный транзистор является наиболее распространенным активным полупроводниковым прибором.

Устройство транзистора. Биполярный транзистор в своей основе содержит три слоя полупроводника (p - n - p или n - p - n) и соответственно два p - n -перехода. Каждый слой полупроводника через невыпрямляющий контакт металл-полупроводник подсоединен к внешнему выводу.

Средний слой и соответствующий вывод называют базой, один из крайних слоев и соответствующий вывод называют эмиттером, а другой крайний слой и соответствующий вывод – коллектором.

На рис. 14.1,а показано схематическое, упрощенное изображение структуры транзистора типа n - p - n и два допустимых варианта условного графического обозначения (рис. 14.1,б).

Транзистор p - n - p устроен аналогично, упрощенное изображение его структуры дано на рис. 14.2, а. Более простой вариант условного графического обозначения – на рис. 14.2,б.

Транзистор называют биполярным, так как в процессе протекания электрического тока участвуют носители электричества двух знаков – электроны и дырки. Но в различных типах транзисторов роль электронов и дырок различна. Транзисторы типа n - p - n более распространены в сравнении с транзисторами типа p - n - p , так как обычно имеют лучшие параметры. Это можно объяснить тем, что основную роль в электрических процессах в транзисторах типа n - p - n играют электроны, а транзисторах типа p - n - p – дырки. Электроны же обладают подвижностью в два-три раза большей, чем дырки.

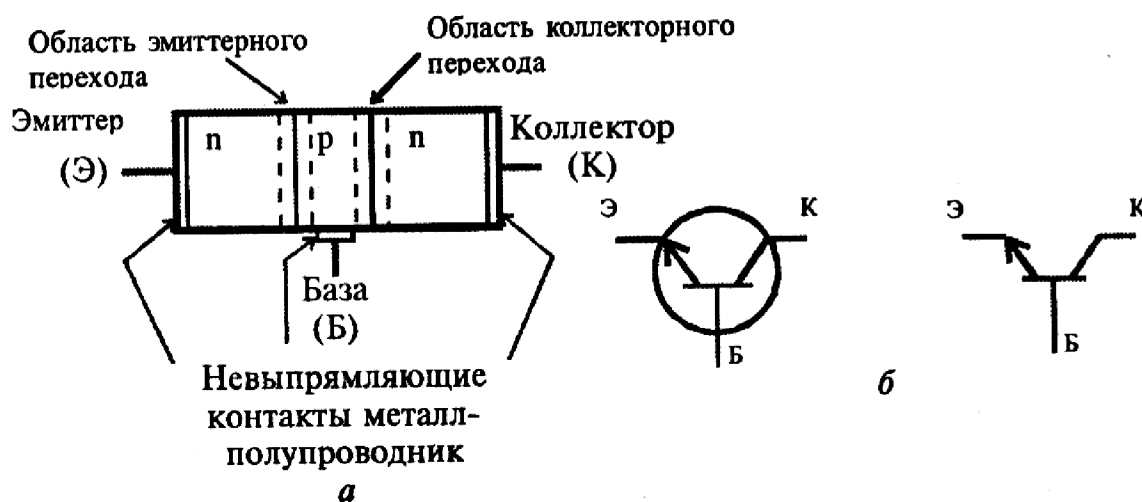


Рис. 14.1. Структура транзистора типа n - p - n (а) и его графическое обозначение (б)

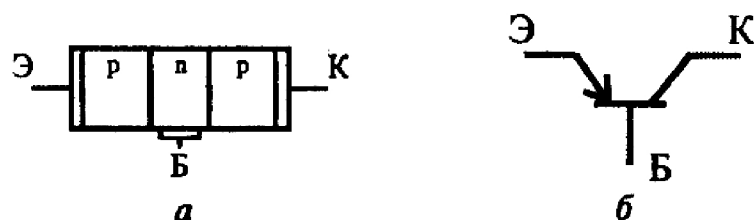


Рис. 14.2. Структура транзистора типа $p-n-p$ (а) и его графическое обозначение (б)

Важно отметить, что реально площадь коллекторного перехода значительно больше площади эмиттерного перехода, так как такая несимметрия значительно улучшает свойства транзистора.

Количественные особенности структуры транзистора. В основе работы биполярного транзистора типа $n-p-n$ лежат те же физические процессы, которые рассмотрены при изучении полупроводникового диода. Особенности транзистора определяются особенностями его конструкции.

Основными элементами транзистора являются два соединенных $p-n$ перехода. Это позволяет дать формальное представление структуры транзистора, показанное на рис. 14.3. Для понимания принципа работы транзистора исключительно важно учитывать, что $p-n$ -переходы транзистора сильно взаимодействуют. Это означает, что ток одного перехода сильно влияет на ток другого, и наоборот. Именно это взаимодействие радикально отличает транзистор от схемы с двумя диодами (рис. 14.4).

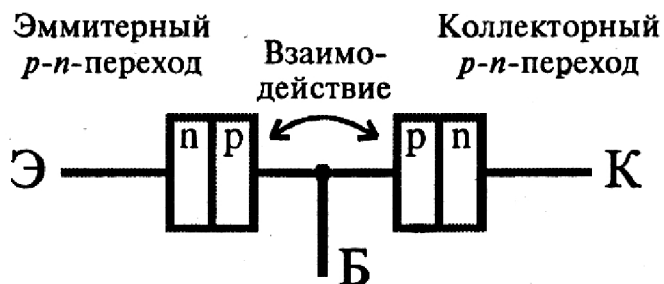


Рис. 14.3. Структура транзистора

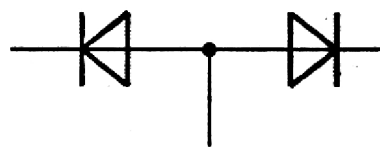


Рис. 14.4. Схема с двумя диодами

В схеме с диодами ток каждого диода зависит от напряжения на нем самом и никак не зависит от тока другого диода.

Указанное взаимодействие имеет исключительно простую главную причину: очень малое расстояние между переходами транзистора (от 20 – 30 мкм до 1 мкм и менее). Это расстояние называют толщиной базы. Именно эта количественная особенность структуры создает качественное своеобразие транзистора.

Три схемы включения биполярного транзистора с ненулевым сопротивлением нагрузки. Транзисторы часто применяют для усиления переменных сигналов (которые при расчетах обычно считают синусоидальными), при этом в выходной цепи транзистора применяется нагрузка с ненулевым сопротивлением.

Во входной цепи, кроме источника постоянного напряжения, необходимого для обеспечения активного режима работы, также используют источник входного переменного напряжения. Представим три характерные схемы включения транзистора.

Схема с общей базой (ОБ) (рис. 14.5). Если сопротивление нагрузки достаточно велико, то амплитуда переменной составляющей напряжения $U_{вых}$ значительно больше амплитуды напряжения $U_{вх}$. Учитывая, что $i_{вых} \approx i_{вх}$, можно утверждать, что схема не обеспечивает

усиления тока, но усиливает напряжение. Входной ток такой схемы достаточно большой, а соответствующее входное сопротивление мало.

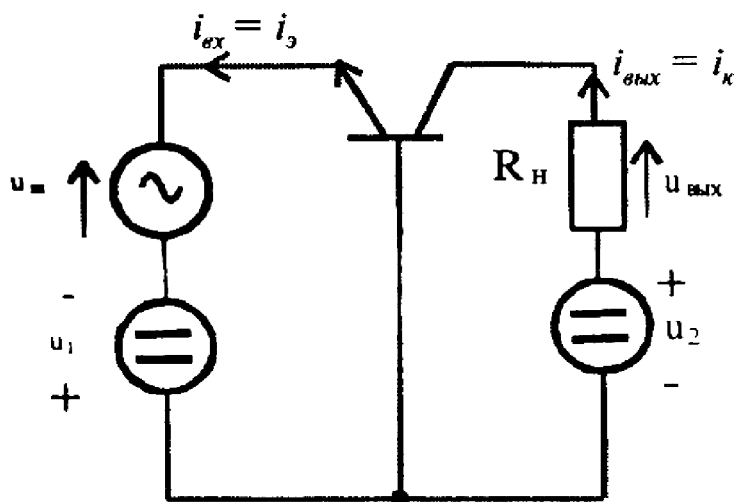


Рис. 14.5. Схема включения транзистора с общей базой (ОБ)

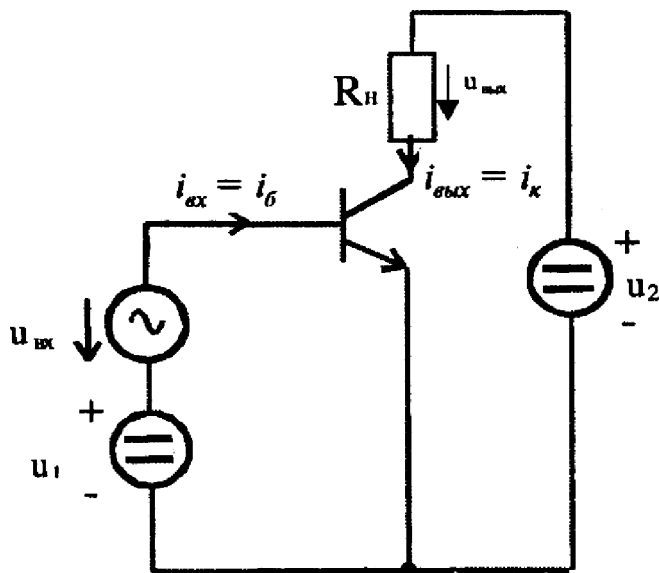


Рис. 14.6. Схема включения транзистора с общим эмиттером (ОЭ)

Схема с общим эмиттером (ОЭ) (рис. 3.6). Так как $i_{блх} \gg i_{бх}$, а при достаточно большом сопротивлении $R_н$ амплитуда переменной составляющей напряжения $u_{блх}$ значительно больше амплитуды напряжения $u_{бх}$, следовательно, схема обеспечивает усиление и тока, и напряжения.

Входной ток схемы достаточно мал, поэтому входное сопротивление больше, чем у схемы с общей базой.

Схема с общим коллектором (ОК) (рис. 14.7). При определении переменных составляющих токов и напряжений источники постоянного напряжения U_1 и U_2 заменяют коротками (закорачивают).

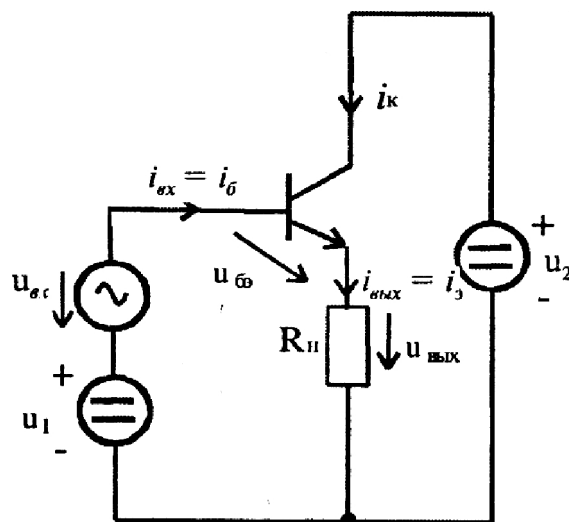


Рис. 14.7. Схема включения транзистора с общим коллектором (ОК)

После этого к коллектору оказываются подключенными и источник входного напряжения $u_{вх}$, и сопротивление нагрузки. Отсюда и название – схема с общим коллектором.

Напряжение $u_{бэ}$ и особенно его переменная составляющая достаточно малы, поэтому амплитуда переменной составляющей напряжения $u_{вх}$ примерно равна амплитуде переменной составляющей напряжения $u_{вых}$. Поэтому схемы с общим коллектором называют эмиттерным повторителем.

Учитывая, что $i_{вых} \gg i_{вх}$, можно отметить, что схема усиливает ток, но не усиливает напряжение.

Схема отличается повышенным входным сопротивлением, так как при увеличении входного напряжения увеличению входного тока препятствует увеличение как напряжения $u_{бэ}$, так и напряжения $u_{вых}$.

На практике наиболее часто используется схема с общим эмиттером.

h – параметры транзистора

При определении переменных составляющих токов и напряжений (т. е. при анализе на переменном токе) и при условии, что транзистор работает в активном режиме, его часто представляют в виде линейного четырехполюсника (рис. 14.8). В четырехполюснике условно изображен транзистор с общим эмиттером.

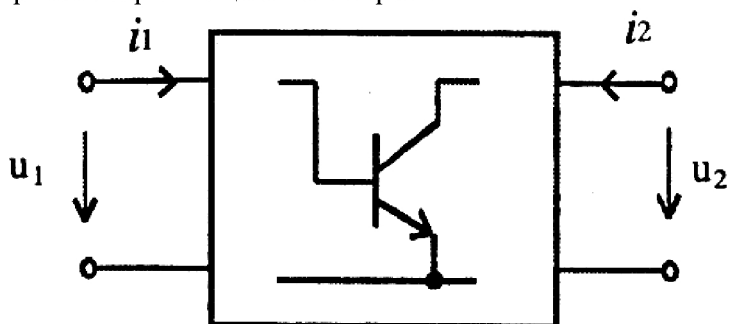


Рис. 14.8. Транзистор в виде четырехполюсника

Для разных схем включения транзистора токи и напряжения этого четырехполюсника обозначают различные токи и напряжения транзистора. Например, для схемы с общим эмиттером эти токи и напряжения следующие:

i_1 – переменная составляющая тока базы;

u_1 – переменная составляющая напряжения между базой и эмиттером;

i_2 – переменная составляющая тока коллектора;

u_2 – переменная составляющая напряжения между коллектором и эмиттером.

Транзистор удобно описывать, используя так называемые h-параметры.

Входное сопротивление транзистора для переменного сигнала (при закороченном выходе: $u_2=0$) :

$$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0} .$$

Аналогично

$$h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_2=0} \text{ - коэффициент обратной связи по напряжению.}$$

Режим работы при $i_1=0$ называют холостым ходом на входе.

Далее

$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0} \text{ - коэффициент передачи тока,}$$

$$h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0} \text{ - выходная проводимость.}$$

При этом

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix},$$

т. е.

$$u_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2;$$

$$i_2 = h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2.$$

Коэффициенты h_{ij} определяются опытным путем. Параметры, соответствующие схеме с общим эмиттером, обозначаются буквой «э», а схеме с общей базой – буквой «б».

15. Полевые транзисторы

Полевой транзистор является очень широко используемым активным (т. е. способным усиливать сигналы) полупроводниковым прибором. Впервые он был предложен в 1930 году.

Полевыми транзисторами называют активные полупроводниковые приборы, в которых выходным током управляют с помощью электрического поля (в биполярных транзисторах выходной ток управляется входным током).

Полевые транзисторы называют также униполярными, так как в процессе протекания электрического тока участвуют только основные носители.

Различают два вида полевых транзисторов: с управляющим переходом и с изолированным затвором.

Устройство полевого транзистора. Схематическое изображение структуры полевого транзистора с управляющим переходом и каналом p -типа приведено на рис. 4.1, a условное графическое обозначение этого транзистора – на рис. 15.2, a . Стрелка указывает направление от слоя p к слою n (как и стрелка в изображении эмиттера биполярного транзистора). В интегральных микросхемах линейные размеры транзисторов могут быть меньше 1 мкм.

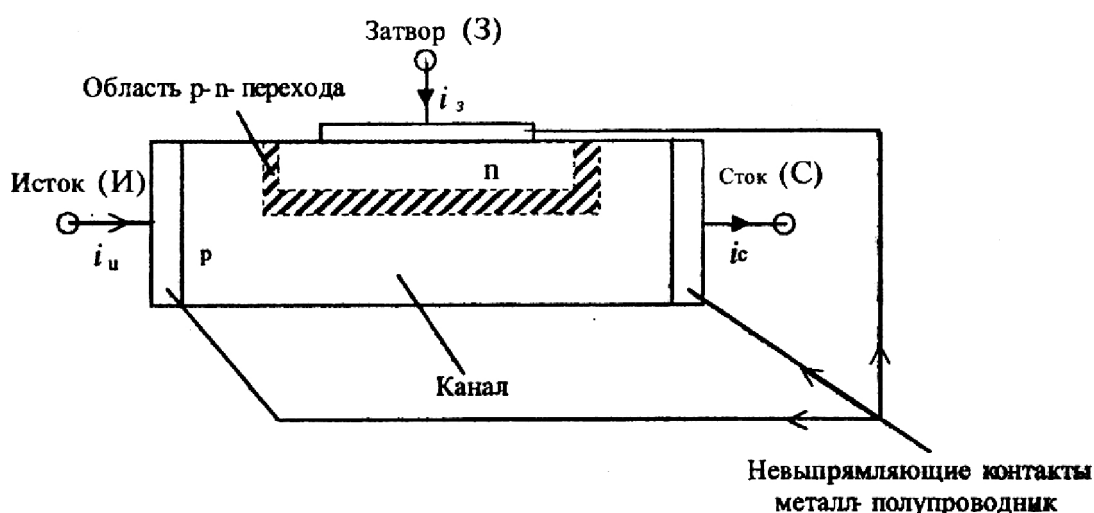


Рис. 15.1. Структура полевого транзистора

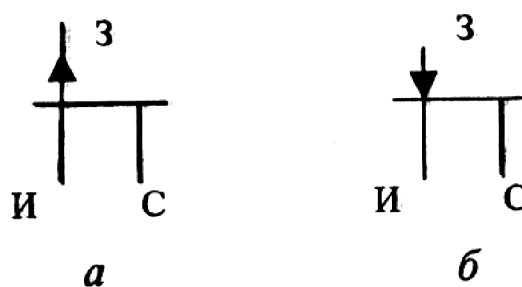


Рис. 15.2. Графическое изображение полевого транзистора:

- a) с управляющим переходом и каналом p -типа;
- $б$) с управляющим p - n -переходом и каналом n -типа

Удельное сопротивление слоя n (затвора) намного меньше удельного сопротивления слоя p (канала), поэтому область p - n -перехода, обедненная подвижными носителями заряда и имеющая очень большое удельное сопротивление, расположена главным образом в слое p .

Если типы проводимости слоев полупроводника в рассмотренном транзисторе изменить на противоположные, то получим полевой транзистор с управляющим p - n -переходом и каналом n -типа. Его условное графическое обозначение представлено на рис. 15.2,б.

Схемы включения транзистора. Для полевого транзистора, как и для биполярного, выделяют три схемы включения. Для полевого транзистора это схемы с общим затвором (ОЗ), общим истоком (ОИ) и общим стоком (ОС). Наиболее часто используют схемы с общим истоком (рис. 15.3).

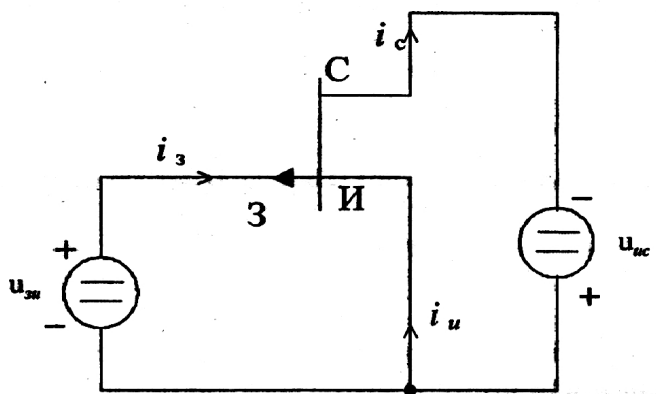


Рис. 15.3. Схема включения полевого транзистора с общим истоком (ОИ)

Так как в рабочем режиме $i_з \approx 0$, а $i_u \approx i_c$, входными характеристиками обычно не пользуются. Например, для транзистора КП103Л для тока утечки затвора $I_{з.ут}$ при $t < 85^\circ\text{C}$ выполняется условие $I_{з.ут} \leq 2 \text{ мкА}$.

Выходные (стоковые) характеристики. Выходной характеристикой называют зависимость вида

$$i_c = f(u_{ис}) \Big|_{u_{зи} = \text{const}},$$

где f – некоторая функция.

Полевой транзистор характеризуется следующими предельными параметрами (смысл которых понятен из обозначений): $U_{ис.макс}$, $U_{зс.макс}$, $P_{макс}$.

Для транзистора КП103Л $U_{ис.макс} = 10 \text{ В}$, $U_{зс.макс} = 15 \text{ В}$, $P_{макс} = 120 \text{ мВт}$ (все при $t = 85^\circ\text{C}$).

Стокозатворные характеристики (характеристики передачи, передаточные, переходные, проходные характеристики). Стокозатворной характеристикой называют зависимость вида

$$i_c = f(u_{зи}) \Big|_{u_{ис} = \text{const}},$$

где f – некоторая функция.

Такие характеристики не дают принципиально новой информации по сравнению с выходными, но иногда более удобны для использования. Для некоторых транзисторов задается максимальное (по модулю) допустимое отрицательное напряжение $u_{зи}$, например, для транзистора 2П103Д это напряжение не должно быть по модулю больше чем $0,5 \text{ В}$.

Параметры, характеризующие свойства транзистора усиливать напряжение.

Крутизна стокозатворной характеристики S (крутизна характеристики полевого транзистора):

$$S = \left| \frac{di_c}{du_{зи}} \right|_{\substack{u_{зи} - \text{заданное} \\ u_{ис} = \text{const}}}$$

Обычно задается $u_{зи}=0$. При этом для транзисторов рассматривается крутизна максимальная. Для КП103Л $S=1,8 \dots 3,8 \text{ мА/В}$ при $u_{ис}=0$, $t=20^\circ\text{C}$.

Внутреннее дифференциальное сопротивление $R_{ис.диф}$ (внутреннее сопротивление) определяется выражением:

$$R_{ис.диф} = \left| \frac{du_{ис}}{di_c} \right|_{\substack{u_{ис} - \text{заданное} \\ u_{зи} = \text{const}}}$$

Для КП103Л $R_{ис.диф} \approx 25 \text{ кОм}$ при $u_{ис}=10 \text{ В}$, $u_{зи}=0$.

Коэффициент усиления

$$M = \left| \frac{du_{ис}}{du_{зи}} \right|_{\substack{u_{зи} - \text{заданное} \\ i_c = \text{const}}}$$

Можно отметить, что

$$M = S \cdot R_{ис.диф}.$$

Для КП103Л при $S=2 \text{ мА/В}$ и $R_{ис.диф}=25 \text{ кОм}$ $M=2 (\text{мА/В}) \cdot 25 \text{ кОм}=50$.

Принципы управления параметрами электронного активного элемента, заложенные в полевых транзисторах, могут быть реализованы в более сложных электронных устройствах. К таким устройствам можно отнести **ячейку памяти на основе полевого транзистора с изолированным затвором (флэш-память)**. Устройства флэш-памяти являются современными быстродействующими программируемыми постоянными запоминающими устройствами (ППЗУ) с электрической записью и электрическим стиранием информации (ЭСП-ПЗУ). Эти устройства являются энергонезависимыми, так как информация не стирается при отключении питания, выдерживают не менее 100 000 циклов записи/стирания.

Одной из разновидностей приборов, реализующих принципы полевых транзисторов, являются **полупроводниковые приборы с зарядовой связью (ПЗС)**. Приборы с зарядовой связью используются:

- в запоминающих устройствах ЭВМ;
- в устройствах преобразования световых (оптических) сигналов в электрические.

16.Тиристоры

Тиристорами называют полупроводниковые приборы с двумя устойчивыми режимами работы (включен, выключен), имеющие три или более p - n -переходов.

Тиристор по принципу действия – прибор ключевого типа. Во включенном состоянии он подобен замкнутому ключу, а в выключенном – разомкнутому ключу. Те тиристоры, которые не имеют специальных электродов для подачи сигналов с целью изменения состояния, а имеют только два силовых электрода (анод и катод), называют неуправляемыми, или диодными, тиристорами (динисторами). Приборы с управляющими электродами называют управляемыми тиристорами, или просто тиристорами.

Тиристоры являются основными элементами в силовых устройствах электроники, которые называют также устройствами преобразовательной техники (управляемые выпрямители, инверторы и т. п.).

Существует большое количество различных тириستоров. Наиболее часто используют незапираемые тиристоры с тремя выводами, управляемые по катоду. Такие тиристоры содержат два силовых и один управляющий электрод и проводят ток только в одном направлении.

Упрощенное изображение структуры тиристора представлено на рис. 16.1, а его условное графическое обозначение – на рис. 16.2.

Обратимся к простейшей схеме с тиристором (рис. 16.3), где использованы следующие обозначения:

- i_a – ток анода (силовой ток в цепи анод-катод тиристора);
- u_{ak} – напряжение между анодом и катодом;
- i_y – ток управляющего электрода (в реальных схемах используют импульсы тока);
- u_{yk} – напряжение между управляющим электродом и катодом;
- u_{um} – напряжение питания.

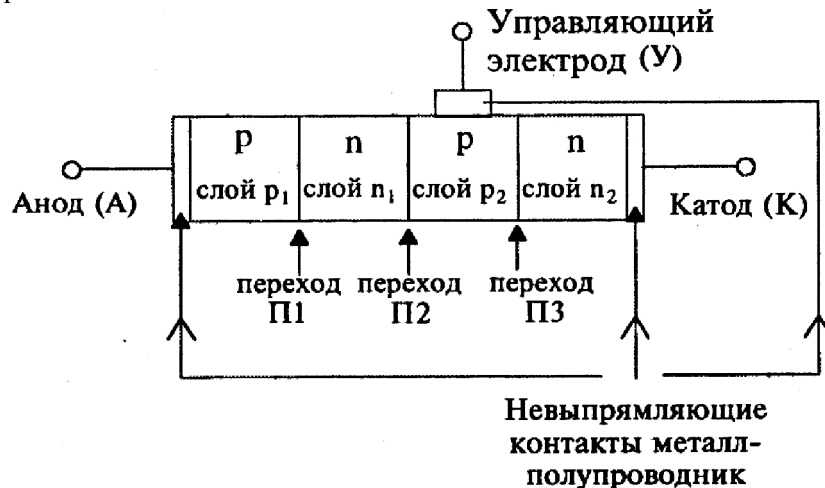


Рис. 16.1. Структурная схема тиристора

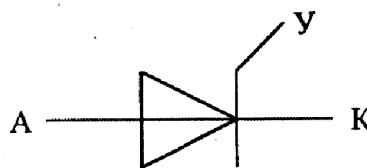


Рис. 16.2. Графическое изображение тиристора

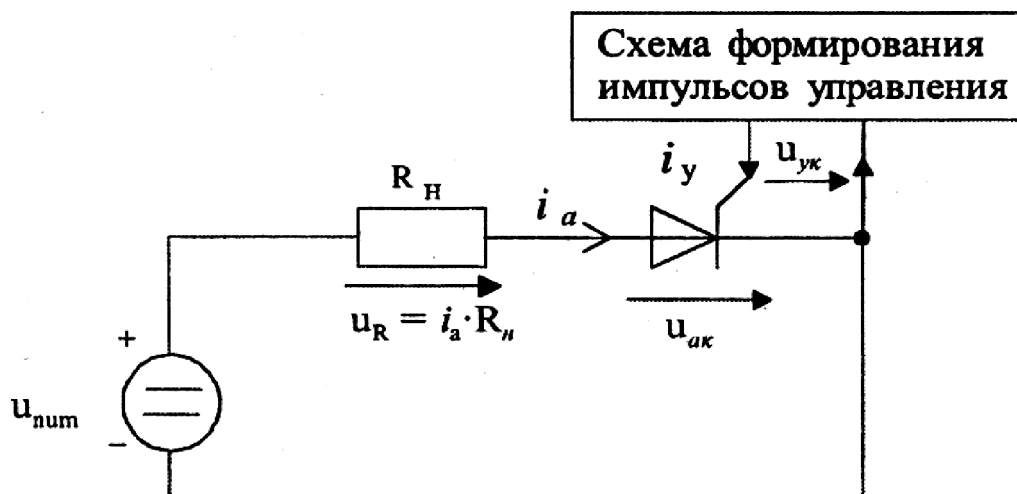


Рис. 16.3. Схема управления с применением тиристора

Предположим, что напряжение питания меньше так называемого напряжения переключения $U_{пер}$ ($u_{num} < U_{пер}$) и что после подключения источника питания импульс управления на тиристор не подавался. Тогда тиристор будет находиться в закрытом (выключенном) состоянии. При этом ток тиристора будет малым ($i_a = 0$) и будут выполняться соотношения $u_{ак} \approx u_{num}$, $u_R \approx 0$ (нагрузка отключена от источника питания).

Если предположить, что выполняется соотношение $u_{num} > U_{пер}$ или что после подключения источника питания (даже при выполнении условия $u_{num} < U_{пер}$) был подан импульс управления достаточной величины, то тиристор будет находиться в открытом (включенном) состоянии. При этом для всех трёх переходов будут выполняться соотношения $u_{ак} \approx 1 \text{ В}$, $i_a \approx u_{num} / R_n$, $u_R \approx u_{num}$ (т. е. нагрузка оказалась подключенной к источнику питания).

Существуют тиристоры, для которых напряжение $U_{пер}$ больше 1 кВ, а максимально допустимый ток i_a больше, чем 1 кА.

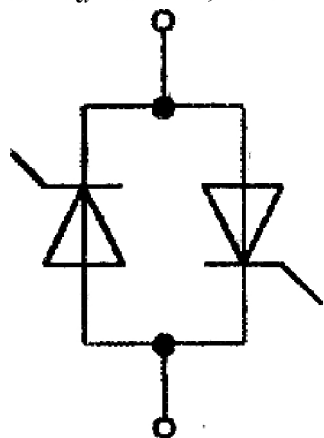


Рис. 16.4

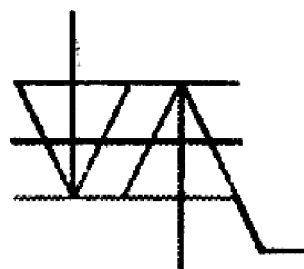


Рис. 16.5

Характерной особенностью рассматриваемого незапираемого тиристора, который очень широко используется на практике, является то, что его нельзя выключить с помощью тока управления.

Для выключения тиристора на практике не него подают обратное напряжение $u_{ак} < 0$ и поддерживают это напряжение в течение времени, большего так называемого времени

выключения $t_{\text{выкл}}$. Оно обычно составляет единицы или десятки микросекунд. За это время избыточные заряды в слоях n_1 и p_2 исчезают. Для выключения тиристора напряжение источника питания $U_{\text{пит}}$ в приведенной выше схеме (см. рис. 16.3) должно изменить полярность.

После указанной выдержки времени на тиристор вновь можно подавать прямое напряжение ($U_{\text{ак}} > 0$), и он будет выключенным до подачи импульса управления.

Существуют и широко используются так называемые симметричные тиристоры (симисторы, триаки). Каждый симистор подобен паре рассмотренных тиристоров, включенных встречно-параллельно (рис. 16.4). Условное графическое обозначение симистора показано на рис. 16.5.

17. Оптоэлектронные приборы

Оптоэлектронными называют приборы, которые чувствительны к электромагнитному излучению в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях, а также приборы, производящие или использующие такое излучение.

Излучение в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях относят к оптическому диапазону спектра. Обычно к указанному диапазону относят электромагнитные волны с длиной от 1 нм до 1 мм, что соответствует частотам примерно от $0,5 \cdot 10^{12}$ Гц до $5 \cdot 10^{17}$ Гц. Иногда говорят о более узком диапазоне частот – от 10 нм до 0,1 мм ($\sim 5 \cdot 10^{12} \dots 5 \cdot 10^{16}$ Гц). Видимому диапазону соответствуют длины волн от 0,38 мкм до 0,78 мкм (частота около 10^{15} Гц).

На практике широко используются источники излучения (излучатели), приемники излучения (фотоприемники) и оптроны (оптопары).

Оптроном называют прибор, в котором имеется и источник, и приемник излучения, конструктивно объединенные и помещенные в один корпус.

Из источников излучения нашли широкое применение светодиоды и лазеры, а из приемников – фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры.

Широко используются оптроны, в которых применяются пары светодиод-фотодиод, светодиод-фототранзистор, светодиод-фототиристор.

Основные достоинства оптоэлектронных приборов:

- высокая информационная емкость оптических каналов передачи информации, что является следствием больших значений используемых частот;
- полная гальваническая развязка источника и приемника излучения;
- отсутствие влияния приемника излучения на источник (однонаправленность потока информации);
- невосприимчивость оптических сигналов к электромагнитным полям (высокая помехозащищенность).

Излучающий диод (светодиод)

Излучающий диод, работающий в видимом диапазоне волн, часто называют светоизлучающим, или светодиодом.

Рассмотрим устройство, характеристики, параметры и систему обозначений излучающих диодов.

Устройство. Схематическое изображение структуры излучающего диода представлено на рис. 17.1,а, а его условное графическое обозначение – на рис. 17.2,б.

Излучение возникает при протекании прямого тока диода в результате рекомбинации электронов и дырок в области *p-n*-перехода и в областях, примыкающих к указанной области. При рекомбинации излучаются фотоны.

Характеристики и параметры. Для излучающих диодов, работающих в видимом диапазоне (длина волн от 0,38 до 0,78 мкм, частота около 10^{15} Гц), широко используются следующие характеристики:

- зависимость яркости излучения L от тока диода i (яркостная характеристика);
- зависимость силы света I_v от тока диода i .

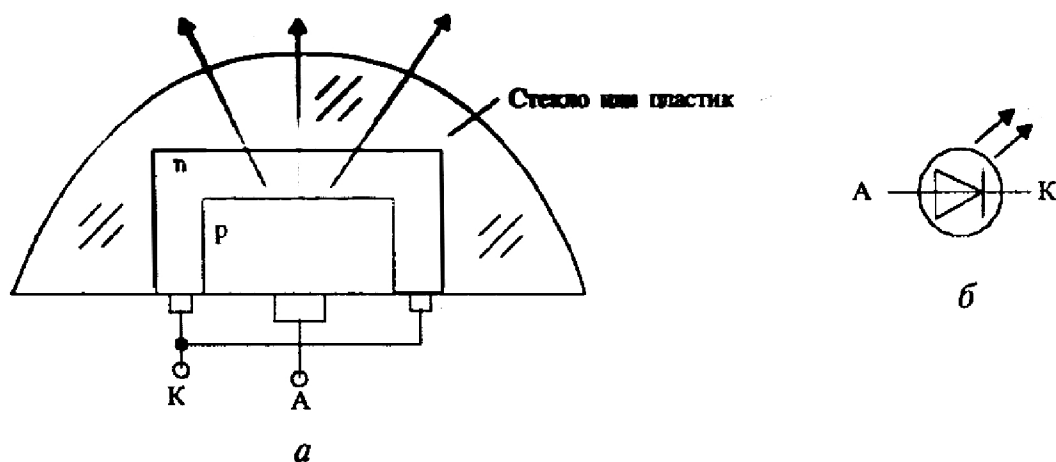


Рис. 17.1. Структура светоизлучающего диода (а) и его графическое изображение (б)

Яркостная характеристика для светоизлучающего диода типа АЛ102А представлена на рис. 17.2. Цвет свечения этого диода – красный.

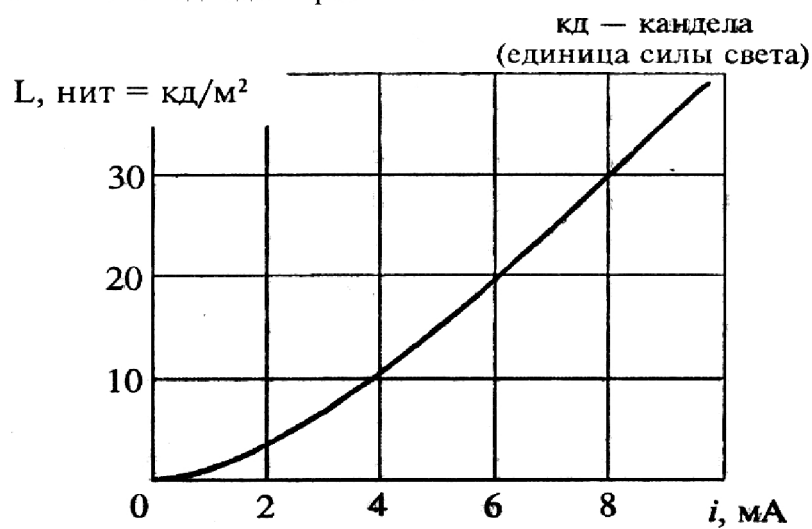


Рис. 17.2. Яркостная характеристика светодиода

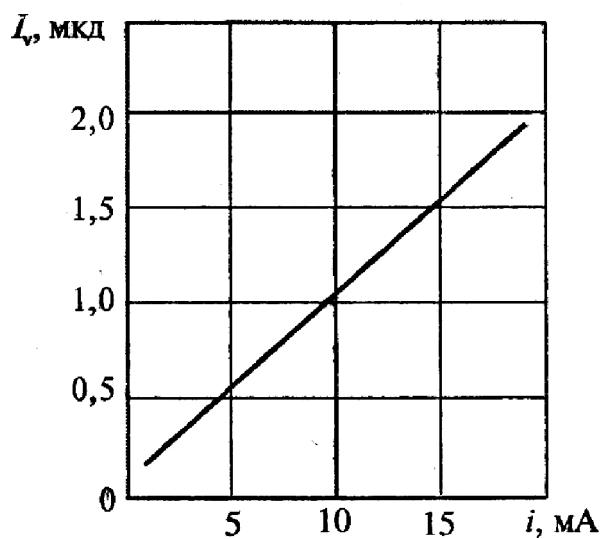


Рис. 17.3. Зависимость силы света от тока светодиода

График зависимости силы света от тока для светоизлучающего диода типа АЛ316А представлен на рис. 17.3. Цвет свечения – красный.

Для излучающих диодов, работающих не в видимом диапазоне, используют характеристики, отражающие зависимость мощности излучения P от тока диода i . Зона возможных положений графика зависимости мощности излучения от тока для излучающего диода типа АЛ119А, работающего в инфракрасном диапазоне (длина волны $0,93 \dots 0,96 \text{ мкм}$), представлена на рис. 17.4.

Приведем для диода АЛ119А его некоторые параметры:

- время нарастания импульса излучения – не более 1000 нс ;
- время спада импульса излучения – не более 1500 нс ;
- постоянное прямое напряжение при $i=300 \text{ мА}$ – не более 3 В ;
- постоянный максимально допустимый прямой ток при $t < +85^\circ\text{C}$ – 200 мА ;
- температура окружающей среды $-60 \dots +85^\circ\text{C}$.

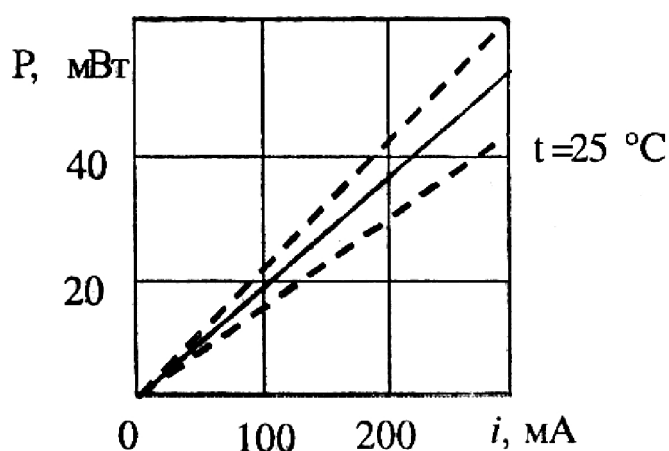


Рис. 17.4 . Зависимость мощности излучения от тока светодиода

Для информации о возможных значениях коэффициента полезного действия отметим, что излучающие диоды типа ЗЛ115А, АЛ115А, работающие в инфракрасном диапазоне (длина волны $0,95 \text{ мкм}$, ширина спектра не более $0,05 \text{ мкм}$), имеют коэффициент полезного действия не менее 10% .

Фоторезистор

Фоторезистором называют полупроводниковый резистор, сопротивление которого чувствительно к электромагнитному излучению в оптическом диапазоне спектра. Схематическое изображение структуры фоторезистора приведено на рис. 17.5,а, а его условное графическое изображение – на рис. 17.5,б.

Поток фотонов, падающих на полупроводник, вызывает появление пар *электрон-дырка*, увеличивающих проводимость (уменьшающих сопротивление). Это явление называют внутренним фотоэффектом (эффектом фотопроводимости). Фоторезисторы часто характеризуются зависимостью тока i от освещенности E при заданном напряжении на резисторе. Это так называемая *люкс-амперная* характеристика (рис. 17.6).

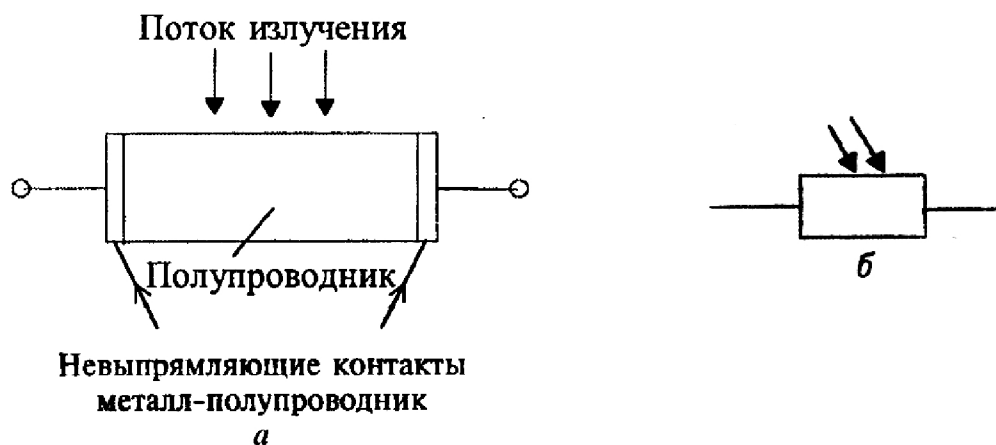


Рис. 17.5. Структура (а) и схематическое обозначение (б) фоторезистора

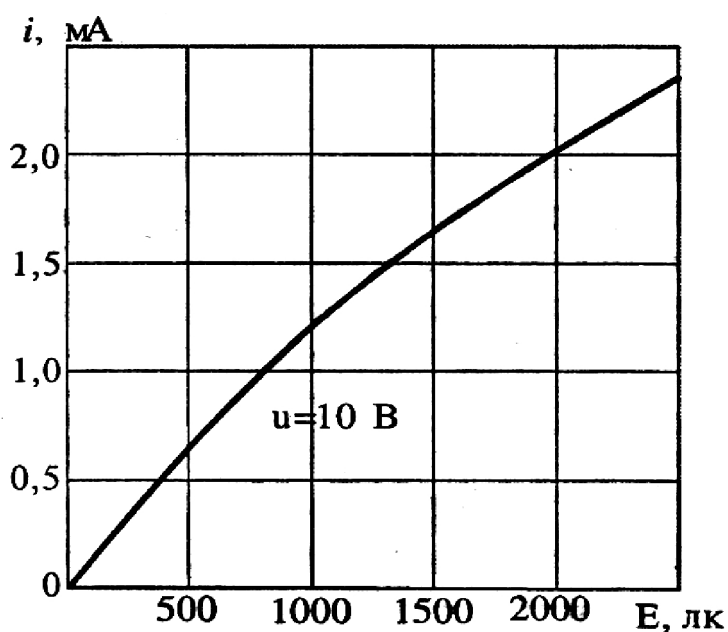


Рис. 17.6. Люкс-амперная характеристика фоторезистора ФСК-Г7

Часто используют следующие параметры фоторезисторов:

- номинальное темновое (при отсутствии светового потока) сопротивление (для ФСК-Г7 это сопротивление равно 5 МОм);
- интегральную чувствительность (чувствительность, определяемая при освещении фоторезистора светом сложного спектрального состава).

Интегральная чувствительность (токовая чувствительность к световому потоку) S определяется выражением:

$$S = \frac{i_{\Phi}}{\Phi},$$

где i_{Φ} – так называемый фототок (разность между током при освещении и током при отсутствии освещения);

Φ – световой поток.

Для фоторезистора ФСК-Г7 $S=0,7\text{ А/лм}$.

Фотодиод

Устройство и основные физические процессы. Упрощенная структура фотодиода приведена на рис. 17.7,а, а его условное графическое изображение – на рис. 17.7,б.

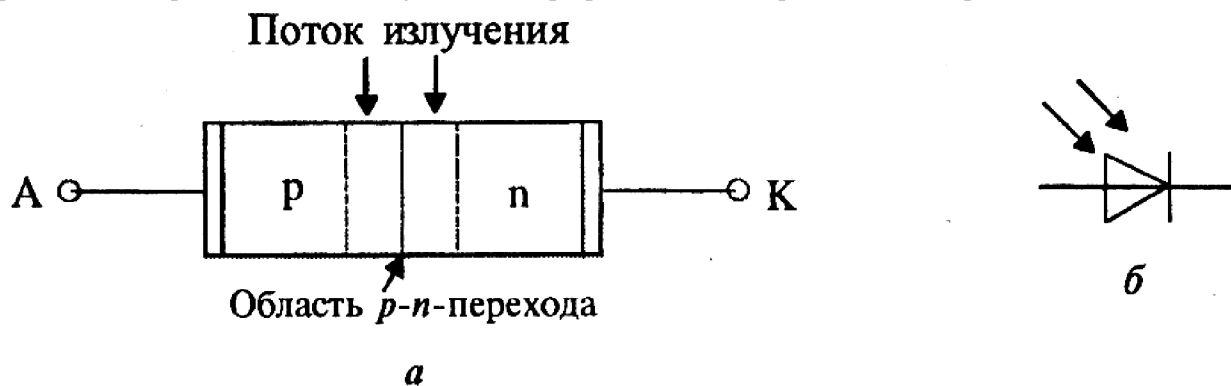


Рис. 17.7. Структура (а) и обозначение (б) фотодиода

Физические процессы, протекающие в фотодиодах, носят обратный характер по отношению к процессам, протекающим в светодиодах. Основным физическим явлением в фотодиоде является генерация пар *электрон-дырка* в области *p-n*-перехода и в прилегающих к нему областях под действием излучения.

Генерация пар *электрон-дырка* приводит к увеличению обратного тока диода при наличии обратного напряжения и к появлению напряжения $U_{ак}$ между анодом и катодом при разомкнутой цепи. Причем $U_{ак} > 0$ (дырки переходят к аноду, а электроны – к катоду под действием электрического поля *p-n*-перехода).

Характеристики и параметры. Фотодиоды удобно характеризовать семейством вольт-амперных характеристик, соответствующих различным световым потокам (световой поток измеряется в люменах, *лм*) или различным освещенностям (освещенность измеряется в люксах, *лк*).

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотодиода представлена на рис. 17.8.

Пусть вначале световой поток равен нулю, тогда ВАХ фотодиода фактически повторяет ВАХ обычного диода. Если световой поток не равен нулю, то фотоны, проникая в область *p-n*-перехода, вызывают генерацию пар *электрон-дырка*. Под действием электрического поля *p-n*-перехода носители тока движутся к электродам (дырки – к электроду слоя *p*, электроны – к электроду слоя *n*). В результате между электродами возникает напряжение, которое возрастает при увеличении светового потока. При положительном напряжении анод-катод ток диода может быть отрицательным (четвертый квадрант характеристики). При этом прибор не потребляет, а вырабатывает энергию.

На практике фотодиоды используют и в так называемом режиме фотогенератора (фотогальванический режим, вентильный режим), и в так называемом режиме фотопреобразователя (фотодиодный режим).

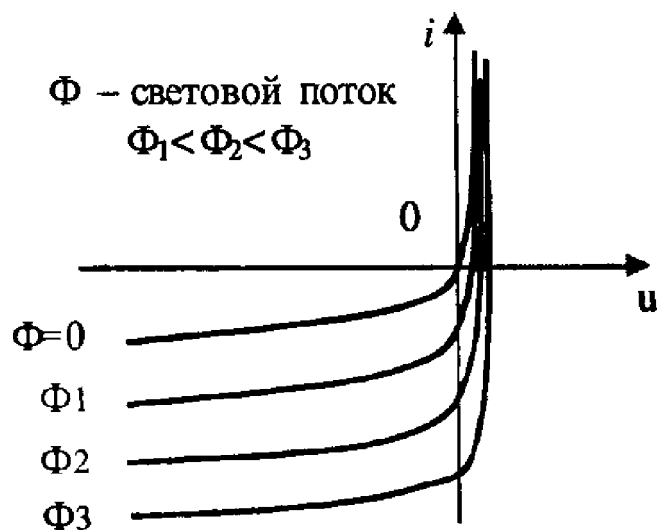


Рис. 17.8. Вольт-амперные характеристики фотодиода

В режиме фотогенератора работают солнечные элементы, преобразующие свет в электроэнергию. В настоящее время коэффициент полезного действия солнечных элементов достигает 20 %. Пока энергия, полученная от солнечных элементов, примерно в 50 раз дороже энергии, получаемой из угля, нефти или урана.

Режим фотопреобразователя соответствует ВАХ в третьем квадранте. В этом режиме фотодиод потребляет энергию ($u \cdot i > 0$) от некоторого обязательно имеющегося в цепи внешнего источника напряжения (рис. 17.9). Графический анализ этого режима выполняется при использовании линии нагрузки, как и для обычного диода. При этом характеристики обычно условно изображаются в первом квадранте (рис. 17.10).

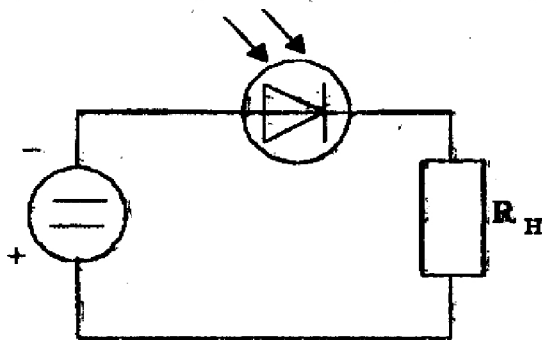


Рис. 17.9

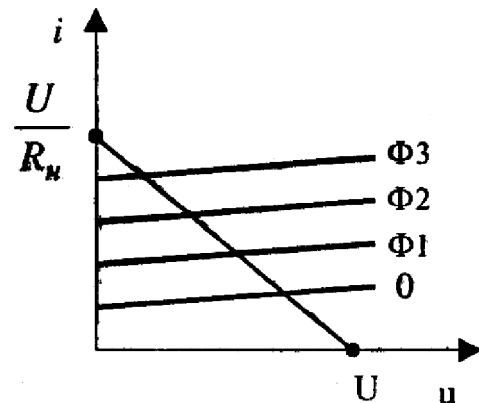


Рис. 17.10

Фотодиоды являются более быстродействующими приборами по сравнению с фоторезисторами. Они работают на частотах 10^7 – 10^{10} Гц. Фотодиод часто используют в оптопарах *светодиод-фотодиод*. В этом случае различные характеристики фотодиода соответствуют различным токам светодиода (который при этом создает различные световые потоки).

Оптрон (оптопара)

Оптрон – полупроводниковый прибор, содержащий источник излучения и приемник излучения, объединенных в одном корпусе и связанные между собой оптически, электрически и одновременно обеими связями. Очень широко распространены оптроны, у которых в качестве приемника излучения используются фоторезистор, фотодиод, фототранзистор и фототиристор.

В резисторных оптронах выходное сопротивление при изменении режима входной цепи может изменяться в $10^7 \dots 10^8$ раз. Кроме того, вольт-амперная характеристика фоторезистора отличается высокой линейностью и симметричностью, что обуславливает широкую применимость резистивных оптопар в аналоговых устройствах. Недостатком резисторных оптронов является низкое быстродействие – $0,01 \dots 1$ с.

В цепях передачи цифровых информационных сигналов применяются главным образом диодные и транзисторные оптроны, а для оптической коммутации высоковольтных силовых цепей – тиристорные оптроны. Быстродействие тиристорных и транзисторных оптронов характеризуется временем переключения, которое часто лежит в диапазоне $5 \dots 50$ мкс.

Рассмотрим подробнее оптопару светодиод-фотодиод (рис. 17.11,а). Излучающий диод (слева) должен быть включен в прямом направлении, а фотодиод – в прямом (режим фотогенератора) или обратном направлении (режим фотопреобразователя). Направления токов и напряжений диодов оптопары приведены на рис. 17.11,б.

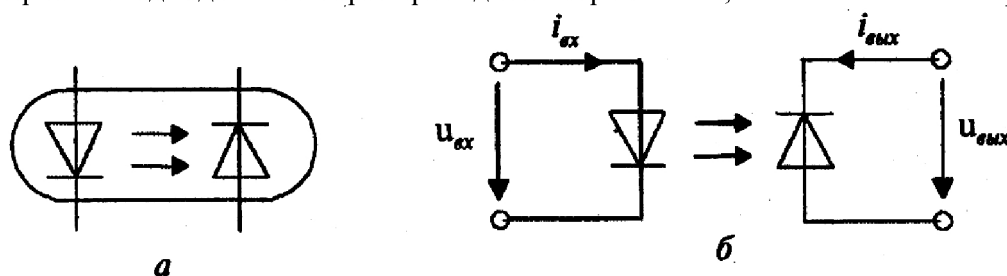


Рис. 17.11. Схема оптопары (а) и направление токов и напряжений в ней (б)

Изобразим зависимость тока $i_{вых}$ от тока i_{ax} при $u_{вых}=0$ для оптопары АОД107А (рис. 17.12). Указанная оптопара предназначена для работы как в фотогенераторном, так и в фотопреобразовательном режиме.

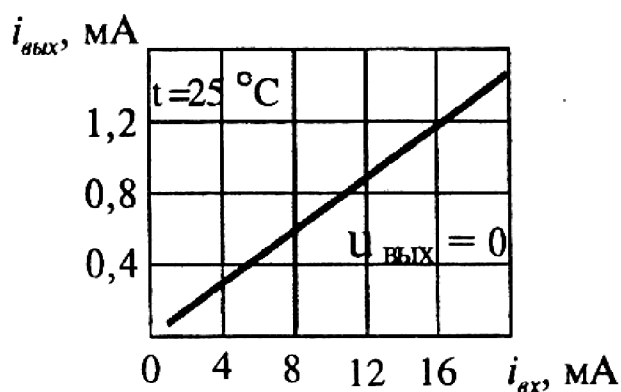


Рис. 17.12. Передаточная характеристика оптопары АОД107А

Фототранзистор и фототиристор

Выходные характеристики фототранзистора подобны выходным характеристикам обычного биполярного транзистора, в котором положение характеристик определяется не током базы, а уровнем освещенности (или величиной светового потока).

Свойства фототиристора подобны свойствам обычного тиристора, однако с той лишь особенностью, что включение тиристора осуществляется не с помощью импульса тока управления, а с помощью светового импульса.

18. Операционные усилители

Операционный усилитель (ОУ) – это высококачественный усилитель, предназначенный для усиления как постоянных, так и переменных сигналов. Вначале такие усилители использовались в аналоговых вычислительных устройствах для выполнения математических операций (сложения, вычитания и т. д.). Это объясняет происхождение термина «операционный».

В настоящее время операционные усилители широко используются в виде полупроводниковых интегральных схем. Эти схемы содержат большое число (десятки) элементов (транзисторов, диодов и т. д.), но по размерам и стоимости приближаются к отдельным транзисторам. Операционные усилители удобно использовать для решения самых различных задач преобразования и генерирования маломощных сигналов, поэтому эти усилители очень широко применяются на практике.

Рассмотрим наиболее широко используемые разновидности операционных усилителей, для питания которых применяются два источника напряжения (обычно $+15\text{ В}$ и -15 В). По-другому это называется питанием от источника с нулевым выводом или от расщепленного источника.

Условное графическое обозначение операционного усилителя показано на рис. 18.1.

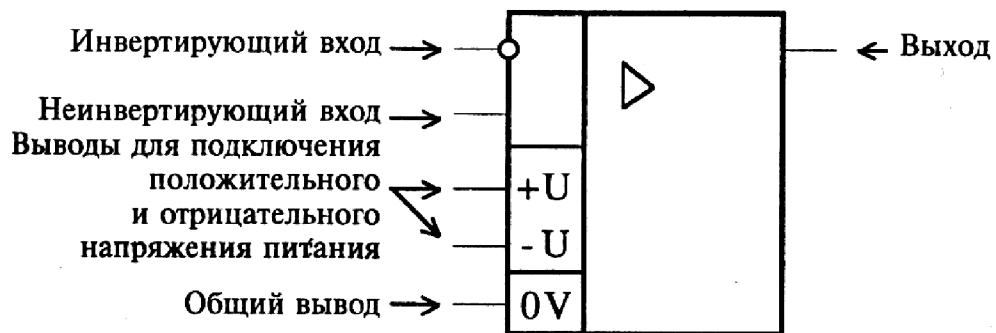


Рис. 18.1. Графическое обозначение операционного усилителя

Обозначение общего вывода «0V» расшифровывается как «ноль вольт». Для пояснения назначения выводов на рис. 18.2 приведена типовая схема на операционном усилителе – схема инвертирующего усилителя.

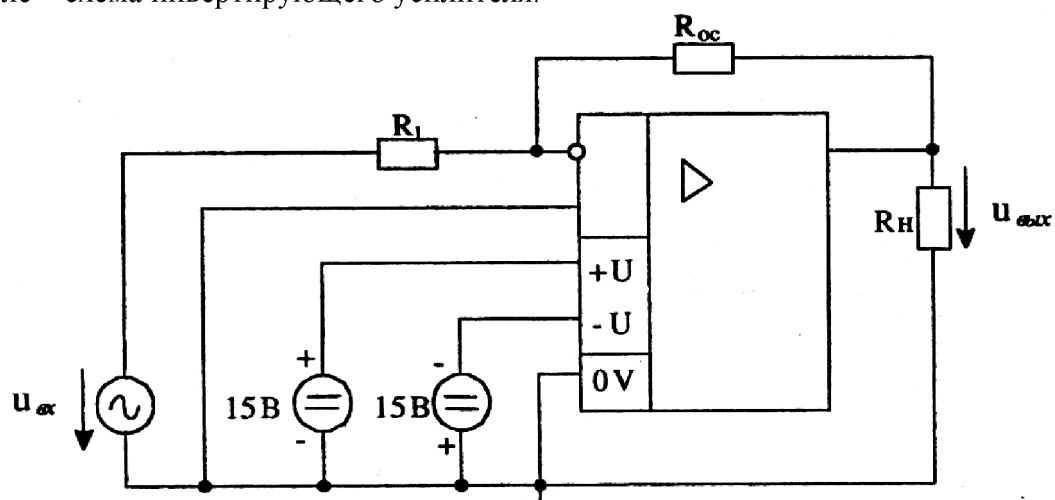


Рис. 18.2. Инвертирующий усилитель на основе операционного усилителя

Если входное напряжение $u_{вх}$ достаточно мало по модулю, то выходное напряжение $u_{вых}$ определяется выражением

$$u_{вых} = -u_{вх} \frac{R_{oc}}{R_1}.$$

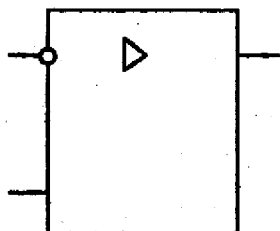


Рис. 18.3

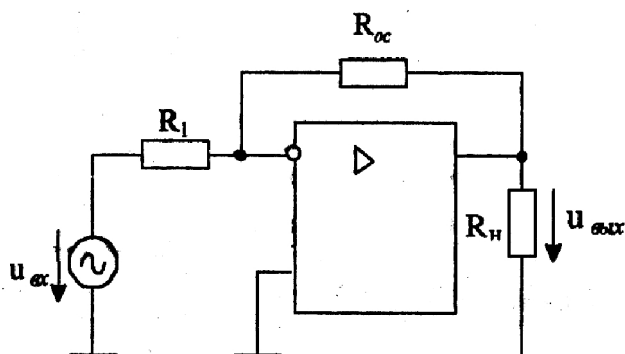


Рис. 18.4

Часто на схемах выводы $+U$, $-U$ и $0V$ не указывают (но подразумевают) и используют упрощенное условное графическое обозначение (рис. 18.3). При этом приведенная на рис. 18.2 типичная схема приобретает упрощенный вид (рис. 18.4).

Обозначим напряжения на выводах операционного усилителя (рис. 18.5).

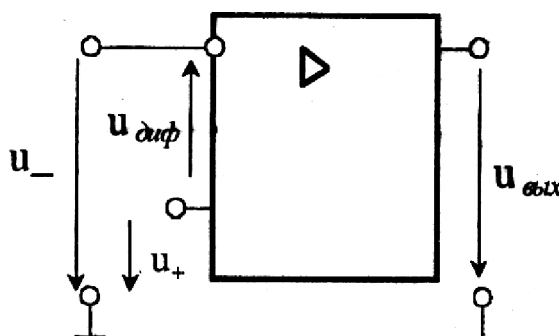


Рис. 18.5

Напряжение $u_{диф}$ между инвертирующим и неинвертирующим входами называют дифференциальным напряжением (дифференциальным сигналом). Ясно, что $u_{диф} = u_+ - u_-$. Операционные усилители конструируют таким образом, чтобы они как можно больше изменяли напряжение $u_{вых}$ при изменении дифференциального сигнала (т. е. разности $u_+ - u_-$) и как можно меньше изменяли напряжение $u_{вых}$ при одинаковом изменении напряжений u_+ и u_- .

Пусть $u_{диф}=0$. Обозначим синфазное напряжение (синфазный сигнал) $u_{сф} \equiv u_+ = u_-$. Операционные усилители конструируют таким образом, чтобы влияние синфазного сигнала на выходное напряжение было как можно меньше.

Передаточная характеристика. Операционный усилитель хорошо характеризует его передаточная характеристика – зависимость вида

$$u_{вых} = f(u_{диф}),$$

где f – некоторая функция.

График этой зависимости для операционного усилителя К140УД1Б приведен на рис. 18.6. Эта конкретная характеристика не проходит через начало координат. Значение напряжения $u_{диф}$, при котором выполняется условие $u_{вых}=0$, называют напряжением смещения нуля и обозначают через $U_{см}$. Для операционного усилителя типа К140УД1 известно, что напряжение $U_{см}$ лежит в диапазоне от $-10 мВ$ до $+10 мВ$. А это означает, что при нулевом напряжении $u_{диф}$ напряжение $u_{вых}$ может лежать в пределах от минимально возможного (около $-7 В$) до максимально возможного (около $+10 В$).

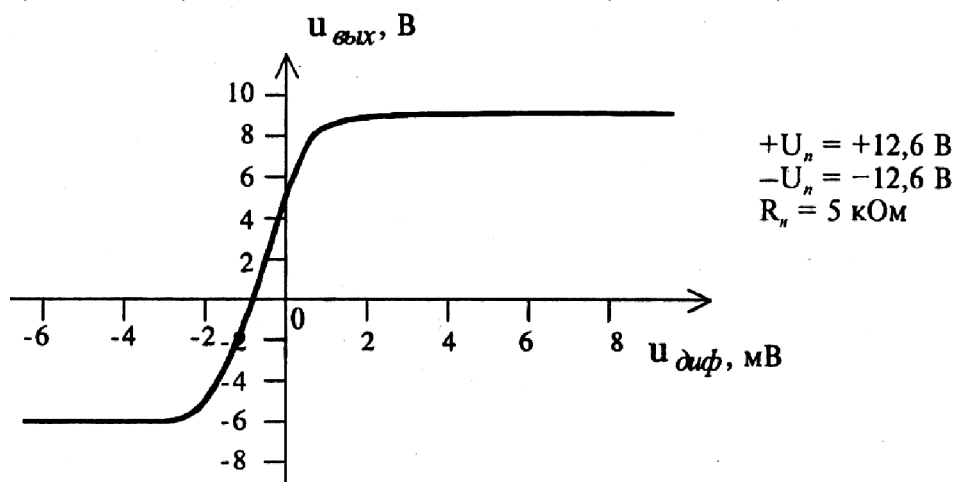


Рис. 18.6. Передаточная характеристика операционного усилителя К140УД1Б

Для того, чтобы при нулевом сигнале на входе напряжение на выходе было равно нулю, т. е. для того, чтобы передаточная характеристика проходила через начало координат, предусматривают меры по компенсации напряжения смещения (балансировка, коррекция нуля, настройка нуля). В некоторых операционных усилителях для компенсации напряжения смещения предусмотрены специальные выводы. Типовая схема включения операционного усилителя типа К140УД8А, в котором предусмотрены такие выводы, представлена на рис. 18.7.

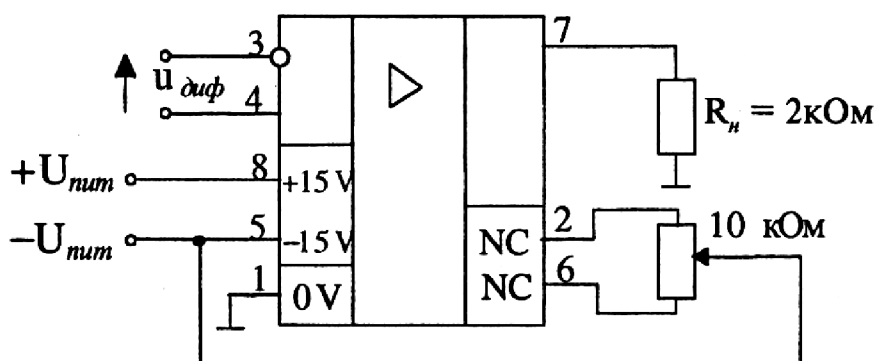


Рис. 18.7. Схема включения операционного усилителя К140УД8А

Через NC обозначены специальные выводы для балансировки. Цифрами обозначены номера выводов.

Диапазон выходного напряжения, соответствующий почти вертикальному участку передаточной характеристики, называется областью усиления. Соответствующий этому диапазону режим работы называют режимом усиления (линейным, активным режимом). В линейном режиме

$$u_{вых} = K \cdot u_{диф},$$

где K – коэффициент усиления по напряжению (коэффициент усиления напряжения, коэффициент усиления дифференциального сигнала).

Обычно величина K лежит в пределах $10^4 \dots 10^5$. Например, для операционного усилителя типа К140УД1Б $K=1350 \dots 12000$, для операционного усилителя К140УД14А K не менее 50000.

Диапазоны выходного напряжения вне области усиления называются областями насыщения. Соответствующий этим областям режим называют режимом насыщения.

Реальные электронные устройства на основе операционных усилителей практически всегда имеют коэффициент усиления значительно меньше K , так как в них используется отрицательная обратная связь (рис. 18.2).

19. Интегральные микросхемы

Интегральные микросхемы, или интегральные схемы (ИС) – микроэлектронное изделие (т.е. изделие с высокой степенью миниатюризации), выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов (или элементов и компонентов) и (или) кристаллов, которое с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации рассматривается как единое целое.

Элемент интегральной схемы – часть интегральной схемы, реализующая функцию какого-либо электрорадиоэлемента (резистора, диода, транзистора и т.д.), причем эта часть выполнена нераздельно от других частей и не может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации.

Компонент интегральной схемы в отличие от элемента может быть выделен как самостоятельное изделие с указанной выше точки зрения.

По конструктивно-технологическим признакам интегральные схемы обычно подразделяются на:

- полупроводниковые;
- гибридные;
- пленочные.

В полупроводниковой схеме все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме или на поверхности полупроводника. В таких схемах нет компонентов. Это наиболее распространенная разновидность интегральных схем.

Интегральную схему называют гибридной, если она содержит компоненты и (или) отдельные кристаллы полупроводника.

В пленочных интегральных схемах отдельные элементы и межэлементные соединения выполняются на поверхности диэлектрика (обычно используется керамика). При этом применяются различные технологии нанесения пленок из соответствующих материалов.

По функциональным признакам интегральные схемы подразделяются на аналоговые (операционные усилители, источники вторичного электропитания и др.) и цифровые (логические элементы, триггеры и т.п.).

Историческая справка. Первые опыты по созданию полупроводниковых интегральных схем были осуществлены в 1953 г., а промышленное производство интегральных схем началось в 1959 г. В 1966 г. был начат выпуск интегральных схем средней степени интеграции (число элементов в одном кристалле до 1000). В 1969 г. были созданы интегральные схемы большой степени интеграции (большие интегральные схемы, БИС), содержащие до 10000 элементов на одном кристалле.

В 1971 г. были разработаны микропроцессоры, а в 1975 г. – интегральные схемы сверхбольшой степени интеграции (сверхбольшие интегральные схемы, СБИС), содержащие более 10000 элементов в одном кристалле. Предельная частота биполярных транзисторов в полупроводниковых интегральных схемах достигает 15 ГГц и более ($1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}$).

В настоящее время ожидается появление интегральных схем, содержащих до 100 млн МОП-транзисторов в одном кристалле (речь идет о цифровых схемах).

20. Аналоговые электронные устройства. Усилители

Усилитель – это электронное устройство, управляющее потоком энергии, идущей от источника питания к нагрузке. Причем, мощность, требующаяся для управления, намного меньше мощности, отдаваемой в нагрузку, а форма входного (усиливаемого) и выходного (на нагрузку) сигналов совпадают (рис. 20.1).

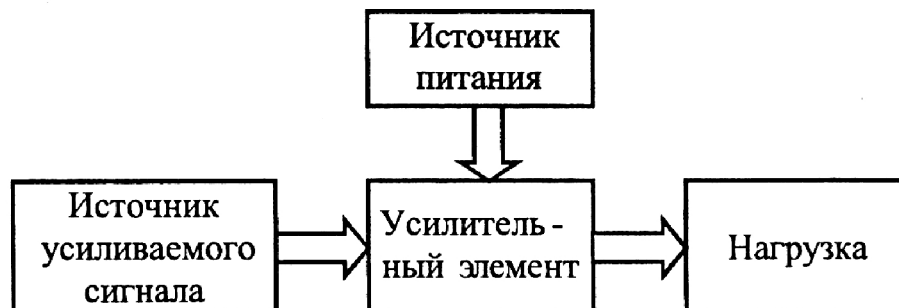


Рис. 20.1. Функциональная схема усилителя

Классификация. Все усилители можно классифицировать по следующим признакам:

- по частоте усиливаемого сигнала: усилители низкой частоты (УНЧ) для усиления сигналов с частотой от 10 Гц до 100 кГц; широкополосные усилители, усиливающие сигналы от 1 до 100 МГц; избирательные усилители, усиливающие сигналы узкой полосы частот;
- по роду усиливаемого сигнала: усилители постоянного тока (УПТ), усиливающие электрические сигналы с частотой от 0 Гц и выше; усилители переменного тока, усиливающие электрические сигналы с частотой, отличной от нуля;
- по функциональному назначению: усилители напряжения, усилители тока и усилители мощности (в зависимости от того, какой из параметров усиливается усилителем).

Основным качественным параметром усилителя является *коэффициент усиления*. В зависимости от функционального назначения усилителя различают коэффициенты усиления по напряжению K_U , току K_I или мощности K_P :

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}, \quad K_I = \frac{I_{вых}}{I_{вх}}, \quad K_P = \frac{P_{вых}}{P_{вх}},$$

где $U_{вх}$, $I_{вх}$ – амплитудные значения переменных составляющих соответственно напряжения и тока на входе;

$U_{вых}$, $I_{вых}$ – амплитудные значения переменных составляющих соответственно напряжения и тока на выходе;

$P_{вх}$, $P_{вых}$ – мощности сигналов соответственно на входе и выходе.

Коэффициенты усиления часто выражаются в логарифмических единицах – децибелах:

$$K_U(\text{дБ})=20\lg K_U; \quad K_I(\text{дБ})=20\lg K_I; \quad K_P(\text{дБ})=10\lg K_P.$$

Усилитель может состоять из одного или нескольких каскадов. Для многокаскадных усилителей его коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления его каскадов: $K=K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n$. Если коэффициенты усиления каскадов выражены в децибелах, то общий коэффициент усиления равен сумме коэффициентов усиления отдельных каскадов:

$$K(\text{дБ})=K_1(\text{дБ})+K_2(\text{дБ})+\dots+K_n(\text{дБ}).$$

Обычно в усилителе содержатся реактивные элементы, в том числе и «паразитные», а используемые усилительные элементы обладают инерционностью. В силу этого коэффициент усиления является комплексной величиной:

$$\dot{K}_u = K_u \cdot e^{j\varphi},$$

где $K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$ - модуль коэффициента усиления;

φ – сдвиг фаз между входным и выходным напряжениями с амплитудами $U_{вх}$ и $U_{вых}$.

Помимо коэффициента усиления важным количественным показателем является коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_{вых}}{P_{ист}},$$

где $P_{ист}$ – мощность, потребляемая от источника питания.

Роль этого показателя особенно возрастает для мощных, как правило, выходных каскадов усилителя.

К количественным показателям усилителя относятся также входное $R_{вх}$ и выходное $R_{вых}$ сопротивления усилителя:

$$R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}}; \quad R_{вых} = \frac{|\Delta U_{вых}|}{|\Delta I_{вых}|},$$

где $U_{вх}$ и $I_{вх}$ – амплитудные значения напряжения и тока на входе усилителя;

$\Delta U_{вых}$ и $\Delta I_{вых}$ – приращения амплитудных значений напряжения и тока на выходе усилителя, вызванные изменением сопротивления нагрузки.

Рассмотрим основные характеристики усилителей.

Амплитудная характеристика – это зависимость амплитуды выходного напряжения (тока) от амплитуды входного напряжения (тока) (рис. 20.2). Точка 1 соответствует напряжению шумов, измеряемому при $U_{вх}=0$, точка 2 – минимальному входному напряжению, при котором на выходе усилителя можно различать сигнал на фоне шумов. Участок 2–3 – это рабочий участок, на котором сохраняется пропорциональность между входным и выходным напряжением усилителя. После точки 3 наблюдаются нелинейные искажения входного сигнала. Степень нелинейных искажений оценивается коэффициентом нелинейных искажений (или коэффициентом гармоник):

$$K_G = \frac{\sqrt{U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + \dots + U_{nm}^2}}{U_{1m}},$$

где U_{1m} , U_{2m} , U_{3m} , U_{nm} – амплитуды 1-й (основной), 2, 3 и n -ой гармоник выходного напряжения соответственно.

Величина $D = \frac{U_{вх. max}}{U_{вх. min}}$ характеризует динамический диапазон усилителя.

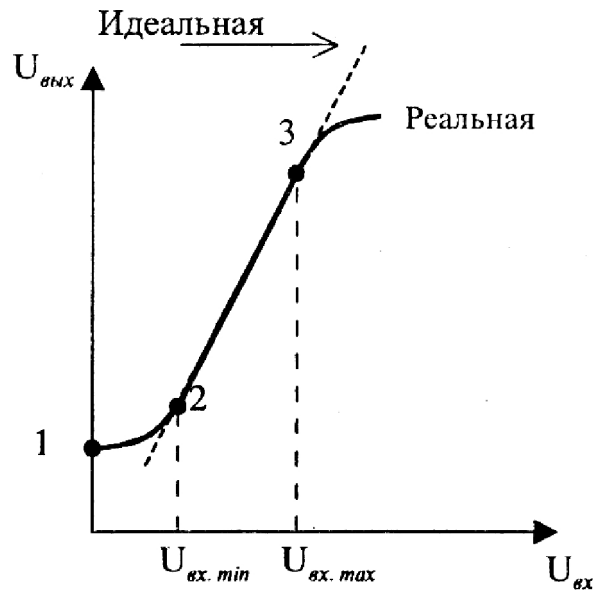


Рис. 20.2. Амплитудная характеристика усилителя

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) усилителя — это зависимость модуля коэффициента усиления от частоты (рис. 9.3). Частоты f_H и f_V называются нижней и верхней граничными частотами, а их разность $(f_H - f_V)$ — полосой пропускания усилителя.

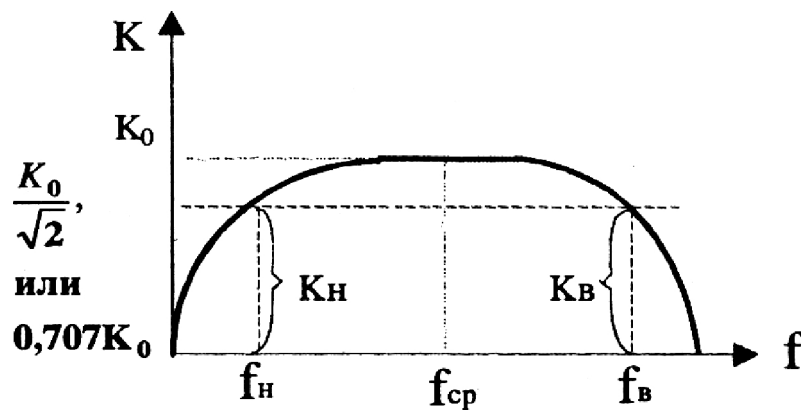


Рис. 20.3. Амплитудно-частотная характеристика усилителя

При усилении гармонического сигнала достаточно малой амплитуды искажения формы усиленного сигнала не возникает. При усилении сложного входного сигнала, содержащего ряд гармоник, эти гармоники усиливаются усилителем неодинаково, так как реактивные сопротивления схемы по-разному зависят от частоты, и в результате это приводит к искажению формы усиленного сигнала.

Такие искажения называются частотными и характеризуются коэффициентом частотных искажений:

$$M = \frac{K_0}{K_f},$$

где K_f — модуль коэффициента усиления на заданной частоте.

Коэффициенты частотных искажений

$$M_n = \frac{K_0}{K_n} \quad \text{и} \quad M_v = \frac{K_0}{K_v}$$

называются соответственно коэффициентами искажений на нижней и верхней граничных частотах.

АЧХ может быть построена и в логарифмическом масштабе. В этом случае она называется ЛАЧХ (рис. 20.4), коэффициент усиления усилителя выражается в децибелах, а по оси абсцисс откладываются частоты через декаду (интервал частот между $10f$ и f).

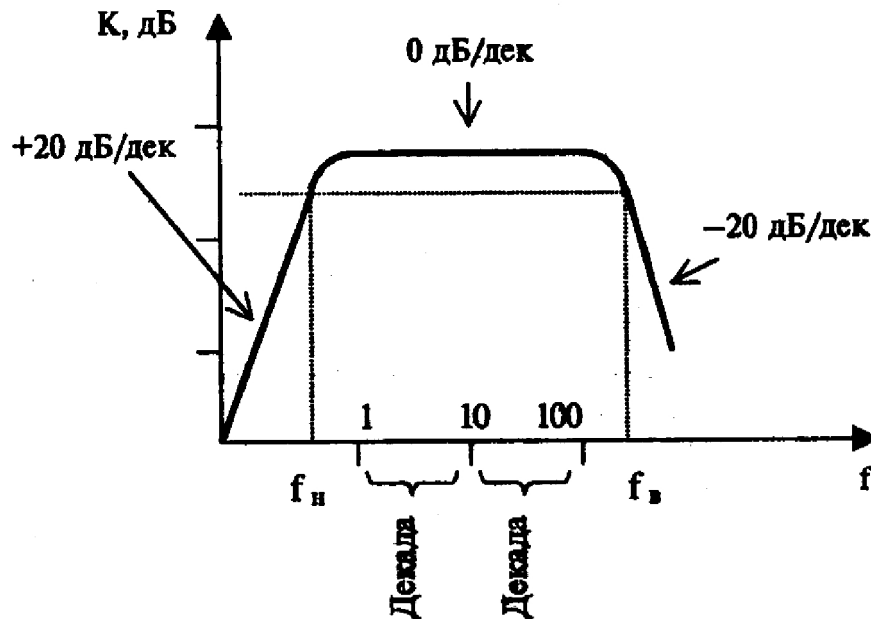


Рис. 20.4. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика усилителя (ЛАЧХ)

Обычно в качестве точек отсчета выбирают частоты, соответствующие $f=10^n$. Кривые ЛАЧХ имеют в каждой частотной области определенный наклон. Его измеряют в децибелах на декаду.

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) усилителя – это зависимость угла сдвига фаз между входным и выходным напряжениями от частоты. Типовая ФЧХ приведена на рис. 20.5. Она также может быть построена в логарифмическом масштабе.

В области средних частот дополнительные фазовые искажения минимальны. ФЧХ позволяет оценить фазовые искажения, возникающие в усилителях по тем же причинам, что и частотные.

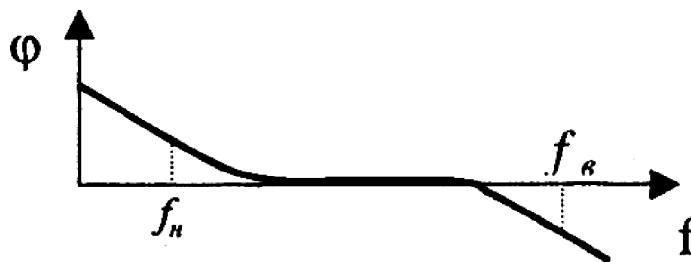


Рис. 20.5. Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) усилителя

Пример возникновения фазовых искажений приведен на рис. 9.6, где показано усиление входного сигнала, состоящего из двух гармоник (пунктир), которые при усилении претерпевают фазовые сдвиги.

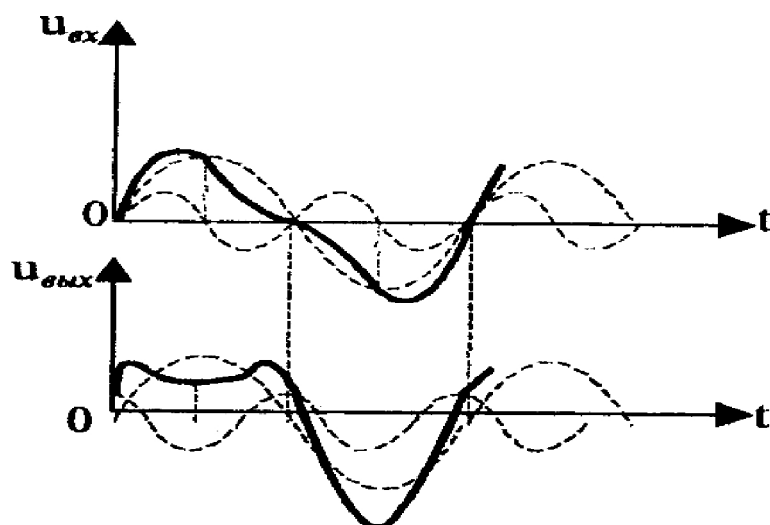


Рис. 20.6. Фазовые искажения в усилителе

Переходная характеристика усилителя – это зависимость выходного сигнала (тока, напряжения) от времени при скачкообразном входном воздействии (рис. 9.7). Частотная, фазовая и переходная характеристики усилителя однозначно связаны друг с другом.

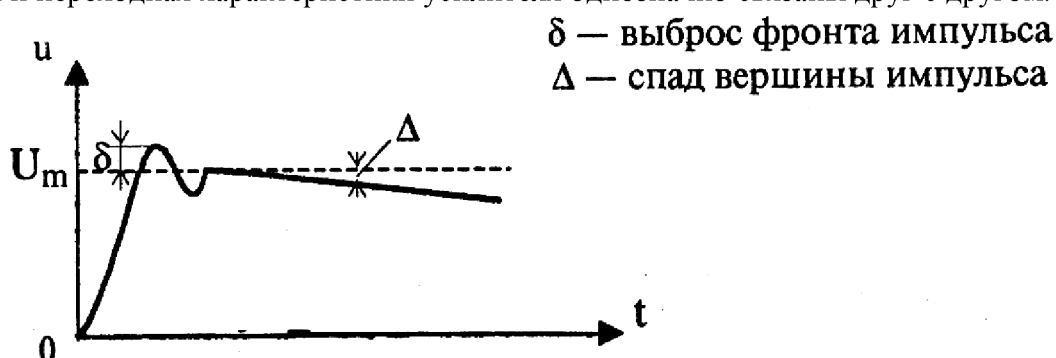


Рис. 20.7. Переходная характеристика усилителя

Области верхних частот соответствует переходная характеристика в области малых времен, области нижних частот – переходная характеристика в области больших времен.

Обратная связь в усилителях

Понятие «обратная связь» (ОС) широко используется как в технике, так и в других областях знаний. Обратной связью называют влияние некоторой выходной величины на некоторую входную, которая в свою очередь существенным образом влияет на выходную величину (определяет эту выходную величину). В усилителях, как правило, используется так называемая *отрицательная обратная связь* (ООС). При наличии отрицательной обратной связи выходной сигнал таким образом влияет на входной, что входной сигнал уменьшается и соответственно приводит к уменьшению выходного сигнала. При этом уменьшаются искажения сигнала, расширяется частотный диапазон и т. д.

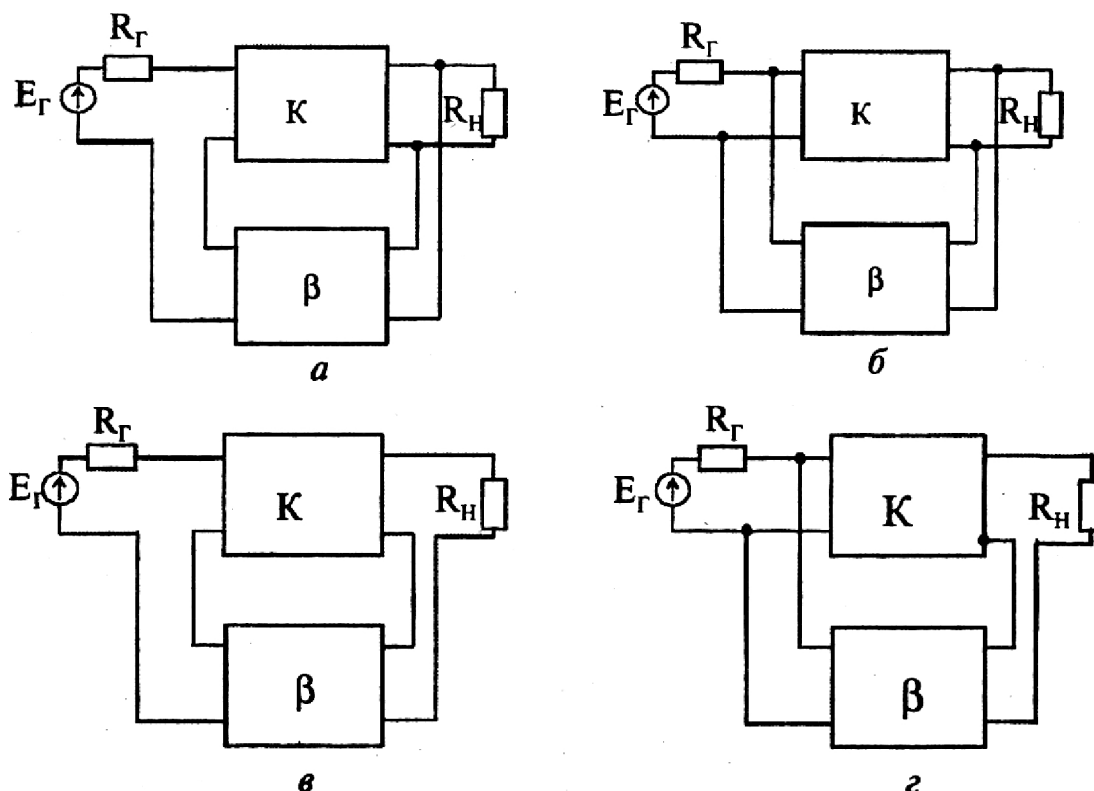


Рис. 20.8. Классификация обратных связей усилителя:
 K – коэффициент прямой передачи, или коэффициент усиления усилителя без обратной связи; β – коэффициент передачи цепи обратной связи

Классификация обратных связей в усилителях представлена на рис. 9.8.

В соответствии с рисунком 9.8 обратные связи подразделяются на:

- последовательная по напряжению (а);
- параллельная по напряжению (б);
- последовательная по току (в);
- параллельная по току (г).

Для определения вида обратной связи (ОС) нужно «закоротить» нагрузку. Если при этом сигнал обратной связи обращается в нуль, то это ОС по напряжению, если сигнал ОС не обращается в нуль – то это ОС по току. При обратной связи по напряжению сигнал обратной связи, поступающий с выхода усилителя на вход, пропорционален выходному напряжению. При обратной связи по току сигнал обратной связи пропорционален выходному току. При последовательной обратной связи (со сложением напряжений) в качестве сигнала обратной связи используется напряжение, которое вычитается (для отрицательной обратной связи) из напряжения внешнего входного сигнала. При параллельной обратной связи (со сложением токов) в качестве сигнала обратной связи используется ток, который вычитается из тока внешнего входного сигнала.

УСИЛИТЕЛИ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

В усилителе в качестве активного элемента использован биполярный транзистор. Перед тем, как подавать на вход усилителя сигнал, подлежащий усилению, необходимо обеспечить начальный режим работы (статический режим, режим по постоянному току,

режим покоя). Начальный режим работы характеризуется постоянными токами электродов транзистора и напряжениями между этими электродами.

Для характеристики проблемы обеспечения начального режима рассматривают следующие три схемы:

- с фиксированным током базы;
- с коллекторной стабилизацией;
- с эмиттерной стабилизацией.

Схема с фиксированным током базы (рис. 20.9).

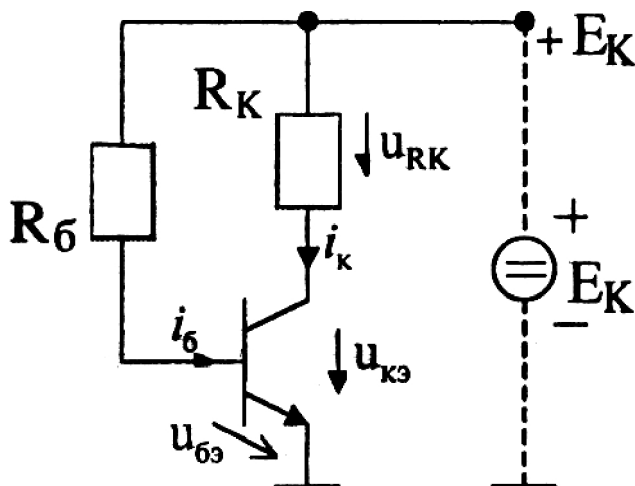


Рис. 20.9. Схема включения транзистора с фиксированным током базы

В соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$i_K \cdot R_K + u_{KЭ} - E_K = 0.$$

Отсюда находим ток коллектора i_K :

$$i_K = -\frac{1}{R_K} \cdot u_{KЭ} + \frac{1}{R_K} \cdot E_K,$$

что соответствует линейной зависимости вида $y = a \cdot x + b$.

Это уравнение описывает так называемую линию нагрузки. Изобразим выходные характеристики транзистора и линию нагрузки (рис. 9.10).

В соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$i_б \cdot R_б + u_{БЭ} - E_K = 0.$$

Отсюда находим ток базы $i_б$:

$$i_б = -\frac{1}{R_б} \cdot u_{БЭ} + \frac{1}{R_б} \cdot E_K.$$

Учитывая, что $u_{БЭ} \ll E_K$, пренебрежем напряжением $u_{БЭ}$. Тогда $i_б \approx \frac{E_K}{R_б}$.

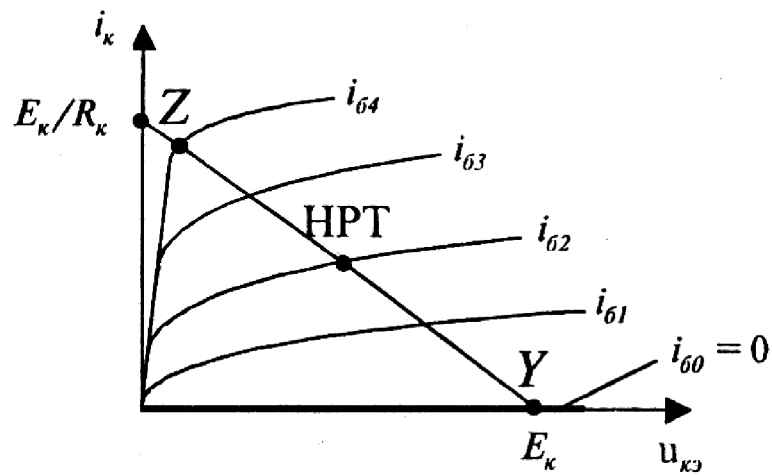


Рис. 20.10. Выходные характеристики транзистора с линией нагрузки

Таким образом, в рассматриваемой схеме ток i_b задается величинами E_k и R_b (ток «фиксирован»). При этом $i_k = \beta_{cm} \cdot i_b + I'_{K0}$.

Пусть $i_b = i_{b2}$. Тогда начальная рабочая точка (НРТ) займет то положение, которое указано на рис. 20.10. Видно, что самое нижнее возможное положение начальной рабочей точки соответствует точке Y (режим отсечки, $i_b = 0$), а самое верхнее положение – точке Z (режим насыщения, $i_b \geq i_{b4}$).

Схему с фиксированным током базы используют редко по следующим причинам:

- при воздействии дестабилизирующих факторов (например, температуры) изменяются величины β_{cm} и I'_{K0} , что изменяет ток $I_{кн}$ и положение начальной рабочей точки;
- для каждого значения β_{cm} необходимо подбирать соответствующее значение R_b , что нежелательно при использовании как дискретных приборов (т. е. приборов, изготовленных не по интегральной технологии), так и интегральных схем.

Схема с коллекторной стабилизацией (рис. 20.11). Эта схема обеспечивает лучшую стабильность начального режима.

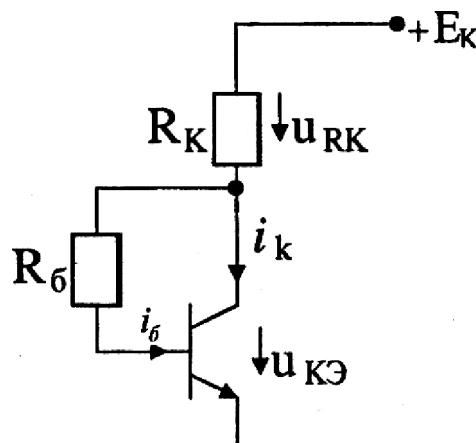


Рис. 20.11. Схема включения транзистора с коллекторной стабилизацией

В схеме имеет место отрицательная обратная связь по напряжению (выход схемы – коллектор транзистора соединен со входом схемы – базой транзистора с помощью резистора R_6). При увеличении тока i_k (например, из-за повышения температуры) начинает увеличиваться напряжение u_{R_k} . Это приведет к уменьшению напряжения $u_{кэ}$ и тока i_6 ($i_6 \approx \frac{u_{кэ}}{R_6}$), что будет препятствовать значительному увеличению тока i_k , т. е. будет осуществляться стабилизация тока коллектора.

Схема с эмиттерной стабилизацией (рис. 20.12). Основная идея, реализованная в схеме, состоит в том, чтобы зафиксировать ток $i_э$ и через это – ток i_k ($i_k \approx i_э$). С указанной целью в цепь эмиттера включают резистор $R_э$ и создают на нем практически постоянное напряжение $u_{R_э}$. При этом оказывается, что:

$$i_э = \frac{u_{R_э}}{R_э} = const.$$

Для создания требуемого напряжения $u_{R_э}$ используют делитель напряжения на резисторах R_1 и R_2 .

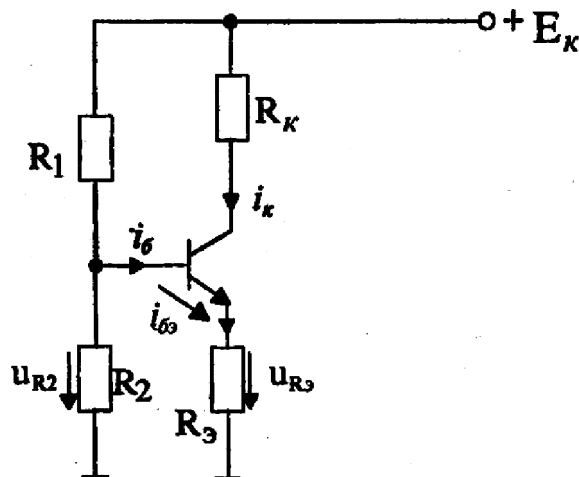


Рис. 20.12. Схема включения транзистора с эмиттерной стабилизацией

Резисторы R_1 и R_2 выбирают несколько малыми, что величина тока i_6 практически не влияет на величину напряжения u_{R_2} . При этом

$$u_{R_2} = E_K \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

В соответствии со вторым законом Кирхгофа $u_{R_э} = u_{R_2} - u_{6э}$.

При воздействии дестабилизирующих факторов величина $u_{6э}$ изменяется мало, поэтому мало изменяется и величина $u_{R_э}$. На практике обычно напряжение $u_{R_э}$ составляет небольшую долю напряжения E_K .

Различают следующие режимы работы транзистора (классы работы): А, АВ, В, С и D. Рассматриваемые RC – усилители обычно работают в режиме А. В режиме А ток коллектора всегда больше нуля ($i_k > 0$). При этом он увеличивается или уменьшается в

зависимости от входного сигнала. В режиме B ток $I_{KH}=0$, поэтому ток коллектора может только увеличиваться. При синусоидальном входном сигнале в цепи коллектора протекают положительные полуволны тока. Режим AB является промежуточным между режимами A и B . В режиме C на вход транзистора подается начальное запирающее напряжение, поэтому в цепи коллектора в каждый период входного сигнала ток протекает в течение времени, меньшего чем половина периода. Режимом D называют ключевой режим работы (транзистор находится или в режиме насыщения, или в режиме отсечки).

Усилители на полевых транзисторах

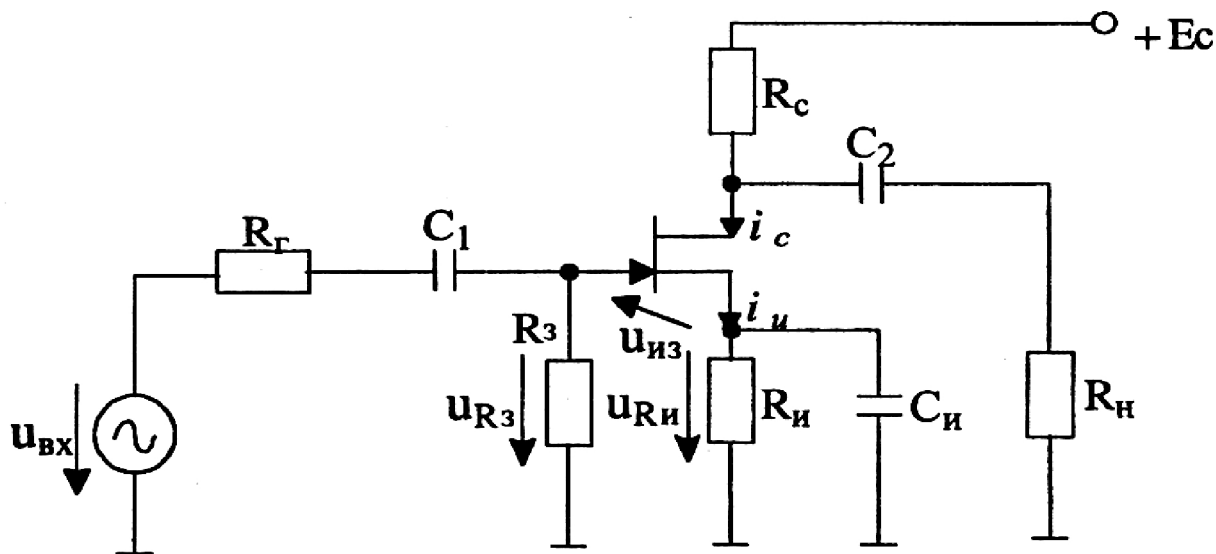


Рис. 20.13. Усилитель на полевом транзисторе

В качестве примера рассмотрим RC -усилитель на полевом транзисторе с p - n -переходом, включенным с общим истоком (рис. 20.13). Используем транзистор с каналом n -типа. Для используемого транзистора начальное напряжение $u_{из}$ должно быть положительным (p - n -переход должен находиться под запирающим напряжением). С целью получения этого напряжения в цепь истока включают резистор R_u , на котором возникает падение напряжения u_{Ru} от протекания по нему начального тока истока $I_{ин}$.

Напряжение u_{Ru} через резистор R_3 передается на затвор. Так как ток затвора полевого транзистора пренебрежительно мал, падение напряжения на резисторе R_3 практически равно нулю, поэтому $u_{из}=u_{Ru}$.

Рассмотренную схему обеспечения начального режима работы называют схемой с автоматическим смещением.

Пусть задан начальный ток стока ($I_{CH} = I_{ин}$) и начальное напряжение $U_{ИЗН}$ между истоком и затвором. Тогда резистор R_u следует выбрать из соотношения

$$R_u = \frac{U_{ИЗН}}{I_{CH}}.$$

Резистор R_3 обычно выбирают порядка 1 МОм.

Рассматриваемая схема обеспечения начального режима работы характеризуется повышенной стабильностью. Если по каким-либо причинам начальный ток стока I_{CH} начнет увеличиваться, то это приведет к увеличению напряжений U_{RI} и $U_{ИЗ}$, что будет препятствовать значительному увеличению тока I_{CH} .

Модуль коэффициента усиления каскада в области средних частот определяется равенством

$$K_U = S \frac{R_C \cdot R_H}{R_C + R_H},$$

где S – статическая крутизна характеристики полевого транзистора, определяемая по справочникам.

Назначение конденсаторов C_1 , C_2 и C_4 аналогично назначению соответствующих конденсаторов RC –усилителя на биполярном транзисторе.

Частотные характеристики рассматриваемого усилителя подобны частотным характеристикам RC –усилителя на биполярном транзисторе.

21. Схемы на основе операционных усилителей

Операционные усилители (ОУ) в настоящее время используются в самых различных электронных устройствах. Их широко применяют как в аналоговых, так и в импульсных устройствах электроники. В то же время существуют и часто используются типовые линейные схемы на основе операционных усилителей.

При создании схем с операционными усилителями используется ряд допущений, принимаемых в предположении, что используемые операционные усилители достаточно близки к идеальным.

Примем следующие допущения:

1. Входное сопротивление ОУ равно бесконечности, токи входных электродов равны нулю ($R_{вх} \rightarrow \infty, i_+ = i_-$).
2. Выходное сопротивление ОУ равно нулю, т. е. ОУ со стороны выхода является идеальным источником напряжения ($R_{вых}=0$).
3. Коэффициент усиления по напряжению (коэффициент усиления дифференциального сигнала) равен бесконечности, а дифференциальный сигнал в режиме усиления равен нулю (при этом не допускается закорачивания выводов ОУ).
4. В режиме насыщения напряжение на выходе равно по модулю напряжения питания, а знак определяется полярностью входного напряжения.
5. Синфазный сигнал не действует на ОУ.
6. Напряжение смещения нуля равно нулю.

Инвертирующий усилитель на основе ОУ

Рассмотрим схему инвертирующего усилителя (рис. 21.1), из которого видно, что в ней действует параллельная обратная связь по напряжению.

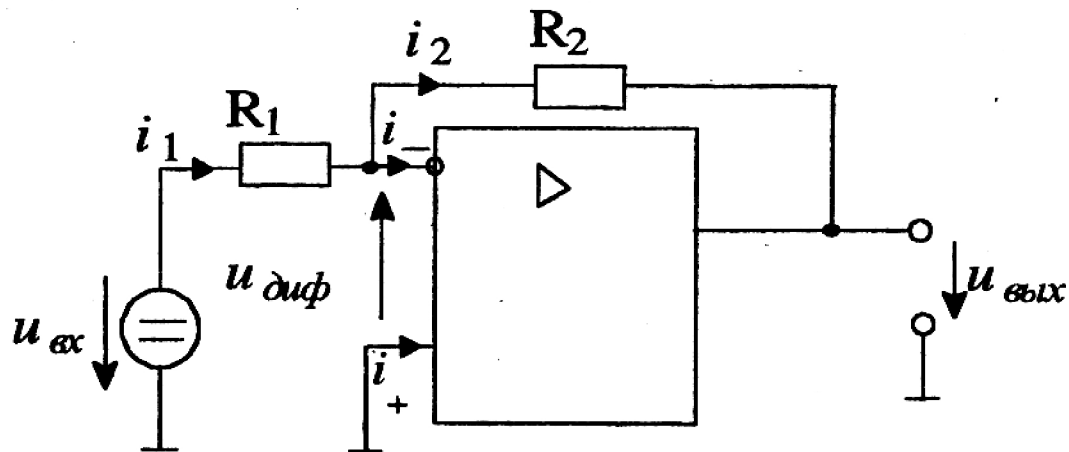


Рис. 21.1. Инвертирующий усилитель с параллельной обратной связью по напряжению

Так как $i = 0$, то в соответствии с первым законом Кирхгофа $i_1 = i_2$.

Если ОУ работает в режиме усиления, то $u_{диф} = 0$. В соответствии с этим на основании второго закона Кирхгофа получим

$$i_1 = \frac{u_{вх}}{R_1}, \quad i_2 = -\frac{u_{вых}}{R_2}.$$

Учитывая, что $i_1 = i_2$, получаем

$$u_{вых} = -u_{вх} \frac{R_2}{R_1}.$$

Например, если $R_1=1\text{ кОм}$, $R_2=10\text{ кОм}$, тогда $u_{вых} = -10 \cdot u_{вх}$.

Для уменьшения влияния входных токов ОУ на выходное напряжение в цепь неинвертирующего входа включают резистор R_3 (рис. 21.2), которое определяется из выражения

$$R_3 = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Входное сопротивление инвертирующего усилителя на низких частотах значительно ниже собственного входного сопротивления ОУ. Это подтверждает вывод о том, что параллельная отрицательная обратная связь уменьшает входное сопротивление.

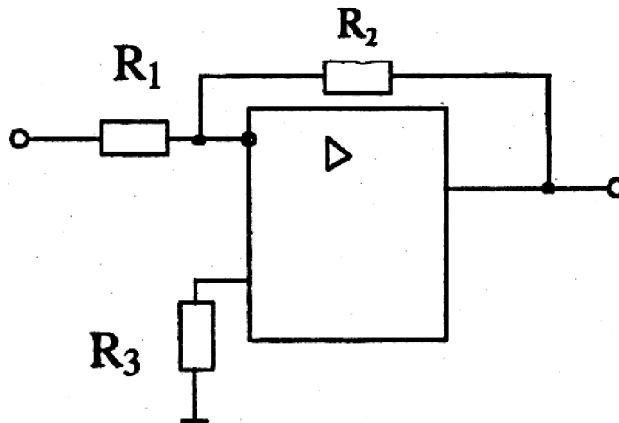


Рис. 21.2. Операционный усилитель с обратной связью

Учитывая, что $u_{диф} \approx 0$, входное сопротивление усилителя на низких частотах приблизительно равно R_1 .

Выходное сопротивление инвертирующего усилителя на низких частотах $R_{вых.ос}$ существенно меньше выходного сопротивления на низких частотах $R_{вых}$ собственно операционного усилителя. Это является следствием действия отрицательной обратной связи по напряжению.

Можно показать, что

$$R_{вых.ос} = \frac{R_{вых}}{1 + K \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}},$$

где K – коэффициент усиления по напряжению ОУ.

Неинвертирующий усилитель на основе ОУ

Рассмотрим схему неинвертирующего усилителя (рис. 21.3), где имеет место последовательная связь по напряжению.

В соответствии с ранее принятыми допущениями входные токи ОУ равны нулю, т. е. $i_- = i_+ = 0$ и, следовательно, $i_1 = i_2$. Если ОУ работает в режиме усиления, тогда $u_{диф} = 0$.

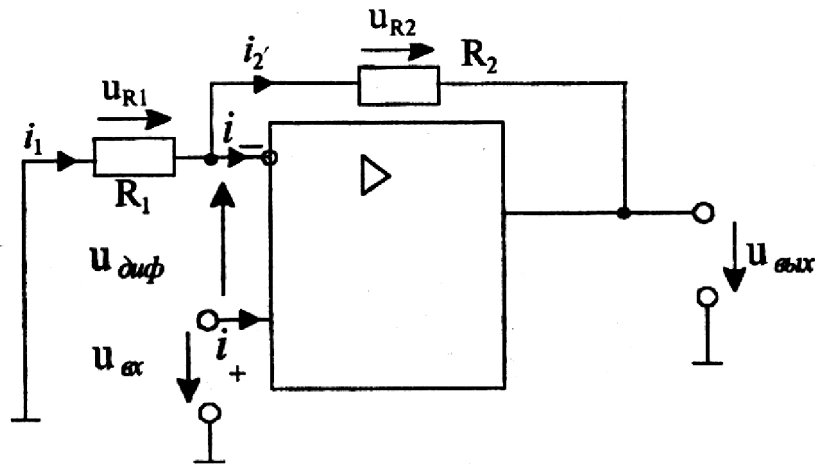


Рис. 21.3. Неинвертирующий усилитель на основе ОУ с обратной связью

На основании второго закона Кирхгофа получаем

$$u_{R1} = -u_{вх}, \quad u_{R2} = u_{вх} - u_{вых}.$$

Неинвертирующий усилитель характеризуется коэффициентом усиления по напряжению

$$K_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

Коэффициент усиления усилителя, охваченный обратной связью, определяется выражением

$$K_{u.ос} = \frac{K}{1 + K \cdot \beta}.$$

При $K \rightarrow \infty$

$$K_{u.ос} = \frac{1}{\beta}.$$

Коэффициент β определяется выражением

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Таким образом, при $K \rightarrow \infty$

$$K_{u.ос} = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

Пусть, например, $R_1 = 2 \text{ кОм}$, $R_2 = 4 \text{ кОм}$ и $u_{вх} = 2 \text{ В}$.

Тогда

$$u_{вых} = 2 \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3} \right) = 6 \text{ В}.$$

Входное сопротивление неинвертирующего усилителя на ОУ с обратной связью

$$R_{ex.oc} = R_{ex} \cdot \left(1 + K \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right),$$

причем при $K \rightarrow \infty$ $R_{ex.oc} \rightarrow \infty$.

На входах операционного усилителя, использующегося в неинвертирующем усилителе, имеется синфазный сигнал, равный напряжению u_{ex} . Это недостаток такого усилителя. В инвертирующем усилителе синфазный сигнал отсутствует.

Повторитель напряжения на основе ОУ

Схема повторителя (рис. 21.4) легко может быть получена из схемы неинвертирующего усилителя при $R_1 \rightarrow \infty$, $R_2 \rightarrow 0$. Здесь предполагается, что операционный усилитель работает в режиме усиления ($u_{диф} \approx 0$). Используя второй закон Кирхгофа, получаем $u_{вых} = u_{ex}$.

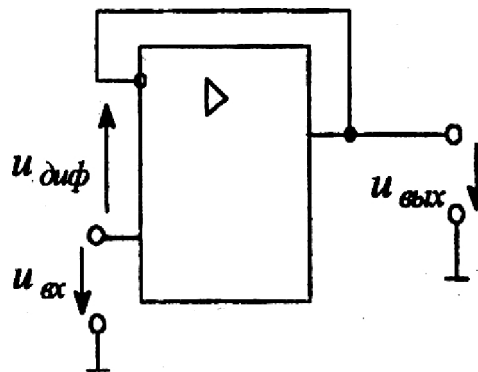


Рис. 21.4. Повторитель напряжения на основе ОУ

Сумматор напряжения (инвертирующий сумматор)

Рассмотрим схему сумматора, приведенную на рис. 21.5.

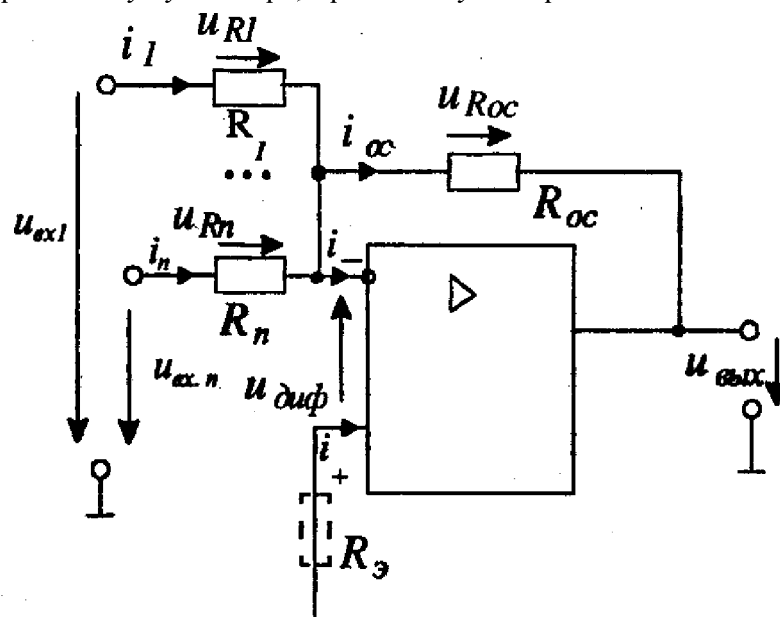


Рис. 21.5. Сумматор напряжения (инвертирующий сумматор)

Предположим, что операционный усилитель работает в режиме усиления, тогда

$u_{диф} \approx 0$. Учитывая, что $i_- = i_+ = 0$, получим $\sum_{j=1}^n i_j = i_{oc}$. При $u_{диф} \approx 0$ получим $u_{Rj} = u_{exj}$, $j = 1, \dots, n$; $u_{Roc} = u_{вых}$. На основании этих выражений после несложных преобразований получаем

$$u_{вых} = -R_{oc} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{u_{ex} \cdot j}{R_j}.$$

Для уменьшения влияния входных токов ОУ в цепь неинвертирующего входа включают резистор с сопротивлением

$$R_9 = R_1 // R_2 // \dots // R_n // R_{oc}.$$

Вычитающий усилитель (усилитель с дифференциальным входом)

В вычитающем усилителе (рис. 21.6) один входной сигнал подается на инвертирующий вход, а второй – на неинвертирующий.

Предположим, что ОУ работает в линейном режиме. Тогда все устройство можно считать линейным и для анализа принцип суперпозиции (наложения).

Если $u_{ex2} = 0$, тогда соответствующее выходное напряжение $u'_{вых}$ будет определяться выражением, соответствующим инвертирующему усилителю:

$$u'_{вых} = -u_{ex1} \frac{R_2}{R_1}.$$

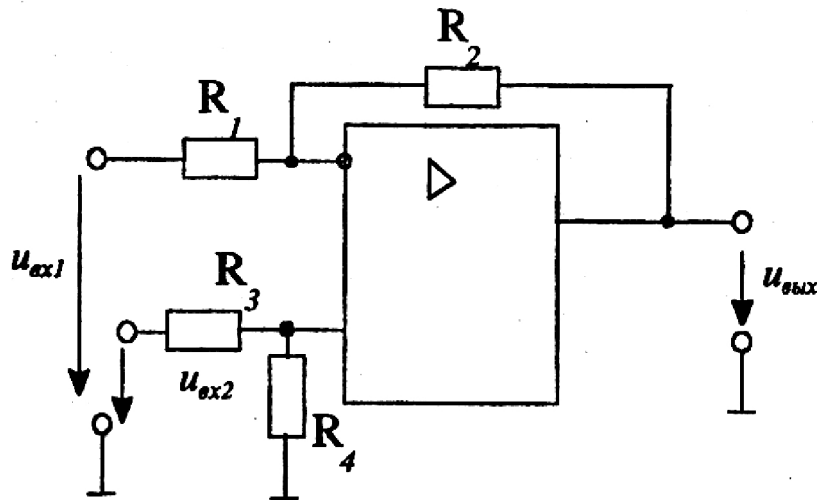


Рис. 21.6. Вычислительный усилитель с дифференциальным входом

Если $u_{ex1} = 0$, определим напряжение на выходе $u''_{вых}$. Для оценки воздействия напряжения u_{ex2} целесообразно на основе теоремы об эквивалентном генераторе преобразование цепи, подключенной к неинвертирующему входу (рис. 21.7).

Как следует из теоремы,

$$u_{экр} = u_{ex2} \frac{R_4}{R_3 + R_4}, \quad R_{экр} = R_3 // R_4 = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4}.$$

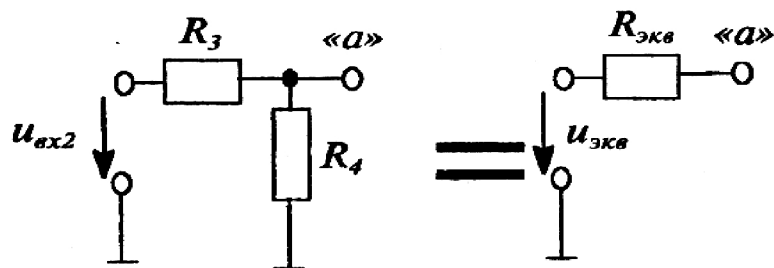


Рис. 21.7

В соответствии с принципом суперпозиции, общее напряжение на выходе $u_{\text{вых}}$ определяется из выражения

$$u_{\text{вых}} = u''_{\text{вых}} + u'_{\text{вых}} = u_{\text{вх}2} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - u_{\text{вх}1} \frac{R_2}{R_1},$$

при $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$

$$u_{\text{вых}} = u_{\text{вх}2} - u_{\text{вх}1}.$$

Схемы с диодами и стабилитронами на основе ОУ

Рассматриваемые схемы являются нелинейными, так как содержат нелинейные элементы – диоды и стабилитроны. Однако такие схемы часто рассматривают как линейные, считая диоды и стабилитроны идеальными и заменяя открытые диоды и стабилитроны закоротками, запертые диоды и стабилитроны – разрывами, а стабилитроны, работающие в режиме пробоя, – источниками напряжения.

При использовании подобных способов линеаризации нелинейных схем основная проблема состоит в том, чтобы определить, в каком режиме работает каждый нелинейный элемент.

Для примера выполним анализ схемы на рис. 21.8, предполагая, что диоды – идеальные. Пусть вначале $u_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$. Если диод D1 открыт (заменяем его закороткой), а диод D2 – закрыт (заменяем его разрывом), то получим эквивалентную схему, приведенную на рис. 21.9.

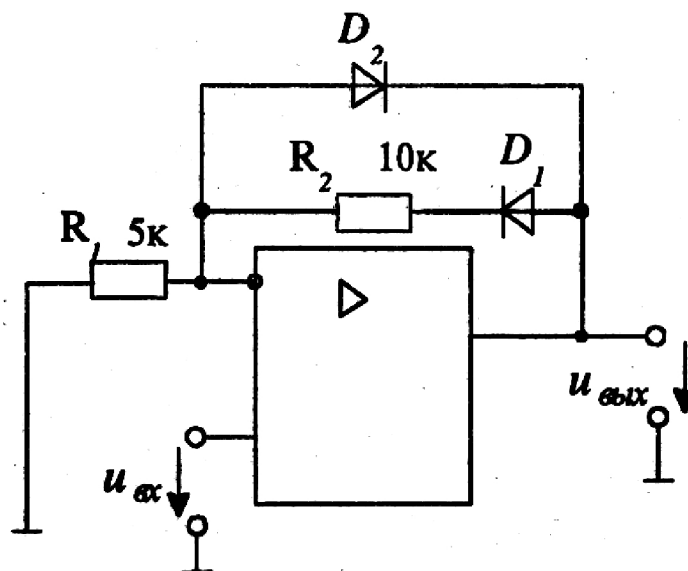


Рис. 10.8. Схема усилителя на ОУ с диодами

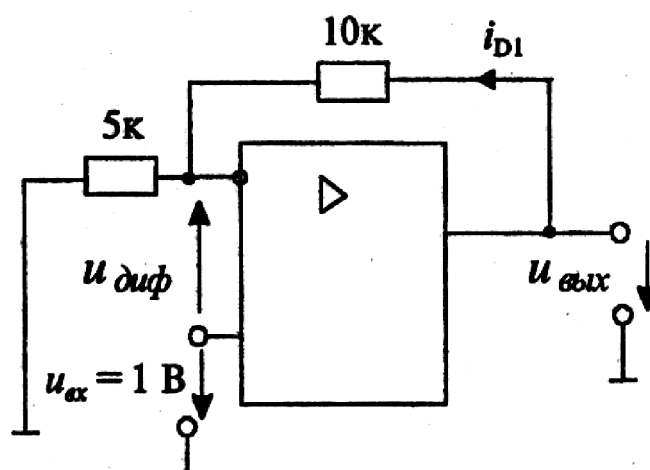


Рис. 21.9. Эквивалентная схема усилителя на ОУ

Из схемы на рис. 21.9 следует, что

$$u_{\text{вых}} = u_{\text{вх}} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = 3B.$$

Проверим правильность сделанного предположения, для чего определим ток i_{D1} диода D1 и напряжение u_{D2} диода D2. Используя допущение о том, что $u_{\text{диф}} = 0$, получаем $u_{D2} = -2B$ и $i_{D1} = 0,2 \text{ мА}$. Так как напряжение на диоде D2 отрицательное, а ток через диод D1 положителен, можно утверждать, что предположение было правильным.

Пусть теперь $u_{\text{вх}} = -1B$. Предположим, что диод D1 закрыт, а диод D2 открыт. Тогда получим эквивалентную схему, приведенную на рис. 21.10, из которой получаем

$$u_{\text{вых}} = u_{\text{вх}} \left(1 + \frac{0}{R_1} \right) = -1B.$$

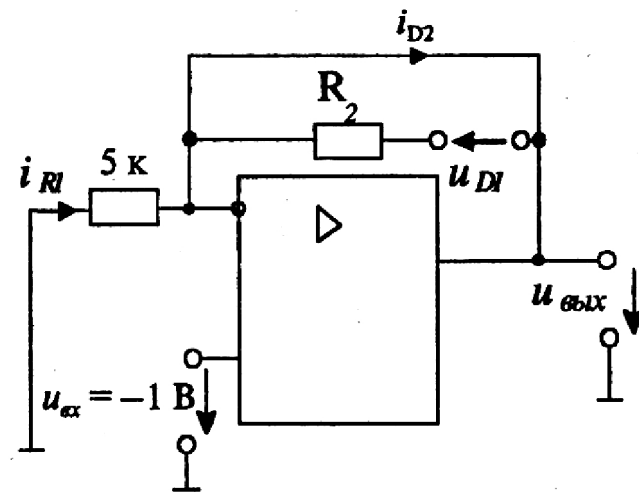


Рис. 21.10. Эквивалентная схема усилителя с обратной связью

Для проверки правильности сделанного предположения определим i_{D2} :

$$i_{D2} = i_{R1} = \frac{-u_{\text{вх}}}{R_1} = \frac{1}{5 \cdot 10^3} = 0,2 \text{ мА}.$$

Очевидно, что $u_{D1} = 0$. Полученные результаты позволяют утверждать, что предположение было правильным.

22. Усилители

Усилитель называют усилителем постоянного тока (УПТ), если он может усиливать постоянные и медленно изменяющиеся сигналы. Такой усилитель можно использовать и для усиления переменных сигналов. К таким усилителям можно отнести и операционные усилители.

Для того, чтобы постоянные или медленно изменяющиеся сигналы могли быть переданы с входа усилителя на его выход, должны использоваться только гальванические связи между отдельными частями усилителя или эти сигналы должны быть преобразованы в переменные. Полученные переменные сигналы могут быть усилены с помощью усилителей переменного тока, в которых гальванические связи разорваны с помощью конденсаторов или трансформаторов. После усиления переменные сигналы должны быть преобразованы в постоянные или медленно изменяющиеся.

Характерным свойством УПТ является дрейф нуля. Под дрейфом нуля понимают самопроизвольное изменение выходного напряжения при неизменном нулевом входном под действием влияния внешней среды (изменений температуры, питающего напряжения, старения электронных элементов).

Основными методами снижения дрейфа являются жесткая стабилизация источников питания усилителей, использование отрицательных обратных связей, применение балансных компенсационных схем УПТ, использование элементов с нелинейной зависимостью параметров от температуры.

Для устранения отмеченных недостатков УПТ строят в виде параллельно-балансных каскадов, представляющих собой сбалансированный мост, который можно назвать дифференциальным усилителем.

Дифференциальный усилитель на биполярных транзисторах

Схема дифференциального усилителя представлена на рис. 22.1.

Основная идея, реализованная в дифференциальном каскаде, состоит в использовании в одном целом двух совершенно одинаковых половин. Это приводит к тому, что выходное напряжение $u_{вых.диф}$ очень слабо зависит от входного синфазного напряжения и практически определяется только $u_{вх.диф}$.

Дифференциальное входное напряжение определяется выражением

$$u_{вх.диф} = u_{вх2} - u_{вх1}.$$

Коэффициент усиления по напряжению для дифференциального сигнала $K_{диф}$ описывается выражением

$$K_{диф} = \frac{u_{вых.диф}}{u_{вх.диф}} = \frac{\beta \cdot R_k}{(\beta + 1) \cdot r_{э}} \approx \frac{R_k}{r_{э}}.$$

Как известно, при увеличении начального тока в цепи эмиттера величина $r_{э}$ уменьшается, а при уменьшении увеличивается. Поэтому при увеличении тока i_0 коэффициент $K_{диф}$ увеличивается. Это позволяет изменять коэффициент усиления, изменяя начальный режим работы усилителя.

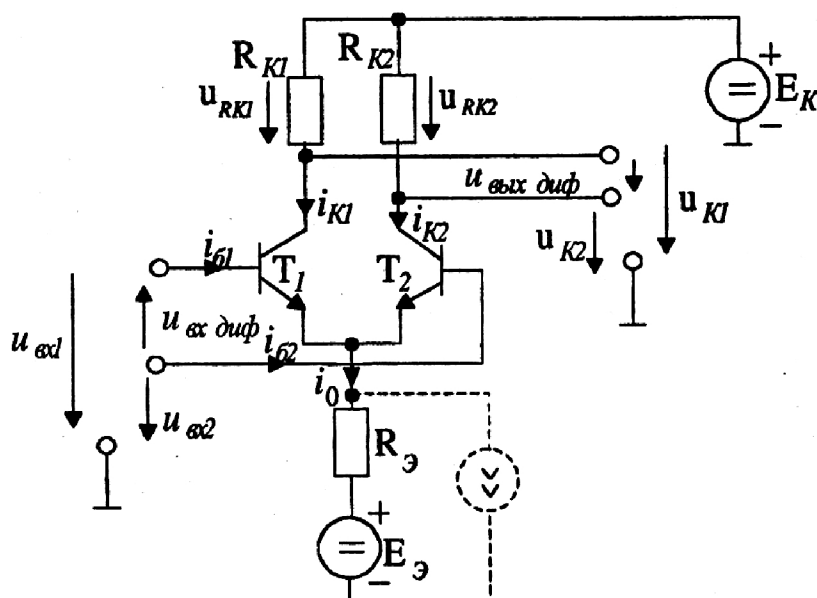


Рис. 22.1. Дифференциальный усилитель

Усилитель постоянного тока с модуляцией и демодуляцией (усилитель типа МДМ)

В усилителях рассматриваемого типа входной постоянный или медленно изменяющийся сигнал преобразуется (модулируется) в переменный повышенной частоты. Полученный сигнал усиливается с помощью усилителя переменного напряжения, а затем вновь преобразуется (демодулируется) в постоянный или медленно изменяющийся. Частота переменного напряжения часто составляет десятки кГц.

Структурная схема усилителя типа МДМ приведена на рис. 22.2.

Модулятор преобразует постоянный или медленно изменяющийся входной сигнал в переменное напряжение с частотой f_{on} , определяемой генератором опорного напряжения, и амплитудой, пропорциональной входному сигналу. Переменное напряжение u_m с выхода модулятора поступает на вход низкочастотного усилителя переменного тока. Демодулятор – фазочувствительный выпрямитель – преобразует переменное напряжение в постоянное, причем величина постоянного напряжения пропорциональна амплитуде переменного напряжения, а следовательно, пропорциональна входному сигналу.

Временные диаграммы указанных на схеме напряжений, поясняющих работу усилителя, приведены на рис. 22.3.

Вследствие того, что в усилителях типа МДМ разорваны гальванические связи между каскадами, удается достичь высокого качества усиления, так как дрейф нуля в данной схеме отсутствует. Такие усилители могут использоваться в высокоточных (прецизионных) устройствах.

Еще одним достоинством усилителей типа МДМ является возможность изолировать с помощью трансформатора входную и выходную части. Изолирующие усилители широко используются, например, в медицинской электронике.

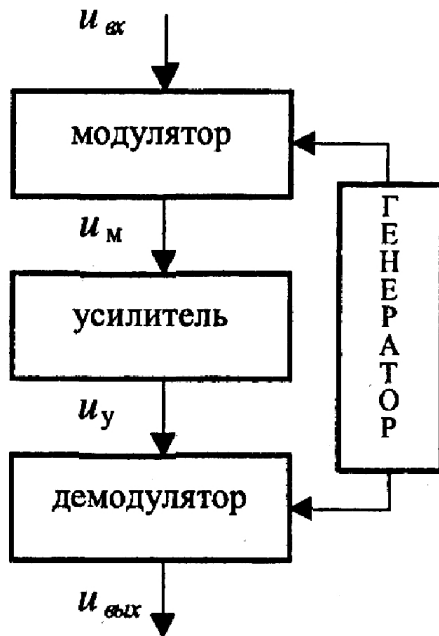


Рис. 22.2. Структура усилителя с МДМ

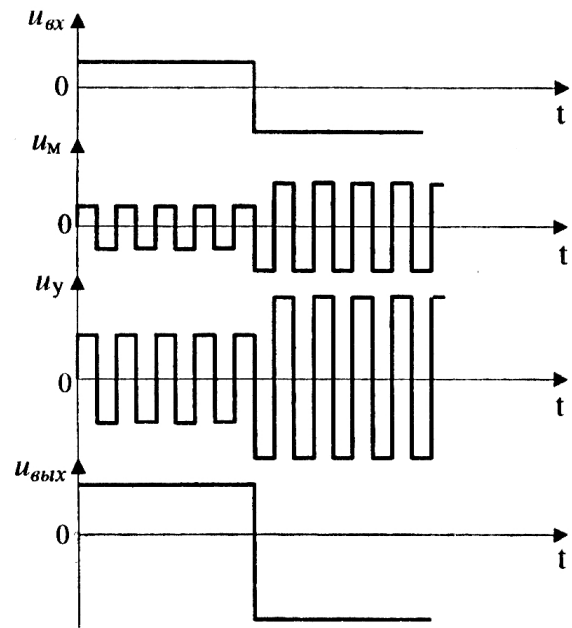


Рис. 22.3. Временные диаграммы напряжений в усилителе

УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

(мощные выходные усилители)

Усилителем мощности называют усилитель, предназначенный для обеспечения заданной мощности нагрузки P_n при заданном сопротивлении нагрузки R_n . Усилитель мощности является примером устройства силовой электроники. Основная цель таких устройств состоит в том, чтобы отдать нагрузке заданную мощность.

Уровень нелинейных искажений и КПД усилителя мощности существенно зависят от начального режима работы, причем нелинейные искажения обуславливаются нелинейностью не только входных, но и выходных характеристик транзисторов, так как они работают в режиме большого сигнала. Минимально возможный уровень нелинейных искажений можно обеспечить в режиме класса A , а максимально возможный КПД – в режиме классов B или AB .

Усилители мощности бывают одноктактные и двухтактные, причем первые работают в режиме класса A , а вторые – в режиме классов B или AB . Одноктактные усилители мощности применяются при относительно малых выходных мощностях (единицы ватт).

В соответствии с требованием обеспечить заданную мощность нагрузки P_n при разработке усилителя мощности должен быть решен вопрос о соответствующем выборе напряжения усилителя E . Предположим, что усилитель с указанным напряжением питания может создать на нагрузке синусоидальный сигнал с максимально возможной амплитудой напряжения

$$U_m = \frac{E}{2}.$$

Тогда максимально возможная нагрузки $P_{n.макс}$ определится выражением

$$P_{H.MAKC} = \left(\frac{U_m}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot \frac{1}{R_H} = \frac{U_m^2}{2 \cdot R_H} = \frac{E^2}{8 \cdot R_H},$$

откуда

$$E = 2 \cdot \sqrt{P_{H.MAKC} \cdot R_H \cdot 2}.$$

Для согласования усилителя и нагрузки часто используют трансформатор (рис. 22.4). Через W_1 и W_2 обозначено соответственно количество витков первичной и вторичной обмоток трансформатора, а через $u_{вых}$ и $R_{вых}$ – соответственно выходное напряжение и выходное сопротивление усилителя.

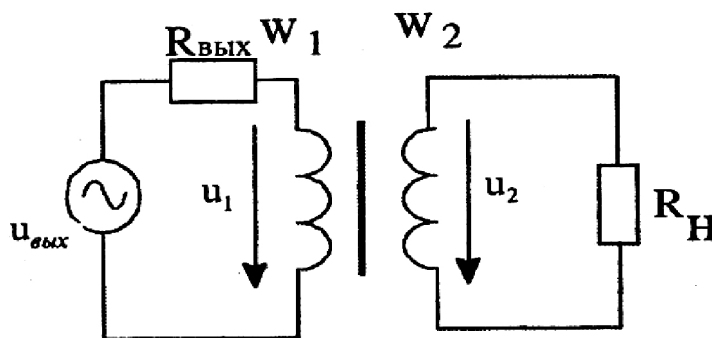


Рис. 22.4. Трансформатор согласования усилителя и нагрузки

При определении мощности нагрузки эту схему можно заменить эквивалентной схемой, приведенной на рис. 11.5. В ней через R'_H обозначено приведенное сопротивление нагрузки

$$R'_H = \frac{R_H}{n^2},$$

где n – коэффициент трансформации ($n = W_2/W_1$).

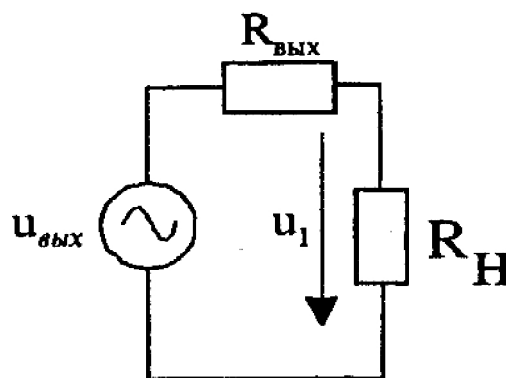


Рис. 22.5. Эквивалентная схема согласования усилителя с нагрузкой

Изменяя коэффициент трансформации, можно добиться необходимого согласования усилителя и нагрузки, причем известно, что максимальная мощность в нагрузку отдается при $R_{вых} = R'_H$. Отсюда определим оптимальное значение коэффициента трансформации:

$$n_{om} = \sqrt{\frac{R_H}{R_{блх}}}.$$

Трансформаторные усилители мощности

Рассмотрим одноконтурный усилитель мощности, в котором трансформатор включен по схеме с ОЭ (рис. 22.6).

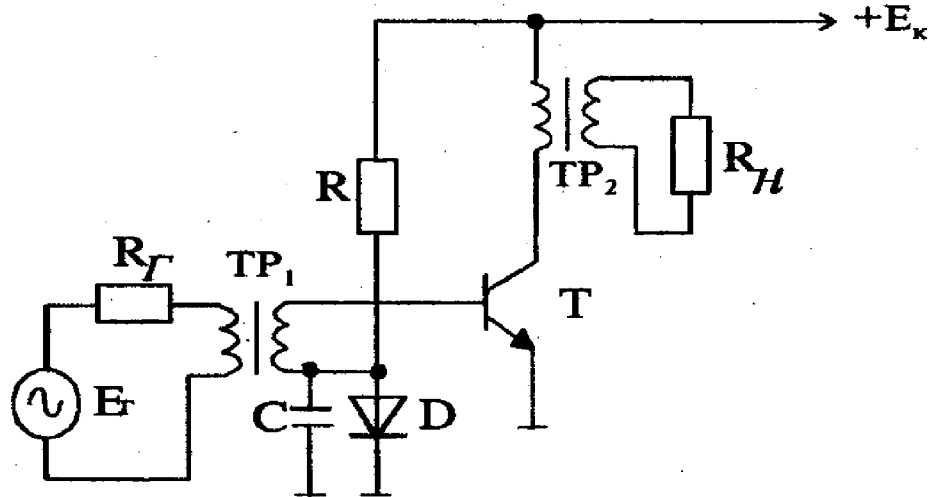


Рис. 22.6. Трансформаторный усилитель мощности

Трансформаторы TP_1 и TP_2 предназначены для согласования нагрузки и выходного сопротивления усилителя и входного сопротивления усилителя с сопротивлением источника входного сигнала соответственно.

Элементы R и D обеспечивают начальный режим работы транзистора, а элемент C увеличивает переменную составляющую, поступающую на транзистор T .

Мощность, потребляемая усилителем от источника питания $P_{потр} = E_K \cdot I_{кн}$.
Следовательно, КПД усилителя

$$\eta = \frac{P_H}{P_{ПOTP}}.$$

Для идеального усилителя теоретический КПД усилителя $\eta_{TEOP} = 0,5$.
Реальный же КПД $\eta_{PEAJI} = 0,3 \div 0,35$.

Рассмотрим двухтактный усилитель мощности (рис. 22.7). Транзисторы могут быть включены по схеме либо с ОЭ (рис. 22.7,а), либо с ОБ (рис. 22.7,б).

Обе схемы могут работать в режиме класса B (резисторы R_1 и R_2 обеспечивают соответствующий начальный режим работы транзисторов).

Двухтактный усилитель можно рассматривать как две независимые схемы, работающие поочередно, каждая в течение полупериода входного сигнала (рис. 22.8).

Средний ток (постоянная составляющая) каждого из транзисторов с учетом обратного тока I_{k0}

$$I_{cpT1} = I_{cpT2} = \frac{1}{\pi} I_{km} + I_{k0}.$$

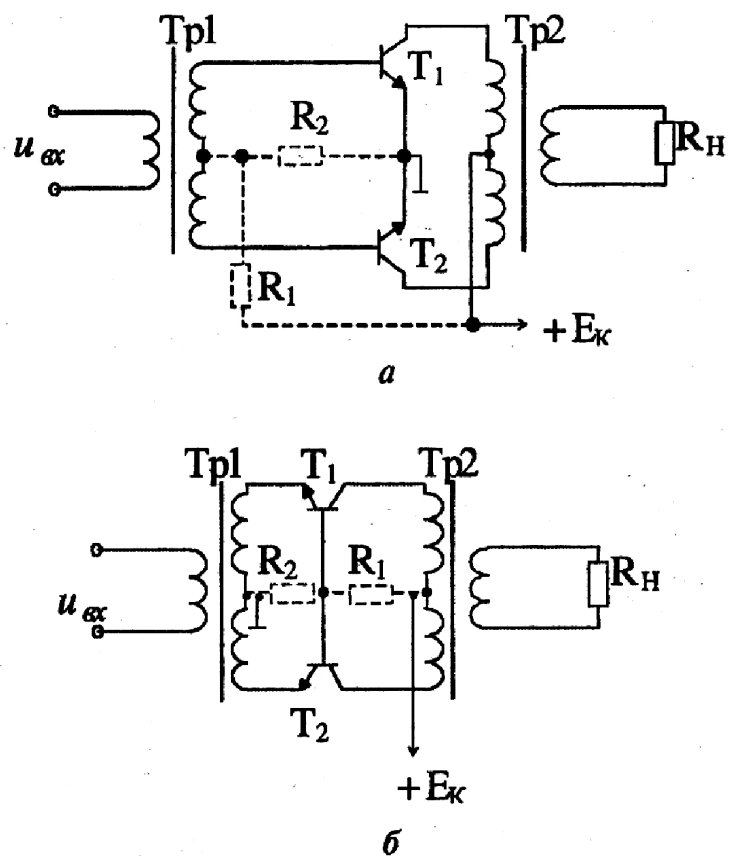


Рис. 22.7. Двухтактный усилитель мощности

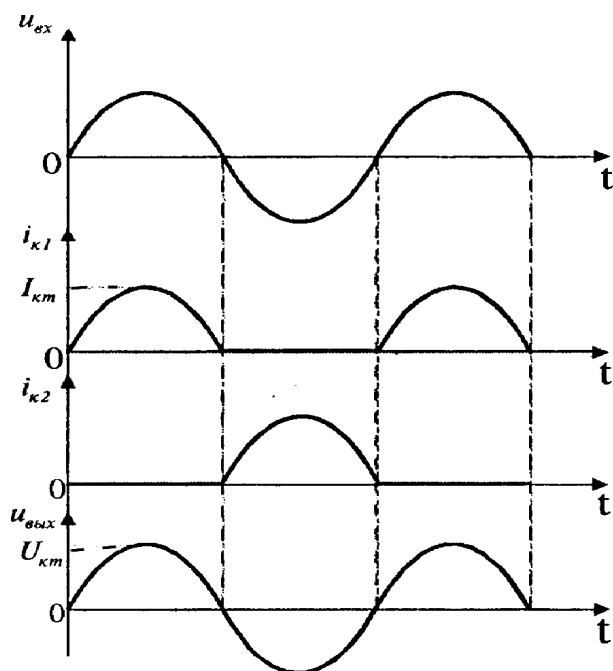


Рис. 22.8. Временные диаграммы двухтактного усилителя класса В

Коэффициент полезного действия двухтактного усилителя мощности класса В

$$\eta = \frac{P_H}{P_{ПОТР}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{U_{km} \cdot I_{km}}{E_k \cdot I_1} \cdot \eta_{TP}.$$

Для идеального усилителя $U_{KT} = E_k$, $I_{KT} = I_1$, $\eta_{TP} = 1$, а следовательно, теоретический КПД $\eta_{TEOP} = \frac{\pi}{4} \approx 0,78$. Реальный же КПД составляет $0,6 \div 0,7$.

Бестрансформаторные усилители мощности

В настоящее время наибольшее распространение находят бестрансформаторные усилители мощности. Рассмотрим двухтактный усилитель мощности на биполярных транзисторах различного типа проводимости (комплементарный эмиттерный повторитель, усилитель с дополнительной симметрией) (рис. 22.9). Транзисторы усилителя работают в режиме класса В. При поступлении на вход усилителя положительной полуволны напряжения $u_{вх}$ транзистор T_1 работает в режиме усиления, а транзистор T_2 – в режиме отсечки. При поступлении отрицательной полуволны транзисторы меняются ролями.

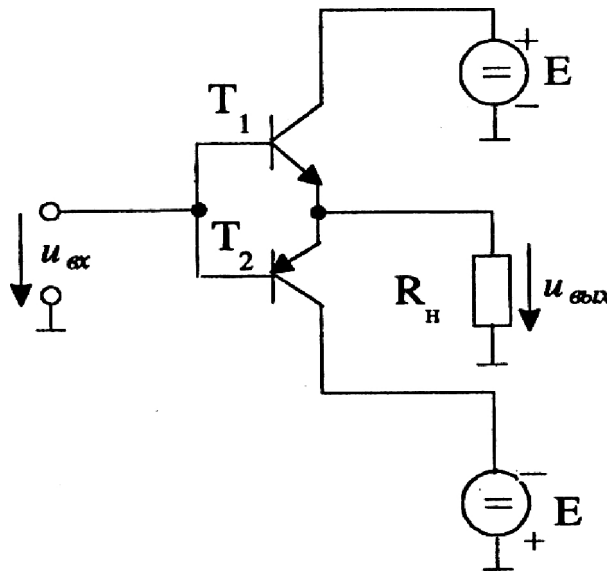


Рис. 11.9. Бестрансформаторный двухтактный усилитель мощности

Максимально возможная мощность нагрузки определяется выражением

$$P_{н.макс} = \left(\frac{U_m}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot \frac{1}{R_H} = \frac{E^2}{2 \cdot R_H}.$$

При максимальной мощности нагрузки усилитель потребляет от источников питания мощность, определяемую выражением

$$P_{потр.макс} = \frac{2 \cdot E^2}{\pi \cdot R_H}.$$

Отсюда получаем максимально возможный коэффициент полезного действия усилителя

$$\eta_{\text{макс}} = \frac{P_{\text{н.макс}}}{P_{\text{потр.макс}}} = \frac{\pi}{4} \approx 0,78.$$

Для уменьшения нелинейных искажений обеспечивают некоторое начальное смещение на входах транзисторов и тем самым переводят их в режим класса АВ (рис. 22.10). При этом коэффициент полезного действия несколько уменьшается.

Рассмотрим двухтактный усилитель мощности с операционным усилителем (рис. 22.11). В схеме использована общая отрицательная обратная связь (резисторы R_1 и R_2), охватывающая оба каскада (на операционном усилителе и на биполярных транзисторах), благодаря которой схема создает настолько малые нелинейные искажения, что часто не требует дополнительных цепей смещения для каскада на транзисторах T_1 и T_2 .

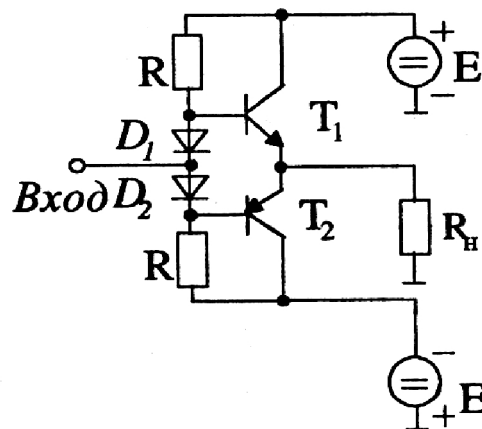


Рис. 22.10. Двухтактный усилитель АВ-класса

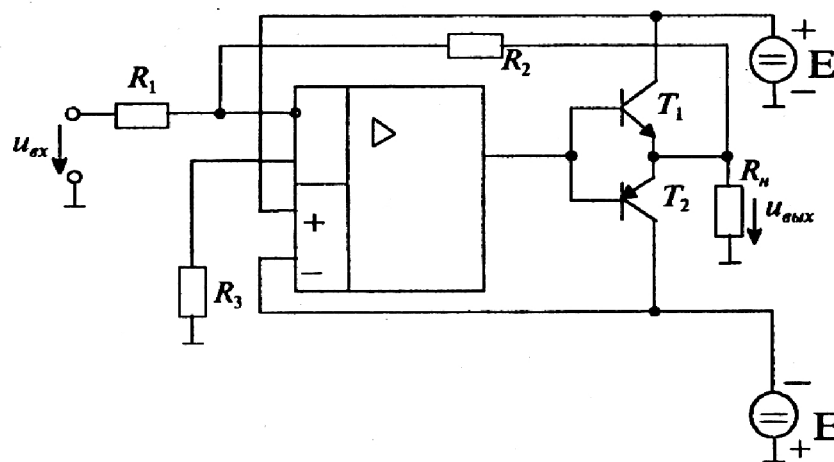


Рис. 22.11. Двухтактный усилитель мощности с операционным усилителем

Поскольку напряжение на нагрузке R_H примерно равно напряжению на выходе ОУ, то мощность на выходе всего усилителя ограничивается выходным напряжением ОУ.

23. Электронные фильтры

Фильтром называют устройство, которое передает (пропускает) синусоидальные сигналы в одном определенном диапазоне частот (в полосе пропускания) и не передает (задерживает) их в остальном диапазоне частот (в полосе задерживания). Фильтры используют для передачи не только синусоидальных сигналов, но, определяя полосы пропускания и задерживания, ориентируются именно на синусоидальные сигналы. Зная, как фильтр передает синусоидальные сигналы, обычно достаточно легко определить, как он будет передавать сигналы и другой формы.

В устройствах электроники, широко использующих фильтры, различают аналоговые и цифровые фильтры. В аналоговых фильтрах обрабатываемые сигналы не преобразуют в цифровую форму, а в цифровых фильтрах перед обработкой сигналов осуществляют такое преобразование.

Аналоговые фильтры строят на основе как пассивных элементов (конденсаторов, катушек индуктивности, резисторов), так и активных элементов (транзисторов, операционных усилителей). Для аналоговой фильтрации широко используют также электромеханические фильтры: пьезоэлектрические и механические. В пьезоэлектрических фильтрах используют естественный и искусственный кварц, а также пьезокерамику. Основу механического фильтра составляет то или иное механическое устройство.

Важно различать требования, предъявляемые к фильтрам силовой и информативной (информационной) электроники. Фильтры силовой электроники должны иметь как можно больший коэффициент полезного действия. Для них очень важной является проблема уменьшения габаритных размеров. Такие фильтры строятся на основе только пассивных элементов. К фильтрам силовой электроники относятся сглаживающие фильтры выпрямителей, проходные фильтры силовых трансформаторов и т. д.

Фильтры информативной электроники чаще разрабатывают при использовании активных элементов. При этом широко используют операционные усилители.

Фильтры, содержащие активные элементы, называют активными. В современных конструкциях фильтров обычно не используют катушки индуктивности из-за их больших габаритов и высокой трудоемкости изготовления. Поэтому активные фильтры могут быть изготовлены с применением технологии интегральных микросхем. Нередко активные фильтры оказываются дешевле соответствующих фильтров на пассивных элементах и занимают меньшие объемы. Активные фильтры способны усиливать сигнал, лежащий в полосе пропускания. Во многих случаях их достаточно легко настроить.

К недостаткам активных фильтров можно отнести:

- использование источника питания;
- невозможность работы на таких высоких частотах, на которых используемые операционные усилители уже не способны усиливать сигнал.

Классификация фильтров по виду их амплитудно-частотных характеристик

Фильтры нижних частот. Для фильтров нижних частот (ФНЧ) характерно то, что входные сигналы низких частот, начиная с постоянных сигналов, передаются на выход, а сигналы высоких частот задерживаются. На рис. 23.1,а показана характеристика идеального (не реализуемого на практике) фильтра (ее иногда называют характеристикой типа «кирпичная стена»). На других рисунках представлены характеристики реальных фильтров.

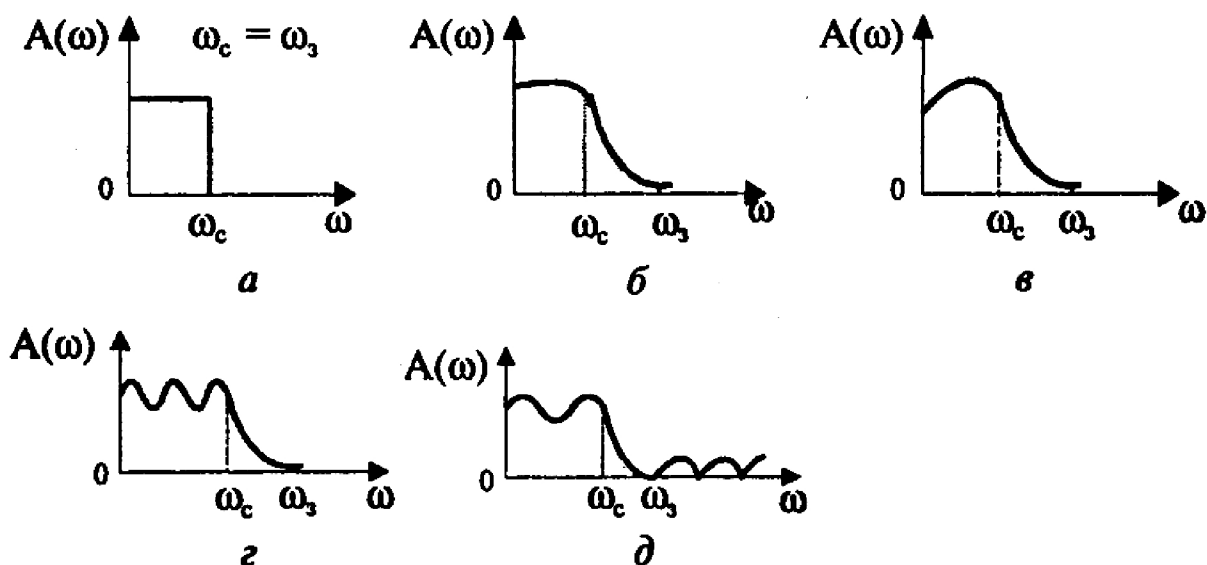


Рис. 23.1. Амплитудно-частотные характеристики фильтров нижних частот

Полоса пропускания лежит в пределах от нулевой частоты до частоты среза ω_c . Обычно частоту среза определяют как частоту, на которой величина $A(\omega)$ равна 0,707 от максимального значения (т. е. меньше максимального значения на 3 дБ).

Полоса задерживания (подавления) начинается от частоты задерживания $\omega_з$ и продолжается до бесконечности. В ряде случаев частоту задерживания определяют как частоту, на которой величина $A(\omega)$ меньше максимального значения на 40 дБ (т. е. меньше в 100 раз).

Между полосами пропускания и задерживания у реальных фильтров расположена переходная полоса. У идеального фильтра переходная частота отсутствует.

Фильтры верхних частот. Фильтр верхних частот характерен тем, что он пропускает сигналы верхних и задерживает сигналы нижних частот.

На рис. 23.2,а приведена идеальная (нереализуемая) амплитудно-частотная характеристика фильтра нижних частот, а на рис. 23.2,б – одна из типичных реальных. Через ω_c и $\omega_з$ обозначены частоты среза и задерживания.

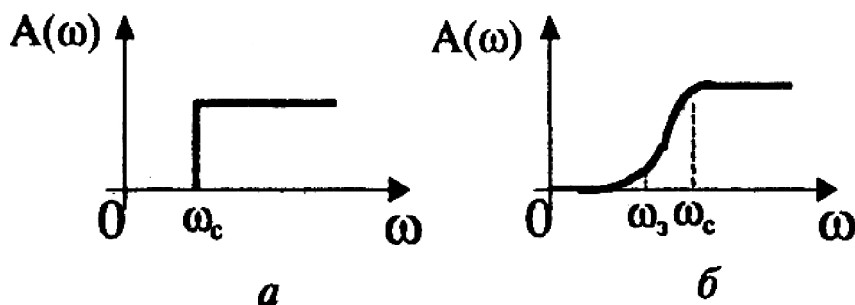


Рис. 23.2. Амплитудно-частотные характеристики фильтров верхних частот

Полосовые фильтры (полосно-пропускающие). Полосовой фильтр пропускает сигналы одной полосы частот, расположенной в некоторой внутренней части оси частот. Сигналы с частотами вне этой полосы фильтр задерживает.

На рис. 23.3,а приведена амплитудно-частотная характеристика идеального (нереализуемого) фильтра и одна из типичных реальных характеристик (рис. 23.3,б). Через

ω_{c1} и ω_{c2} обозначены две частоты среза, ω_0 – средняя частота. Она определяется выражением

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_{c1} \cdot \omega_{c2}}.$$

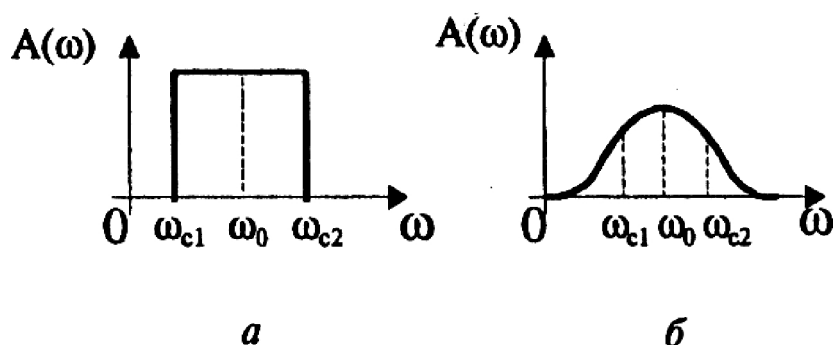


Рис. 23.3. Амплитудно-частотные характеристики полосового фильтра
а-идеальная характеристика; *б*-реальная характеристика

Режекторные фильтры (полосно-заграждающие). Режекторные фильтры не пропускают (задерживают) сигналы, лежащие в некоторой полосе частот, и пропускают сигналы с другими частотами.

Амплитудно-частотная характеристика идеального (нереализуемого) фильтра приведена на рис. 23.4,*а*. На рис. 12.4,*б* показана одна из типичных реальных характеристик.

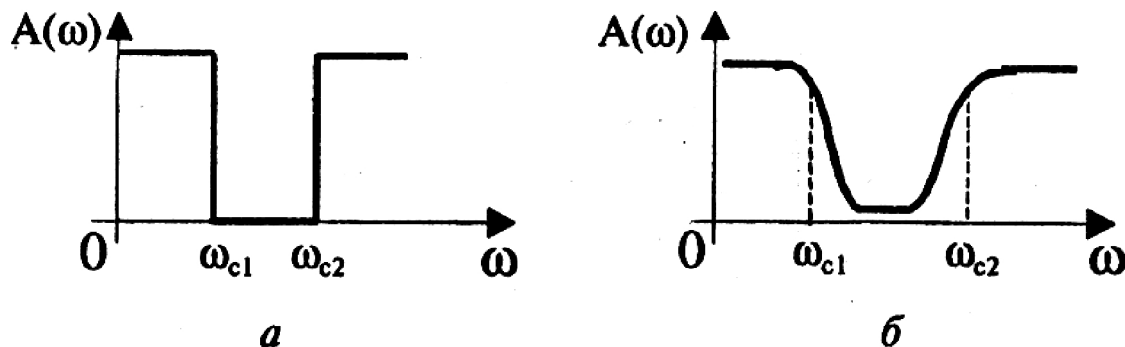


Рис. 23.4. Амплитудно-частотные характеристики режекторного фильтра

Все пропускающие фильтры (фазовые корректоры). Эти фильтры пропускают сигналы любой частоты. Такие фильтры используются в некоторых электронных системах для того, чтобы изменить с той или иной целью фазочастотную характеристику всей системы (рис. 23.5).

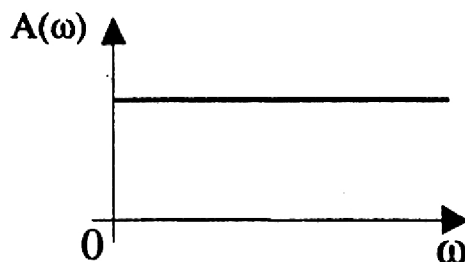


Рис. 12.5. Амплитудно-частотная характеристика все пропускающего фильтра

Классификация фильтров по передаточным функциям

Рассмотрим эту классификацию на примере фильтров низкой частоты. На практике широко используются фильтры, отличающиеся характерными особенностями амплитудно-частотных характеристик. Это фильтры Баттерворта, Чебышева, Бесселя (Томсона) (рис. 23.6).

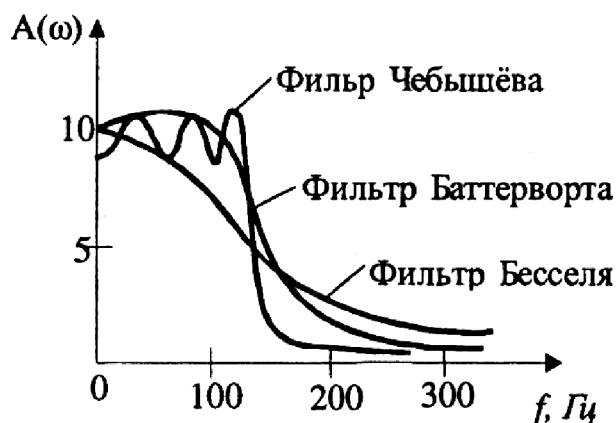


Рис. 12.6. Амплитудно-частотные характеристики фильтров

Фильтры Баттерворта характеризуются наиболее плоской амплитудно-частотной характеристикой в полосе пропускания. Это их достоинство. Но в переходной полосе указанные характеристики спадают плавно, недостаточно резко.

Фильтры Чебышева отличаются резким спадом амплитудно-частотных характеристик в переходной полосе, но в полосе пропускания эти характеристики не являются плоскими.

Фильтры Бесселя характеризуются очень пологими участками амплитудно-частотных характеристик в переходной полосе, еще более пологими, чем у фильтров Баттерворта. Их фазочастотные характеристики достаточно близки к идеальным, соответствующим постоянному времени задержания, поэтому такие фильтры мало искажают форму входного сигнала, содержащего несколько гармоник.

Активные фильтры

Приведем в качестве примера две схемы фильтров второго порядка. Схема фильтра нижних частот приведена на рис. 23.7. Можно отметить, что на низких частотах (и на постоянном токе) фильтр имеет коэффициент усиления, который описывается следующим выражением:

$$K = 1 + \frac{(K-1) \cdot R}{R},$$

где K — величина, определяющая сопротивление в цепи обратной связи $(K-1) \cdot R$ (рис. 23.7).

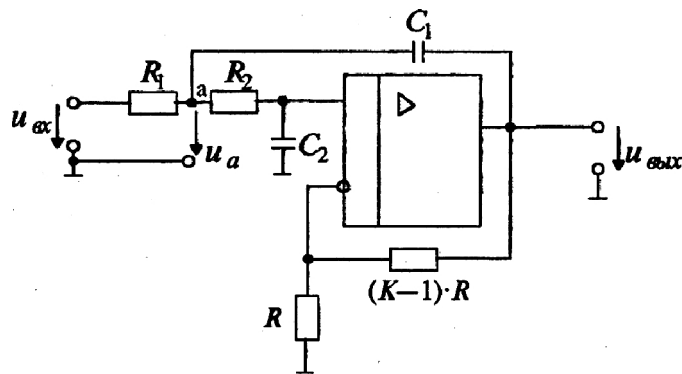


Рис. 23.7. Активный фильтр нижних частот

Приведенное выражение соответствует неинвертирующему усилителю. При увеличении частоты входного сигнала напряжение на выходе уменьшается во-первых, в связи с уменьшением напряжения на неинвертирующем входе (т.е. на емкости C_2) из-за уменьшения модуля комплексного сопротивления емкости C_2 . Во-вторых, уменьшается напряжение u_a из-за того, что модуль комплексного сопротивления емкости C_1 уменьшается и через эту емкость с выхода усилителя в точку «а» подается ток, который значительно сдвинут по фазе относительно напряжения $u_{\text{вых}}$.

Фильтр верхних частот представлен на рис. 23.8. На высоких частотах коэффициент усиления фильтра равен K . В зависимости от параметров резисторов R_1 и R_2 и конденсаторов C_1 и C_2 схема реализует фильтры Баттерворта, Чебышева или Бесселя.

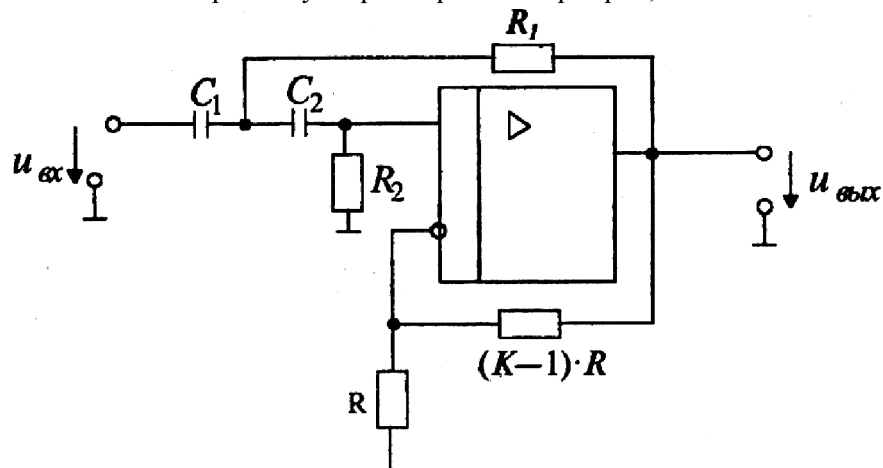


Рис. 23.8. Активный фильтр верхних частот

Краткая характеристика активных фильтров на переключаемых конденсаторах. Переключаемый конденсатор – это своего рода дозатор, передающий строго определенные заряды из одной электрической цепи в другую. Упрощенная схема, поясняющая работу переключаемого конденсатора, представлена рис. 23.9. Ключи S_1 и S_2 работают в противофазе, т.е. когда ключ S_1 замкнут, ключ S_2 разомкнут, и наоборот. После замыкания ключа S_1 конденсатор накапливает заряд $u_{\text{вх}} \cdot C$, получая его от источника входного напряжения. После замыкания ключа S_2 конденсатор отдает указанный заряд в цепь этого ключа.

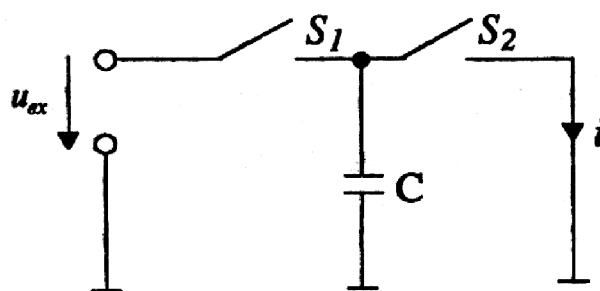


Рис. 23.9. Активный фильтр на переключаемых конденсаторах

Чем чаще будут переключаться ключи, тем больший заряд в единицу времени будет передаваться в указанную цепь, т.е. тем больше будет среднее значение тока i . Использование переключаемого конденсатора позволяет изменять среднее значение тока i путем изменения частоты переключения. В этом режиме переключаемый конденсатор играет роль резистора с регулируемым сопротивлением.

Активные фильтры на переключаемых конденсаторах имеют следующие достоинства, позволяющие достаточно часто использовать их на практике:

- они достаточно дешевые, так как при их изготовлении используется относительно простая технология;
- их легко перестраивать на другие частоты, для чего достаточно изменять частоту переключения.

24. Генераторы гармонических сигналов

Генератором гармонических колебаний называют устройство, создающее переменное синусоидальное напряжение при отсутствии входных сигналов. Генератор преобразует энергию источника постоянного напряжения в энергию переменного входного сигнала.

Различают два режима возбуждения генератора: самовозбуждение (мягкий режим) и с внешним начальным сигналом (жесткий режим).

RC-генераторы с мостом Вина. Мостом Вина обычно называют схему, приведенную на рис. 24.1.

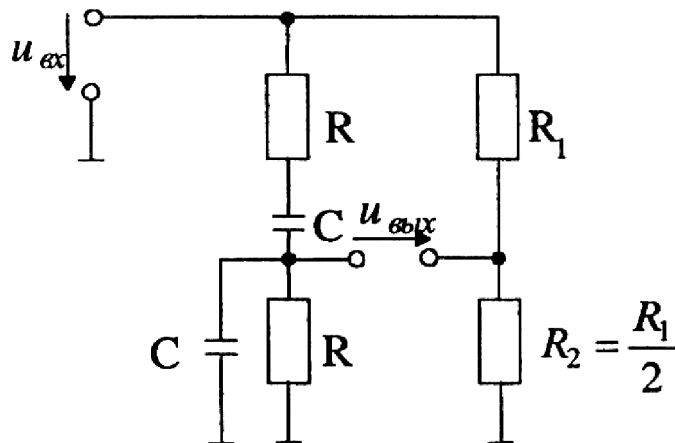


Рис. 24.1. Мост Вина

При частоте входного сигнала, равной резонансной частоте f_0 , напряжение на выходе $U_{вых}$ равно нулю (при ненулевом входном напряжении $U_{вх}$). Резонансная частота определяется выражением

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}.$$

В реальных схемах генераторов для поддержания колебаний необходимо, чтобы на частоте колебаний напряжение $U_{вых}$ несколько отличалась от нуля. Поэтому реально мост работает с некоторым рассогласованием, когда отношение сопротивлений R_1/R_2 несколько отличается от 2 (более точно $R_1/R_2 > 2$).

Схема генератора на операционном усилителе с очень простой схемой автоматической стабилизации амплитуды, которую обеспечивают диоды, представлена на рис. 24.2. Пунктиром показан усилитель, представляющий из себя ОУ, охваченный цепью отрицательной обратной связи (ООС) и имеющий коэффициент усиления K . С помощью частотно-зависимой RC -цепи (упрощенный мост Вина) этот усилитель охвачен цепью положительной обратной связи.

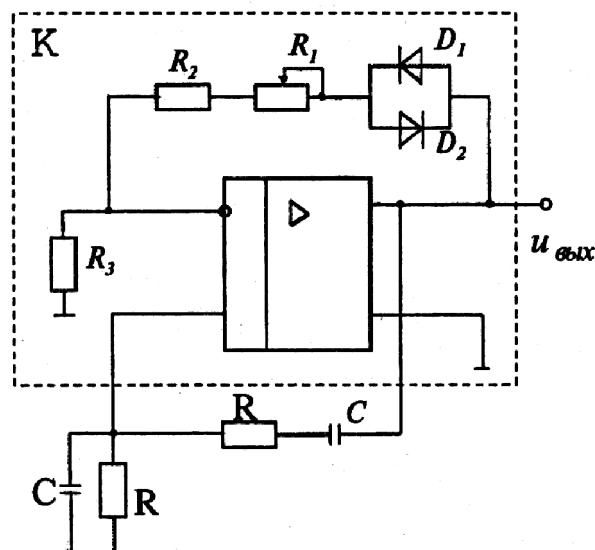


Рис. 24.2. Генератор на ОУ с мостом Вина и стабилизатором амплитуды на диодах

На частоте f_0 коэффициент передачи упрощенного моста Вина $\beta=1/3$. Для соблюдения условия баланса амплитуд необходимо, чтобы $K \cdot \beta \geq 1$, т.е. $R_1 + R_2 \geq 2R_3$.

При практическом применении подобных генераторов нагрузку часто желательно подключать через дополнительный буферный усилительный каскад.

Кварцевые генераторы. Основой генераторов составляют кварцевые резонаторы. Кварцевый генератор – это пластинка кварца, закрепленная определенным образом в кварцедержателе и представляющая собой электромеханическую колебательную систему. Эти резонаторы относятся к пьезоэлектрическим элементам, принцип действия которых основан на использовании прямого и обратного пьезоэффекта. При анализе схемы с кварцевым резонатором (рис. 13.3,а) его удобно заменить эквивалентной схемой (рис. 13.3,б).

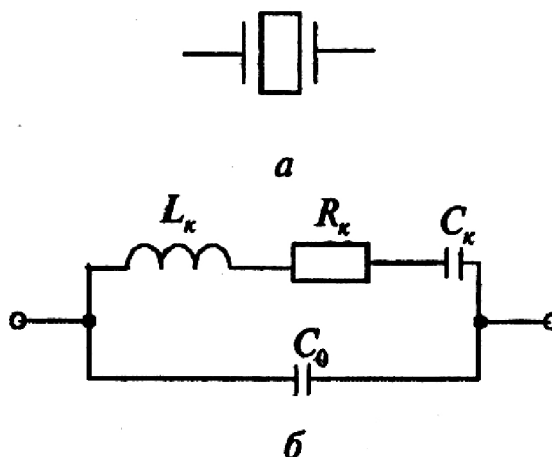


Рис. 13.3. Схема кварцевого резонатора (а) и его эквивалентная схема (б)

В эквивалентной схеме могут иметь место и параллельный, и последовательный резонанс. На практике используют оба вида резонанса.

На частоте последовательного резонанса

$$\omega_K \approx \frac{1}{\sqrt{L_K \cdot C_K}}$$

резонатор имеет минимальное сопротивление R_K . Частота параллельного резонанса

$$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{L_K \frac{C_K \cdot C_0}{C_K + C_0}}}.$$

В диапазоне частот между ω_K и ω_0 резонатор ведет себя как некоторая индуктивность.

Кварцевые резонаторы характеризуются высокой стабильностью и добротностью ($Q_K = 10^4 \div 10^5$). Использование кварцевых резонаторов позволяет снизить относительное изменение частоты генераторов до очень малых значений ($10^{-6} \div 10^{-9}$).

Упрощенная схема кварцевого генератора на основе операционного усилителя при использовании последовательного резонанса (рис. 24.4).

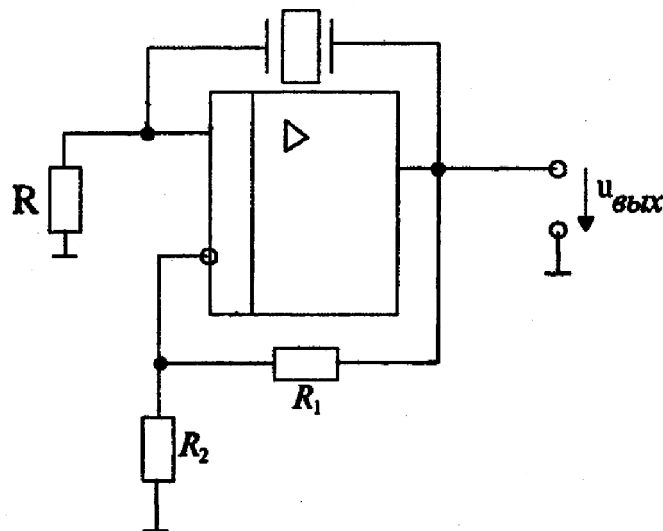


Рис. 24.4. Кварцевый генератор с ОУ с последовательным резонансом

На частоте последовательного резонанса в схеме имеет место сильная положительная обратная связь, что и поддерживает автоколебания.

25. Вторичные источники питания

Вторичные источники питания предназначены для получения напряжения, необходимого для непосредственного питания электронных и других устройств.

На рис. 25.1 приведена структурная схема источника питания без преобразователя частоты.

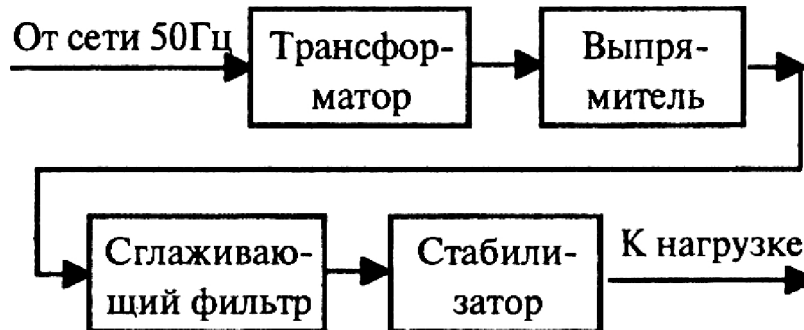


Рис. 25.1. Типовая схема вторичного источника питания

Трансформатор предназначен для гальванической развязки питающей сети и нагрузки и изменения уровня переменного напряжения.

Выпрямитель преобразует переменное напряжение в напряжение одной полярности (пульсирующее).

Сглаживающий фильтр уменьшает пульсации напряжений на выходе выпрямителя.

Стабилизатор уменьшает изменения на нагрузке (стабилизирует напряжение), вызванные изменением напряжения сети и изменением тока, потребляемого нагрузкой. Напряжение в сети обычно может изменяться в диапазоне $+15 \dots -20 \%$.

Для уменьшения веса и габаритов трансформатора и сглаживающего фильтра, работающих на частоте 50 Гц , используют источник питания с преобразователем частоты (рис. 25.2).

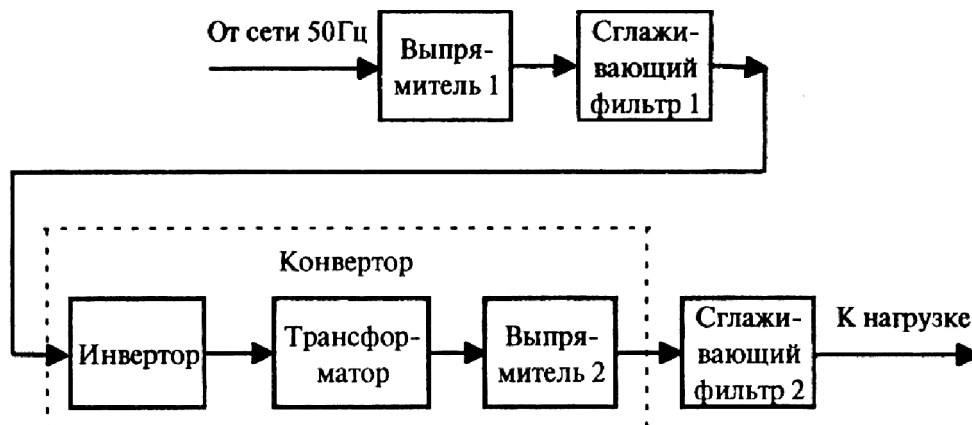


Рис. 14.2. Структурная схема вторичного источника питания с преобразователем частоты

В источниках электропитания такого типа напряжение от сети подается непосредственно на выпрямитель 1 и через сглаживающий фильтр 1 постоянное напряжение подается на инвертор, который вновь преобразует постоянное напряжение в переменное повышенной частоты (десятки килогерц). Трансформатор, работающий на повышенной частоте, имеет меньшие вес и габариты. Вес и габариты сглаживающего фильтра 2 также незначительны.

В такой схеме инвертор выполняет роль стабилизатора напряжения.

Рассматриваемые источники питания широко используются в современных устройствах электроники, в частности в компьютерах. Они обладают значительно лучшими технико-экономическими показателями в сравнении с источниками без преобразования частоты.

Рассмотрим основные элементы структурной схемы вторичного источника питания с преобразователем частоты.

Однофазный однополупериодный выпрямитель является простейшим и имеет схему, приведенную на рис. 25.3,а. В таком выпрямителе ток через нагрузку протекает лишь в течение полупериода сетевого напряжения (рис. 25.3,б).

Основные параметры однополупериодного выпрямителя:

- среднее значение выходного напряжения

$$U_{cp} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{ex} \approx 0,45 \cdot U_{ex}, \quad \text{где } U_{ex} \approx 2,22 \cdot U_{cp};$$

- среднее значение тока на нагрузке выпрямителя

$$I_{cp} = \frac{U_{cp}}{R_n};$$

- коэффициент пульсаций выходного напряжения

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} = 1,57.$$

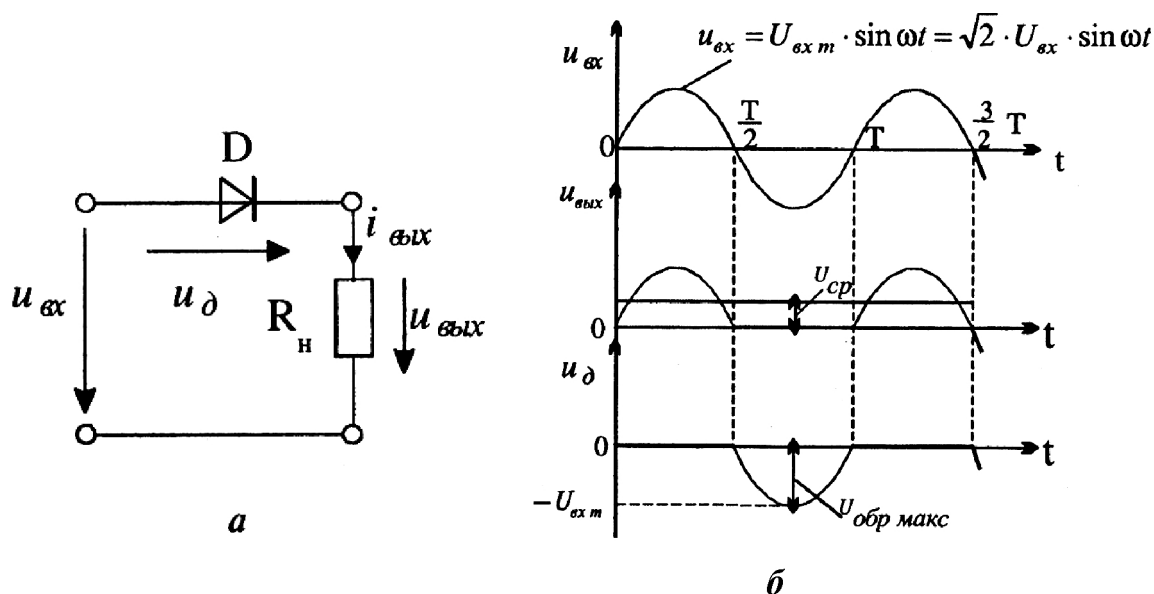


Рис. 25.3. Однополупериодная схема выпрямителя

Такой выпрямитель находит ограниченное применение в маломощных устройствах. Отрицательной чертой однополупериодного выпрямителя является протекание постоянной составляющей тока во входной цепи.

Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой представляет собой параллельное соединение двух однополупериодных выпрямителей (рис. 25.4,а). Диоды схемы проводят ток поочередно, каждый в течение полупериода (рис. 25.4,б).

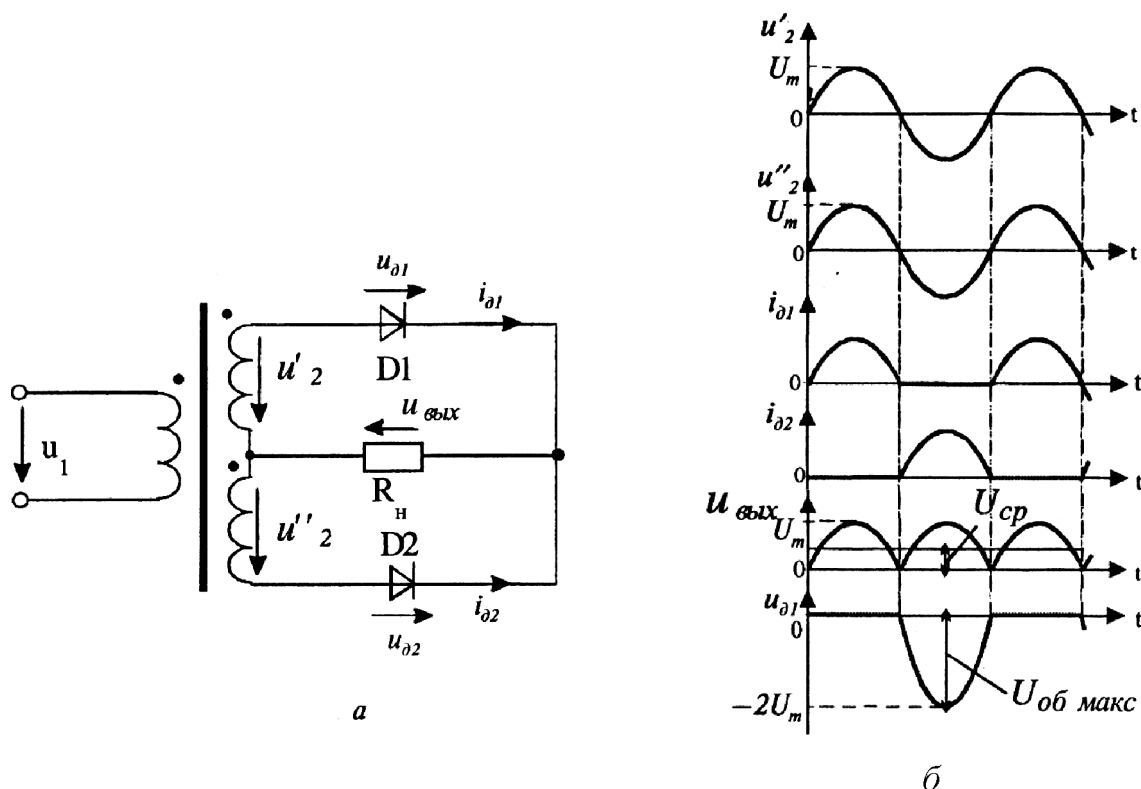


Рис. 25.4. Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой

Основные параметры такого выпрямителя:

- среднее значение выходного напряжения

$$U_{cp} = 2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2 \approx 0,9 \cdot U_2,$$

где U_2 – действующее значение напряжения каждой половины вторичной обмотки, $U_2 \approx 1,11 \cdot U_{cp}$;

- среднее значение тока на нагрузке выпрямителя $I_{cp} = \frac{U_{cp}}{R_n}$;
- коэффициент пульсаций выходного напряжения

$$\varepsilon = \frac{2}{3} \approx 0,67.$$

Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой характеризуется довольно высокими технико-экономическими показателями и широко используется в технике. Недостаток – необходимость двойного количества витков во вторичной обмотке трансформатора.

Однофазный мостовой выпрямитель (рис. 25.5,а) можно считать пределом совершенства бестрансформаторных выпрямителей. Диоды в рассматриваемой схеме включаются и выключаются парами. Одна пара – это диоды D_1 и D_2 , а другая – D_3 и D_4 .

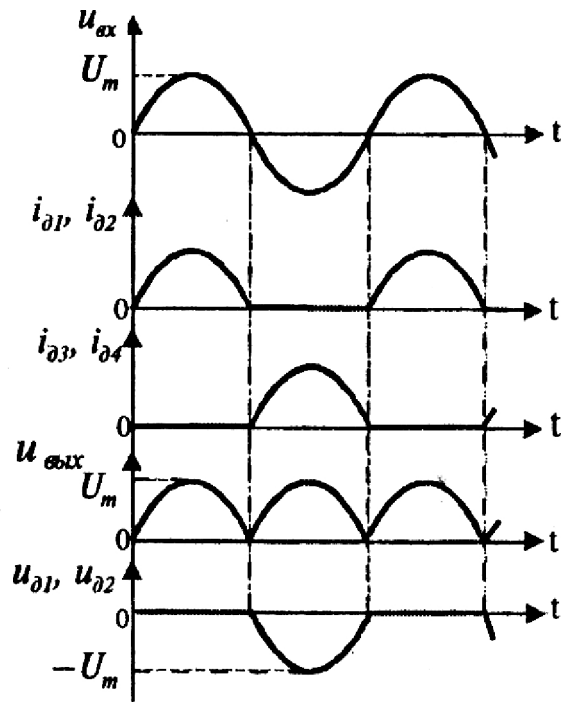
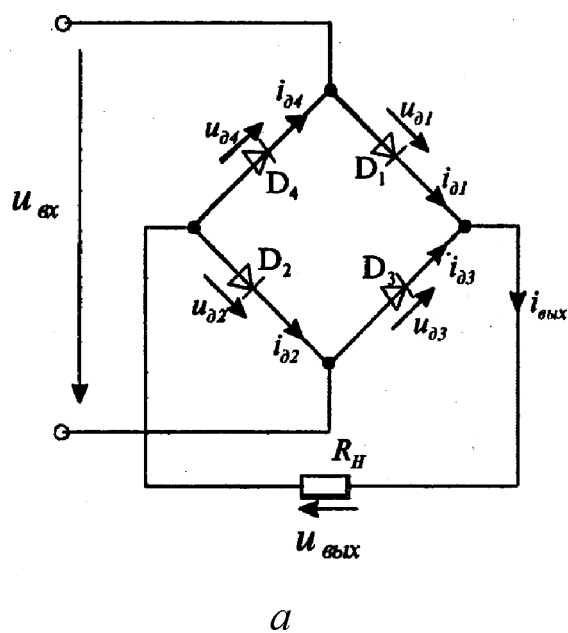


Рис. 14.5. Однофазный мостовой выпрямителя

Основные параметры такого выпрямителя:

- среднее значение выходного напряжения

$$U_{cp} = 2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{вх} \approx 0,9 \cdot U_{вх},$$

где $U_{вх} \approx 1,11 \cdot U_{cp}$;

- среднее значение тока на нагрузке выпрямителя $I_{cp} = \frac{U_{cp}}{R_H}$;
- коэффициент пульсаций выходного напряжения

$$\varepsilon = \frac{2}{3} \approx 0,67.$$

Такой выпрямитель характеризуется высокими технико-экономическими показателями и широко используется на практике. Часто все четыре диода выпрямителя помещают в один корпус.

Сглаживающие фильтры. Выпрямленное напряжение имеет существенные пульсации, поэтому широко используют сглаживающие фильтры – устройства, уменьшающие эти пульсации (рис. 25.6). Важнейшим параметром сглаживающего фильтра является коэффициент сглаживания S .

По определению $S = \varepsilon_1 / \varepsilon_2$, причем ε_1 и ε_2 определяют как коэффициенты пульсаций на входе и выходе фильтра соответственно.

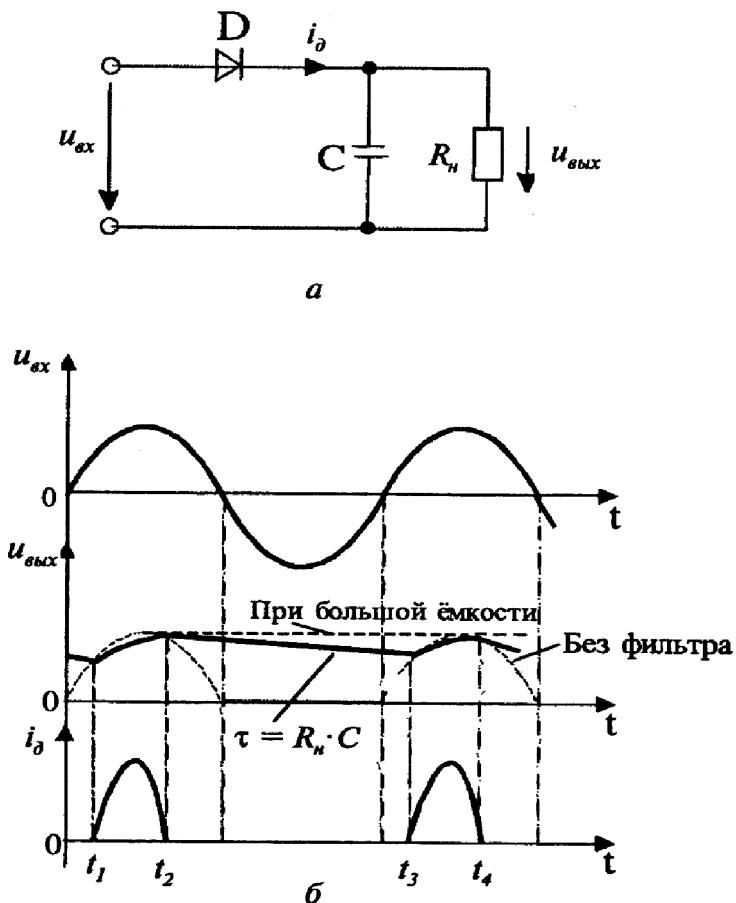


Рис. 25.6. Сглаживающий емкостной фильтр

Простейшим фильтром является емкостной фильтр (С-фильтр). Рассмотрим его работу на примере однофазного однополупериодного выпрямителя (рис. 25.6). Емкостной фильтр подключается параллельно нагрузке (рис. 25.6,а).

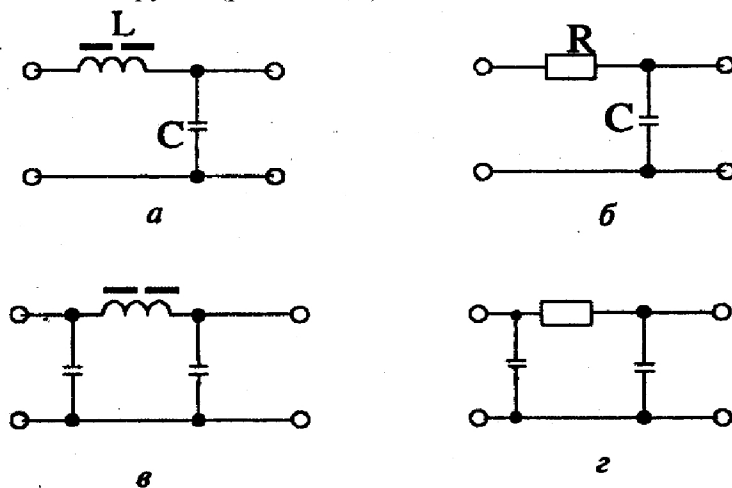


Рис. 25.7. Схемы фильтров, применяемых в выпрямителях

На отрезке времени $t_1 \dots t_2$ диод открыт и конденсатор заряжается (рис. 25.6,б). На отрезке $t_2 \dots t_3$ диод закрыт, источник входного напряжения отключен от конденсатора и нагрузки. Разряд конденсатора характеризуется экспонентой с постоянной времени $\tau = R_n \cdot C$. Ток через диод протекает только часть полупериода (отрезок $t_1 \dots t_2$). Чем короче отрезок $t_1 \dots t_2$, тем больше амплитуда тока диода при заданном среднем токе нагрузки. Если

емкость C очень велика, то отрезок $t_1 \dots t_2$ оказывается очень малым, а амплитуда тока диода очень большой, и диод может выйти из строя.

Такой фильтр широко используется в маломощных выпрямителях; в мощных выпрямителях он используется редко, так как режим работы диода и соответствующих электрических цепей (к примеру, обмоток трансформатора) достаточно тяжел.

На практике используют также следующие фильтры (рис. 25.7): индуктивно-емкостной или Г-образный LC-фильтр (а), Г-образный RC-фильтр (б), П-образный LC-фильтр (в), П-образный RC-фильтр (г).

Обычно Г- и П-образные RC-фильтры применяются только в маломощных схемах, так как они потребляют значительную долю энергии. На практике в силовых цепях применяются другие, более сложные фильтры.

Инверторы – это устройства, преобразующие постоянный ток в переменный (рис. 25.8), где имеет место соотношение $u_{c1} = u_{c2} = 1/2 u_{вх}$. В схеме часто используются электролитические конденсаторы большой емкости.

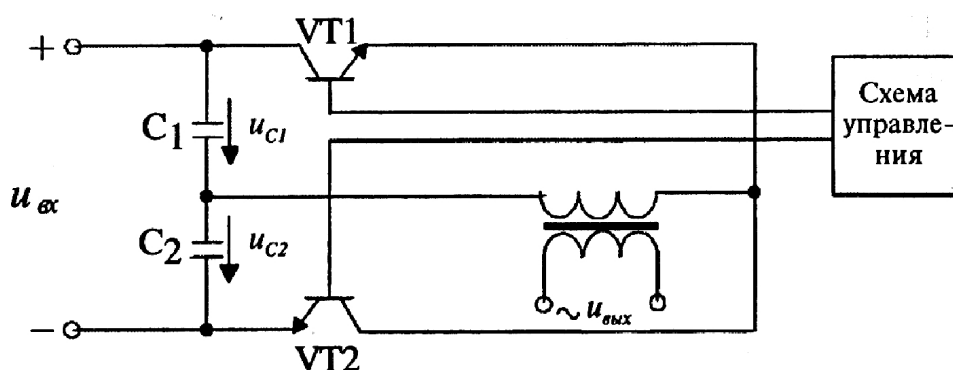


Рис. 25.8. Инвертор на биполярных транзисторах

Транзисторы работают в ключевом режиме: включаются и выключаются поочередно. На выходе схемы возникает переменное напряжение.

Управляемые выпрямители позволяют регулировать выходное напряжение. Они построены на основе однополупериодных (незапираемых) тиристоров (рис. 25.9).

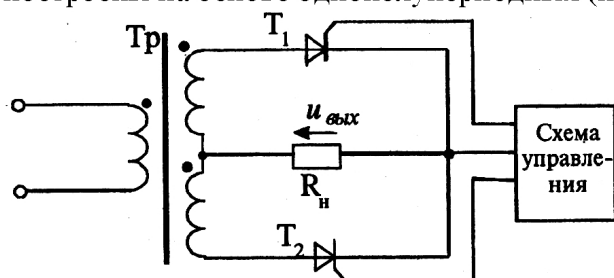


Рис. 25.9. Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель

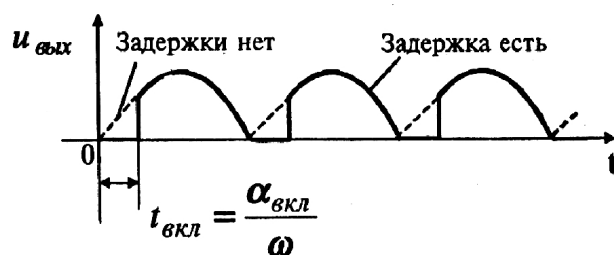


Рис. 25.10. Временная диаграмма

Включение тиристоров производится с некоторой задержкой $t_{вкл}$ (рис. 25.10). Угол $\alpha_{вкл} = \omega \cdot t_{вкл}$ – угол сдвига по фазе между напряжением на тиристоре и импульсами управления. Угол $\alpha_{вкл}$ называют углом управления, который может изменяться в пределах от 0 до 180°.

26. Цифровая и импульсная электроника

Импульсный режим работы и цифровое представление преобразуемой информации. Импульсный режим работы электронного устройства характерен резкими изменениями токов и напряжений. Импульсный режим широко используется в устройствах как силовой, так и информативной электроники.

Импульсный режим работы устройств информативной электроники имеет следующие два важнейших преимущества:

- резко повышается помехоустойчивость, так как и при высоком уровне помех обычно не возникает проблемы отличить одно состояние схемы от другого, а именно состояние схемы определяет информацию о преобразуемом сигнале;
- информация о сигнале простым и естественным образом представляется в цифровой форме, что позволяет использовать большие и все возрастающие возможности цифровой обработки информации.

Импульсные сигналы. Основные термины. Обратимся для примера к идеализированному импульсу, который называют трапецеидальным (рис. 26.1,а).

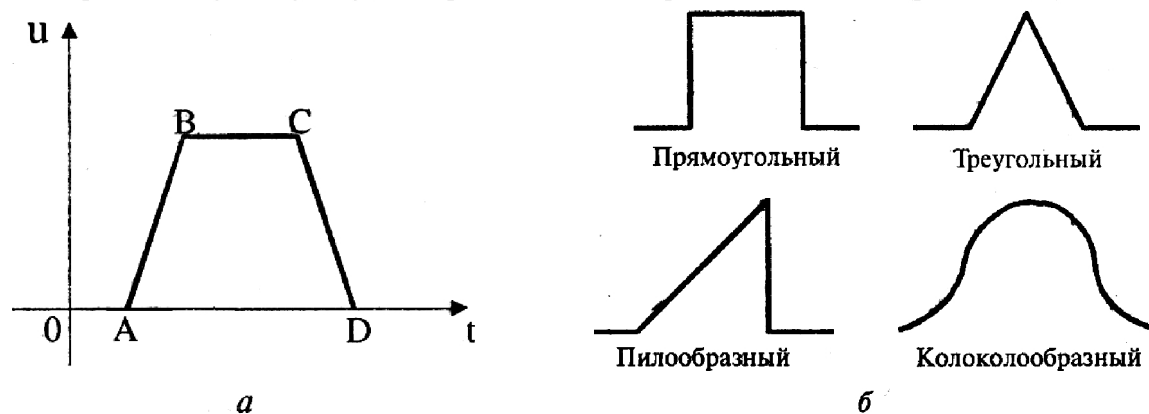


Рис. 26.1. Виды идеализированных импульсов

Участок трапецеидального импульса АВ называют фронтом, участок ВС – вершиной, участок CD – срезом, отрезок AD – основанием. Иногда участок АВ называют передним фронтом, а участок CD – задним фронтом.

На рис. 26.1,б приведены другие идеализированные импульсы характерных форм и даны их названия.

Более сложный по форме, приближенный к реальному, вид импульса показан на рис. 26.2,а.

Участок импульса, соответствующий отрицательному напряжению, называют хвостом импульса, или обратным выбросом.

Для величин, указанных на рис. 26.2, обычно используют следующие названия:

- t_u – длительность импульса;
- t_ϕ – длительность фронта импульса;
- t_c – длительность среза импульса;
- t_x – длительность хвоста импульса;
- U_m – амплитуда (высота) импульса;
- ΔU – спад вершины импульса;
- $U_{обр}$ – амплитуда обратного выброса.

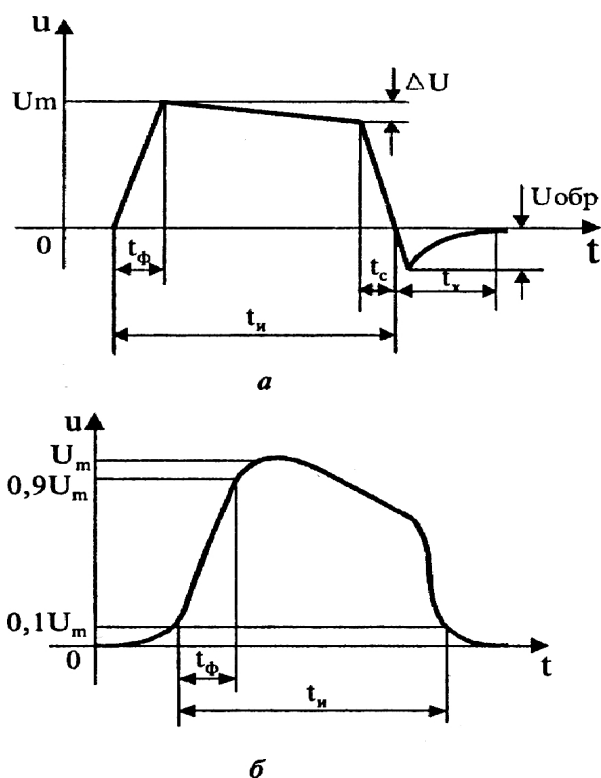


Рис. 15.2. Характерные параметры импульса

При определении параметров реальных импульсов обычно нет возможности однозначно разделить импульс на характерные участки, поэтому в этих случаях параметры импульсов определяют исходя из тех или иных допущений. Например, длительность импульса и фронта импульса часто определяют так, как показано на рис. 26.2,б.

Обратимся к периодически повторяющимся импульсам (рис. 26.3).

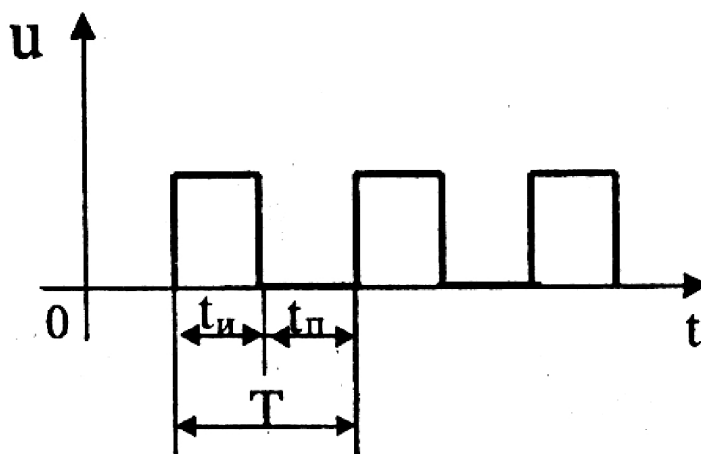


Рис. 15.3. Периодически повторяющиеся импульсы

В этом случае используют следующие параметры:

T – период повторения импульсов;

$f=1/T$ – частота повторения импульсов;

t_u – длительность импульса;

t_n – длительность паузы;

$Q=T/t_u$ – скважность импульса;

$K_з=1/Q=t_u/T$ – коэффициент заполнения.

Цифровое представление преобразуемой информации. Для цифрового представления информации характерно полное абстрагирование от особенностей электрических процессов в электронной схеме, выполняющей обработку сигналов.

В устройствах цифровой электроники в большинстве случаев используются сигналы двух уровней – высокого и низкого. При этом обычно имеется в виду уровни напряжения, а не тока. Важным является не абсолютные значения амплитуд напряжений для высокого и низкого уровня, а их четко различимая разность. Изобразим диаграмму, поясняющую изложенное (рис. 26.4):



Рис. 26.4. Соотношение высокого и низкого уровня сигналов

На этой диаграмме, соответствующей цифровым схемам транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ), имеющей напряжение питания 5 В , укажем диапазоны напряжений для входных и выходных сигналов (заштрихованные прямоугольники). Это такие диапазоны, что сигнал, оказавшись в одном из них, безошибочно квалифицируется как сигнал высокого или низкого уровня. Высокому и низкому уровню сигналов ставятся в соответствие логические состояния 1 и 0. Если высокому уровню сигналов ставится в соответствие состояние 1, а низкому – состояние 0, то говорят о так называемой позитивной логике. Если высокому уровню соответствует состояние 0, а низкому – 1, то говорят о так называемой негативной логике.

Транзисторные ключи

Транзисторный ключ является основным элементом устройств цифровой электроники и очень многих устройств силовой электроники. Параметры и характеристики транзисторного ключа в очень большой степени определяют свойства соответствующих схем.

Ключи на биполярных транзисторах. Простейший ключ на биполярном транзисторе, включенный по схеме с общим эмиттером, и соответствующая временная диаграмма входного напряжения представлены на рис. 26.5.

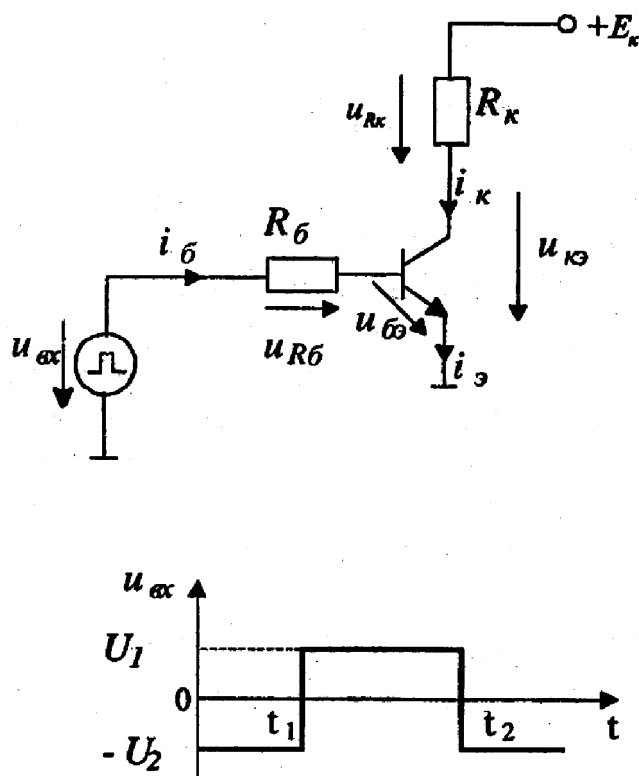


Рис. 26.5. Ключ на биполярном транзисторе

Рассмотрим работу транзисторного ключа в установившихся режимах. До момента времени t_1 эмиттерный переход транзистора заперт и транзистор находится в режиме отсечки. В этом режиме $i_k = -i_b = I_{ko}$ (I_{ko} – обратный ток коллектора), $i_э \approx 0$. При этом $u_{Rб} \approx u_{Rк} \approx 0$; $u_{бэ} \approx -U_2$; $u_{кэ} \approx -E_k$.

В промежутке времени $t_1 \dots t_2$ транзистор открыт. Для того, чтобы напряжение на транзисторе $u_{кэ}$ было минимальным, напряжение U_1 обычно выбирают так, чтобы транзистор находился или в режиме насыщения, или в пограничном режиме, очень близким к режиму насыщения.

Ключи на полевых транзисторах отличаются малым остаточным напряжением. Они могут коммутировать слабые сигналы (в единицы микровольт и меньше). Это следствие того, что выходные характеристики полевых транзисторов проходят через начало координат.

Для примера изобразим выходные характеристики транзистора с управляющим переходом и каналом p -типа в области, прилегающей к началу координат (рис. 26.6).

Обратим внимание, что характеристики в третьем квадранте соответствуют заданным напряжениям между затвором и стоком.

В статическом состоянии ключ на полевом транзисторе потребляет очень малый ток управления. Однако этот ток увеличивается при увеличении частоты переключения. Очень большое входное сопротивление ключей на полевых транзисторах фактически обеспечивает гальваническую развязку входных и выходных цепей. Это позволяет обойтись без трансформаторов в цепях управления.

На рис. 26.7 приведена схема цифрового ключа на МДП-транзисторе с индуцированным каналом n -типа и резистивной нагрузкой и соответствующие временные диаграммы.

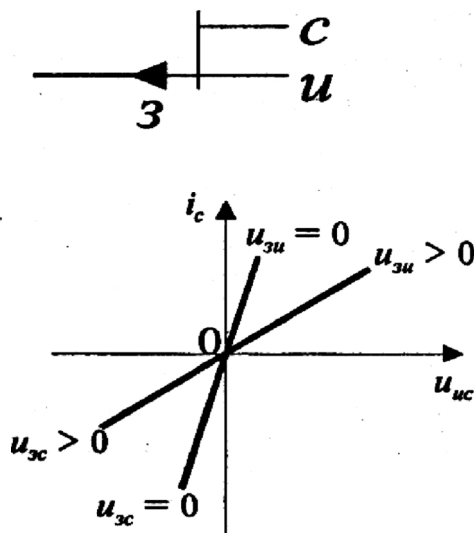


Рис. 26.6. Полевой транзистор с каналом р-типа

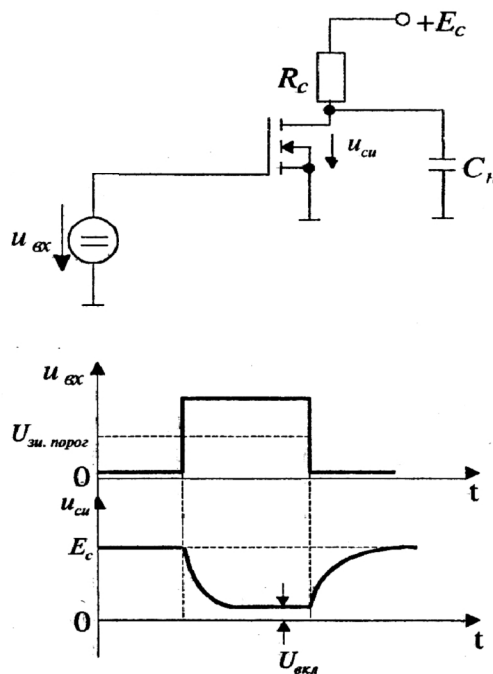


Рис. 26.7. Цифровой ключ на полевом транзисторе

На схеме изображена емкость нагрузки C_n , моделирующая емкость устройств, подключенных к транзисторному ключу. Очевидно, что при нулевом входном сигнале транзистор заперт и $u_{си} = E_c$. Если напряжение $u_{вх}$ больше порогового напряжения $U_{зи.порог}$ транзистора, то он открывается и напряжение $u_{си}$ уменьшается.

Логические элементы

Логический элемент (логический вентиль) – это электронная схема, выполняющая некоторую простейшую логическую операцию. На рис. 26.8 приведены примеры условных графических обозначений некоторых логических элементов.

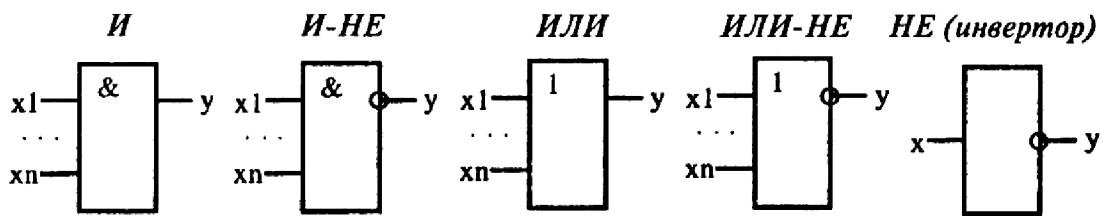


Рис. 26.8. Логические элементы

Логический элемент может быть реализован в виде отдельной интегральной схемы. Часто интегральная схема содержит несколько логических элементов.

Логические элементы используются в устройствах цифровой электроники (логических устройствах) для выполнения простого преобразования логических сигналов.

Классификация логических элементов. Выделяются следующие классы логических элементов (так называемые логики):

- резисторно-транзисторная логика (ТРЛ);
- диодно-транзисторная логика (ДТЛ);
- транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ);
- эмиттерно-транзисторная логика (ЭСЛ);
- транзисторно-транзисторная логика с диодами Шоттки (ТТЛШ);
- логика на основе МОП-транзисторов с каналами типа p (p -МДП);
- логика на основе МОП-транзисторов с каналами типа n (n -МДП);
- логика на основе комплементарных ключей на МДП-транзисторах (КМДП, КМОП);
- интегральная инжекционная логика И²Л;
- логика на основе полупроводника из арсенида галлия GaAs.

В настоящее время наиболее широко используются следующие логики: ТТЛ, ТТЛШ, КМОП, ЭСЛ. Логические элементы и другие цифровые электронные устройства выпускаются в составе серий микросхем: ТТЛ – К155, КМ155, К133, КМ133; ТТЛШ – 530, КР531, КМ531, КР1531, 533, К555, КМ555, 1533, КР1533; ЭСЛ – 100, К500, К1500; КМОП – 564, К561, 1564, КР1554; GaAs – К6500.

Наиболее важные параметры логических элементов:

- Быстродействие характеризуется временем задержки распространения сигнала $t_{зр}$ и максимальной рабочей частотой $F_{макс}$. Время задержки принято определять по перепадам уровней $0,5U_{вх}$ и $0,5\Delta U_{вых}$. Максимальная рабочая частота $F_{макс}$ – это частота, при которой сохраняется работоспособность схемы.
- Нагрузочная способность характеризуется коэффициентом объединения по входу $K_{об}$ (иногда используют термин «коэффициент объединения по выходу»). Величина $K_{об}$ – это число логических входов, величина $K_{раз}$ – максимальное число однотипных логических элементов, которые могут быть подключены к выходу данного логического элемента. Типичные значения их таковы: $K_{об}=2\dots 8$, $K_{раз}=4\dots 10$. Для элементов с повышенной нагрузочной способностью $K_{раз}=20\dots 30$.
- Помехоустойчивость в статическом режиме характеризуется напряжением $U_{псм}$, которое называется статической помехоустойчивостью. Это такое максимально допустимое напряжение статической помехи на входе, при котором еще не происходит изменение выходных уровней логического элемента.
- Мощность, потребляемая микросхемой от источника питания. Если эта мощность различна для двух логических состояний, то часто указывают среднюю потребляемую мощность для этих состояний.
- Напряжение питания.
- Входные пороговые напряжения высокого и низкого уровня $U_{вх.1порог}$ и $U_{вх.0порог}$, соответствующие изменению состояния логического элемента.

- Выходные напряжения высокого и низкого уровней $U_{вых1}$ и $U_{вых0}$.
Используются и другие параметры.

Особенности логических элементов различных логик. Для конкретной серии микросхем характерно использование типового электронного узла – базового логического элемента. Этот элемент является основой построения самых разнообразных цифровых электронных устройств.

Базовый элемент ТТЛ содержит многоэмиттерный транзистор, выполняющий логическую операцию И, и сложный инвертор (рис. 26.9).

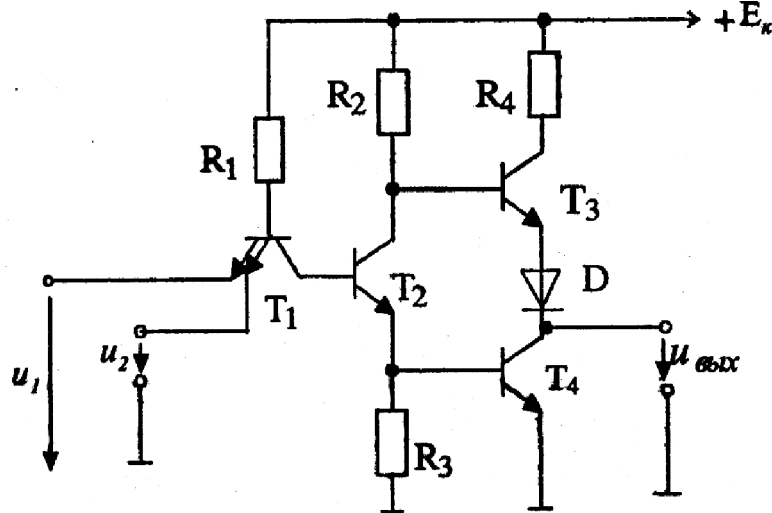


Рис. 26.9. Базовый элемент ТТЛ

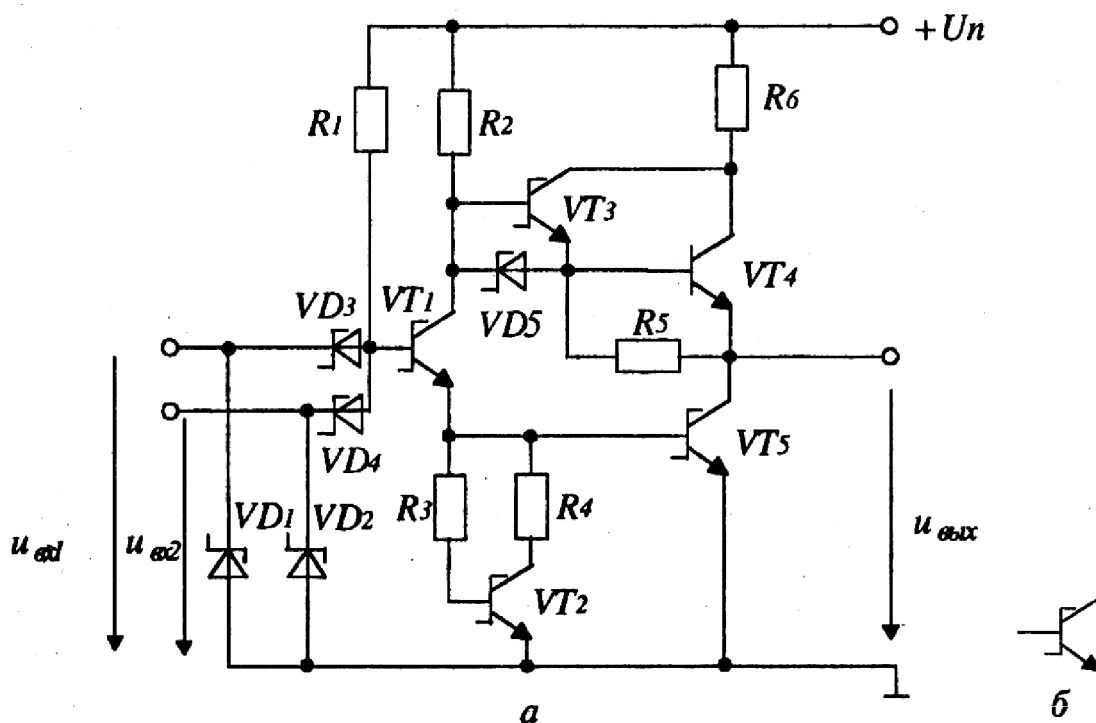


Рис. 26.10. Логический элемент ТТЛШ

Если на один или оба входа одновременно подан низкий уровень напряжения, то многоэмиттерный транзистор находится в состоянии насыщения и транзистор T_2 закрыт, а следовательно, закрыт и транзистор T_4 , т. е. на выходе будет высокий уровень напряжения. Если на обоих входах одновременно действует высокий уровень напряжения, то транзистор T_2 открывается и входит в режим насыщения, что приводит к открытию и насыщению

транзистора T_4 и запиранию транзистора T_3 , т.е. реализуется функция И-НЕ. Для увеличения быстродействия элементов ТТЛ используются транзисторы с диодами или транзисторами Шоттки.

Базовый логический элемент ТТЛШ (на примере серии К555). В качестве базового элемента серии микросхем К555 использован элемент

И-НЕ (рис. 26.10,а), а на рис. 26.10,б показано графическое изображение транзистора Шоттки.

Транзистор VT4 – обычный биполярный транзистор. Если оба входных напряжения U_{ex1} и U_{ex2} имеют высокий уровень, то диоды VD3 и VD4 закрыты, транзисторы VT1, VT5 открыты и на выходе имеет место напряжение низкого уровня. Если хотя бы на одном входе имеется напряжение низкого уровня, то транзисторы VT1 и VT5 закрыты, а транзисторы VT3 и VT4 открыты, и на входе имеет место напряжение низкого уровня. Микросхемы ТТЛШ серии К555 характеризуются следующими параметрами:

- напряжение питания $+5 В$;
- выходное напряжение низкого уровня не более $0,4 В$;
- выходное напряжение высокого уровня не менее $2,5 В$;
- помехоустойчивость – не менее $0,3 В$;
- среднее время задержки распространения сигнала $20 нс$;
- максимальная рабочая частота $25 МГц$.

Особенности других логик. Основой базового логического элемента ЭСЛ является токовый ключ, схема которого подобна схеме дифференциального усилителя. Микросхема ЭСЛ питается отрицательным напряжением ($-4 В$ для серии К1500). Транзисторы этой микросхемы не входят в режим насыщения, что является одной из причин высокого быстродействия элементов ЭСЛ.

В микросхемах n -МОП и p -МОП используются ключи соответственно на МОП-транзисторах с n -каналами и динамической нагрузкой и на МОП-транзисторах с p -каналом. Для исключения потребления мощности логическим элементом в статическом состоянии используются комплементарные МДП-логические элементы (КМДП или КМОП-логика).

Логика на основе полупроводника из арсенида галлия GaAs характеризуется наиболее высоким быстродействием, что является следствием высокой подвижности электронов (в 3...6 раз больше по сравнению с кремнием). Микросхемы на основе GaAs могут работать на частотах порядка $10 ГГц$.

Литература

1. Электротехника: учебник для вузов/А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 10-е (9-е) изд., стер.– Москва, 2007 (2005) . – 544 с.
2. Электротехника и электроника: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений/М.А. Жаворонков, А.В. Кузин. – Москва, 2005. – 400 с.
3. Общая электротехника: Учеб. пособие для вузов/Под ред. А.Т. Блажкина. – Ленинград, 1986. – 592 с.
4. Цуркин А.П. Мосолов Д.Н. Учебное пособие по курсу Электротехники и электроники. Москва 2008 -150с
5. Козлова И.С. – Конспект лекций по электротехнике. Москва 2010 – 162с

Содержание

1. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА	3
1.1 ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ	4
1.2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И ИХ КЛАССИФИКАЦИИ.	6
1.3 ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. ИСТОЧНИКИ ЭДС И ТОКА	8
2. РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА	12
2.1 ПЕРВЫЙ ЗАКОН КИРХГОФА.	12
2.2 ВТОРОЙ ЗАКОН КИРХГОФА.	12
2.3 ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНОВ ОМА И КИРХГОФА ДЛЯ РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ	12
2.4 МЕТОД УЗЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ	13
2.5 МЕТОД КОНТУРНЫХ ТОКОВ	15
2.6 ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ.	16
2.7 ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЭДС	18
2.8 РАБОТА И МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС	18
2.9 БАЛАНС МОЩНОСТЕЙ	19
2.10 УСЛОВИЕ ПЕРЕДАЧИ ПРИЁМНИКУ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ	19
2.11 ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ, С ЦЕПЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА	20
3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ИНДУКТИВНОСТЬ И ЁМКОСТЬ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ	23
3.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	23
3.2 ЭДС САМОИНДУКЦИИ И ИНДУКТИВНОСТЬ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.	25
3.3 ЁМКОСТЬ ПРОВОДЯЩИХ ТЕЛ. КОНДЕНСАТОРЫ. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ.	26
4. ОДНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА	27
4.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	27
4.2 СРЕДНЕЕ И ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	27
4.3 ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ.	28
4.4 РАСЧЁТ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА СИМВОЛИЧЕСКИМ МЕТОДОМ	29
4.5 ЗАКОН ОМА В КОМПЛЕКСНОЙ ФОРМЕ	31
4.6 ЗАКОНЫ КИРХГОФА В КОМПЛЕКСНОЙ ФОРМЕ	32
4.7 МОЩНОСТЬ В ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА	32
4.8 ЦЕПИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ $R L C$	34
4.9 ЦЕПИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ВЕТВЕЙ	35
4.10 РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ	36
4.11 РЕЗОНАНС ТОКОВ	38
4.12 ПРИМЕР ЗАДАЧИ ПО РАСЧЕТУ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	40
5. ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ	42
5.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	42
5.2 РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ	44
6. ТРАНСФОРМАТОРЫ	48
6.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	48
6.2 ХОЛОСТОЙ ХОД ТРАНСФОРМАТОРА	49
6.3 ПОСТРОЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ НАГРУЖЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРА	50
6.4 ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ТРАНСФОРМАТОРА И ЕЕ ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА	50
6.5 КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА	52

6.6 ОСОБЕННОСТИ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ	52
7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	54
7.1 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ	54
7.2 ВИДЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ И КЛАССЫ ТОЧНОСТИ	54
7.3 СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ	55
8. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ	58
8.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	58
8.2 ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ДВИГАТЕЛЯ	61
8.3 РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ	62
9. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ	64
9.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	64
9.2 АСИНХРОННЫЙ ПУСК СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ	65
10. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА	67
10.1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	67
10.2 ВЫПРЯМЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННОЙ ЭДС ПОСРЕДСТВОМ КОЛЛЕКТОРА И ЩЕТОК	69
10.3 РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ	71
10.4 РЕЖИМ ДВИГАТЕЛЯ	73
11 ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ	75
12. ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКУ	80
13. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ	84
14. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ	90
15. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ	96
16. ТИРИСТОРЫ	99
17. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ	102
18. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ	109
19. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ	113
20. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА. УСИЛИТЕЛИ	114
21. СХЕМЫ НА ОСНОВЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ	125
22. УСИЛИТЕЛИ	133
23. ЭЛЕКТРОННЫЕ ФИЛЬТРЫ	141
24. ГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ	147
25. ВТОРИЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ	150
26. ЦИФРОВАЯ И ИМПУЛЬСНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	156