

Министерство образования и науки РФ

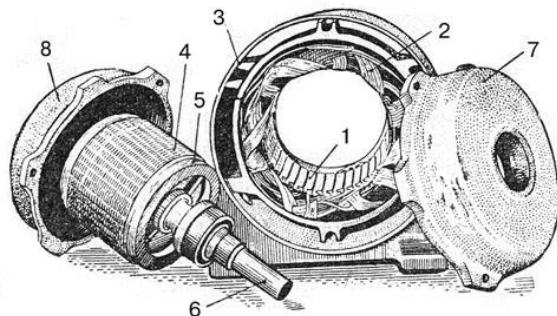
ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Елабужский институт

Кафедра физики и информационных технологий

М.Н. Самедов, В.М. Шибанов, В.Ю. Шурыгин

**ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
И ЭЛЕКТРОНИКА**



Учебное пособие

Елабуга-2015

УДК 621.3
ББК 31.2
С17, Ш55, Ш96

Печатается по решению редакционно-издательского совета Елабужского института Казанского (Приволжского) федерального университета (прот. № 3 от 26.11.2015).

Рецензенты:

Тазмеев Х.К., к.т.н., доцент кафедры физики Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета;

Сабирова Ф.М., к.ф.- м.н., доцент кафедры физики и информационных технологий Елабужского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета.

Самедов М.Н., Шибанов В.М., Шурыгин В.Ю. Общая электротехника и электроника / Учебное пособие для бакалавров. – Елабуга: изд-во ЕИ КФУ, 2015. – 112 с.

Пособие в первую очередь предназначено бакалаврам, обучающимся по направлению подготовки 23.03.01 «Технология транспортных процессов», для методического обеспечения учебного процесса по курсу «Общая электротехника и электроника». Оно также может быть полезным и для студентов других направлений подготовки, в учебных планах которых содержатся такие дисциплины, как «Электротехника», «Радиотехника», «Электроника».

© Самедов М.Н., Шибанов В.М., Шурыгин В.Ю., ЕИ КФУ

Оглавление

Введение.....	4
РАЗДЕЛ I. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА	5
<i>1.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТЯННОГО ТОКА</i>	<i>5</i>
<i>1.2. ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА</i>	<i>10</i>
<i>1.3. РЕЗОНАНС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ</i>	<i>15</i>
<i>1.4. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ</i>	<i>18</i>
<i>1.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ</i>	<i>23</i>
<i>1.6. ТРАНСФОРМАТОРЫ</i>	<i>26</i>
<i>1.7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ..</i>	<i>30</i>
<i>1.8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ..</i>	<i>34</i>
РАЗДЕЛ II. ЭЛЕКТРОНИКА	38
<i>2.1. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОНИКИ</i>	<i>39</i>
<i>2.2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ</i>	<i>53</i>
<i>2.3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ</i>	<i>55</i>
<i>2.4. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ</i>	<i>59</i>
<i>2.5. УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ</i>	<i>68</i>
<i>2.6. МЕЖКАСКАДНАЯ СВЯЗЬ</i>	<i>77</i>
<i>2.7. УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ</i>	<i>80</i>
<i>2.8. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ</i>	<i>86</i>
<i>2.9. ГЕНЕРАТОРЫ</i>	<i>90</i>
<i>2.10. УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА</i>	<i>94</i>
<i>2.11. ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ</i>	<i>96</i>
<i>2.12. ПРИНЦИП ТЕЛЕВИДЕНИЯ</i>	<i>100</i>
ЛИТЕРАТУРА	112

История развития и перспективы дисциплины

Развитие электротехники относится к первой половине XIX века, когда были открыты основные закономерности магнитных и электрических явлений. Дальнейшее развитие она получает после создания современных электрических машин и трансформаторов. Так, в 1802 году профессор физики В.В.Петров получил электрическую дугу и указал на возможность их практического применения для освещения и плавки металлов.

Русский академик Э.Х. Ленц установил в области электромагнитной индукции закон, носящий его имя. Он так же исследовал вопрос о тепловом действии электрического тока (закон Джоуля - Ленца).

В 1834 году Б.С. Якоби изобрёл и в 1838 году построил первый электрический двигатель. В 1873 году русский изобретатель А.Н. Лодыгин создал первую лампу накаливания с начала с угольной, а потом с металлической (вольфрамовой) нитью.

Русский изобретатель Н.Н. Бенардос и Н.Г. Славянов осуществляли электрическую дуговую сварку металлов.

Русский электротехник М.О. Доливо-Добровольский в 1888 году разработал систему трёхфазного тока, создал трёхфазный двигатель, трёхфазный трансформатор и осуществил передачу электрической энергии по трёхфазной линии.

В 1885 году А.С. Попов изобрёл радиотелеграф. Больших достижений в области электротехники добились иностранные ученые. Среди них необходимо отметить, прежде всего, Фарадея, английского учёного, установившего законы электролиза и обнаруживший вращение проводника с током вокруг полюса постоянного магнита, открывший явления электромагнитной индукции Максвелла (1831-1879), английского физика, основоположника теории электромагнитного поля. Он так же доказал существование электромагнитных волн, электромагнитную природу и давления света.

Дальнейшее развитие электроэнергетики и электрификации требует подготовки большого числа специалистов вооруженных хорошими знаниями электротехники, так же области техники, которым входит производство, передача, распределения и многообразные применения электрической энергий.

РАЗДЕЛ I. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

1.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТЯННОГО ТОКА

Общие сведения

Направленное движение свободных заряженных частиц под действием электрического поля называется ***электрическим током***.

Электрический ток в металлических проводниках представляет собой упорядоченное движение электронов. Таким образом, ток в металлах образуется свободными электронами, поэтому их проводимость называют ***электронной***.

Электрический ток в электролитах представляет собой упорядоченное движение ионов. В жидких электролитах, к которым относятся водные растворы солей, кислот и щелочей, всегда имеются положительные и отрицательные ионы. Следовательно, в жидких электролитах ток образуется ионами, поэтому проводимость такого типа называется ***ионной***.

Интенсивность электрического тока характеризуется физической величиной, которая называется силой электрического тока.

Сила тока численно равна количеству электричества Q , проходящему через поперечное сечение проводника за 1 секунд. Силу тока обозначают буквой I :

$$I = \frac{dQ}{dt},$$

где Q – количество электрического заряда, проходящего через поперечное сечение проводника за время t . Единица измерения силы тока – ампер (А).

Плотность тока – это отношение силу тока I к площади поперечного сечения S проводника: $\delta = I/S$ единица измерения плотности тока – A/mm^2 .

Электрический ток, сила и направление которого не изменяется с течением времени, называется *постоянным*.

Разные вещества не одинаково проводят электрический ток, поскольку в различной мере противодействуют движению электрических зарядов. Это противодействие характеризуется величиной, которого называют *электрическим сопротивлением* и обозначают буквой R . Единица измерения сопротивления – Ом. Это сопротивление проводника, в котором протекает ток силой а 1 А при напряжении 1 В. Сопротивление зависит от материала проводника и его геометрических размеров (длины l и площади поперечного сечения S).

$$R = \rho \frac{l}{S} . \text{ Здесь } \rho - \text{ удельное сопротивление проводника Ом м.}$$

Сопротивления проводников изменяются при изменения их температуры. Обозначая сопротивления проводника при температуре $0^{\circ}C$ через R_0 , получим формулу для определения сопротивления при любой температуре t .

$$R = R_0(1 + \alpha t),$$

где α - теоретический коэффициент сопротивления, показывающий относительного удельного сопротивления при нагревании проводника на $1^{\circ}C$.

Электрическая цепь и ее основные элементы

Основными элементами *электрической цепи* (рис. 1) являются источники ЭДС, приёмники энергии, или потребители, и провода для передачи электроэнергии.

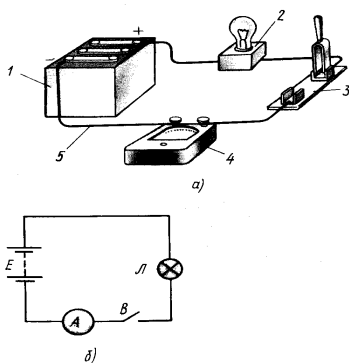


Рис. 1. Схема простейшей электрической цепи

E – источник электрической энергии (батарея); $Л$ – потребитель электрической энергии (лампа накаливания); B – включатель.

Различают *внешнюю* или *внутреннюю* части электрической цепи.

Приёмник электрической энергии и соединительные провода составляют её *внешнюю часть*, а источники электрической энергии (источник питания) – *внутреннюю часть*.

В качестве *источников электрической энергии* применяют электрические (электромашинные) генераторы, преобразующие механическую энергию в электрическую, первичные элементы и аккумуляторы, преобразующие химическую энергию в электрическую и т.п.

К *приёмникам электрической энергии* относятся электрические двигатели, нагревательные приборы, облучатели. В приёмниках электрической энергии, электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии: механическую в электрических двигателях, тепловую в нагревательных приборах, лучистую в облучательных и осветительных установках. Электрические провода являются звеном, связывающим источника и приёмника. В электрические цепи могут входить приборы контроля и управления, а так же преобразующие устройства (трансформаторы и выпрямители и др.).

Электрические цепи разделяют на разветвлённые и неразветвлённые. Разветвлённые цепи содержат несколько параллельных ветвей.

В зависимости от того, для какого тока предназначена электрическая цепь, её называют соответственно: «электрическая цепь постоянного тока», «электрическая цепь переменного тока».

Работа и мощность

Работа, совершаемая электрическим током в единицу времени (секунду), называется **мощностью** и обозначается буквой **P**. Эта величина характеризует интенсивность совершаемой током работы. Мощность определяется по формуле.

$$P = \frac{W}{t} = \frac{U \cdot I \cdot t}{t} = U \cdot I.$$

Единицей измерения мощности служит **Ватт** (Вт). Ватт – это мощность, при которой за секунду равномерно выполняется работа в один джоуль.

Кратные единицы мощности: киловатт–1кВт=1000Вт и мегаватт–1 МВт=1000000 Вт.

Так работа, совершенная за время t может быть записана следующим образом.

$$W = P t.$$

Следовательно, в электрических цепях за единицу применяют работу, совершаемую током при мощности в 1 Вт в течение 1 сек. Она соответствует работе в 1 Дж. Практическая единица измерения электрической энергии – киловатт час (кВт ч) представляет собой работу, совершаемую при постоянной мощности в 1 кВт в течении 1 ч.

При протекании электрического тока через проводник он нагревается. Количество тепла Q , выделяющегося в проводнике, определяется по формуле.

$$Q = I^2 R \cdot t. \text{ (Дж)}$$

Эта зависимость называется законом Джоуля – Ленца.

Законы Кирхгофа

Сложные электрические цепи обычно содержат несколько замкнутых контуров с источниками токов в каждом или хотя бы в некоторых из них. Конфигурация их может быть очень сложной, а число источников тока может превышать число контуров.

Для расчёта электрических цепей наряду с законом Ома применяется два закона Кирхгофа, являющихся следствиями закона сохранения энергии.

Методы расчета с применением законов Кирхгофа позволяют рассчитать электрическую цепь любой конфигурации и сложности, т.е. являются основными.

Первый закон Кирхгофа применяется для узлов электрической цепи и выражает баланс токов в них, в узле электрической цепи алгебраическая сумма токов равна нулю:

$$\sum I = 0.$$

Второй закон Кирхгофа применяется для контуров электрических цепей и выражает баланс напряжений в них: в контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений на сопротивлениях, входящих в этот контур:

$$\sum E = \sum I \cdot R.$$

Наиболее распространенными методами расчёта сложных цепей являются:

1) метод наложения; 2) метод контурных токов; 3) метод узлового напряжения.

1.2. ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Синусоидальный переменный ток и его основные параметры

Ток, изменяющийся во времени по значению и направлению, называется переменным. В практике применяют периодически изменяющийся по синусоидальному закону переменный ток. Синусоидальные величины характеризуется следующими основными параметрами: периодом, частотой, амплитудой, начальной фазой или сдвигом фаз. **Период** обозначается с буквой T – время (с), в течение которого переменная величина совершает полное колебание.

Частота обозначается с буквой f – число периодов в 1с. Единица измерения частоты – герц (Гц). Один герц равен одному колебанию в секунду.

Период и частота связаны зависимостью $T=1/f$.

В нашей стране применяют переменный ток с частотой 50 Гц. Это значит, что полярность зажимов источника переменного тока с частотой 50 Гц меняется 100 раз в 1с. Изменяясь во времени, синусоидальная величина (напряжения, ток, ЭДС) принимает различные значения. Значения величины в данный момент времени называют мгновенным.

Амплитуда – наибольшее значение синусоидальной величины. Амплитуда тока, напряжения и ЭДС обозначают прописными буквами с индексом I_m , U_m , E_m , а мгновенные значения – строчными буквами i , u , e .

Мгновенное значение синусоидальной величины, например тока, определяют по формуле $i=I_m \sin(\omega t + \varphi)$, где $\omega t + \varphi$ – фаза-угол, определяющей значение синусоидальной величины в данной момент времени; ω – круговая частота ($\omega=2\pi f$); φ – начальная фаза, то есть угол, определяющий значение величины в начальный момент времени.

Если синусоидальные величины имеют одинаковую частоту, но разные начальные фазы, то в этом случае говорят, что они сдвинуты по фазе. Разница начальных фаз $\varphi=\varphi_u-\varphi_i$ определяет угол

сдвига фаз. На рис. 2. приведены графики синусоидальных величин (тока и напряжения), сдвинутых по фазе.

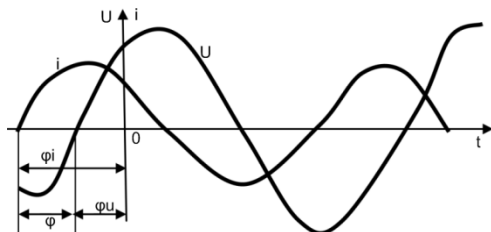


Рис 2. Графики синусоидальных напряжения u и тока i несдвинутых φ по фазе

Когда же начальные фазы двух величин равны ($\varphi_u = \varphi_i$), то разница $\varphi_u - \varphi_i = 0$, значит, сдвига фаз нет $\varphi = 0$ (рис 3). В цепи переменного тока, состоящей из резистора R , напряжения и ток совпадают по фазе: $u = U_m \sin \omega t$, $i = I_m \sin \omega t$.

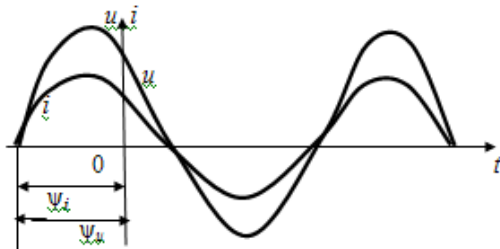


Рис 3. Графики синусоидальных ψ_u напряжения u и тока i несдвинутых по фазе

На ряду с аналитическим изображением периодически изменяющихся величин применяют векторные диаграммы. При построении векторной диаграммы выбирают основной вектор и направляют его произвольно, а остальные – в соответствии со сдвигом по фазе относительно основного. Длины векторов выбирают равными (в масштабе) амплитудам изображаемых периодических величин. Поворот вектора против часовой стрелки соответствует опережению по фазе, по часовой – отставание по

фазе. По правилам векторного сложения легко осуществляют сложение и вычитание векторов, а вместе с этим – сложение и вычитание самих переменных величин.

Цепи переменного тока с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью

На рис. 4. приведена векторная диаграмма тока и напряжения для цепи с резистором. Средняя за период мощность цепи с резистором называется активной мощностью и равно произведению действующих значений напряжения и тока.

Изменения тока в цепи с индуктивностью L (рис. 5) вызывает ЭДС самоиндукции, которая по закону Ленца противодействует изменению тока. При увеличении тока ЭДС самоиндукции действует навстречу току, а при убывании тока она действует направлению тока, противодействующая его уменьшению. Вследствие этого ток в цепи с катушкой индуктивности отстает от кривой напряжения на угол $\pi/2$ радиан (четверть периода), как показано на рис. 4.

Выражения закона Ома для цепи переменного тока, содержащей индуктивность имеет вид $I=U_L/X_L$. Величина X_L называется индуктивным сопротивлением цепи или реактивным сопротивлением индуктивности и измеряется в Омах.



Рис 4. Векторная диаграмма тока и напряжения для цепи с резистором

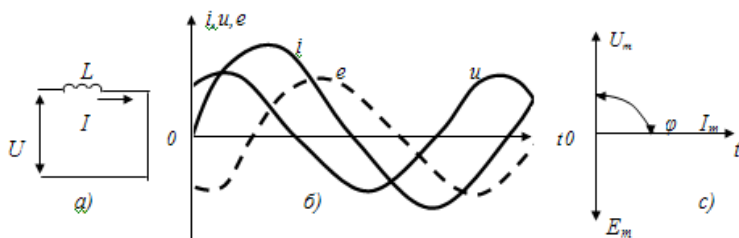


Рис 5. Электрическая цепь с катушкой индуктивности: а) схема, б) графики тока, напряжения и ЭДС самоиндукции. в) векторная диаграмма

Индуктивное сопротивление рассчитывают по формуле: $X_L = \omega L$, где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота L – индуктивность катушки.

При включении в цепь переменного тока конденсатора происходит непрерывное перемещение электрических зарядов. При увеличении напряжения ток в цепи конденсатора будет зарядным, а при уменьшении напряжения – разрядным. Поэтому ток в цепи, содержащей конденсатор, опережает напряжения на угол $\pi/2$ радиан. Выражение закона Ома для цепи переменного тока, содержащей емкость, имеет вид $I = U/X_c$. Величина X_c называется емкостным сопротивлением или реактивным сопротивлением емкости, которое определяется по формуле;

$$X_c = 1/2\pi fC = 1/\omega C.$$

При последовательном соединении катушки индуктивности и конденсатора их реактивное сопротивление вычисляется;

$$X = X_L - X_c.$$

Эта величина называется реактивным сопротивлением цепи. Геометрическая сумма активного и реактивного сопротивлений равна полному сопротивлению электрической цеп;

$$R^2 + X^2 = R^2 + (X_L - X_c)^2 = Z^2.$$

Эта зависимость показывает, что, используя значение R , X и Z , можно построить треугольник сопротивлений (рис 6).

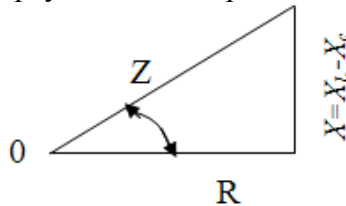


Рис 6. Треугольник сопротивлений электрической цепи переменного тока R

Мощность в цепях переменного тока

Умножая значение сторон этого треугольника на силу тока, а цепи, получают треугольник напряжений. Умножая сопротивления на квадрат тока, получают треугольник мощностей.

Электрические установки, работающие в сельском хозяйстве, потребляют активную и реактивную энергию. Лампы накаливания

и электрические нагревательные приборы потребляют практически только с активную энергию. Такие электроприёмники, как асинхронные двигатели, трансформаторы, дроссели, линии электропередачи и другие, потребляют активную и реактивную энергии. Электроустановки снабжаются энергией, вырабатываемой генераторами электростанций. Активная энергия преобразуется потребителями в другие виды энергии: тепловую, световую, механическую и др. Реактивная энергия пульсирует между генератором и потребителями, непроизводительно загружая электрическую сеть током.

Активная мощность электроприёмника определяют по формуле $P=UI\cos\varphi$ и измеряют в ваттах (**Вт**).

Реактивную мощность определяют по формуле $Q=UISin\varphi$ и измеряют в вольт – амперах реактивных (**вар**).

Полную мощность определяют по формуле $S=UI$ и измеряют в Вольт – Амперах (**ВА**).

Отношение активной мощности P к полной мощности S электроустановки называется коэффициентом мощности $\cos\varphi=P/S=P/\sqrt{P^2+Q^2}$ где S , P и Q – соответственно полная, активная и реактивная мощности.

Экономические значения коэффициента мощности и методы его повышения

Экономическое значение коэффициента мощности $\cos\varphi$ состоит в том, что от его величины определённым образом зависят капитальные и эксплуатационные расходы, а так же эффективность использования оборудования электрических установок.

Для выяснения влияния коэффициента мощности на экономические показатели электротехнических установок рассмотрим приемник энергии, работающий с постоянной активной мощностью при постоянном напряжении в сети. Ток в приемнике, а следовательно, и в проводах, соединяющих его с генератором электрической энергии, при этих условиях зависит от $\cos\varphi$.

$$P = UI \cos \varphi, \quad I = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi}.$$

Чем меньше $\cos \varphi$ приемника, тем больший ток должен быть в самом приемнике, в генераторе, в соединительных проводах, трансформаторе и других элементах сети электроснабжения.

Мощность тепловых потерь, согласно закону Ленца – Джоуля, пропорционально квадрату тока и сопротивлению проводов: $\Delta P = I^2 R$. Очевидно, чем больше ток приемника, тем больше потерь энергии в электрической цепи. Стоимость потерянной энергии входит в эксплуатационные расходы. Увеличение $\cos \varphi$ приемников ведет к уменьшению тока, сокращению потерь энергии и сокращению расходов.

Если электротехническая установка спроектировано с относительно низким $\cos \varphi$, то оборудование и провода должны быть выбраны на большие токи, чем при высоком $\cos \varphi$. Это значит, что оборудование должно быть установлено относительно больших размеров, а провода – большого сечения. Последнее повлечет за собой увеличение объема зданий, утяжеление фундаментов и опор и т.п.

1.3. РЕЗОНАНС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Общие сведения

При рассмотрении различных режимов электрических цепей могут быть случаи равенства реактивных сопротивлений ($X_L = -X_C$) при последовательном соединении и равенства реактивных проводимостей ($B_L = B_C$) при параллельном соединении участков, содержащих индуктивность и емкость. В этих случаях электрическая цепь находится в режиме резонанса, который характеризуется тем, что реактивная мощность на его входных зажимах равна нулю, ток и напряжения совпадают по фазе ($\varphi=0$). Резонанс возникает при определенной для данной цепи частоте источника энергии (частоте вынужденных колебаний), которая называется резонансной частотой ω_p .

Резонанс напряжений

Режим электрической цепи при последовательном соединении участков с индуктивностью и емкостью, характеризующихся равенством индуктивного и емкостного сопротивлений, называется *резонансом напряжений*.

Резонанс напряжений рассмотрим сначала на схеме идеализированной цепи (рис. 7), в которой последовательно с активным сопротивлением включены идеальные (без потерь) катушка L и конденсатор C . Реактивные сопротивления X_L и X_C (Рис 9. а) зависят от частоты вынужденных колебаний ω

$$X_L = \omega L, \quad X_C = 1 / \omega C.$$

При резонансе напряжений $X_L = X_C$; $\omega = \omega_p$:

$$\omega_p L = \frac{1}{\omega_p C}.$$

Отсюда определяется резонансная частота $\omega_p = \sqrt{\frac{1}{LC}}$.

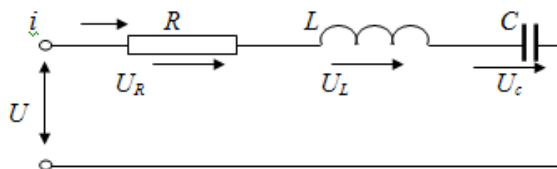


Рис. 7. К вопросу о резонансе напряжений

Резонанс в цепи можно установить двумя путями: изменением параметров L и C (одного из них или обоих вместе) при постоянной частоте источника или изменением частоты источника энергии при постоянных L и C .

В связи с этим большой практический интерес представляет зависимости напряжения и токов на отдельных элементах цепи от частоты. Эти зависимости называются резонансными кривыми.

Реактивные сопротивления с изменением частоты изменяются, как показано на рис. 8. При увеличении частоты X_L увеличивается пропорционально частоте, а X_C уменьшается по закону обратной пропорциональности.

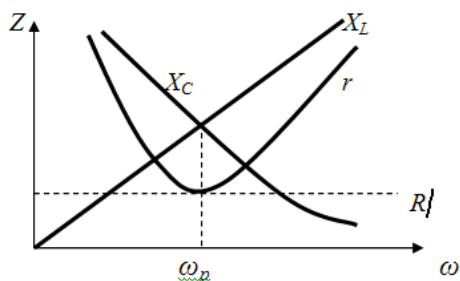


Рис. 8. Зависимости X_L , X_C , Z от ω

Соответственно полное сопротивление Z цепи при резонансной частоте ω_p оказывается наименьшим, равным активному сопротивлению R , резонансные явления широко применяются в радиотехнике.

Резонанс токов

Режим электрической цепи при параллельном соединении участков с индуктивностью и емкостью характеризующихся равенством индуктивной и емкостной проводимостей, называется резонансом токов.

Этот режим рассмотрим для схемы идеализированной цепи. В этой схеме параллельно активному сопротивлению R включены идеальная катушка L и конденсатор C , потери энергии в которых не учитываются (рис. 9).

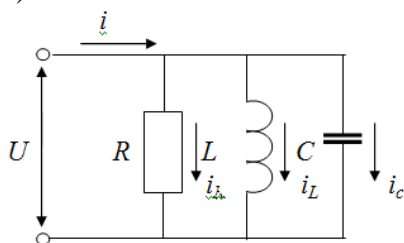


Рис 9. К вопросу о резонансе токов

Реактивная проводимость зависит от частоты вынуждённых колебаний.

Для рассматриваемой схемы активная проводимость $g=1/R$;

$$b_L=1/\omega L; b_C= \omega C.$$

При резонансе токов $\epsilon_L = \epsilon_C$; $\omega = \omega_p$; $1/\omega_p L = \omega_p C$.

Отсюда определяется резонансная частота $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Резонанс токов, так же как и резонанс напряжений, можно получить изменением параметров L и C или изменением частоты источника энергии.

На рис. 10. показаны зависимости проводимостей от частоты.

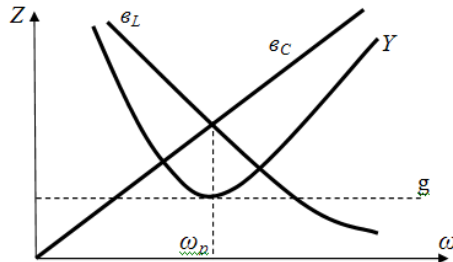


Рис. 10. Зависимости ϵ_L , ϵ_C , Y от ω

Полная проводимость цепи Y при резонансной частоте ω_p оказывается наименьшей, равной активной проводимости g .

1.4. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

Общие сведения

Трехфазной называется система, состоящая из трех электрических цепей одной частоты, ЭДС которые сдвинуты по фазе на одну треть периода (120°). Каждая отдельная цепь трехфазной системы образует фазу.

Рассмотрим схему устройства и принцип действия генератора трехфазного тока (рис. 11). Он состоит из двух основных частей: неподвижной – статора 1 и вращающихся – ротора 2. В пазы статора вложены три обмотки с одинаковым числом витков, сдвинутые на $2\pi/3$ рад (для двухполюсной машины). Каждый виток занимает два противоположенных пазы. На вал ротора жестко посажен двухполюсный электромагнит с полюсными

наконечниками N и S . Обмотка электромагнита питается постоянным током от специального источника.

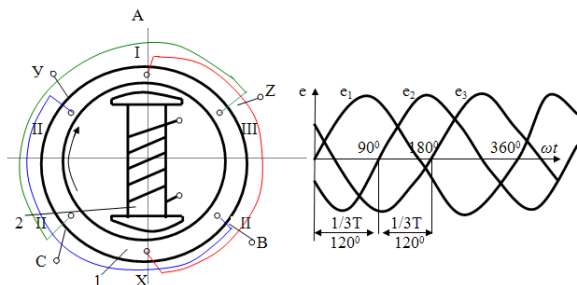


Рис. 11. Схема устройства и принцип действия генератора трехфазного тока

Ротор генератора приводится во вращение первичным двигателем (турбиной, двигателем внутреннего сгорания и др.), и в фазных обмотках статора индуцируются переменные ЭДС. Так как магнитное поле вращающегося ротора пересекает фазные обмотки не одновременно, то ЭДС обмоток сдвинуты по фазе относительно друг друга на одну треть периода $2\pi/3$.

ЭДС индуцируемые в фазах (обмотках), называют **фазными**. Каждая обмотка трехфазного генератора представляет собой самостоятельный источник и сокращенно называется **фазой** генератора. Все три обмотки фаз генератора имеют одинаковое число витков и изготовлены из провода одного сечения. Поэтому максимальные E_m и действующие E значения ЭДС этих обмоток одинаковы. Система трех ЭДС одинаковыми амплитудами и сдвинутыми по фазе относительно друг друга $1/3$ периода называется **симметричной**. Наоборот, при неравенстве амплитуд ЭДС будет **несимметричной**. На электрических схемах трехфазный генератор условно обозначают в виде трех обмоток, расположенных по отношению друг к другу под углом $2\pi/3$ рад. Начало обмотки первой фазы обозначают буквой А, а ее конец – Х; начало второй фазы – буквой В, конец – У; начало третьей фазы – буквой С, конец – Z.

Соединения трехфазной системы

Фазные обмотки трехфазного генератора соединяют по двум основным схемам, названным «звезда» и «треугольник»

Если концы всех трех обмоток генератора сведены в одну точку, а начала обмоток подключены к линейным проводам (рис. 12), то образуется соединение «звезда» (условное обозначение Y). Точку соединения концов обмоток 0 называют **нулевой точкой** генератора, провода, идущие от начала обмоток генератора к потребителю, – линейными, а провод, соединяющий нулевую точку – нулевым (нейтральным).

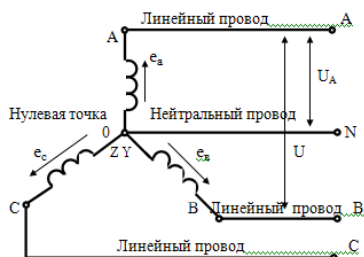


Рис. 12. Схема соединения обмоток генератора в звезду

В линейном проводе протекает линейный ток, а в обмотке (фазе) генератора – фазный. Между линейными проводами действуют линейные напряжения, обозначаемые U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , или в общем виде U . Напряжения между линейными проводами и нулевым проводом называют фазными и обозначают U_A , U_B , U_C , или в общем виде U_ϕ . Пренебрегая падением напряжения внутри обмоток трехфазного генератора, можно считать, что фазные напряжения равны фазным ЭДС.

При соединении звездой линейные токи равны фазным ($I=I_\phi$), а линейное напряжение больше фазных в $\sqrt{3}$ раза, то есть $U_L = \sqrt{3} U_\phi$.

Если конец первой обмотки трехфазного генератора соединить с началом второй, конец второй – с началом третьей и конец третьей – с началом первой (рис. 13), то получится соединение «треугольником» (условное обозначение Δ).

К общим точкам соединения обмоток генератор подключаются линейные провода.

При соединении обмоток генератора треугольником линейное напряжение равно фазному ($U_l = U_\phi$), а линейный ток больше фазного в $\sqrt{3}$ раза, то есть $I_l = \sqrt{3} I_\phi$.

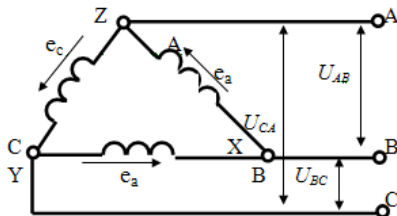


Рис. 13. Схема генератора при соединении обмоток в треугольник

Активная мощность трехфазной системы при соединении потребителей звездой и треугольником определяется как сумма мощностей отдельных фаз:

$$P = P_a + P_b + P_c \text{ или } P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}$$

При равной нагрузке всех фаз $P = 3P_\phi$. Мощность одной фазы $P_\phi = U_\phi I_\phi \cos\phi$, где ϕ – угол сдвига фаз между фазными напряжением и током.

Выражая фазные величины через линейные, получим формулу мощности для симметричной трехфазной системы (независимо от соединения звездой или треугольником):

$$P = 3P = \sqrt{3} UI \cos\phi.$$

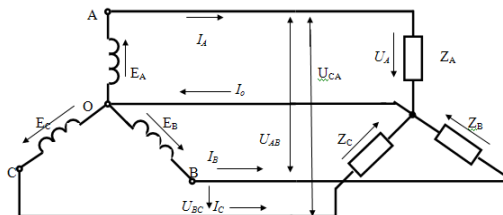


Рис. 14. Схема соединения трехфазного генератора и потребителей

Четырехпроводная трехфазная система (звезда с нулевым проводом), получившая широкое практическое применения (рис.

14), позволяет иметь два напряжения, отличающиеся друг от друга в $\sqrt{3}$ раз. К четырех проводной системе можно подключать трехфазные и однофазные потребители.

Для низковольтных электросетей приняты стандартные линейные напряжения 220В и 380В. При линейном напряжении $U_{л}=220\text{В}$, фазное напряжение $U_{\phi}=\frac{220}{\sqrt{3}}=127\text{ В}$, при $U=380\text{В}$

$$U_{\phi}=\frac{380}{\sqrt{3}}=220\text{ В}.$$

Способы включения приемников в сеть трёхфазного тока

В соответствии со стандартными напряжениями электросетей приемники энергии изготовляют на номинального напряжения приемника. Приёмники энергии нужно включать в сеть так, чтобы через них протекал номинальный ток (то есть ток, на который рассчитаны эти приёмники).

А сеть со стандартным линейным напряжением 380В лампы и электродвигатели, рассчитанные на номинальное напряжение 220В, включают по схеме звезда, а электродвигатели с номинальным напряжением 380В – по схеме треугольник.

В сеть с линейным напряжением 220В лампы и электродвигатели с номинальным напряжением 127В включают звездой, а лампы и электродвигатели с номинальным напряжением 220В – треугольником.

1.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Общие сведения

Электрические измерения широко используются в сельскохозяйственном производстве для оценки электрических величин (напряжения, силы тока, мощности, энергии, сопротивления, частоты), а также для оценки неэлектрических величин (температура, влажность, уровня, давления и др.).

Электроизмерительные приборы классифицируются по роду измеряемой величины, принципу действия, роду тока, точности и т.п. Название прибора определяется физической природой измеряемой величины.

В основу устройства прибора могут быть положены самые разнообразные действия электрического тока. В соответствии с этим существует большое число систем электроизмерительных приборов: *магнитоэлектрической, электромагнитной, ферродинамической, индукционной, электростатической*. Систему прибора на шкале обозначают специальным значком, представляющим собой схематический чертёж основного узла прибора, определяющего его принцип действия.

На шкалах приборов указывают род электрического тока, при котором могут использоваться прибор и условия эксплуатации.

Для электроизмерительных приборов класс точности прибора, т.е. приведенная погрешность указывают в виде числа.

На шкалах приборов также указывают рабочие положения шкалы прибора \uparrow - вертикальное, $\angle 60^\circ$ – градусов наклонное, \square - горизонтальное, испытательное напряжение в кВ, категория защищенности от внешнего магнитного поля – I и II и др.

По способу получения результата электрические измерения разделяют на прямые и косвенные. *Прямые* измерения выполняют приборами, шкала которых проградуирована в искомым величинах. *Косвенные* – выполняют приборами, дающими значения вспомогательных величин, используя которые можно вычислить искомую величину. Например, сопротивления,

мощность можно измерить с помощью омметра и ваттметра, а можно вычислить используя показания амперметра (силу тока) и вольтметра (напряжения).

Измерения электрических величин

В условиях сельскохозяйственного производства наиболее часто при эксплуатации электрифицированных машин и механизмов приходится контролировать значения следующих электрических величин: напряжения, силу тока, энергии и сопротивления.

Для измерения электрического тока служат приборы, так называемые амперметрами. Амперметр включается в цепь последовательно (рис. 15, а).

Для расширения пределов при измерениях на переменном токе используют измерительные трансформаторы (рис. 15, б).

Для расширения пределов при измерениях в цепях постоянного тока применяют шунты – электрические сопротивления, подключаемые параллельно к измерительному прибору (рис. 15, в).

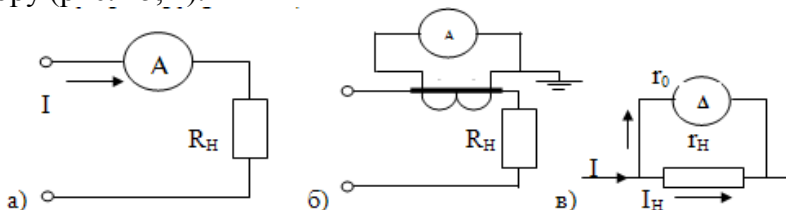


Рис. 15. Схема включения амперметра в электрическую цепь

Для измерения напряжения служат приборы, называемые вольтметрами. Вольтметры всегда включают между теми точками цепи, напряжения между которыми необходимо измерить (рис.16, а).

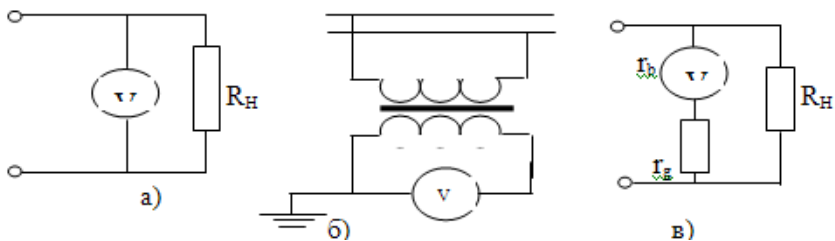


Рис. 16. Схема включения вольтметра

Для расширения пределов измерения вольтметров в цепях переменного тока применяют специальных измерительных трансформаторов напряжения (рис. 16, б), также добавочные сопротивления (рис. 16, в).

Измерения мощности. Мощность постоянного тока равно произведению силы тока на напряжение и выражается формулой $P=IU$. Следовательно мощность можно вычислить по показаниям амперметра и вольтметра.

Мощность переменного тока измеряется ваттметром (рис. 17).

Мощность трехфазной системы измеряется трехфазным ваттметром.

Ваттметр имеет две обмотки, одну токовую (т.о.) и другую обмотку напряжения (о.н.).

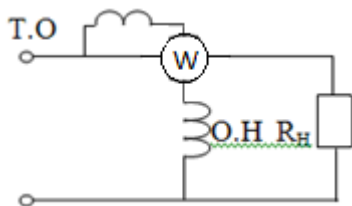


Рис. 17. Схема включения ваттметра

Измерения сопротивления. Для измерения сопротивлений предназначены омметры. Омметр служит для непосредственного измерения величины сопротивления. Однако величину сопротивления можно определить по показаниям амперметра и вольтметра, используя законы Ома.

Измерения электрической энергии. Для измерения электрической энергии служат счётчики. Счетчики бывают активной и реактивной энергии. Соответственно единица измерения электрической энергии – Вт сек; кВт час и Вар сек; кВт Вар час. В сельскохозяйственном производстве используются трехфазные счетчики.

1.6. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Назначение, устройство и принцип работы трансформатора

При передаче электрической энергии от электростанции к удаленным потребителям, напряжению повышают до несколько сотен тысяч вольт для уменьшения потерь энергии в проводах и снижения затрат на сооружения линий электропередачи.

На месте потребления (в хозяйствах) высокое напряжение понижают до потребительского 380В, 220В и 127В. Повышения и понижения напряжения осуществляются при помощи трансформаторов.

Трансформатор – это электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования (понижения или повышения) напряжения электрической энергии переменного тока той же частоты.

Простейший однофазный трансформатор (рис. 18) состоит из сердечника 2, набранного из отдельных листов электротехнической стали, на который намотаны две обмотки, изолированные друг от друга и от сердечника.

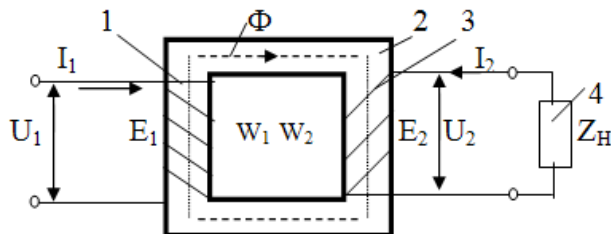


Рис. 18. Электромагнитная схема однофазного трансформатора
 1 – первичная обмотка, 2 – сердечник, 3 - вторичная обмотка,
 4 – нагрузка

Обмотку 1, подключаемую к источнику тока, называют *первичной*, а обмотку 3, которой присоединяют нагрузку 4 (потребитель) – *вторичной*. Принцип действия трансформатора основан на явлениях электромагнитной индукции. Когда по первичной обмотке протекает переменный ток поток Φ , который пересекает витки обеих обмоток индуцируя в первичной обмотке ЭДС самоиндукции E_1 , а во вторичной ЭДС взаимоиндукции E_2 . При неизменной частоте и неизменном магнитном потоке значения ЭДС в каждой обмотке зависят от числа ее витков.

Коэффициент трансформации трансформатора K определяется по формуле:

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_2},$$

где W_1 и W_2 – соответствующие число витков первичной или вторичной обмоток. При $K > 1$ трансформатор называется *понижающим*, при $K < 1$ *повышающим*. Мощности в первичной и во вторичной обмотках примерно равны между собой. $I_1 U_1 = I_2 U_2$ где I_1 I_2 соответственно токи в первичной и вторичной обмотках, U_1 U_2 соответственно напряжения первичной и вторичной обмоток.

Тогда коэффициент трансформации $K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_1}{I_2}$.

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2 \cos \varphi_2}{I_2 U_2 \cos \varphi_2 + P_M + P_{CT}},$$

где P_1 – активная мощность первичной обмотки, P_2 – активная мощность вторичной обмотки, P_M – потери в меди, P_{CT} – потери в стали.

Трансформаторы различают:

- по числу фаз – однофазные и трехфазные;
- по числу обмоток на фазах – двухобмоточные и трехобмоточные;

- по назначению—силовые и специальные (сварочные, измерительные, автотранс маторы);
- по способу охлаждения – с воздушным охлаждением (мощность до 10 кВа) и маслянным охлаждением.

Однофазные и трехфазные трансформаторы

Для электроснабжения небольших однофазных потребителей применяют *однофазные силовые трансформаторы* типа ОМС и ОМ мощностью от 4 до 25кВА с высшим напряжением от 6 до 35кВ и низшим 220В.

Питание ламп местного освещения и контрольно – измерительной аппаратуры осуществляется от трансформаторов типа ТОСБ (однофазный, сухой, с сердечником броневого типа, ОС и ОСО (однофазный, сухой, осветительный)). Преобразование трехфазного напряжения осуществляется в основном трехфазными трансформато-рами, которые состоят из трехстержневого магнитопровода (рис. 19).

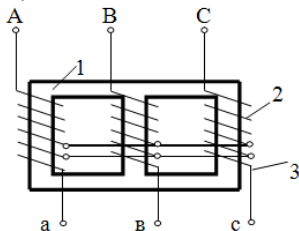


Рис. 19. Трехфазный силовой трансформатор
1-магнитопровод, 2-первичная обмотка, 3-вторичная обмотка.
А, В, С-высокая сторона, а,в,с-низкая сторона

На каждом стержне размещены две обмотки низшего 2 и высокого 3 напряжений, принадлежащие одной фазе. Процессы, проходящие в каждой фазе трехфазного трансформатора, ничем ниотличается от процессов в однофазном трансформаторе.

Обмотки низшего и высшего напряжения соединяют по различным схемам и группам, из которых наибольшее распространения получили “звезда-треугольник” (Y/Δ), “звезда-звезда с нулем” Y/Y.

В паспорте силового трансформатора указаны серия, номинальная мощность, номинальные напряжения, номинальный ток первичной и вторичной обмотки, частота тока, схема и группа соединения обмоток и напряжения короткого замыкания.

Специальные трансформаторы

Сварочные трансформаторы типа СТАН, СТН, ТС, СТШ, ТД используют при электрической сварке металлов на переменном токе. Напряжения питающей линий 380 или 280В, вторичное напряжения холостого хода 50-60В, рабочее 20-30В, потребляемая мощность 24-43кВА. Силу сварочного тока регулируют, изменяя воздушный зазор в сердечнике (СТАН, СТН, СТШ, ТД) или расстояние между обмотками (ТС). С увеличением воздушного зазора и уменьшением расстояния между обмотками сварочный ток увеличивается (или наоборот).

Автотрансформаторы (однофазные и трехфазные) применяют в различных схемах для повышения и понижения напряжения. В отличие от обычных двухобмоточных трансформаторов у них на фазу приходится по одной обмотке: обмотка НН является частью обмотки ВН, то есть обмотки НН и ВН имеют электрическую связь (рис. 20).

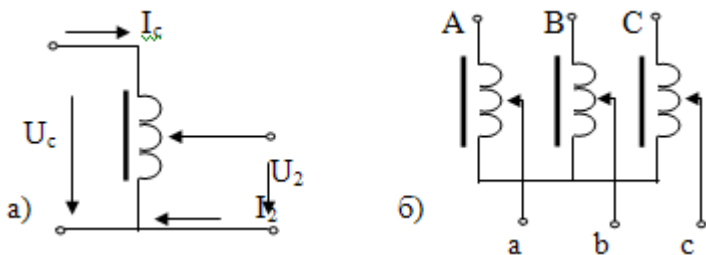


Рис. 20. Автотрансформаторы: а) однофазный, б) трехфазный

Многообмоточные трансформаторы. Вышеуказанные трансформаторы имеют одну первичную и несколько вторичных обмоток рассчитанные на различные напряжения (рис. 21).

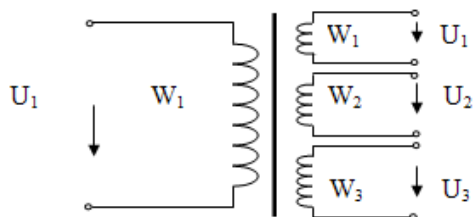


Рис. 21. Многообмоточный трансформатор напряжения

Измерительные трансформаторы тока и напряжения применяют для расширения пределов измерения приборов (амперметра, вольтметра, ваттметра, счетчиков и др.) в цепях переменного тока и обеспечения безопасности обслуживающего персонала. Один вывод вторичной обмотки и корпус трансформатора тока и напряжения заземляют.

1.7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Принцип действия и устройства машин постоянного тока

Принцип действия машин постоянного тока (МПТ) – генераторов и двигателей – основан на явлениях электромагнитной индукции и явлениях взаимодействия проводника, по которому проходит ток, с магнитным полем.

Следует заметить, что МПТ, как и электрические машины вообще, обладают свойством обратимости, то есть каждая машина может работать и в генераторном, и в двигательном режимах. Рассмотрим устройство электрической машины ПТ (рис. 22). Она состоит из двух основных частей: неподвижной части – статора и вращающегося – якоря.

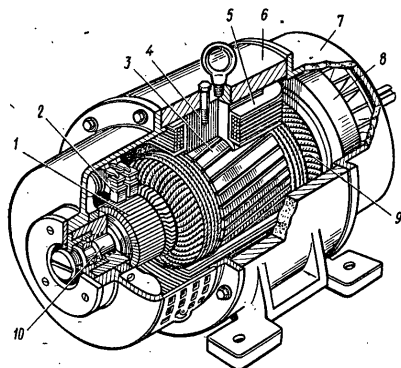


Рис. 22. Устройство электрической машины постоянного тока:
 1-коллектор, 2- щетки, 3-сердечник якоря, 4-сердечник
 главного полюса, 5-полюсная катушка, 6-статина, 7
 подшипниковый щит, 8-вентилятор, 9-обмотки якоря,
 10-вал якоря

Статор представляет собой станину 6, на внутренней поверхности которой укреплены сердечники главных полюсов 4 с полюсными катушками 5 и добавочные полюса.

Якорь состоит из вала 10, сердечника 3, обмотки 9 и коллектора 1.

Коллектор ГПТ служит для преобразования переменного тока в постоянный, а также для электрического соединения вращающейся обмотки якоря с внешней сетью при помощи неподвижных щеток 2. Вентилятор предназначен для создания воздушного потока охлаждающего машину. Щетки создают электрический контакт с поверхностного коллектора. Их располагают и закрепляют в щеткодержателях.

На станине или на переднем подшипниковом щите располагают панель (клеммный щиток), куда выводят концы обмоток. Выводы маркируют следующим образом: обмотка якоря – Я1 и Я2, обмотка возбуждения последовательная – С1 и С2, обмотка добавочных полюсов – Д1 и Д2. Цифрой 1 обозначают начала обмотки, а цифрой 2 – концы. К станине машины прикрепляют табличку (паспорт), где указаны все необходимые номинальные данные машины.

Генераторы постоянного тока

Генераторы постоянного тока с электромагнитным возбуждением разделяют на генераторы независимого возбуждения, в которых обмотка возбуждения питается от постороннего источника тока (аккумуляторные батареи или другая машина постоянного тока), и генераторы с самовозбуждением, в которых обмотка возбуждения получает питание непосредственно от схемы включения обмотки возбуждения различают (рис. 23):

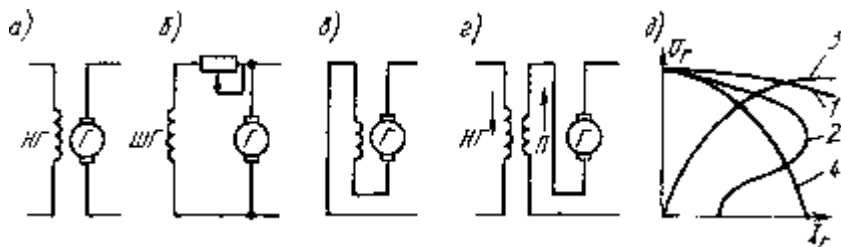


Рис. 23. Схемы возбуждения генераторов: а) независимое, б) параллельное, в) последовательное, г) смешанные

генераторы с параллельным возбуждением – у них обмотка возбуждения включена параллельно с обмоткой якоря;

генераторы с последовательным возбуждением – здесь обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря;

генераторы со смешанным возбуждением – у них две обмотки возбуждения, одна из которых включена параллельно обмотке якоря, а другая – последовательно.

Электродвижущую силу E (В) генератора постоянного тока определяют по формуле $E=C \cdot n \cdot \Phi$: где C – постоянная величина машины; n – частота вращения якоря, об/мин; Φ – магнитный поток, Вб.

Электродвигатели постоянного тока

Уже отмечалось, что электрические машины постоянного тока обратимы, они могут работать и двигателем. Поэтому

устройство электродвигателей постоянного тока такое же, как у генераторов.

Принцип действия электродвигателей постоянного тока основан на явлениях взаимодействия проводника, по которому проходит ток, с магнитным полем.

Когда электродвигатель подключают к источнику электрической энергии постоянного тока, в его обмотках появляется ток. В результате взаимодействия этого тока и магнитного поля, создаваемого полюсами электромагнитов, на валу якоря возникает электромагнитный момент M , вращающий якорь двигателя. При вращении обмотка якоря пересекает магнитное поле и в ней индуцируется ЭДС E_u , направленная противоположно току $I_{я}$ в якоре и напряжению источника (сети), в чем легко убедиться, применяя правило правой руки. По этому ЭДС индукции E_u называют противоэлектродвижущей силой (противо ЭДС) якоря.

Напряжение, приложенное к якору двигателя, уравнивается противо ЭДС якоря и падением напряжения в обмотке якоря:

$$U = E_u + I_{я} r_{я}.$$

Значения противо ЭДС E_u определяют по ранее приведенной формуле для ЭДС, наводимой в якорной обмотке генератора.

$$E_u = c \cdot n \cdot \Phi.$$

Решая эти уравнения относительно тока и частоты вращения, получим формулы, удобные для анализа свойств электродвигателей постоянного тока:

$$I_{я} = \frac{U - E_u}{r_{я}} = \frac{U - c \cdot n \cdot \Phi}{r_{я}},$$

откуда: $n = \frac{U - I_{я} r_{я}}{c \Phi}.$

Электромагнитный (вращающий) момент двигателя постоянного тока

$$M = k I_{я} \Phi_{я},$$

где k – постоянная величина машины.

В начальный момент пуска двигателя частота вращения якоря $n=0$, по этому протото ЭДС также равно нулю и ток в якоре двигателя определяется соотношением $I_{\text{пуск}} = \frac{U}{r_{\text{я}}}$.

С целью ограничения пускового тока в цепь обмотки якоря включают пусковой реостат. По мере разгона двигателя пусковой реостат выводят полностью.

Для регулирование частоты вращения электродвигателя служат регулировочный реостат в цепи обмотки возбуждения. Чтобы изменить направление вращения якоря двигателя, достаточно изменить направления тока в обмотке возбуждения или в обмотке якоря.

По способу возбуждения электродвигателя постоянного тока, так же как и генератора, в соответствии со схемой включения обмотки возбуждения относительно обмотки якоря подразделяют на двигатели параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

Электродвигатели постоянного тока преимущественно используется где требуется регулирование скорости в широких диапазонах (троллейбусах, трамваях, электропоездах, электрокарах и т.п.).

1.8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Общие сведения

Машины переменного тока – двигатели и генераторы – принято разделять на две большие группы – машины асинхронные и синхронные.

К группе асинхронных относят машины переменного тока, у которых частота вращающегося магнитного поля и частота вращения подвижной части (ротора) всегда различны и не могут быть одинаковыми по характеру основных физических процессов, происходящих в машине.

Группа синхронных машин объединяет машины переменного тока, частота вращения ротора которых всегда равна (синхронна) частоте вращающегося магнитного поля.

По числу фаз различают трехфазные и однофазные машины переменного тока.

Как и электрические машины, вообще, машины переменного тока обратимы, то есть каждая из них может работать и генератором и двигателем. Это, однако, не означает, что практически безразлично, в каком режиме (двигательном или генераторном) использовать данную машину. Синхронным, асинхронным, однофазным и трехфазным машинам переменного тока присущи специфические свойства, которые определяют сферу их применения. Так, более мощные и экономически трехфазные машины распространены значительно шире, чем однофазные. Синхронные машины используют в основном в качестве генераторов (ими оснащены все современные мощные электростанции): синхронные двигатели применяют реже, в отдельных процессах и производствах.

Из всех электрических машин наибольшее распространение и в промышленности, и в сельском хозяйстве получил трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (около 95 % всех двигателей асинхронные). Это простые по конструкции, надежные в работе, удобные в обслуживании и дешевые машины.

Асинхронные электродвигатели

Асинхронный электродвигатель состоит из двух основных частей, неподвижная часть – статор, подвижная часть – ротор. Статор состоит из чугунного или алюминиевого корпуса, сердечника с пазами, набранного из отдельных изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5мм, и обмотки, выполненной обычно из медной изолированной проволоки. В статор укладывают три обмотки (по числу фаз), сдвинутые в пространстве по отношению друг к другу на угол 120° , а их выводы помещают в коробку, размещенную на корпусе и определенным образом маркируют.

Ротор состоит из вала, сердечника и обмотки. В пазы сердечника ротора укладывают стержневую обмотку, но чаще заливают расплавленный алюминий. Это называется асинхронный двигатель с коротко замкнутым ротором. У электродвигателей с фазным ротором в пазы укладывают трехфазную обмотку, соединенную звездой.

Фазные обмотки статора могут быть соединены между собой звездой или треугольником в зависимости от напряжения сети (рис. 24).

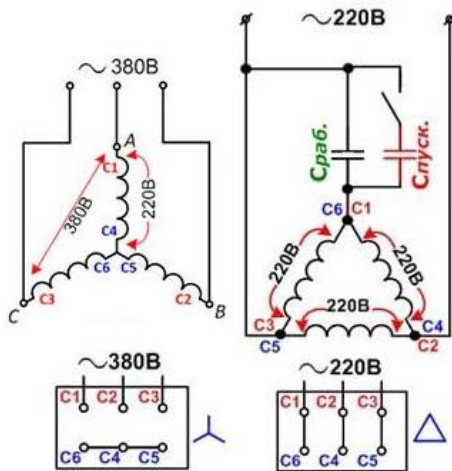


Рис. 24. Схема соединения обмоток трехфазного двигателя

Частоту вращения магнитного поля статора подсчитывают по формуле;

$$n_0 = \frac{60f}{P} = \frac{3000}{P},$$

где f – частота тока, равная 50Гц; P – число пар полюсов на фазу.

При перегрузке двигателя частота вращения ротора уменьшается, а ток возрастает. У асинхронного двигателя частота вращения ротора не совпадает с частотой вращения магнитного поля и меняется в зависимости от нагрузки.

Наиболее широко распространены двигатели с 3000, 1500 и 720 об/мин.

Величина, характеризующая отставание частота вращения ротора от частоты вращения магнитного поля статора называется **скольжением**. Оно обычно выражается в процентах и определяется по формуле;

$$S = \frac{n_0 - n_p}{n_0} \cdot 100\%,$$

где S – скольжение %, n_0 – частота вращения магнитного поля, n_p – частота вращения ротора.

Например, в паспорте ЭД указано, что его обмотка выполнена на напряжения 220/380В. Это означает что ЭД можно включаться в сеть напряжением 220В соединив обмотки треугольником, или в сеть 380В, соединив обмотки звездой.

Синхронные электродвигатели

У синхронных электродвигателей частота вращения ротора не зависит от нагрузки и равна частоте вращения магнитного поля статора, а скольжение S равно нулю. Они бывают трехфазные и однофазные. Устройство синхронного электродвигателя трехфазного тока аналогично синхронному генератору. Они не имеют пускового момента, поэтому в ротор таких электродвигателей укладывают короткозамкнутую пусковую обмотку, состоящую из медных стержней.

Принцип действия синхронного электродвигателя основан на взаимодействии магнитного поля статора и ротора: северный полюс статора увлекает за собой южный полюс ротора, а южный полюс статора – северный полюс ротора. Синхронные электродвигатели применяют в непрерывно действующих установках для привода машин и механизмов, требующих постоянство частоты вращения, в качестве *синхронных компенсаторов* для улучшения $\cos \varphi$. Синхронный компенсатор – это синхронный двигатель работающих перевозбуждением в холостом ходе.

РАЗДЕЛ II. ЭЛЕКТРОНИКА

Введение

Электроника – наука, занимающаяся изучением взаимодействия электронов с электромагнитными полями, разработкой методов создания электронных приборов и устройств, используемых для передачи, обработки и хранения информации.

Электроника, прежде всего, обеспечивает информационные потребности человеческого общества. Развитие производительных сил и производственных отношений основано на создании новых видов техники и технологии, тесно связано с развитием средств информатики. История развития средств информационного общения между людьми состоит из нескольких этапов: жест и мимика, звуковая речь, письменность, книгопечатание. В настоящее время все эти средства передачи, обработки и хранения информации используются человеческим обществом. Переход к каждому новому способу передачи информации приводил к резкому увеличению производительных сил общества. Электроника резко увеличила скорость, объемы передачи информации на громадные расстояния.

Электроника в своем развитии прошла четыре периода.

Первый период развития радиотехники начался с изобретения беспроводного телеграфа – радио А.С. Поповым в 1895г. Аппаратура средств связи этого периода состояла из пассивных элементов: проводов, катушек индуктивности, магнитов, резисторов, конденсаторов, электромеханических приборов (переключателей, реле и т.п.).

Второй период начался с изобретения Ли де Форестом в 1906г. лампового триода. Триод явился первым активным электронным прибором, способным различного рода преобразованиям электрических сигналов, а главное – усилению мощности. Благодаря усилению слабых сигналов с помощью электронных ламп стало возможным передача телефонных разговоров на большие расстояния. Элементы аппаратуры

электроники второго периода – электронные лампы, резисторы, конденсаторы, трансформаторы.

Третий период развития радиотехники начался с изобретения в 1948 году Дж. Бардином, В. Браттейном и В. Шокли биполярного транзистора – основного активного (усилительного) элемента твердотельной (полупроводниковой) электроники. Транзистор способен выполнять все функции электронной лампы.

Четвертый период развития радиотехники начался с создания электронных устройств и систем на базе интегральных микросхем (ИМС) и носит название *периода микроэлектроники*.

2.1. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОНИКИ

РЕЗИСТОРЫ

Один из самых распространенных радиоэлементов – **резистор** (англ. resistor от лат. resisto – сопротивляюсь) по этому его часто называют сопротивлением.

Резисторы используются в качестве нагрузочных и токоограничительных элементов, делителей напряжения, добавочных сопротивлений и шунтов в измерительных цепях и т.д.

Основным параметром резистора является его сопротивление, характеризующее его способность препятствовать протеканию электрического тока. Сопротивление измеряется в Оммах. Участок проводника обладает сопротивлением в 1 Ом, если при приложенном напряжении в 1 Вольт через него протекает ток в 1 Ампер.

Резисторы подразделяются на постоянные, регулируемые и саморегулируемые (нелинейные).

Постоянный резистор обозначают символом в виде прямоугольника. Номинальную мощность рассеивания обозначают специальным знаком, помещенным внутри символа (Рис. 25, а).

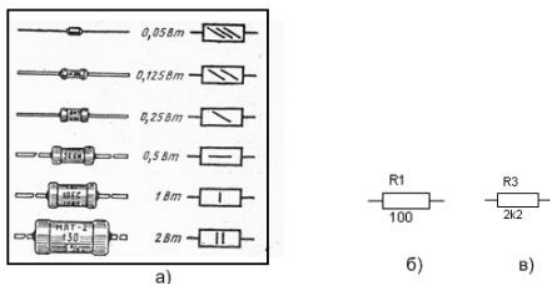


Рис. 25. Символы и обозначение резисторов

На принципиальной схеме номинальное сопротивление резистора и его порядковый номер указывают рядом с условным обозначением (Рис. 25, б).

Если номинальное сопротивление указано целым числом, без размерности, то единица измерения Ом ($R1=100 \text{ Ом}$).

Если номинальное сопротивление указано дробным числом с нулевой дробной частью, без размерности, то единица измерения $\text{мОм} = 10 \cdot 10^6 \text{ Ом}$.

На резисторах отечественного производства номинальное сопротивление, допустимое отклонение от него, а если позволяют размеры то, и номинальную мощность рассеивания указывают в виде полного или сокращенного (кодированного) обозначения. В кодированной системе:

буквой Е, R, Ω ,	обозначают	Ом,
к, кОм, к Ω , кило Ом		103 Ω ,
м, мОм, м Ω , мега Ом		106 Ω ,
г, гОм, г Ω , гига Ом		109 Ω .

Если номинальное сопротивление выражено дробным числом, то буква указывающая порядок ставится вместо запятой (рис. 25, в).

$$R3 = 2\text{k}2 = 2,2 \text{ к}\Omega = 2200 \Omega,$$

$$M10 = 0,1 \text{ м}\Omega = 100 \text{ к}\Omega.$$

Кодированные буквенные обозначения установлены и для допустимых отклонений сопротивления от номинального.

Допустимому отклонению $\pm 1\%$ соответствует буква:

Р	$\pm 2\%$
Л	$\pm 5\%$
И	$\pm 10\%$
С	$\pm 20\%$

Постоянные резисторы делятся на 5 основных типов:

УЛМ – углеродистые лакированные малогабаритные (-60°C $+100^{\circ}\text{C}$) в качестве токопроводящего вещества используют углеродистые соединения. Сверху резисторы покрывают эмалью зеленого цвета.

ВС – влагостойкие сопротивления ($-60^{\circ}\text{C} \dots +100^{\circ}\text{C}$). В отличие от УЛМ – гибкие выводы расположены в плоскости торца чашки.

МЛТ – металлизированные лакированные теплостойкие ($-60^{\circ}\text{C} \dots +120^{\circ}\text{C}$).

Внешне они похожий на УЛМ, углеродистое напыление заменено напылением металла с большим удельным сопротивлением. Сверху резисторы покрывают эмалью красного цвета.

ПЭ – металлизированные эмалированные.

ПЭВ – проволочные эмалированные влагостойкие.

Резистор ПЭВ мощные, для облегчения конструкции за основу берут керамический полый цилиндр, поверх которого наматывают провод с большим удельным сопротивлением. Концы обмотки зажимают хомутами, которые являются контактными площадками.

Резистор технологически представляет собой керамический полый или сплошной цилиндр, покрытый токопроводящим веществом (2). Для увеличения сопротивления покрытие прорезается спиральной канавкой.

Электрический контакт обеспечивается обжимными чашками (1), выполненными из меди или латуни. Припайка к схеме осуществляется с помощью гибких медных выводов (4), которые

обычно обслуживаются или серебрятся (Рис. 26). Диаметры D и d выбираются исходя из мощности, рассеиваемой резистором $P=J^2R$.

Первые три типа устроены следующим образом: на керамический стержень напыляется слой токопроводящего вещества, с

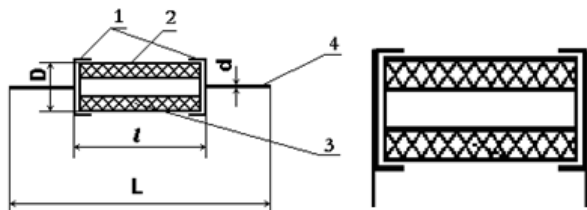


Рис. 26. Резисторы ПЭВ мощные

обеих сторон одеваются контактные колпачки или хомутики и покрывают лаком.

Последние два типа отличаются от предыдущих тем, что вместо напыления наматывают провод из материала с большим удельным сопротивлением.

Регулируемые резисторы, т. е. резисторы (Рис. 27), сопротивление которых можно изменять в определенных пределах. Применяют в качестве регуляторов усиления, громкости, тембра и т. д. Общее обозначение такого резистора состоит из базового символа и знака регулирования, причем независимо от положения символа на схеме стрелку, обозначающую регулирование, проводят в направлении снизу вверх под углом 45° .

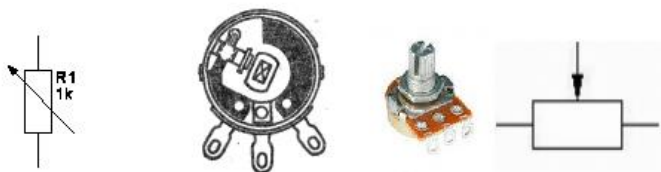


Рис. 27. Регулируемые и переменные резисторы

Переменные резисторы, как правило, имеют минимум три вывода (Рис. 27): от концов токопроводящего элемента и от щеточного контакта, который может перемещаться по нему.

Существуют две схемы включения переменных резисторов в электрическую цепь. В одном случае их используют для регулирования тока в цепи, и тогда регулируемый резистор называют *реостатом*, в другом — для регулирования напряжения, тогда его называют *потенциометром*.

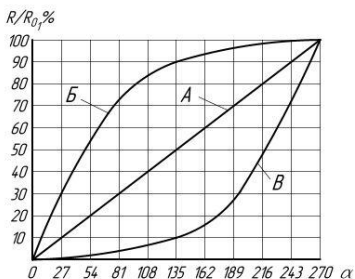


Рис. 28. Логарифмические зависимости сопротивления

Промышленность выпускает непроволочные переменные резисторы, в основном, трех групп: **А** - с линейной, **Б** - с логарифмической и **В** - с обратнологарифмической зависимостью сопротивления между правым и средним выводами от угла поворота оси φ (Рис. 28).

Для регулирования громкости, тембра, уровня записи в стереофонической аппаратуре, частоты в измерительных генераторах сигналов и т. д. применяют **сдвоенные переменные резисторы** (Рис. 29), сопротивления которых изменяются одновременно при повороте общей оси (или перемещении движка).

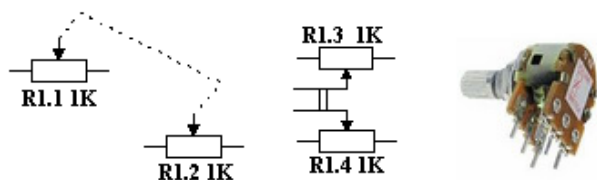


Рис. 29. Сдвоенные переменные резисторы

Подстроечные резисторы — разновидность переменных (Рис. 30). Узел щеточного контакта таких резисторов приспособлен для управления отверткой. Условное обозначение подстроечного резистора наглядно отражает его назначение: это, по сути, постоянный резистор с отводом, положение которого можно изменять.

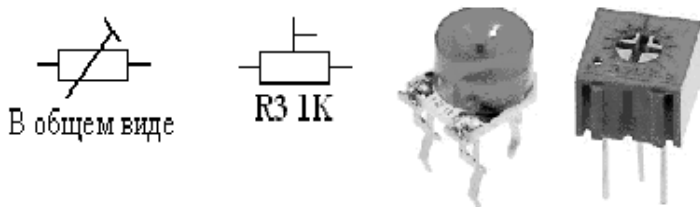


Рис. 30. Подстроечные резисторы

Нелинейные резисторы - в радиотехнике, электронике и автоматике находят применение нелинейные саморегулирующиеся резисторы (Рис. 31), изменяющие свое сопротивление под действием внешних электрических или неэлектрических факторов: к ним относятся угольные столбы, варисторы, терморезисторы и т.д.

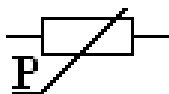


Рис. 31. Нелинейные резисторы

Терморезисторы, как говорит самоназвание, характеризуются тем, что их сопротивление изменяется под действием температуры (Рис. 32). Токопроводящие элементы этих резисторов изготавливают из полупроводниковых материалов.



Рис. 32. Терморезисторы

Зависимость сопротивления терморезисторов от температуры имеет нелинейный характер, поэтому на схемах их изображают в виде нелинейного резистора со знаком температуры t° .

Нелинейные полупроводниковые резисторы, известные под названием **варисторов** (VARI (ABLE)) - переменный, изменяют свое сопротивление при изменении приложенного к ним напряжения (Рис. 33).

Существуют варисторы, у которых увеличение напряжения всего в 2—3 раза сопровождается уменьшением сопротивления в несколько десятков раз.



Рис. 33. Нелинейные полупроводниковые резисторы

В системах автоматики широко используют **фоторезисторы** (рис. 34)— полупроводниковые резисторы, изменяющие свое сопротивление под действием света.

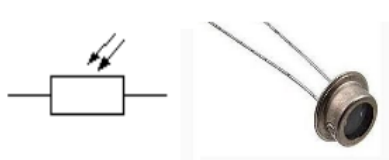


Рис. 34. Фоторезистор

КОНДЕНСАТОРЫ

Конденсаторы (от лат. condense - уплотняю, сгущаю) - это радиоэлементы с сосредоточенной электрической емкостью (рис. 35), образуемой двумя или большим числом электродов (обкладок), разделенных диэлектриком (специальной тонкой бумагой, слюдой, керамикой и т. д.).

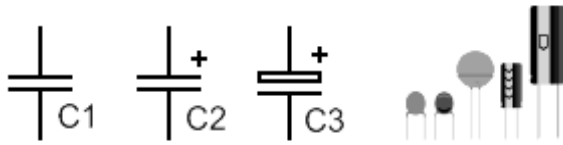


Рис. 35. Конденсаторы

Емкость конденсатора зависит от размеров (площади) обкладок, расстояния между ними и свойств диэлектрика.

$$C = \frac{\varepsilon_a \cdot S}{d},$$

$$\varepsilon_a = \varepsilon \cdot \varepsilon_0.$$

ε_a – **абсолютная диэлектрическая проницаемости** (величина, показывающая зависимость электрической индукции от напряжённости электрического поля);

ε – **относительная диэлектрическая проницаемости** — безразмерная величина, характеризующая свойства изолирующей (диэлектрической) среды. Она показывает, во сколько раз взаимодействие между зарядами в однородной среде меньше, чем в вакууме.

ε_0 – **диэлектрическая постоянная** = $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/М

Важным свойством конденсатора является то, что для переменного тока он представляет собой сопротивление, величина которого уменьшается с ростом частоты.

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C}.$$

Как и резисторы, конденсаторы разделяют на конденсаторы постоянной емкости, конденсаторы переменной емкости (КПЕ), подстроечные и саморегулирующиеся. Наиболее распространены конденсаторы **постоянной емкости**. Их применяют в колебательных контурах, различных фильтрах, а также для разделения цепей постоянного и переменного токов и в качестве блокировочных элементов.

Основная единица измерения емкости – **фарад** – емкость такого единенного проводника, потенциал которого возрастает на

один вольт при увеличении заряда на один кулон. Это очень большая величина, которая на практике не применяется. В радиотехнике используют конденсаторы емкостью от долей пикофарада (пф) до десятков тысяч микрофарад (мкФ).

«Микроф» - $10^{-6}\Phi$; «Наноф» - $10^{-9}\Phi$; «Пикоф» - $10^{-12}\Phi$

В сокращенной маркировке единицы измерения емкости обозначают буквами **М; Н; П**.

Условное графическое обозначение конденсатора постоянной емкости – две параллельные линии – символизирует его основные части: две обкладки и диэлектрик между ними (рис. 35).

В зависимости от размеров конденсатора номинальную емкость и допустимое отклонение указывают в полной или сокращенной (кодированной) форме. В сокращенной маркировке единицы измерения емкости обозначают буквами:

м или М	$10^{-6}\Phi$,
п или Н	$10^{-9}\Phi$,
р или П	$10^{-12}\Phi$.

При этом букву ставят после числа (если оно целое), либо на месте запятой (**4,7 пФ — 4П7; 22 пФ — 22П** и т.д.).

Полярность включения оксидного конденсатора показывают на схемах знаком «+», изображаемого у той обкладки, которая символизирует анод.

Конденсаторы переменной емкости (рис. 36) состоит из двух групп металлических пластин, одна из которых может плавно перемещаться по отношению к другой.

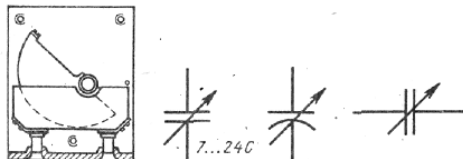


Рис. 36. Конденсаторы переменной емкости

Подстроечные конденсаторы. Основное требование к ним - плавность изменения емкости и надежность фиксации ротора в установленном при настройке положении.

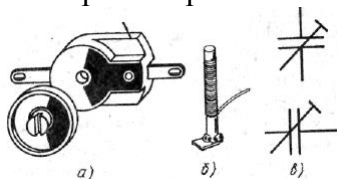


Рис. 37. Подстроечные конденсаторы

Конструкция керамического подстроечного (рис. 37, а) конденсатора (КПК) одного из наиболее распространенных типов. Он состоит из керамического основания (статора) и подвижно закрепленного на нем керамического диска (ротора). Подстроечные конденсаторы обозначают на схемах основным символом, перечеркнутым знаком подстроечного регулирования (рис. 37, в).

Саморегулируемые конденсаторы. Используя в качестве диэлектрика специальную керамику, диэлектрическая проницаемость которой сильно зависит от напряженности электрического поля, можно получить конденсатор, емкость которого зависит от напряжения на его обкладках (рис. 38, а).

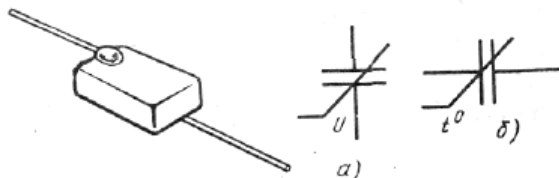


Рис. 38. Саморегулируемые конденсаторы

Аналогично построено обозначение **термоконденсаторов** применяемых в электронных наручных часах. Фактор, изменяющий емкость такого конденсатора— температуру среды — обозначают символом t° (рис. 38, б).

Конденсаторы могут быть различных типов. К примеру: **КТ** – конденсатор трубчатый (рис. 39, а), **КД** – дисковый (рис. 39, б).



Рис. 39. Разновидность конденсаторов

Емкостное сопротивление конденсатора вычисляется по формуле:

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot c} \approx \frac{1}{6,28 \cdot f \cdot c}$$

Конденсаторы бывают типа **МБМ** – металлобумажные малогабаритные

КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ И ДРОССЕЛИ

К числу элементов, без которых невозможно построить радиоприемник, телевизор, магнитофон и многие другие радиоприборы, относятся катушки и дроссели. Их важной характеристикой является **индуктивность**. В цепях переменного тока катушки и дроссели ведут себя как резисторы, сопротивление которых растет с увеличением частоты. Единица измерения индуктивности – **генри (Гн)**, **миллигенри (1 мГн = 10⁻³ Гн)**, **микрогенри (1 мкГн = 10⁻⁶ Гн)** и **наногенри (1 нГн = 10⁻⁹ Гн)**.

Важным параметром, характеризующим качество катушки, является **добротность**, численно равная отношению ее индуктивного сопротивления к переменному току данной частоты к сопротивлению постоянного тока. Чтобы увеличить добротность в катушку вводят **магнитопровод (сердечник)** из специального магнитного материала.

Катушка индуктивности и дроссель (рис. 40) - как и конденсатор, используются в цепях переменного тока. Это соленоид с сердечником или без него, который является либо элементом колебательного контура, либо применяется для создания индуктивного сопротивления переменному току. В

первом случае его называют катушкой индуктивности, во втором – дросселем.

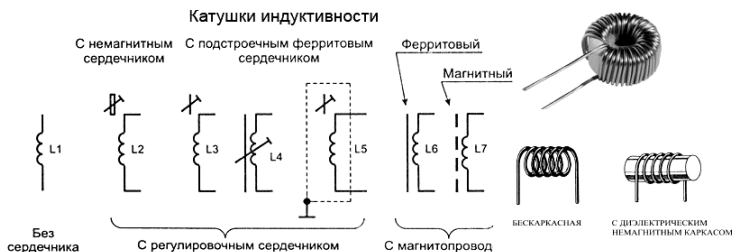


Рис. 40. Катушка индуктивности и дроссель

Коэффициент L называется *индуктивностью цепи* и зависит только от конфигурации цепи и материала проводника, находящегося в переменном магнитном поле. Индуктивность цилиндрической катушки из N витков, площадью поперечного сечения S и длиной l , в среде с магнитной проницаемостью μ равна (в единицах СИ):

Индуктивность L измеряется в генри ($1 \text{ Гн} = 1 \text{ В}\cdot\text{с}/\text{А}$).

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

В цепях переменного тока катушки и дроссели ведут себя как резисторы, сопротивление которых растет с увеличением частоты.

$$X_L = \omega \cdot L.$$

Магнитопроводы для катушек, предназначенных для работы на радиочастотах, изготавливают из специальных материалов: ферритов и магнитодиэлектриков.

Свойства катушки индуктивности:

- Скорость изменения тока через катушку ограничена и определяется индуктивностью катушки.
- Сопротивление (модуль импеданса) катушки растет с увеличением частоты текущего через неё тока.
- Катушка индуктивности при протекании тока запасает *энергию* в своём магнитном поле. При отключении внешнего источника тока катушка *отдаст запасенную энергию*, стремясь

поддерживать величину тока в цепи. При этом напряжение на катушке нарастает, вплоть до пробоя изоляции или возникновения дуги на коммутирующем ключе.

Катушка индуктивности обладает реактивным сопротивлением модуль которого:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL,$$

где L — индуктивность катушки, ω — циклическая частота протекающего тока. Соответственно, чем больше частота тока, протекающего через катушку, тем больше её сопротивление.

Если на одном сердечнике находится два и более катушек индуктивности, то такое устройство называется *трансформатором*.

Трансформатор (от лат. transformo — преобразовывать) — это статическое электромагнитное устройство (рис. 41), имеющее две или более индуктивно связанных обмоток на каком-либо магнитопроводе и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем (напряжений) переменного тока в одну или несколько других систем (напряжений) переменного тока без изменения частоты системы (напряжения) переменного тока

Конструктивно трансформатор может состоять из одной (автотрансформатор) или нескольких изолированных проволочных, либо ленточных обмоток (катушек), охватываемых общим магнитным потоком, намотанных, как правило, на магнитопровод (сердечник) из ферромагнитного магнито-мягкого материала.

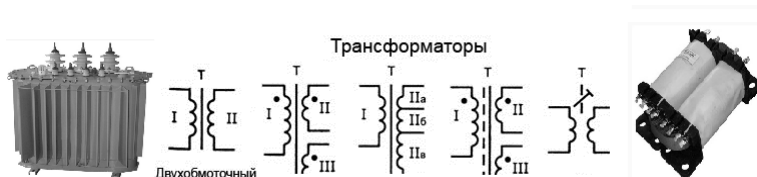


Рис. 41. Трансформатор

Виды трансформаторов:

Силовой трансформатор — трансформатор, предназначенный для преобразования электрической энергии в

электрических сетях и в установках, предназначенных для приёма и использования электрической энергии.

Автотрансформатор — вариант трансформатора, в котором первичная и вторичная обмотки соединены напрямую, и имеют за счёт этого не только электромагнитную связь, но и электрическую. Обмотка автотрансформатора имеет несколько выводов (как минимум 3), подключаясь к которым, можно получать разные напряжения.

Трансформатор тока — трансформатор, питающийся от источника тока. Типичное применение — для снижения первичного тока до величины, используемой в цепях измерения, защиты, управления и сигнализации, кроме того, трансформатор тока осуществляет гальваническую развязку (отличие от шунтовых схем измерения тока).

Трансформатор напряжения — трансформатор, питающийся от источника напряжения. Типичное применение — преобразование высокого напряжения в низкое в цепях, в измерительных цепях. Применение трансформатора напряжения позволяет изолировать логические цепи защиты и цепи измерения от цепи высокого напряжения.

Импульсный трансформатор — это трансформатор, предназначенный для преобразования импульсных сигналов с длительностью импульса до десятков микросекунд с минимальным искажением формы импульс

Разделительный трансформатор — трансформатор, первичная обмотка которого электрически не связана со вторичными обмотками. Силовые разделительные трансформаторы предназначены для повышения безопасности электросетей, при случайных одновременных прикосаниях к земле и токоведущим частям или нетокведущим частям, которые могут оказаться под напряжением в случае повреждения изоляции.

Согласующий трансформатор — трансформатор, применяемый для согласования сопротивления различных частей (каскадов) электронных схем при минимальном искажении формы сигнала. Одновременно согласующий трансформатор обеспечивает создание гальванической развязки между участками схем. Тип

трансформатора характеризуется *коэффициентом трансформации*, который равен отношению числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной:

$$\begin{aligned}U_1/U_2 &= N_1/N_2 = K, \\P_1 &= P_2, \\U_1 I_1 &= U_2 I_2,\end{aligned}$$

где U_1 и U_2 - входное и выходное напряжения, N_1 и N_2 - число витков первичной и вторичной обмоток.

Обычный понижающий трансформатор был изобретен в 1878г. русским ученым Павлом Николаевичем Яблочковым.

2.2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Энергетические зоны

Устройства современной электроники изготавливаются из полупроводниковых материалов. Полупроводники бывают кристаллические, аморфные и жидкие. В полупроводниковой технике в основном используют кристаллические полупроводники (монокристаллы с примесями не более одного атома примеси на 10^{10} атомов основного вещества). Обычно к полупроводникам относят вещества, по удельной электрической проводимости σ занимающие промежуточное положение между металлами и диэлектриками (отсюда происходит их название). При комнатной температуре удельная электрическая проводимость их составляет от 10^{-8} до 10^5 См/м (Сименс на метр). У металлов $\sigma = 10^6 - 10^8$ См/м, у диэлектриков $\sigma = 10^{-8} - 10^{-13}$ См/м. Основная особенность полупроводников заключается в возрастании удельной электрической проводимости при повышении температуры, а у металлов она падает. Свойства полупроводников описываются с помощью ***зонной теории твердого тела***.

Энергия валентного электрона W как и любого электрона в атоме дискретна, или квантована, т.е. электрон может иметь некоторое разрешенное значение энергии, называемое

энергетическим уровнем. Энергетические уровни разделены зонами запрещенной энергии для электронов. Их называют **запрещенными зонами.** Так как в твердом теле соседние атомы находятся очень близко друг от друга, это вызывает смещение и расщепление энергетических уровней, в результате чего образуются энергетические зоны, называемые **разрешенными.** В энергетической зоне число разрешенных уровней равно числу атомов в кристалле. Ширина разрешенных зон обычно равна нескольким электрон – вольтам (электрон-вольт – это энергия, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов 1В). Минимальный уровень энергии в разрешенной зоне называют дном (W_c), а максимальный потолком (W_v).

На рис. 42. приведена зонная энергетическая диаграмма полупроводника. Ширина запрещенной зоны ΔW_z является важнейшим параметром полупроводника.

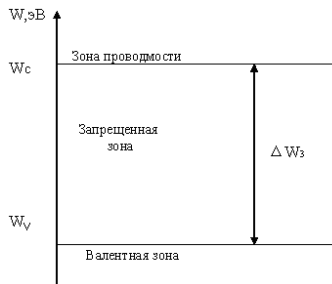


Рис. 42. Зонная энергетическая диаграмма

Для полупроводников, которые наиболее часто используются в электронике, ΔW_z (эВ) равна: для германия – 0,67эВ, для кремния – 1,12эВ и для арсенида галлия – 1,38эВ.

У диэлектриков ширина запрещенной зоны $\Delta W_z \geq 2\text{эВ}$, а у металлов разрешенные зоны сливаются, так что у них ее нет.

Верхняя разрешенная зона называется **зоной проводимости**, то есть электроны, обладающие соответствующей энергией, под действием внешнего электрического поля могут перемещаться в объеме полупроводника, создавая электропроводность. Электроны с энергией, соответствующей одной из энергий зоны

проводимости, называются *электронами проводимости* или *свободными носителями заряда*. Нижняя разрешенная зона называется *валентной зоной*.

При температуре абсолютного нуля (0 К) все энергетические уровни в валентной зоне полупроводника заняты электронами, а все энергетические уровни в зоне проводимости свободны.

2.3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Диодом называют электропреобразовательный прибор, который, как правило, содержит один или несколько электрических переходов и два вывода для подключения к внешней цепи. В справочниках по полупроводниковым приборам диоды классифицируются по применению в радиоэлектронной аппаратуре или по назначению.

Выпрямительные диоды

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного напряжения источников питания в постоянное. Основное свойство выпрямительных диодов – односторонняя проводимость, наличие которой определяет эффект выпрямления.

Частотный диапазон использования выпрямительных диодов очень широк. Поэтому диоды классифицируют по диапазону рабочих частот.

Выпрямительные низкочастотные диоды (НЧ диоды) предназначены для преобразования переменного тока промышленной частоты (50Гц) в постоянный. Выпрямительные диоды обычно подразделяются на диоды малой, средней и большой мощности, рассчитанные на выпрямленный ток до 0,3А, от 0,3 до 10А и свыше 10А соответственно.

Выпрямительные высокочастотные диоды (ВЧ диоды) предназначены для нелинейного электрического преобразования сигналов на частотах до десятков и сотен мегагерц. ВЧ диоды используются в детекторах высокочастотных сигналов, смесителях, схемах преобразователей частоты и т.п.

Диоды с барьером Шоттки распространены в переключательных источниках питания, так как позволяют увеличить рабочую частоту переключения до 100 кГц и более, уменьшить массогабаритные характеристики РЭА и повысить КПД источников питания.

Стабилитроны

Стабилитроны - это полупроводниковые диоды, принцип работы которых основан на том, что при обратном напряжении на $p-n$ - переходе в области электрического пробоя напряжение на нем изменяется незначительно при значительном изменении тока. Условное обозначение стабилитрона приведено на рис. 43, б. Стабилитрон предназначен для стабилизации напряжения в схемах.

Основным электрическим параметром стабилитрона является напряжение стабилизации $U_{СТ}$, которое остается практически постоянным при изменении тока в широких пределах от $I_{СТ.min}$ до $I_{СТ.max}$.

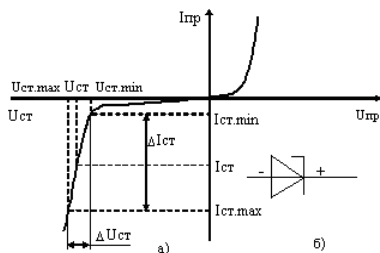


Рис. 43. Стабилитрон

Варикапы

Варикап- предназначен для использования в качестве электрически управляемой емкости. Принцип работы варикапа основан на использовании зависимости барьерной емкости электрического перехода от обратного напряжения (рис. 44).

Условное графическое изображение варикапа;

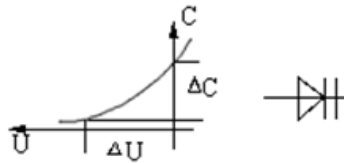


Рис. 44. Варикап

Основное применение варикапов – электронная перестройка частоты колебательных контуров.

Туннельные диоды

Туннельным диодом - называют полупроводниковый (Рис. 45, а) прибор, сконструированный на основе вырожденного полупроводника, в котором при обратном и небольшом прямом напряжении возникает туннельный эффект и вольт–амперная характеристика имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Устройство туннельных диодов в принципе не отличается от устройства других диодов, но для их изготовления применяют полупроводниковые материалы с содержанием примеси до 10^{20} см^{-3} .

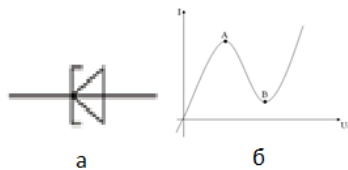


Рис. 45. Туннельный диод

ВАХ туннельного диода приведена на рис. 45, б. Участок АВ характеризуется отрицательным дифференциальным сопротивлением. Если включить туннельный диод в контур электрической цепи, то при определенных соотношениях между параметрами контура и величиной отрицательного сопротивления в этой цепи возможны усиление или генерация колебаний.

Диоды оптоэлектроники

Оптоэлектроника – раздел электроники, изучающий теорию и практическое применение устройств, в которых прием,

передача и обработка информации происходит путем преобразования световых сигналов в электрические и наоборот. Элементами оптоэлектроники являются фотодиод и светодиод.

Фотодиодом называется фотоэлектрический прибор с одним $p-n$ - переходом (Рис. 46). Фотодиод может включаться в схему как с внешним источником питания (фотодиодный режим), так и без него.

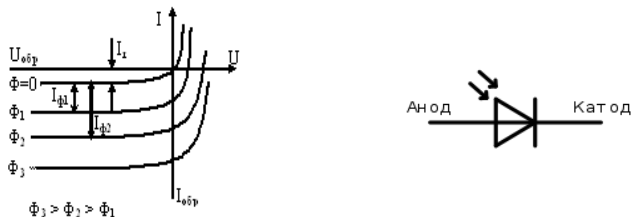


Рис. 46. Фотодиод

Светодиоды – это излучающие полупроводниковые приборы (Рис. 47) с одним $p-n$ - переходом, преобразующие электрическую энергию в некогерентное световое излучение. Излучение появляется в результате рекомбинации пар: электрон – дырка. Рекомбинация наблюдается, если $p-n$ - переход включен в прямом направлении.



Рис. 47. Светодиод

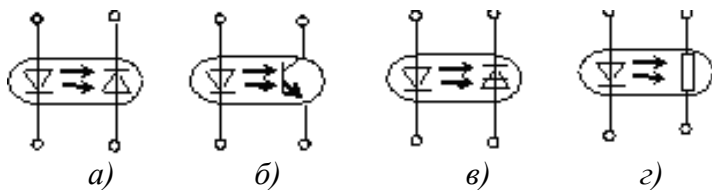
Длина волны (λ) излучаемого света однозначно определяется энергией кванта, которая при излучательной рекомбинации приблизительно равна ширине запрещенной зоны полупроводника. Для светодиодов, изготовленных из арсенида галлия, $\lambda = 0,9-1,4$ мкм. Диоды красного, желтого и зеленого свечения изготавливают на основе фосфида галлия, с фиолетовым свечением – на основе карбида кремния и т.д.

Оптоэлектронная пара, или **оптонара**, содержит светоизлучатель и фотоприемник конструктивно связанные через оптическую среду. Прямая оптическая связь от излучателя к

фотоприёмнику исключает все виды электрической связи между этими элементами.

Оптроны

Под действием входного электрического сигнала светодиод генерирует световое излучение, а фотоприемник (фотодиод, фоторезистор и т.п.) генерирует ток под действием освещения.



На рис. 48. приведено схемное изображение оптопары, состоящей из светодиода и фотодиода (а), фототранзистора (б), фототиристора (в), фоторезистора (г). Оптопара используется как элемент электрической развязки в цифровых и импульсных устройствах, устройствах передачи аналоговых сигналов, системах автоматики для бесконтактного управления высоковольтными источниками питания и др.

2.4. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Общие сведения

Биполярным транзистором - называют активный полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими **p-n**-переходами и тремя электродами (внешними выводами). Прохождение тока в транзисторе обусловлено движением зарядов обоих знаков – электронов и дырок.

Биполярный транзистор содержит три полупроводниковые области с чередующимися типами проводимости (рис. 49) **p-n-p** (а) или **n-p-n** (б). В дальнейшем будем рассматривать наиболее распространенную **n-p-n** структуру биполярного транзистора.

Наиболее сильно легированную крайнюю область транзистора (**n** - типа) называют **эмиттером**, назначение ее –

инжекция носителей в среднюю область (p – типа), называемую **базой**. Другую крайнюю область (n – типа) называют **коллектором**. Он менее легирован, чем эмиттер, и предназначен для экстракции носителей из базовой области (рис. 49). Переход между эмиттером и базой называют эмиттерным переходом - ЭП, а $p - n$ - переход между коллектором и базой – коллекторным переходом - КП.

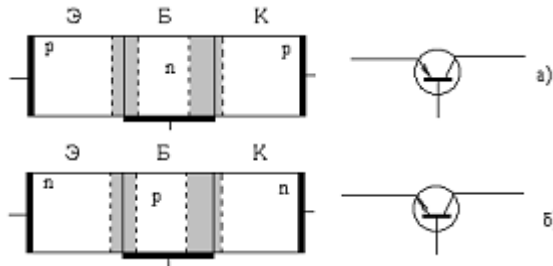


Рис. 49. Биполярные транзисторы

С помощью внешних источников напряжения ($U_{ЭБ}$, $U_{КБ}$) эмиттерный переход смещается в прямом направлении, а коллекторный – в обратном (Рис.50). В этом случае говорят, что транзистор функционирует в **активном**, или нормальном режиме, когда проявляются его усилительные свойства.

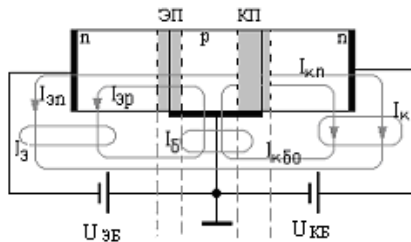


Рис. 50. Эмиттерный и коллекторный переход транзистора

Если эмиттерный переход смещен в обратном направлении, а коллекторный в прямом, то такое включение биполярного транзистора называется **инверсным**, или обратным. При работе

транзистора в цифровых схемах транзистор может работать в режиме **насыщения** (оба перехода включаются в прямом направлении), либо в режиме **отсечки** (оба перехода включены в обратном направлении).

Схемы включения биполярного транзистора

При включении транзистора в схему один из его выводов делают общим для входной и выходной цепей, поэтому схемы включения бывают: **с общей базой (ОБ)** (рис. 51, а); **с общим эмиттером (ОЭ)** (рис. 51, б); **с общим коллектором (ОК)** (рис. 51, в). При этом считается, что потенциал общего вывода равен нулю. Полярности источников напряжения и направление токов транзистора соответствуют активному режиму работы транзистора. Схема включения с ОБ имеет ряд недостатков и используется крайне редко.

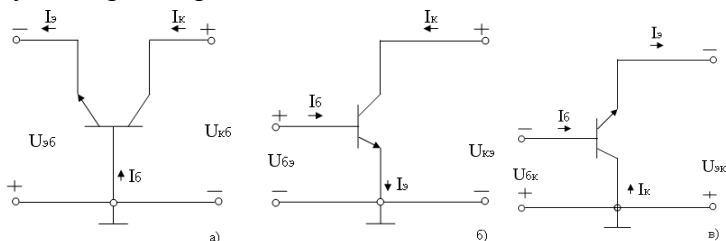


Рис. 51. Схемы включения биполярного транзистора

Действие биполярного транзистора основано на использовании трех явлений:

- инжекции носителей из эмиттера в базу;
- переноса инжектированных в базу носителей к коллекторному переходу;
- экстракции инжектированных в базу и дошедших до коллекторного перехода неосновных носителей из базы в коллектор.

Для расчета цепей с биполярными транзисторами используют h - параметры: транзистор представляют четырехполюсником и записывают уравнения четырехполюсника в h - параметрах.

$$\Delta U_{БЭ} = h_{11} \Delta I_Б + h_{12} \Delta U_{КЭ}$$

$$\Delta I_K = h_{21} \Delta I_B + h_{22} \Delta U_{KЭ}$$

Коэффициенты четырехполюсника (h - параметры) выражаются следующим образом:

$h_{11} = \Delta U_{БЭ} / \Delta I_B$ при $U_{KЭ} = \text{const}$ - входное сопротивление $R_{вх}$, Ом;

$h_{12} = \Delta U_{БЭ} / \Delta U_{KЭ}$ при $I_B = \text{const}$ - безразмерный коэффициент обратной связи по напряжению (α);

$h_{21} = \Delta I_K / \Delta I_B$ при $U_{KЭ} = \text{const}$ - безразмерный коэффициент передачи тока (β);

$h_{22} = \Delta I_K / \Delta U_{KЭ}$ при $I_B = \text{const}$ - выходная проводимость ($1 / R_{вых}$), Сименс.

h - параметры приводятся в справочниках, а также могут быть определены по семейству входных и выходных характеристик транзистора.

Коэффициенты усиления по току α и β являются статическими параметрами, поскольку представляют собой отношение постоянных токов. Помимо них широко используются дифференциальные коэффициенты усиления, которые представляют собой отношение приращений токов. Статический и дифференциальный коэффициенты усиления α несколько отличаются друг от друга и поэтому их различают, когда это принципиально необходимо. Зависимость коэффициента усиления по току от напряжения на коллекторе обусловлена эффектом Эрли.

Дифференциальный коэффициент усиления по току для схемы с ОЭ $\beta = \frac{dI_K}{dI_B}$ обладает температурной зависимостью, что

обусловлено зависимостью времени жизни неосновных носителей в области базы. Поскольку с повышением температуры замедляются процессы рекомбинации, обычно наблюдается рост коэффициента усиления транзистора по току. Температурная нестабильность характеристик транзистора является его существенным недостатком.

К физическим параметрам помимо рассмотренного выше коэффициента передачи тока относят дифференциальные сопротивления переходов, объемные сопротивления областей, коэффициент обратной связи по напряжению, емкости переходов.

Эмиттерный и коллекторный переходы транзистора представляются своими дифференциальными сопротивлениями. Поскольку эмиттерный переход смещен в прямом направлении, его дифференциальное сопротивление $r_{\text{Э}}$ можно определить, используя

$$r_{\text{Э}} = \frac{dU_{\text{ЭБ}}}{dI_{\text{Э}}} = \frac{\varphi_T}{I_{\text{Э}}},$$

где $I_{\text{Э}}$ – постоянная составляющая тока. Оно имеет малое значение (при токе 1мА сопротивление $r_{\text{Э}}$ составляет 20-30Ом), уменьшается с ростом тока и увеличивается с повышением температуры.

Поскольку коллекторный переход в транзисторе смещен в обратном направлении, ток $I_{\text{К}}$ слабо зависит от напряжения $U_{\text{КБ}}$. Поэтому дифференциальное сопротивление коллекторного перехода $r_{\text{К}} = \frac{dU_{\text{КБ}}}{dI_{\text{К}}} = 1\text{МОм}$. Сопротивление $r_{\text{К}}$ в основном

обусловлено эффектом Эрли, оно обычно уменьшается с ростом рабочих токов.

Сопротивление базы $r_{\text{Б}}$ составляет несколько сотен Ом. При достаточно большом токе базы падение напряжения на сопротивлении базы снижает напряжение на эмиттерном переходе по сравнению с внешним напряжением между выводами базы и эмиттера.

Сопротивление коллектора для маломощных транзисторов составляет десятки Ом, а для мощных – единицы Ом. Из за высокой концентрации примесей сопротивление эмиттерной области пренебрежимо мало, по сравнению с сопротивлением базы

Коэффициент обратной связи по напряжению в схеме с ОБ определяется как $\alpha_{\text{О.Б}} = \frac{d|U_{\text{ЭБ}}|}{dU_{\text{КБ}}}$ (при $I_{\text{Э}} = \text{const}$), а в схеме с ОЭ как

$\alpha_{\text{О.С}} = \frac{d|U_{\text{БЭ}}|}{dU_{\text{КЭ}}}$ (при $I_{\text{Б}} = \text{const}$). По абсолютному значению

коэффициенты приблизительно одинаковы и в зависимости от концентрации и технологии изготовления транзисторов составляют

$$\alpha_{o.c} = 10^{-2} - 10^{-4}.$$

Частотные свойства биполярного транзистора определяются временем пролета неосновных носителей заряда через базу и временем перезарядки барьерных емкостей переходов. Относительная роль этих факторов зависит от конструкции и режима работы транзистора, а также от сопротивлений во внешних цепях.

Для очень малых входных сигналов и активного режима работы биполярный транзистор можно представить в виде линейного четырехполюсника и описать этот четырехполюсник некоторой системой параметров. Эти параметры принято называть h – параметрами. К ним относятся: h_{11} – входное сопротивление транзистора при коротком замыкании на выходе; h_{12} – коэффициент обратной связи по напряжению при разомкнутом входе; h_{21} – коэффициент усиления (передачи) по току при коротком замыкании на выходе; h_{22} – выходная проводимость при разомкнутом входе. Все h – параметры легко и непосредственно измеряются.

В ранней литературе по электронике частотным зависимостям малосигнальных параметров придавалось очень большое значение. В настоящее время выпускаются транзисторы, обеспечивающие нормальную работу при частотах до 10ГГц. В таких случаях для получения требуемых частотных характеристик схемы достаточно лишь правильно выбрать по справочнику тип транзистора.

ТИРИСТОРЫ

Тиристоры - это полупроводниковые приборы с тремя и более р-п переходами (Рис. 52). Они предназначены, для использования в качестве электронных ключей в схемах коммутации больших по величине токов при сравнительно невысоком быстродействии.

В зависимости от вида ВАХ и способа управления тиристоры делят на диодные и триодные.

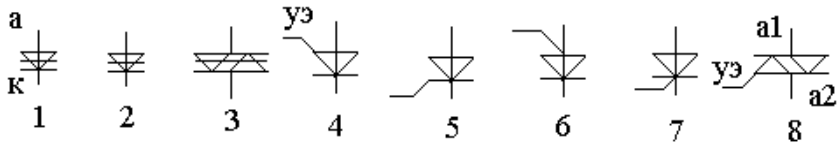


Рис. 52. Виды тиристоров

Диодные тиристоры имеют два вывода – анод и катод. В зависимости от способа управления включения или выключения тока, они бывают: запираемые в обратном направлении (1), проводящие в обратном направлении (2) и симметричные (3). Последние представляют собой встречно- последовательное соединение тиристоров запираемых в обратном направлении. Они способны пропускать ток как в прямом, а также в обратном направлении. Они имеют два вывода, которые называются: анод 1, и анод 2.

Триодные тиристоры называют просто – тиристорами. Они имеют три вывода. Появляется третий *управляющий электрод* (УЭ). Напряжение, подаваемое на него, позволяет управлять включением (выключением) тиристора. Триодные тиристоры подразделяют на: запираемые в обратном направлении с управлением по аноду (4) и по катоду (5); проводящие в обратном направлении с управлением по аноду (6) и по катоду (7); симметричные (двунаправленные).

Структура тиристора, ВАХ и принцип работы. Простейший диодный тиристор имеет четырехслойную *p-n-p-n* структуру (рис. 53, б), изготовленную из кремния (Рис. 53).

Область p1, на которую подают положительное напряжение от источника напряжения E_a называется – анодом, область p2 – катодом, а области p1 и p2 – базами. Между p и n областями возникают *p-n* переходы П1, П2, П3. Переходы П1 и П3 называются эмиттерными, переход П2 – коллекторным т.к. он смещен в обратном направлении. Аналогом тиристора может служить схема (рис. 53, а) из двух биполярных транзисторов VT1 – *p-n-p* типа и VT2 - *n-p-n* типа.

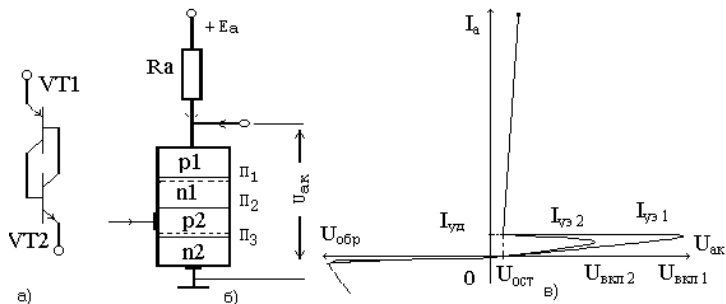


Рис. 53. Структурная схема тиристора, VAX

Вольт - амперная характеристика тиристора приведен на рисунке (рис. 53, в). На ней можно выделить четыре участка.

Участок – 1. На аноде положительное напряжение. Переходы П1 и П3 смещены в прямом направлении, а переход П2 – в обратном.

Все внешнее напряжение будет приложено к КП. Ток коллекторного перехода $I_{кп}$ – это малый по величине ток неосновных носителей заряда. Он является суммой токов, вызванных инжекцией через эмиттерные переходы П1 и П3, и небольшого собственной обратного тока перехода П2:

$$I_{кп} = \alpha_1 I_{\beta 1} + \alpha_2 I_{\beta 2} + I_{к0},$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты инжекции тока эмиттерных переходов П1 и П3. Очевидно, что $I_{кп} = I_{\beta 1} = I_{\beta 2} = I_a$ т.к. это элементы одной электрической ветви, а потому

$$I_a = I_{к0} (1 - (\alpha_1 + \alpha_2)).$$

Пока напряжение между анодом и катодом относительно мало $\alpha_1 + \alpha_2 \ll 1$, $I_{кп} = I_{к0}$, сопротивление прибора велико (до сотен килоОм). Так как коэффициенты передачи тока эмиттерных переходов П1 и П3 (α_1 и α_2) с увеличением $U_{ак}$ растут. Следовательно, растет и ток I_a .

Участок 2. При определенном значении напряжения $U_{ак}$, называемом напряжением включения $U_{вкл}$, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$. Ток должен стремиться к бесконечности. Начинается лавинообразное увеличение токов. Транзисторы переходят в режим полного

насыщения. Сопротивление прибора при этом падает до единиц Ом. Но наличие в цепи анода резистора с сопротивлением R_a ограничивает ток на уровне E_a/R_a .

Участок 3, соответствует ВАХ диода в открытом состоянии. Это проводящее состояние динистора, $I_a \cong E_a / R$.

Участок 4. Переходы П1 и П3 смещены в обратном направлении. Ток тиристора мал. Это запертое т.е. непроводящее ток, состояние тиристора. При достаточно больших обратных напряжениях, обратный ток тиристора резко возрастает – это тепловой пробой. В основном за процесс включения тиристора отвечает переход П3 и процессы в области p_2 . Обычно выполняется условие $\alpha_2 > \alpha_1$. Это достигается конструкцией – $W_{n1} > W_{p2}$, где $W_{n1} > W_{p2}$ – толщина базы $n1$ и $p2$.

Тиристор имеет дополнительный – управляющий электрод. Если, используя управляющий электрод, с помощью внешнего источника напряжения или тока в цепи эмиттерного перехода П3 обеспечить протекание тока, то это вызовет увеличение α_2 и сумма $\alpha_1 + \alpha_2$ приблизится к единице при меньшем напряжении $U_{ак}$, чем при отсутствии тока в цепи управляющего электрода. Следовательно, изменяя ток управляющего электрода, I_{y3} можно изменять $U_{вкл}$. После открывания тиристора ток I_{y3} может быть уменьшен до нуля, но прибор останется во включенном состоянии. Чтобы выключить прибор, надо прервать или значительно уменьшить на определенное время проходящий через, него ток – условие выключения тиристора $I_a < I_{уд}$.

В последнее время начат выпуск ЭП с пятислойной структурой (симисторов). Их ВАХ одинакова в 1-м и 3-м квадрантах, а управление включением обеспечивается с помощью одного (общего) электрода.

2.5. УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Существует три способа включения транзистора: это с ОЭ; с ОБ и с ОК.

Полевые транзисторы являются разновидностью полупроводниковых, используются для усиления и генерации электрических колебаний различных частот.

Рассмотрим способ включения транзистора в схеме с ОЭ:

Во избежание искажений нужно в базовой цепи задать некоторый начальный ток – **ток смещения**:

Чем больше напряжение смещения, тем больше коллекторный ток, а значит, и мощность, потребляемая транзистором больше. Для экономного расходования батареи смещение на базу следует подавать как можно меньше (Рис. 54).

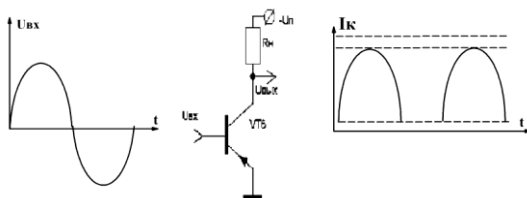


Рис. 54. Ток смещения

Смещение на базу устанавливается с учетом уровня входного сигнала: чем меньше этот сигнал, тем меньше можно открывать транзистор, экономя при этом энергию батарей.

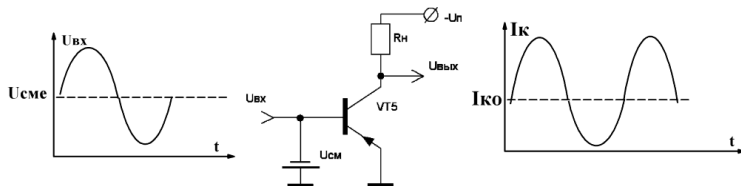


Рис. 55. Введения постоянного тока смещения

Существуют различные способы введения в базовую цепь постоянного тока смещения (Рис. 55).

Можно для этого использовать отдельную батарею, а можно подать на базу необходимое постоянное напряжение от коллекторной батареи (Рис. 56, а):

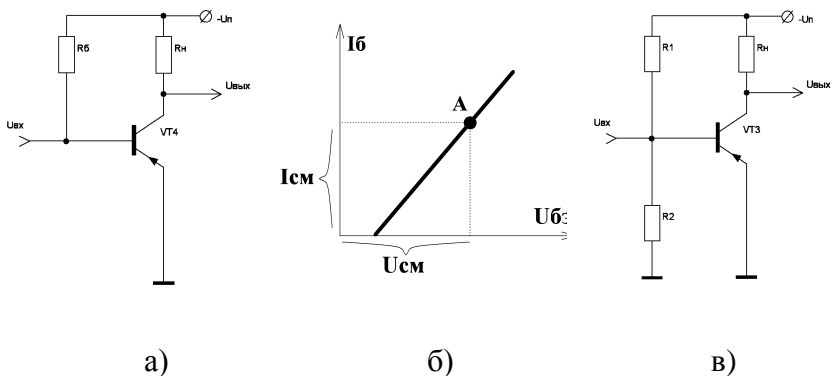


Рис. 56. Схема создание напряжения смещения
Используя для экономии источники:

$$R_1 = (U_{п} - U_{см}) / i_{б}.$$

Это способ используются ограничено. Поскольку рабочая точка нестабильная. Рабочая точка зависит от напряжения источника тока и от температуры полупроводника (Рис. 56, б).

Напряжения смещение задается с помощью резисторного делителя источника питания (Рис. 56, в).

$$i_{дел} = U_{п} / R_1 + R_2.$$

Ток делителя выбирают приблизительно в 2 – 5 раз больше чем ток смещения.

$$I_{дел} \approx (2 \div 5) I_{б}.$$

В последовательных цепях течет один и тот же ток.

Падения напряжения $U_{R1} = R_1 i_{дел}$,

$$U_{R2} = R_2 i_{дел},$$

$$U_{п} = U_{R1} + U_{R2} \Rightarrow U_{п} = U_{п} - U_{R1},$$

$$U_{R2} = U_{см}.$$

При прохождении электрического тока по проводнику, он нагревается, согласно закона Джоуля - Ленца количество теплоты, выделяющееся в проводнике $Q = I^2 \cdot R \cdot t$.

Даже если транзистор закрыт, в цепи коллектора течет неуправляемый ток. Причем при увеличении температуры на 10°C , ток возрастает в 2 раза.

Сопротивление металлических проводников увеличивается с повышением температуры. А у полупроводников сопротивление сильно уменьшается.

В цепи делителя течет ток, резисторы R_1 и R_2 нагревается, но сопротивление их остается постоянным. В цепи коллектора тоже течет ток, элементы этой цепи тоже нагреваются. R_n сопротивление постоянное, величина его не зависит от температуры, а сопротивление транзистора с ростом температуры уменьшается. Ток коллектора при этом возрастает, а следовательно возрастает количество выделяемой теплоты. Прямая зависимость, чем больше температура, тем больше ток и наоборот. Прямая зависимость тока от температуры. Транзистор лавинообразно нагревается, наступает температурный пробой, транзистор выходит из строя. Следовательно температуру полупроводниковых приборов необходимо стабилизировать.

Существует 4 способа **термостабилизации**:

1. Полупроводниковый прибор устанавливают на дополнительный *теплоотвод* (радиатор) -это пластина с большой площадью поверхности и хорошей теплопроводностью. В качестве материала радиатора используют медь, латунь, алюминий или железо.

2. Используются если недостаточно первого. Осуществляет принудительный *обдув* с помощью электровентилятора.

3. Используются если недостаточно первых двух. Полупроводниковые приборы погружают в жидкостные ванны.

4. Автоматическая термостабилизация. В эмиттерную цепь транзистора включают дополнительное сопротивление R_z (Рис. 57)

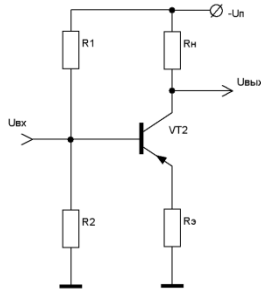


Рис. 57. Автоматическая термостабилизация

Что получится, если в цепь эмиттера включить $Rэ$?

$U_{БЭ} = U_{R2} - U_{Rэ}$ при увеличении I_K увеличивается $U_{Rэ}$ тогда $U_{см}$ тем самым уменьшает ток коллектора.

$$Q = U_{п} \cdot I_K \cdot t \quad (1)$$

$$I_K = U_{п} / (R_{кэ} + R_{н} + Rэ) \quad (2)$$

$$U_{Rэ}^{\uparrow} = I_K^{\uparrow} \cdot Rэ \quad (3)$$

$$U_{см} = U_{R2} - U_{Rэ} \quad (4)$$

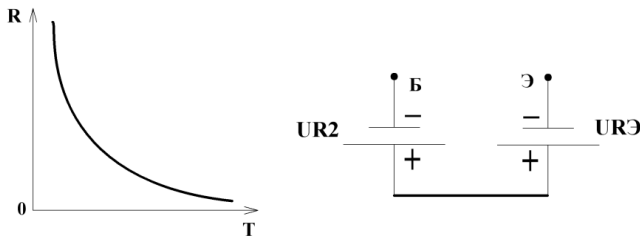


Рис. 58. Создание напряжения смещения

Напряжения смещения задается двумя элементами U_{R2} и $U_{Rэ}$ (Рис. 58). В цепи коллектора течет ток (2), выделяется джоулево тепло (1), транзистор нагревается и его сопротивление $R_{кэ}$ уменьшается, ток коллектора I_K возрастает, возрастает напряжения на $Rэ$ (3). Если $U_{Rэ}^{\uparrow}$ возрастает, то согласно (4) $U_{см}$ убывает. Транзистор закрывается, ток коллектора уменьшается. Таким образом, мы стабилизируем ток коллектора. Напряжения источника питания постоянная величина, ток коллектора мы застabilизировали. В единицу времени выделяется одно и то же

количество теплоты. При включении транзистор нагревается до рабочей температуры. Дальнейший рост температуры прекращается.

$$U_{см} = U_{R2} - U_{Rэ}$$

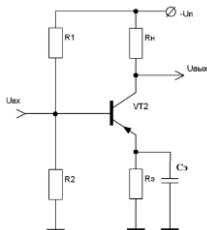


Рис. 59. Разграничения постоянных и переменных токов

Для разграничения постоянных и переменных токов в цепи эмиттера параллельно $Rэ$ ставят $Cэ$ (Рис. 59). Постоянный ток течет по пути наименьшего сопротивления, через $Rэ$, а переменный через $Cэ$.

Постоянный ток $X_{Cэ} = 1/\omega \cdot Cэ$ $\omega = 0$ $X_{Cэ} = \infty$,

Переменный ток $X_{Cэ} = 1/\omega \cdot Cэ$ $\omega \gg 0$ $Cэ = 10\mu F$ $X_{Cэ} = 0$.

Конденсатор $Cэ$ осуществляет связь эмиттера с общим проводом.

Эмиттер транзистора соединен с общим проводом по переменному току через блокировочный конденсатор $Cэ$ (Рис. 60).

Любой источник и приемник имеет свое внутреннее сопротивление. Сопротивление нагрузки и внутреннее сопротивление источника тока должно быть одинаковым. Тогда КПД будет максимальное.

Для того чтобы внутреннее сопротивление источника тока не влияло на напряжение смещение транзистора, на вход усилителя ставятся разделительные конденсаторы C_1 . На выходе усилителя кроме полезного напряжения присутствует постоянное составляющая напряжения. На выход усилителя также ставят разделительный конденсатор C_2 .

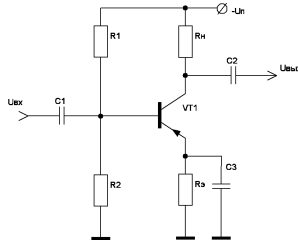


Рис. 60. Схема с общим эмиттером

C_2 – разделительный конденсатор легко пропускает переменное усиливается напряжение и не позволяет источнику сигнала шунтировать нижнюю часть делителя по постоянному току.

Это окончательная схема с общим эмиттером.

Основные параметры усилителя для схемы с ОЭ

$$R_{вх} = R_2 \quad (1-10\text{к}\Omega)$$

$$R_{вых} = R_н \quad (1-10\text{к}\Omega)$$

$R_{вх} \approx R_{вых}$, что позволяет соединять каскады между собой.

$$K_U = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вх} \quad (10 \div 300)$$

$$K_i = \Delta i_k / \Delta i_b \quad (10 \div 300)$$

$$K_p = K_i \cdot K_U \quad (1\ 000 \div 10\ 000)$$

Схема с ОЭ поворачивает фазу сигнала на 180° (Рис. 61).

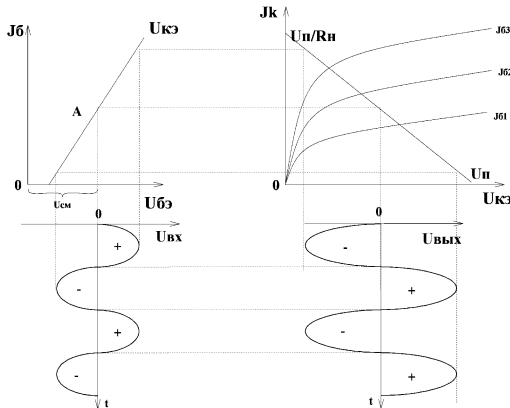


Рис. 61. Выбор рабочей точки

База транзистора соединена с общим проводом по переменному току через блокировочный конденсатор C3 (Рис. 62).

Элементы схемы (сопротивления) находится на тех же самых местах, а следовательно, несет те же функции как с ОЭ. Напряжение $U_{вх}$ подается на эмиттер транзистора.

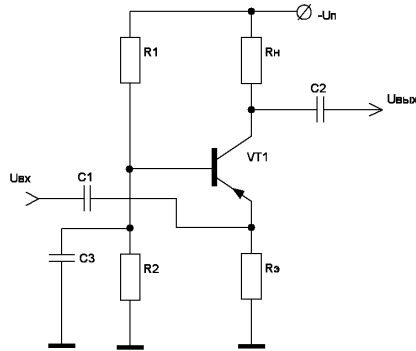


Рис. 62. Схема с общей базой

Сопротивление конденсатора $C1$ и $C2$ входному переменному току равен нулю. Входное сопротивление будет определяться сопротивлением база – эмиттерного перехода.

Основные параметры усилителя **для схемы с ОБ**

$$R_{вх} = R_{бэ} \text{ (10-100 Ом)}$$

$$R_{вых} = R_{н} \text{ (1-10к}\Omega\text{) как ОЭ}$$

$R_{вх} \ll R_{вых}$ по этому схему с ОБ наз. трансформатором сопротивления, т.е. ОБ преобразует малое входное сопротивление в большее выходное сопротивление.

$K_U = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вх}$ (10 ÷ 100) чуть меньше чем у схемы с ОЭ

$$K_i = \Delta i_k / \Delta i_{э} \leq 1$$

$$K_p = K_U$$

Коллектор транзистора соединен с общим проводом по переменному току через конденсатор Сф фильтра источника питания (Рис. 63).

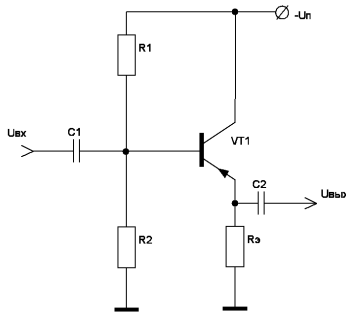


Рис. 63. Схема с общим коллекторам

$R_{вх} = R2$ (1-10кΩ) как ОЭ

$R_{вых} = Rн$ (10-100 Ом)

$R_{вх} \gg R_{вых}$ по этому схему с ОК называется трансформатором сопротивления, т.е. ОК преобразует большее входное сопротивление в малое выходное.

$K_U = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вх} \leq 1$

$K_i = \Delta i_k / \Delta i_э$ (10 ÷ 100) чуть меньше чем у схемы с ОЭ.

$K_p = K_i$

Дроссельный усилитель

Если нагрузка транзистора является дроссель (R_n – дроссель) то усилитель называют дроссельный (Рис. 64).

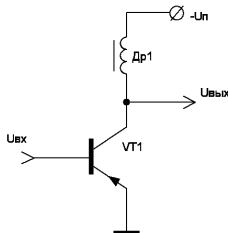


Рис. 64. Дроссельный усилитель

Положительные стороны; - по постоянному току нет потерь, все $U_{п}$ приложено к «К»; КПД ближе к 50%.

Отрицательные стороны; зависимость коэффициента усиления от частоты $X_L = \omega L = 2\pi f$, дроссель дороже R , имеет большие габариты и массу.

Трансформаторный усилитель

Если нагрузка транзистора является трансформатор ($R_{н}$ – трансформатор) то усилитель называют трансформаторный (Рис. 65).

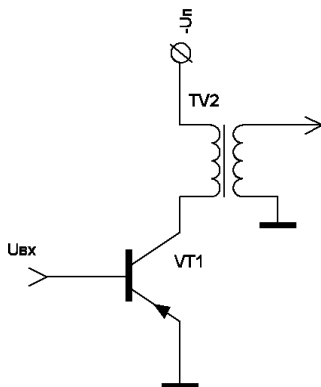


Рис. 65. Трансформаторный усилитель

Положительная сторона; первый и последующие каскады разделены по постоянному току. Трансформатор T_p может быть повышающим (понижающим), в 3÷5 раз, что дает дополнительное увеличение выходного напряжения (тока). трансформатор дает согласование по сопротивлению между каскадами.

К L_1 подводится $P_1 = I_1 U_1$, КПД ≈ 1 в L_2 будет $P_2 = I_2 U_2$,
 $N_1 / N_2 = U_1 / U_2 = i_2 / i_1 = n$.

Отрицательная сторона; тоже что и с дросселем.

Резонансный усилитель

Если нагрузка транзистора является колебательный контур (R_H – колебательный контур) то усилитель называют резонансным (Рис. 66).

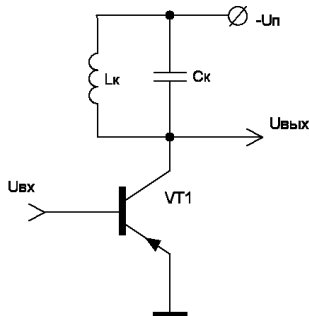


Рис.66. Резонансный усилитель

R_H – колебательный контур

$$f_0 = 1/2\pi\sqrt{CL}.$$

Коэффициент усиления резонансного усилителя максимальный при совпадении частоты входного сигнала (f) с резонансной частотой ($f_0 = 1 / 2\pi\sqrt{LC}$) и резко уменьшается на других частотах.

Если максимальная значения коэффициента усиления принять за единицу, то действующая значения будет равен $\sqrt{2} \cdot K_{max} = 0.7 \cdot K_{max}$. считается , что коэффициент усиления имеет равномерное АЧХ в диапазоне частот от f_H до f_B . Этот диапазон называют - полоса пропускания резонансного усилителя.

Положительная сторона- наибольший коэффициент усиления, обладает избирательностью.

Отрицательная сторона; - узкая полоса частот.

2.6. МЕЖКАСКАДНАЯ СВЯЗЬ

На практике наиболее часто используют **емкостную, трансформаторную и гальваническую** связь между каскадами.

Емкостная или резистивная межкаскадная связь

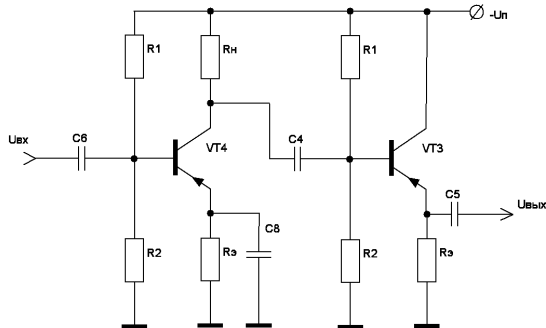


Рис. 67. Емкостная межкаскадная связь

Положительные стороны; первый и последующие каскады разделены по постоянному току.

Каждый каскад содержит полный набор элементов для самостоятельной работы, что позволяет собирать и отлаживать схему в любом удобном порядке.

Отрицательные стороны; большое количество элементов
Большое потребление энергии от источника питания.

Трансформаторная или индукционная межкаскадная связь

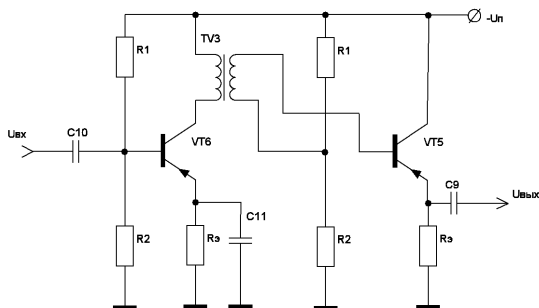


Рис. 68. Трансформаторная межкаскадная связь

Положительные стороны; первый и последующие каскады разделены по постоянному току.

Трансформатор (Тр) может быть повышающим (понижающим), что дает дополнительное увеличение выходного напряжения (тока).

Трансформатор дает согласование по сопротивлению между каскадами.

Отрицательные стороны; большое количество элементов. Наличие большого тяжелого трансформатора, который является основным источником искажения на краях диапазона. Большое потребление энергии от источника питания.

Гальваническая или непосредственная межкаскадная связь

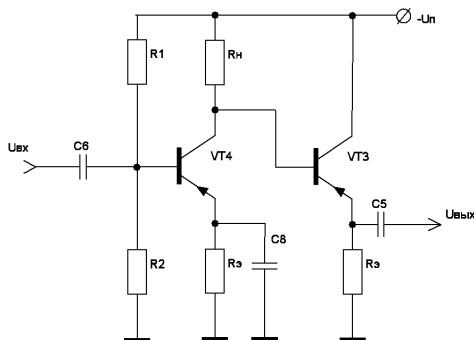


Рис. 69. Гальваническая межкаскадная связь

$$U_{cm1} = U_{r2} - U_{r3}$$

$$U_{cm2} = U_{r3} + U_{k31} - U_{r5}$$

Положительные стороны; малое число деталей. Не большое потребление энергии от источника питания. Отсутствие частотно зависимых элементов.

Отрицательные стороны; нет разделения между каскадами по постоянному току. При выходе из строя элементов одного каскада, приводит к выходу из строя элементов последующих каскадов.

Сборку и отладку схему производят в строго определенном порядке (начиная с первого каскада).

Частным случаем гальванической связи является *составной транзистор*. Наиболее часто используют схему *Дарлингтона* (Рис. 70).

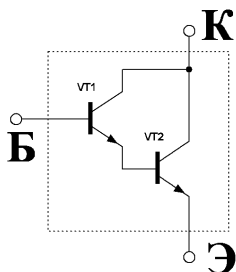


Рис. 70. Схема Дарлингтона

$$\beta = \beta_1 \cdot \beta_2,$$

$$R_{вх} = R_{вх1} + R_{вх2} (\beta_1 + 1),$$

$$R_{вых} \approx R_{вых2}.$$

VT_1 – качественный транзистор, VT_2 – обычно мощный транзистор. В результате получается мощный транзистор с большим коэффициентом усиления.

2.7. УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

Усилителем мощности (УМ) называют любой усилитель тока, поскольку нагрузка усилителя является низкоомный потребитель. На низкоомном сопротивлении нельзя создать большие падения напряжения, по этому для получения большое выходное мощности усиливают ток, а не напряжения.

$$P=UI.$$

Усилители подразделяется: трансформаторные и бестрансформаторные, одноктактные и двухтактные, с однополярные и двухполярные.

Одноктактным бестрансформаторным усилителям мощности с однополярным источником питанием является схема с ОК. Мы его достаточно подробно разбирали раньше.

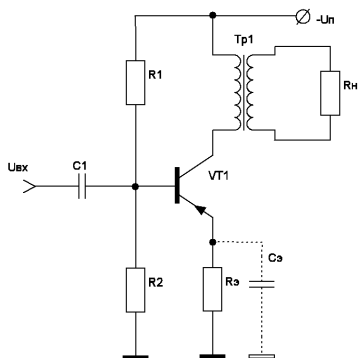


Рис. 71. Однофазный УМ

Собирают по схеме трансформаторного УНЧ с ОЭ (Рис. 71). Усилитель работает в классе **A**, Tr1– понижающий. Для того чтобы создать большую выходную мощность на Rн, необходимо создать большую мощность во вторичной обмотке трансформатора. Поскольку $P_1=P_2$, то необходимо создать аналогичную мощность в первичной обмотке трансформатора. Для этого Rэ выбирают $\approx 0,1 \div 1\Omega$. В этом случае Сэ – необязательно.

Протекание относительно большого тока в первичной обмотке трансформатора, создает магнитное поле, который намагничивает сердечник трансформатора. Для перемагничивания его переменным током тратится много энергии. Поэтому КПД усилителя около 35%.

Избавится от постоянного тока в обмотках трансформатора позволяют усилительные каскады собранный по двухтактным схемам.

Двухтактный трансформаторный УМ

R1, R2 – делитель напряжения источника питания. R3 – автоматическая термостабилизация.

$$U_{см} = U_{R2} - U_{R3}.$$

Транзисторы работают в классе **B**, рабочая точка находится в начале линейного участка входной характеристики, то есть в режиме покоя оба транзистора закрыты.

Ток смещения течет по 2-м параллельным ветвям.

Трансформатор Тр1 – согласующий, выполняет роль

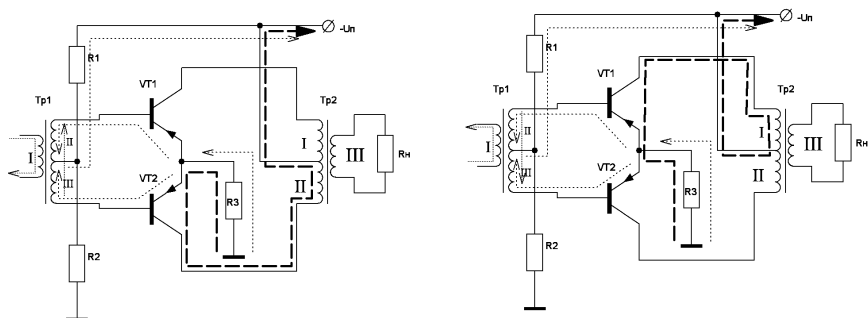


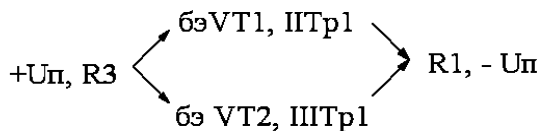
Рис. 72. Двухтактный трансформаторный УМ

фазоинверсного каскада. Имеет две симметричные вторичные обмотки. В обмотках II и III Тр1 протекают одинаковые токи по величине, но противоположные по направлению (Рис.72). Создают магнитные поля уничтожающий друг друга.

Несмотря на то, что в обмотках течет ток смещения - сердечник трансформатора не намагничивается. Транзисторы 1 и 2 закрыты – в обмотках Тр2 – ток не течет.

По приходу положительного полупериода входного сигнала в обмотках II и III Тр1 индуцируется входной ток, который в обмотке II Тр1 совпадает с током смещения, а в обмотке III Тр1 – направлен в противоположную сторону. Ток смещения VT2 уменьшается, транзистор был закрыт, еще больше закрывается, а ток смещения VT1 увеличивается - VT2 открывается пропорционально входному сигналу. Основной ток течет - $+U_{п}$, R3, экVT1, I Тр2, $-U_{п}$.

Во вторые полупериоды входного сигнала VT2 закрывается, а VT1 открывается.



Основной ток течет - $+U_{п}$, R3, эк VT2, II Тр2, $-U_{п}$.

Трансформатор Тр2 – выходной. Объединяет усиленный сигнал по отдельности положительный и отрицательный полупериода входного сигнала. Полный период входного сигнала усиливается за два такта отдельными транзисторами.

Положительная сторона; КПД – 78%. Меньше линейных искажений, т.к. через Тр не течет постоянный ток.

Отрицательная сторона; тяжелый выходной трансформатор. Тр – основной источник искажений (на краях диапазона). Тр не может пропустить через себя весь звуковой диапазон частот. Энное количество трансформаторов на НЧ, ВЧ, СЧ.

Избавится от тяжелого согласующего трансформатора позволяет транзисторный фаза – инверсный каскад (Рис. 73). Это – усилитель имеющий один вход и два взаимно –инверсных выхода. Строится усилители на основе комбинации усилителей ОЭ, ОК. По выходу 1 – это ОЭ, поворачивает фазу входного сигнала на 180°.

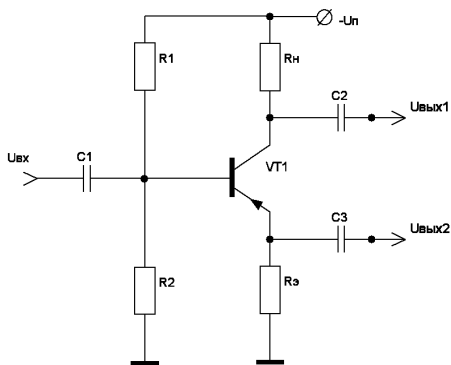


Рис. 73. Транзисторный фаза – инверсный каскад

По выходу 2 – это ОК, не поворачивает фазу. Коэффициент усиления по напряжению схема с ОК около 1. Для того что бы амплитуда выходного сигнала один (**Uвых1**) было такой же как и на выходе два (**Uвых2**), резисторы Rк и Rэ выбирают равны по величине.

$$R_k \cong R_e,$$

Бестрансформаторный двухтактный усилитель мощности

Транзисторы работают в классе **В** или **С**. Цепи смещения не обозначены. Схема требует фазоинверсный каскад (Рис. 74). КПД = 78%.

I-полупериод: на $U_{вх1}$ подается отрицательное напряжение, а на $U_{вх2}$ – положительно. Транзистор $VT1$ открывается пропорционально входному сигналу, а $VT2$ был закрыт, еще больше закрывается.

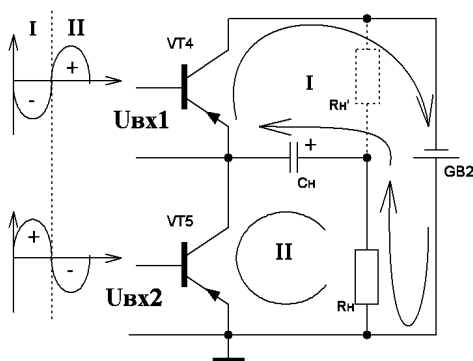


Рис. 74. Бестрансформаторный двухтактный УМ

Ток течет по направлению $+U_n, R_n, C_n, ЭК1, -U_n$.

II полупериод: на $U_{вх2}$ подается отрицательное напряжение, а на $U_{вх1}$ – положительно. Транзистор $VT2$ открывается пропорционально входному сигналу, а $VT1$ – закрывается. Ток течет $+C_n, R_n, ЭК2, -C_n$.

Недостаток: С ростом частоты коэффициент усиления падает поскольку уменьшается время зарядки накопительного конденсатора C_n . Конденсатор накапливает малое энергии и отдает малую мощность. Избавиться от этого недостатка позволяет использования двухполярного питания (Рис. 75). Принцип работы так же.

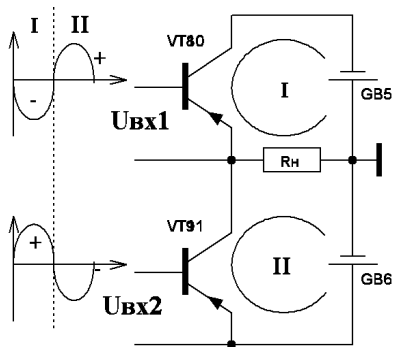


Рис. 75. Схема использования двухполярного питания

Избавиться от инверсного каскада позволяют выходные каскады на комплементарные (взаимодополняющие) парах. Это два транзистора с одинаковыми параметрами но разной проводимости.

Существуют две схемы с однополярным и двухполярным источником питания (Рис. 76).

Входной сигнал подают между базой и эмиттером обоих транзисторов. VT1 открывается положительным полупериодом входного сигнала, а VT2 – отрицательным.

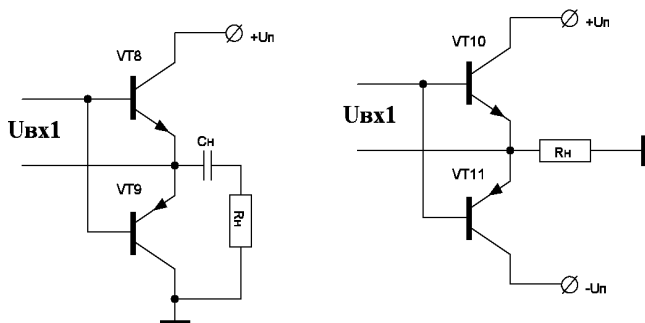


Рис. 76. Схемы с однополярным и двухполярным источником питания

2.8. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Обратная связь осуществляется подачей части **U** и **I** с выхода устройства на его вход.

Обратная связь применяется в автогенераторах, генерирующих высоко и низкочастотные колебания, очень широко используют в усилителях.

Если в автогенераторах применяется положительная обратная связь, поддерживающая колебания, то в усилителях обычно применяют отрицательную обратную связь, позволяющая уменьшить нелинейные искажения и нестабильность усилителя, а также изменить в желаемую сторону входное и выходное сопротивление.

Структурную схему усилителя с обратной связью можно представить в виде 2-х усилителей (Рис. 77).

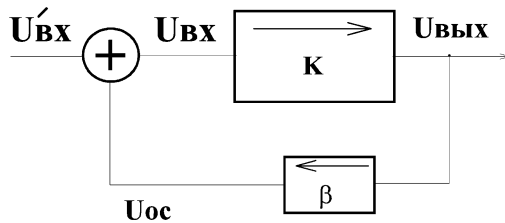


Рис. 77. Структурная схема усилителя с обратной связью

Верхний усилитель имеет в направлении показанном стрелкой, коэффициент передачи напряжения **K**, равным отношению **Uвых** к **Uвх**.

$$K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$$

Нижний усилитель служит для передачи напряжения обратной связи. Его коэффициент передачи β в направлении, указанном стрелкой, равен отношению **Uос** к **Uвых**.

$$\beta = U_{\text{ос}} / U_{\text{вых}}$$

Напряжение обратной связи является частью выходного напряжения усилителей.

Коэффициент β показывает какая часть выходного напряжения передается обратно на вход, поэтому его называют коэффициентом обратной связи. Обычно $|\beta| \leq 1$, поэтому вместо нижнего усилителя можно применить пассивный линейный четырехполюсник. Напряжение на входе усилителя, охваченного обратной связью равно сумме $U_{вх}$ и $U_{ос}$,

$$U_{вх} = U'_{вх} + U_{ос},$$

$$U'_{вх} = U_{вх} - \beta U_{вых}.$$

Напряжение на выходе усилителей,

$$U_{вых} = K U_{вх}.$$

$$U'_{вх} = U_{вх} - \beta U_{вых} = U_{вх} - \beta K U_{вх} = U_{вх} (1 - \beta K).$$

Следовательно, для усилителя, охваченного обратной связью.

$$K' = U_{вых} / U'_{вх} = K U_{вх} / (1 - \beta K) \cdot U_{вх} = K / (1 - \beta K).$$

Полученное соотношение, связывающее коэффициент усиления усилителя, охваченного обратной связью, и усилителя без обратной связи, является основным соотношением в теории усилителей с обратной связью.

Если βK – положительная величина, вызывающая увеличение усиления, то обратную связь называют положительной.

Если βK – отрицательная величина, то обратная связь отрицательная, при этом коэффициент усиления с обратной связью меньше коэффициента усиления усилителя без обратной связи.

При $\beta K = 1$ коэффициент усиления усилителя, охваченного положительной обратной связью, обратиться в ∞ . Фактически это означает, что на выходе усилителя имеется напряжение при отсутствии входного напряжения, приложенного извне, т.е. усилитель само возбуждается и превращается в генератор. Другими словами: *обратная связь называется отрицательной, если часть выходного сигнала усилителя подается на его вход в противофазе* (Рис. 78).

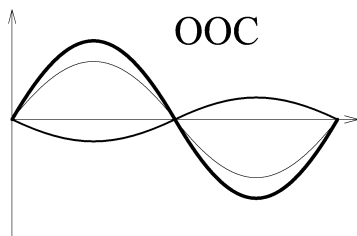


Рис. 78. Отрицательная обратная связь

Положительная обратная связь – входной сигнал и сигнал обратной связи приходят синфазно или складываются (Рис. 79).

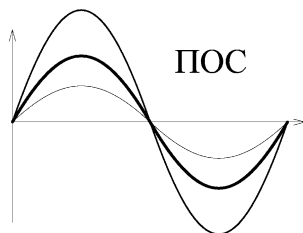


Рис. 79. Положительная обратная связь

На практике наиболее часто используют последовательную отрицательную обратную связь по току и параллельную отрицательную обратную связь по напряжению.

В одиночных усилительных каскадах с **ОЭ** последовательная **ООС** по току устанавливается исключением блокировочного конденсатора C_3 (Рис. 80).

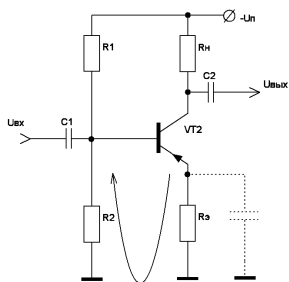


Рис. 80. Последовательная ООС по току

Ток коллектора с эмиттером на резисторе создает напряжение, которое прикладывается к базе последовательно с входным.

Усилитель с параллельной отрицательной обратной связью по напряжению (Рис. 81).

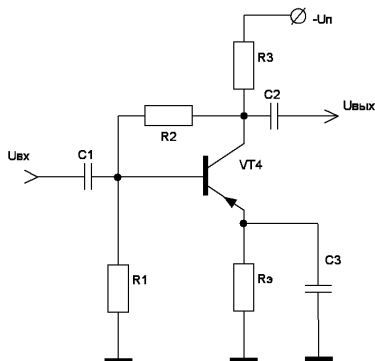


Рис. 81. Параллельная ООС по напряжению

Выход усилителя соединен параллельно входу посредством R2. Входное напряжение ($U_{вх}$) выделяется на R1, часть выходного напряжения ($U_{ос}$), так же выделяется на R1. Схема с ОЭ поворачивает фазу сигнала на 180 градусов, т.е. на R1 из $U_{вх}$ вычитается $U_{ос}$, следовательно, организуется ООС.

Частотно – зависимая обратная связь применяется для изменения амплитудно-частотной характеристики усилителя. Одним из примеров является избирательный усилитель с двойным Т-образным мостом.

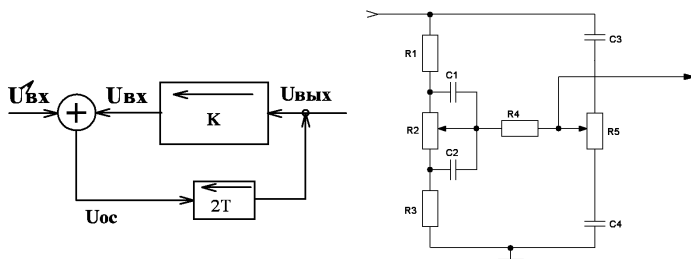


Рис. 82. Положительная обратная связь

Положительное ОС применяется в основном в генераторах и простейших приемниках прямого усиления. $R_{вх}$ при ПОС уменьшается, а $R_{вых}$ увеличивается в $(1+\beta k)$ раз (Рис. 82).

В УНЧ ПОС возникает произвольно, от плохого монтажа и называется *паразитной связью*. Для УНЧ вводят ООС, который устраняет самовозбуждения УНЧ. ООС выравнивает частотную характеристику, $R_{вх}$ при ООС увеличивается, а $R_{вых}$ уменьшается в $(1+\beta k)$ раз.

2.9. ГЕНЕРАТОРЫ

Электронный генератор – это устройство, преобразующее электрическую энергии источника постоянного тока в энергию незатухающих электрических колебаний требуемой формы, частоты и мощности.

По принципу работы различают генераторы с самовозбуждением (автогенераторы) и генераторы с внешним возбуждением, которые являются усилителями мощности высокой частоты. Электронные автогенераторы подразделяются на *автогенераторы синусоидальных (гармонических) колебаний* и автогенераторы колебаний не синусоидальной формы, которые принято *называть релаксационными (импульсными) автогенераторами*.

Наиболее распространенные схемы автогенераторов содержат усилительный элемент и колебательную систему, связанные между собой цепью положительной обратной связи (Рис. 83).

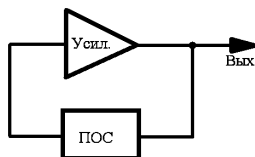


Рис. 83. Структурная схема автогенератора

Различают два типа автогенераторов. Это **LC** и **RC** генераторы. Любой **LC** автогенератор содержит колебательную систему (обычно колебательный контур), источник электрической энергии, за счет которого в контуре поддерживаются незатухающие колебания. Транзистор, с помощью которого регулируется подача энергии от источника в контур, и элемент обратной связи, посредством которого осуществляется подача необходимого возбуждающегося переменного напряжения из выходной цепи во входную.

Схема генератора с последовательным питанием

В момент включения источника питания в колебательном контуре возникают затухающие колебания. Верхним проводом колебательный контур, через разделительный конденсатор

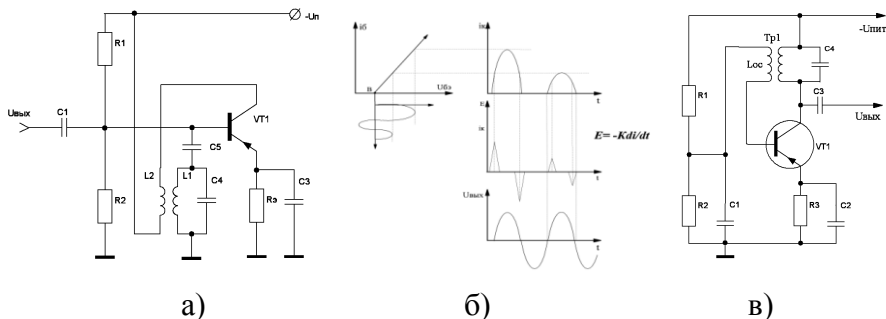


Рис. 84. Схемы генераторов

соединен с базой транзистора, нижним – через блокировочный конденсатор – с эмиттером (Рис. 84, а). По переменному току колебательный контур включен между базой и эмиттером транзистора. Транзистор работает в классе **В** или **С**. В цепи коллектора возникают импульсы тока которые протекают через катушку связи. В момент быстрого изменения тока в катушке связи, в катушку колебательного контура индуцируется ЭДС. Импульсы ЭДС дозаряжают конденсатор контура до первоначального значения, в результате в контуре возникают незатухающие колебания.

Незатухающие колебания в контуре установятся только при выполнении двух основных условий: баланс фаз и баланс амплитуд.

Баланс фаз – конденсатор колебательного контура, пополняется энергией строго определенной промежутки времени. Не раньше не позже, лишь после того как конденсатор потерял часть энергии.

Баланс амплитуд - конденсатор колебательного контура, пополняется энергией строго дозировано. Сколько конденсатор потерял энергии, столько же должно восполниться, не больше, не меньше.

Недостатком такого генератора является небольшая мощность выходного сигнала, т.к. он снимается непосредственно с контура. LC генераторы высокочастотные, конденсатор C4 имеет маленькую емкость. А следовательно в нагрузку отдает маленькую мощность (Рис. 84, в).

Избавляться от этого недостатка позволяет заменой катушки связи на колебательный контур (Рис. 85).

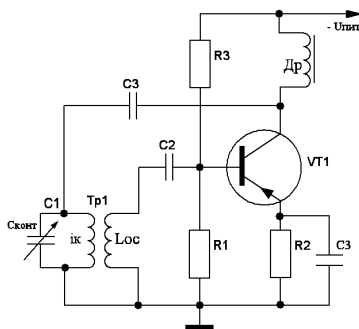


Рис. 85. Генератор с колебательным контуром

Другая схема LC генератора с индуктивной связью с более мощным выходом.

положительная сторона; более мощный выходной сигнал
отрицательная сторона; по Lк проходит постоянный ток.

Генератор с параллельным питанием избавляет от недостатка генератора с последовательным питанием. Это схема является технологически выгодной.

3-х точечная схема с индуктивной и емкостной связью (Рис. 86).

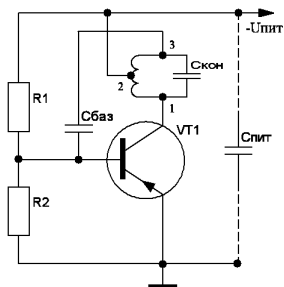


Рис. 86. Трех точечная схема генератора

Верхняя половина контура соединена с базой VT1 через Сб и с Э через Спит.

Баланс фаз автоматический.

RC – ГЕНЕРАТОР

В диапазоне звуковой частоты схему генератора можно упростить. Заменой контура RC цепочкой (Рис. 87).

Ток через резистор и напряжение на нем (I_R и U_R) совпадает по фазе, ток через конденсатор и напряжение (I_C и U_C) на нем сдвинуты по фазе на 90° .

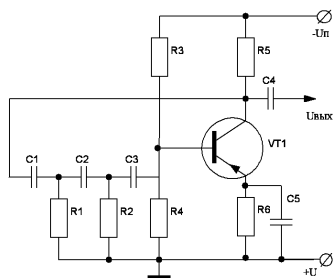


Рис. 87. RC генератор

Во всех элементах последовательной цепи ток один и тот же – **Иобщ** равно сумме напряжений U_R и U_C на отдельных участках. Чем больше X_C какой-либо **РС**- цепочки, тем больше напряжение U_C на конденсаторе и тем ближе к 90° сдвиг фаз между током **Иобщ** и общим напряжением **Uобщ**. А чем больше R , тем больше активное сопротивление всей цепи, тем меньше сдвиг фаз между **Иобщ** и **Uобщ**. Существует частота, на которой при данном соотношении сдвиг фаз между **Иобщ** и **Uобщ** равен 60° . и три таких цепочки поворачивают фазу в сумме на 180° .

2.10. УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В устройствах автоматики и измерительных устройствах часто регистрируются значения таких величин, как мощность, угол сдвига фаз, давление, температура, световой поток и т.д. Эти электрические и неэлектрические величины во многих случаях удобно преобразовывать в медленное изменение тока или напряжения, частота которых составляет единицы или даже доли герца.

Для усиления таких медленно изменяющихся токов или напряжений необходимы усилители, полоса пропускания которых имеет нижнюю границу равную нулю. Усилители, обладающие такими свойствами, носят названия усилителей постоянного тока (**УПТ**) независимо от того, какая из величин – ток или напряжение – подлежат усилению (Рис. 88).

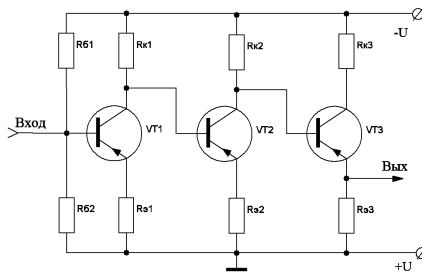


Рис. 88. Усилитель постоянного тока

Электрические сигналы, воздействующие на вход УПТ, во многих случаях малы по величине напряжения порядка долей $\mu\text{В}$, а токи порядка 10^{-16}А . Для усиления столь слабых сигналов одного каскада обычно не достаточно, а соединение каскадов между собой сопряжено с преодолением больших трудностей. В УПТ могут быть применены трансформаторы, и разделительные конденсаторы. Поэтому единственной схемой межкаскадной связи, является гальваническая (или непосредственная) связь. Такая связь вносит в УПТ ряд специфических особенностей, затрудняющих как построение усилителя, так и его эксплуатацию.

Усиление постоянного тока или напряжения можно осуществлять двумя принципиально известными методами: непосредственно по постоянному току и с предварительным преобразованием постоянного тока в переменным. В соответствии с этим УПТ делятся на два основных типа: *усилители прямого усиления* и *усилители с преобразованием*.

Усилительные каскады выполнены по схеме с ОЭ. Поэтому расчетные соотношения при выборе режима покоя и режима усиления, такие же как в УНЧ.

Практическое осуществление гальванической связи затрудняется тем, что на базу следующего транзистора, кроме полезного сигнала подается постоянное напряжение коллектора предыдущего каскада, которое необходимо компенсировать.

В приведенной схеме компенсация постоянной составляющей выходного напряжения достигается с помощью резисторов (R_3) последующего транзистора. Так сопротивление резистора R_{32} подбирается такой величины, чтобы постоянное падение напряжения на нем было больше падения напряжения на R_{31} на разность $U_{бэ}$ последующего транзистора:

$$U_{32} = U_{31} + (U_{кэ1} - U_{бэ2}).$$

Еще более сложной задачей является обеспечение высокой стабильности работы усилителя при изменениях напряжения источника питания, режимов работы транзисторов, параметров, входящих в схему элементов. Любое, даже очень медленное изменение перечисленных величин вызывают значительное изменение выходного напряжения.

Изменение выходного напряжения, не связанного с входным напряжением и обусловленные внутренними процессами в усилителе, *называют дрейфом нуля усилителя.*

Напряжение дрейфа на выходе усилителя может оказаться одного порядка с **Усиг** и даже больше, что приводит к недопустимым искажениям усиливаемого сигнала.

Поэтому наряду с такими методами уменьшения дрейфа, как стабилизация напряжения источника питания, применяют глубокую **ООС**.

Помимо этого требование стабильности режима особенно трудно выполнимо вследствие зависимости параметров транзистора от температуры.

Повышение устойчивости работы УПТ путем введения в его схему **ООС** не дает большого эффекта, т.к. в результате уменьшается коэффициент усиления каскадов растет их число, а следовательно требуется увеличение мощности источника питания и усложнение схемы. Поэтому основными методами устойчивости УПТ является применение *балансных (мостовых)* схем и преобразование постоянного напряжения в переменное.

2.11. ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ

Если в проводнике течет переменный электрический ток то излучается электромагнитная волна. Такой проводник называют передающей антенной. На некотором расстоянии от него находится другой проводник, который называют приемной антенной. По линии связи — от передающей антенны к приемной - можно передавать информацию без соединительных проводов, используя электромагнитную волну. Главный процесс в такой системе беспроводной электросвязи — это излучение. И поэтому ее называют системой радиосвязи — «радио» можно перевести на русский как «связанный с излучением», это слово происходит от латинского «радиус» — «луч».

Включив в передающую антенну микрофон, а в приемную антенну— громкоговоритель {головной телефон) получим

простейшую линию радиотелефонной связи. Микрофон создаст в передающей антенне меняющийся ток, который будет излучать радиоволны. Они в свою очередь наведут ток в приемной антенне, а громкоговоритель воспроизведет с его помощью звук, копию звука с микрофона.

Несмотря на простоту такой системы, на практике она неприменима. Чтобы передающая антенна эффективно излучала электромагнитные волны, эта антенна должна быть как можно выше, во всех случаях ее высота должна быть соизмерима с длиной волны. Это требование связано с самим механизмом излучения: трудно представить себе, чтобы громкоговоритель размером с булавочную головку эффективно излучал звук. Хорошо, если высота антенны равна половине λ , неплохо, если четверти $\lambda(i) = \frac{300000}{f(\text{в } \text{А} \ddot{\text{о}})}$. Теперь подсчитаем: даже на средней

звуковой - частоте 1000 Гц длина волны оказывается 300 км и, если смириться с тем, что высота антенны составляет всего 1 % от λ то понадобится антенна высотой 3 км. Построить такую высокую антенну непросто. А ведь нужно еще излучать и более низкие частоты, для которых антенну пришлось бы делать намного выше.

Выход такой: создавать радиоволны нужно с помощью токов высокой частоты, а каждому передатчику разрешать работать только на одной, именно за ним закрепленной частоте. Во-первых, это позволит в приемнике с помощью резонансных фильтров отделять сигнал нужной станции от всех остальных. А во-вторых, для эффективного излучения высокочастотному току понадобятся уже сравнительно небольшие антенны. Так, например, частоте 150 кГц, одной из самых низких высоких частот, применяемых для радиовещания, соответствует длина волны 2 км. Высота антенны, если принять для нее 10% от длины волны, составит 200 м.

Использование высокочастотных токов в линии беспроводной связи создает новые проблемы — на передатчике нужно как-то записать информацию в

высокочастотном токе, а в приемнике нужно эту информацию извлечь.

Модуляция: изменяя тем или иным способом высокочастотный ток, записывают в нем информацию. Включив в передающую антенну телеграфный ключ, а в приемную — приемный телеграфный аппарат, можно создать линию беспроводной радиотелеграфной связи.

Чтобы записать в высокочастотном токе речь или музыку и таким образом заставить радиоволны переносить эту информацию к приемнику, можно просто включить угольный микрофон в антенну. Так же, как его включали в цепь постоянного тока. Под действием звуковых волн сопротивление микрофона меняется, а значит, будет меняться и амплитуда высокочастотного тока, как в свое время менялся ток в линии телефонной связи. Этот процесс называется амплитудной модуляцией. Высокочастотный ток, модулированный по амплитуде, излучает модулированные радиоволны — их интенсивность тоже меняется, повторяя все изменения звукового давления перед микрофоном. Модулированные радиоволны наводят в приемной антенне модулированный высокочастотный ток, а довольно простой электронный блок (заранее назовем его детектором) позволяет расшифровать этот ток и получить переменный ток низкой частоты, точную копию звука.

Амплитудная модуляция, сокращенно АМ, — это лишь один из способов зашифровывания информации в высокочастотном токе. Другой распространенный способ — частотная модуляция ЧМ. Здесь амплитуда высокочастотного тока остается неизменной, а под влиянием микрофона в сравнительно небольших пределах меняется сама частота переменного тока (Рис. 89).

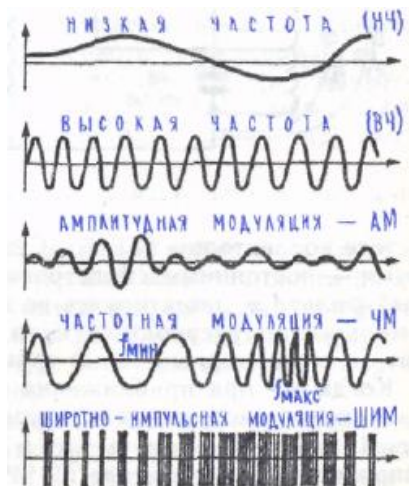


Рис. 89. Модуляция

Сделать это несложно: генератор высокочастотного тока в передатчике — это всегда генератор, частоту которого определяют параметры колебательного контура. Существуют несложные схемы, которые под действием микрофонного тока в небольших пределах меняют емкость контура и таким образом осуществляют частотную модуляцию.

Передатчики многоканальных линий радиосвязи часто работают в импульсном режиме, это позволяет использовать много разных способов модуляции. Например, менять амплитуду импульса (амплитудно-импульсная модуляция, АИМ), ширину импульса (широко-импульсная модуляция, ШИМ), время его появления (фазово-импульсная модуляция, ФИМ) или отображать изменения микрофонного тока в различных комбинациях импульсов (импульсно-кодовая модуляция, ИКМ).

Детектирование: модулированный высокочастотный ток преобразуют таким образом, чтобы извлечь записанную в нем информацию. Слово «детектор» в переводе на русский означает «обнаружитель», оно происходит от того же корня, что и «детектив» — «сыщик». В приемной антенне циркулирует только наведенный радиоволнами ток высокой частоты с изменяющейся, модулированной амплитудой (Рис. 90).

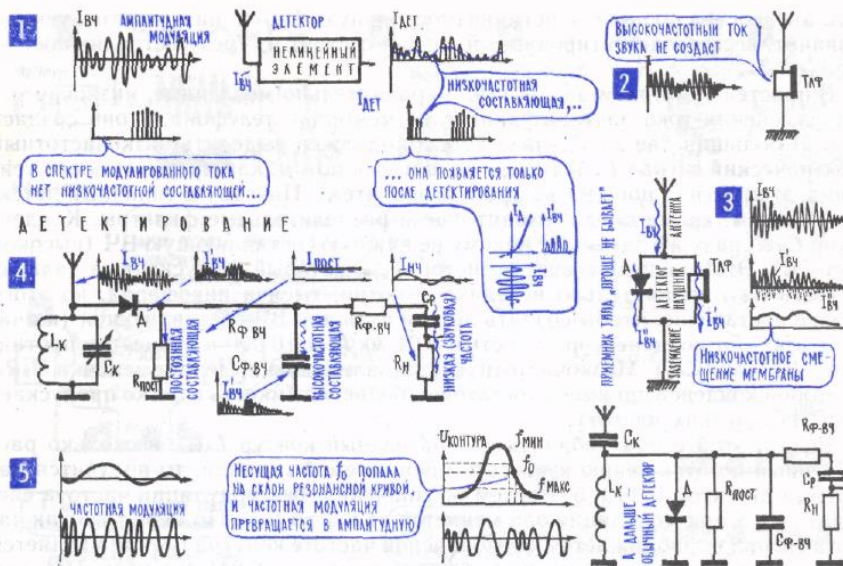


Рис. 90. Детектирование

А для того чтобы получить низкочастотный ток, нужно прежде всего преобразовать спектр этого высокочастотного тока, пропустить его через нелинейный элемент. Только в результате нелинейных процессов в спектре могут появиться новые составляющие и, в частности, низкочастотный ток, который нам необходим.

2.12. ПРИНЦИП ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Развертка изображения: элементы картинка передаются поочередно по одному каналу связи. Любую картинку, которую мы видим, можно представить себе как сложную мозаику из мельчайших светящихся точек, определенным образом расположенных в пространстве.

В современных системах передачи изображения, таких, как телевидение или фототелеграф, картинка передается по одной линии связи. Информация о яркости элементов изображения передается поочередно.

Передающая телевизионная трубка: большое количество фотоэлементов, поочередно включаемых электронным лучом — *икonosкопа*. Ее основа — мозаичный фотокатод, пластинка, покрытая мельчайшими светочувствительными крупинками, каждая из которых фактически представляет собой микроскопический фотоэлемент. Картинка, которую нужно превратить в серию электрических сигналов, с помощью объектива проектируется на светочувствительную мозаику фотокатода (Рис. 91).

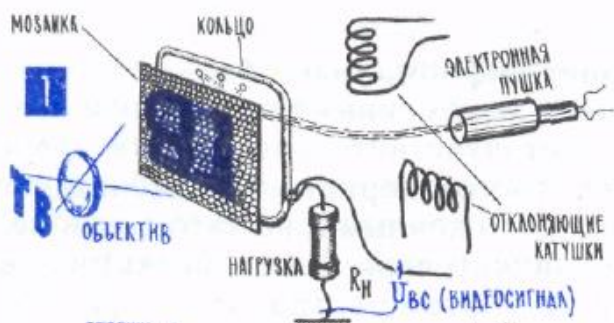


Рис. 91. Передающая трубка

При этом каждая крупинка-фотоэлемент получает свою порцию света и, как полагается фотоэлементу, создает свою электродвижущую силу, пропорциональную освещенности: чем больше света падает на крупинку-фотоэлемент, тем большую э. д. с. она вырабатывает. В итоге на фотокатоде создается невидимая электрическая картинка, повторяющая картинку световую. Электронный луч, двигаясь по фотокатоду от одной его точки к другой выбивает из каждой крупинке - фотокатода вторичные электроны. Количество вторичных электронов, выбитых с какого-либо участка фотокатода, зависит от того, насколько интенсивно этот участок освещен. Именно вторичные электроны, частично ответвляясь на сопротивление нагрузки, создают в нем ток, пропорциональный освещенности той или иной точки фотокатода.

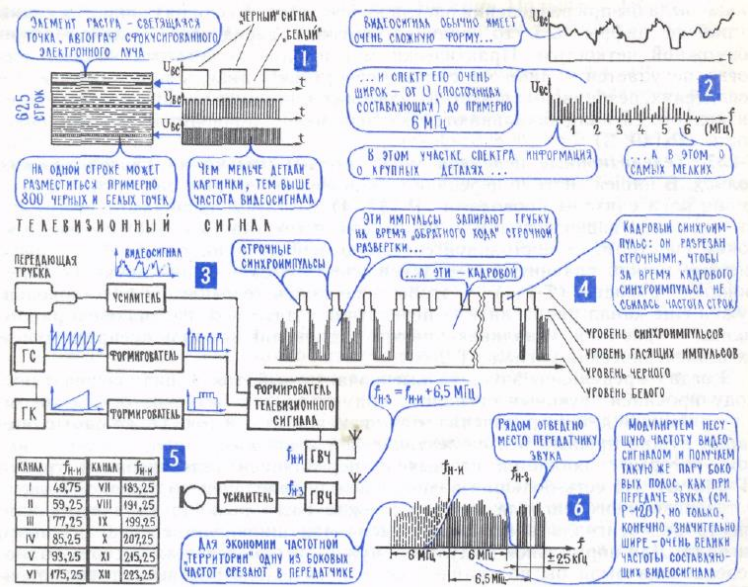


Рис. 92. Образование видео сигнала

В электронно-лучевой трубке формирование и отклонение электронного луча осуществляется электрическими или магнитными полями. Отклонение луча в пространстве осуществляется с помощью магнитных полей. В телевизионных системах производится строчная развертка изображения: луч строку за строкой прочерчивает экран в горизонтальном направлении, постепенно смещаясь вниз. Чтобы перемещать электронный луч, достаточно иметь две системы отклонения — горизонтальную и вертикальную. Первую из них называют строчной разверткой, вторую — кадровой разверткой. Магнитное отклонение луча осуществляется расположенными вне трубки отклоняющими катушками: меняя в них ток, меняют и магнитное поле, отклоняющее электронный луч.

Для отклонения луча в комплекте с трубкой согласованно работают два генератора — кадровой и строчной. Первый из них дает меняющееся напряжение, которое сравнительно медленно сдвигает луч сверху вниз, второй дает меняющееся напряжение, которое заставляет луч сравнительно быстро

двигаться справа налево, прочерчивать строку за строкой. Чтобы луч двигался равномерно необходимо, чтобы к отклоняющим пластинам подводилось пилообразное, то есть равномерно нарастающее, напряжение.

Во время обратного хода луч может внести путаницу, вторично попадая на одни и те же точки светочувствительного катода. Чтобы этого не случилось, на время обратного хода луч убирают, подав запирающее напряжение на управляющий электрод.

Приемная трубка (кинескоп): электронный луч прочерчивает люминофорный экран, создает в разных точках свечение различной яркости.

В кино смена кадров происходит 24 раза в секунду, почти такая же частота — 25 кадров в секунду — принята и для телевидения. Правда, в телевидении для того, чтобы уменьшить мелькания картинки, передаются не целые кадры, а полукадры и сменяют они друг друга в два раза чаще. Сначала, например, передаются все четные строки (первый полукадр), потом все нечетные (второй полукадр) и так далее. При этом число полных кадров остается таким же, как в кино (то есть 25 кадров в секунду), а картинка меняется в два раза чаще (50 раз в секунду), что как раз и уменьшает мелькания экрана.

С увеличением числа строк возрастает четкость картинки, однако одновременно сильно расширяется спектр телевизионного сигнала. В разных странах существуют разные телевизионные стандарты, выбрано разное число строк телевизионного раstra. В Великобритании, например, 405 строк, в США и Канаде — 525 строк, во Франции — 819 строк. В России, Венгрии, Польше, ГДР, Чехословакии, Болгарии и многих других странах стандартом установлено деление кадра на 625 строк.

Повышение четкости, увеличение числа строк сопровождается расширением спектра телевизионного сигнала.

Спектр телевизионного сигнала не остается постоянным, в процессе передачи он меняется и зависит от того, какая картинка, какое изображение в данное время передается. Чем

мельче детали картинки, тем выше частота телевизионного сигнала.

Будем считать, что нижняя граница спектра начинается от нуля, и попробуем определить, чему же равна наивысшая частота спектра, его верхняя частотная граница. Чтобы подсчитать эту наивысшую частоту, представим себе, что передается картинка в виде шахматной доски с мельчайшими клеточками, размер каждой клеточки равен высоте строки. Расчет будем вести для нашего стандарта, то есть для кадра, разделенного на 625 строк. Если бы кадр был квадратным, то на нем разместилось бы $625 \times 625 \approx 390000$ клеточек. А поскольку кадр продолговатый, соотношение его сторон по стандарту равно 4:3, то клеточек будет больше, то есть примерно 520000.

Это значит, что по мере развертки такого изображения уровень сигнала на выходе иконоскопа будет меняться 520 000 раз. Если предположить, что черным клеточкам соответствует один положительный полупериод телевизионного сигнала, а белым — отрицательный и что луч иконоскопа обегает этот кадр за 1 сек, то окажется, что телевизионный сигнал имеет частоту 260кГц. В действительности за 1 сек. передается не один кадр, а 25, и максимальная частота оказывается еще в 25 раз выше, то есть примерно составляет 6МГц.

Из расчета видно, что с увеличением числа строк резко возрастает высшая частота спектра, а это влечет за собой дополнительные трудности в усилении и преобразовании телевизионного сигнала. Не говоря уже о том, что увеличивается полоса частот, которую должен занимать в эфире телевизионный передатчик.

Телевизионные передачи могут вестись только на ультракоротких волнах. Чтобы передавать телевидение без проводов, нужен еще канал радиосвязи — передатчик с антенной, излучающей радиоволны, и приемник, улавливающий эти радиоволны и вновь превращающий их в электрический сигнал.

Для нормальной модуляции нужно, чтобы несущая частота радиопередатчика была бы по крайней мере в несколько

раз выше; Чем максимальная модулирующая частота. Это значит, что для передачи видеосигнала нужен передатчик с несущей частотой в несколько десятков мегагерц, то есть передатчик, работающий на ультракоротких волнах.

Чтобы уменьшить полосу частот, занимаемую телепередатчиком, одну из его боковых полос в антенну не пускают, и в эфир излучается только одна боковая полоса частот. Одновременно с видеосигналом на близкой к нему частоте передается звуковое сопровождение, причем для улучшения качества звука — с частотной модуляцией.

Для телевизионных передач сначала было выделено 12 частотных каналов в диапазоне метровых волн, а затем к ним добавили еще 60 каналов в диапазоне дециметровых волн. Из-за особенностей распространения ультракоротких волн телевизионные передачи можно принимать только на расстоянии прямой видимости или немного дальше. Чтобы расширить зону уверенного приема, передающую антенну стараются поднять повыше, но даже антенны, установленные на верхушке высочайшей Останкинской телевизионной башни, создают зону уверенного приема радиусом до 120—150 км. Передача телевизионных программ на большие расстояния ведется по радиорелейным или кабельным линиям или через искусственные спутники Земли.

Основные узлы телевизора — преобразователь частоты с переключением каналов, усилитель ПЧ, детекторы звука и изображения, видео усилитель, усилитель НЧ, генераторы строчной и кадровой развертки, системы синхронизации и питания. Когда-то телевизионные приемники строились по разным схемам, были и приемники прямого усиления, и сдвоенные супергетеродины с двумя самостоятельными каналами промежуточной частоты — для звукового сигнала и сигнала изображения (Рис. 93).

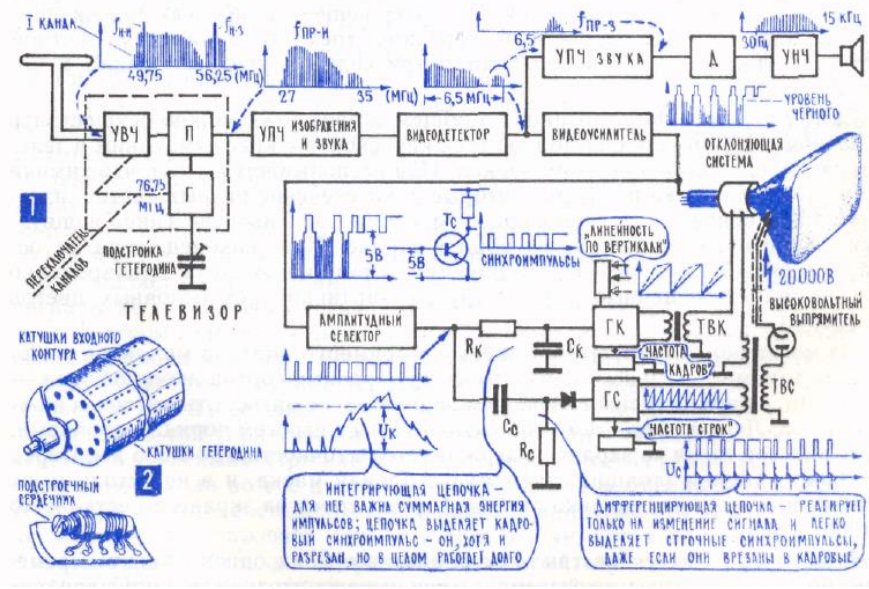


Рис. 93. Структурная схема и основные узлы телевизора

Все современные телевизоры строятся по так называемой схеме одноканального приема, которая очень упрощенно показана на. Первый каскад телевизора — усилитель ВЧ, второй — преобразователь частоты. Оба каскада находятся в едином блоке, переключателе телевизионных каналов ПТК, (некоторые его образцы назывались переключателем телевизионных программ ПТП).

В последние годы вместо ПТК используют, как их называют, селекторы каналов — СКМ (метровый диапазон) и СКД (дециметровый диапазон).

После преобразователя в телевизоре получается сигнал промежуточной частоты, причем в телевизоре частота эта весьма высокая — 38 МГц (несущая), — а усилитель ПЧ пропускает очень широкую полосу частот—около 7 МГц. В этой полосе оказываются и видеосигнал, и звуковой сигнал. После усилителя ПЧ весь сигнал промежуточной частоты целиком поступает на нормальный амплитудный детектор

(видеодетектор). Здесь из высокочастотного модулированного сигнала выделяется сам видеосигнал, который подается на видеоусилитель, а с него прямо на управляющий электрод кинескопа и меняет яркость свечения различных точек люминофорного экрана, по мере того, как электронный луч движется по этому экрану.

Что же касается звука, то для него прием идет по схеме с двойным преобразованием частоты — вторым преобразователем здесь по совместительству работает сам видеодетектор, в нем рождается сигнал второй промежуточной частоты звука ($6,5 \text{ МГц}$). С помощью фильтров ее отделяют от видеосигнала, направляют в дополнительный усилитель ПЧ (его называют усилителем ПЧ звука, сокращенно УПЧЗ, затем на частотный детектор, усилитель НЧ и громкоговоритель.

Генераторы развертки, которые дают пилообразные напряжения каждой своей частоты — кадровый (ГК) 50 Гц , строчный (ГС) — 15625 Гц . Через отклоняющие обмотки современных кинескопов нужно пропускать значительный ток, поэтому каждый блок развертки содержит два каскада — собственно генератор (мультивибратор или чаще блокинг-генератор) и усилитель на сравнительно мощной лампе или мощном транзисторе.

От усилителя строчной развертки требуется некоторая дополнительная мощность — он по совместительству используется еще и для получения высокого напряжения, которое подается на второй анод кинескопа.

В усилителе строчной развертки имеется выходной трансформатор (трансформатор выходной строчный, сокращенно ТВС), с одной из его обмоток пилообразное напряжение подводится к отклоняющим катушкам. В строчном трансформаторе есть повышающая обмотка, с которой напряжение подается на выпрямитель, а с него через фильтр на второй анод кинескопа. Именно благодаря высокой скорости изменения тока во время обратного хода, на этой повышающей обмотке, имеющей всего несколько сот витков, получается напряжение в полтора — два десятка киловольт, и сам

строчный трансформатор представляет собой сравнительно небольшую деталь.

Чтобы электронный луч в кинескопе двигался в такт с лучом в передающей трубке, в телевизионный сигнал подмешивают импульсы синхронизации -кадровые и строчные. В телевизоре эти импульсы выделяют и направляют к генераторам развертки. Синхронизирующие импульсы навязывают генераторам свой ритм, и именно таким образом достигается идеальное согласование разверток изображения на передатчике и в приемнике. Чтобы синхронизирующие импульсы не попадали на экран, не портили изображения, их спаривают с гасящими импульсами, которые вводятся в видеосигнал на момент обратного хода луча и с помощью которых гасится электронный луч (уровень гасящих импульсов выше уровня черного; они попросту запирают кинескоп, прерывают электронный луч на время его обратного хода). Чтобы за время кадрового синхронизирующего импульса не сбилась частота генератора строчной развертки, в кадровый синхроимпульс врезают несколько строчных. Именно строгая последовательность синхроимпульсов обеспечивает точное попадание на свои места строчек четных и нечетных полукадров.

Селектор (разделитель) синхроимпульсов. Транзистор, ко входу которого подводится весь видеосигнал, надежно закрыт постоянным положительным смещением, он открывается только в момент появления синхроимпульсов; только они создают ток в коллекторной цепи и напряжение на нагрузке. Здесь же в коллекторной цепи происходит отделение кадровых синхроимпульсов от строчных. Кадровые импульсы выделяет так называемая интегрирующая цепочка $R_K C_K$; ее конденсатор C_K заряжают все импульсы коллекторного напряжения, но только длительные кадровые импульсы успевают зарядить его до сравнительно большого напряжения U_K . Строчные импульсы выделяет дифференцирующая цепочка $R_C C_C$; по ее нагрузочному резистору R_C ток идет только в момент заряда конденсатора C_C , то есть только в момент изменения

напряжения на коллекторе. Поэтому одинаковые импульсы зарядного тока, а значит, и одинаковые импульсы напряжения U_c появляются и под действием основных импульсов строчной синхронизации, и под действием строчных импульсов, врезанных в кадровый импульс.

Используя люминофоры красного, синего и зеленого свечения и передав по телевизионному каналу информацию об окраске объекта, можно воспроизвести многоцветную картинку. Любой цвет радуги можно получить, смешивая в определенной пропорции краски трех основных цветов — красного, синего и зеленого.

Передав по каналам связи три составляющие многоцветного объекта — красную, синюю и зеленую, а затем в месте приема сложив их на общем экране, можно получить цветное телевизионное изображение. Иногда, например, создаются три совершенно одинаковых телевизионных канала, для одновременной передачи трех составляющих цветной картинки. Или по очереди передаются три кадра — красный, синий и зеленый.

Само сложение трех картинок на общем экране тоже можно осуществить по-разному. Например, взяв за основу масочный кинескоп, в котором три электронных луча одновременно рисуют три совмещенные друг с другом картинки трех основных цветов.

На мозаичном экране этого кинескопа примерно полтора миллиона мельчайших (диаметр меньше $0,3 \text{ мм}$) точек трех разных сортов люминофоров -с красным, синим и зеленым свечением, примерно по пятьсот тысяч точек каждого цвета. Люминофорные точки расположены в строгом порядке, тройками, место каждой точки на экране выдерживается с точностью до $0,005 \text{ мм}$. Перед экраном — тонкая (толщина $0,15 \text{ мм}$) стальная маска, и в ней столько же мельчайших дырочек, сколько люминофорных троек на экране, то есть около пятисот тысяч.

В масочном кинескопе три электронных луча, их одновременно перемещает общая отклоняющая система, но током каждого луча можно управлять в отдельности. Все три

луча попадают на экран, только пройдя через отверстие в маске. А поскольку лучи приходят к маске под разными углами, то и отверстие они тоже проходят под разными углами и попадают в разные точки экрана. В масочном кинескопе все рассчитано так, чтобы каждый луч попадал на люминофорные точки только одного цвета. Поэтому один луч рисует только красную картинку, второй — только синюю, третий — только зеленую. На электроды, управляющие током этих лучей, подаются три разных сигнала. Один из них несет информацию о красной составляющей картинки, второй - о синей, третий - о зеленой. В итоге на экране «одна в другой» появляются три картинки трех основных цветов, а так как точечная структура экрана издала незаметна, то эти картинки сливаются в одну многоцветную.

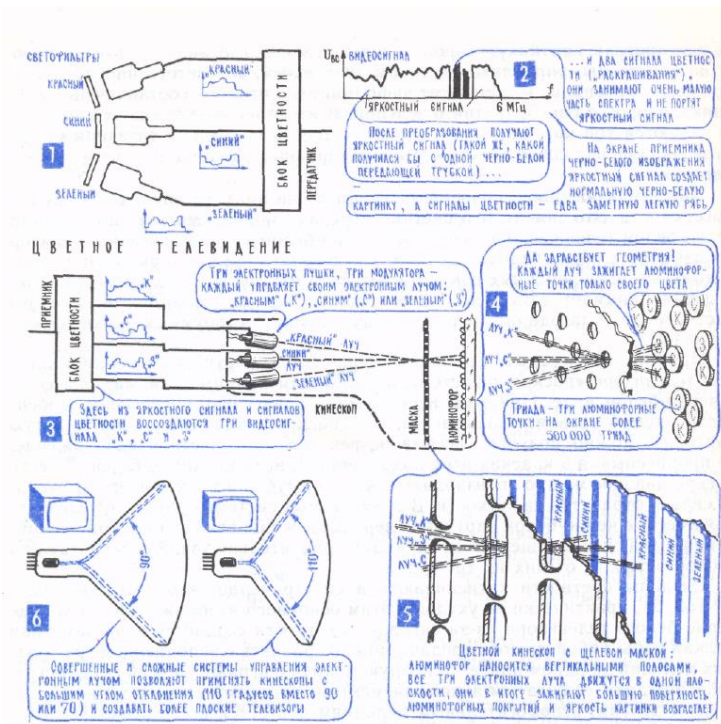


Рис. 94. Получение цветного видео изображения

Сигналы цветности вписывают в спектр черно-белого видеосигнала, практически не ухудшая этим основного изображения: на экране черно-белого телевизора из-за сигналов цветности создается едва заметная мелкая рябь.

В цветном телевизоре сигналы цветности вместе с основным черно-белым сигналом сложным образом преобразуются. В итоге восстанавливаются три исходных цветовых сигнала, в которых заключена информация о красной, синей и зеленой составляющих цветной картинке. Эти три сигнала подаются на три управляющих электрода цветного кинескопа (Рис. 94).

В мире существует несколько совместимых систем цветного телевидения. По основной своей идее все они одинаковы, главное различие в способах записывания информации в сигналах цветности. В нашей стране цветное телевидение развивается на основе советско-французской системы СЕКАМ, в которой сигналы цветности передаются по очереди, через строку.

В приемнике один из сигналов попадает на линию задержки и, двигаясь по ней, дожидается прихода второго сигнала. У черно-белого и цветного телевизоров много общих узлов, различие появляется только после детектора, когда начинается выделение и переработка сигналов цветности. В целом же цветной телевизор намного сложнее черно-белого по своей схеме, по технологии обработки электрических сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьева Н.А., Булат Л.П. Электротехника и электроника: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2010. – 181 с.
2. Блохин, А. В. Электротехника: учебное пособие. – 2-е изд., испр. – Екатеринбург: изд-во Урал. ун-та, 2014. – 184 с.
3. Жаворонков М.А. Электротехника и электроника: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 400 с.
4. Новожилов О.П. Электротехника и электроника: учебник для бакалавров. - 2-е изд. испр. и доп. – М.: Юрайт, 2013. – 653 с.
5. Прошин В.М. Электротехника для неэлектротехнических профессий: учебник для студ. учр. сред. проф. образования. – М.: изд. центр «Академия», 2014. – 464 с.
6. Самедов М.Н., Шибанов В.М. Электротехника: методическое пособие для нефизических факультетов. – Елабуга: изд-во ЕГПУ, 2006. – 52 с.
7. Самедов М.Н., Шибанов В.М. Электроника: учебно-методическое пособие. – Елабуга: изд-во ЕИ КФУ, 2013. – 160 с.
8. Шибанов В.М., Самедов М.Н. Электротехника и электропривод: учебно-методическое пособие. – Елабуга: изд-во ЕИ КФУ, 2013 – 61 с.
9. Шурыгин В.Ю., Самедов М.Н., Шибанов В.М. Электротехника: методические указания и варианты контрольных работ. – Н.Челны: изд-во Камского института, 2006. – 54 с.

Самедов Магамед Насиб оглы
Шибанов Виктор Михайлович
Шурыгин Виктор Юрьевич

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА
Учебное пособие для бакалавров

Сдано в печать 3.12.2015 г. Формат 84x108/82. Объем 7,5 усл. п. л.
Тираж 300 экз. Отпечатано 15.12.2015 г. Типография ЕИ КФУ.
Издательство ЕИ КФУ. 423604, г. Елабуга, ул. Казанская, 89.