

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**

**ДОНЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Стефаненко П.В.

## **УСИЛИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ**

*Рекомендовано Министерством образования и науки Украины в качестве учебного пособия для студентов специальности «Радиотехника» и курсантов высших военных учебных заведений*

Донецк, ДонГТУ 2000

С 79 Стефаненко П.В. Усилители электрических колебаний. Учебное пособие. — Донецк: ДонГУУ, 2000. — 53 с.

**Рецензенты:**

Н.И. Дворак канд. техн. наук, доцент кафедры

Электрооборудования и автоматики

Керченского МТИ

В.В. Колодяжный

канд. техн. наук, доцент кафедры

Электрооборудования и автоматики

Керченского МТИ

Рассматриваются общие сведения об усилителях, их классификации, режимах работы усилительных элементов, основные показатели характеристик усилителей. Предназначено для самостоятельной работы студентов и курсантов высших учебных заведений.

ISBN 966-7559-32-7

© ДонГУУ, 2000

Развитие техники в годы НТР, появление новых принципов усиления сигналов, создание полупроводниковой и микроэлементной РЭА требуют пересмотра принципов анализа усилительных схем.

Совершенствование технологии позволяет создавать полупроводниковые усилители с полезной мощностью до 400 Вт, работающие в диапазоне сотен МГц. В последнее время полупроводниковые диоды заменяют микросхемы. В усилительных каскадах радиопередатчиков микросхемы используются в маломощных ступенях, побудителях, преобразователях частоты и др.

В пособие введен ряд новых вопросов, например коррекция АЧХ усилителей, усилительные устройства СВЧ и др.

## 1. Общие сведения об усилителях, их классификация.

Усилителем электрических сигналов называют устройство, увеличивающее мощность электрических сигналов без изменения их формы.

Усилители электрических сигналов широко применяются в радиотехнических устройствах. Они используются в радиоприемных устройствах, в радиопередаточных устройствах, аппаратуре звукоусиления и звукозаписи, в системах проводной связи, в измерительной аппаратуре, в электронно-вычислительной технике и т. д. Усилители так же широко используются во всевозможных автоматических и телемеханических устройствах, без которых не могут обойтись современные промышленные предприятия, электросистемы, нефте- и газопромыслы и другие производства.

В состав любого усилителя электрических сигналов входит элемент, обладающий усиительным свойством. В зависимости от типа используемого элемента усилители делятся на транзисторные, ламповые, магнитные, диодные, молекулярные, параметрические и др. Чаще всего в качестве усиительных элементов используются транзисторы или электронные лампы (рис.1). Принцип действия используемых в них усиительных элементов основан на электронных процессах, происходящих в полупроводнике или в вакууме.

Транзисторы и электронные лампы являются наиболее совершенными и универсальными усиительными элементами. Они обеспечивают большое усиление в широкой полосе частот имеют сравнительно простые схемы включения и большой срок службы. По этим причинам электронные усилители находят наиболее широкое применение в радиотехнических устройствах: радиосвязи, радиолокации и т. д.

Магнитные, диодные, молекулярные, параметрические и другие типы усилителей имеют более узкие и специализованные области применения.

По характеру нагрузки усилители делятся на апериодические и резонансные (УВЧ).

В апериодических усилителях сопротивление нагрузки меньше зависит от частоты (так в УНЧ обычно нагрузкой является резистор), чем в резонансных, где в качестве нагрузки используются колебательные контуры.

В зависимости от диапазона рабочих частот различают:

1. Усилители постоянного тока (УПТ), предназначенные для усиления медленно изменяющихся токов. Используются, когда

при усилении необходимо сохранить соотношение между переменной и постоянной составляющими усиливаемого сигнала.

2. Усилители низкой частоты (УНЧ) предназначены для усиления частот звукового диапазона (20 Гц - 20 кГц).

3. Высокочастотные усилители (УВЧ) работают в широкой полосе частот (от десятков герц до нескольких мегагерц). Используются в импульсных устройствах.

4. Резонансные усилители работают в диапазоне высоких частот (МГц). К ним относятся усилители на радиочастотах, т. е. на несущих частотах (УВЧ), а также на промежуточных частотах (УПЧ). Эти усилители характеризуются высокими избирательными свойствами.

В зависимости от способности усилителя усиливать напряжение или мощность различают усилители напряжения (УН) и мощности (УМ).

В усилителе напряжения режим работы устанавливается таким, чтобы напряжение выходного сигнала было бы больше, чем напряжение входного сигнала  $U_{вых} > U_{вх}$ . При этом величина мощности входного сигнала существенного значения не имеет. В усилителе мощности основной задачей является выделение определенной мощности сигнала нагрузки, а величина выходного напряжения значения не имеет.

Усилительные каскады также принято классифицировать по следующим признакам: по способу включения усиительного элемента, по числу усиительных элементов и по режиму работы усиительного элемента.

Электронные усилители могут состоять из одного или нескольких усиительных каскадов. Поэтому они соответственно называются однокаскадными или многокаскадными. Структурная схема многокаскадного усилителя изображена на рис.2.

Источник питания обеспечивает усиительный каскад электрической энергии, за счет которой происходит процесс усиления электрического сигнала. В качестве источника питания в электронных усилителях используются: выпрямители, батареи гальванических элементов или аккумуляторов. Основными элементами усиительного каскада являются: усиительный элемент и нагрузка (рис.3)

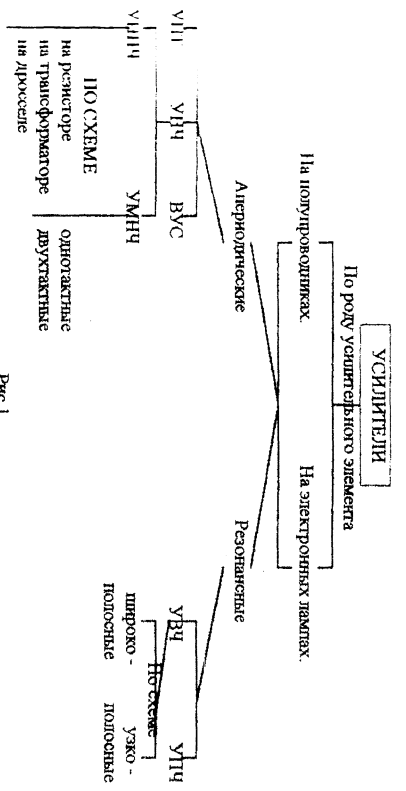


Рис. 1

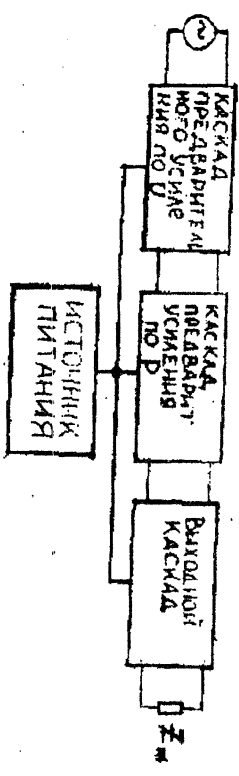


Рис. 2.

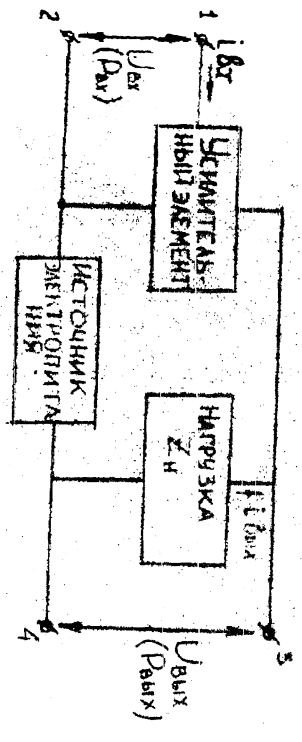


Рис. 3.

Усилительный элемент — это элемент, обладающий усиительным свойством, которое заключается в том, что небольшие изменения напряжения на управляющем электроде усиительного элемента приводят к большим изменениям тока, протекающего через

усилительный элемент. В электронных усилителях в качестве усиительных элементов используются транзисторы или электронные лампы. У электронных ламп управляющим электродом является управляющая сетка, а у транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, — база.

Нагрузка усиительного элемента — это элемент, на котором выделяется усиленный сигнал за счет тока усиительного элемента. В качестве нагрузки используются резисторы, дроссели, трансформаторы, параллельные колебательные контуры, связанные контуры. Динамические громкоговорители (динамики), головные телефоны, отклоняющие пластины электронно-лучевых трубок и т. д.

В усиительном каскаде различают вход и выход. Вход усиительного каскада — это точки 1 и 2, к которым подводится входной усиливаемый сигнал, характеризующийся напряжением  $U_{вх}$ , током  $I_{вх}$  и мощностью  $P_{вх}$ . Входной сигнал подает на управляющий электрод усиительного элемента. Выход усиительного каскада — это точки 3 и 4, с которых снимается выходной усиленный сигнал, характеризующийся напряжением  $U_{вых}$ , током  $I_{вых}$  и мощностью  $P_{вых}$ .

Усиленный сигнал снимается с нагрузки усиительного элемента. Усилительные элементы (лампы и транзисторы) имеют три основных электрода. Один из них должен быть общим для входной и выходной цепей усилителя. Различают три основные схемы включения усиительного элемента:

- с общим катодом, эмиттером, истоком (ОК, ОЭ, ОИ) (рис. 4 а, б, в)
- с общей сеткой, базой, затвором (ОС, ОБ, ОЗ) (рис. 5 а, б, в)
- с общим анодом, коллектором, стоком (ОА, ОК, ОС) (рис. 6 а, б, в).

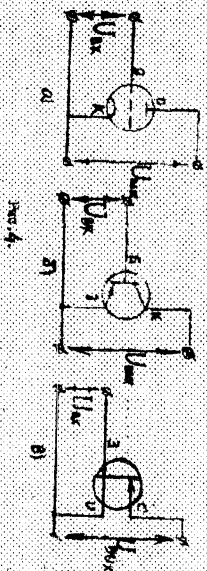


рис. 4.

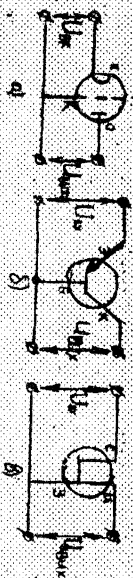


рис. 5.

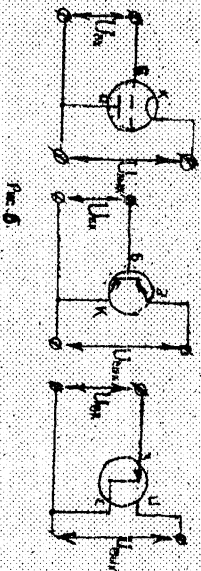


рис. 6.

## 2. Режимы работы усилительных элементов.

Различают несколько режимов работы усилительных элементов. Отличаются эти режимы выбором рабочей точки на динамической характеристике.

### а) Режим «А»:

Это такой режим работы усилительного элемента, когда ток в выходной цепи существует в течение всего периода сигнала (рис. 7), рабочая точка находится на середине линейного участка характеристики.

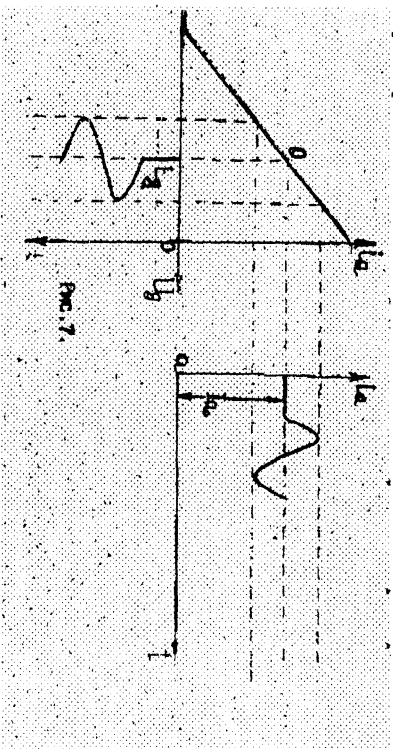


рис. 7.

Основным недостатком режима «А» является незначительное усиление сигнала, недостатком – низкий КПД (20-30%).

Режим «А» применяют в каскадах предварительного усиления, редко в выходных каскадах усиления малой мощности.

### б) Режим «В»:

Это такой режим работы, при котором ток  $I_a$  существует в течение примерно половины периода сигнала (рис. 8), напряжение смещения  $E_{г0}$  примерно равно напряжению записания лампы  $E_{г0}$ . Усилитель открывается только положительными полупериодами входного сигнала, образуя в анодной цепи импульсы анодного тока.

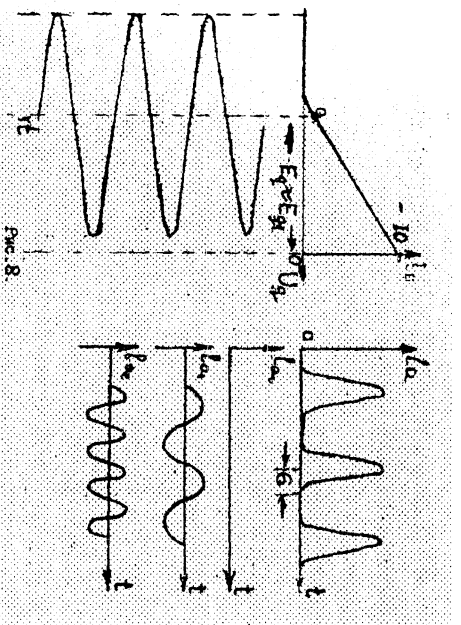


Рис. 8.

Режимы с отсечкой анодного тока характеризуют углом отсечки  $\theta^\circ$ . Это угол, соответствующий половине той части периода, в течение которой в цепи проходит ток. В режиме "B" угол отсечки  $\theta = 90^\circ$ . Такая последовательность импульсов анодного тока может быть представлена в виде ряда гармоник с частотами, кратными частоте повторения импульсов, т. е. частоте выходного сигнала.

$$I_o(t) = I_{o0} + I_{o1m} \cos \omega t + I_{o2m} \cos 2\omega t + \dots$$

$I_{o0}$  – постоянная составляющая анодного тока.

$I_{o1m}, I_{o2m}$  – амплитуды первой, второй и т. д. гармоник.

Основным достоинством режима "B" является высокий КПД, что позволяет использовать этот режим в мощных выходных каскадах ( $\eta = 60 - 70\%$ ).

В схемах усиления гармонических колебаний режим "B" не применяется из-за значительных нелинейных искажений.

в) Режим "С":

Это режим работы, при котором ток в выходной цепи течет меньше половины периода сигнала ( $\theta < 90^\circ$ ). Этот режим имеет очень высокий КПД.

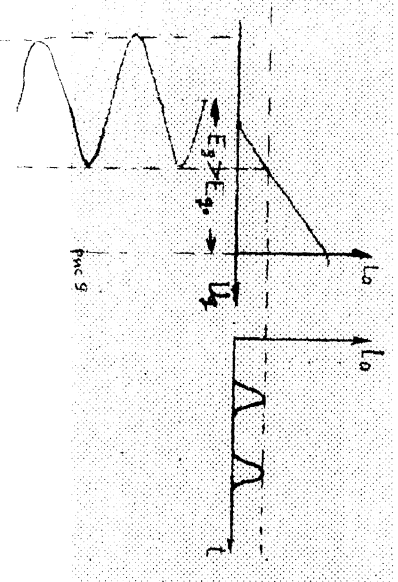


Рис. 9.

Режим "С" находит применение в мощных резонансных усилителях радиопередаточных устройств, где нагрузкой является параллельный контур, настроенный на частоту входного сигнала или на одну из его гармоник.

1) Режим "ДТ" (ключевой режим):

Это такой режим, при котором усилитель находится в двух состояниях: или заперт ( $I_o = 0$ ) или открыт ( $U \approx 0$ ). КПД оказывается близким к единице.

### 3. Основные показатели и характеристики усилителей.

Эффективность работы усилителя оценивается его показателями и характеристиками.

Основные показатели усилителей – это коэффициенты усиления, коэффициент полезного действия, диапазон рабочих частот, динамический диапазон, входное и выходное сопротивление и др. У усилителей высокой и сверх высокой частоты важным показателем является также коэффициент шума.

Основными характеристиками усилителей является амплитудно-частотная /АЧХ/ и амплитудная /АХ/ характеристики.

Входным сопротивлением усилителя  $Z_{вх}$  называют сопротивление между его входными точками (1 и 2 на рис. 3).

Входное сопротивление можно определить, пользуясь законом Ома как отношения входного напряжения усилителя  $U_{вх}$  и его входному току  $I_{вх}$

$$|Z_{вх}| = U_{вх} / I_{вх}$$

Поскольку входной ток, как правило, не совпадает по фазе с входным напряжением, то входное сопротивление по характеру

комплексное, т. е. оно состоит из активной  $R_{вх}$  и реактивной  $X_{вх}$  составляющих.

Величина активной составляющей входного сопротивления усилителя характеризует употребляемому усилителем мощность источника усиливаемого сигнала  $P_{вх}$ .

$$P_{вх} = I_{вх}^2 * R_{вх}$$

Например, в многокаскадных усилителях  $P_{вх}$  характеризует потребляемому мощность данным каскадом от предыдущего. Чем больше входное сопротивление усилителя, тем меньшая мощность требуется от источника усиливаемого сигнала для управления работой данного усилителя.

Выходным сопротивлением усилителя  $Z_{вх}$  называют сопротивление между его выходными точками (3 и 4 на рис.3).

Выходное сопротивление тоже можно определить по закону Ома как отношение выходного сопротивления усилителя к его выходному току

$$|Z_{вх}| = U_{вх} / I_{вх}$$

Выходное сопротивление усилителя, как правило, комплексное. Величина выходного сопротивления усилителя определяется видом нагрузки усилительного элемента и типом усилителя.

Коэффициентом полезного действия (КПД) усилителя называют отношение отдаваемой усилителем мощности сигнала к суммарной мощности, потребляемой усилителем от всех источников питания.

$$\eta = P_{сиг} / \Sigma P$$

КПД является одним из важнейших показателей для усилителей большой мощности, которые потребляют большую суммарную мощность источников питания. Величина КПД усилителя зависит от вида схемы усилителя, используемых в нем усилительных элементов и их режима работы. Усилитель имеет более высокой КПД, если его усилительные элементы работают в режиме с отсечкой тока при определенных значениях угла отсечки. Для усилителя малой мощности КПД является несущественным показателем, поскольку эти усилители потребляют от источников питания малую суммарную мощность.

Коэффициентом усиления усилителя по напряжению  $K_u$  называется отношение выходного напряжения сигнала  $U_{с вх}$  к входному  $U_{вх}$ .

$$K_u = U_{с вх} / U_{вх}$$

Коэффициент усиления по напряжению часто называют просто коэффициентом усиления и обозначают  $K$ .

Коэффициентом усиления по мощности  $K_p$  называют отношение среднего значения мощности сигнала на выходе  $P_{с вх}$  к среднему значению мощности сигнала на входе  $P_{вх}$ .

$$K_p = P_{с вх} / P_{вх}$$

Коэффициентом усиления усилителя по току  $K_i$  называют отношение выходного тока сигнала  $I_{с вх}$  к входному  $I_{вх}$ .

$$K_i = I_{с вх} / I_{вх}$$

У многокаскадных усилителей общий коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов. Например, общий коэффициент усиления по напряжению  $n$ -каскадного усилителя равен

$$K_u = K_{u1} K_{u2} \dots K_{un}$$

где  $K_{u1}$ ,  $K_{u2}$ ,  $K_{un}$  — соответственно коэффициенты усиления по напряжению первого, второго и последнего  $n$ -го каскада.

Коэффициент усиления часто выражают не в отвлеченных единицах, а в логарифмических (децибелах). Для этого используют выражения:

$$K_u [\text{дБ}] = 20 \lg K_u; \quad K_i [\text{дБ}] = 20 \lg K_i; \quad K_p [\text{дБ}] = 10 \lg K_p.$$

Так, например, если выходное напряжение усилителя  $U_{с вх} = 40\text{В}$ , входное  $U_{вх} = 0,025\text{В}$ , то коэффициент усиления по напряжению в относительных единицах равен

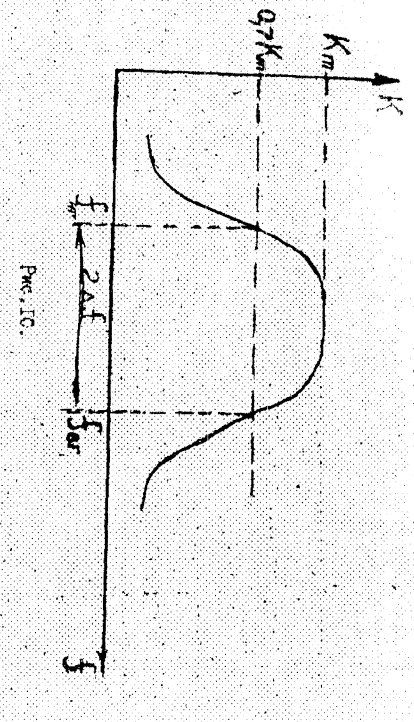
$$K_u = 40/0,025 = 1600.$$

а в децибелах составляет величину  $K_u [\text{дБ}] = 20 \lg 1600 = 20 * 3,2 = 64\text{дБ}$ . У многокаскадного усилителя общий коэффициент усиления в децибелах равен сумме коэффициентов усиления всех каскадов в децибелах.

$$K_u [\text{дБ}] = K_{u1} [\text{дБ}] + K_{u2} [\text{дБ}] + \dots + K_{un} [\text{дБ}].$$

Амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) усилителя называется зависимость коэффициента усиления от частоты сигнала.  $|K| \neq \Phi(\omega)$ .

Форма АЧХ усилителя в основном определяется видом нагрузки усилителя. Кроме того, на форму АЧХ усилителя влияют вспомогательные реактивные элементы, входящие в состав усилителя. Наиболее часто АЧХ усилителя имеет вид, показанный на рис. 10.



Усилитель имеет максимальный коэффициент  $K_m$  на одной частоте или в некоторой области частот. На остальных частотах коэффициент усиления уменьшается и приближается к нулю. Таким образом, усилитель усиливает сигналы различных частот неодинаково: сигналы одной частот усиливает в большей степени, а сигналы других частот – в меньшей степени. Однако резкой границы между этими сигналами нет. Для условного разграничения сигналов, усиливаемых в большей степени от основных сигналов, усилитель характеризуется полосой пропускания.

Полосой пропускания (П) называют область частот в пределах которой коэффициент усиления  $K \geq 0,7K_m$ .

Полоса пропускания ограничена нижней  $f_{нг}$  и верхней  $f_{вг}$  граничными частотами.

$$2\Delta f = f_{вг} - f_{нг}$$

Граничные частоты – это частоты, на которых коэффициент усиления равен семи десяткам от максимального значения коэффициента усиления.

$$K_g = 0,7K_m$$

При усилении сигналов усилитель несколько изменяет их форму. Отличие формы выходного сигнала от формы входного называют искажением сигнала. Искажения сигнала в усилителе бывают частотные, фазовые и нелинейные.

Частотные искажения сигнала обусловлены тем, что коэффициент усиления на разных частотах имеет различные значения даже в пределах полосы пропускания. Поэтому составляющие сложного входного сигнала (гармоники) разных частот усиливаются в разной степени, и соотношение между их амплитудами в выходном сигнале получается не таким, каким оно было во входном сигнале. Для получения небольших частотных искажений усиливаемого сигнала

полоса пропускания усилителя должна быть не уже ширины спектра усиливаемого сигнала  $2\Delta f_{пс}$ .

$$2\Delta f \geq 2\Delta f_{пс}$$

Фазовые искажения сигнала обусловлены тем, что гармоники входного сигнала в усилителе получают разные фазовые сдвиги из-за наличия в составе усилителя вспомогательных реактивных элементов, сопротивление которых зависит от частоты.

Частотные и фазовые искажения сигнала иногда называют линейными, так как их возникновение связано с линейными элементами усилителя.

Нелинейные искажения сигнала в усилителе возникают из-за нелинейности характеристик усилительных элементов.

На рис. 11 изображена характеристика биполярного транзистора и показано возникновение нелинейных искажений в нем вследствие того, что исходная рабочая точка А установлена не на середине линейного участка, а близко к нижнему изгибу характеристики.

При подаче на вход такого усилителя входного напряжения  $U_{вх}$ , изменяющегося строго по синусоидальному закону, переменная составляющая тока коллектора транзистора положительно и отрицательно полупериоды изменяются на различные величины, т.е. получается несимметричной. Выходное положение усилителя получается несинусоидальное. Для уменьшения нелинейных искажений сигнала в усилителе необходимо выбрать его режим работы так, чтобы использовался наиболее линейный участок характеристики усилительного элемента при всех возможных значениях входного напряжения.

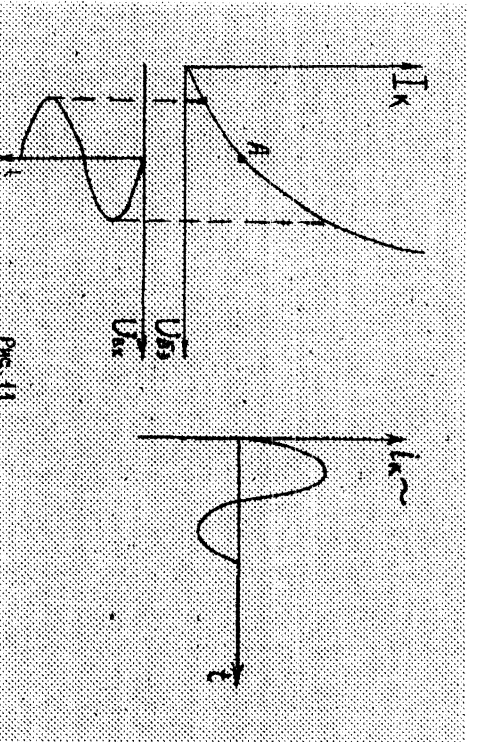


Рис. 11



Амплитудной характеристикой усилителя (АХ) называется зависимость выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  от входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ .

$$U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}}).$$

Выходное напряжение связано с входным напряжением следующим соотношением

$$U_{\text{вых}} = K \cdot U_{\text{вх}}.$$

где  $K$  – коэффициент усиления усилителя.

Если бы коэффициент усиления усилителя от входного напряжения не зависел, т. е. был бы постоянным  $K = \text{const}$ , то АХ усилителя представляла бы прямую линию, проходящую через начало координат под некоторым углом (пунктирная линия).

Этот угол зависит от величины коэффициента усиления усилителя. Чем больше коэффициент усиления, тем больше угол  $\alpha$ .

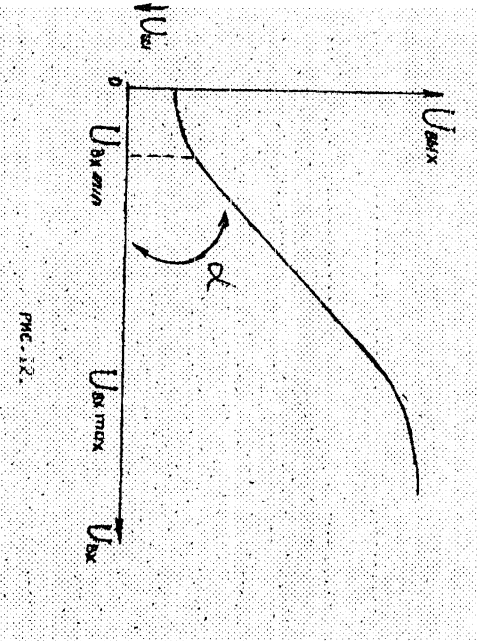


рис. 12.

АХ реального усилителя (сплошная линия) не проходит через начало координат, а изгибается при небольших значениях входного напряжения, пересекая вертикальную ось в точке  $U_{\text{пн}}$ , т. к. при отсутствии входного напряжения сигнала выходное напряжение усилителя равно напряжению его собственных (внутренних) шумов в его выходной цепи  $U_{\text{ш}}$ . При слишком больших значениях входного напряжения реальная АХ также изгибается из-за перетрузки усилительного элемента.

Из рис. 12 видно, что реальный усилитель может нормально усиливать сигналы с напряжением большим, чем  $U_{\text{вх min}}$ , и меньше  $U_{\text{вх max}}$ , т. к. более слабые сигналы будут заглушаться напряжением собственных шумов усилителя  $U_{\text{пн}}$ , а очень сильные сигналы будут вносить большие нелинейные искажения.

Отношение  $U_{\text{вх max}} / U_{\text{вх min}}$  характеризует диапазон входных напряжений сигнала, усиливаемых данным усилителем без чрезмерных помех и искажений, и называется диапазоном усиления  $D$ .

$$D = U_{\text{вх max}} / U_{\text{вх min}}; \quad D(\text{дБ}) = 20 \lg D.$$

Для расширения динамического диапазона усилителя используются системы ручной и автоматической регулировок усиления в усилителях.

# 1. Резисторные усилители.

Резисторные усилители применяются в качестве усилителей напряжения низкой (звуковой) частоты (УННЧ) в радиоприемниках, в аппаратуре звукозаписи и звукопрозравления в системах проводной связи. Кроме того, на базе резисторных усилителей составляются широкополосные усилители видеосигналов (видеоусилители).

В качестве нагрузки усилительных элементов используется частотно-независимые элементы – резисторы. Поэтому такие усилители называют апериодическими. Принципы работы электронных усилителей подробно рассмотрены в учебниках пособиях «Электроракумные приборы», «Подупроводниковые приборы».

а) Резисторный усилитель на лампе (рис. 13).

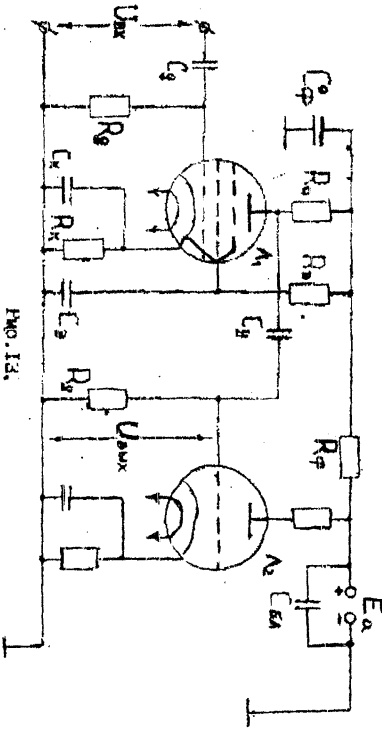


рис. 13.

Назначение элементов:

1. Ra – сопротивление анодной нагрузки, служит для выделения усиленного лампы напряжения сигнала и подачи на анод питающего напряжения от источника Eп.
2. Rk, Ck – ячейка смещения, обеспечивает смещение рабочей точки на нужный участок характеристики.
3. Cf, Rf – развязывающий фильтр, устраняет попадание переменной составляющей анодного тока на внутреннее сопротивление источника.
4. Cd – разделительный конденсатор, предотвращает путь постоянной составляющей с анода усилителя на вход следующего каскада.

5. Rd – сопротивление утечки, обеспечивает стекание электронов с управляющей сетки и осуществляет подачу напряжения смещения на сетку усилителя.

Rз – гасящее сопротивление в цепи экранирующей сетки. Cз – блокировочный конденсатор, отводит переменную составляющую тока экранирующей сетки на корпус.

При отсутствии входного сигнала в цепи усилителя протекают постоянные составляющие токов, создающие постоянные падения напряжения на резисторах Ra, Rk, Rз.

Путь постоянной составляющей анодного тока Ia0:

$$(+)\text{Ea} \rightarrow Rf \rightarrow Rg \rightarrow a \rightarrow k \rightarrow Rk \rightarrow (-) Eo$$

Путь постоянной составляющей экранного тока Iэ0:

$$(+)\text{Ea} \rightarrow Rf \rightarrow Rg \rightarrow Rз \rightarrow D2 \rightarrow k \rightarrow Rk \rightarrow (-) Eo$$

При этом образуется постоянное напряжение на аноде лампы

$$Ua = Ea - Ia0 * Ra (Rf \ll Ra)$$

и отрицательное напряжение смещения

$$Ed = URk = Rk (Ia0 + Iэ0).$$

которое подается на управляющую сетку лампы, обеспечивая работу усилителя в режиме "А".

При поступлении на вход схемы переменного сигнала, в анодной цепи появляется переменная составляющая анодного тока Ia:

$$\rightarrow Ra \rightarrow Rf \rightarrow I \rightarrow Ck \rightarrow k.$$

Г. к. источник переменной составляющей анодного тока – лампа может быть заменена эквивалентным генератором, ЭДС которого

$U_{гг} * U_{вх}$ , а внутреннее сопротивление R1, то схему можно представить в следующем виде (рис. 14).

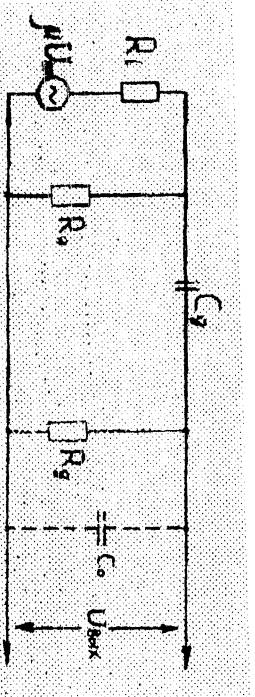


рис. 14.

Емкость Cо – является полной емкостью схемы

$$Cо = C_{вх A1} + C_{вх A2} + C_{м}.$$

Cвх A1 – емкость анод.-катод. Д1

Cвх A2 – емкость сетка-катод Д2

Cм – емкость монтажа.

На средних частотах  $C_d$   $C_o$  влияние на работу схемы не оказывают.

Нагрузкой усилителя будет сопротивление

$$R_o = R_o * R_d / (R_o + R_d) \quad R_o, \text{ т. к. } R_d \gg R_o$$

Тогда эквивалентная схема усилителя на средних частотах примет вид (рис.15).

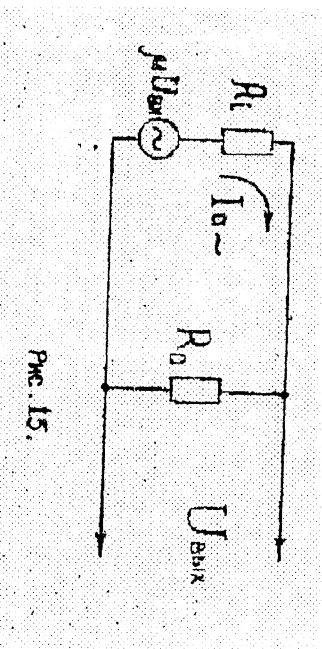


Рис. 15.

Величина переменной, составляющей анодного тока

$$I_a = \mu * U_{вх} / (R_1 + R_a)$$

Этот ток создает на нагрузке падение напряжения

$$U_{вх} = I_a * R_a = \mu * U_{вх} / (R_1 + R_a) * R_o$$

Тогда коэффициент усиления каскада

$$K = U_{вх} / U_{вх} = \mu / (1 + R_1 / R_a)$$

Для pentодов, где  $R_1 \gg R_a$

$$K \approx \mu / (R_1 + R_a) * R_o \approx S * R_a$$

Значит, для увеличения коэффициента усиления необходимо увеличивать  $R_a$ , однако всегда будет, выполняться условие  $K \leq \mu$ .

Кроме того, увеличение  $R_a$  приведет к уменьшению постоянного напряжения на аноде  $U_{a0}$ , произойдет смещение характеристики вправо и рабочая точка может оказаться на нелинейном участке характеристики.

Величина  $R_a$  - обычно десятки кОм.

Переменная составляющая, проходя по сопротивлению  $R_k$ , снижает коэффициент усиления каскада и смещает рабочую точку с частотой входного сигнала, т. к. на  $R_k$  выделяется переменное падение напряжения, воздействующее на сетку лампы. Для устранения этого, сопротивление  $R_k$  зашунтировано конденсатором большой емкости.

Фильтр в анодной цепи устраняет возможность самовозбуждения усилителя за счет паразитных связей через общий источник. Для переменной составляющей выполняется условие

$$R_f \gg 1 / (\omega C_f)$$

Кроме того, источник блокируется конденсатором большой емкости  $C_{ба}$ , имеющим очень малое сопротивление для переменной составляющей.

Усиленное напряжение нельзя подавать непосредственно на управляющую сетку каскада, т. к. постоянное напряжение  $U_{a0}$  нарушит работу следующего каскада.

Для устранения этого служит разделительный конденсатор  $C_d$ . Емкость его должна быть большой (10 тыс.пф), чтобы на нем не создавалось падение напряжения от переменной составляющей.

Сопротивление утечки  $R_d$  по переменной составляющей анодного тока через емкость  $C_d$  соединяется параллельно с сопротивлением нагрузки  $R_a$ . Если сопротивление  $R_d$  будет не велико, то сопротивление нагрузки  $R_a$  уменьшается и, следовательно, снижается коэффициент усиления усилителя. Для устранения этого величина  $R_d$  выбирается в несколько раз больше  $R_a$ . Практически  $R_d = (0,1 - 1) M\Omega$ .

б) Резисторный усилитель на транзисторе (рис.16).

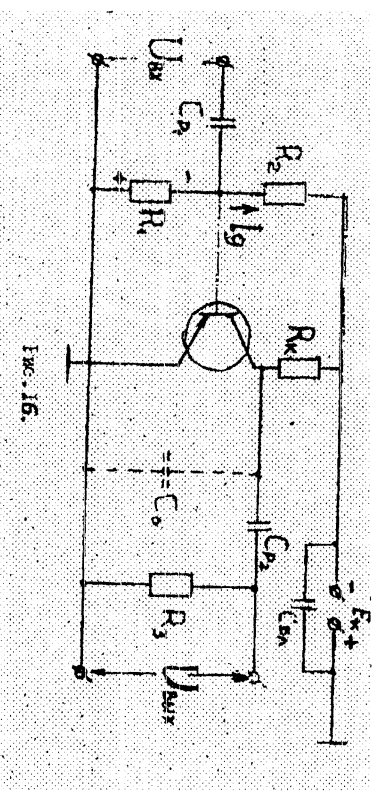


Рис. 16.

Назначение элементов этого усилителя такое же, как и у лампового усилителя (рис.13).

Расмотрим работу резисторного усилителя, собранного на транзисторе типа P-11-P по схеме ОЭ.

Источник постоянной ЭДС  $E_k$  является источником электропитания. Величина его напряжения единицы-десятки вольт. От этого источника получают два необходимых для работы транзистора постоянных напряжения: коллекторное  $U_{к0}$  и базовое  $U_{б0}$ .

Резистор  $R_k$  является нагрузочным элементом. Он включен в цепь коллекторного тока транзистора. На нем создается усиленное

напряжения сигнала, которое через переходную цепь  $Cp2Rz$  подается на выход усилителя.

Для получения режима работы транзистора без отсечки или с отсечкой тока на его базу нужно подавать отрицательное постоянное напряжение смещения  $-U_{60}$  той или иной величины. Величина этого напряжения, как правило, составляет доли вольта. Напряжение смещения получают от источника  $E_k$  при помощи делителя напряжения, образованного резисторами  $R1$  и  $R2$ . Под действием напряжения  $E_k$  по резисторам этого делителя протекает постоянный ток  $I_d$ . Этот ток на резисторе  $R1$  создает падение напряжения

$$U_{r1} = I_d * R1.$$

Это падение напряжения используется как напряжение смещения

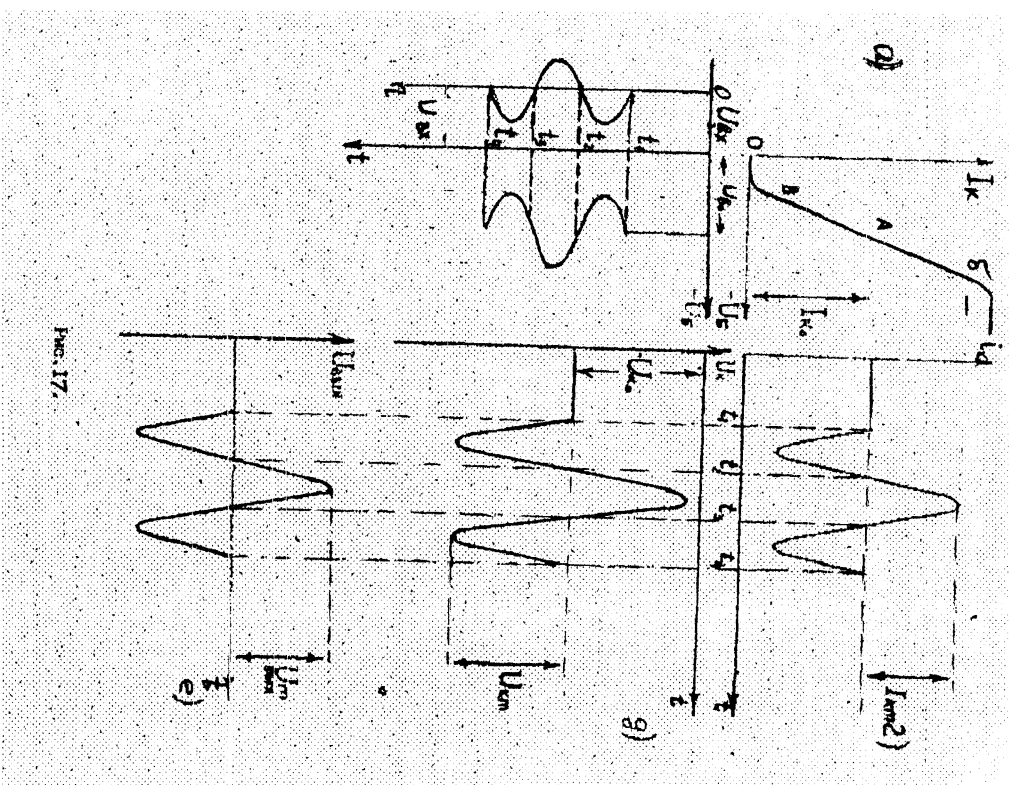


рис. 17.

$$-U_{60} = -U_{r1} = I_d * R1.$$

Подбором величины сопротивления резистора  $R1$  установив величину напряжения смещения такой, чтобы транзистор работал в режиме без отсечки тока при данном входном напряжении  $U_{вх}$ . Режим без отсечки тока в усилителях напряжения используется наиболее часто, т. к. он позволяет осуществлять усиление с минимальными искажениями усиливаемого сигнала.

Исходную рабочую точку на характеристике транзистора установив на середине линейного участка (точка А на рис. 17а). На

рис.17 б и в показаны графики изменения входного напряжения гармонического немодулированного сигнала  $U_{вх}$  и результирующего напряжения на базе транзистора  $U_б$ .

$$-U_б = -(U_{б0} + U_{вх})$$

На рис.17 г и д показаны графики изменения тока коллектора  $i_к$  и напряжения на коллекторе транзистора  $U_к$ .

Сначала рассмотрим процессы в усилителе при отсутствии входного напряжения (до момента времени t1). На коллекторе и на базе транзистора под действием источника  $E_к$  создаются постоянные напряжения  $-U_к0$  и  $U_б0$ .

Под действием их через транзистор протекают постоянные токи базы  $I_{б0}$  и коллектора  $I_{к0}$ , ток коллектора создает на  $R_к$  падение напряжения

$$U_{кк} = I_{к0} * R_к$$

При этом на коллекторе выделяется постоянное напряжение

$$U_{к0} = E_к + I_{к0} * R_к$$

Начиная с момента t1, на вход усилителя будем подавать гармонический сигнал низкой частоты  $f$

$$U_{вх} = U_m \sin 2\pi f t$$

При этом напряжение на базе транзистора становится пульсирующим

$$U_б = -U_{вх} + U_m \sin 2\pi f t$$

В положительный полупериод (t1 - t2) отрицательное напряжение базы уменьшается, что приводит к уменьшению тока коллектора (рис.17а, г)

В отрицательный полупериод (t2 - t3) отрицательное напряжение на базе растет, в результате чего ток коллектора увеличивается (рис.17а, г).

Падение напряжения на резисторе  $R_к$  тоже изменяется по закону входного напряжения, что приводит к изменению коллекторного напряжения

$$U_к = -E_к + I_к * R_к$$

Напряжение коллектора становится пульсирующим. Оно состоит из постоянного напряжения  $U_{к0}$  и переменного  $U_к$  с амплитудой  $U_{км}$ . Переменное напряжение коллектора используется в качестве выходного напряжения усилителя

$$U_m \sin 2\pi f t = I_{км} * R_к$$

Из графиков изменения входного и выходного напряжений (рис.17 а, е) видно, что рассмотренный усилитель на транзисторе с ОЭ изменяет фазу усиливаемого сигнала на  $180^\circ$ .

Коэффициент усиления с резисторного усилителя определяется из выражения

$$K = S * R_к$$

где: S - крутизна характеристики транзистора.

$R_к$  - сопротивление нагрузки.

Достоинства резисторного усилителя:

1. Равномерная частотная характеристика в широком диапазоне частот.
2. Простота схемы.

Недостатки:

1. Сравнительно небольшой коэффициент усиления ( $K < \mu$ ).

Этот недостаток устраняется в схеме усилителя на трансформаторе. За счет коэффициента трансформации  $n > 1$  можно получить коэффициент усиления  $K = n * \mu$ , однако в такой схеме зависимость коэффициента усиления от частоты более резкая, чем в усилителе на резисторе.

## 5. Однотактный усилитель мощности низкой частоты (УМНЧ).

### а) Ламповый УМНЧ.

Усилитель мощности низкой частоты предназначен для увеличения мощности низкочастотных колебаний и отдачи максимальной мощности в нагрузку при наименьшем расходе энергии источника питания и при допустимых значениях искажений. Обычно УМНЧ применяются в выходном (оконечном) каскаде приемника и в модуляторе передатчика. С выхода УМНЧ колебания поступают в нагрузку: громкоговоритель, головные телефоны, линия, устройство для записи звука и т. д.

Если выходная мощность не превышает нескольких ватт, то УМНЧ выполняются по одноконтурной схеме.

Оценим возможности использования в качестве усилителя мощности ранее рассмотренного резисторного усилителя.

Эффективность каскада оценивается КПД:

$$\eta = P_n / P_o,$$

где  $P_n$  — мощность в нагрузке,

$P_o$  — мощность источника питания.

Предельно допустимое значение КПД  $\eta \approx 12\%$ , а в тепловом режиме  $\eta = 4-5\%$ . Следовательно, чтобы обеспечить 1 Вт в нагрузке необходимо, чтобы каскад потреблял от источника  $P = 40-50$  Вт. Поэтому рассматриваемая в прошлом схема для усиления мощности не эффективна.

Большая мощность может быть получена при использовании лампы, которые имеют большую величину тока при одном и том же значении  $U_{вх}$  т. Поэтому в усилителях мощности используются мощные лучевые тетроды и пентоды (6П1П, 6П3С, 6П16С и др.).

На практике сопротивление нагрузки  $R_n$  значительно меньше сопротивления  $R_i$  лампы, что нарушает условие отдачи в нагрузку максимальной мощности.

Если такую нагрузку непосредственно включить в анодную цепь лампы, то в ней будет развиться очень небольшая мощность. Для получения от лампы максимальной возможной мощности необходимо согласовать сопротивление нагрузки с внутренним сопротивлением лампы.

Для достижения этого применяют усилители мощности с трансформаторным выходом (рис. 18). Такая схема обладает следующими достоинствами.

1. Постоянная составляющая анодного тока проходит через первичную обмотку выходного трансформатора и в нагрузку не попадает.

2. Нагрузка не находится под высоким анодным напряжением.
3. Применяя выходной трансформатор с соответствующим коэффициентом трансформации можно согласовать низкоомное сопротивление нагрузки с высокоомным сопротивлением лампы.

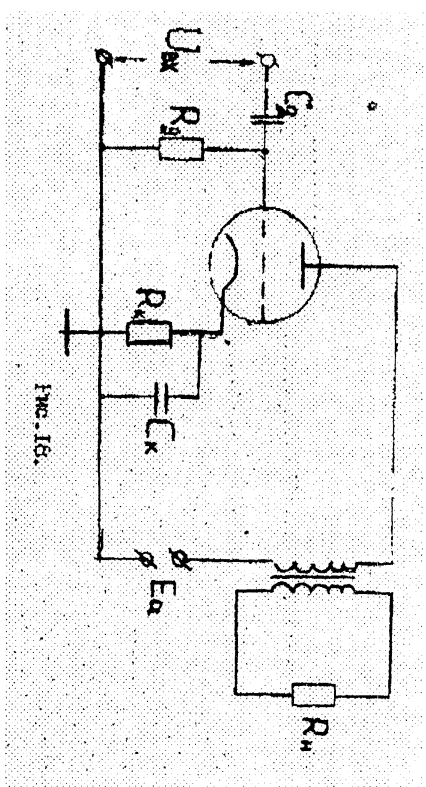


рис. 18.

Важным свойством трансформатора является его способность преобразовывать величину нагрузочного сопротивления. Для согласования нагрузки с лампой первичная обмотка трансформатора включается в анодную цепь лампы, а во вторичную обмотку включается низкоомная нагрузка.

Выясним, каким должен быть коэффициент трансформации ( $n > 1$  или  $n < 1$ ), чтобы выполнить согласование лампы с нагрузкой. В зависимости от этого трансформатор будет повышающим или понижающим.

Будем считать, что на средних частотах нагрузка имеет активный характер. Тогда эквивалентная схема УМНЧ будет иметь следующий вид (рис. 19).

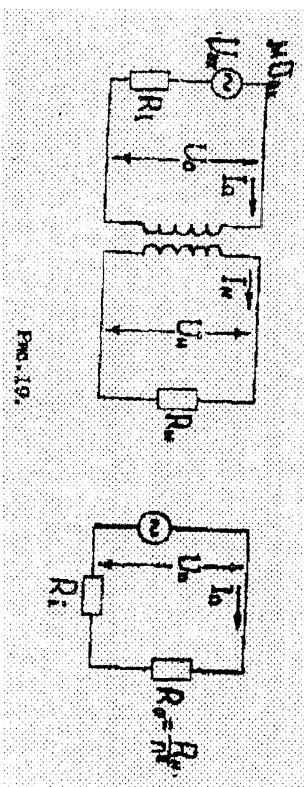


рис. 19.

Мощность, потребляемая нагрузкой равна:

$$P_n = U_n * I_n = U_n^2 / R_n.$$

Мощность, развиваемая усилителем на эквивалентном пересчитанном в первичную цепь сопротивлении  $R_n$  равна:

$$P_a = U_a \cdot I_a = U_a^2 / R_a.$$

Поэтому мощность будет расходоваться только в нагрузке при условии равенства (потерь) в трансформаторе можно пренебречь)

$$I_a R_n = U_n^2 / R_n = U_a^2 / R_a.$$

Разделим обе части равенства на  $U_a^2$ . Учтя, что коэффициент трансформации  $n = U_n / U_a$ , получим

$$n^2 / R_n = 1 / R_a \quad \text{или} \\ R_a = R_n / n^2.$$

Таким образом, можно считать, что генератор (лампа) работает на сопротивлении заменяющего трансформатор, вторичная обмотка которого нагружена на сопротивлении нагрузки  $R_n$ . Выбирая соответствующим образом коэффициент трансформации, можно добиться условия согласования

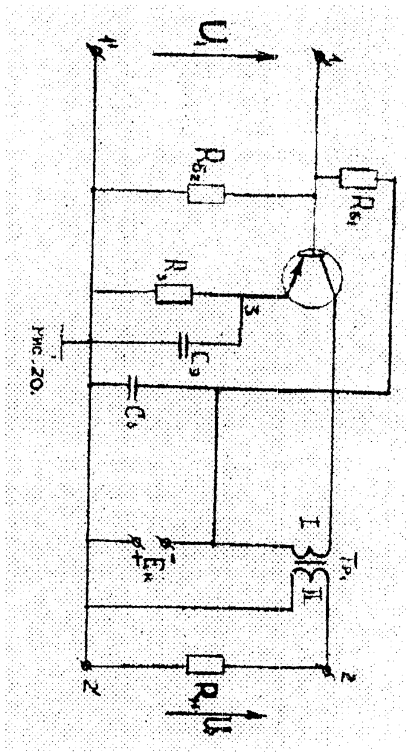
$$R_a = R_l$$

Очевидно, для этого необходим понижающий трансформатор ( $n > 1$ )

### б) УМНЧ на транзисторе.

В современных устройствах связи усилители мощности на транзисторах находят широкое применение, особенно в маломощных УМ. При конструировании наиболее распространенные каскады УМ с включением транзисторов по схеме ОЭ, которое дает наибольшее усиление сигнала, а поэтому и требует меньше уровень мощности возбуждения. Поэтому предварительный каскад может быть сделан резисторным или построен с использованием интегральных микросхем, например, типа К1У1401 (операционных усилителей), что упрощает конструктивно усилителя.

Принципиальная схема УМ на транзисторе с проводимостью типа P-N-P, включенном по схеме с общим эмиттером, приведена на рис. 20.



Она включает в себя следующие элементы:

- транзистор, который является активным прибором, работающим в режиме усиления мощности;
- трансформатор  $Tr1$  - выходной трансформатор, предназначенный для исключения прохождения постоянной составляющей тока питания каскада через его нагрузку, что существенно повышает КПД каскада. Кроме того, при помощи выходного трансформатора достигается согласование низкоомной нагрузки с высокоомным выходом усилительного элемента;
- резисторы  $R51, R52, R3$ , конденсатор  $C3$  имеют назначение аналогичное элементам резисторных усилителей;
- конденсатор  $C3$  служит для предотвращения протекания переменной составляющей тока коллектора и базы через источник питания  $E_k$ .

Рассмотрим физические процессы в схеме.

При отсутствии входного сигнала в усилителе протекают только постоянные составляющие токов.

Постоянная составляющая тока коллектора протекает по следующим элементам:  $+E_k, R3, z$ -к транзистора; первичная обмотка трансформатора  $Tr1, -E_k, +E_k$ . Аналогично можно указать и путь протекания базы:  $+E_k, R3, z$  -  $6, R52, -E_k, +E_k$ . Наряду с этим, в каскаде протекает ток базового делителя;  $+E_k, R51, R51, -E_k, +E_k$ .

Анализ прохождения постоянных составляющих токов показывает, что наибольший из них ток коллектора, протекает через первичную обмотку трансформатора, создавая поток подмагничивания сердечника. Это приводит к появлению дополнительных нелинейных искажений в каскаде, особенно в

усилителей с мощностью до 5Вт. Уменьшение подмагничивания сердечника, как правило, достигается вводом в магнитную цепь магнитного сопротивления (в виде магнитного зазора с изолирующим наполнением). Этот способ приводит к уменьшению КПД трансформатора и усилителя мощности в целом.

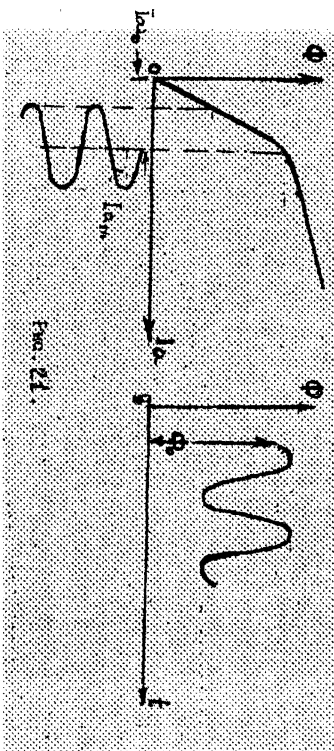
Переменная составляющая тока коллектора протекает по цепи: коллектор, первичная обмотка  $Tr_1$ ,  $C_3$ ,  $C_2$ , эмиттер, коллектор. За счет применения понижающего трансформатора можно получить оптимальное сопротивление в цепи коллектора и добиться выделения значительной мощности в низкоомной нагрузке каскада.

Для повышения мощности конечной ступени инотда, вклучают 2-3 лампы (транзистора) параллельно. Напряжения при этом остаются неизменными, а токи и мощности соответственно увеличиваются. Однако вследствие неоднородности усилительных элементов мощность увеличивается непропорционально их числу, а в меньшей степени. Кроме того, увеличиваются междуэлектродные емкости, т. к. они соединены параллельно.

Другим более эффективным способом увеличения мощности, является применение двухтактных усилителей мощности.

## 6. ДВУХТАКТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ.

Источником нелинейных искажений в УМНЧ является трансформатор. Сердечник трансформатора под влиянием постоянной составляющей анодного тока может намагнититься до насыщения. Тогда изменения магнитного потока не будут пропорциональны изменениям тока в первичной обмотке (рис. 21).



Поэтому переменное напряжение во вторичной обмотке, индуцируемое этим переменным магнитным потоком, также будет искаженным.

В двухтактном УМНЧ эти нелинейные искажения существенно уменьшаются. Двухтактный УМНЧ собирается на двух лампах П1, П2 (рис. 21).

$Tr_1$  – входной трансформатор, средняя точка его вторичной обмотки заземлена.

$Tr_2$  – выходной трансформатор, средняя точка его первичной обмотки подключена к положительному полюсу источника питания  $E_a$ .

При отсутствии входного сигнала в схеме протекают постоянные составляющие анодных токов  $ia_1$  и  $ia_2$ . Первичные обмотки выходного трансформатора эти токи проходят в разных направлениях, т. е. намагничиваются действие постоянной составляющей анодного тока одной лампы уничтожается действием постоянной намагничивания, опасность насыщения отпадает, может получаться небольшое постоянное намагничивание, поэтому со стороны катодов ламп инотда вклучают дополнительные переменные (или подбираемые опытным путем постоянные) сопротивления.

Ток во вторичной обмотке трансформатора отсутствует. Эти же постоянные составляющие, проходя в общей цепи через



сопротивления  $R_c$ , создают на нем падение напряжения, которое является напряжением отрицательного смещения лампы Л1, Л2.

$$|E_{a1}| = |E_{a2}| = (I_{a01} + I_{a02}) R_c$$

Входное переменное напряжение за счет заземленной средней точки вторичной обмотки входного трансформатора подается на сетке лампы Л1 и Л2 в противофазе.

Это приводит к тому, что анодные токи ламп также будут изменяться в противофазе: уменьшение тока  $i_{a2}$  сопровождается увеличением тока  $i_{a1}$  и наоборот. В общем сопротивлении эти токи будут протекать в одном направлении, т.е. фазы их противоположны, то они взаимно уничтожатся.

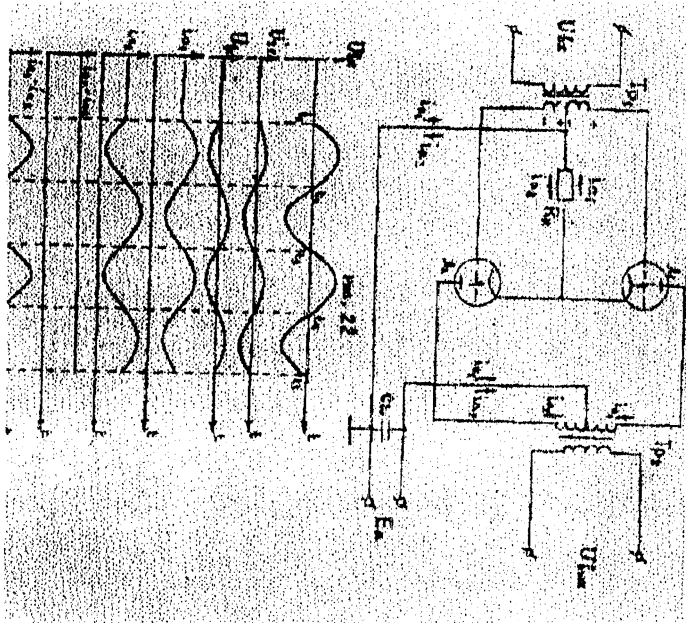
Благодаря этому на сопротивлении  $R_c$  получается только постоянное напряжение. Шунтировать это сопротивление конденсатора для исключения обратной связи не надо.

В первичной обмотке выходного трансформатора токи также имеют сдвиг фаз  $180^\circ$ , но они текут в разные стороны.

Общий переменный магнитный поток  $\Phi$  равен сумме магнитных потоков, создаваемых анодными токами обеих ламп.

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$$

Практически происходит удвоение магнитного потока, что приведет к удвоению ЭДС взаиминдукции во вторичной обмотке и, следовательно, к удвоению тока в ней. Таким образом, мощность на выходе двухтактного усилителя в два раза больше, чем в одноклаптном.



Преимуществом двухтактной схемы является малая ее чувствительность к пульсациям питающих напряжений. Работа двухтактного усилителя мощности на транзисторе (рис. 24) мало отличается от рассмотренной.

С помощью входного трансформатора Тр1 на базы транзисторов подаются противофазные напряжения. Выходной трансформатор Тр2 согласует нагрузку с выходным сопротивлением транзисторов; выборка должным образом коэффициент информации, можно

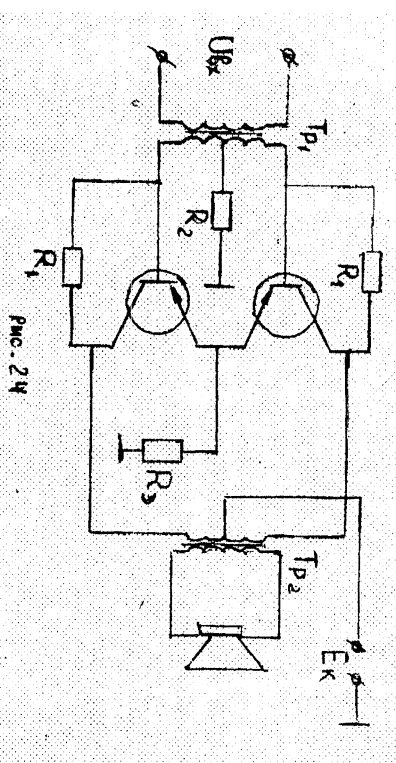


рис. 24

получить в коллекторной цепи наименьшее сопротивление и за счет этого передать в нагрузку наибольшую мощность.

Выборные положение исходной работы обеспечивает резисторами R1, R2, R3. При этом используется режим класса «В» (с отсечкой тока), поскольку в этом режиме обеспечивается более высокий КПД.

Достоинства двухтактного УМНЧ:

1. позволяет получить мощность в нагрузке больше, чем одноклаптные при большем значении КПД (до 80%).
2. Резко уменьшаются нелинейные искажения.
3. Малая чувствительность к пульсациям питающих напряжений.

## 7. Нелинейные искажения сигналов. Обратная связь в усилителях.

При усилении сигналов наблюдаются искажения их формы. Искажения, вызванные нелинейностью характеристик усилительных элементов (лампы и транзисторов), называются нелинейными (3).

В результате нелинейных искажений форма пульсирующий тока будет отличаться от синусоидальной. Известно, что любое периодическое колебание можно разложить на ряд гармонических составляющих. Пусть частота входного сигнала равна  $f$ ; тогда в составе анодного (коллекторного) тока будут составляющие  $1, 0, 1, 2, 3, \dots$  с частотами  $f, 2f, 3f, \dots$  и т.д.

Следовательно, нелинейные искажения вызывают появление гармонических составляющих в выходном сигнале, амплитуды которых зависят от степени нелинейности формы сигнала.

Постоянную степень нелинейных искажений можно оценить коэффициентом гармоник, который определяется так:

$$K_T = \frac{\sqrt{U_{m2}^2 + U_{m3}^2 + \dots}}{U_{m1}} = \frac{\sqrt{I_{m2}^2 + I_{m3}^2 + I_{m4}^2 + \dots}}{I}$$

Так как наибольшую амплитуду имеет обычно вторая гармоника (по сравнению с более высокими), то при практических расчетах используют следующую формулу:

$$K_T = U_{m2}/U_{m1} = I_{m2}/I_{m1}$$

Допустимая величина  $K_T$  может быть различной в зависимости от назначения усилителя, например:

- в качестве УНЧ -  $K_T = 1 - 2\%$
- в УНЧ среднего качества -  $K_T = 5 - 7\%$
- в многоконтурных усилителях -  $K_T = 0,2 - 0,1\%$

Для борьбы с нелинейными искажениями используют следующие способы:

1. Выбор ламп (транзисторов) с линейными характеристиками.
  2. Выбор рабочей рабочей точки на середине линейного участка характеристики.
  3. Амплитуда выходного сигнала должна быть такой, чтобы при работе рабочей точка не выходила за пределы линейного участка.
  4. Работа без сеточных токов.
  5. Применение двухтактных усилителей, у которых четные гармоники отсутствуют.
  6. Применение отрицательной обратной связи в усилителе.
- Наибольший эффект дает применение обратной связи. Если часть энергии в выходной цепи усилителя передается снова на входную, то такой усилитель имеет обратную связь. Обратной связью может быть охвачен не один, а несколько каскадов. При этом на вход схемы подается напряжение в раз меньше, чем напряжение

на выходе усилителя. Схема усилителя, охватянного обратной связью, изображена на рис. 25.

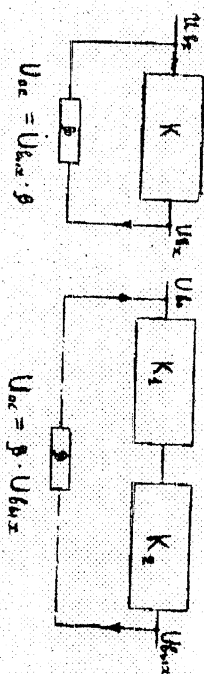


Рис. 25.

Если напряжение обратной связи совпадает по фазе с напряжением входного сигнала, то такая связь называется положительной, она применяется в автогенераторах.

Если же напряжение обратной связи находится в противофазе с напряжением входного сигнала, то такая связь называется отрицательной.

Отрицательная обратная связь изменяет качественные показатели усилителя:

1. Уменьшает нелинейные искажения.
2. Увеличивает устойчивость усилителя.
3. Изменяет входное и выходное сопротивление усилителя.
4. Уменьшает коэффициент усиления усилителя.

Хотя при отрицательной обратной связи коэффициент усиления уменьшается, но из-за уменьшения нелинейных искажений и увеличения устойчивости усилителя она находит широкое применение.

Отрицательная обратная связь бывает различных видов и классифицируется:

- 1) По способу снятия напряжения обратной связи с выхода усилителя (рис. 26):
  - а) по напряжению,
  - б) по току.

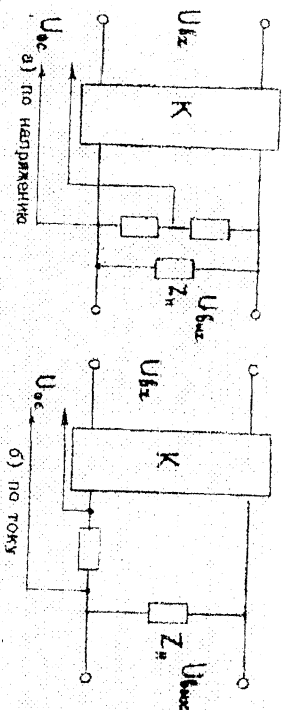


Рис. 26.

2) По способу подачи напряжения обратной связи на вход усилителя (рис. 27):

- а) параллельное,
- б) последовательное,
- в) комбинированная (мостовая).

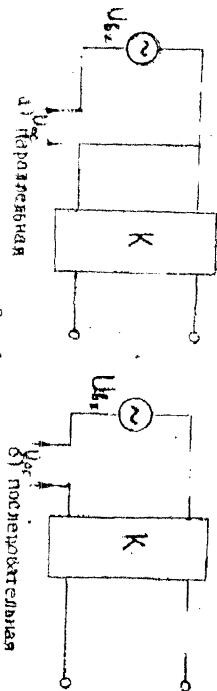


Рис. 27.

Обычно в усилителях  $\beta = 0,05 - 0,2$ .

Рассмотрим физические процессы в схеме усилителя с отрицательной обратной связью (рис. 28).

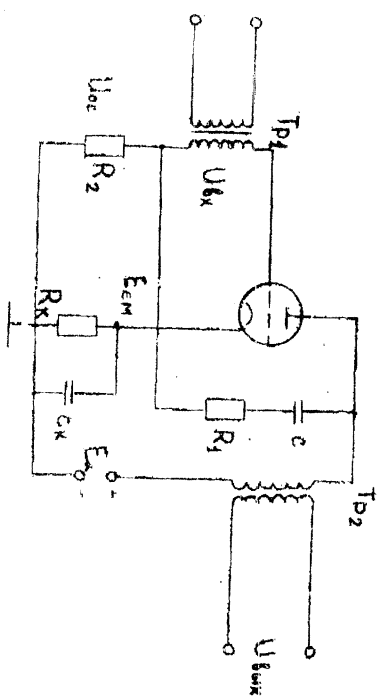


Рис. 28.

Петочка  $C, R1, R2$  — осуществляет отрицательно обратную связь в усилителе. Напряжение с выхода (первичная обмотка  $Tr2$ ) подается на делитель  $R1$  и  $R2$ . Напряжение обратной связи снимается с  $R2$  и подается на сетку лампы. Т. к. напряжение обратной связи является частью выходного напряжения, то оно противоположно по фазе входному напряжению.

$$U_{лк} = U_{вх} - U_{ос};$$

$$U_{вх} = U_{лк} + U_{ос}.$$

Коэффициентом обратной связи называется отношение напряжения обратной связи к выходному напряжению.

Он показывает, какая часть переменного выходного напряжения подается в цепь усилителя.

$$\beta = U_{ос} / U_{вых} \quad \text{т. е. } U_{ос} = \beta * U_{вых}.$$

Коэффициентом усиления каскада с обратной связью

$$K_{\beta} = U_{вых} / U_{вх}.$$

$$K_{\beta} = U_{вых} / (U_{лк} + U_{ос}) = U_{вых} / (U_{лк} +$$

$$\beta * U_{вых}).$$

Разделив числитель и знаменатель этого выражения на  $U_{лк}$  и имея в виду, что  $U_{вых} / U_{лк} = k$  (коэффициент усиления каскада без обратной связи), получим.

$$K_{\beta} = k / (1 + \beta k).$$

Таким образом, коэффициент усиления каскада с отрицательной обратной связью уменьшается в  $(1 + \beta k)$  раз. В это же число раз уменьшаются нелинейные искажения.

Уменьшение нелинейных искажений в схеме усилителя с отрицательной обратной связью по напряжению (рис. 28) можно пояснить следующими графиками (рис. 29):

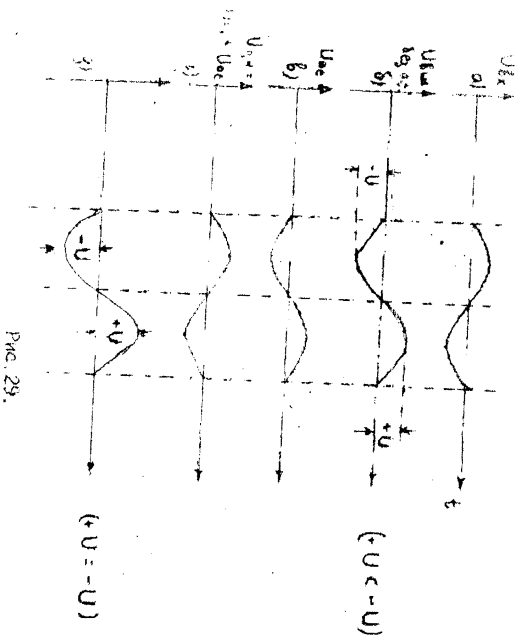


Рис. 29.

На графиках "а, б" показаны входной и выходной сигналы в усилителе без обратной связи. За счет нелинейных искажений положительный полупериод напряжения на выходе меньше на амплитуде, чем отрицательный.

Введение отрицательной обратной связи приводит к искажению входного сигнала (График "г"). При этом его положительный полупериод оказывается меньше отрицательного, а т. е. к положительный полупериод попадает на участок характеристики усилительного элемента с большей крутизной, то он будет усилен в большей степени.

В результате выходное напряжение усилителя с отрицательной обратной связью (График "д") воспроизводится почти без искажений.

В технике радиосвязи широко применяются усилители с сильной отрицательной обратной связью - эмиттерные (катодные) повторители. Эмиттерный повторитель - это транзисторный резисторный усилитель, у которого нагрузочный резистор включен в цепь эмиттера (рис. 30), назначение элементов схемы такое же как и в резисторном усилителе.

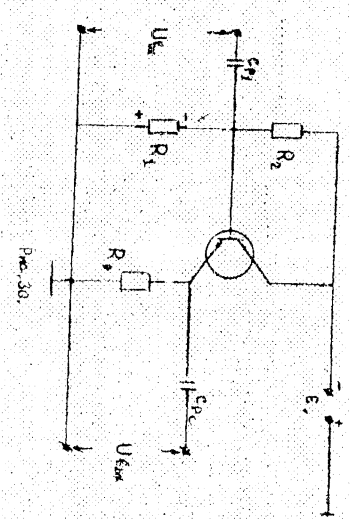


Рис. 30.

Выходное напряжение формируется на резисторе  $R_e$  за счет изменения тока эмиттера и через разделительный конденсатор  $C_{e2}$  передается на выход усилителя. Кроме того, выходное напряжение полностью прикладывается к базе транзистора. Поэтому в эмиттерном повторителе осуществляется сильная последовательная отрицательная обратная связь по напряжению

$$U_{ос} = U_{вых} \quad K = U_{ос} / U_{вх} = 1.$$

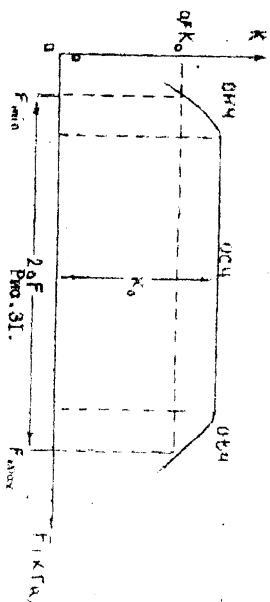
Основные особенности эмиттерного повторителя:

1. Фаза усиленного сигнала не изменяется.
2. Сильная обратная связь обеспечивает широкополосную пропускания, поэтому искажение формы сигнала не происходит.
3. Коэффициент усиления схемы  $K < 1$ .
4. Схема имеет большое входное и малое выходное сопротивление, что позволяет использовать эмиттерный повторитель для межкаскадного согласования.

## 8. Частотная характеристика УНЧ.

### Спектральная коррекция частотной характеристики.

Зависимость коэффициентов усиления от частоты называется частотной характеристикой усилителя. На рис. 31 изображена частотная характеристика УНЧ на резисторе.



Из-за неравномерного (в неодинаковое число раз) усиления спектральных составляющих сложного сигнала происходит нарушение амплитудных соотношений между этими составляющими, что искажает сигнал (рис. 32).

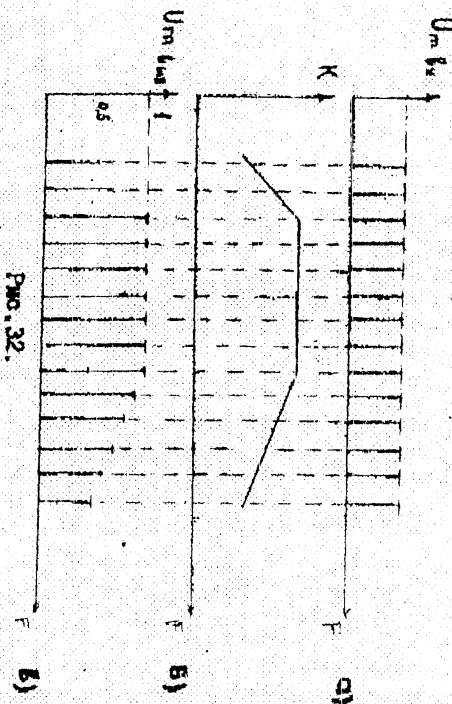


Рис. 32.

На рис. 32-а видно, что амплитуды составляющих входного сигнала одинаковы, а на выходе (рис. 32-б) усилителя их амплитуды стали большими, но по величине разными. Изменения спектрального состава вызовет изменение звучания (тембра) сигнала. Также искажения сигнала называются частотными, они происходят из-за неравномерного усиления усилителем в диапазоне частот.

Весь диапазон усиливаемых частот можно разбить на три области (рис. 31):

1. ОНЧ — область нижних частот.
2. ОСЧ — область средних частот.
3. ВЧЧ — область верхних частот.

Частотные искажения вызываются наличием в схеме усилителя реактивных элементов. Рассмотрим их влияние на частотную характеристику усилителя на резисторе (рис. 33). Усиленное напряжение с нагрузки  $R_k$  снимается на выход через переходную цепь  $Cp2R3$  (рис. 33).

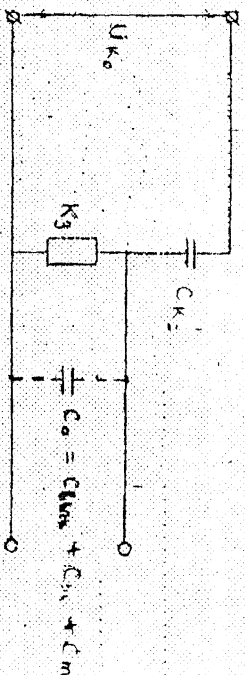


Рис. 33.

Поскольку в состав схемы входит конденсаторы  $Cp2$ ,  $C_0$ , сопротивление которых зависит от частоты, то и коэффициент усиления усилителя также будет зависеть от частоты усиливаемого сигнала.

В области средних частот влияние  $CR$  и  $Co$  мало и ими можно пренебречь. Значит, в этой области частот сопротивление нагрузки практически не зависит, и коэффициент усиления остается практически постоянным. АЧХ имеет горизонтальный участок. В области нижних частот общая емкость  $Co$  на АЧХ усилителя не влияет по той же причине, что и на средних частотах. Сопротивление конденсатора  $Cp2$  на нижних частотах увеличивается и становится равным с сопротивлением резистора  $R3$ . Часть подаваемого на переходную цепь усиленного напряжения выделяется на конденсаторе  $Cp2$ , выходное напряжение уменьшается.

$$U_{вых} = U_{РК} - U_{Cp2} < U_{РК}$$

На нижних частотах с уменьшением частоты сопротивление  $Cp2$  увеличивается, а выходное напряжение и коэффициент усиления уменьшаются. Поэтому АЧХ резисторного усилителя в ОНЧ имеет завал (рис. 31).

На верхних частотах влиянием  $C_{p2}$  можно пренебречь. Сопротивление же общей мощности  $S_0$  резко уменьшается и притягивает сопротивление переходной цепи  $R_3$  (рис.33).

При этом часть переменного составляющей тока коллектора отвлекается через емкость  $S_0$ . На нагруженном резисторе создается меньшее переменное напряжение. Коэффициент усиления с увеличением частоты уменьшается, и АЧХ резисторного усилителя в ОБЧ имеет завал (рис.31).

Из АЧХ резисторного усилителя видно, что резисторный усилитель имеет максимальный коэффициент усиления на средних частотах  $K_0$ , а на нижних и верхних частотах коэффициент усиления уменьшается.

Полоса пропускания резисторного усилителя составляет единицы килогерц. Такая полоса пропускания приемлема для усилителей низкой частоты СВЧ и радиовещательных радиоприемников, поскольку спектр речи соответствует полосе пропускания резисторных усилителей. В радиоприемниках импульсных сигналов, полоса пропускания видеоусилителей должна быть более широкой, чем полоса пропускания резисторного усилителя. Объясняется это тем, что ширина спектра коротких видеосигналов широкая и простирается от десятков герц до единиц мегагерц. Расширение полосы пропускания усилителей осуществляется коррекцией его АЧХ.

Коррекция АЧХ осуществляется путем введения в резисторный усилитель корректирующих цепей или введением отрицательной обратной связи. Получившийся в результате коррекции усилитель называется широкополосным усилителем. Он наиболее часто используется для усиления видеосигналов с минимальным искажением их формы и называется видеоусилителем.

Для коррекции АЧХ усилителя в области нижних частот в коллекторную цепь транзистора включают цепь, состоящую из

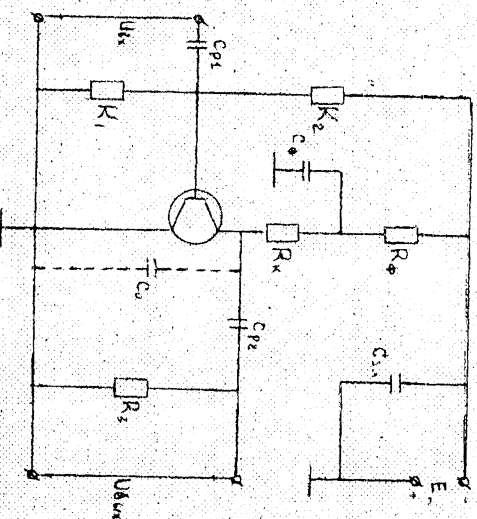


Рис. 34.

параллельно соединенных резистора  $R_f$  и конденсатора  $S_f$  (рис.34).

Емкость конденсатора  $S_f$  берется такой, чтобы на средних и верхних частотах сопротивление его было значительно меньше  $R_f$  и  $R_k$ .

$$|X_{Cf}| \ll R_f; \quad |X_{Cf}| \ll R_k.$$

Поэтому переменная составляющая тока коллектора  $i_k \sim$  протекает по нагрузочному резистору  $R_k$  и по конденсатору  $S_f$ , который почти не оказывает влияния на процессы в усилителе.

При понижении частоты сопротивление конденсатора  $S_f$  увеличивается и на нижних частотах становится сравнимым с сопротивлением резистора  $R_f$

$$|X_{Cf}| \approx R_f.$$

Переменная составляющая тока коллектора  $i_k \sim$  на нижних частотах протекает по резистору  $R_k$  и частично по резистору  $R_f$ . Сопротивление нагрузки транзистора увеличивается и приближается к величине  $R_k + R_f$ . Поэтому коэффициент усиления усилителя на нижних частотах увеличивается и компенсирует уменьшения усиления из-за влияния конденсатора переходной цепи  $S_{p2}$ . В АЧХ

резисторного усилителя на нижних частотах завал подчасется меньше, т. е. полоса пропускания усилителя расширяется в области нижних частот.

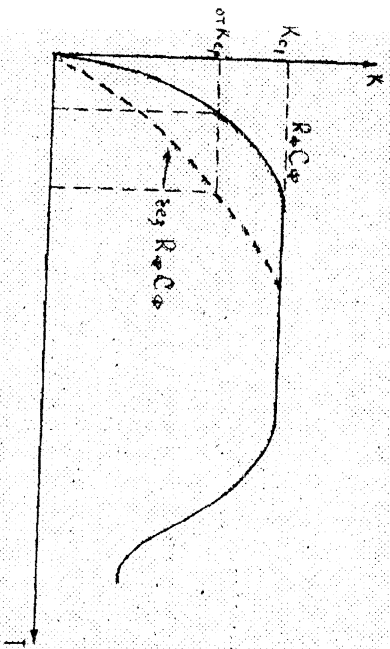


Рис. 35.

На рис. 35 сплошной линией показана АЧХ резисторного усилителя с коррекцией в области нижних частот, а пунктирной линией — АЧХ резисторного усилителя без коррекции. При правильном выборе параметров элементов корректирующей петлички  $R_{\phi}$  и  $C_{\phi}$  нижнего граничного частоту резисторного усилителя можно уменьшить в 5-10 раз.

Для коррекции АЧХ усилителя в области верхних частот в коллекторную цепь транзистора последовательно с нагрузочным резистором  $R_n$  включается катушка индуктивности  $L_k$  (рис. 36).

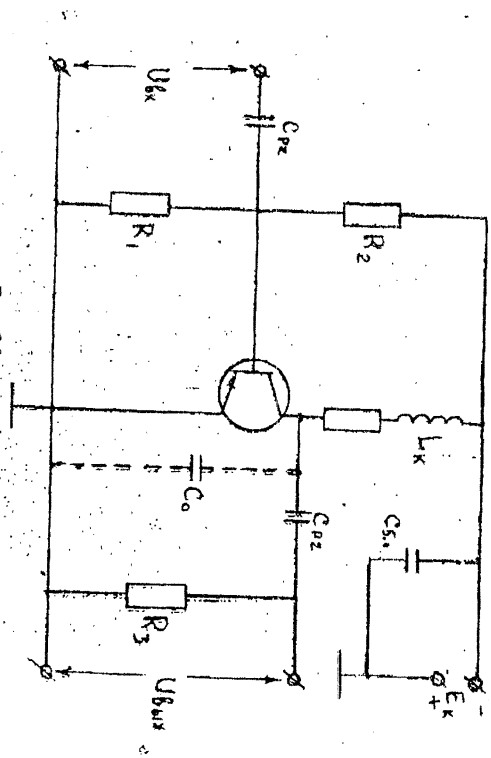


Рис. 36.

Индуктивность катушки  $L_k$  мала, поэтому на нижних и средних частотах она не работает усилителя не влияет.

Корректирующая индуктивность  $L_k$  образует с емкостью  $C_{\phi}$  параллельный колебательный контур. Этот контур путем подбора величины корректирующей индуктивности  $L_k$  настраивают на одну из верхних частот ( $f_0$ ), на которой начинается заметный завал АЧХ резисторного усилителя. Сопротивление контура на резонансной частоте достаточно велико, поэтому сопротивление нагрузки усилительного элемента на верхних частотах получается большим, и коэффициент усиления увеличивается, а полоса пропускания усилителя в области верхних частот расширяется до единиц мегагерц (рис. 37).

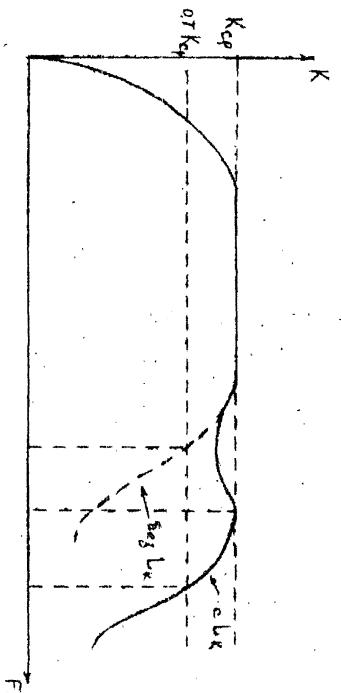


Рис. 37.

У резисторного усилителя с коррекцией АЧХ в области нижних и верхних частот полюсу пропускания удается получить до нескольких мегагерц. Такая полоса пропускания оказывается одного порядка с активной пильной спектра видеосигналов. Поэтому резисторные усилители с коррекцией в области низких и верхних частот используются в качестве видеосушителей.

## 9. Резонансные усилители напряжения.

Резонансными усилителями называются устройства, предназначенные для усиления электрических колебаний определенной полосы частот и подавления электрических сигналов вне этой полосы. Резонансные усилители используются в качестве усилителей напряжения высокой частоты (УНВЧ), радиоприемников длинных (ДВ), средних (СВ) и коротких (КВ) волн и в качестве усилителей промежуточной частоты (УПЧ) в радиоприемниках супергетеродинного типа.

В качестве нагрузки усилительных элементов используются колебательные контуры, настроенных в резонанс с частотой полезного сигнала. Обычно в УНВЧ используются одиночный колебательный контур, перестраиваемый по диапазону, а в УПЧ — полосуовой фильтр, настроенный на фиксированную частоту  $f_{пр}$ .

Принципиальная схема резонансного усилителя высокой частоты изображена на рис. 38, в схеме предусмотрено перестройка контура: плавно в пределах поддиапазона изменением емкости  $C_k$  и скачкообразно путем переключения катушек  $L_1, L_2, L_3$  для перехода на другой поддиапазон. Это обусловлено тем, что перестроить контур в пределах заданного диапазона одной емкостью практически невозможно.

В состав усилителя входят:

- транзистор (усилительный элемент),
  - параллельный колебательный контур  $L_k C_k$ , настроиваемый в резонанс на частоту полезного сигнала — нагрузка усилительного элемента.
  - источник питания  $E_k$ ,
  - переходная цепь  $S_r R_k$  для передачи напряжения выходного сигнала на базу транзистора,
  - переходная цепь  $S_r 2R_3$  для снятия с нагрузки на выход усиленного напряжения сигнала,
  - делитель напряжения источника питания  $R_1 R_2$ .
- С резистора  $R_1$  на базу транзистора снимается постоянное отрицательное напряжение смещения  $U_{см}$ , составляющее наибольшую часть от напряжения источника  $E_k$ . Это напряжение обеспечивает работу транзистора в режиме без отсечки тока на линейном участке характеристики.



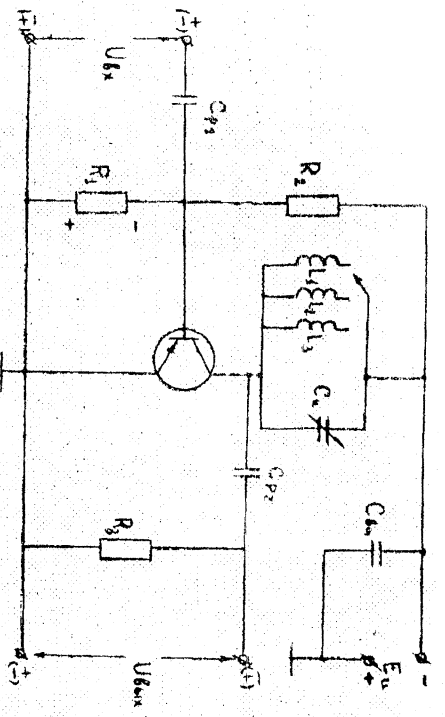


Рис. 38.

Под действием входного напряжения усиливается сигнал, действующего на базу транзистора, ток коллектора транзистора изменяется по закону изменения входного напряжения и в больших пределах, поскольку транзистор обладает усиительными свойствами. В составе тока коллектора транзистора имеется постоянная и переменная составляющие. Переменная составляющая тока коллектора  $i_k \sim$  имеет частоту входного напряжения. Поскольку контур  $L_k C_k$  настроен в резонанс на частоту входного напряжения то он имеет большое сопротивление  $Z_{кр}$  для переменной составляющей тока коллектора транзистора. Переменная составляющая тока коллектора протекает по контуру и создает на нем переменное напряжение, которое через переходную цепь  $C_p 2R_3$  снимается на выход. Амплитуда выходного напряжения равна

$$U_m \text{ вых} = I_m k Z_{кр},$$

где  $I_m k$  — амплитуда переменной составляющей тока коллектора транзистора.

Благодаря усиительному свойству транзистора амплитуда переменной составляющей тока коллектора имеет большую величину и резонансное сопротивление контура  $Z_{кр}$  велико. Поэтому амплитуда выходного напряжения усилителя получается больше, чем амплитуда входного напряжения.

$$U_m \text{ вых} > U_m \text{ вх}$$

Это свидетельствует о том, что в резонансном усилителе происходит усиление входного сигнала по напряжению.

Коэффициент усиления резонансного усилителя по напряжению для любой частоты входного напряжения находится из выражения

$$K = S * Z_k$$

где  $S$  — крутизна характеристики транзистора;

$Z_k$  — сопротивление контура на частоте входного напряжения.

На частоте свободных колебаний контура  $f_0$  коэффициент усиления резонансного усилителя максимальный, поскольку на этой частоте сопротивление контура максимальное  $Z_{кр} = L_k / C_k K_k$ .

Поэтому

$$K_0 = S * L_k / C_k K_k$$

где  $Z_{кр} = L_k / C_k K_k$  — резонансное сопротивление параллельного контура, включенного в коллекторную цепь транзистора.

Из выражения видно, что резонансный коэффициент усиления зависит от  $L_k$  и  $C_k$ , которые изменяются при перестройке контура. В пределах диапазона  $C_k = \text{const}$ , а контур перестраивается изменением емкости  $C_k$ . Чем больше частота, тем меньше  $C_k$  и, следовательно, тем больше  $K_0$ . При переходе на более высокочастотный поддиапазон скачкообразно уменьшается индуктивность контура.  $L_k$  что приводит к понижению  $K_0$ . Таким образом, зависимость резонансного коэффициента усиления УНВЧ от частоты имеет вид, изображенный на рис. 39.

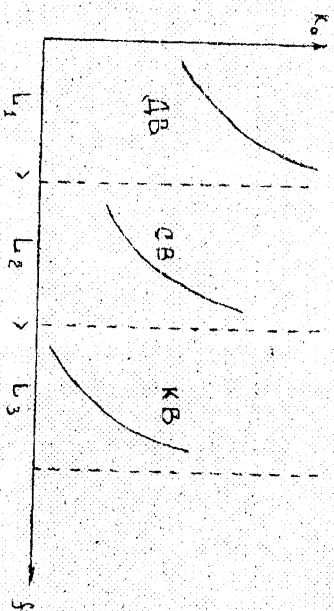


Рис. 39.

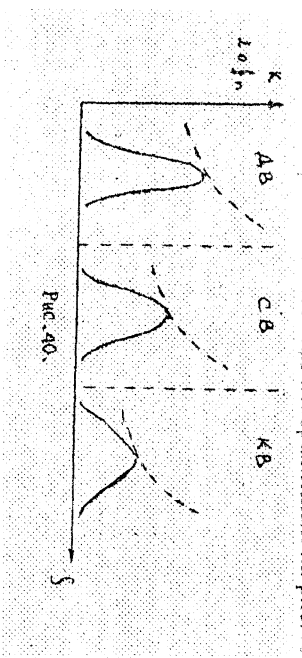
Определим зависимость полосы пропускания контура от резонансной частоты:

$$2 \Delta f n = f_0 / Q; \quad f_0 = 1 / (2\pi \sqrt{L_k C_k}); \quad Q = S / C_k \sqrt{L_k C_k} / C_k$$

$$2 \Delta f n = (1 / (2\pi \sqrt{L_k C_k})) / (\sqrt{L_k C_k} / C_k)$$

Из этого выражения видно, что в пределах поддиапазона полоса пропускания контура остается неизменной. Однако полоса пропускания изменяется скачкообразно за счет изменения  $L_k$  при переходе от одного поддиапазона к другому. Таким образом, при перестройке контура в широком диапазоне частот изменяются его

резонансной коэффициент усиления  $K_0$  в полосе пропускания. Различные варианты имеют вид, изображенный на рис.40.

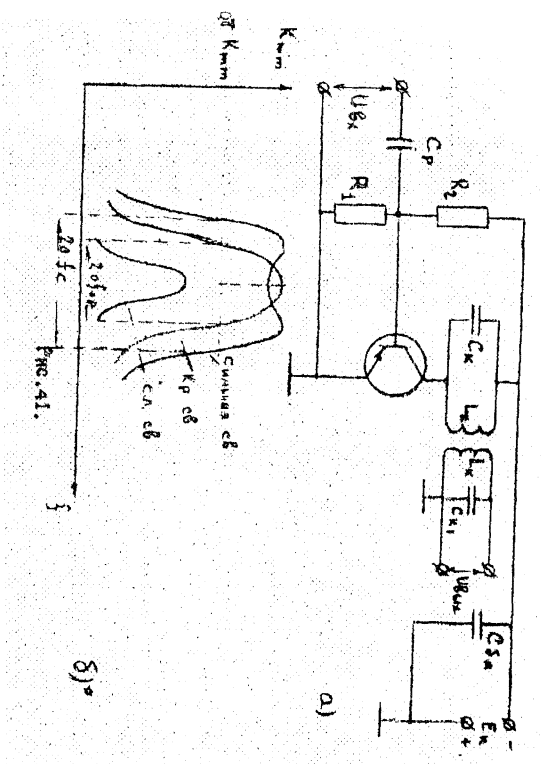


АЧХ резонансного усилителя высокой частоты имеет полосу скаты и не обладает хорошей избирательностью. УПЧ радиоприемных и связанных радиоприемников должны иметь АЧХ близко к прямоугольной. Для получения такой характеристики в УПЧ эти радиоприемники используются усилители со связанными контурами (рис.41).

Первичный контур Лк2Ск2 включен в цепь коллектора транзистора. С вторичного контура Лк2Ск2 снимается усиленное напряжение сигнала  $U_{к2}$ .

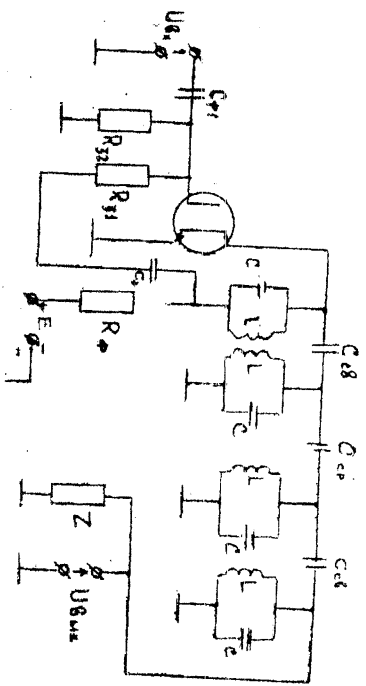
Оба контура настроены в резонанс на несущую частоту полезного сигнала. Связь между контурами индуктивная, но могут быть и другие связи, например, емкостная, автотрансформаторная или комбинированная. Физические процессы при работе такого усилителя аналогичны физическим процессам в обычном резонансном усилителе.

Форма АЧХ усилителя зависит от степени связи между контурами. При слабой АЧХ однокорбай и такая же, как у обычного резонансного усилителя. При технической связи АЧХ еще однокорбай, но имеет большой максимум. При сильной связи АЧХ становится двукорбай. Величина полосы пропускания зависит от степени связи между контурами, чем сильнее связь, тем шире полоса пропускания УПЧ.



Наряду с двухконтурными полосовыми фильтрами в радиоприемной аппаратуре применяются многоэлементные фильтры. Такие фильтры называются фильтрами сосредоточенной избирательности (ФСИ). Коэффициент прямоугольности ФСИ достигает высоких значений ( $K_{пр} \approx 0,9$ ).

На рис.42 изображена схема полосового усилителя ФСИ на полевом транзисторе.



Как видно из схемы, ФСИ представляет собой сложную многоэлементную цепь LC элементов. Для того чтобы обеспечить

максимально крутые скаты резонансной характеристики и наибольшая коэффициент усиления каскада, эффективность контуров, на которых работает фильтр, должна быть максимально высокой  $Q = 180-250$ . Элементы фильтра должны быть тщательно экранированы друг от друга, с тем, чтобы связь между ними осуществлялась через емкость  $C_{св}$ .

В ряде случаев ФСИ изготавливаются с использованием кварцевых резонаторов. Последние выполняются за один технологический прием, а сам ФСИ конструктивно оформлен в виде монолитного избирательного элемента.

## 10. Усилители СВЧ.

### а) Усилители на ЛВВ.

В сантиметровом диапазоне для усиления радиосигналов находят широкое применение усилители высокой частоты на ЛВВ, благодаря низкому коэффициенту шума. Конструкция УВЧ на ЛВВ изображена на рис. 43.

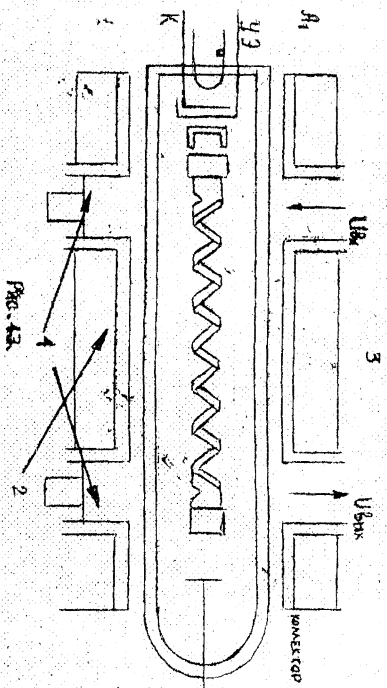


Рис. 43.

В состав усилителя входят: лампа бегущей волны 1, фокусирующая система 2, входное и выходное устройства 3.

Фокусирующая система выполнена в виде соленоида из последовательно соединенных катушек или в виде набора постоянных кольцеобразных магнитов, закрепленных на арматуре. Фокусирующая система создает постоянное продольное, вдоль оси ЛВВ, магнитное поле высокой напряженности. Это поле необходимо для дополнительной фокусировки электронного луча вдоль всей замкнутой системы ЛВВ.

Входное и выходное устройства представляют собой отрезки волноводов или коаксиальных линий. Эти отрезки обеспечивают подвод и вывод энергии усиливаемых радиосигналов.

Принцип работы УВЧ на ЛВВ основан на длительном взаимодействии электронного потока с бегущей волной электрического поля усиливаемого сигнала. В результате этого взаимодействия осуществляется преобразование кинетической энергии движущихся в пучке электронов в энергию электромагнитного поля усиливаемого радиосигнала.

Преобразование кинетической энергии электронов пучка в энергию усиливаемых радиосигналов осуществляется путем торможения движущихся электронов электрическим полем сигнала, распространяющегося вдоль замкнутой системы. Действительное сопряжение электронов потока с сигналом

обеспечивается подбором начальной скорости электронов и использованием ЛБВ замедляющей системы с параметрами, соответствующими длине волны усиливаемого радиосигнала.

Начальная скорость электронов в пучке обеспечивается установкой и подерживанием на электронах пушки ЛБВ требуемых напряжений. Эти же напряжения обеспечивают выстреливание электронов пушкой вдоль оси замедляющей системы. Для повышения напряжения плотности электронов в луче и уменьшения разброса начальных скоростей их движения в пушке могут быть установлены дополнительные электроды между первым и вторым анодами  $A_1$ ,  $A_2$ .

УВЧ на ЛБВ позволяет обеспечить коэффициент усиления по мощности  $K_p = 20-40$  дБ и коэффициент шума  $K_{ш} = 2$ .

Поскольку УВЧ являются первыми каскадами супергетеродинного радиоприемника то применение в них ЛБВ позволяет получить достаточно высокую чувствительность радиоприемника.

### б) параметрические усилители.

Перспективными являются малопотребляющими радиосигналов в УКВ диапазоне являются параметрические усилители высокой частоты различного типа. Основными типами параметрических усилителей являются резонансные параметрические полупроводниковые усилители (ППУ), параметрические полупроводниковые усилители (ПНУ), параметрические усилители бегущей волны (ПУБВ), электронно-лучевые параметрические усилители (ЭПУ) и другие.

Наибольшее распространение в настоящее время получили резонансные (ППУ). В них в качестве усилительного элемента нелинейные конденсаторы в виде р-п перехода параметрического полупроводникового диода.

Ёмкость параметрического диода изменяется под воздействием вспомогательного высокочастотного гармонического напряжения.

Вспомогательное напряжение подается на запертый р-п перехода диода от специального генератора – генератора накачки. Энергия, поступающая на р-п переход диода от генератора накачки, полностью расходуется на изменение емкости перехода. За счет энергии генератора накачки усилительный элемент осуществляет усиление поданного на него радиосигнала.

Простейшим резонансным полупроводниковым параметрическим усилителем является одноконтурный. Эквивалентная схема параметрического усилителя метрового диапазона изображена на рис.44.

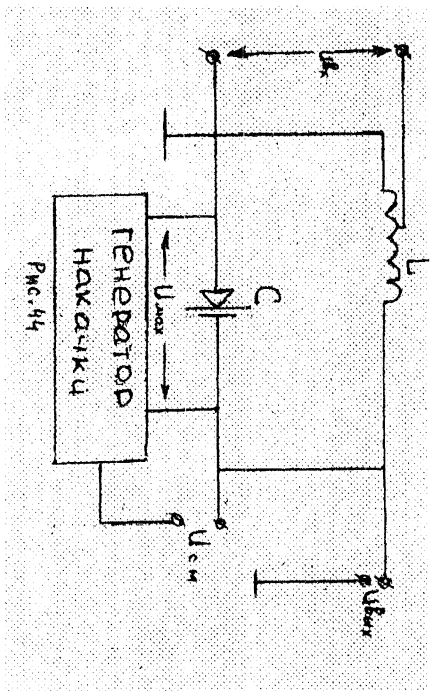


Рис.44

Резонансная система является нагрузкой усилителя и представляет собой колебательный контур, составленный из катушки индуктивности  $L$  и конденсатора  $C$ , образованного емкостью р-п перехода параметрического диода.

Входное напряжение радиосигнала  $U_{вх}$  подается на часть контура, а выходное напряжение  $U_{вых}$  снимается со всего контура.

Наиболее полно параметрические явления были изучены советскими учеными под руководством академика Д. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси. Однако построение такого усилителя стало возможным лишь после того, как в 1954 году советский ученый В. М. Вул предложил в качестве нелинейного конденсатора использовать запертый р-п переход.

Современные параметрические полупроводниковые усилители позволяют получить коэффициент усиления по мощности 15–20 дБ на каскад и коэффициент шума 1,2–2.

**Литература.**

1. Сифоров В. И. Радиоприемные устройства. М. Сов. радио. 1976.
2. Вельский А. Ф. Широкополосные усилители электрических сигналов. Изд. ВАС. Ленинград. 1976.
3. Дьякин Т. С. Усилительные устройства. Изд. "Связь". Москва. 1978.
4. Королев П. Г. Нелинейные радиотехнические устройства. Воениздат. Москва. 1984.
5. Гондальберг Л. М. Импульсные устройства. М., Радио и связь. 1981.

**Оглавление.**

	Стр.
Введение	1
1. Общие сведения об усилителях, их классификация	2
2. Режимы работы усилительных элементов	7
3. Основные показатели и характеристики усилителей	9
4. Резисторные усилители	16
5. Двухтактный усилитель мощности низкой частоты	24
6. Двухтактный усилитель мощности низкой частоты	29
7. Нелинейные искажения сигналов. Обратная связь в усилителях	32
8. Частотная характеристика УНЧ. Способы коррекции частотной характеристики	38
9. Резонансные усилители напряжения	45
10. Усилители СВЧ	51
Литература	54