

ЛЕКЦИЯ 16

Аналоговые усилители

План занятия:

1. Основные сведения и классификация усилителей
2. Основные параметры и характеристики усилителей
3. Классы усилителей
4. Обеспечение устойчивости рабочей точки при влиянии внешних дестабилизирующих факторов
5. Работа усилителя на биполярном транзисторе
6. Искажения сигнала в усилителе
7. Дифференциальный усилитель

Основные сведения и классификация усилителей

Усилителем называется устройство, предназначенное для усиления входных электрических сигналов по напряжению, току или мощности за счет преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала.

Усилитель включает в себя нелинейный элемент, управляемый входным электрическим сигналом, источник питания и нагрузочное устройство с определенным сопротивлением.

Классификация усилителей производится по различным признакам:

- *по виду усиливаемого сигнала* они делятся на усилители гармонических и импульсных сигналов;
- *по типу усиливаемого сигнала* усилители подразделяют на усилители напряжения, тока и мощности;
- *по диапазону усиливаемых частот* различают усилители постоянного тока и усилители переменного тока. В свою очередь усилители переменного тока в зависимости от диапазона усиливаемых частот делятся на усилители низкой частоты (УНЧ), высокой частоты (УВЧ), широкополосные и избирательные усилители. Последние обеспечивают усиление в узком диапазоне частот;
- *по виду нагрузки* различают усилители с активной, с активно-индуктивной и емкостной нагрузкой.

Усилители могут быть однокаскадными и многокаскадными с гальванической, емкостной и индуктивной связью. В зависимости от режима работы можно выделить два класса усилителей: усилители с линейным режимом работы и усилители с нелинейным режимом работы.

Основные параметры и характеристики усилителей

Основными характеристиками любого усилителя являются:

- *амплитудная характеристика*, которая представляет собой зависимость $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ (рис.1,а). Позволяет определить динамический диапазон входного сигнала для обеспечения работы с минимальными нелинейными искажениями. Для линейных усилителей это прямая, проходящая через

начало координат;

- амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) $U_{\text{ВЫХ}} = f(f)$ (рис.1,б) отражает зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты. Реально в усилителях из-за наличия паразитных емкостей и индуктивностей различные частоты усиливаются неодинаково;
- фазо-частотная характеристика $\varphi = f(f)$ (рис.1,в) отражает зависимость угла сдвига фазы, выходного сигнала по отношению к фазе входного сигнала, от частоты сигнала;
- переходная характеристика – отражает реакцию усилителя на единичный скачок входного напряжения (рис.1,г). Процесс изменения выходного сигнала может быть колебательным (кривая 1) либо апериодичным (кривая 2).

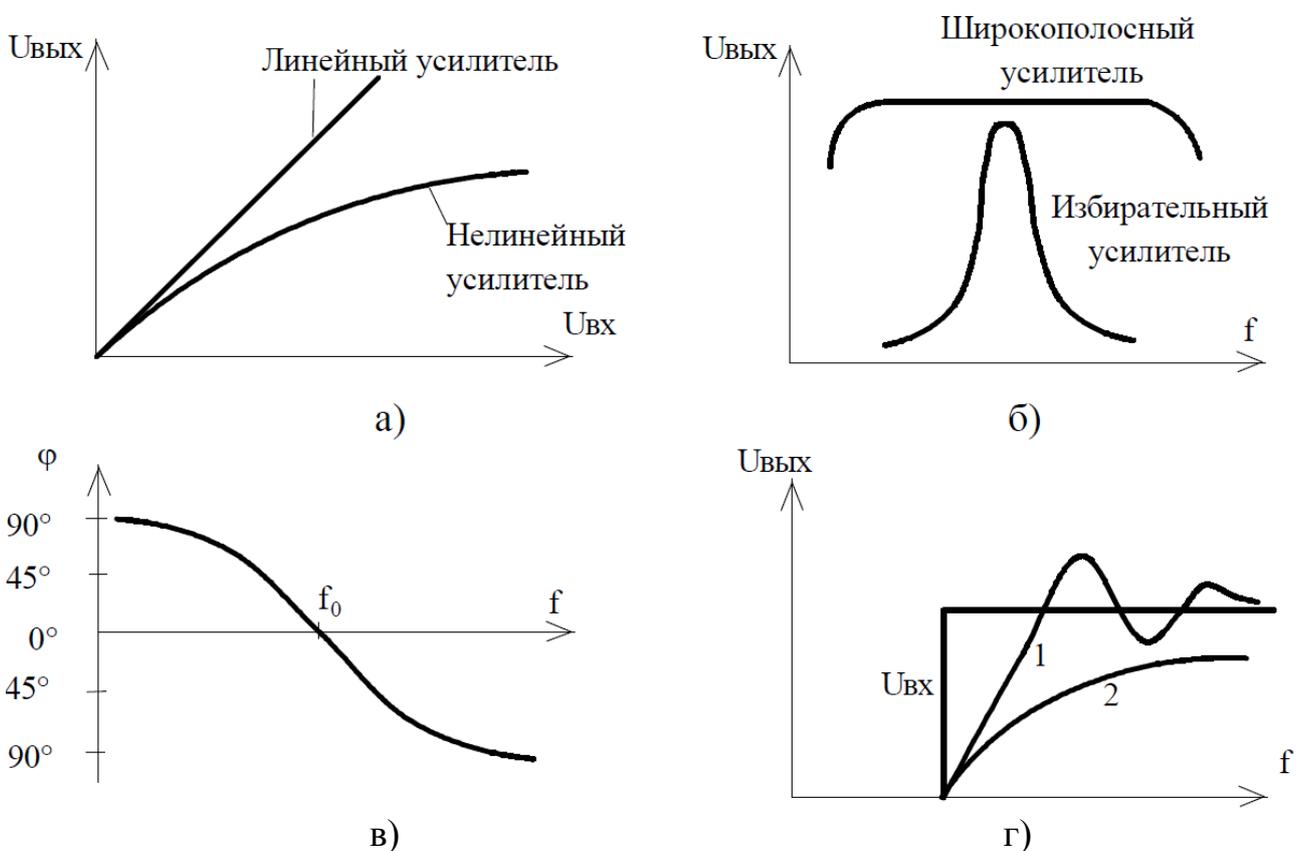


Рис. 1 – Характеристики усилителя: а – амплитудная, б – амплитудно-частотная, в – фазо-частотная, г – переходная

Важнейшими параметрами усилителя являются:

Коэффициенты усиления по току K_I , напряжению K_U и мощности K_P :

$$K_I = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}}; \quad K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}}; \quad K_P = \frac{\Delta P_{\text{ВЫХ}}}{\Delta P_{\text{ВХ}}},$$

где $I_{\text{ВХ}}$, $I_{\text{ВЫХ}}$, $U_{\text{ВХ}}$, $U_{\text{ВЫХ}}$, $P_{\text{ВХ}}$, $P_{\text{ВЫХ}}$ – действующие значения токов напряжений и мощностей на входах и выходах усилителя.

Полоса пропускания усилителя – характеризует частотные свойства

усилителя. Измеряется на уровне 0,707 от K_{\max} .

Входное и выходное сопротивление необходимо учитывать при согласовании с источником входного сигнала и с нагрузкой. В общем случае значение входного и выходного сопротивлений носят комплексный характер и являются функцией от частоты:

$$Z_{\text{вх}} f = \frac{U_{\text{вх}} f}{I_{\text{вх}} f}; \quad Z_{\text{вых}} f = \frac{U_{\text{вых}} f}{I_{\text{вых}} f}.$$

Выходная мощность усилителя – это мощность, которая выделяется на нагрузке.

Искажения сигналов в усилителе – это отклонение формы выходного сигнала от формы входного сигнала. Различают два вида искажений: статические (нелинейные) и динамические (линейные).

Нелинейные искажения возникают в умножителе за счет работы его на нелинейном участке ВАХ.

Линейные искажения определяются амплитудно-частотной характеристикой усилителя и количественно оцениваются коэффициентами частотных искажений на низких и высоких частотах.

Классы усилителей

Расположение рабочей точки по постоянному току определяет динамику изменений режимов работы транзистора и влияет на энергопотребление и искажения сигналов в усилителе. В зависимости от расположения точки покоя различают пять основных классов усиления: А, В, АВ, С, D.

Класс усиления А, характеризуется выбором рабочей точки на линейном участке входной характеристики (рис.2). При работе в данном классе усиления транзистор все время находится в активном режиме, поэтому форма выходного сигнала $U_{\text{вых}}(t)$ повторяет форму входного сигнала $U_{\text{вх}}(t)$ за счет работы транзистора в активной зоне без захода в область насыщения и отсечки.

Достоинством этого класса являются минимальные нелинейные искажения сигнала, к недостаткам относится низкий КПД, который теоретически не может превышать 0,5. Что объясняется протеканием постоянного тока $I_{\text{к0}}$ вне зависимости от наличия или отсутствия входного сигнала. Поэтому такой режим используется только в маломощных каскадах, в которых необходимо иметь минимальные нелинейные искажения.

Класс усиления В, характеризуется тем, что напряжение смещения $U_{\text{см}} = 0$, а следовательно, рабочая точка выбирается в самом начале входной характеристики (рис.3). Особенностью режима В является то, что при отсутствии входного сигнала отсутствуют базовые и коллекторные токи. Предполагается, что транзистор находится в активном режиме, т.е. усиливает входной сигнал только половину периода его действия. Вторую половину периода входного сигнала транзистор находится в режиме отсечки.

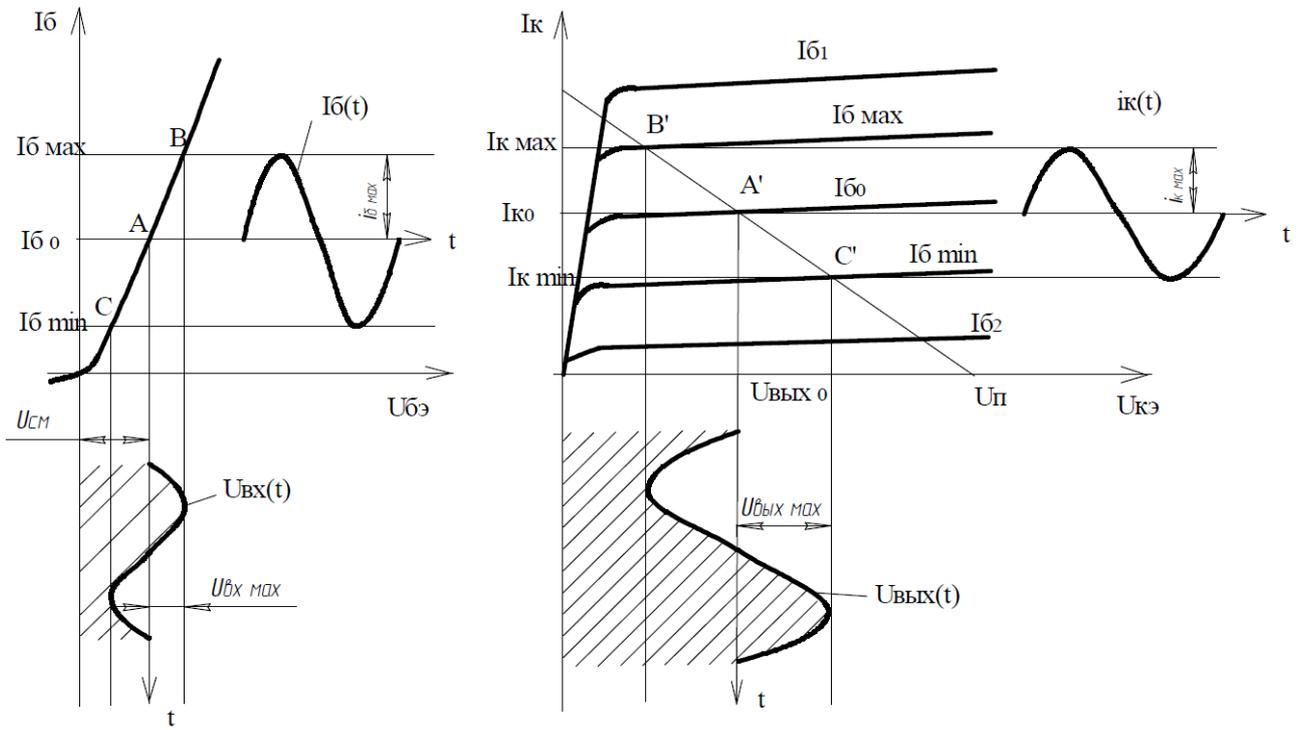


Рис. 2 – Взаимосвязь токов и напряжений транзистора в усилителе класса А

Основными достоинствами класса В являются: высокий КПД (до 70%) и малая мощность тепловых потерь, рассеиваемых в транзисторе, что крайне важно для усилителей большой и средней мощности. Недостаток – большой уровень нелинейных искажений, поэтому такой режим применяется только в двухтактных усилителях.

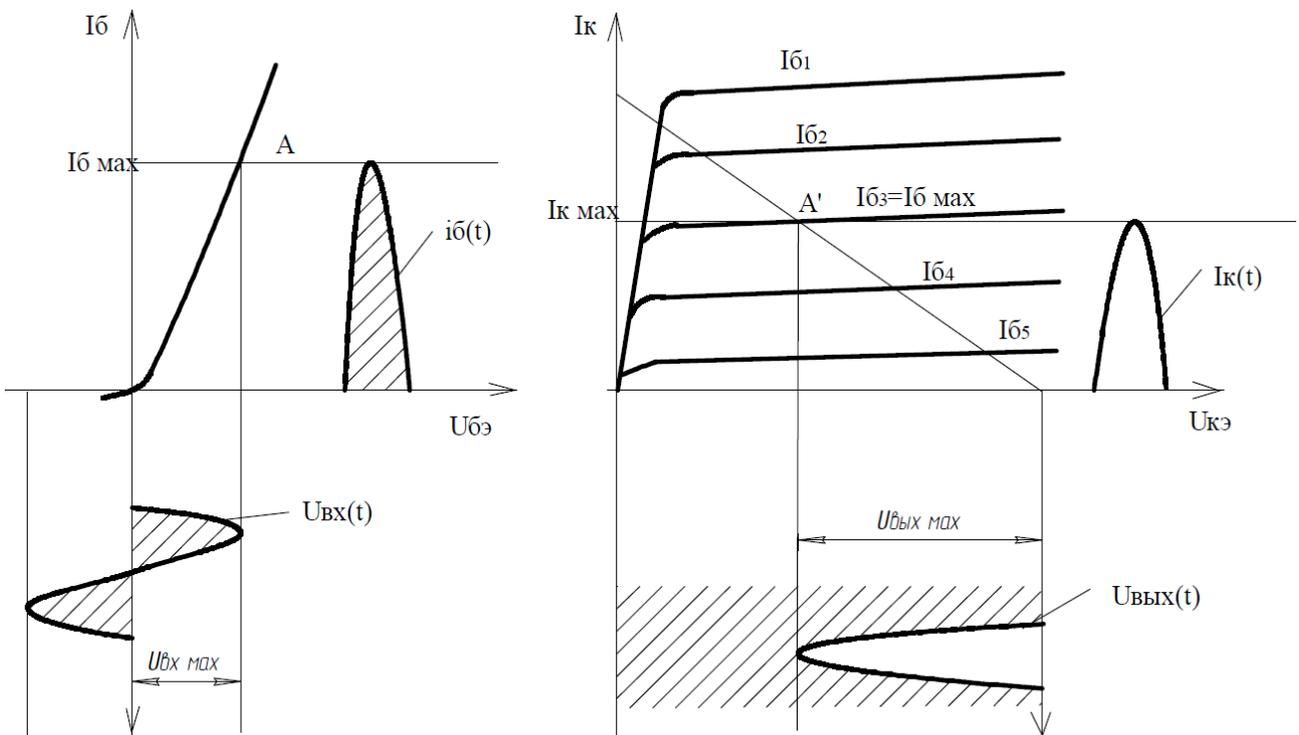


Рис. 3 – Взаимосвязь токов и напряжений транзистора в усилителе класса В

Класс усиления АВ. Данный класс усиления является промежуточным между классами А и В. Характеризуется небольшим напряжением смещения, а незначительное снижение КПД усилительного каскада в классе АВ компенсируется существенным уменьшением нелинейных искажений при усилении одного из полупериодов входного сигнала. Поэтому данный класс используется в высококачественных двухтактных усилителях мощности.

Класс усиления С, характеризуется тем, что рабочая точка на входной характеристике сдвинута влево от начала координат (рис.4). Следовательно, большую часть периода входного сигнала транзистор находится в закрытом состоянии. Достоинство класса С – высокий КПД, недостаток – большие нелинейные искажения. Применяется в генераторах частоты.

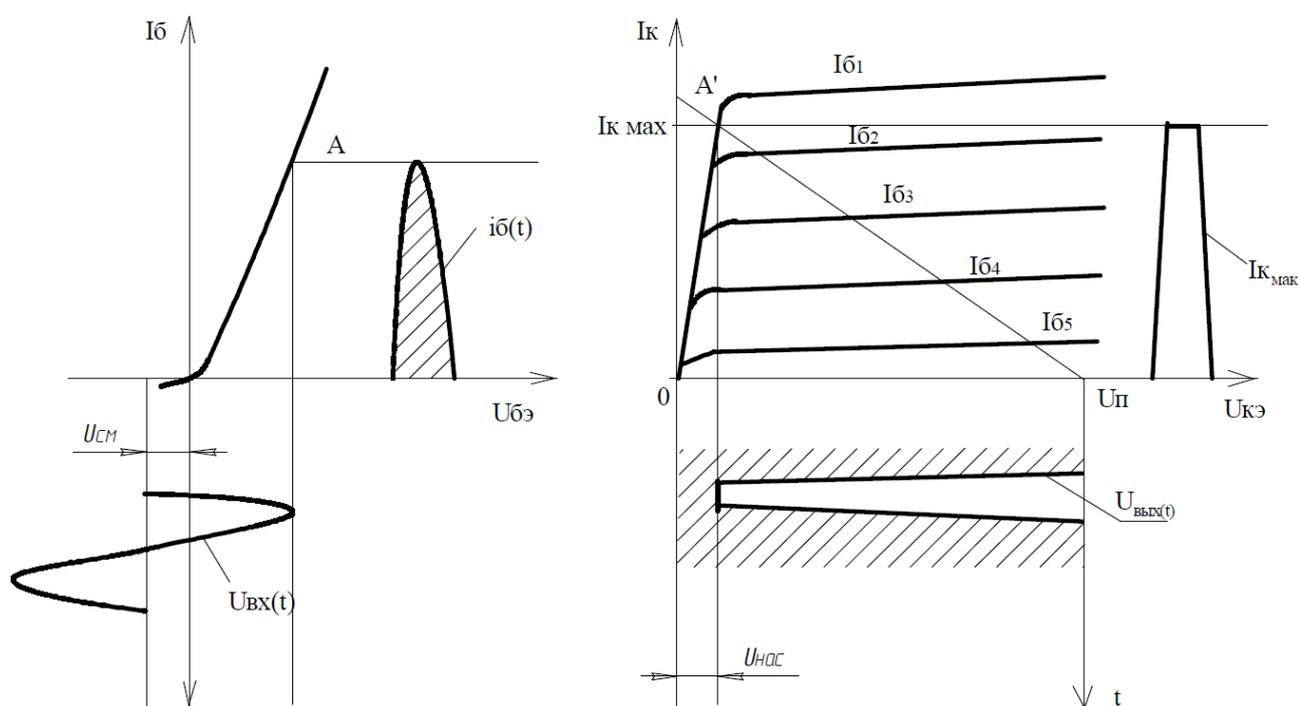


Рис. 4 – Взаимосвязь токов и напряжений транзистора в усилителе класса С

Класс усиления D. Предназначен для обозначения ключевого режима работы, при котором биполярный транзистор может находиться только в двух устойчивых состояниях: или полностью открытом (режим насыщения), или полностью закрытом (режим отсечки). Скорость перехода из одного состояния в другое характеризует быстродействие усилительного элемента. КПД такого усилительного каскада близок к 1. Область применения цифровые и импульсные схемы.

Обеспечение устойчивости рабочей точки при влиянии внешних дестабилизирующих факторов

В реальных радиоэлектронных устройствах транзисторные усилительные каскады функционируют не в тех идеальных условиях, которые

подразумеваются при анализе схем, а подвержены достаточно жесткому влиянию множества факторов. Таких, например, как: температура окружающей среды, колебания питающего напряжения, наличие значительных электрических или магнитных полей, создающих паразитные наводки в цепях, и т.п. Все эти воздействия могут дестабилизировать рабочие точки транзисторных схем, что сопровождается ухудшением их параметров и в конечном итоге приводит к прекращению выполнения ими предназначенных функций.

Для предотвращения данных явлений в стандартные цепи смещения вводят дополнительные звенья и применяют специальные элементы, компенсирующие вредные воздействия. Чаще всего используются следующие два метода:

- включение нелинейных элементов, нейтрализующих температурный (и прочий) дрейф параметров транзистора (метод параметрической стабилизации);
- создание в каскаде специальных цепей обратной связи по постоянному току или напряжению, обеспечивающих возврат рабочей точки в исходное состояние в случае ее смещения.

Работа усилителя на биполярном транзисторе

Среди схем транзисторных усилительных каскадов наибольшее распространение получила схема с общим эмиттером (ОЭ) (рис.5) за счет ряда преимуществ:

- относительно большое входное сопротивление;
- возможность усиления сигнала как по току, так и по напряжению;
- возможность питания схемы от одного источника напряжения.

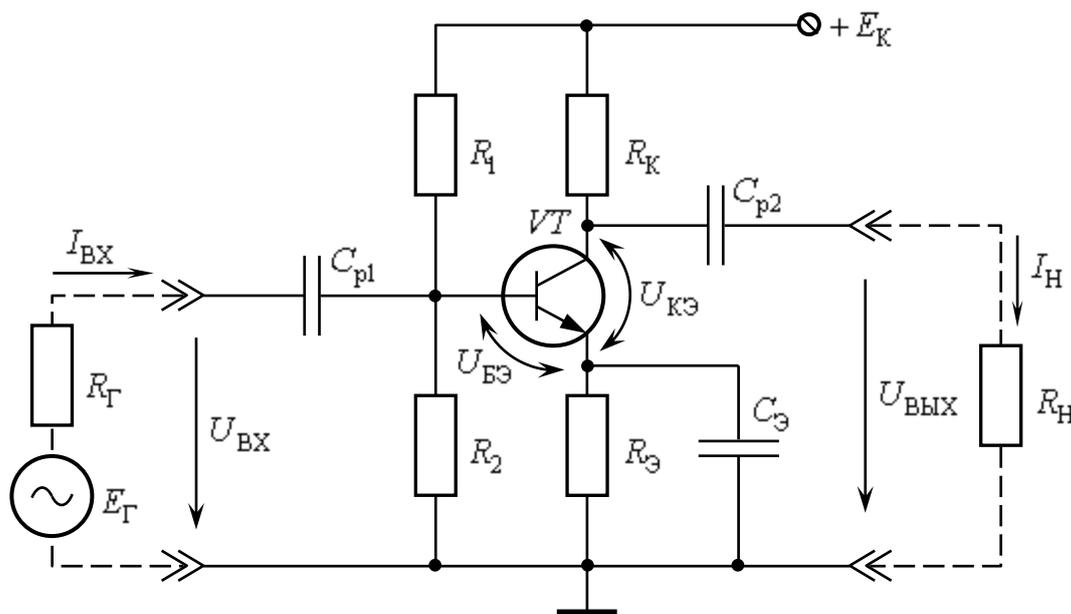


Рис. 5 – Схема транзисторного усилителя с ОЭ

Резистивный делитель R_1, R_2 задает напряжение на базе транзистора U_{B0} (рис.6), если пренебречь малым током базы то можно записать

$$U_{B0} = \frac{E_K}{R_1 + R_2} R_2.$$

При этом напряжение смещения $U_{см}$, которое обеспечивает работу транзистора в *режиме покоя* (в отсутствие входного сигнала) и определяет класс работы усилителя, определяется выражением

$$U_{см} = U_{BЭ0} = U_{B0} - I_{Э0} R_Э.$$

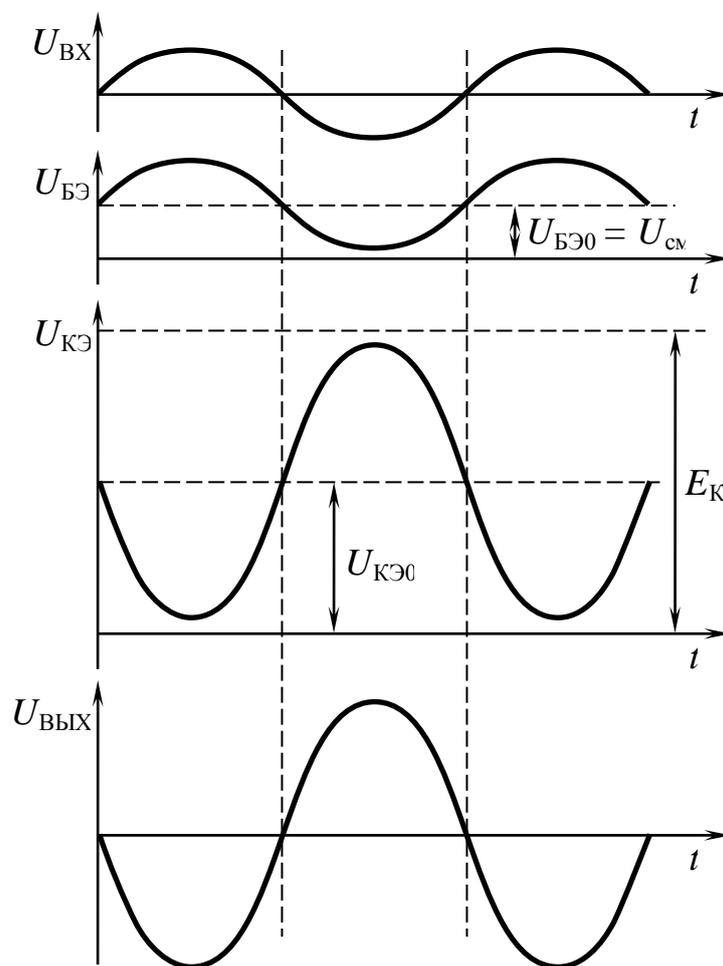


Рис. 6 – Сигналы напряжений, действующих в усилителе

Элементы схемы $R_1, R_2, R_Э, C_Э$ создают отрицательную обратную связь (ООС) по постоянному току, которая обеспечивает температурную стабилизацию рабочей точки. Если в результате нагрева транзистора ток коллектора I_{K0} получает некоторое положительное приращение, то такое же приращение получит и ток эмиттера, поскольку $I_{Э0} = I_{K0} + I_{B0} \approx I_{K0}$. Падение напряжения на резисторе $R_Э$ увеличится, в результате напряжение $U_{БЭ0}$

уменьшится, что приводит к уменьшению I_{K0} .

Разделительный конденсатор C_{p1} предотвращает попадание в цепь базы транзистора VT постоянной составляющей входного сигнала, которая могла бы исказить режим работы транзистора по постоянному току. Кроме того этот конденсатор препятствует протеканию постоянного тока от источника питания E_K через цепи источника входного сигнала.

Конденсатор связи C_{p2} на выходе усилительного каскада обеспечивает выделение из коллекторного напряжения $U_{KЭ}$ переменной составляющей (рис.6), которая подается в нагрузку R_n или последующий каскад усиления напряжения (в многокаскадном усилителе).

Выходное напряжение $U_{KЭ}$ создается с помощью резистора в коллекторной цепи R_K при изменении коллекторного тока транзистора. Для коллекторной цепи усилительного каскада в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать следующее уравнение электрического состояния

$$E_K = U_{KЭ} + R_K \cdot I_K.$$

В данном случае подразумевается, что на частоте сигнала сопротивлением эмиттерной цепи можно пренебречь. Из уравнения видно, что увеличение тока коллектора при открытии транзистора приводит к возрастанию падения напряжения на R_K и, соответственно, к уменьшению выходного напряжения. Выходной сигнал находится в противофазе к входному, т.е. транзисторный усилитель с ОЭ *инвертирует* сигнал.

Расчет транзисторного усилительного каскада целесообразно производить графоаналитическим методом с использованием семейств входных и выходных характеристик выбранного транзистора.

Основными параметрами транзисторного усилителя являются:

- коэффициент усиления по напряжению $K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}$;
- коэффициент усиления по току $K_I = \frac{I_n}{I_{ВХ}}$;
- коэффициент усиления по мощности $K_P = K_U K_I$;
- входное и выходное сопротивления.

Искажения сигнала в усилителе

В реальных схемах усилителей могут проявляться различные несоответствия формы выходного сигнала входному – искажения. При работе усилителей различают линейные и нелинейные искажения, в свою очередь линейные искажения делятся на частотные и фазовые.

Линейные искажения не нарушают амплитудных соотношений в усиливаемом сигнале, т.е. амплитудная характеристика не претерпевает никаких искажений. Линейные искажения связаны с неравномерностью

амплитудно-частотной характеристики усилителя и нелинейностью его фазо-частотной характеристики. Поэтому линейные искажения еще называют частотными.

Частотные искажения вызваны изменением коэффициента усиления на различных частотах, их причиной являются реактивные элементы (конденсаторы, катушки индуктивности, ёмкость p - n переходов, ёмкость монтажа и т.д.). Частотные искажения можно оценить по АЧХ (рис.1,б). При средних частотах коэффициент усиления практически не зависит от частоты. В области низких частот наблюдается «завал» частотной характеристики, обусловленный сопротивлением разделительных конденсаторов, включенных последовательно во входную и выходную цепи

$$X_c = \frac{1}{\omega C_p}.$$

Разделительные конденсаторы с эквивалентными сопротивлениями образуют RC -цепочки, известно, что на частоте $\omega_c = \frac{1}{R_{\text{экв}} C_p}$ коэффициент пропускания RC -цепочки уменьшается до 0,707 от своего максимального значения. Для C_{p1} эквивалентное сопротивление определяется суммой входного сопротивления усилителя и сопротивлением источника сигнала (R_{Γ}), для C_{p2} – суммой выходного сопротивления усилителя и сопротивления нагрузки ($R_{\text{н}}$).

«Завал» АЧХ в области высоких частот обусловлен шунтирующим действием паразитных емкостей (ёмкость монтажа, резисторов и других элементов усилителя), сопротивление которых при высоких частотах уменьшается.

Считается допустимым уменьшение коэффициента усиления до $0,707K_{\text{max}}$. При этих значениях определяют граничную низшую $f_{\text{н}}$ и высшую $f_{\text{в}}$ частоты. Полоса пропускания усилителя определяется как разность этих частот $f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$.

Фазовые искажения также возникают из-за наличия реактивных элементов. Они обусловлены возникновением различных фазовых сдвигов при усилении сигналов различных частот. Оценивают фазовые искажения по ФЧХ (рис.1,в).

При больших входных напряжениях переменные составляющие токов выходят за пределы линейных участков вольтамперных характеристик транзистора, в результате чего форма кривой выходного напряжения претерпевает значительные искажения. Эти искажения носят название *нелинейных искажений*. В результате нелинейных искажений на выходе усилителя кроме полезного сигнала появляются высшие гармоники, т.е. совершенно новые колебания, которых не было на входе.

Для оценки диапазона изменения входных напряжений, усиливаемых без искажений, используют амплитудную характеристику (рис.1,а). Из рисунка

видно, что при превышении входным сигналом определенного уровня характеристика перестает быть линейной.

Дифференциальный усилитель

Дифференциальный усилитель представляет собой мостовые усилительные каскады параллельного типа (рис.7), имеет два входа и два выхода и предназначен для усиления разности входных сигналов

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ1}} - U_{\text{ВЫХ2}} = K_1 U_{\text{ВХ1}} - K_2 U_{\text{ВХ2}} = K_{\text{ДУ}} U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}} \cdot$$

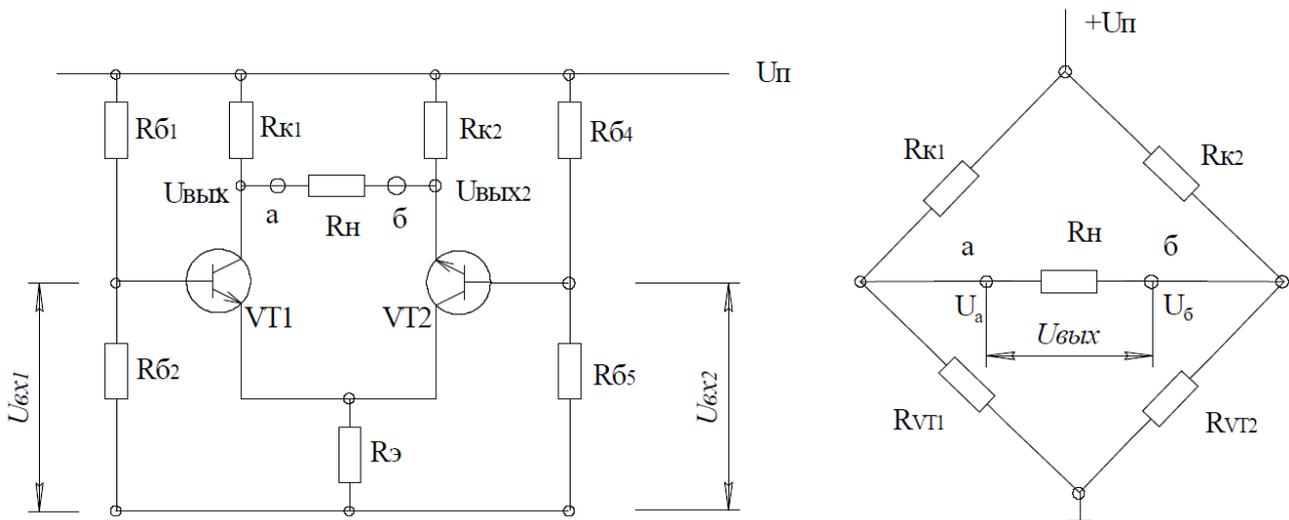


Рис. 7 – Схема дифференциального усилителя

Он обладает высокой стабильностью параметров при воздействии различных дестабилизирующих факторов, большим коэффициентом усиления дифференциальных сигналов и высокой степенью подавления синфазных помех.