Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Национальный исследовательский университет

Учебно-научный и инновационный комплекс
"Новые многофункциональные материалы и нанотехнологии"

Морозов О.А.

ТРАНЗИСТОРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

(Учебно-методический материал для лабораторного практикума)

Мероприятие:
2.1. Развитие междисциплинарных фундаментальных и прикладных исследований с целью комплексного решения проблем по ПНР
Название работы:
2.1.1. Разработка и модернизация учебно-методических пособий и лабораторных практикумов

Учебная дисциплина: «Электротехника и электроника»

Специальность, направление: «Информационные системы и технологии », «Информационные системы

ННГУ, 2010

УДК 681.3
ББК 32.97

ТРАНЗИСТОРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ: Учебно-методический материал для лабораторного практикума / Сост.: О.А. Морозов. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2010. – 30 с.

Составитель: кандидат физ.-мат. наук, доцент **О.А. Морозов**

Рецензент: доктор педагогических наук, доцент **И.В. Гребенев**

В пособии основное внимание уделено изучению характеристик и параметров усилительных каскадов низкой частоты на биполярных транзисторах, рассмотрено влияние обратных связей на основные характеристики усилителя. Приведено описание лабораторной работы и указания к её выполнению.

Практикум предназначен для студентов физического факультета ННГУ в качестве пособия при подготовке и проведении лабораторных работ по курсу «Электротехника и электроника».

УДК 681.3
ББК 32.97

С о д е р ж а н и е

стр.

Введение ……..…..…… 4

1. Усилители низкой частоты …..…… 6

1.1. Основные характеристики усилителя низкой частоты…… 6

1.2. Усилители мощности …….…… 8

1.3. Обратная связь в усилителях …….…… 11

1.3.1. Обратная связь по постоянному току …….. 14

1.3.2. Обратная связь по переменному току …….. 15

1.4. Параметры транзисторного УНЧ……..…….. 17

1.5. Переходные искажения в двухтактных каскадах усилителя мощности ……..... 22

1.6. Контрольные вопросы……...……... 24

2. Описание лабораторной работы …...…… 25

2.1. Лабораторная работа «Изучение усилителя звуковой частоты»..... 25

2.2. Порядок выполнения заданий лабораторной работы……..…….. 26

2.3. Указания к отчету……...……..…… 29

Литература……. 29

Введение

Для увеличения амплитуды напряжения, силы тока, мощности электрических сигналов используют специальные устройства, называемые электронными усилителями. Усилитель осуществляет увеличение энергетических параметров управляющего сигнала за счет использования энергии источника питания. Различного вида усилители применяются во многих областях современной науки и техники. Особенно широкое применение усилители имеют в радиосвязи и радиовещании, устройствах радиотехники и автоматики, радиолокации, телевидении, технике радиоизмерений.

Усилители могут быть классифицированы по различным признакам: назначению, типу усилительных элементов, частотной полосе и т.п. По типу применяемых усилительных элементов различают транзисторные, ламповые, комбинированные, усилители на интегральных микросхемах.

По виду амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) выделяют усилители постоянного тока, нижняя граница полосы пропускания которых равна нулю; усилители переменного тока; селективные (узкополосные) усилители, АЧХ которых имеет вид частотной характеристики избирательного полосового фильтра; апериодические (широкополосные, импульсные) усилители, полоса усиления которых соизмерима со значением центральной частоты пропускания.

С точки зрения спектрального диапазона усиливаемого сигнала выделяют усилители звуковой (низкой) частоты (УЗЧ, УНЧ); усилители промежуточной частоты (УПЧ), усилители высокой частоты (УВЧ) радиоприёмных устройств. Кроме того возможна классификация усилителей по мощности, режимам работы, выполнению специальных функций.

Все усилители можно подразделить на два класса – с линейным режимом работы и нелинейным. К усилителям с линейным режимом работы предъявляются требования получения выходного сигнала, близкого по форме к входному (пропорциональном усилении мгновенных значений входного сигнала). Одной из основных характеристик усилителей с линейным режимом работы, как линейных четырёхполюсников, является комплексный коэффициент передачи по напряжению (току):

$$K_u(f) = \frac{U_{m\,вых}(f)}{U_{m\,вх}(f)} = \left|K_u(f)\right| \cdot e^{j\varphi_к(f)}.$$

Величина $K_u(f)$ является комплексной, т.е. характеризует изменение как амплитуды, так и фазы сигнала на выходе усилителя по сравнению с их значениями на входе. Модуль коэффициента передачи усилителя $\left|K_u(f)\right|$ называют коэффициентом усиления. Зависимость модуля комплексного коэффициента передачи от частоты, определённого для гармонического

входного сигнала, является амплитудно-частотной характеристикой усилителя. Зависимость аргумента комплексного коэффициента передачи от частоты $\varphi_u(f)$ называется фазово-частотной характеристикой усилителя.

Часто для достижения необходимого коэффициента усиления K_u используют многокаскадные усилители, в которых выходное напряжение предыдущего каскада является входным для следующего каскада и общий коэффициент усиления равен $K_u = K_{u1} \cdot K_{u2} \cdot K_{u3} \cdot \ldots \cdot K_{un}$.

Коэффициент усиления в ряде случаев принято выражать в децибелах

$$K_{дб} = 20 \ \lg\left|\frac{U_{вых}}{U_{вх}}\right|; \qquad K_{I\,дб} = 20 \ \lg\left|\frac{I_{вых}}{I_{вх}}\right|, \qquad K_{P\,дб} = 10 \ \lg\left(\frac{P_{вых}}{P_{вх}}\right)$$

Для многокаскадного усилителя: $K_{дб} = K_{1\,дб} + K_{2\,дб} + K_{3\,дб} + \ldots + K_{n\,дб}$.

В усилителях с нелинейным режимом работы пропорциональность в передаче мгновенных значений входного сигнала отсутствует. К усилителям с нелинейным режимом работы можно отнести, например, усилители-ограничители и логарифмические усилители.

1. Усилители низкой частоты

Усилители низкой частоты предназначены для усиления гармонических составляющих непреобразованного передаваемого или принимаемого сообщения. Частотная характеристика усилителей низкой частоты охватывает спектральный диапазон от десятков Гц до десятков кГц (для УЗЧ), а для некоторых типов видеоусилителей высшая рабочая частота может составлять сотни кГц.

1.1. Основные характеристики усилителя низкой частоты

УНЧ являются элементом усилительного устройства, которое должно содержать также источник сигнала, нагрузку и источник питания (рис. 1).

Основное назначение УНЧ – усиливать мощность сигнала, т.е. при подаче на вход УНЧ электрического сигнала малой мощности получать на нагрузке сигнал той же формы, но большей мощности. Для усиления мощности УНЧ преобразует энергию источника питания с помощью усилительных приборов. В некоторых случаях УНЧ имеет и вспомогательное значение – осуществляет коррекцию формы сигнала.

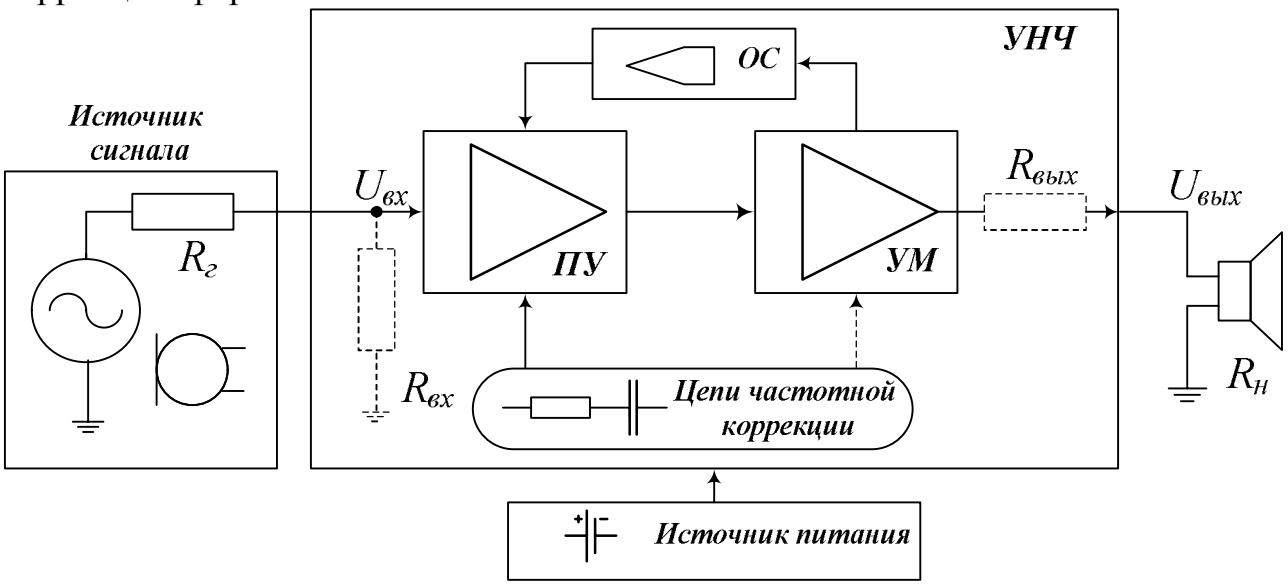


Рис.1
Структурная схема УНЧ

По полосе усиливаемых частот (от нижней частоты диапазона до верхней) УНЧ делятся на усилители постоянного и переменного тока. Усилители постоянного тока (УПТ) – усилители медленно изменяющихся напряжений или токов, усилители переменного тока усиливают только переменную составляющую тока в необходимой спектральной полосе. Усилители звуковых частот – УНЧ, усиливающие сигналы в полосе частот, воспринимаемых ухом человека.

Для оценки УНЧ кроме коэффициента усиления, АЧХ и ФЧХ часто используются следующие электрические параметры:

Рабочий диапазон частот – интервал значений (от нижней частоты до верхней), в котором коэффициент усиления изменяется по определенному закону с известной степенью точности.

Неравномерность частотной характеристики – наибольшее отклонение коэффициента усиления в заданном диапазоне частот от значения K_0, определённого для средней частоты.

Коэффициент частотных искажений M характеризует неравномерность АЧХ. *M* – отношение коэффициента усиления в области средних частот K_0 к коэффициенту усиления на границе заданного диапазона частот. Различаются коэффициенты частотных искажений в области нижних частот и верхних частот.

Коэффициент нелинейных искажений определяет степень искажения входного *синусоидального сигнала* усилителем и оценивается как квадратный корень из отношения мощностей всех высших гармоник выходного сигнала к полной выходной мощности:

$$k_н = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + ... + P_n}{P_1 + P_2 + P_3 + ... + P_n}},$$

или близким к нему *коэффициентом гармоник:*

$$k_г = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + ... + P_n}{P_1}} = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + ... + U_n^2}{U_1^2}},$$

где U_1, U_2, U_n - действующие (или амплитудные) значения первой, второй и т.д. гармоник выходного напряжения при синусоидальном сигнале на входе.

Номинальная выходная мощность $P_{вых}^{ном}$ – мощность, выделяемая УНЧ в нагрузке и заданная техническими требованиями.

Номинальное выходное напряжение $U_{вых}^{ном}$ – напряжение на нагрузке, соответствующее номинальной выходной мощности. Это напряжение связано с номинальным сопротивлением нагрузки $R_н$ соотношением $U_{вых}^{ном} = \sqrt{P_{вых}^{ном} \cdot R_н}$

Номинальное входное напряжение $U_{вх}^{ном}$ – напряжение, подаваемое на вход УНЧ, при котором на выходе создается номинальная мощность. Напряжение $U_{вх}^{ном}$ соответствует чувствительности УНЧ.

Входное сопротивление $Z_{вх}$ – сопротивление для токов низкой частоты, измеренное между входными зажимами УНЧ. В области средних частот входное сопротивление обычно оказывается активным $R_{вх}$.

Выходное сопротивление $Z_{вых}$ – сопротивление для токов низкой частоты, измеренное между выходными зажимами УНЧ (при условии, что

источник сигнала включен, но его напряжение равно нулю). В области средних частот выходное сопротивление обычно оказывается активным $R_{вых}$.

Общая потребляемая мощность P_0 – мощность, потребляемая УНЧ от источников питания, при номинальной выходной мощности $P_{вых}^{ном}$.

Номинальная выходная мощность определяет верхний предел выходной мощности, при котором все характеристики качества звучания по электрическому напряжению соответствуют нормам.

Фон – среднеквадратическая сумма спектральных составляющих выходного сигнала, возникающих в результате недостаточной фильтрации напряжения питания.

Основными элементами структурной схемы УНЧ (рис. 1) являются предварительный усилитель (ПУ) и усилитель мощности (УМ). К дополнительным элементам УНЧ относятся: цепи частотной коррекции и цепи обратной связи (ОС), кроме того в состав УНЧ часто включают регулятор усиления.

Усилитель мощности может содержать один или несколько каскадов усиления и предназначен для создания необходимой мощности в нагрузке.

Предварительный усилитель (или усилитель напряжения) служит для усиления слабого входного сигнала и создания необходимого уровня напряжения на входе усилителя мощности, он также может содержать один или несколько усилительных каскадов, причем часто в качестве входного каскада применяют эмиттерные (истоковые) повторители для лучшего согласования с источником сигнала.

Регулятор усиления в усилителях звуковой частоты используется в качестве регулятора громкости.

Цепи коррекции используются для изменения частотной характеристики УНЧ, в частности, к цепям частотной коррекции относится регулятор тембра. Коррекция частотной характеристики УНЧ часто применяется для компенсации искажений АЧХ источника входного сигнала (например, звукоснимающей магнитной головки в магнитофонах) или АЧХ нагрузки (например, звуковых колонок).

1.2. Усилители мощности

Усилителем мощности обычно называют выходной каскад усилителя сигнала. Значительная часть мощности, потребляемой УНЧ от источников питания, рассеивается усилителем мощности. Когда отдаваемая в нагрузку мощность полезного сигнала становится соизмеримой с потребляемой усилителем мощностью, возникает вопрос экономии энергии источника питания, для этого, прежде всего, следует уменьшить мощность, выделяющуюся в схеме самого выходного каскада.

Можно выделить несколько основных режимов работы (классов) выходного каскада усилителя мощности.

Режим класса А. Рабочая точка (р.т.), определяющая состояние схемы при отсутствии сигнала, выбирается на линейном участке динамической вольт–амперной (передаточной) характеристики (рис. 2а). Амплитуда входного напряжения $U_{\text{у}}$ на управляющем электроде активного элемента (базе транзистора) для минимизации нелинейных искажений выбирается меньше величины напряжения смещения. Выходной ток $I_{вых}$ протекает непрерывно в течение всего периода сигнала и достаточно точно воспроизводит форму входного переменного напряжения, а положение рабочей точки не выходит за пределы прямолинейного участка динамической характеристики. Достоинством режима класса А являются малые нелинейные искажения, недостатками – низкий КПД (отношение отдаваемой мощности к потребляемой, в УНЧ не более 25%) и относительно малая мощность в нагрузке. Поэтому режим класса А применяется в маломощных (до 3…5 Вт) однотактных выходных каскадах. В режиме класса А работают и все каскады усиления напряжения.

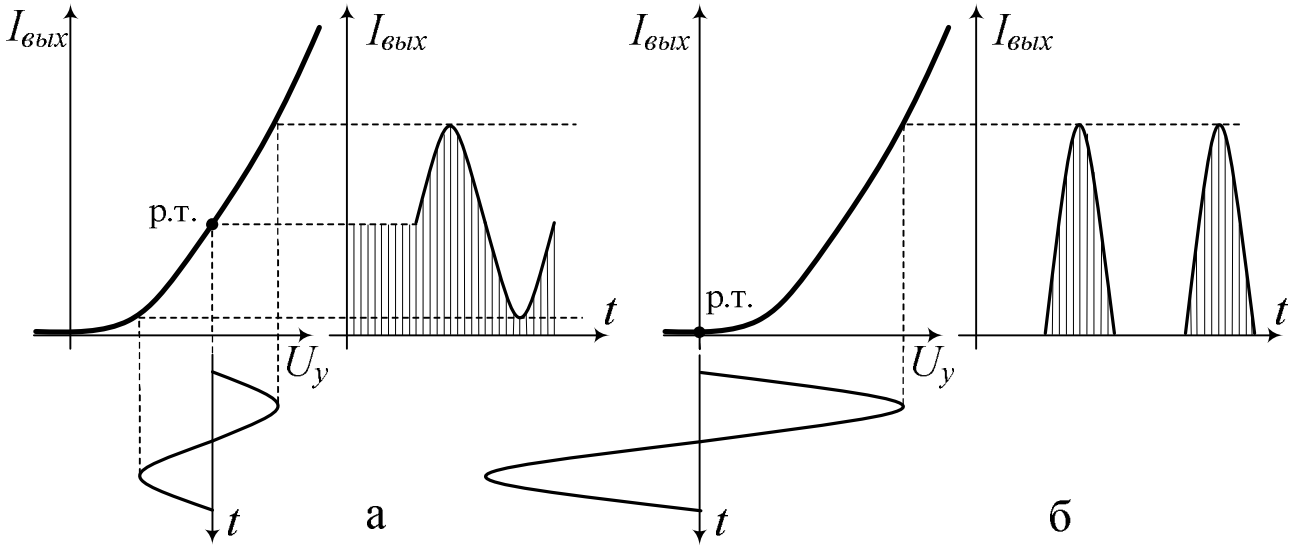


Рис. 2
Выбор рабочей точки усилителя

Режим класса В. Рабочая точка выбирается в самом начале динамической вольт–амперной характеристики (рис. 2б), в результате чего при отсутствии входного сигнала выходной ток практически равен нулю и выделяемая в каскаде мощность мала. Однако в этом случае каскад способен усиливать только одну полуволну гармонического сигнала (сигналы только одной полярности). При подаче на вход синусоидального сигнала ток в выходной цепи протекает лишь в течение половины периода (в течение другой половины периода активный элемент находится в состоянии отсечки) и имеет форму импульсов. Чтобы получить усиление полного сигнала применяются двухтактные схемы, в которых положительные составляющие сигнала усиливаются одним активным элементом, а отрицательные – другим. В

нагрузке $R_н$ усиленные компоненты сигнала складываются таким образом, что восстанавливается его первоначальная форма.

Достоинства усилителя мощности, работающего в режиме класса В, – высокий КПД (до 70%) и большая мощность сигнала в нагрузке, однако форма выходного сигнала искажена из-за нелинейного участка передаточной характеристики. Чистый режим класса В практически используют очень редко, значительно чаще используется так называемый смешанный или промежуточный режим АВ.

Режим АВ. Рабочая точка занимает промежуточное положение на передаточной характеристике (между началом координат и серединой линейного участка). За счет сдвига рабочей точки из нуля в начало линейного участка на передаточной характеристике при отсутствии входного сигнала через активный элемент протекает некоторый начальный ток покоя. При этом выбором максимальной амплитуды входного напряжения можно добиться, чтобы активный элемент не переходил в состояние отсечки и усиливал (с разной степенью искажений) обе полуволны синусоидального сигнала. Режим АВ работы усилителя характеризуется достаточно высоким КПД при относительно небольших нелинейных искажениях формы выходного сигнала.

Режим С – это режим, при котором выходной ток протекает в течение промежутка времени, меньшего половины периода входного сигнала, т.к. рабочая точка располагается левее точки начала координат на переходной характеристике (отрицательное смещение). Ток покоя отсутствует, поэтому КПД режима С выше, чем режима В и достигает 80% и более. В режиме С использование двухтактной схемы не дает возможности получить в выходной цепи сигнал той же формы, что и подаваемой во входную цепь, поэтому такой режим не применяют для усиления сигналов произвольной формы. Этот режим широко используется в мощных избирательных (резонансных) усилителях, где нагрузкой является параллельный резонансный контур, настроенный на частоту подаваемого на вход синусоидального колебания или на одну из его высших гармоник.

Режим D – это ключевой режим работы, при котором транзистор может находиться только в двух состояниях: или полностью заперт (режим отсечки), или полностью открыт (режим насыщения). Достоинство режима D заключается в очень высоком (близком к 100%) КПД. Его недостаток – значительное усложнение схемы усилителя. Такой режим широко используется в цифровой технике, во всевозможных управляющих, регулирующих, следящих устройствах, где вследствие высокого КПД и малого потребления энергии он находит широкое применение для усиления прямоугольных импульсов произвольной длительности и скважности.

Вариантов построения выходных каскадов усилителей мощности существует достаточно много. Выходные каскады бывают трансформаторными и бестрансформаторными. Применение согласующего трансформатора позволяет получить высокий КПД и малые нелинейные искажения. Трансформаторные двухтактные выходные каскады чаще всего используются в

режиме класса АВ, при котором КПД превышает 50%, бестрансформаторные выходные каскады характеризуются более широким диапазоном частот, меньшими размерами и массой. На рис. 3 приведены принципиальные схемы часто используемых в УНЧ усилителей мощности.

Схема однотактного усилительного каскада (усилителя напряжения) представлена на рис. 3а. Положение рабочей точки задается резисторным делителем в цепи базы транзистора, такой усилитель работает режиме класса А. На рис. 3б представлена схема трансформаторного двухтактного выходного каскада, резисторный делитель обеспечивает необходимое смещение для работы в режиме АВ, согласующие трансформаторы обеспечивают оптимальное согласование входа усилителя с предварительным усилителем и выхода усилителя с нагрузкой. В данной схеме применены транзисторы одного типа (n–p–n).

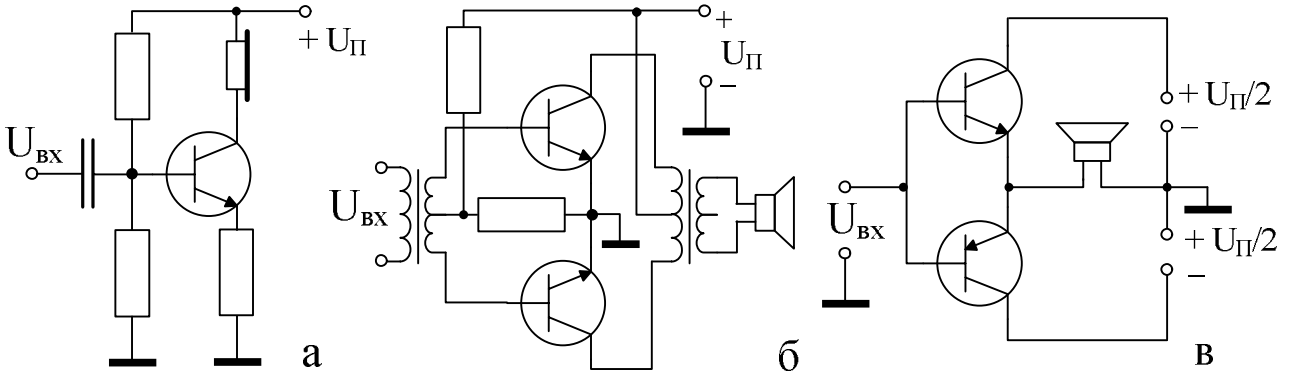


Рис. 3
Выходные каскады усилителей мощности

Наиболее широкое распространение в выходных усилителях получили бестрансформаторные каскады (рис. 3в) на транзисторах разного типа проводимости n–p–n и p–n–p, но со сходными характеристиками. Если питание такого усилителя осуществляется от однополярного источника, то неизбежно прохождение через нагрузку постоянной составляющей выходного тока, в этом случае нагрузку включают через разделительный конденсатор. Возможно использование в выходном каскаде транзисторов одного вида проводимости, но тогда предварительный усилитель должен содержать фазоинверсный каскад с двумя выходами – прямым и инверсным.

1.3. Обратная связь в усилителях

Под обратной связью (ОС) обычно понимают возвращение части энергии сигнала с выхода активного элемента (усилителя) на его вход или предшествующие цепи. Применение обратной связи может существенно изменить основные показатели усилителей сигналов.

Обратная связь может быть *внутренней*, связанной с физической природой усилительного прибора, *паразитной*, создаваемой за счет паразитных связей (ёмкостных или индуктивных) между цепями, и *внешней,* создаваемой преднамеренно. Обратная связь, охватывающая только один усилительный каскад, называется *местной***,** а два и более каскада – *общей.*

Внутренними и паразитными обратными связями нельзя управлять, но они нередко изменяют свойства усилителя в нежелательном направлении, например, приводят к самовозбуждению, поэтому предусматриваются специальные меры по их устранению (или ослаблению). Внешняя обратная связь легко управляема и её вводят для улучшения показателей усилителя: снижения искажений всех видов, уменьшения собственных помех, изменения входного и выходного сопротивлений и др.

Усилитель (усилительный каскад) и цепь ОС образуют замкнутое кольцо – *петлю обратной связи*. Если свойства цепи обратной связи не зависят от частоты, ОС называется *частотнонезависимой*, в противном случае – *частотнозависимой*. Существуют различные способы подключения цепи обратной связи к выходу и входу усилителя. Если цепь обратной связи присоединить к выходу схемы параллельно нагрузке, то сигнал обратной связи будет пропорционален напряжению на нагрузке; такую обратную связь называют обратной связью по напряжению. Отношение напряжения связи к выходному напряжению усилителя называется коэффициентом передачи цепи обратной связи или коэффициентом обратной связи χ. Если цепь обратной связи присоединить к выходу устройства последовательно с нагрузкой, то сигнал обратной связи будет пропорционален току в нагрузке, и обратную связь называют обратной связью по току.

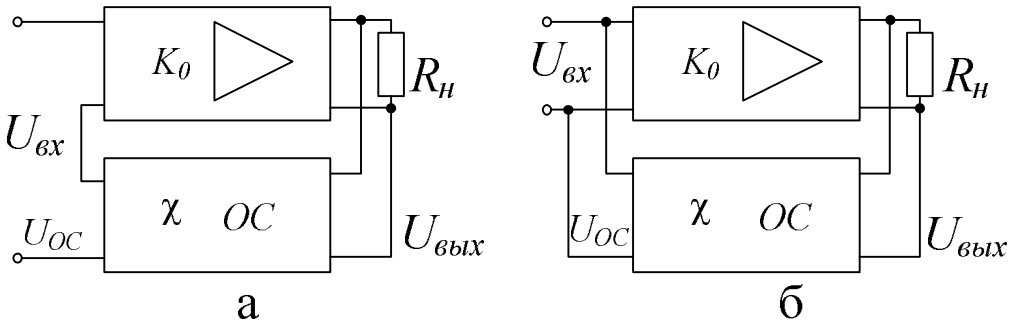


Рис. 4
Способы подключения обратной связи к входу усилителя

К входу усилительного устройства цепь обратной связи также может подключаться двумя способами: последовательно с источником сигнала (рис. 4а) и параллельно ему (рис. 4б). В этом случае обратную связь называют соответственно последовательной и параллельной.

Для того чтобы определить, какой является связь - по току или по напряжению, необходимо учитывать, что ОС по току исчезает при обрыве нагрузки, а ОС по напряжению – при коротком замыкании. Чтобы определить, является ли ОС последовательной или параллельной, необходимо учесть, что последовательная ОС исчезает при обрыве источника сигнала, параллельная ОС исчезает при коротком замыкании источника сигнала.

Из теории цепей с обратной связью известно выражение для результирующего коэффициента усиления напряжения

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{K_0}{1 - \chi K_0}.$$

Обратную связь называют положительной (ПОС, $\chi > 0$), если напряжение связи находится в фазе с напряжением сигнала, подводимого к входу усилителя. Если же напряжение обратной связи находится в противофазе с входным ($\chi < 0$), обратную связь называют отрицательной (ООС). При сдвиге фаз между напряжением обратной связи и входным напряжением, отличающимся как от 0, так и от 180°, обратную связь называют комплексной.

Для количественной оценки ОС используется ряд показателей – петлевое усиление, глубина ОС, фаза петли ОС.

Петлевое усиление – усиление вдоль разомкнутой петли ОС $|K| = |K_0 \cdot \chi|$. *Глубина ОС* показывает, во сколько раз изменяется полное усиление при введении ОС. *Фаза петли ОС* – сумма фазовых сдвигов, вносимых усилителем (или усилительным каскадом) и цепью ОС. Величина фазы петли ОС определяет характер ОС. Глубина ООС связана с петлевым усилением соотношением: $A = 1 + K \cdot \chi$.

В УНЧ в основном применяют отрицательную обратную связь по напряжению. При последовательной ООС по напряжению напряжение сигнала снимается с нагрузки $R_н$ и через цепь обратной связи с коэффициентом передачи $|\chi| < 1$ подается во входную цепь, где вычитается напряжение обратной связи $U_{ОС}$ из входного напряжения $U_{вх}$. При параллельной ООС из входного тока вычитается ток обратной связи.

ООС приводит к уменьшению полного коэффициента усиления пропорционального глубине ОС. При достаточно глубокой ООС полный коэффициент усиления практически определяется только цепью ОС (обратно пропорционален χ). В связи с этим за счет ООС повышается стабильность коэффициента усиления: относительное изменение коэффициента усиления под влиянием соответствующего дестабилизирующего фактора снижается пропорционально глубине ООС. При увеличении глубины ООС пропорционально уменьшаются также нелинейные искажения и уровень фона и собственных шумов усилителя. При введении последовательной ООС по напряжению уменьшается коэффициент гармоник при условии, что ОС является отрицательной как для первой, так для высших гармоник сигнала. Однако введением ООС нельзя сделать искажения меньшими, чем они были на входе усилителя.

ОС влияет на входное и выходное сопротивления усилителя, при этом последовательная ООС увеличивает сопротивление (входное или выходное), а параллельная — уменьшает. Степень влияния ООС на сопротивление (аналогично усилению) определяется глубиной ОС.

При введении частотнонезависимой ООС по напряжению расширяется АЧХ усилителя, стабилизируется выходное напряжение, и как следствие, уменьшается неравномерность АЧХ. При помощи частотнозависимой ООС можно придать АЧХ усилителя различную форму.

Устойчивость усилителя с ООС зависит от коэффициента усиления и коэффициента передачи цепи обратной связи, т.е. от глубины ООС. При глубокой ООС фазовые сдвиги на низших и высших рабочих частотах обуславливают появление ПОС, которая вызывает неустойчивость работы усилителя, а иногда и самовозбуждение. Из-за этого в усилителях с глубокой ООС необходимо расширять диапазон частот с линейной ФЧХ.

1.3.1. Обратная связь по постоянному току

ООС по постоянному току используется в основном для стабилизации режимов работы транзисторов. Для этого применяется как местная, так и общая ООС.

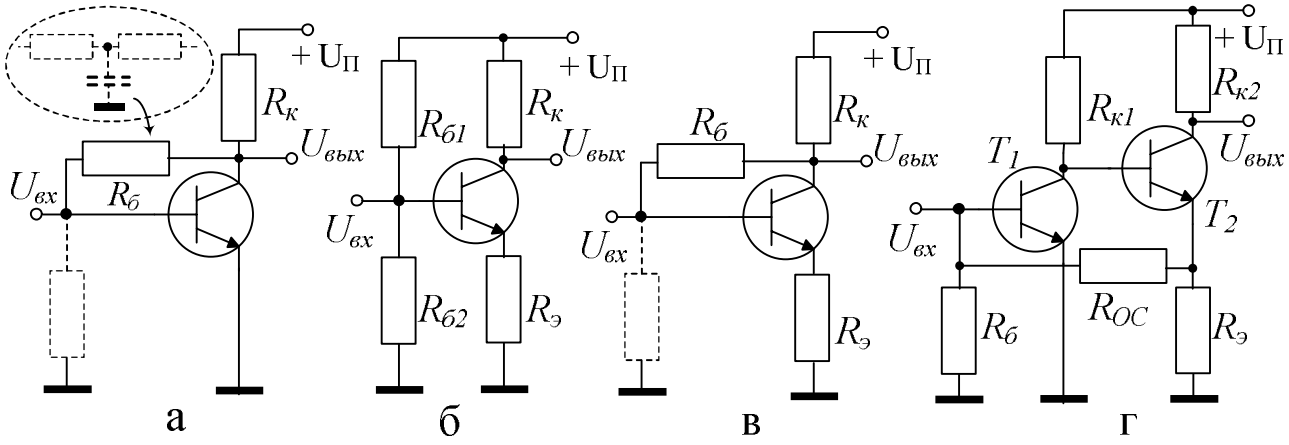


Рис. 5
Схемотехническая реализация ООС по постоянному току

Местная ООС бывает трех типов: параллельная (рис. 5а), последовательная (рис. 5б) и комбинированная (рис. 5в).

В схеме ООС параллельного типа, называемой также *схемой коллекторной стабилизации* (рис. 5а), обратная связь поступает с коллектора транзистора на его базу через сопротивление $R_б$. При возрастании тока коллектора (под влиянием дестабилизирующих факторов) увеличивается падение напряжения на сопротивлении коллекторной нагрузки R_k. Это приводит к уменьшению тока базы, а соответственно и тока коллектора. Эффективность стабилизации, определяемая соотношением сопротивлений R_k и $R_б$, обычно мала. В данной схеме ООС действует как по постоянному, так и по переменному току. Если необходимо ослабить действие ООС на частотах сигнала, резистор $R_б$ можно заменить на RC – цепочку, как показано в верхней части рисунка пунктиром.

В схеме ООС последовательного типа, называемой также *схемой эмиттерной стабилизации* (рис. 5б), сопротивление ОС $R_э$ включено в цепь эмиттера. За счет делителя $R_{б1}$ и $R_{б2}$ напряжение на базе транзистора поддерживается примерно постоянным. При возрастании тока коллектора (под влиянием дестабилизирующего фактора) увеличивается ток эмиттера и возрастает падение напряжения на сопротивлении $R_э$, в результате чего уменьшается напряжение на переходе база–эмиттер транзистора, что приводит к уменьшению тока коллектора.

Общая ООС по постоянному току может быть реализована только при непосредственной связи каскадов. Один из видов такой ООС для двух каскадов показан на рис. 5г. Напряжение смещения на базу транзистора T_1 подается от эмиттерного сопротивления $R_э$ через сопротивление обратной связи $R_{ОС}$. Если под влиянием дестабилизирующего фактора возрастает ток базы второго транзистора T_2, то увеличивается падение напряжения на сопротивлении $R_э$ и, соответственно, протекающий через него ток, что приводит к увеличению тока коллектора первого транзистора. В результате снижается напряжение на коллекторе T_1 и уменьшается ток коллектора T_2.

1.3.2. Обратная связь по переменному току

ООС по переменному току широко используется в УНЧ для улучшения качественных показателей как всего усилителя, так и отдельных его каскадов. Для этого применяется как местная, так и общая ООС. В УНЧ используются преимущественно два вида общей ООС по переменному току: последовательная ООС по напряжению и параллельная ООС по току. Местная ООС по переменному току также бывает двух основных типов: параллельная и последовательная.

Параллельная ООС осуществляется с помощью сопротивления $R_б$, включенного между коллектором и базой транзистора (рис. 5а, данная схема обеспечивает отрицательную обратную связь как по постоянному, так и по переменному току). Параллельная ООС по переменному току используется преимущественно для частотной коррекции – при необходимости снизить усиление в области верхних частот, при этом вместо резистора $R_б$ включают конденсатор $C_б$ (рис. 6а): глубина ООС с ростом частоты будет возрастать, следовательно, усиление верхних частот сигнала будет падать.

Последовательная ООС по переменному току, также как и по постоянному току, осуществляется с помощью сопротивления $R_э$ включенного в цепь эмиттера транзистора (рис. 5б). В данной схеме можно разделить влияние ООС по постоянному току и ООС по переменному току, но в цепь ООС обязательно должно быть включено сопротивление $R_э$, необходимое для прохождения постоянного тока эмиттера. Для разделения влияния этих ООС используют блокировочные конденсаторы (рис. 6б,в). За счет емкости $C_э$ последовательная ООС становится частотнозависимой – с ростом частоты

входного сигнала уменьшается импеданс блокировочного конденсатора $C_э$ и глубина ООС по переменному току уменьшается.

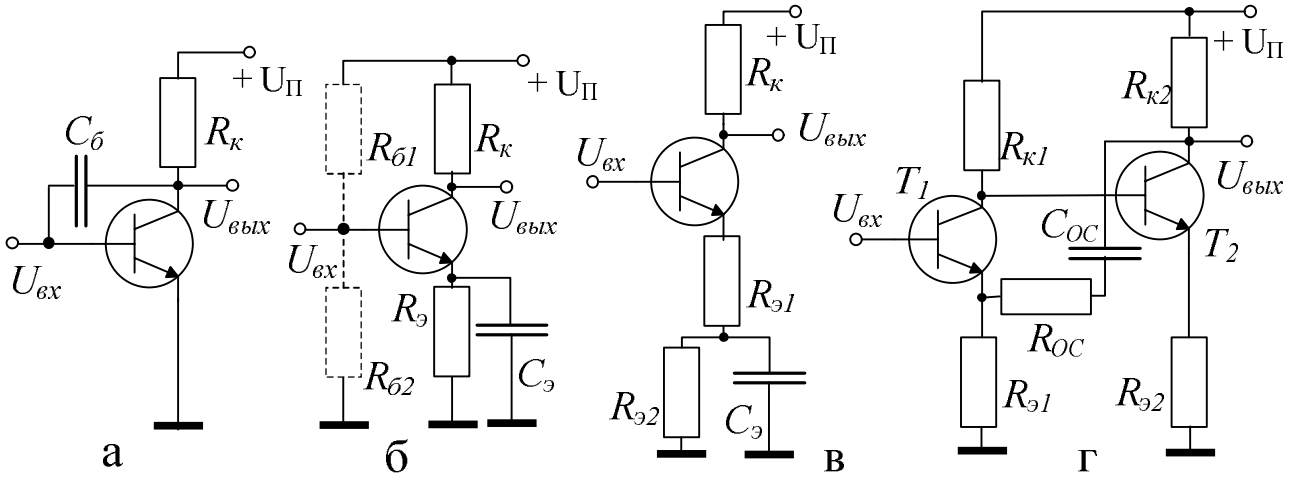


Рис. 6
Примеры реализации обратной связи по переменному току

Пример реализации общей ООС по переменному току для двухкаскадного усилителя приведен на рис. 6г. Элементами цепи ООС, связывающей коллектор транзистора T_2 с эмиттером T_1, являются резисторы $R_{ОС}$ и $R_{Э1}$. Для устранения возникающей при таком включении ООС по постоянному току последовательно с резистором $R_{ОС}$ включается конденсатор $C_{ОС}$. Обычно ёмкость этого конденсатора выбирается большой, такой, чтобы даже для наиболее низкой частоты спектрального диапазона усиливаемого сигнала импеданс конденсатора был достаточно малым.

ООС по переменному току широко используется в каскадах как предварительных, так и мощных УНЧ для повышения входного сопротивления, стабильности коэффициента усиления и для коррекции АЧХ.

В УНЧ, охваченных ОС, предусматриваются специальные меры по повышению их устойчивости. Для этого ограничивается допустимая глубина ОС, а также применяется частотная коррекция – ограничивается усиление верхних частот вне рабочего диапазона. Для создания таких корректирующих цепей используется, в частности, частотнозависимая параллельная ОС (местная и общая). Для исключения паразитных ОС применяются рациональный монтаж (исключающий возникновение паразитных электрических или магнитных связей), экранировка и развязка каскадов усиления по цепям питания.

Использование положительной обратной связи в УНЧ позволяет повысить коэффициент усиления или получить отрицательное выходное сопротивление усилителя, что приводит к улучшению работы акустических систем. Одновременно с ПОС необходимо обязательно применять ООС, иначе работа усилителя будет неустойчивой.

1.4. Параметры транзисторного УНЧ

Каскады усиления напряжения звуковой частоты чаще всего выполняются на транзисторах, включённых по схеме с ОЭ, так как при этом получается наибольшее усиление сигнала. Рабочую точку усилительного каскада выбирают в каждом конкретном случае в зависимости от параметров, которыми должен обладать усилитель. Основными требованиями, предъявляемыми к каскаду, являются:

- максимальное усиление по напряжению;
- минимальные частотные и нелинейные искажения;
- высокая экономичность;
- температурная стабильность.

Одновременно выполнить все эти требования невозможно. Так, например, при большом усилении снижается устойчивость работы усилителя, который легко возбуждается, превращаясь в генератор, и нарушается его нормальное функционирование. Увеличение температурной стабильности обязательно сопровождается снижением усиления и КПД.

Основным требованием, наиболее часто предъявляемым к предварительным усилителям напряжения, является требование минимальных нелинейных и частотных искажений усиливаемого сигнала. В качестве предварительных усилителей напряжения часто используют каскад со схемой эмиттерной стабилизации (рис. 7а) или дифференциальный усилитель (рис. 7б).

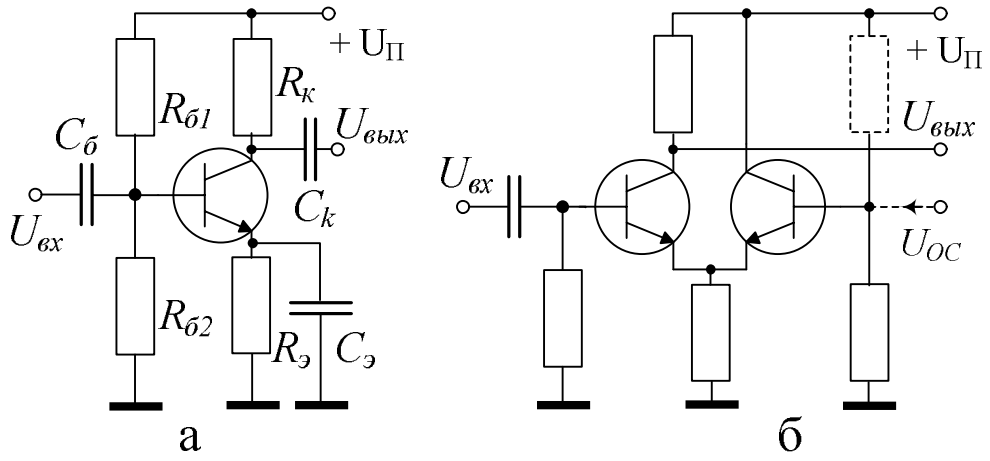


Рис.7
Типичные схемы предварительных усилителей напряжения

Рассмотрим приближённую схему расчета параметров усилителя напряжения (рис. 7а). Рабочая точка такого каскада выбирается в следующей последовательности:

- Для используемого в схеме транзистора по справочным данным определяют максимально допустимые значения коллекторного тока $I_K^{\max}$ и напряжения $U_{КЭ}^{\max}$ и максимальную рассеиваемую мощность $P_{КЭ}^{\max}$.

Например, широко распространенный транзистор КТ315Д имеет следующие параметры:

– максимальный ток коллектора $I_K^{\max} = 100\,мА$;

– максимальное напряжение коллектор - эмиттер $U_{КЭ}^{\max} = 40\,В$;

– максимальная рассеиваемая мощность транзистора $P_{КЭ}^{\max} = 150\,мВт$;

– статический коэффициент усиления в схеме с ОЭ $h_{21Э} \approx 50$.

- на семействе выходных вольт-амперных характеристик (ВАХ) транзистора (рис. 8а) строится линия нагрузки *БВ*, исходя из следующих условий:

$$U_{\text{п}} / R_{\text{к}} < 0.8 \cdot I_K^{\max}, \quad (1)$$

$$U_{\text{п}} < 0.8 \cdot U_{КЭ}^{\max}. \quad (2)$$

Выполнение неравенства (1) необходимо потому, что коллекторный ток насыщенного транзистора должен быть меньше максимального допустимого тока $I_K^{\max}$. Коэффициент 0,8 гарантирует выполнение этого неравенства при разбросе сопротивления резистора R_k и нестабильности питания $U_{\text{п}}$. Выполнение неравенства (2) обеспечивает надёжную работу транзистора в режиме отсечки или при обрыве цепи базовых резисторов, когда напряжение на коллекторе транзистора поднимается почти до $U_{\text{п}}$.

- Р.т. каскада в режиме класса А выбирается в средней части рабочего участка линии нагрузки БВ и характеризуется тремя параметрами: токами покоя $I_Б^0$, $I_{\text{К}}^0$, напряжением $U_{КЭ}^0$. Затем она переносится на входную ВАХ транзистора, снятую при $U_{КЭ} = U_{КЭ}^0$, и по найденному значению $I_Б^0$ определяется напряжение $U_{БЭ}^0$ (рис. 8б). Изменение положения р.т. обеспечивается изменением сопротивления резистора $R_{б1}$.

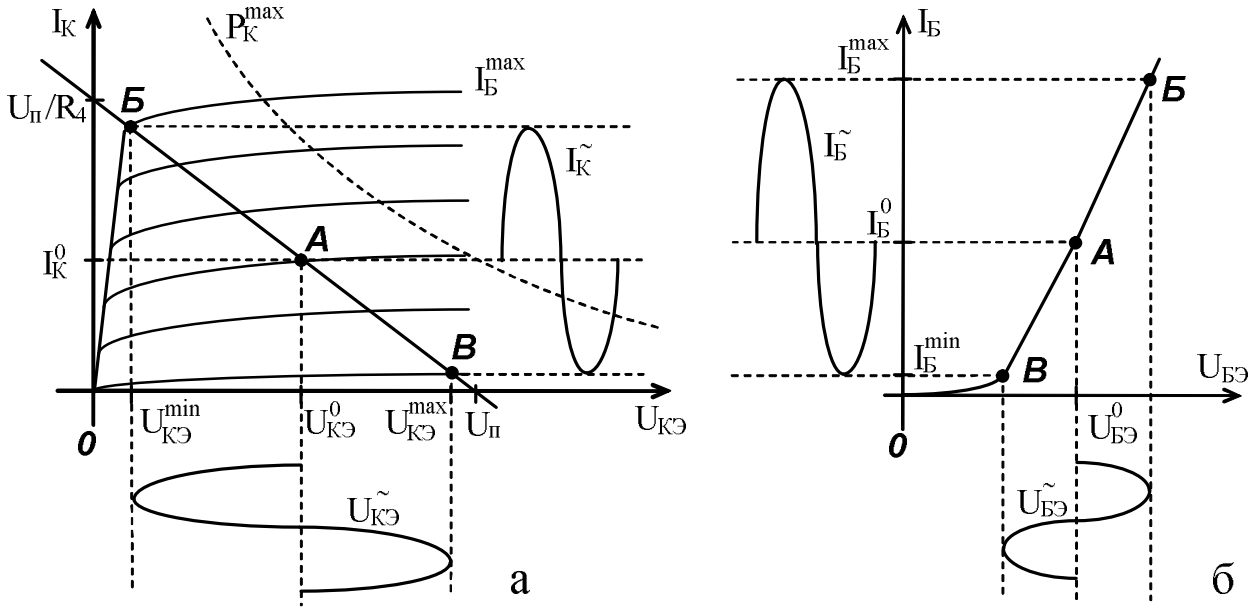


Рис. 8
К расчету параметров усилителя напряжения

В инженерных расчетах параметры $I_Б^0$, $I_К^0$, $U_{КЭ}^0$, а через них значения резисторов можно оценить по приближенным формулам, если принять следующие допущения:

– амплитуда входного сигнала настолько мала, что рабочая точка всегда находится на линейном участке динамической характеристики транзистора;

– ёмкость конденсатора $C_э$ настолько велика, что его сопротивлением переменному току на наименьшей частоте усиливаемого сигнала можно пренебречь (т.е. считать, что переменное напряжение на эмиттере транзистора равно нулю);

– линейный участок динамической характеристики расположен симметрично относительно нуля и напряжения питания, что обеспечивает возможность приблизительно одинакового изменения коллекторного тока в сторону уменьшения и сторону увеличения.

Таким образом, можно выбрать начальное напряжение на коллекторе транзистора в отсутствии сигнала при работе усилителя в режиме класса А равным половине напряжения источника питания $U_{КЭ}^0 = 0.5 \cdot U_п$.

Как уже отмечалось, начальный ток коллектора I_K^0 и начальный ток базы $I_Б^0$ выбирают по ВАХ транзистора, однако можно поступить иначе: выбрать начальный ток коллектора, который обеспечивает рассеиваемую транзистором мощность заведомо меньшую максимальной $P_{КЭ}^{max}$. Для большинства маломощных транзисторов приемлемым можно считать начальный ток коллектора 0.1…1 *мА*.

Тогда сопротивление коллекторного резистора определяется:

$$R_K = \frac{U_п - U_K^0}{I_K^0} = \frac{0.5 \cdot U_п}{I_K^0}.$$

Сопротивление в цепи эмиттера $R_Э$ обычно выбирается так, чтобы выполнялось соотношение $U_Э^0 \approx 0.1 \cdot U_п$, т.е. ($I_K \approx I_Э$)

$$R_Э = \frac{0.1 \cdot U_п}{I_K^0}.$$

Величина сопротивления $R_{б2}$ определяется как

$$R_{б2} = \frac{U_Э^0 + U_{БЭ}^0}{I_d},$$

где $U_{БЭ}^0$ – напряжение базы, которое определяется значением $I_Б^0$ по ВАХ транзистора, I_d – ток делителя, можно выбрать $I_d \approx 10 \cdot I_Б^0$.

Величина сопротивления $R_{б1}$ определяется как

$$R_{б1} = \frac{U_п - (U_Э^0 + U_{БЭ}^0)}{I_d + I_Б^0}.$$

Если схема усилителя допускает подстройку сопротивления хотя бы одного резистора (обычно резистор $R_{б1}$ разбивается на два – постоянный и подстроечный), для инженерных расчетов бывает достаточно точности более простых выражений, определяемых следующими условиями без привлечения ВАХ транзистора.

Поскольку для нормальной работы транзистора (в режиме класса А) эмиттерный переход должен поддерживаться в открытом состоянии, т.е. напряжение на базе на 0.6 B (для кремниевых транзисторов) должно быть выше напряжения на эмиттере: $U_Б = U_Э + 0.6B$. Кроме того, для обеспечения стабильности постоянного смещения на базе транзистора ток делителя I_d должен значительно превышать ток базы (примерно в 5…10 раз).

Базовый ток можно оценить как $I_Б^0 \approx I_K^0 / h_{21Э}$ (где $h_{21Э}$ – коэффициент усиления транзистора в схеме с ОЭ, приводится в справочной литературе). Таким образом, ток делителя можно выбрать $I_d \approx 10 \cdot I_Б^0 = \dfrac{10 \cdot I_K^0}{h_{21Э}}$ и, если пренебречь базовым током, значения сопротивлений делителя $R_{б1}$ и $R_{б2}$ определяются из соотношений:

$$I_d = \frac{U_п}{R_{б1} + R_{б2}}; \quad U_Б = I_d \cdot R_{б2}.$$

Выбор значений ёмкостей конденсаторов зависит от требований, предъявляемых к частотным характеристикам усилителя, в частности к нижней граничной частоте f_n усиливаемого сигнала:

$$C_Э >> \frac{1}{2\pi f_n R_Э}; \quad C_б > \frac{1}{2\pi f_n R_{вх}}; \quad C_к > \frac{1}{2\pi f_n (R_{вых} + R_н)},$$

где $R_{вх}$ – входное сопротивление усилителя, $R_{вых}$ – выходное сопротивление, $R_н$ – сопротивление нагрузки. Обычные значения ёмкостей конденсаторов $C_Э$ – 10…100 мкФ, $C_б$ и $C_к$ – 0.05…50 мкФ.

Входное и выходное сопротивления усилителя (переменному току) можно оценить следующим образом. Напряжение входного сигнала $U_{вх}$ поступает через разделительный конденсатор $C_б$ на базу транзистора и вызывает протекание тока через резисторы $R_{б1}$, $R_{б2}$ базового делителя и в цепи базы транзистора и изменяет ток коллектора на ΔI_K и напряжение на коллекторе на $\Delta U_{КЭ} = \Delta I_K \cdot R_k$. Входным сопротивлением каскада являются параллельно включенные резисторы базового делителя ($R_{б1} \| R_{б2}$) и входное сопротивление транзистора $h_{11Э}$ ($h_{11Э} \approx h_{21Э} \cdot (25мВ / I_K\,[мА])$~1 *кОм*).

$$R_{вх} = R_{б1} \parallel R_{б2} \parallel h_{11Э}.$$

Обычно сопротивление резисторов $R_{б1}$ и $R_{б2}$ значительно больше входного сопротивления $h_{11Э}$ транзистора, поэтому выражение для $R_{вх}$ можно упростить: $R_{вх} = h_{11Э}$.

Следует отметить, что входное сопротивление переменному току отличается от входного сопротивления постоянному току, т.к. мы использовали допущение, что из-за наличия конденсатора $C_Э$ отрицательная обратная связь по переменному току отсутствует (переменное напряжение на эмиттере транзистора равно нулю). Наличие ООС по постоянному току приводит к тому, что входное сопротивление постоянному току будет определяться величиной ($R_{б1} \| R_{б2}$), поскольку входное сопротивление транзистора в данном случае определяется как $h_{21Э} \cdot R_Э$ и обычно имеет большую величину. В любом случае, лучше выбирать $R_{б1} \| R_{б2} << h_{21Э} \cdot R_Э$.

Для переменного тока можно считать, что входной ток практически весь поступает в базу транзистора

$$I_{вх} = \frac{U_{вх}}{R_{вх}} \approx I_Б,$$

следовательно, переменная составляющая тока коллектора

$$I_K^{\sim} = h_{21Э} \cdot I_Б = \frac{h_{21Э} \cdot U_{вх}}{R_{вх}},$$

а напряжение на коллекторе, представляющее собой выходное напряжение,

$$U_{вых}^{\sim} = U_K^{\sim} = I_K^{\sim} \cdot R_k = \frac{h_{21Э} \cdot U_{вх}}{R_{вх}} \cdot R_k.$$

Выходное сопротивление каскада определяется параллельным соединением резистора R_k и выходного сопротивления транзистора $1/h_{22Э}$.

$$R_{вых} = R_k \| (1/h_{22Э}),$$

где $h_{22Э}$ – выходная проводимость транзистора в схеме с ОЭ (~50 *См*).

Коэффициент усиления по напряжению определяется как

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{h_{21Э} \cdot R_k}{R_{вх}}.$$

Этот параметр усилителя зависит от частоты и амплитуды усиливаемого сигнала. Это объясняется тем, что с понижением частоты падение напряжения на конденсаторах $C_б$ и C_k под действием входного и выходного токов каскада увеличивается и представляет собой потери напряжения сигнала, а конденсатор $C_Э$ все меньше шунтирует резистор $R_Э$, что увеличивает полное сопротивление эмиттерной цепи транзистора и глубину отрицательной обратной связи по переменному току, следовательно, уменьшает коэффициент K_U.

При повышении частоты сигнала необходимо учитывать влияние входной и выходной (паразитных) ёмкостей транзистора, шунтирующих

входное и выходное сопротивления каскада, что проявляется уменьшением полезного тока, поступающего на его вход и в нагрузку.

1.5. Переходные искажения в двухтактных каскадах усилителя мощности

В двухтактных каскадах усилителей мощности используют все три схемы включения транзисторов: с ОБ, ОЭ и ОК.

В качестве выходного каскада УНЧ рассмотрим широко распространённую классическую схему двухтактного бестрансформаторного каскада усиления мощности на транзисторах разного типа проводимости (рис. 4в). Для управления транзисторами разных типов проводимости требуется один сигнал, т.к. при увеличении входного напряжения ток базы одного из транзисторов увеличивается, а другого уменьшается и наоборот. Как уже отмечалось, ток через каждый транзистор двухтактной схемы протекает лишь в течение половины периода, положительные составляющие сигнала усиливаются одним активным элементом, отрицательные – другим, а в нагрузке усиленные компоненты сигнала складываются таким образом, что восстанавливается его первоначальная форма. Однако данному усилителю мощности, работающему в режиме класса В, свойственны характерные искажения сигнала. Поскольку по отношению к нагрузке каждый транзистор включен по схеме эмиттерного повторителя (схема с ОК), то напряжение на выходе (эмиттере транзистора) будет отличаться от напряжение на базе на величину прямого падения напряжения на открытом p–n (база–эмиттер) переходе $U_Э = U_Б - 0.6B$, а при величине напряжения на базе меньшем $0.6\,B$ транзистор перейдет в режим отсечки. При сложении токов каждого из транзисторов в нагрузке будут наблюдаться характерные переходные искажения сигнала (рис. 9а), часто называемые как искажения типа «ступенька».

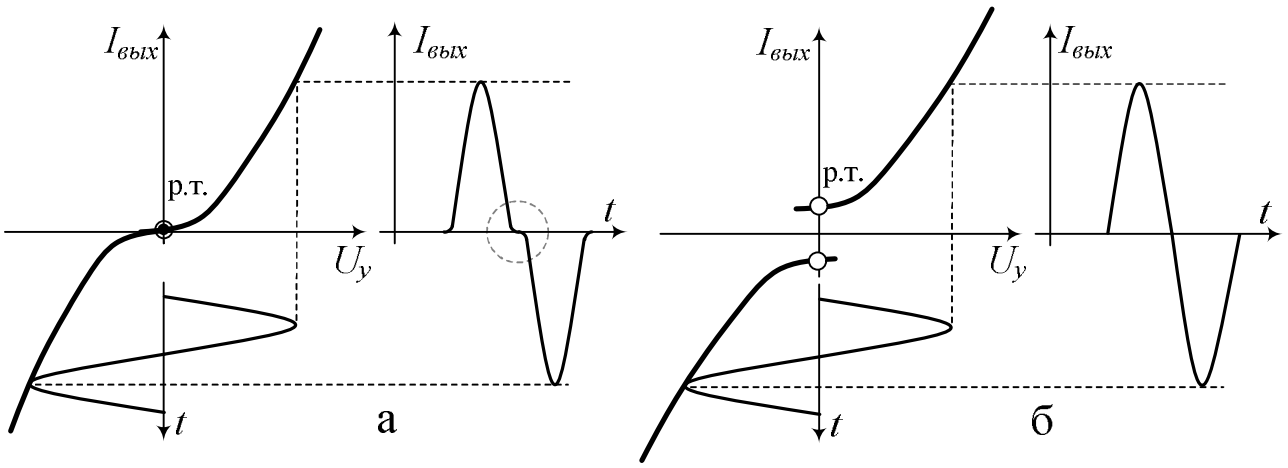


Рис. 9
Переходные искажения сигнала типа «ступенька»

Устранить подобные искажения формы сигнала можно либо применением глубокой ООС, либо немного сместив транзисторы двухтактного каскада в состояние проводимости, т.е. перевести усилитель в режим класса АВ (рис. 9б).

Типичные примеры реализации смещения транзисторов двухтактного каскада в состояние проводимости приведены на рис. 10.

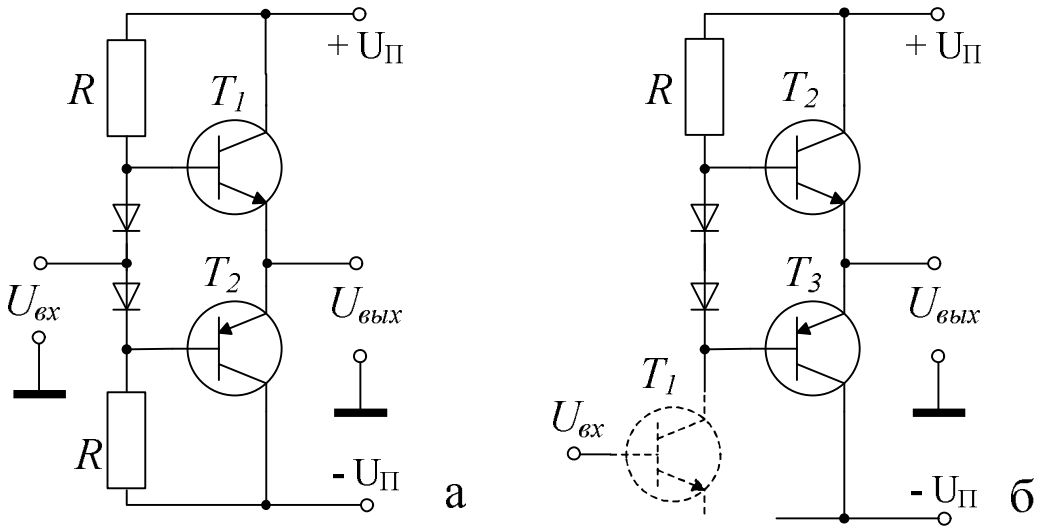


Рис. 10
Примеры реализации смещения транзисторов двухтактного каскада УМ

Резисторы смещения (рис. 10а) переводят диоды в состояние проводимости, благодаря этому напряжение на базе транзистора T_1 превышает входное напряжение на величину падения напряжения на диоде, а напряжение на базе транзистора T_2 на величину падения напряжения на диоде меньше, чем входное напряжение. Благодаря такому смещению при переходе входного сигнала через нуль один из транзисторов всегда открыт и, тем самым в значительной степени устраняются переходные искажения. Сопротивление резисторов R выбирается так, чтобы обеспечивался необходимый базовый ток выходных транзисторов при пиковых значениях входного сигнала.

Схема, приведенная на рис. 10б, является более распространённой благодаря повышенной температурной стабильности. В данной схеме входной сигнал снимается с коллектора транзистора T_1 предшествующего каскада. Резистор R выполняет двойную функцию: он является коллекторным резистором транзистора T_1 и формирует ток для смещения диодов в состояние проводимости в основной двухтактной схеме. Для улучшения температурной стабильности в цепи эмиттеров транзисторов T_2 и T_3 иногда включают дополнительные резисторы сопротивлением менее 1 *Ом*, небольшое падение напряжения (доли вольта) на которых обеспечивает слабую ООС. Для хорошей компенсации переходных искажений падение напряжения между базами выходных транзисторов должно быть немного больше удвоенного падения

напряжения на диоде, поэтому часто в схему добавляют третий диод или регулируемый резистор с небольшим сопротивлением.

Если выходной каскад по схеме рис. 10б используется при однополярном питании, напряжение покоя (напряжение в точке соединения эмиттеров транзисторов T_2 и T_3 при отсутствии входного сигнала) необходимо установить равным половине напряжения источника питания, чего добиваются настройкой параметров каскада предварительного усиления на транзисторе T_1, а нагрузку подключают через разделительный конденсатор достаточно большой (обычно сотни *мкФ*) ёмкости.

1.6. Контрольные вопросы

1. Принцип действия электронного усилителя.
2. Назначение элементов, входящих в функциональную схему усилителя, основные параметры и характеристики усилителя.
3. Как обратная связь влияет на параметры и характеристики усилителя?
4. АЧХ и ФЧХ усилителя низкой частоты, полоса пропускания усилителя.
5. В чём основное отличие при организации ООС схем на рис. 6б и рис. 6в?
6. Что происходит с рабочей точкой при увеличении сопротивления резистора $R_{б1}$ или $R_{б2}$ в усилителе напряжения (рис. 7а)?
7. Какую форму будет иметь выходной сигнал при отключении резистора $R_{б1}$ ($R_{б2}$), если на вход подан синусоидальный сигнал?
8. Какие элементы схемы влияют на АЧХ усилителя в области нижних (верхних) частот сигнала?
9. Как проявляют себя нелинейные искажения при усилении синусоидальных сигналов в усилителях напряжения и усилителях мощности?
10. Как изменится усиление каскада, если исключить из него конденсатор $C_Э$ (рис. 7а)?
11. От каких элементов схемы и как зависят параметры усилителя? Объясните функциональное назначение каждого элемента схемы (рис. 7а).
12. Как с помощью ООС можно ограничить АЧХ усилителя в области высоких частот?
13. Особенности режимов работы усилителей мощности, их основные достоинства и недостатки.
14. Как осуществляется температурная стабилизация в выходном каскаде двухтактного усилителя мощности?
15. Рассчитайте номиналы всех элементов схемы усилителя (рис.7а), если используется транзистор КТ315Д, заданы ток покоя коллектора 1 *мА* и напряжение питания $10\,B$.
16. Оцените значение сопротивления R (рис. 10а) 10–ваттного усилителя мощности, если выбрано напряжение питания $\pm 20\,B$ и сопротивление нагрузки 8 *Ом*.

2. Описание лабораторной работы

В данном разделе приводится описание лабораторной работы, направленной на изучение характеристик и параметров усилительных каскадов низкой частоты на биполярных транзисторах и влияния обратных связей на основные характеристики усилителя.

2.1. Лабораторная работа «Изучение усилителя звуковой частоты»

Цель работы:

1. Изучение принципа действия усилителя звуковой частоты (УЗЧ) на биполярных транзисторах, включающего в себя каскад предварительного усиления по схеме с общим эмиттером (ОЭ) и двухтактный усилитель мощности на транзисторах разного типа проводимости;
2. определение основных параметров усилителя и практическая настройка режимов работы каскадов УНЧ.

Аппаратура. Лабораторный макет усилителя низкой (звуковой) частоты, источник питания 9*В*, 2-х канальный осциллограф, генератор сигналов.

Содержание работы. Изучение влияния параметров элементов электрической схемы на параметры усилителя.

Порядок выполнения.

1. Ознакомиться с рабочим местом, устройством и инструкцией по эксплуатации генератора сигналов и 2-х канального осциллографа.
2. Ознакомиться с принципиальной схемой исследований. Определить номиналы элементов электрической схемы макета лабораторной установки, назначение переключателей и клемм.
3. Установить переключатель динамической головки K_4 в положение «выкл.» (на резистор).
4. Первый канал осциллографа подключить к генератору сигналов. На осциллографе установить: чувствительность – 2 В/дел; длительность развертки – 50 мкс/дел; синхронизация по первому каналу. Включить питание осциллографа и генератора сигналов. Переключить генератор сигналов в режим синусоидального сигнала, установить амплитуду сигнала не более 0.1 *В*, частоту 1 *кГц* (по осциллографу).
5. Подключить макет к источнику питания.
6. Выполнить задания лабораторной работы.

2.2. Порядок выполнения заданий лабораторной работы

Электрическая схема исследуемого макета усилителя низкой (звуковой) частоты на транзисторах приведена на рис. 11.

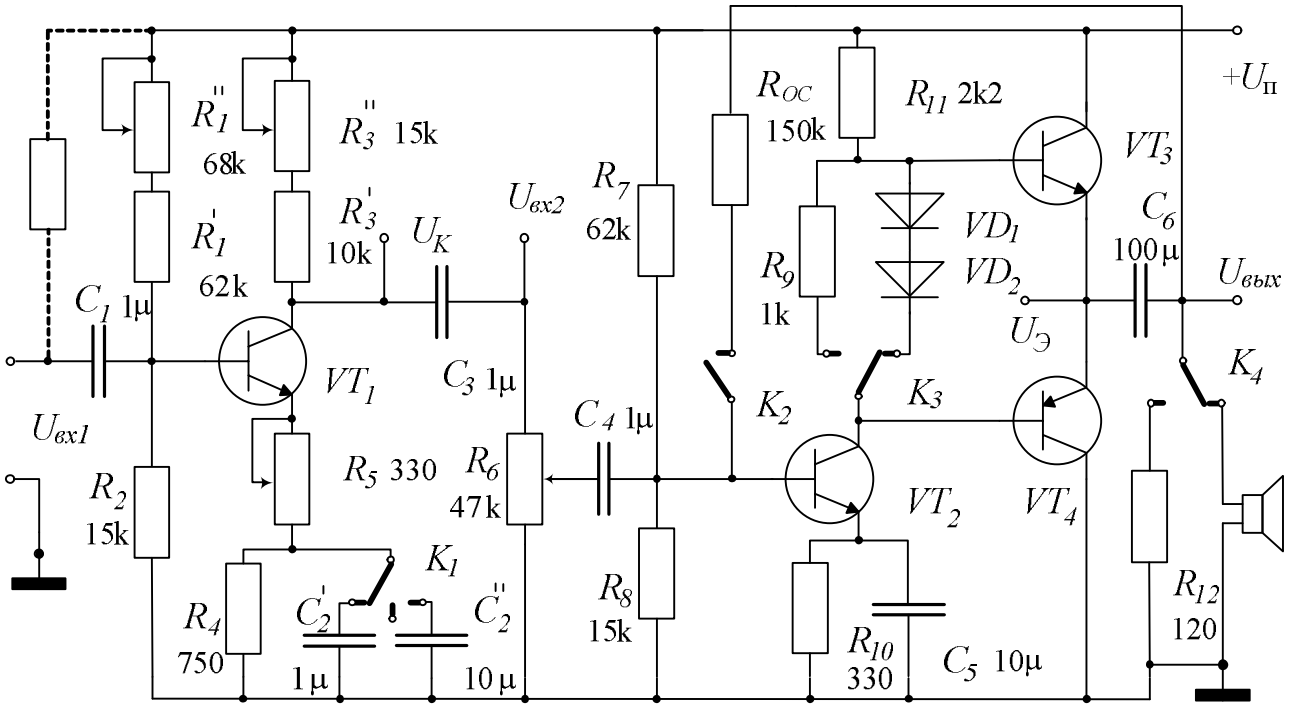


Рис. 11
Электрическая схема макета усилителя низкой частоты

Для формирования напряжения питания усилителя (+6 В) от нестабилизированного источника питания (+9В) используется микросхема 7806 интегрального стабилизатора напряжения, расположенная на обратной стороне макетной платы усилителя.

Подготовить схему к исследованию, для чего:

а) Поставить все переменные резисторы в среднее положение.

б) Переключатель K_1 поставить в среднее положение (конденсаторы отключены).

в) Переключатель K_2 поставить в положение «выкл.» (отключена петля ООС усилителя мощности).

г) Переключатель K_3 поставить в левое положение (на резистор).

д) Подключить второй канал осциллографа к выходу первого каскада усилителя (клемма U_K).

1. *Измерение и расчёт основных параметров усилителя напряжения.*

1.1. Рассчитать параметры рабочей точки усилительного каскада (в частности, напряжение на коллекторе транзистора T_1) и предполагаемый коэффициент усиления каскада.

1.2. В отсутствии сигнала осциллографом измерить напряжение на клемме U_K и сравнить результат с расчётным.

1.3. Подключить генератор сигналов к входу усилителя (клемма $U_{вх1}$). Регулировкой амплитуды сигнала генератора и/или резистором R_1 добиться неискаженной формы выходного сигнала предварительного усилителя напряжения (клемма U_K). Зафиксировать осциллограммы сигналов.

1.4. По осциллографу оценить коэффициент усиления (как отношение амплитуд входного и выходного сигналов) каскада при 3-х различных положениях переключателя K_1. Для измерения коэффициента усиления рекомендуется установить на выходе генератора частоту 1 *кГц* и, регулируя входное напряжение, получить неискаженный синусоидальный выходной сигнал максимально возможной амплитуды. Затем при соответствующем режиме измерить входное и выходное напряжения.

1.5. Выяснить влияние резисторов R_1, R_3 и R_5 на параметры усилителя: изменение положения рабочей точки, коэффициент усиления.

1.6. Исследовать влияние ёмкости конденсатора C_2 на параметры усилителя: изменение положения рабочей точки, коэффициент усиления.

1.7. Установить рабочую точку транзистора в средней части динамической характеристики в следующей последовательности:

а) контролируя по осциллографу форму выходного напряжения, увеличивать входное напряжение генератора до тех пор, пока не появятся нелинейные искажения выходного напряжения;

б) изменяя потенциометром величину R_1, устранить искажения сигнала или сделать их минимальными;

в) плавно увеличивая входной сигнал и изменяя положение рабочей точки потенциометрами R_1 и R_3, добиться симметричности искажений положительной и отрицательной полуволн выходного напряжения;

г) уменьшить входное напряжение до исчезновения искажений.

При последующих измерениях менять значение сопротивления переменных резисторов **не допускается**, так как оно фиксирует работу УЗЧ в режиме линейного усиления.

2. *Измерение основных параметров мощности усилителя.*

2.1. Подключить первый канал осциллографа к входу (клемма $U_{вх2}$), а второй канал – к выходу усилителя мощности (клемма $U_{вых}$). Поставить переменный резистор R_6 (регулятор уровня входного сигнала или в УЗЧ – регулятор громкости) в крайнее правое положение (максимальный уровень входного сигнала).

2.2. Подать с генератора на вход УМ (клемма $U_{вх2}$) синусоидальный сигнал частотой 1 *кГц*. Регулировкой амплитуды сигнала на генераторе добиться максимально неискаженной формы сигнала на выходе усилителя. Аналогично п.1.4 оценить коэффициент усиления УМ.

2.3. Зафиксировать осциллограммы выходного сигнала при различных положениях переключателя K_3. Сделать выводы относительно искажений формы выходного сигнала.

2.4. Исследовать влияние петли ООС на параметры УМ, для чего переключить второй канал осциллографа на клемму $U_Э$ и наблюдать осциллограммы сигналов при различных положениях переключателя K_2.

2.5. Исследовать влияние регулятора уровня входного сигнала R_6 на параметры УМ.

3. *Снятие АЧХ усилителя.*

3.1. Уменьшить амплитуду сигнала генератора. Переключателем K_2 включить ООС, переключатель K_3 поставить в положение – на диоды, регулятор уровня входного сигнала R_6 – в положение максимальной громкости. Подключить генератор сигналов к входу усилителя (клемма $U_{вх1}$). Регулировкой амплитуды генератора добиться максимального неискаженного сигнала на выходе УЗЧ (клемма $U_{вых}$), затем немного уменьшить амплитуду входного сигнала и в дальнейшем оставить его неизменным $U_{вх} = const$.

3.2. Изменяя частоту входного сигнала по осциллографу измерить выходное напряжение усилителя для трех вариантов значений ёмкости конденсатора C_2 в эмиттерной цепи транзистора T_1: 1 - й вариант – 10 *мкФ*; 2 - й вариант – 1 мкФ; 3 - й вариант – K_1 в нейтральном положении (ёмкость отключена). Шаг изменения частоты можно выбирать произвольно, но так, чтобы на каждом характерном участке АЧХ было не менее 5 замеров. При подготовке отчета графики АЧХ представить на одном рисунке (в одних координатных осях), по оси частот использовать логарифмический масштаб.

3.3. По АЧХ определить полосу пропускания УЗЧ по уровню 0.7.

4. *Проверка работы УЗЧ на сигналах с микрофона.*

4.1. Произвести настройку режимов работы каскадов УНЧ для получения неискаженного синусоидального сигнала.

4.2. Отключить генератор и подключить к входу (клемма $U_{вх1}$) микрофон. Установить переключатель K_4 в положение «вкл.» (на динамик).

4.3. Воспроизвести усиленный звуковой сигнал с микрофона (речевой сигнала или музыкальный сигнал, для чего поднести к микрофону наушник от MP3–плейера, сотового телефона или другой звуковоспроизводящей аппаратуры).

2.3. Указания к отчету

Отчет должен содержать:

- титульный лист с названием работы, фамилии студента и даты выполнения работы.
- Перечень оборудования.
- Принципиальные схемы исследуемых устройств с указанием всех номиналов.
- Краткое описание принципа работы и назначения исследуемого устройства.
- Экспериментальные данные, полученные в виде таблиц и параметров, графики экспериментально измеренных зависимостей и осциллограммы.
- Погрешности измерений.
- Расчетные параметры и выводы по результатам исследований и наблюдений.

Литература

1. Кибакин В.М. Основы теории и разработки транзисторных низкочастотных усилителей мощности. – М.: Радио и связь, 1988. – 240 с.
2. Электротехника и основы электроники. / Под ред. О.П. Глудкина, Б.П. Соколова. – М.: Высш. шк., 1993.
3. Джонс М.Х. Электроника – практический курс. – М.: Постмаркет, 1999. – 528 с.
4. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. –М.: Мир, 1986. – 600 с.
5. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1985. – 488 с.
6. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М.: Высш. шк., 1982. – 496 с.
7. Колонтаевский Ю.Ф. Лабораторный практикум по радиоэлектронике. – М.: Высшая школа, 1989. – 206 с.
8. Транзисторы: Справочник. – М.: Радио и связь, 1990.

ТРАНЗИСТОРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Учебно-методический материал для лабораторного практикума

Составитель:
Олег Александрович **Морозов**

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Подписано в печать Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1,9. Уч.-изд. л. 1,8.
Заказ № . Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского
603600, г. Нижний Новгород, ул. Большая Покровская, 37
Лицензия ПД №18-0099 от 14.05.01