

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Учебно-методическое пособие

по выполнению лабораторного практикума по дисциплине
для обучающихся очной формы обучения специальности
11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Севастополь
СевГУ
2025

УДК 621.396.6:621.375(076.5)
ББК 32.846я73
У748

Р е ц е н з е н т :

И. Л. Афонин – д-р техн. наук, профессор

Ответственный за выпуск:

И. Л. Афонин – д-р техн. наук, профессор, заведующий
кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

Составитель: А. В. Мельников

У748 Усилительные устройства радиоэлектронных систем : учебно-методическое пособие по выполнению лабораторного практикума по дисциплине для обучающихся очной формы обучения специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» / Севастопольский государственный университет, Институт радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем, кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации» ; сост. А. В. Мельников. – Севастополь : СевГУ, 2025. – 59 с. – Текст : электронный.

Цель учебно-методического пособия – оказать помощь студентам в подготовке и выполнении лабораторного практикума по дисциплине «Усилительные устройства радиоэлектронных систем», а также в получении теоретических знаний по методам построения и методам исследования основных характеристик устройств аналоговой обработки сигналов.

УДК 621.396.6:621.375(076.5)
ББК 32.846я73

Рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации», протокол № 10 от 26 марта 2025 г.

© Мельников А.В., сост., 2025
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Лабораторная работа № 1	
Исследование усилительного каскада на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером	5
2. Лабораторная работа № 2	
Исследование каскада с общим коллектором	24
3. Лабораторная работа № 3	
Исследование усилителя с обратной связью	33
4. Лабораторная работа № 4	
Исследование усилителей на основе ОУ	44
Библиографический список	59

ВВЕДЕНИЕ

Студенты очной форм обучения изучают дисциплину «Усилительные устройства в радиоэлектронных системах» в 4-ом семестре. В данное учебно-методическое пособие включены четыре лабораторные работы, выполняемые в процессе изучения дисциплины.

Методические рекомендации по выполнению каждой лабораторной работы содержат следующие разделы: цель работы, краткие теоретические сведения, описание лабораторной установки, порядок выполнения работы, содержание отчета, контрольные вопросы.

В основу лабораторного практикума положен фронтальный метод проведения работ, суть которого заключается в том, что группа студентов, разбитая на бригады, выполняет одну и ту же лабораторную работу на различных лабораторных макетах. Это позволяет синхронизировать процесс изучения теоретического материала с тематикой лабораторного практикума, а также дает возможность преподавателю по ходу занятия давать пояснения, обсуждать методику эксперимента и результаты со всей группой студентов одновременно. Фронтальный метод позволяет также студентам осуществлять предварительную подготовку к лабораторным занятиям, поскольку их тематика заранее известна.

Бригада состоит, как правило, из 2-3 студентов. В процессе выполнения работы студенты должны вести подробный протокол, в котором излагают весь ход работы, фиксируют результаты экспериментов. После завершения работы преподаватель просматривает полученные данные и отмечает выполнение работы. На основании протокола каждый студент оформляет отчет, который должен иметь титульный лист и содержать следующие разделы: цель работы, принципиальную схему лабораторного макета, экспериментальные данные (таблицы с результатами измерений и др.), результаты обработки экспериментальных данных (графики, расчетные параметры и т.д.), выводы по работе.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ, ВКЛЮЧЕННОМ ПО СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

1.1. Цель работы

Определить основные показатели усилительного каскада и изучить влияние элементов схемы на амплитудно-частотную характеристику каскада усиления напряжения на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером.

1.2. Краткие теоретические сведения

Напряжение на выходе многих источников сигнала (микрофон, звуковоспроизводящая головка магнитофона, детекторное устройство приемника и т.д.) имеют малый уровень. Поэтому слабые сигналы предварительно усиливают с помощью однокаскадного или многокаскадного усилителя напряжения до уровня, достаточного для нормальной работы выходного усилителя мощности. Число каскадов в многокаскадных усилителях зависит от требуемого значения коэффициента усиления по напряжению.

Основным требованием к каскаду усиления является получение высокого коэффициента усиления по напряжению. Поэтому биполярные транзисторы обычно включают по схеме с общим эмиттером, а для уменьшения нелинейных искажений в каскадах предварительного усиления, почти всегда используют режим *A*.

Особенности работы усилительного каскада с общим эмиттером рассмотрим на примере схемы, изображенной на рис. 1.1, получившей наибольшее распространение в каскадах усиления напряжения.

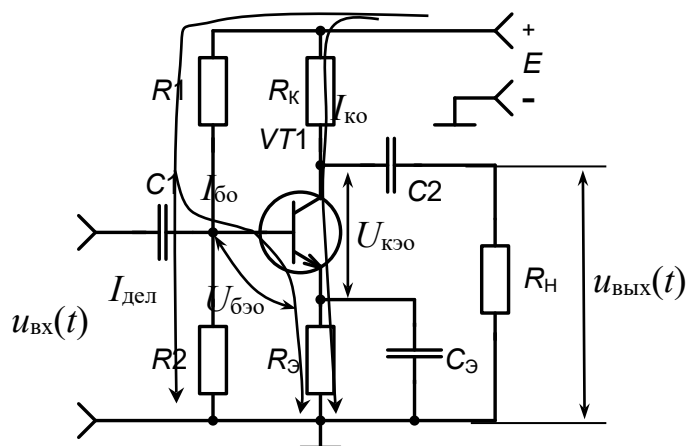


Рис. 1.1 — Схема усилительного каскада на транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером

Название схемы «с общим эмиттером» означает, что вывод эмиттера по переменному току является общим для входной и выходной цепей каскада.

Основными элементами схемы являются источник питания E , управляемый элемент — транзистор $VT1$ и резистор R_k , включенный в цепь коллектора. Эти элементы образуют выходную цепь, в которой за счет протекания коллекторного тока, управляемого по цепи базы, на выходе схемы создается усиленное переменное напряжение. Остальные элементы каскада выполняют вспомогательную роль.

Конденсаторы $C1$ и $C2$ являются разделительными. Номиналы этих конденсаторов выбирают таким образом, чтобы в рабочей полосе частот их сопротивления были близки к нулю. Конденсатор $C1$ исключает шунтирование входной цепи усилительного каскада цепью источника входного сигнала по постоянному току, что позволяет, во-первых, исключить протекание постоянного тока через источник входного сигнала и, во-вторых, обеспечить независимость постоянного напряжения на базе транзистора $U_{б0}$ от внутреннего сопротивления источника сигнала. Конденсатор $C2$ обеспечивает передачу в цепь нагрузки (сопротивление R_n) переменной составляющей выходного напряжения, выделяющегося на сопротивлении R_k (на коллекторе транзистора), а также исключает возможность протекания постоянного тока от источника питания через нагрузку.

Резисторы $R1$ и $R2$ используются для задания режима покоя каскада. Они создают постоянное напряжение на базе транзистора и постоянный ток покоя базы $I_{б0}$, необходимые для работы с переменным по знаку входным сигналом. Постоянная составляющая тока базы $I_{б0}$ протекает от положительного к отрицательному полюсу источника питания E через резистор $R1$. Выходной ток покоя транзистора (ток коллектора $I_{к0}$) определяется величиной тока покоя базы $I_{б0}$. В соответствии с выражением

$$I_{к0} = h_{21Э} \cdot I_{б0}.$$

Постоянные токи и напряжения в цепях усилительного элемента (транзистора) в отсутствии сигнала определяют так называемую «точку покоя» каскада.

Резистор R_3 является элементом цепи отрицательной обратной связи, предназначенным для стабилизации точки покоя каскада при изменении температуры и при воздействии других дестабилизирующих факторов. Конденсатор C_3 , имеющий в рабочей полосе частот ничтожно малое сопротивление, шунтирует резистор R_3 по переменному току, исключая тем самым отрицательную обратную связь по переменному току. Отключение конденсатора C_3 приведет к уменьшению коэффициента усиления схемы.

Подача на вход каскада переменного напряжения от источника сигнала приводит к появлению в цепи базы транзистора кроме постоянной

составляющей еще и переменной составляющей, и, как следствие этого, переменной составляющей тока коллектора. За счет протекания тока коллектора через резистор R_k на нем создается переменная составляющая напряжения, которая через конденсатор $C2$ поступает в цепь нагрузки (резистор R_n).

Если на вход транзистора подать сигнал положительной полярности, то сопротивление транзистора между коллектором и эмиттером уменьшится (транзистор приоткрывается). В этом случае потенциал коллектора относительно общего провода уменьшится, то есть станет более отрицательным по сравнению с исходным режимом. В итоге выходной сигнал оказывается проинвертированным по отношению к входному сигналу.

Для усиления сигнала без искажения связь между постоянными и переменными составляющими в выходной цепи должна быть такой, чтобы амплитудные значения переменных составляющих не превышало значения постоянных составляющих, то есть

$$I_{km} \leq I_{k0} \quad \text{и} \quad U_{выхm} \leq U_{кэ0} . \quad (1.1)$$

Анализ работы каскада для нахождения токов и напряжений схемы часто производят графоаналитическим методом, основанном на использовании графических построений и расчетных соотношений. Графические построения проводят с использованием выходных и входных статических характеристик транзистора. При этом токи и напряжения в транзисторе зависят не только от параметров самого транзистора, но и от внешних элементов усилительного каскада. Таких как сопротивление в цепи коллектора, напряжение источника питания и др. То есть при определении токов и напряжений в усилительном каскаде необходимо одновременно учитывать и свойства транзистора, определяемые его выходными и входными характеристиками, и влияние параметров элементов схемы (резисторов и конденсаторов).

Для определения величин постоянных токов и напряжений в выходной цепи усилительного каскада на статических выходных характеристиках транзистора (рис. 1.2) проводят так называемую нагрузочную прямую каскада по постоянному току, представляющую собой геометрическое место точек, координаты которых соответствуют возможным значениям точки покоя каскада.

Зависимость $U_{кэ0} = f(I_{к0})$ найдем из уравнения, составленного на основе второго закона Кирхгофа для выходной цепи каскада

$$E = I_{к0} R_k + U_{кэ0} + I_{э0} R_э . \quad (1.2)$$

Если считать, что $I_{э0} \approx I_{к0}$, то уравнение (1.2) может быть приведено к виду

$$U_{кэ0} = E - I_{к0} (R_k + R_э) . \quad (1.3)$$

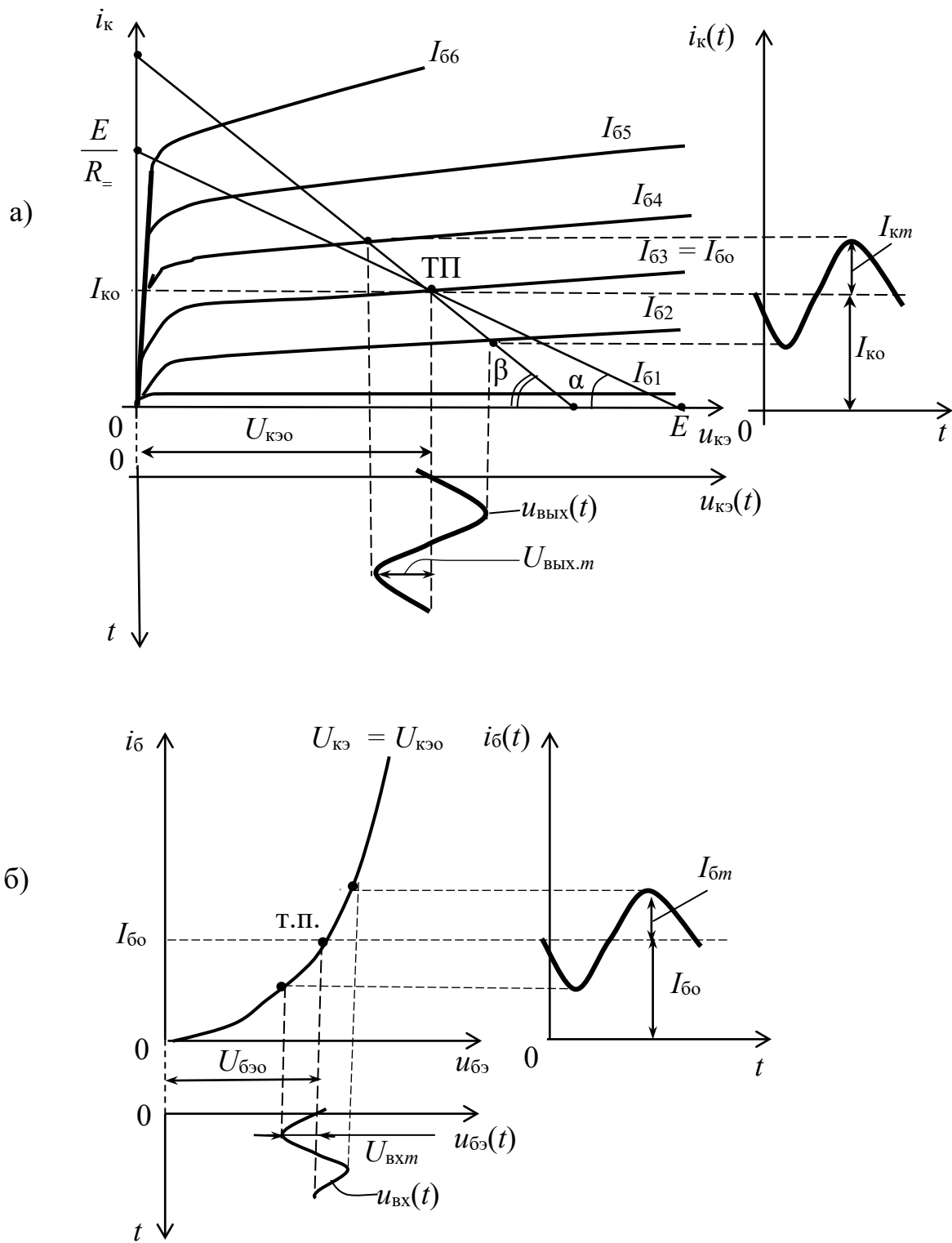


Рис. 1.2 — Диаграммы работы выходной цепи (а) и входной цепи (б) усилительного каскада

Сумму сопротивлений, по которым протекает постоянная составляющая тока коллектора, называют сопротивлением выходной цепи для постоянного тока. Для схемы, изображенной на рис. 1.1, сопротивление выходной цепи для постоянного тока равно

$$R_{\Sigma} = R_K + R_{\Sigma} . \quad (1.4)$$

Выражение (1.3) является уравнением прямой линии. В связи с этим построение нагрузочной прямой каскада по постоянному току обычно проводят на выходных характеристиках транзистора по двум точкам, характеризующим режим холостого хода и короткого замыкания в выходной цепи каскада. Координаты этих точек:

$$\begin{aligned} I_{K0} &= 0 ; \quad U_{KЭ0} = E ; \\ U_{KЭ0} &= 0 ; \quad I_{K0} = E / (R_K + R_{\Sigma}) = E / R_{\Sigma} . \end{aligned}$$

Нагрузочную характеристику по постоянному току можно также провести через точку $U_{KЭ0} = E$ под углом α , который определяется из выражения

$$\alpha = \arctg\left(\frac{1}{R_{\Sigma}} \cdot \frac{m_u}{m_i}\right) , \quad (1.5)$$

где m_u и m_i — коэффициенты, учитывающие масштаб по оси абсцисс и ординат соответственно.

Из выражения (1.5) видно, что наклон нагрузочной прямой зависит только от сопротивления нагрузки, и не зависит от напряжения источника питания.

Точки пересечения нагрузочной прямой со статическими выходными характеристиками транзистора дают графическое решение уравнения (1.3) для заданного сопротивления R_{Σ} и различных значений тока базы I_B . По этим точкам можно, задавшись током базы I_{B0} , определить ток коллектора в отсутствие сигнала на входе I_{K0} , а также напряжение коллектор-эмиттер $U_{KЭ0}$.

Точка покоя (ТП) находится на пересечении нагрузочной прямой для постоянного тока с выходной статической характеристикой транзистора для заданного тока базы. Как было отмечено выше, постоянная составляющая тока базы I_{B0} задается резисторами $R1$ и $R2$. Следовательно, при изменении сопротивления резисторов $R1$ или $R2$ ток базы будет меняться и точка покоя будет перемещаться по нагрузочной прямой постоянного тока, что приведёт к изменению постоянной составляющей тока коллектора и напряжения коллектор-эмиттер при отсутствии сигнала на входе.

При подаче на вход сигнала в каскаде кроме постоянных токов начинают протекать и переменные токи. Для определения переменных составляющих выходного напряжения каскада и коллекторного тока транзистора, обусловленных влиянием поданного на вход усиливаемого сигнала, используют нагрузочную прямую каскада по переменному току.

При построении нагрузочной прямой каскада по переменному току учитывают, что резистор R_3 шунтируется в рабочей полосе частот конденсатором C_3 , а к коллекторной цепи через ничтожно малое сопротивление разделительного конденсатора $C2$ подключается нагрузка R_n . С учетом того, что внутреннее сопротивление источника питания E для переменного тока близко к нулю, оказывается, что в рабочей полосе частот нагрузкой каскада по переменному току $R_{н\sim}$ являются параллельно включенные резистор R_k и сопротивление нагрузки R_n , то есть

$$R_{н\sim} = \frac{R_k R_n}{R_k + R_n} . \quad (1.6)$$

Из сравнения выражений (1.4) и (1.6) видно, что для схемы, изображенной на рис. 1.1, сопротивление нагрузки каскада по постоянному току не равно сопротивлению нагрузки по постоянному току. Следовательно, наклон нагрузочной прямой по переменному току будет отличаться от наклона нагрузочной прямой по постоянному току. Угол наклона нагрузочной прямой переменного тока к оси абсцисс можно найти из выражения

$$\beta = \arctg\left(\frac{1}{R_{н\sim}} \cdot \frac{m_u}{m_i}\right) . \quad (1.7)$$

Из выражений (1.5) и (1.7) видно, что для схемы, изображенной на рис. 1.1, сопротивление нагрузки каскада для постоянного тока больше, чем для переменного тока, следовательно угол наклона к оси абсцисс нагрузочной прямой по переменному току будет больше, чем для нагрузочной прямой для постоянного тока (угол $\beta >$ угла α) (см. рис 1.2).

Нагрузочные прямые по постоянному и переменному токам всегда пересекаются в точке покоя.

Рассмотрим перемещение рабочей точки при подаче на вход полезного усиливаемого сигнала.

При подаче на вход каскада переменного напряжения $u_{вх}(t)$ в цепи базы транзистора кроме постоянной составляющей $I_{б0}$ создается ещё и переменная составляющая тока базы $i_б(t)$ (см. рис. 1.3,б). Взаимосвязь между поданным входным напряжением $u_{вх}(t)$ и переменной составляющей тока базы $i_б(t)$ определяется по входной характеристике транзистора. При этом в коллекторной цепи транзистора, кроме постоянного тока коллектора, создается ещё и переменная составляющая тока коллектора $i_k(t)$

$$i_k(t) = I_{к0} + h_{21Э} \cdot i_б(t)$$

и, соответственно, переменное выходное напряжение $u_{вых}(t)$.

Нагрузочная прямая по переменному току характеризует взаимосвязь мгновенных значений тока $i_k(t)$ и напряжения $u_{кэ}(t)$. Рабочая точка при подаче

на вход переменного сигнала перемещается по нагрузочной прямой переменного тока. Её положение в момент времени t определяется током базы транзистора

$$I_{\text{б0}} + i_{\text{б}}(t).$$

При этом рабочая точка перемещается вниз от точки покоя при уменьшении тока базы (отрицательная полуволна), и вверх — при увеличении тока базы (положительная полуволна).

Очевидно, что для исключения искажений выходного сигнала необходимо, чтобы рабочая точка в пределах линейного участка и при перемещении вверх по нагрузочной прямой не заходила в область нелинейных начальных участков выходных характеристик, а при перемещении вниз — в область отсечки тока коллектора. То есть соотношение между амплитудами тока и напряжения на нагрузке должно соответствовать выражению (1.1).

Работа каскада без искажений выходного сигнала достигается за счет правильного выбора режима работы каскада (положение точки покоя) с учетом максимально возможной амплитуды входного сигнала.

К основным параметрам, характеризующим каскады предварительного усиления, относят: коэффициенты усиления (по напряжению, току и мощности), полоса пропускания (определяемая при заданном коэффициенте амплитудно-частотных искажений) и динамический диапазон усиливаемых напряжений.

Комплексный коэффициент усиления напряжения $\dot{K}$ — это отношение комплексной амплитуды напряжения на выходе к комплексной амплитуде напряжения на входе каскада

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{\text{выхт}}}{\dot{U}_{\text{вхт}}} = K e^{j\varphi},$$

где $\dot{U}_{\text{выхт}}$, $\dot{U}_{\text{вхт}}$ — комплексные амплитуды напряжений на выходе и входе усилителя; K — модуль комплексного коэффициента усиления, называемый просто «коэффициент усиления» он показывает во сколько раз напряжение на выходе больше, чем напряжение на входе каскада; φ — сдвиг фазы между выходным и входным напряжениями.

Аналогично определяют комплексный коэффициент усиления по току $\dot{K}_I$ и коэффициент усиления мощности K_p

$$\dot{K}_I = \frac{\dot{I}_{\text{выхт}}}{\dot{I}_{\text{вхт}}} = K_I e^{j\varphi}, \quad K_p = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}},$$

где $\dot{I}_{\text{выхт}}$, $\dot{I}_{\text{вхт}}$ — комплексные амплитуды тока на выходе и входе усилителя; $P_{\text{вых}}$, $P_{\text{вх}}$ — мощности на выходе и входе усилителя.

$\dot{K}$ и $\dot{K}_I$ являются комплексными величинами. Основной причиной этого является наличие в цепях усилителя и его нагрузке реактивных элементов, что приводит к сдвигу по фазе выходного напряжения и тока относительно входного напряжения и тока.

Обычно интерес представляет активная потребляемая и активная отдаваемая в нагрузку мощность. В этом случае K_p является действительным числом.

Выразим K_p через коэффициенты усиления по току и напряжению

$$K_p = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{0,5 \cdot U_{\text{ВЫХм}} I_{\text{ВЫХм}}}{0,5 \cdot U_{\text{ВХм}} I_{\text{ВХм}}} = K K_I \quad .$$

Коэффициент усиления в области средних частот, в пределах которой он практически не зависит от частоты, называют номинальным коэффициентом усиления и приписывают ему дополнительный индекс «нуль»:

$$K(f_{\text{ср}}) = K_0 = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(f_{\text{ср}})}{U_{\text{ВХ}}(f_{\text{ср}})} \quad .$$

Номинальный коэффициент усиления — действительное число.

Коэффициенты усиления часто выражают в логарифмических единицах (децибелах)

$$K_{\text{дБ}} = 20 \lg K, \quad K_{I, \text{дБ}} = 20 \lg K_I, \quad K_{p, \text{дБ}} = 10 \lg K_p \quad .$$

Зависимость коэффициента усиления усилителя от частоты называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) усилителя, а зависимость фазового сдвига от частоты — фазо-частотной характеристикой (ФЧХ).

У идеального усилителя коэффициент усиления остается постоянным во всем диапазоне частот. Поэтому АЧХ идеального усилителя имеет вид прямой линии, параллельной оси абсцисс. У реальных усилителей коэффициент усиления не остается постоянным, что приводит к отличию АЧХ реального усилителя от АЧХ идеального усилителя (рис. 1.3).

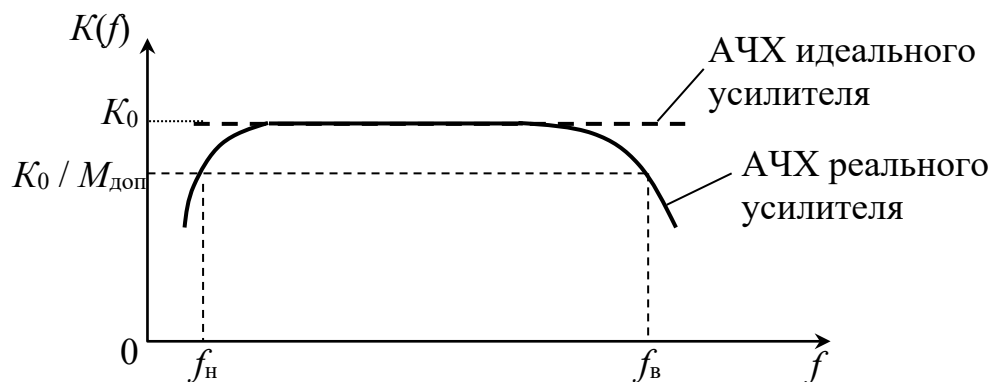


Рис. 1.3 — Амплитудно-частотная характеристика усилителя

Амплитудно-частотную характеристику усилителя условно разбивают на три области: область нижних, область средних и область верхних частот. На рис. 1.3 буквой $M_{\text{доп}}$ обозначен допустимый уровень неравномерности коэффициента усиления в рабочей полосе частот.

Уменьшение коэффициента усиления на нижних частотах обусловлено, в основном, влиянием разделительных конденсаторов (C_1 и C_2) и влиянием конденсатора в цепи эмиттера транзистора (C_3) (см. рис. 1.1), а в области верхних частот — ухудшением частотных свойств транзистора, а также влиянием паразитных емкостей схемы.

Часто при построении АЧХ коэффициент усиления нормируют к величине коэффициента усиления в области средних частот (K_0). Нормированный коэффициент усиления на средней частоте принимает значение равное единице. Нормированную АЧХ удобно использовать при сравнении частотных характеристик каскадов с различными коэффициентами усиления.

Количественно частотные искажения оценивают коэффициентом частотных искажений $M(f)$

$$M(f) = K_0 / K(f) ,$$

где $M(f)$ — коэффициент частотных искажений на частоте f ;

K_0 — коэффициент усиления в области средних частот (номинальный коэффициент усиления) (для УНЧ K_0 определяется на частоте 1 кГц);

$K(f)$ — коэффициент усиления на частоте f .

Коэффициент частотных искажений показывает, во сколько раз коэффициент усиления на данной частоте меньше коэффициента усиления на средних частотах. Чем больше M отличается от единицы, тем больше вносимые усилителем частотные искажения. Для идеального усилителя, у которого коэффициент усиления остается постоянным в диапазоне частот от 0 до бесконечности, коэффициент частотных искажений $M_{\text{ид}} = 1$.

Обычно коэффициент частотных искажений находят отдельно для нижних и верхних частот

$$M_{\text{н}}(f_{\text{н}}) = K_0 / K_{\text{н}}(f_{\text{н}}) , \quad M_{\text{в}}(f_{\text{в}}) = K_0 / K_{\text{в}}(f_{\text{в}}) ,$$

В справочных данных при этом указывают частоты, на которых найдены эти частотные искажения.

При последовательном включении нескольких каскадов результирующий коэффициент частотных искажений рассчитывают как произведение коэффициентов частотных искажений отдельных каскадов (если M выражено в относительных единицах) или как сумму (если M выражено в децибелах). Например, для двухкаскадного усилителя

$$M_{\Sigma} = M_1 M_2 ,$$

или

$$M_{\Sigma, \text{дБ}} = M_{1, \text{дБ}} + M_{2, \text{дБ}} \quad .$$

где M_1 , M_2 — коэффициент частотных искажений 1-го и 2-го каскадов соответственно.

Диапазоном рабочих частот или полосой пропускания усилителя называют полосу частот, в пределах которой частотные искажения не превышают допустимых значений ($M_{\text{доп}}$).

Полосу пропускания усилителя можно определить по АЧХ, используя заданные коэффициенты частотных искажений на нижних и верхних частотах (см. рис. 1.3).

Обычно полосу пропускания определяют при $M_{\text{доп}} = \sqrt{2}$ (3 дБ), что соответствует уменьшению коэффициентов усиления по напряжению или току на верхней и нижней граничных частотах в $\sqrt{2} \approx 1,41$ раза (а мощности в 2 раза) от их значений на средней частоте. В этом случае $M_{\text{н, дБ}} = M_{\text{в, дБ}} = 3 \text{ дБ}$.

Амплитудной характеристикой (АХ) усилителя называют зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного напряжения. Типичная амплитудная характеристика усилителя изображена на рис. 1.4. Так как у усилителя коэффициент усиления не должен зависеть от амплитуды сигнала на входе, то АХ идеального усилителя представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат. АХ реального усилителя отличается от идеальной.

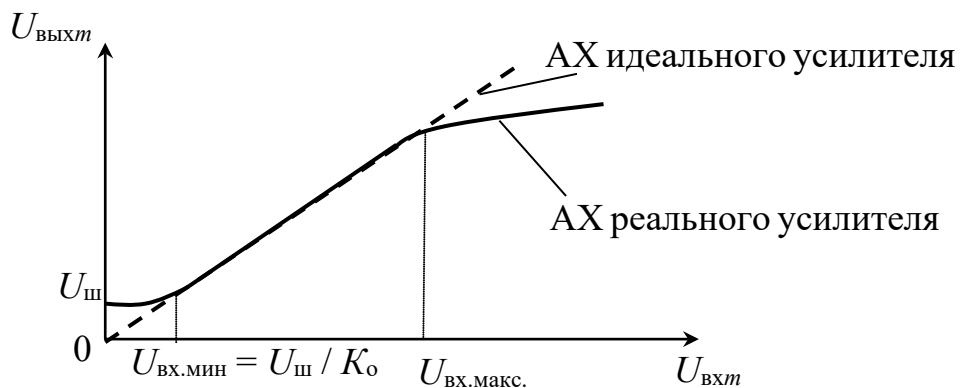


Рис. 1.4 — Амплитудная характеристика усилителя

Если напряжение сигнала поданного на вход меньше, чем $U_{\text{вх.мин}}$ (см. рис. 1.4), то на выходе реального усилителя этот сигнал будет маскироваться (заглушаться) напряжением собственных шумов усилителя $U_{\text{ш}}$. При значительном увеличении напряжения сигнала (если $U_{\text{вх}} > U_{\text{вх.макс}}$) сильно возрастают нелинейные искажения, проявляющиеся в виде ограничения сигнала по амплитуде. Величина $U_{\text{выхт.макс}}$, при которой начинают проявляться искажения сигнала, в основном определяется напряжением источника

питания каскада, так как напряжение на выходе бестрансформаторного усилителя не может быть больше напряжения питания каскада.

Амплитудную характеристику обычно снимают в области средних частот исследуемого усилителя. Для УНЧ амплитудную характеристику снимают на частоте 1 кГц.

Отношение $U_{\text{вх.макс.}}/U_{\text{вх.мин.}}$ в пределах линейной части амплитудной характеристики характеризует диапазон напряжений, усиливаемых данным усилителем с допустимым уровнем нелинейных искажений. Это отношение называют динамическим диапазоном усилителя. Он выражается в относительных единицах

$$D = U_{\text{вх.макс.}}/U_{\text{вх.мин.}} ,$$

где D — динамический диапазон усилителя;

$U_{\text{вх.макс}}$ — максимальный входной сигнал, при котором отсутствуют нелинейные искажения сигнала на выходе;

$U_{\text{вх.мин}}$ — минимальный входной сигнал, при котором напряжение на выходе превышает уровень собственных шумов усилителя.

Динамический диапазон частот выражают в логарифмических единицах (децибеллах)

$$D_{\text{дб}} = 20 \lg D .$$

1.3. Описание лабораторной установки

В состав лабораторной установки входят: модули «Апериодический усилитель» (рис. 1.5), «Функциональный генератор» (рис. 1.6), «Мультимеры» (рис. 1.7), а также двухлучевой цифровой осциллограф типа «KEYSIGHT DSOX 1102G» (рис. 1.9).

На лицевой панели модуля «Апериодический усилитель» находятся гнезда для подключения модуля «Функциональный генератор», двухлучевого осциллографа и др. измерительных приборов. Кнопка и индикатор включения напряжения источника питания находятся в нижней части модуля. Ручки регулировки сопротивления резисторов и переключатели размещены в средней части модуля (см. рис. 1.5).

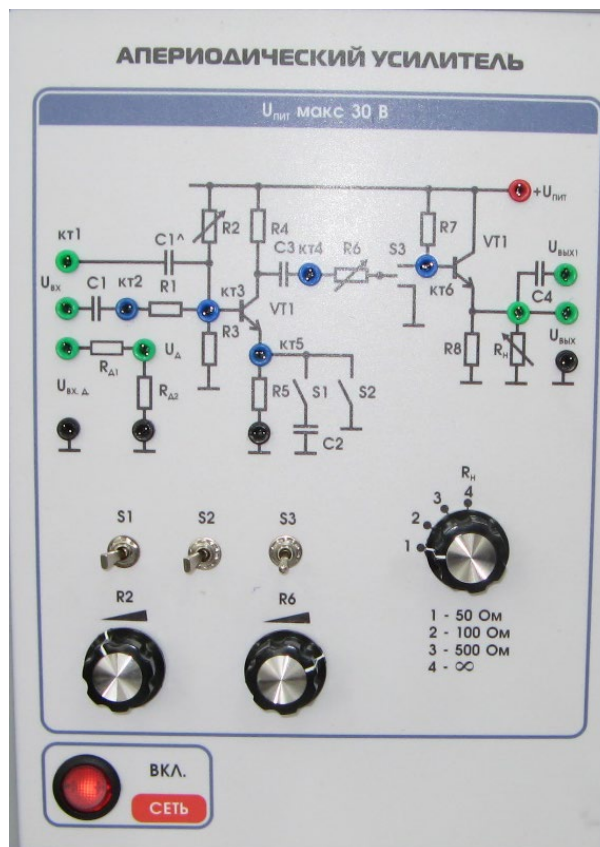


Рис. 1.5 — Внешний вид модуля «Апериодический усилитель»



Рис. 1.6 — Внешний вид модуля «Функциональный генератор»



Рис. 1.7 — Внешний вид модуля «Мультимеры»

Принципиальная схема усилительного каскада на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, используемая в лабораторном макете, изображена на рис. 1.8. Конструктивно он собран в модуле «Апериодический усилитель». В этом модуле собрана также схема каскада с общим коллектором ($VT1$, $R7$, $R8$, R_H , $C4$), которая в данной работе не исследуется. Питание цепей каскада производится от встроенного в модуль источника напряжения $U_{\text{пит}} = 15$ В. Включатель напряжения питания («ВКЛ») находится в нижней части модуля.

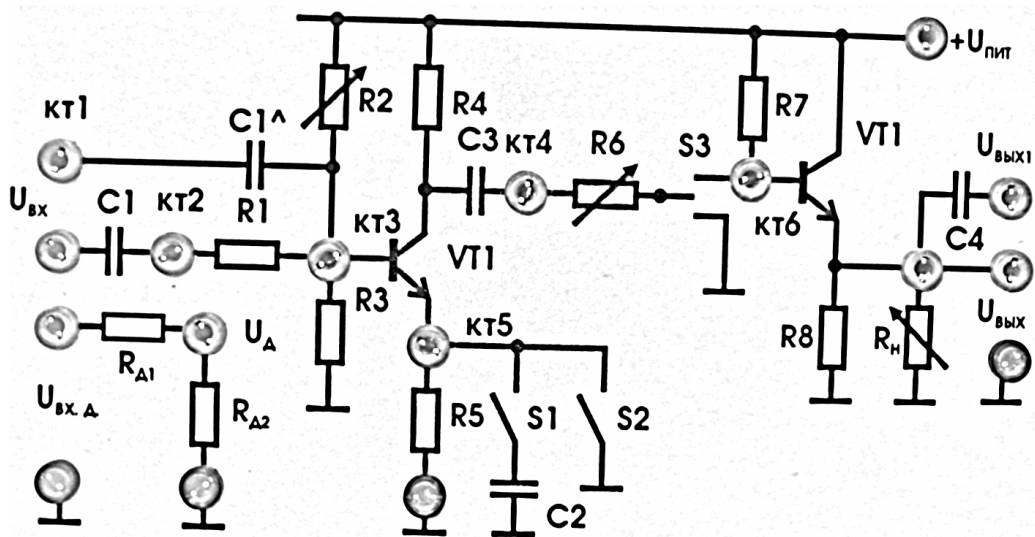


Рис. 1.8 — Схема лабораторного макета

Делитель напряжения $R_{Д1}$ — $R_{Д2}$ (см. рис. 1.8) предназначен для уменьшения амплитуды входного сигнала. В данной работе этот делитель не используется.

Для установки точки покоя в цепь базы транзистора $VT1$ подано напряжение смещения, снимаемое с регулируемого делителя напряжения $R2$ — $R3$. Резистор $R2$ выполнен переменным. Его величина может изменяться с помощью ручки « $R2$ ».

Резистор $R5$ в цепи эмиттера служит для температурной стабилизации точки покоя, осуществляемой с помощью отрицательной обратной связи по постоянному току.

Резистор $R1$ введен в схему для измерения входного сопротивления каскада.

Входом исследуемого каскада являются гнезда «КТ1» и «Общий» или (при измерении входного сопротивления) гнезда « $U_{\text{вх}}$ » и «Общий».

Выходом каскада с общим эмиттером являются гнезда «КТ4» и «Общий». При установке переключателя « $S3$ » в нижнее положение к выходу схемы может быть подключена нагрузка (переменный резистор $R6$).

1.4. Порядок выполнения работы

1.4.1. Подключите нагрузку (резистор R_6) к схеме каскада с общим эмиттером с помощью переключателя «S3», расположенного на передней панели модуля. Для этого правый по схеме вывод резистора R_6 соедините с проводом «Общий».

1.4.2. Вращая ручку резистора R_6 по часовой стрелке, установите его максимальное значение.

1.4.3. Переключатели «S1» и «S2» установите в разомкнутое состояние.

1.4.4. Ко входу исследуемой схемы (гнезда «к1» и «Общий») подключите выход модуля «Функциональный генератор», а к выходу исследуемой схемы (гнезда «к4» и «Общий») подключите вход 1 цифрового осциллографа (рис. 1.9).



Рис. 1.9 — Внешний вид лицевой панели осциллографа KEYSIGHT DSOX 1102G

1.4.5. Включите модуль «Функциональный генератор» и установите частоту 1 кГц, выходное напряжение — $U = 0$ В, форма выходного напряжения — синусоидальная.

1.4.6. Включите модуль «Апериодический усилитель» и увеличивая напряжение на входе исследуемой схемы, наблюдайте на экране осциллографа форму выходного напряжения и, изменяя сопротивление резистора R_2 , добейтесь одновременного появления искажений положительной и отрицательной полуволн выходного напряжения. В этом случае точка покоя находится в середине линейного участка проходной характеристики.

1.4.7. С помощью модуля «Мультимеры» измерьте постоянные напряжения относительно общего провода на базе и на эмиттере транзистора. Рассчитайте напряжение база-эмиттер транзистора как разность измеренных напряжений.

1.4.8. Снимите амплитудную характеристику каскада на частоте 1 кГц. Для этого:

- подайте напряжение от модуля «Функциональный генератор» на вход усилителя (гнезда «к1» и «Общий»);
- на осциллографе установите режим «*AC RMS*, Полный экран»;
- канал 1 осциллографа подключите ко входу усилителя параллельно генератору, а канал 2 к выходу усилителя (гнезда «к4» и «Общий»);
- изменяя входное напряжение в пределах от 0 до максимального неискаженного выходного напряжения, наблюдаемого на экране осциллографа, снимите зависимость $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$. Количество измерений должно быть не менее семи;
- рассчитайте коэффициент усиления на линейном участке амплитудной характеристики;
- измерьте напряжение максимального неискаженного напряжения на выходе ($U_{\text{вых max}}$);
- отключите источник сигнала, закоротите входные гнезда усилителя и измерьте напряжение шума на выходе ($U_{\text{ш вых}}$);
- определим динамический диапазон усилителя.

1.4.9. Снимите амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) каскада при использовании на входе каскада разделительного конденсатора $C1^{\wedge}$. Для этого:

- подключите на вход исследуемой схемы (гнезда «к1» и «Общий») выход осциллографа «*Gen Out*» и параллельно ему вход канала 1 осциллографа;
- подключите канал 2 осциллографа к выходу схемы (гнезда «к4» и «Общий»);

— установите на осциллографе режим анализа частотной характеристики. Для этого нажмите кнопку «*Analyze*», включите «Функции «*FRA*» и выберите «Анализ частотной характеристики»

— установите минимальную частоту анализа 20 Гц, максимальную — 20 МГц. Амплитуда $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$ ($1.00 V_{pp}$);

— нажмите на осциллографе кнопку «Пуск анализ». На экране осциллографа через 10—20 секунд появится АЧХ и ФЧХ анализируемой схемы;

— установите курсор на частоту 1 кГц и определите коэффициент усиления в децибеллах и фазовый сдвиг на этой частоте. Сравните полученное значение с измеренным при исследовании амплитудной характеристики;

— определите полосу пропускания усилителя по уровню 3 дБ. Для этого перемещая курсор в сторону нижних частот определите частоту, на которой коэффициент усиления уменьшится на 3 дБ (по сравнению с коэффициентом усиления на частоте 1 кГц). Эта частота является нижней граничной частотой полосы пропускания. Затем перемещая курсор в сторону верхних частот, определите частоту, на которой коэффициент усиления уменьшится на 3 дБ в области верхних частот. Эта частота является верхней граничной частотой полосы пропускания;

— определите фазовые сдвиги на нижней и верхней частотах полосы пропускания;

1.4.10. Снимите АЧХ каскада при параллельном включении конденсаторов $C1^{\wedge}$ и $C1$ на входе. Для этого:

— установите две перемычки: одну между гнездами «кт1» и « $U_{\text{вх}}$ », вторую — между гнездами «кт2» и «кт3» (закоротите резистор $R1$);

— проведите исследования АЧХ по методике, описанной в п. 1.4.9.

1.4.11. Измерьте входное сопротивление каскада с ОЭ. Для этого:

— подключите выход модуля «Функциональный генератор» ко входу исследуемой схемы (гнезда « $U_{\text{вх}}$ » и «Общий»). Канал 1 цифрового осциллографа подключите к гнездам «кт2» и «Общий». Канал 2 цифрового осциллографа подключите к выходу каскада (гнезда «кт4» и «Общий»);

— установите в модуле «Функциональный генератор» синусоидальное напряжение частотой 1 кГц. Увеличивая амплитуду синусоидального напряжения на входе каскада, установите неискаженное синусоидальное напряжение на выходе усилителя;

— переключите канал 2 осциллографа к гнездам «кт3» и «Общий».

— измерьте при помощи цифрового осциллографа (режим «АС RMS Полный Экран») напряжение U_1 между гнездами «кт2» и «Общий», а также напряжение U_2 между гнездами «кт3» (см. рис. 1.5) и «Общий»;

— рассчитайте входное сопротивление каскада по формуле

$$R_{\text{вх}} = R_1 \frac{U_2}{U_1 - U_2} ;$$

где $R_1 = 1 \text{ кОм}$;

U_1 — напряжение между гнездами «кт2» и «Общий»;

U_2 — напряжение между гнездами «кт3» и «Общий».

4.12. Измерьте выходное сопротивление каскада с общим эмиттером. Для этого:

— подключите выход модуля «Функциональный генератор» ко входу исследуемой схемы (гнезда «кт1» и «Общий»). Установите в модуле «Функциональный генератор» синусоидальное напряжение частотой 1 кГц;

— установите переключатель «S3» в среднее положение;

— подключите канал 2 осциллографа к выходу каскада (гнезда «кт4» и «Общий»);

— измерьте напряжение на выходе $U_{\text{вых1}}$;

— переключатель «S3» установите в нижнее положение и, вращая ручку потенциометра «R6», добейтесь уменьшения выходного напряжения в два раза, то есть $U_{\text{вых2}} = U_{\text{вых1}} / 2$;

— отключите осциллограф от выхода каскада, выключите модуль «Апериодический усилитель» и, используя модуль «Мультимеры», измерьте сопротивление резистора $R6$ (сопротивление между гнездами «кт4» и «Общий»).

— полученное значение сопротивления резистора R_6 равно выходному сопротивлению усилительного каскада

$$R_{\text{вых}} = R_6 .$$

1.5. Содержание отчета

1.5.1. Цель работы.

1.5.2. Принципиальная схема лабораторного макета.

1.5.3. Результаты измерений, проведенных в п.п. 1.4.7 и 1.4.8, а также амплитудная характеристика, построенная по измерениям п.п. 1.4.8. Экспериментально найденные значения коэффициента усиления и динамического диапазона.

1.5.4. Результаты измерений, проведенных в п.п. 1.4.9 и 1.4.10, а также амплитудно-частотные характеристики, построенные по этим данным.

1.5.5. Результаты измерений, проведенных в п.п. 1.4.11 и 1.4.12, а также и расчеты входного и выходного сопротивлений усилителя.

1.5.6. Выводы.

1.6. Контрольные вопросы

1.6.1. Что называется амплитудной характеристикой усилителя? Какой вид имеет идеальная и реальная амплитудные характеристики?

1.6.2. Поясните методику измерения амплитудной характеристики.

1.6.3. Дайте определение динамического диапазона усилителя? Как его можно расширить?

1.6.4. Дайте определение амплитудно-частотной характеристики усилительного каскада?

1.6.5. Дайте определение коэффициента частотных искажений?

1.6.6. Поясните методику измерения амплитудно-частотной характеристики.

1.6.7. Дайте определение нижней и верхней граничных частот полосы пропускания? Как они определяются?

1.6.8. Как экспериментально определить полосу пропускания усилителя?

1.6.9. Дайте определение фазо-частотной характеристики усилительного каскада.

1.6.10. Поясните назначение элементов схемы резистивного усилительного каскада.

1.6.11. Что называется «точкой покоя» усилительного каскада? На каком участке проходной характеристики она выбирается?

1.6.12. Покажите на схеме каскада пути прохождения постоянных токов.

1.6.13. Почему коэффициент усиления усилителя зависит от частоты?

1.6.14. В области каких частот разделительный конденсатор оказывает влияние на АЧХ каскада? Как величина частотных искажений, вносимых этим конденсатором, зависит от других элементов схемы?

1.6.15. Что такое нагрузочная характеристика? Поясните методы построения нагрузочных характеристик по постоянному и переменному токам.

1.6.16. Поясните работу каскада с использованием нагрузочных характеристик.

1.6.17. Назовите типичные значения основных характеристик усилительного каскада, включенного по схеме с общим эмиттером (коэффициенты усиления по напряжению, току и мощности, входное и выходное сопротивления, нижняя и верхняя граничные частоты полосы пропускания).

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДА С ОБЩИМ КОЛЛЕКТОРОМ

2.1. Цель работы

Изучить основные параметры каскада на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим коллектором, с учетом влияния элементов схемы на амплитудную характеристику, амплитудно-частотную характеристику и входное сопротивление каскада.

2.2. Краткие теоретические сведения

Принципиальная схема каскада с общим коллектором (ОК) (или эмиттерного повторителя) изображена на рис. 2.1.

Название схемы «с общим коллектором» означает, что вывод коллектора транзистора по переменному току является общим для входной, так и для выходной цепей каскада. В схеме на рис. 2.1 коллектор транзистора по переменному току через малое внутреннее сопротивление источника питания E ($r_i \approx 0$) соединен с общим проводом.

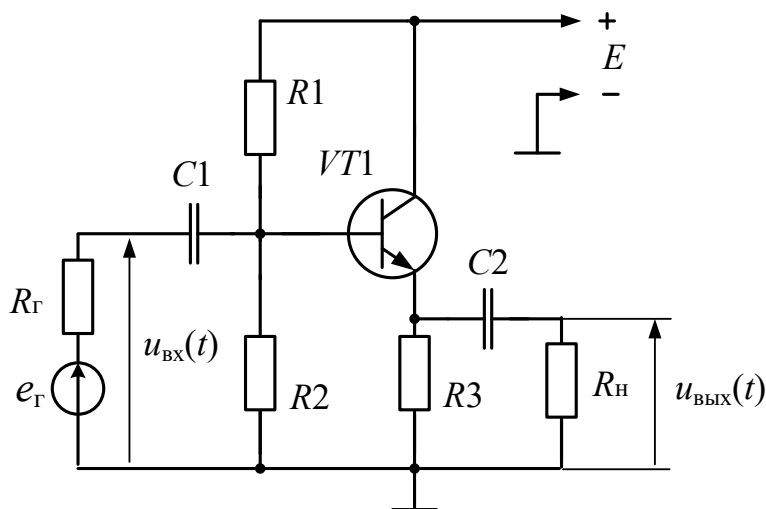


Рис. 2.1 — Схема каскада на биполярном транзисторе, включенном с общим коллектором

Конденсатор $C1$ необходим для разделения переменной и постоянной составляющих напряжения сигнала, подаваемого на вход каскада. Величину емкости этого конденсатора выбирают такой, чтобы его сопротивление переменному току в рабочей полосе частот было значительно меньше входного сопротивления каскада.

Резисторы $R1$ и $R2$ служат для подачи постоянного напряжения смещения на базу транзистора. Они задают величину постоянной составляющей тока

базы, следовательно, тока коллектора и эмиттера, то есть определяют точку покоя транзистора. Точку покоя выбирают так, чтобы транзистор работал на линейном участке проходной характеристики. Тогда нелинейные искажения, вносимые каскадом, будут минимальны.

Резистор R_3 , стоящий в эмиттерной цепи, является нагрузкой каскада по постоянному току. Он совместно с резисторами R_1 и R_2 определяет режим работы каскада.

Разделительный конденсатор C_2 выбирают достаточно большой емкости, чтобы его сопротивление в рабочей полосе частот было значительно меньше, чем сопротивление нагрузки R_n , подключаемой к выходу усилителя. С учетом этого, нагрузкой каскада для переменному току являются параллельно соединенные сопротивления R_3 и R_n .

Коэффициент усиления эмиттерного повторителя K можно найти из выражения [1, 2]:

$$K = \frac{U_{кэ}}{U_{кэ} + U_{бэ}}, \quad (2.1)$$

где K — коэффициент усиления;

$U_{кэ}$ — действующее значение переменного напряжения между коллектором и эмиттером транзистора;

$U_{бэ}$ — действующее значение переменного напряжения между базой и эмиттером транзистора.

Из выражения (2.1) видно, что коэффициент усиления каскада меньше единицы. Обычно коэффициент усиления эмиттерного повторителя находится в пределах $K = 0,95—0,99$.

Коэффициент усиления каскада по току определяется статическим коэффициентом передачи транзистора по току $h_{21э}$, а также он зависит от величины сопротивления нагрузки. При уменьшении величины сопротивления нагрузки коэффициент усиления по току увеличивается. Его предельно достижимое значение $K_{\max}$ равно

$$K_{\max} = h_{21э} + 1, \quad (2.2)$$

Обычно коэффициент усиления по току эмиттерного повторителя находится в пределах $K_I = 10—50$.

Входное сопротивление каскада $R_{вх}$ определяется сопротивлениями параллельно включенных резисторов R_1 , R_2 и сопротивлением входной цепи транзистора. Оно может быть найдено из выражения:

$$R_{вх} = R_1 \parallel R_2 \parallel r_{вх VT} = \frac{R_1 R_2 r_{вх VT}}{R_1 R_2 + R_1 r_{вх VT} + R_2 r_{вх VT}}, \quad (2.3)$$

где R_1 и R_2 — сопротивления резисторов $R1$ и $R2$, образующих делитель напряжения на входе;

$r_{\text{вх } VT}$ — сопротивление входной цепи транзистора.

Величина $r_{\text{вх } VT}$ зависит от суммарного сопротивления нагрузки каскада по переменному току $R_{\text{н}\sim}$ и рассчитывается по формуле [1]:

$$r_{\text{вх } VT} \approx h_{21Э} R_{\text{н}\sim} = h_{21Э} \frac{R_3 R_{\text{н}}}{R_3 + R_{\text{н}}}, \quad (2.4)$$

$h_{21Э}$ — коэффициент передачи по току транзистора;

$R_{\text{н}\sim}$ — сопротивление нагрузки по переменному току;

$R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузки, подключенной к выходу схемы.

Чтобы делитель напряжения $R1$, $R2$ не снижал входное сопротивление каскада, стараются при проектировании каскада выполнить условие

$$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \gg r_{\text{вх } VT}.$$

При выполнении этого условия входное сопротивление каскада будет практически равно сопротивлению входной цепи транзистора

$$R_{\text{вх}} = h_{21Э} R_{\text{н}\sim}. \quad (2.5)$$

Обычно входное сопротивление эмиттерного повторителя находится в пределах 50—500 кОм.

Выходное сопротивление эмиттерного повторителя определяется сопротивлением выходной цепи транзистора и обычно находится в пределах $R_{\text{вых}} = 10—100$ Ом.

2.3. Описание лабораторной установки

В состав лабораторной установки входят модули «Апериодический усилитель» (рис. 2.2), «Функциональный генератор» (рис. 1.6), «Мультимеры» (рис. 1.7), а также двухлучевой цифровой осциллограф типа «KEYSIGHT DSOX 1102G» (рис. 1.9). На лицевой панели модуля «Апериодический усилитель» находятся гнезда для подключения модуля «Функциональный генератор», двухлучевого осциллографа и других измерительных приборов.

Конструктивно исследуемый каскад с общим коллектором находится в модуле «Апериодический усилитель» (см. рис. 2.2). В этом модуле собрана также схема каскада с общим эмиттером (ОЭ), которая была изучена ранее при выполнении лабораторной работы № 1.

Схема подключений каскада с общим коллектором изображена на рис. 2.3.

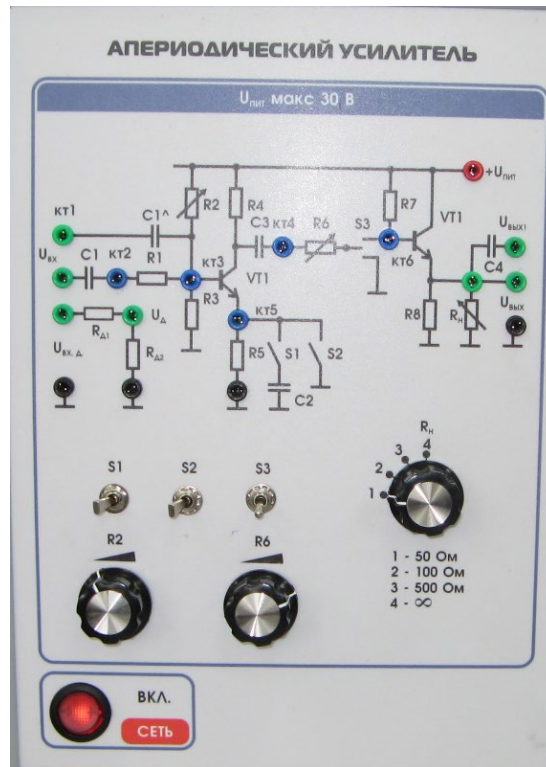


Рис. 2.2 — Внешний вид модуля «Аперидический усилитель»

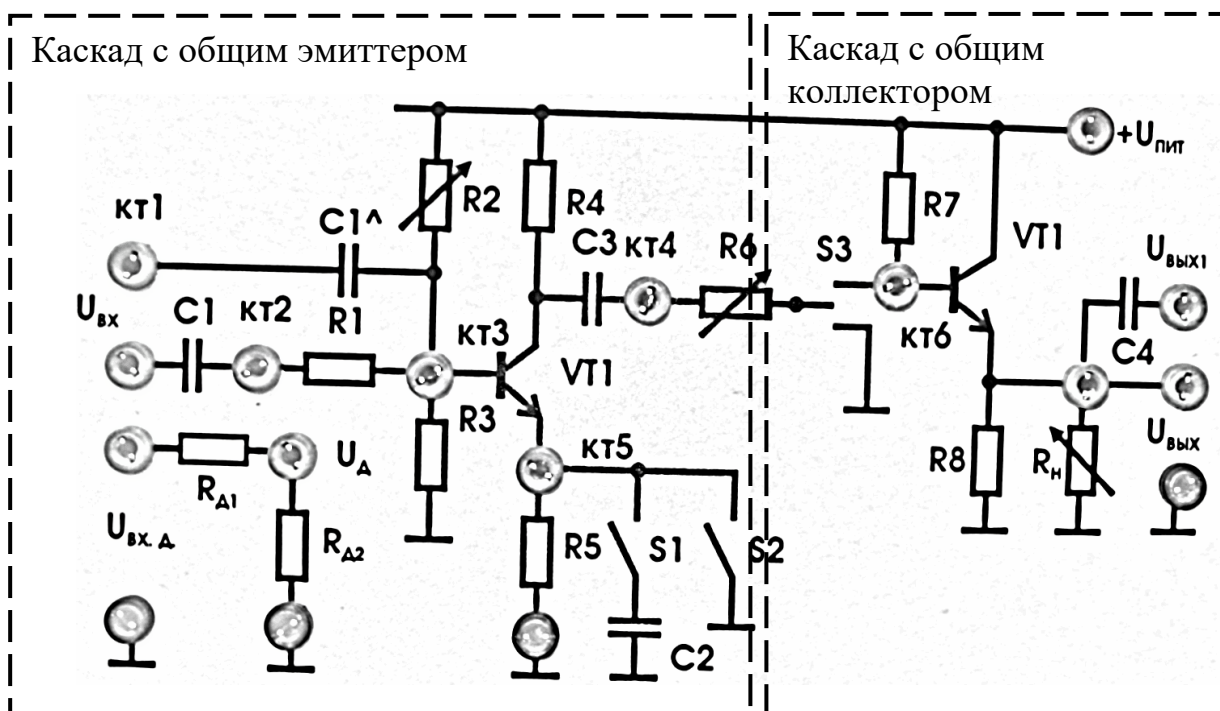


Рис. 2.3 — Изображение схемы подключений на лицевой панели лабораторного макета

Каскад с общим коллектором собран на следующих элементах: $VT1$, $R7$, $R8$, R_H , $C4$. Резистор $R7$ задает положение точки покоя каскада. Резистор $R8$ с параллельно включенным резистором R_H , являются нагрузкой по постоянному току. Резистор нагрузки R_H выполнен ступенчато изменяемым с помощью переключателя « R_H », установленного на лицевой панели в правой части макета. Конденсатор $C4$ выполняет функцию разделительного конденсатора.

Входом исследуемого каскада с ОК являются гнезда « $кт6$ » и «Общий».

При помощи переключателя $S3$ вход каскада с ОК может быть подключен к выходу каскада с ОЭ. В этом случае входом такого двухкаскадного усилителя будут являться гнезда « $кт1$ » и «Общий», расположенные в левой части модуля «Апериодический усилитель».

Выходом каскада с общим коллектором являются гнезда « $U_{ВЫХ1}$ » или « $U_{ВЫХ}$ » и «Общий». Гнездо « $U_{ВЫХ1}$ » используют при снятии выходного напряжения по переменной составляющей, а гнездо « $U_{ВЫХ}$ » — при снятии выходного напряжения по постоянной и переменной составляющим.

Для установки точки покоя каскада с общим эмиттером в цепь базы транзистора $VT1$ подаётся напряжение смещения, снимаемое с регулируемого делителя напряжения $R2—R3$. Резистор $R2$ выполнен переменным. Его сопротивление может изменяться с помощью ручки « $R2$ », находящейся в левой нижней части модуля «Апериодический усилитель».

Питание цепей каскада производится от встроенного в модуль источника питания « $U_{пит}$ » с напряжением 15 В. Выключатель напряжения питания («ВКЛ») находится в нижней части модуля.

2.4. Порядок выполнения работы

2.4.1. Не включая модуль «Апериодический усилитель» измерьте величину резистора $R8$. Для этого переключатель « R_H » установите в положение 4 ($R_H = \infty$), включите мультиметр в режим измерения сопротивлений и измерьте сопротивление между гнездами « $U_{ВЫХ}$ » и «Общий».

2.4.2. На модуле «Апериодический усилитель» установите переключатель « $S3$ » в среднее положение, переключатель « R_H » установите в положение 1 ($R_H = 50 \text{ Ом}$). Включите напряжение питания модуля «Апериодический усилитель».

2.4.3. Используя модуль «Мультиметры» в режиме измерения постоянных напряжений измерьте относительно общего провода напряжение питания (гнездо « $U_{пит}$ »), а также постоянные напряжения на базе (гнездо « $кт6$ ») и эмиттере (гнездо « $U_{ВЫХ}$ ») транзистора.

Рассчитайте напряжение база-эмиттер $U_{бэ}$ в точке покоя по формуле

$$U_{бэ} = U_{кт6} - U_{ВЫХ}.$$

2.4.4. Переключатель « R_H » установите в положение 2 ($R_H = 100 \text{ Ом}$) и определите напряжение база—эмиттер (см. п. 2.4.3).

2.4.5. Переключатель « R_H » установите в положение 3 ($R_H = 500 \text{ Ом}$) и определите напряжение база—эмиттер (см. п. 2.4.3).

2.4.6. Переключатель « S_3 » на модуле «Апериодический усилитель» установите в верхнее положение (подключите вход каскада с ОК к выходу каскада с ОЭ). Переключатель « S_1 » установите в левое положение («Отключено»), переключатель « S_2 » также установите в левое положение («Отключено»). Установите ручку потенциометра « R_6 » в крайнее правое положение ($R_6 = 0$). Установите переключатель « R_H » в положение 2 ($R_H = 100 \text{ Ом}$).

К входу каскада с ОЭ (гнезда « $кт1$ » и «Общий») подключите выход модуля «Функциональный генератор». На модуле «Функциональный генератор» включите напряжение питания и установите частоту 1 кГц, форма выходного напряжения — синусоидальная. Ручкой «Амплитуда 0...10 В» установите $U_{\text{ВЫХ}} = 0$.

К выходу каскада с ОК (гнезда « $U_{\text{ВЫХ}1}$ » и «общий») подключите вход канала 1 цифрового осциллографа.

2.4.7. Изменяя сопротивление резистора R_2 и увеличивая напряжение на входе, установите на выходе каскада с ОК максимальное неискаженное напряжение сигнала.

2.4.8. Снимите амплитудную характеристику каскада с ОК на частоте 1 кГц. Для этого:

— вход канала 1 осциллографа подключите к входу каскада с общим коллектором (гнезда « $кт6$ » и «Общий»), канал 2 осциллографа подключите к выходу каскада с ОК (гнезда « $U_{\text{ВЫХ}1}$ » и «Общий»). На цифровом осциллографе нажмите кнопку «*Mess*» и установите на каналах 1 и 2 осциллографа режим измерения переменных напряжений (измерение «*AC RMS* (ПЭ)»);

— установите напряжение на выходе модуля «Функциональный генератор» равным нулю. Затем увеличивайте выходное напряжение модуля «Функциональный генератор» и, наблюдая изменение выходного напряжения каскада с ОК (канал 2 осциллографа), определите максимальное выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ МАХ}}$, при котором форма усиливаемого сигнала остается синусоидальной (не наблюдаются нелинейные искажения формы сигнала). Определите, наблюдая измеренное значение на канале 1 осциллографа, величину $U_{\text{ВХ МАХ}}$. Затем, изменяя напряжение на входе исследуемого каскада от нуля до $1,2 \cdot U_{\text{ВХ МАХ}}$, выполните измерения выходного напряжения не менее, чем в 10 точках;

— рассчитайте значение коэффициента усиления на частоте 1 кГц.

2.4.9. Исследуйте влияние элементов схемы на амплитудно-частотную характеристику каскада с ОК. Для этого выполните следующие действия:

— переключатель « S_3 » на модуле «Апериодический усилитель» установите в среднее положение («Отключено»);

— подключите к входу каскада с ОК (гнезда «кТб» и «Общий») выход осциллографа «*Gen Out*» и параллельно ему к этим же гнездам подключите вход канала 1 осциллографа;

— подключите канал 2 осциллографа к выходу исследуемой схемы (гнезда « $U_{\text{ВЫХ1}}$ » и «Общий»);

— установите на осциллографе режим анализа. Для этого нажмите кнопку «*Analyze*», затем нажмите кнопку «Функции *FRA*» и выберете режим «Анализ частотной характеристики». Нажмите кнопку «Настройки» и установите минимальную частоту анализа 20 Гц, максимальную — 20 МГц, амплитуду входного напряжения — 3 V_{pp} .

Установите переключатель « R_H » в положение 1 ($R_H = 50 \text{ Ом}$).

2.4.10. Измерение амплитудно-частотной характеристики и определение нижней и верхней граничных частот полосы пропускания произведите в следующей последовательности:

— нажмите кнопку «Пуск». После этого на экране осциллографа через некоторое время (50—60 с) появится изображение АЧХ исследуемого каскада;

— вращая ручку «*Entry*», установите курсор в положение, соответствующее частоте 1 кГц, и определите коэффициент усиления на этой частоте.

Сравните полученное значение с измеренным при исследовании амплитудной характеристики (см. п. 2.4.8);

— переместите курсор в сторону нижних частот, установите его в положение, соответствующее частоте 20 Гц, и определите коэффициент усиления на этой частоте. Рассчитайте коэффициент частотных искажений на частоте 20 Гц (коэффициент частотных искажений находят как разность выраженных в децибелах коэффициентов усиления на данной частоте и на частоте 1 кГц);

— переместите курсор в сторону верхних частот и установите его в положение, соответствующее частоте 20 МГц, определите коэффициент усиления на этой частоте и рассчитайте коэффициент частотных искажений на частоте 20 МГц;

— изменяя положение курсора от 20 Гц до 20 МГц снимите зависимость коэффициента усиления от частоты (используйте следующий шаг измерения частоты: 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, Гц и т.д.).

2.4.11. Установите переключатель « R_H » в положение 2 ($R_H = 100 \text{ Ом}$). Измерьте АЧХ усилителя и частотные искажения на частотах 20 Гц и 20 МГц в соответствии с методикой, изложенной в п. 2.4.10.

2.4.12. Установите переключатель « R_H » в положение 3 ($R_H = 500 \text{ Ом}$). Измерьте АЧХ усилителя и частотные искажения на частотах 20 Гц и 20 МГц в соответствии с методикой, изложенной в п. 2.4.10.

2.4.13. Измерьте АЧХ усилителя и частотные искажения на частотах 20 Гц и 20 МГц при отсутствии разделительного конденсатора (C_4) на выходе каскада с ОК. Для этого канал 2 осциллографа подключите к гнездам « $U_{\text{ВЫХ}}$ » и

«Общий», установите переключатель « R_H » в положение 2 ($R_H = 100 \text{ Ом}$) и повторите измерения в соответствии с п. 2.4.10.

2.4.14. Исследуйте влияние сопротивления нагрузки каскада с ОК на его входное сопротивление:

— подключите выход модуля «Функциональный генератор» к входу каскада с ОЭ (гнезда «кт1» и «Общий»). Установите частоту 1 кГц, форма сигнала — синусоида, выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}} = 0$;

— переключатель «S3» установите в верхнее положение (выход каскада с ОЭ подключен к входу каскада с ОК);

— канал 1 осциллографа подключите к входу каскада с ОК (гнезда «кт6» и «Общий»), канал 2 — к выходу схемы (гнезда « $U_{\text{ВЫХ1}}$ » и «Общий»). Нажмите кнопку «Meas» и установите на каналах 1 и 2 осциллографа режим измерения переменных напряжений (измерение «AC RMS (ПЭ)»);

— установите переключатель « R_H » в положение 1 ($R_H = 50 \text{ Ом}$).

2.4.15. Измерение входного сопротивления каскада с общим коллектором проведите в следующей последовательности:

— вращая ручку « R_6 » по часовой стрелке установите его в крайнее положение ($R_6 = 0$);

— изменяя величину резистора R_2 модуля «Апериодический усилитель» и увеличивая напряжение на выходе модуля «Функциональный генератор» установите на выходе каскада с ОК максимальное неискаженное напряжение;

— вращая ручку «Амплитуда» модуля «Функциональный генератор» уменьшите напряжение на выходе каскада с ОК в 2 раза;

— измерьте напряжение U_1 на выходе каскада с ОК;

— вращая ручку « R_6 » против часовой стрелки установите его в крайнее положение ($R_6 = 1 \text{ кОм}$);

— измерьте напряжение U_2 на выходе каскада с ОК;

— рассчитайте входное сопротивление каскада с общим коллектором по формуле

$$R_{\text{вх}} = R_1 \frac{U_2}{U_1 - U_2}, \quad (2.6)$$

где $R_1 = 1 \text{ кОм}$;

U_1 — напряжение на выходе каскада с ОК при $R_1 = 0$;

U_2 — напряжение на выходе каскада с ОК при $R_1 = 1 \text{ кОм}$;

2.4.16. Установите переключатель « R_H » в положение 2 ($R_H = 100 \text{ Ом}$) и измерьте входное сопротивление каскада (см. п. 2.4.14) при сопротивлении нагрузки равном $R_H = 100 \text{ Ом}$.

2.4.17. Установите переключатель « R_H » в положение 3 ($R_H = 500 \text{ Ом}$) и измерьте входное сопротивление каскада (см. п. 2.4.14) при сопротивлении нагрузки равном $R_H = 500 \text{ Ом}$.

2.4.18. Сделайте выводы по работе, поясняющие влияние элементов схемы на АЧХ, частотные искажения на нижних и верхних частотах, входное сопротивление каскада.

2.5. Содержание отчета

2.5.1. Цель работы и постановка задач исследования.

2.5.2. Принципиальная схема каскада с ОК.

2.5.3. Результаты измерений по п. 2.4.3—2.4.5 и значения напряжений база—эмиттер транзистора при различных сопротивлениях нагрузки.

2.5.4. Результаты измерений, проведенных в п. 2.4.8, и амплитудная характеристика, построенная по этим измерениям.

2.5.5. Результаты измерений, проведенных в п. 2.4.10—2.4.13, а также амплитудно-частотные характеристики, построенные по этим данным.

2.5.6. Результаты измерений и расчетов, проведенных в п. 2.4.15—2.4.17.

2.5.7. Выводы по работе.

2.6. Контрольные вопросы

2.6.1. Поясните назначение элементов схемы каскада с общим коллектором.

2.6.2. Покажите на схеме каскада с общим коллектором пути протекания постоянных и переменных токов.

2.6.3. Что называется динамическим диапазоном усилителя? Как его можно определить?

2.6.4. Что называется амплитудно-частотной характеристикой усилительного каскада?

2.6.5. Поясните методику измерения амплитудно-частотной характеристики.

2.6.6. Что называется нижней и верхней граничными частотами полосы пропускания? Как они определяются?

2.6.7. Как экспериментально определить полосу пропускания усилителя?

2.6.8. Что определяет (ограничивает) максимальную амплитуду выходного напряжения усилительного каскада с общим коллектором?

2.6.9. Как можно расширить полосу пропускания каскада в области нижних частот? В области верхних частот?

2.6.10. Поясните методику измерения входного сопротивления каскада.

2.6.11. Какие элементы схемы определяют входное сопротивление эмиттерного повторителя?

2.6.12. По какой формуле обычно рассчитывают входное сопротивление эмиттерного повторителя?

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

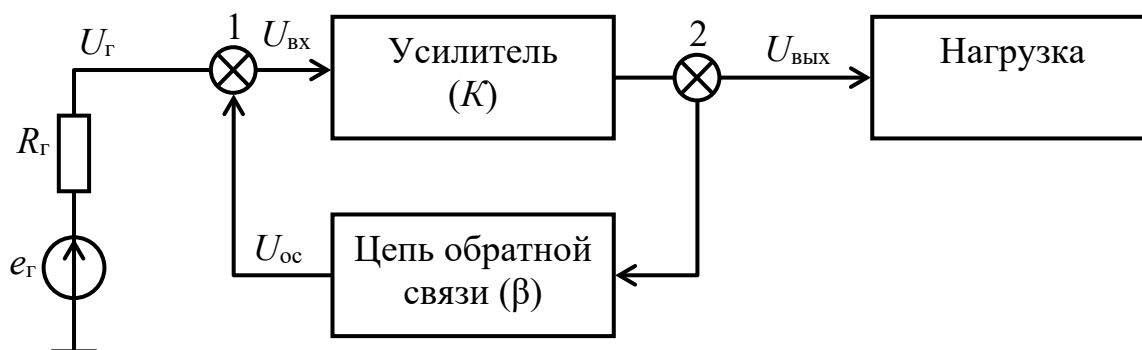
3.1. Цель работы

Определить основные показатели и изучить влияние элементов цепей обратной связи на амплитудно-частотную характеристику усилительного каскада.

3.2. Краткие теоретические сведения

При необходимости расширить полосу пропускания усилителя, улучшить его переходную характеристику или получить амплитудно-частотную характеристику, отличающуюся от линейной, в усилитель вводят частотно-независимые или частотно-зависимые цепи обратной связи.

Обратной связью (ОС) называют такую связь между цепями усилителя, посредством которой энергия передается из последующих цепей или каскадов в предыдущие, т.е. в направлении обратном тому, которое имеет место в процессе усиления сигналов (рис. 3.1).



1 — устройство ввода сигнала обратной связи;

2 — устройство снятия сигнала обратной связи;

Рис. 3.1 — Усилитель, охваченный внешней цепью обратной связи

Обратная связь может сильно влиять на свойства и характеристики усилителя. Разработка усилителя с параметрами, удовлетворяющими современным требованиям, невозможна без использования обратной связи.

Различают:

1) внешнюю обратную связь, обусловленную введением специальных цепей, преднамеренно создающих по желанию разработчика в каскаде или усилителе обратную связь для изменения свойств в нужном направлении;

2) паразитную обратную связь, обусловленную неудачным расположением и монтажом усилительных каскадов или неидеальностью элементов, когда паразитные емкостные и индуктивные связи создают путь для передачи колебаний с выхода на вход.

Если при сложении колебаний источника сигнала (U_r) с колебаниями, поступающими с выхода через цепь обратной связи (U_{oc}), амплитуда результирующего колебания на входе усилителя ($U_{вх}$) возрастает, то такую ОС называют положительной обратной связью (ПОС), если амплитуда результирующего колебания уменьшается, то такую ОС называют отрицательной обратной связью (ООС).

При ПОС колебания на входе складываются в фазе, при ООС — в противофазе.

В усилителях положительная обратная связь обычно является вредной, так как может вызвать самовозбуждение усилителя. Присущие усилителям фазовые сдвиги изменяются с изменением частоты, поэтому обратная связь, отрицательная на одних частотах, может превратиться в положительную на других. Обычно изменение знака ОС происходит за пределами рабочего диапазона частот.

Если коэффициент передачи β цепи ОС остается постоянным в полосе рабочих частот, то такую ОС называют частотно-независимой, если не остается постоянным, то называют частотно-зависимой.

Обратная связь может быть: по постоянной и переменной составляющим, регулируемой (переменной).

По способу снятия различают обратную связь по току, напряжению и комбинированную. Способ снятия ОС необходимо учитывать при определении влияния ОС на выходное сопротивление усилителя.

По способу ввода обратной связи различают последовательную, параллельную и комбинированную. Способ ввода ОС необходимо учитывать при определении влияния ОС на входное сопротивление усилителя.

При всех способах снятия и ввода обратной связи коэффициент усиления устройства с отрицательной и положительной обратной связью определяют из соотношений

$$K_{оос}^* = \frac{K^*}{1 + \beta K^*} ; \quad (3.1)$$

$$K_{пос}^* = \frac{K^*}{1 - \beta K^*} , \quad (3.2)$$

где $K_{оос}^*$ и $K_{пос}^*$ — коэффициенты усиления при отрицательной и положительной обратной связи соответственно.

Видно, что ООС снижает коэффициент усиления устройства. Величину, показывающую во сколько раз изменяется коэффициент усиления при введении обратной связи, называют глубиной обратной связи.

При ООС глубину обратной связи рассчитывают из соотношения

$$F = 1 + \beta K^* , \quad (3.3)$$

где F — глубина обратной связи;

β — коэффициент передачи цепи обратной связи;

K^* — сквозной коэффициент усиления усилителя.

Положительная обратная связь увеличивает коэффициент усиления устройства. Если при этом $\beta K^* = 1$, то коэффициент усиления становится бесконечно большим, что физически соответствует самовозбуждению устройства.

При введении в усилитель частотно-независимой ООС коэффициент передачи цепи обратной связи β остается постоянным и не зависит от частоты, а глубина обратной связи F при неравномерной АЧХ зависит от величины коэффициента усиления усилителя без ОС на низких и высоких частотах. Так как на низких и высоких частотах коэффициент усиления уменьшается, по сравнению с областью средних частот, то в области средних частот, где коэффициент усиления наибольший, глубина ООС наибольшая и уменьшение коэффициента усиления после ввода ООС будет наибольшим. В области НЧ и ВЧ, где коэффициент усиления меньше, чем в области средних частот, глубина ООС уменьшается, и вводимая ООС уменьшит K^* в меньшее количество раз. За счет этого полоса пропускания усилителя с ООС расширяется (рис. 3.2).

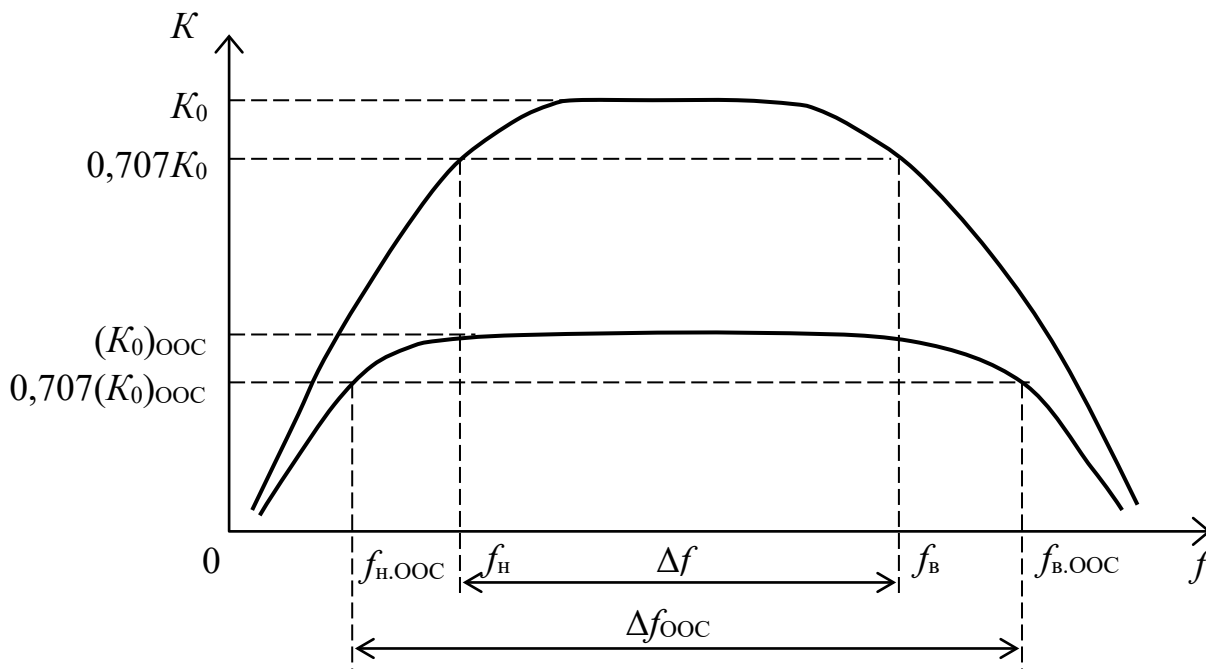


Рис. 3.2 — Влияние отрицательной обратной связи на АЧХ усилителя

Таким образом, частотно-независимая ООС, уменьшая усиление устройства, уменьшает его частотные искажения и расширяет полосу пропускания. Коэффициент частотных искажений с ООС находят из выражения:

$$M_{\text{оос}} = \frac{M-1}{1+\beta K^*} + 1, \quad (3.4)$$

где $M_{\text{оос}}$ — коэффициент частотных искажений усилителя, охваченного ООС;
 M — коэффициент частотных искажений усилителя без ОС.

При введении частотно-зависимой ОС коэффициент передачи цепи обратной связи β меняет свою величину в рабочей полосе частот. При этом АХЧ усилителя приобретает подъемы и спады. Частотно-зависимую ОС используют для корректирования характеристик в области нижних, средних и верхних частот, в блоках регулировки тембра, для конструирования частотно-избирательных усилителей и т.д.

Введение ООС в усилитель, обладающий нелинейной амплитудной характеристикой, линеаризует ее вид. Следствием этого является то, что при одном и том же уровне выходного напряжения коэффициент гармоник в усилителе, охваченном ООС, оказывается меньше, чем коэффициент гармоник усилителя без обратной связи

$$K_{\text{Г.оос}} = \frac{K_{\text{Г}}}{1+\beta K^*}, \quad (3.5)$$

где $K_{\text{Г.оос}}$ — коэффициент гармоник усилителя, охваченного ООС;
 $K_{\text{Г}}$ — коэффициент гармоник без ОС.

Коэффициент усиления усилительного каскада и положение его точки покоя изменяется от воздействия различных дестабилизирующих факторов. Введение ООС по переменной составляющей уменьшает нестабильность усиления усилителя во столько же раз, во сколько она снижает его сквозной коэффициент усиления. Это позволяет создавать высокостабильные усилители, находящие применение в измерительной технике, системах многоканальной связи и т.д.

Введение ООС по постоянной составляющей повышает стабильность положения точки покоя.

Нестабильность сквозного коэффициента усиления при обратной связи по переменному току или нестабильность положения точки покоя при обратной связи по постоянному току находят из выражения:

$$dq_{\text{оос}} = \frac{dq}{1+\beta K^*}, \quad (3.6)$$

где $dq_{\text{оос}}$ — нестабильность сквозного коэффициента усиления (положения точки покоя) усилителя охваченного ООС;

dq — нестабильность усилителя без ОС.

Введение обратной связи изменяет как входное, так и выходное сопротивления устройства, которое она охватывает. Характер изменения входного сопротивления определяется способом введения обратной связи во входную цепь и не зависит от способа ее снятия с цепи выхода. Характер изменения выходного сопротивления определяется способом снятия напряжения обратной связи с выходной цепи и не зависит от способа ее введения во входную цепь.

Входное сопротивление усилителя при последовательной по способу ввода положительной и отрицательной обратной связи определяют из выражений:

$$Z_{\text{вх.ПОС}} = Z_{\text{вх}} (1 - \beta K) ; \quad (3.7)$$

$$Z_{\text{вх.ООС}} = Z_{\text{вх}} (1 + \beta K) . \quad (3.8)$$

где $Z_{\text{вх.ПОС}}$, $Z_{\text{вх.ООС}}$ — входное сопротивление усилителя охваченного последовательной ПОС и ООС соответственно;

$Z_{\text{вх}}$ — входное сопротивление усилителя без ОС.

Последовательная по способу ввода отрицательная обратная связь увеличивает полное входное сопротивление той части устройства, которую она охватывает. Если входное сопротивление имеет активную и емкостную составляющие, то последовательная ООС, увеличивая полное входное сопротивление, увеличивает активную составляющую входного сопротивления и уменьшает входную емкость

$$R_{\text{вх.ООС}} = R_{\text{вх}} (1 + \beta K), \quad (3.9)$$

$$C_{\text{вх.ООС}} = C_{\text{вх}} / (1 + \beta K) . \quad (3.10)$$

Входная проводимость усилителя, охваченного параллельной по способу ввода ООС, определяется следующим выражением:

$$Y_{\text{вх.ООС}} = Y_{\text{вх}} + Y_{\text{ос}} (1 + K), \quad (3.11)$$

где $Y_{\text{ос}}$ — проводимость цепи обратной связи.

Соответственно входное сопротивление можно найти из выражения

$$Z_{\text{вх.ООС}} = \frac{1}{Y_{\text{вх.ООС}}} = \frac{Z_{\text{вх}} Z_{\text{ос}}}{Z_{\text{вх}} (1 + K) + Z_{\text{ос}}} . \quad (3.12)$$

При параллельной отрицательной обратной связи входная цепь усилителя шунтируется уменьшенным в $(1 + K)$ раз сопротивлением обратной связи, что уменьшает входное сопротивление той части устройства, которая охвачена ОС.

При параллельной по способу ввода ПОС входная проводимость определяется из соотношения

$$Y_{\text{вх.ПОС}} = Y_{\text{вх}} + Y_{\text{ос}}(1 - K) . \quad (3.13)$$

Откуда видно, что параллельная ПОС при $K > 1$ уменьшает входную проводимость и соответственно увеличивает входное сопротивление.

Способ снятия обратной связи влияет на выходное сопротивление усилителя. Отрицательная обратная связь по напряжению уменьшает выходное сопротивление устройства

$$Z_{\text{вых.ООС}} = \frac{Z_{\text{вых}}}{1 + \beta K^*} . \quad (3.14)$$

где $Z_{\text{вых.ООС}}$ — выходное сопротивление усилителя охваченного ООС;

$Z_{\text{вых}}$ — выходное сопротивление усилителя без ОС.

Отрицательная обратная связь по току увеличивает выходное сопротивление устройства

$$Z_{\text{вых.ООС}} = Z_{\text{вых}} (1 + \beta K^*) . \quad (3.15)$$

3.3. Описание лабораторной установки

В состав лабораторной установки входят: модули «Усилитель с обратной связью» (рис. 3.3), «Функциональный генератор» (рис. 1.6), а также двухлучевой цифровой осциллограф типа «KEYSIGHT DSOX 1102G» (рис. 1.9).

На лицевой панели модуля «Усилитель с обратной связью» находятся гнезда для подключения источников входного сигнала, нагрузки и измерительных приборов, гнезда для измерения напряжений и контроля формы сигналов в узлах исследуемой схемы.

Переключатель $S1$ предназначен для подключения к эмиттеру транзистора $VT1$ конденсатора $C2$, шунтирующего напряжение ООС по переменному току. Переключатели для ступенчатого изменения величины сопротивлений $R5$ и $R10$ расположены непосредственно под исследуемой схемой. В нижней части модуля размещен выключатель напряжения питания.

Схема исследуемого усилителя с обратной связью изображена на рис. 3.4. Конструктивно он собран в модуле «Усилитель с обратной связью». Усилитель содержит два каскада на транзисторах $VT1$ и $VT2$, включенных по схеме с общим эмиттером.

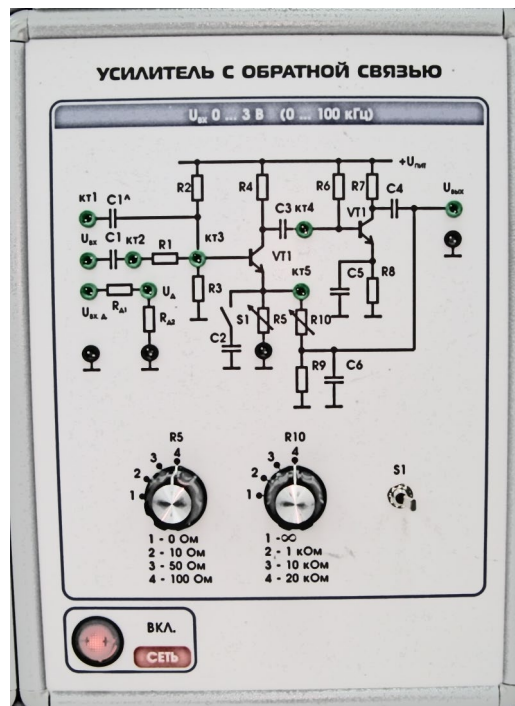


Рис. 3.3 — Внешний вид модуля «Усилитель с обратной связью»

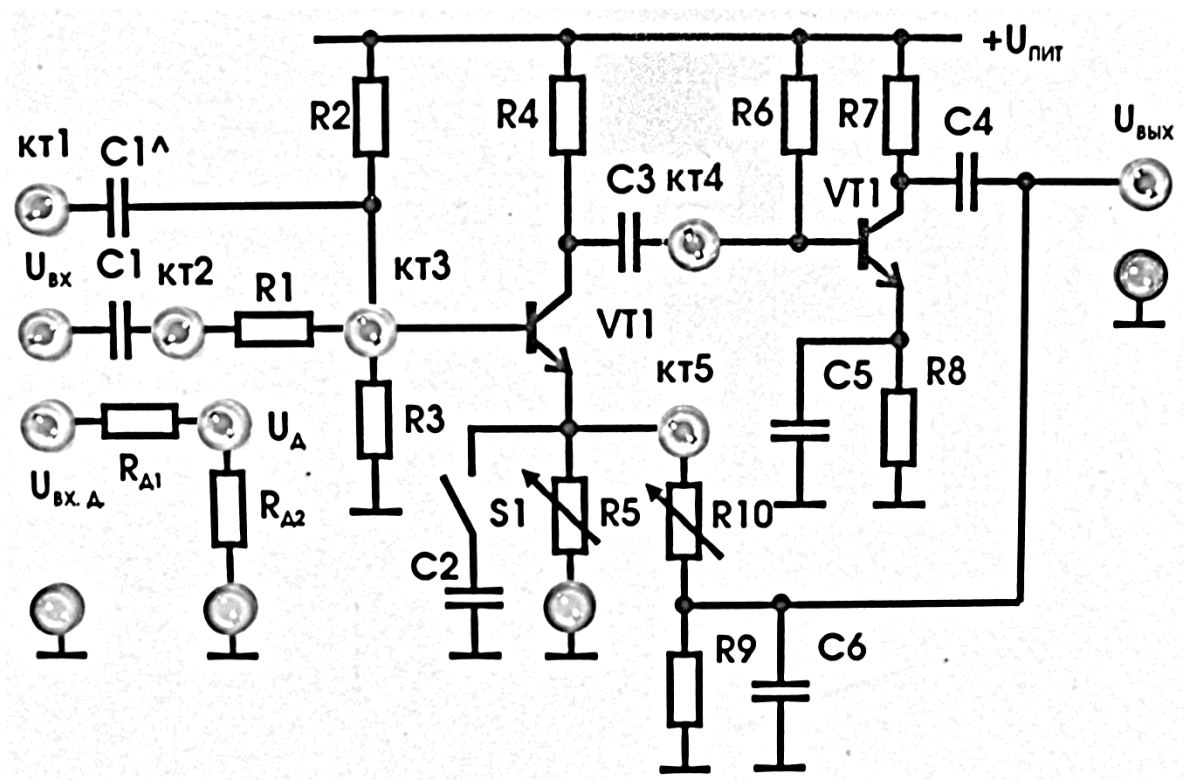


Рис. 3.4 — Изображение схемы подключений на лицевой панели лабораторного макета

Входом исследуемой схемы служат гнезда «к1» и «Общий». Резистор $R1$ введен в схему для обеспечения возможности измерения входного сопротивления. При измерении входного сопротивления входное напряжение от источника сигнала подается на гнезда « $U_{вх}$ » и «Общий».

Выходом двухкаскадного усилителя являются гнезда « $U_{вых}$ » и «Общий».

Резисторы $R2$, $R3$ и $R6$ предназначены для обеспечения режима работы транзисторов по постоянному току.

В исследуемом усилителе имеется местная последовательная по току отрицательная обратная связь, снимаемая с резистора $R5$, а также последовательная по напряжению отрицательная обратная связь, охватывающая два усилительных каскада. Глубина этой обратной связи может ступенчато регулироваться с помощью переменного резистора $R10$.

Делитель напряжения $R_{д1}$ — $R_{д2}$ может быть использован для уменьшения амплитуды входного напряжения, при необходимости исследования схемы с малыми напряжениями на входе.

3.4. Порядок выполнения работы

3.4.1. Переключатель $S1$ поставьте в левое положение («Отключено»). Резистор $R5$ — в положение 2 ($R5 = 10 \text{ Ом}$). Резистор $R10$ — в положение 1 ($R10 = \infty$).

3.4.2. Подсоедините выход модуля «Функциональный генератор» ко входу делителя (гнезда « $U_{вх.д}$ » и «Общий»). Выход делителя (гнезда « $U_{д}$ » и «Общий») подсоедините ко входу исследуемого усилителя (гнезда «к1» и «Общий»). Канал 1 цифрового осциллографа подсоедините ко входу схемы (гнезда «к1» и «Общий»), а канал 2 осциллографа к выходу схемы (гнезда « $U_{вых}$ » и «Общий»).

3.4.3. Включите модуль и «Функциональный генератор» и установите частоту 1 кГц, выходное напряжение — $U = 0 \text{ В}$, форма выходного напряжения — синусоидальная. Включите модуль «Усилитель с обратной связью».

Включите цифровой осциллограф и установите режим измерения напряжений. Для этого нажмите кнопку «Mess» и установите для входов 1 и 2 измерение напряжений «DC RMS-ПЭ». Измеренные напряжения будут отображаться в нижней части экрана.

3.4.4. Определите коэффициент усиления исследуемой схемы. Для этого:

— увеличивая напряжение на входе исследуемой схемы установите максимальное неискаженное напряжение сигнала на выходе;

— используя цифровой осциллограф, измерьте напряжения на входе и выходе;

— рассчитайте коэффициент усиления.

3.4.5. Установите переключатель « $R5$ » в положение 3 ($R5 = 50 \text{ Ом}$). При этом глубина отрицательной обратной связи увеличится.

Определите коэффициент усиления схемы для установленной ООС (повторите п. 3.4.4).

3.4.6. Установите переключатель « $R5$ » в положение 4 ($R5 = 100 \text{ Ом}$) и определите коэффициент усиления схемы для установленного значения резистора $R5$ (повторите п. 3. 4.4).

3.4.7. Проанализируйте полученные результаты и определите зависимость коэффициента усиления от глубины последовательной по току отрицательной обратной связи.

3.4.8. Установите переключатель « $R5$ » в положение 3 ($R5 = 50 \text{ Ом}$), переключатель « $R10$ » в положение 1 ($R10 = \infty$).

Определите зависимость коэффициента усиления от глубины последовательной по напряжению ООС. Для этого:

- увеличивая напряжение на входе установите максимальное неискаженное напряжение сигнала на выходе;

- определите напряжения на входе и выходе схемы;

- рассчитайте коэффициент усиления.

- переключатель « $R10$ » установите в положение 2 ($R10 = 1 \text{ кОм}$), установите на выходе усилителя максимальное неискаженное напряжение и определите коэффициент усиления схемы;

- переключатель « $R10$ » установите в положение 3 ($R10 = 10 \text{ кОм}$), установите на выходе усилителя максимальное неискаженное напряжение и определите коэффициент усиления схемы;

- переключатель « $R10$ » установите в положение 4 ($R10 = 20 \text{ кОм}$), установите на выходе усилителя максимальное неискаженное напряжение и определите коэффициент усиления схемы.

Сделайте выводы о зависимости коэффициента усиления от глубины последовательной по напряжению ООС.

3.4.9. Исследуйте влияние обратной связи на амплитудно-частотную характеристику усилителя и полосу пропускания усилителя.

Подключите выход цифрового осциллографа «*Gen Out*» (см. рис. 1.9) ко входу усилителя (гнезда « $KT1$ » и «Общий»). К этим же гнездам лабораторного макета подключите канал 1 цифрового осциллографа. Канал 2 цифрового осциллографа подключите к выходу исследуемой схемы (гнезда « $U_{\text{вых}}$ » и «Общий»). Осциллограф переведите в режим «Анализ» (нажмите кнопку «*Analyze*»). Далее нажмите кнопку «Функции *FRA*» и выберите режим «Анализ частотной характеристики». Нажмите кнопку «Настройки» и установите минимальную частоту анализа — 20 Hz ; максимальную частоту анализа — 20 MHz ; амплитуду входного напряжения — 50 mVpp .

Установите переключатель « $R5$ » в положение 4 ($R5 = 100 \text{ Ом}$), переключатель « $R10$ » в положение 2 ($R10 = 1 \text{ кОм}$).

3.4.10. Измерение амплитудно-частотной характеристики и определение нижней и верхней граничных частот полосы пропускания произведите в следующей последовательности:

— нажмите кнопку «Пуск». После этого на экране осциллографа через некоторое время (50—60 с) появится изображение АЧХ исследуемого усилителя;

— включите на осциллографе режим измерения с помощью курсора (нажмите кнопку «*Cursors*») (см. рис. 1.9);

— вращая ручку «*Entry*» и изменяя положение курсора, определите коэффициент усиления на частоте 1 кГц;

— перемещая курсор в сторону нижних частот определите частоту f_n , на которой коэффициент усиления уменьшается на 3 дБ;

— перемещая курсор в сторону верхних частот определите частоту f_v , на которой коэффициент усиления уменьшится на 3 дБ относительно коэффициента усиления на частоте 1 кГц.

— полученные частоты f_n и f_v являются граничными частотами полосы пропускания усилителя;

— изменяя положение курсора от 20 Гц до 20 МГц измерьте зависимость коэффициента усиления от частоты.

3.4.11. Установите переключатель «*R5*» в положение 3 ($R5 = 50 \text{ Ом}$), переключатель «*R10*» остается в положении 2 ($R10 = 1 \text{ кОм}$). Измерьте АЧХ усилителя и определите полосу пропускания в соответствии с методикой, изложенной в п. 3.4.10.

3.4.12. Установите переключатель «*R10*» в положении 1 ($R10 = \infty$), переключатель «*R5*» остается в положении 3 ($R5 = 50 \text{ Ом}$). Измерьте АЧХ усилителя и определите полосу пропускания в соответствии с методикой, изложенной в п. 3.4.10.

3.4.13. Сделайте выводы о влиянии обратной связи на полосу пропускания усилителя.

3.5. Содержание отчета

3.5.1. Цель работы.

3.5.2. Принципиальная схема лабораторного макета.

3.5.3. Результаты измерений, проведенных в п. 3.4.4—3.4.8 и рассчитанные коэффициенты усиления.

3.5.4. Результаты измерений, проведенных в п. 3.4.9—3.4.12, а также амплитудно-частотные характеристики, построенные по этим данным.

3.5.5. Экспериментально найденные (по п. 3.4.9—3.4.12) граничные частоты полосы пропускания усилителя при различной глубине ООС.

3.5.6. Таблица сравнения коэффициентов усиления на частоте 1 кГц, найденных при проведении измерений по п. 3.4.4—3.4.8 и по п. 3.4.9—3.4.12.

3.5.5. Выводы по работе.

3.6. Контрольные вопросы

3.6.1. Что такое обратная связь?

3.6.2. Поясните способы снятия и ввода обратной связи.

3.6.3. Как влияют частотно-независимая и частотно-зависимая обратные связи на характеристики усилителя?

3.6.4. Найдите на принципиальной схеме лабораторного макета обратные связи и определите их знак (положительная или отрицательная). Поясните их принцип действия.

3.6.5. Какими методами можно осуществить коррекцию амплитудно-частотной и переходной характеристик усилителя?

3.6.6. Как изменяется АЧХ усилителя при введении частотно-зависимой обратной связи?

3.6.7. Как изменяется входное сопротивление усилителя при последовательной и параллельной по способу ввода отрицательной обратной связи?

3.6.8. Определите способ снятия и способ ввода обратных связей, используемых в лабораторном макете.

3.6.9. Поясните принцип действия низкочастотной коррекции.

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОУ

4.1. Цель работы

Изучить основные параметры инвертирующего и неинвертирующего усилителей, собранных на основе операционного усилителя, с учетом влияния элементов схемы на амплитудную и амплитудно-частотную характеристики.

4.2. Краткие теоретические сведения

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель постоянного тока с дифференциальным входом и несимметричным выходом, имеющий весьма большие коэффициент усиления и входное сопротивление.

Термин «операционный» обусловлен тем, что в аналоговых устройствах эти усилители используются для проведения различных математических операций (масштабирования, сложения, вычитания интегрирования, дифференцирования и т.д.) над входными сигналами.

Идеальный операционный усилитель отличается следующими свойствами: бесконечный коэффициент усиления; бесконечная полоса рабочих частот; бесконечное входное сопротивление; нулевое выходное сопротивление.

Рассмотрим условное графическое обозначение (УГО) ОУ на принципиальных схемах (рис. 4.1). Микросхемы ОУ имеют выводы для подключения источника сигнала и нагрузки, напряжения питания ($+U_{\text{ип}}$, $-U_{\text{ип}}$), цепей балансировки (NC), элементов высокочастотной коррекции (FC). Цифры на УГО обозначают номера выводов микросхемы.

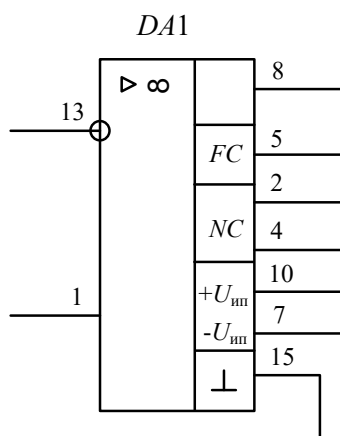


Рис. 4.1 — Пример УГО микросхемы ОУ

Операционные усилители обычно имеют два входа: инвертирующий (на УГО его выделяют кружочком) и неинвертирующий. В рассматриваемом примере вывод микросхемы № 13 является инвертирующим входом (вход 1), а вывод № 1 — неинвертирующим (вход 2). При подаче напряжения на неинвертирующий вход (вывод № 1) выходное напряжение будет синфазно с входным (полученный в этом случае усилитель называют «неинвертирующим»), а при подаче напряжения на инвертирующий вход (вывод № 13) выходное напряжение будет в противофазе с входным (полученный в этом случае усилитель называют «инвертирующим»).

Рассмотрим типичную структурную схему ОУ (рис. 4.2). На входе ОУ устанавливают дифференциальный каскад (ДК). Входы 1 и 2 дифференциального каскада являются входами операционного усилителя. Один из входов («Вход 1» см. рис. 4.2) является инвертирующим (он обозначен кружочком), второй вход («Вход 2» см. рис. 4.2) является неинвертирующим. Дифференциальный каскад имеет выводы, предназначенные для подключения внешних цепей балансировки ОУ. При проведении балансировки усилителя его входные выводы соединяют с общей шиной и добиваются нулевого напряжения на выходе.

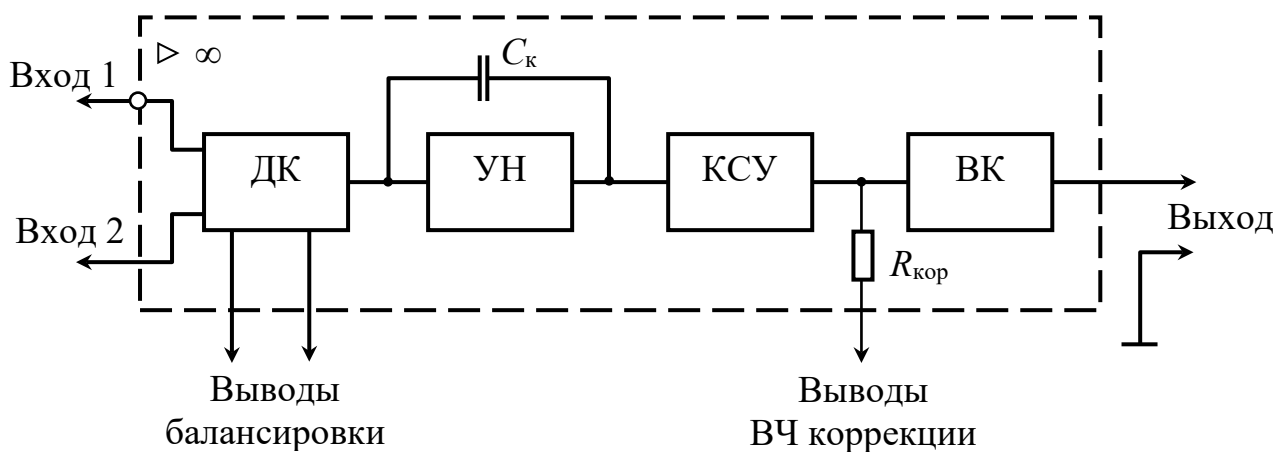


Рис. 4.2 — Типичная структурная схема операционного усилителя

Усилитель напряжения (УН) (см. рис. 4.2) предназначен для основного усиления сигнала по напряжению и обычно выполняется по схеме с динамической нагрузкой.

Каскад сдвига уровня (КСУ) предназначен для сдвига уровня постоянного выходного напряжения таким образом, чтобы при подаче на вход нулевого напряжения ($U_{вх} = 0$) выходное напряжение также было бы равно нулю ($U_{вых} = 0$).

Выходной каскад (ВК) — это обычно двухтактный каскад, транзисторы которого включены по схеме с общим коллектором и работают в режиме *AB*.

В схему ОУ могут быть включены цепи внутренней высокочастотной коррекции, которые предназначены для устранения паразитной генерации

операционного усилителя на высоких частотах. Например, конденсатор C_k (см. рис. 4.2) емкостью от 10 до 30 пФ, образующий цепь частотно-зависимой отрицательной обратной связи, охватывающей каскад УН. Кроме этого, во многих типах ОУ имеются выводы для подключения внешних цепей ВЧ коррекции.

Типичными значениями основных параметров микросхем ОУ являются:

- коэффициент усиления K_{ou} — не менее 20000;
- входное сопротивление $R_{вх\ ou}$ — не менее 10 кОм;
- выходное сопротивление $R_{вых\ ou}$ — не более 200 Ом;
- частота единичного усиления — не менее 1 МГц,
- скорость нарастания выходного напряжения $V_{U_{вых}}$ — не более 100 В/мкс.

При построении усилителей на основе ОУ последний охватывают глубокой отрицательной обратной связью, которая заводится с выхода ОУ на инвертирующий вход. При этом параметры полученного усилителя определяются в основном параметрами элементов внешней обратной связи и практически не зависят от свойств ОУ.

На основе ОУ можно получить инвертирующий (рис. 4.3) и неинвертирующий (рис. 4.4) усилители.

В инвертирующем усилителе входное напряжение подается на инвертирующий вход (см. рис. 4.3).

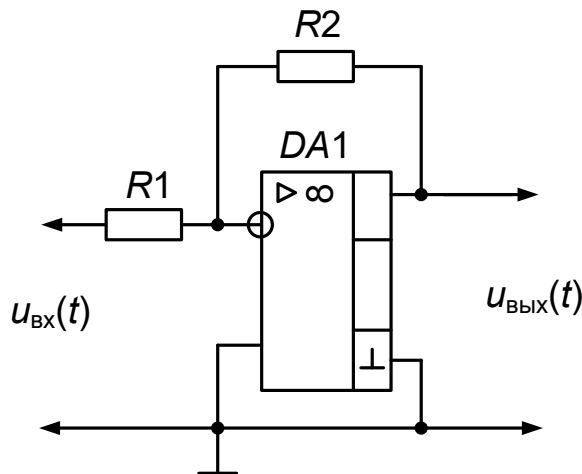


Рис. 4.3 — Схема инвертирующего усилителя на ОУ

Коэффициент усиления $K_{и}$ инвертирующего усилителя может быть найден из соотношения [1—3]

$$K_{и} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R_2}{R_1}, \quad (4.1)$$

где $K_{\text{и}}$ — коэффициент усиления инвертирующего усилителя;

$U_{\text{вых}}$ — действующее напряжение на выходе усилителя;

$U_{\text{вх}}$ — действующее напряжение на входе усилителя;

R_1, R_2 — сопротивления резисторов цепи обратной связи.

Знак минус в выражении (4.1) свидетельствует об инвертировании сигнала на выходе по отношению к входному сигналу.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя равно [1—3]

$$R_{\text{вх}} = R_1. \quad (4.2)$$

На рис. 4.4 изображена схема неинвертирующего усилителя.

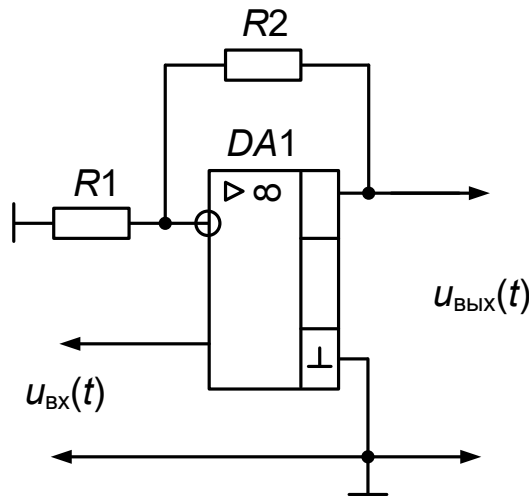


Рис. 4.4 — Схема неинвертирующего усилителя на ОУ

Коэффициент усиления $K_{\text{ни}}$ и входное сопротивление неинвертирующего усилителя $R_{\text{вх}}$ (см. рис. 4.4) определяются выражениями [1—3]:

$$K_{\text{ни}} = \frac{R_2}{R_1} + 1, \quad (4.3)$$

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{вх ОУ}} \frac{K_{\text{ОУ}}}{K_{\text{ни}}}, \quad (4.4)$$

где $K_{\text{ОУ}}$ — коэффициент усиления операционного усилителя;

$R_{\text{вх ОУ}}$ — входное сопротивление микросхемы ОУ.

Как следует из соотношений (4.1) и (4.3), коэффициенты усиления в обеих схемах зависят только от отношения сопротивлений резисторов R_2 и R_1 и не зависят от коэффициента усиления микросхемы операционного усилителя.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя равно сопротивлению резистора R_1 (см. выражение (4.2)), а неинвертирующего — определяется по формуле (4.4). Оно зависит от входного сопротивления микросхемы ОУ без обратной связи $R_{\text{вх ОУ}}$ и отношения коэффициентов усиления микросхемы ОУ без обратной связи $K_{\text{ОУ}}$ и усилителя с обратной

связью $K_{\text{ни}}$. При глубокой обратной связи входное сопротивление неинвертирующего усилителя может быть очень большим (сотни Мегаом и более).

Выходное сопротивление для обеих схем включения может быть найдено из соотношения [1—3]

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{выхОУ}} \frac{K}{K_{\text{ОУ}}}, \quad (4.5)$$

где $R_{\text{вых ОУ}}$ — выходного сопротивления микросхемы ОУ;

$K = K_{\text{и}}$ для схемы инвертирующего усилителя или $K = K_{\text{ни}}$ для схемы неинвертирующего усилителя.

Обычно в усилителях выполняется условие $K \ll K_{\text{ОУ}}$ поэтому в практических схемах усилителей выходное сопротивление не превышает единиц Ом.

На основе неинвертирующего усилителя можно построить повторитель напряжения, коэффициент усиления которого близок к единице, а входное сопротивление очень велико (рис. 4.5).

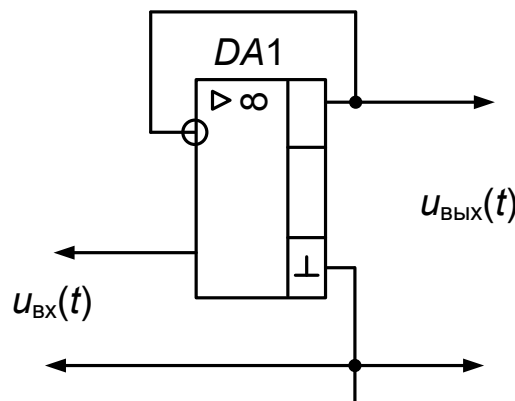


Рис. 4.5 — Схема повторителя напряжения на ОУ

Для повторителя напряжения (см. рис. 4.5), положив $R_2 = 0$, $R_1 = \infty$ из выражения (4.3) получим

$$K_{\text{ни}} = 1.$$

Рассмотрим идеализированные амплитудно-частотные характеристики усилителей на основе ОУ (рис. 4.6). По обеим осям на графике идеализированной АЧХ используется логарифмический масштаб. АЧХ содержит два участка: горизонтальный с постоянным коэффициентом усиления, далее излом на верхней граничной частоте ($f_{\text{в}}$), на которой частотные искажения составляют 3 дБ, и наклонный участок на высоких частотах, имеющий наклон 6 дБ/октаву (20 дБ/декаду). Если в схеме нет разделительных

конденсаторов, то ОУ усиливает колебания начиная с нулевой частоты (постоянного тока) до некоторой верхней граничной частоты f_B .

Для предотвращения самовозбуждения усилителя на высоких частотах используют встроенную или внешнюю высокочастотную коррекцию. В случае внешней коррекции номиналы корректирующих конденсаторов и номера выводов, к которым они подключаются, обычно указывают в типовых схемах включения микросхемы (в паспортных данных на микросхему). При этом номиналы корректирующих элементов подбирают так, чтобы на частоте единичного усиления (f_1) фазовый сдвиг выходного напряжения не превышал 180° .

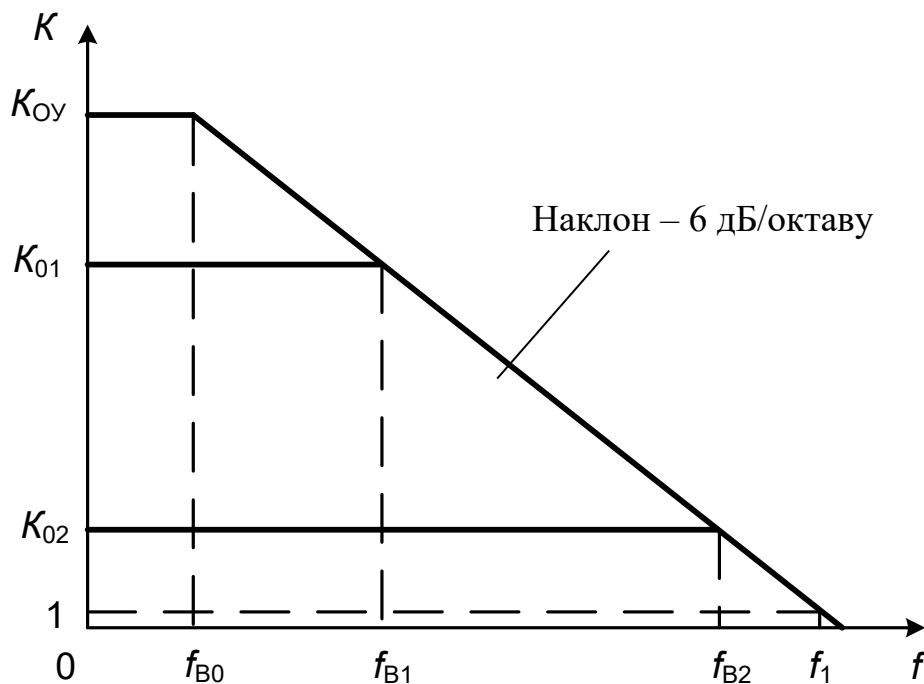


Рис. 4. 6 — Идеализированные логарифмические АЧХ усилителей на основе ОУ с различными коэффициентами усиления

В схеме инвертирующего и неинвертирующего усилителей коэффициент усиления зависит от глубины обратной связи. Однако эти усилители обладают следующим важнейшим свойством: произведение коэффициента усиления на нулевой частоте на верхнюю граничную частоту, на которой частотные искажения равны -3 дБ, остается постоянным. Это произведение принято называть **площадью усиления каскада**. Численно она равна **частоте единичного усиления** операционного усилителя f_1 .

$$K_0 f_B = f_1 = \text{const} , \quad (4.6)$$

где K_0 — коэффициент усиления на нулевой частоте;

$f_{\text{в}}$ — верхняя граничная частота усилителя, на которой частотные искажения равны 3 дБ;

f_1 — частота единичного усиления микросхемы операционного усилителя, которая приводится в справочных данных на микросхему.

Из соотношения (4.6) следует, что верхняя граничная частота усилительного каскада ($f_{\text{в}}$) зависит от коэффициента усиления каскада на нулевой (низких) частотах (K_0). При уменьшении коэффициента усиления каскада верхняя граничная частота каскада увеличивается во столько же раз. Поэтому в каскадах на ОУ с высокой верхней граничной частотой, как правило, не достигается высокий коэффициент усиления.

Для усилителей, АЧХ которых изображены на рис. 4.6, из условия постоянства площади усиления, следует соотношение

$$K_{01}f_{\text{в}1} = K_{02}f_{\text{в}2} . \quad (4.7)$$

4.3. Описание лабораторной установки

В состав лабораторной установки входят модули «Операционный усилитель» (рис. 4.7), «Мультимеры» (рис. 1.7), «Измерительные приборы» (рис. 4.8), а также двухлучевой осциллограф типа «KEYSIGHT DSOX 1102G».

На лицевой панели модуля «Операционный усилитель» изображена принципиальная схема исследуемого усилителя (см. рис. 4.7), а также находятся гнезда для подключения измерительных приборов, переключатели для изменения сопротивления резисторов и емкостей конденсаторов (рис. 4.9).

При исследовании инвертирующего усилителя входом являются гнезда «X4» (или «X9») и «Общий», выходом схемы — «X10» и «Общий». При исследовании неинвертирующего усилителя входом являются гнезда «X12» и «Общий», выходом — «X10» и «Общий».

Сопротивление резистора R_4 , установленного в цепи обратной связи операционного усилителя, может ступенчато изменяться с помощью переключателя «SA1». На гнездах «X3» и «Общий» формируется постоянное напряжение, изменяемое с помощью ручки регулировки «RP1» в пределах $\pm 4,7\text{В}$.

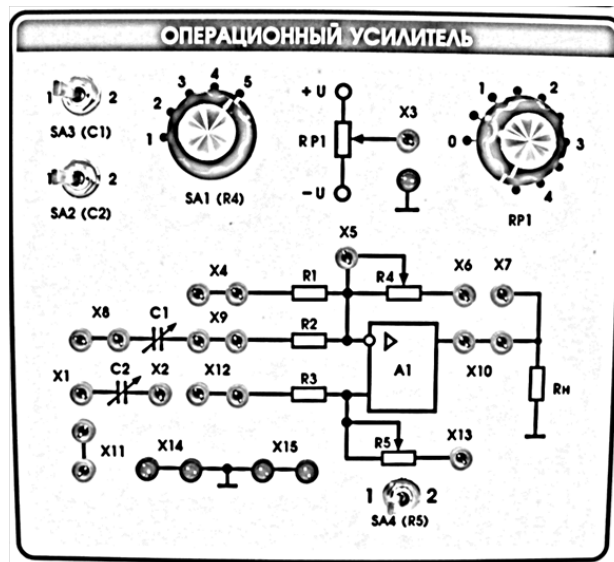


Рис. 4.7 — Внешний вид модуля «Операционный усилитель»



Рис. 4.8 — Внешний вид модуля «Измерительные приборы»

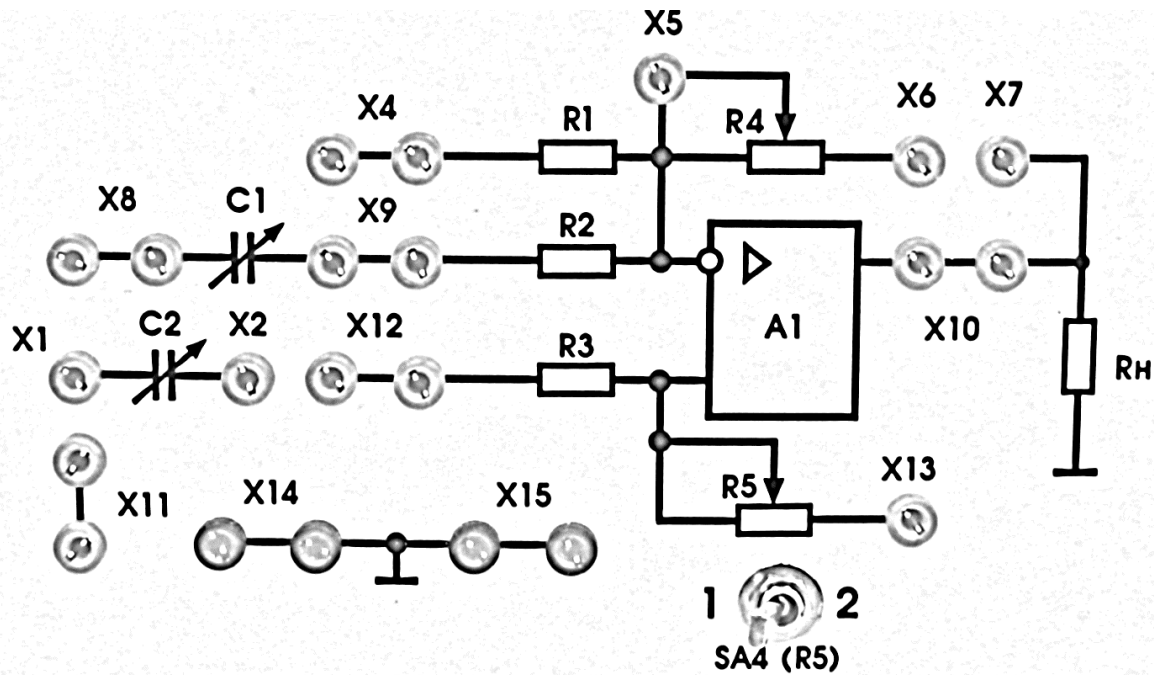


Рис. 4.9 — Изображение схемы подключения ОУ на лицевой панели лабораторного макета

4.4. Порядок выполнения лабораторной работы

4.4.1. Исследование инвертирующего усилителя на ОУ

4.4.1.1. Не включая напряжение питания лабораторной установки, с помощью модуля «Мультиметры», измерьте сопротивления резисторов $R1$, $R2$, а также значения сопротивления резистора $R4$ для положений 1—5 переключателя $SA1$.

4.4.1.2. Соберите схему инвертирующего усилителя. Для этого установите перемычки между гнездами «X6»—«X7», «X12»—«X14», «X13»—«X15»; установите переключатель «SA4» в положение 1.

4.4.1.3. На приборах «Ампервольтметр 1» и «Ампервольтметр 2» модуля «Измерительные приборы» установите режим измерения постоянных напряжений (соответствующие переключатели установите в положения «DC» и «U, В»). Подключите вход измерения напряжений прибора «Ампервольтметр 1» к входу инвертирующего усилителя (гнезда «X9» и «X15»), а вход прибора «Ампервольтметр 2» подключите к выходу инвертирующего усилителя (гнезда «X10» и «X14»).

Включите питание лабораторной установки тумблером «Сеть».

4.4.1.4. На вход исследуемого усилителя (гнезда «X9» и «X14») подключите напряжение, снимаемое с переменного резистора $RP1$ (гнезда «X3» и «Общий»).

Переключатель «SA1» установите в положение 1 ($R4 = 20 \text{ кОм}$).

4.4.1.5. Снимите амплитудную характеристику ($U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$) на постоянном токе при двух полярностях входного сигнала. Для этого определите максимальные выходные напряжения $\pm U_{\text{выхт}}$ и соответствующие им входные напряжения $\pm U_{\text{вхт}}$. Затем, изменяя входное напряжение в пределах от $-1,2U_{\text{вхт}}$ до $+1,2U_{\text{вхт}}$, выполните измерения выходного напряжения не менее, чем в 10 точках.

Постройте график амплитудной характеристики и по нему определите линейный диапазон работы усилителя и его коэффициент усиления. Рассчитайте теоретически ожидаемое значение коэффициента усиления воспользовавшись формулой (4.1). И сравните результат с экспериментально полученным значением.

4.4.1.6. Установите переключатель $SA1$ в положение 2 ($R4 = 62 \text{ кОм}$). Снимите и постройте амплитудную характеристику (см. п. 4.4.1.5) при новом значении сопротивления резистора $R4$, установленного в цепи обратной связи.

4.4.1.7. Установите переключатель $SA1$ в положение 3 ($R4 = 100 \text{ кОм}$). Снимите и постройте амплитудную характеристику (см. п. 4.4.1.5) при этом значении сопротивления резистора $R4$, установленного в цепи обратной связи.

4.4.1.8. Установите переключатель $SA1$ в положение 4 ($R4 = 180 \text{ кОм}$). Снимите и постройте амплитудную характеристику (см. п. 4.4.1.5) при этом сопротивлении резистора $R4$.

4.4.1.9. Установите переключатель $SA1$ в положение 5 ($R4 = 210 \text{ кОм}$). Снимите и постройте амплитудную характеристику (см. п. 4.4.1.5) при этом сопротивлении резистора $R4$.

4.4.1.10. Резисторы $R1$ и $R2$ включите параллельно друг другу (установите перемычку между гнездами «X4» и «X9»). При этом суммарное сопротивление, подключенное к инвертирующему входу операционного усилителя, уменьшится и станет равным $R_{1-2} = 10 \text{ кОм}$.

Переключатель « $SA1$ » установите в положение 1 ($R4 = 20 \text{ кОм}$).

Снимите и постройте амплитудную характеристику (см. п. 4.4.1.5) при этих значениях сопротивлений резисторов, подключенных к инвертирующему входу операционного усилителя.

4.4.1.11. Исследуйте влияние элементов схемы на амплитудно-частотную характеристику инвертирующего усилителя.

Соберите схему для измерения АЧХ инвертирующего усилителя. Для этого установите перемычки между гнездами «X6»—«X7», «X12»—«X14» и «X13»—«X15».

Подключите выход цифрового осциллографа «Gen Out» ко входу исследуемого усилителя (гнезда «X4» и «Общий»). К этим же гнездам лабораторного макета подключите канал 1 цифрового осциллографа. Канал 2 цифрового осциллографа подключите к выходу исследуемой схемы (гнезда «X10» и «Общий»). Осциллограф переведите в режим «Analyze» (нажмите кнопку «Analyze»). Далее нажмите кнопку «Функции FRA» и выберите режим «Анализ частотной характеристики». Нажмите кнопку «Настройки» и

установите минимальную частоту анализа — 20 Hz; максимальную частоту анализа — 20 MHz; ручкой «Entry» установите амплитуду входного напряжения — 100 mVpp.

Переключатель «SA1» установите в положение 1 ($R4 = 20$ кОм).

4.4.1.12. Произведите измерение амплитудно-частотной характеристики и определение верхней граничной частоты полосы пропускания в следующей последовательности:

— нажмите кнопку «Пуск Анализ». На экране осциллографа через некоторое время (50—60 с) появится изображение АЧХ исследуемого усилителя;

— вращая ручку «Entry» и изменяя положение курсора, определите значение коэффициента усиления на частоте 1 кГц;

— перемещая курсор в сторону верхних частот определите частоту f_v , на которой коэффициент усиления уменьшится на 3 дБ относительно коэффициента усиления на частоте 1 кГц.

— полученная частота f_v является верхней граничной частотой полосы пропускания усилителя;

— изменяя положение курсора от 20 Гц до 20 МГц снимите зависимость коэффициента усиления от частоты.

4.4.1.13. Переключатель «SA1» установите в положение 2 ($R4 = 62$ кОм). Снимите АЧХ усилителя и определите верхнюю граничную частоту его полосы пропускания (см. п. 4.4.1.12).

4.4.1.14. Переключатель «SA1» установите в положение 3 ($R4 = 100$ кОм). Измерьте АЧХ усилителя и определите его верхнюю граничную частоту полосы пропускания (см. п. 4.4.1.12).

4.4.1.15. Переключатель «SA1» установите в положение 4 ($R4 = 180$ кОм). Измерьте АЧХ усилителя и определите его верхнюю граничную частоту полосы пропускания (см. п. 4.4.1.12).

4.4.1.16. Переключатель «SA1» установите в положение 5 ($R4 = 210$ кОм). Измерьте АЧХ усилителя и определите его верхнюю граничную частоту полосы пропускания (см. п. 4.4.1.12).

4.4.2. Исследование неинвертирующего усилителя на ОУ

4.4.2.1. Соберите схему неинвертирующего усилителя. Для этого установите перемычки между гнездами «X6»—«X7» и «X4»—«X14»; установите переключатель «SA4» в положение 1;

4.4.2.2. Для приборов «Ампервольтметр 1» и «Ампервольтметр 2» модуля «Измерительные приборы» установите режим измерения постоянных напряжений (соответствующие переключатели установите в положения «DC» и «U, В»). Подключите вход для измерения напряжений прибора «Ампервольтметр 1» к входу неинвертирующего усилителя (гнезда «X12» и

«X14»), а вход прибора «Ампервольтметр 2» подключите к выходу неинвертирующего усилителя (гнезда «X10» и «X15»).

Включите питание лабораторной установки тумблером «Сеть».

4.4.2.3. На вход исследуемого усилителя (гнезда «X12» и «X14») подключите напряжение, снимаемое с переменного резистора $RP1$ (гнезда «X3» и «Общий»).

Переключатель «SA1» установите в положение 1 ($R4 = 20 \text{ кОм}$).

4.4.4.2.4. Снимите и постройте амплитудную характеристику ($U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$) на постоянном токе при двух полярностях входного сигнала. Для этого определите максимальные выходные напряжения $\pm U_{\text{вых.т}}$ и соответствующие им входные напряжения $\pm U_{\text{вх.т}}$. Затем, изменяя входное постоянное напряжение в пределах от $-1,2U_{\text{вх.т}}$ до $+1,2U_{\text{вх.т}}$, снимите амплитудную характеристику. Количество измерений должно быть не менее 10. По амплитудной характеристике определите линейный диапазон работы усилителя и его коэффициент усиления. Рассчитайте теоретически ожидаемое значение коэффициента усиления по формуле (4.3) и сравните результат с экспериментально полученным значением.

4.4.2.5. Установите переключатель SA1 в положение 5 ($R4 = 210 \text{ кОм}$). Снимите и постройте амплитудную характеристику (см. п. 4.4.2.4) при новом значении резистора $R4$.

Рассчитайте теоретически ожидаемый коэффициент усиления и сравните полученные данные.

4.4.2.6. Резисторы $R1$ и $R2$ включите параллельно друг другу (установите перемычку между гнездами «X4»—«X9»). В этом случае суммарное сопротивление, подключенное к инвертирующему входу операционного усилителя, уменьшится и станет равным $R_{1-2} = 10 \text{ кОм}$.

Переключатель «SA1» установите в положение 1 ($R4 = 20 \text{ кОм}$).

Снимите и постройте амплитудную характеристику (см. п. 4.2.5) при новом значении сопротивлений резисторов, подключенных к инвертирующему входу операционного усилителя.

4.4.2.7. Исследуйте влияние элементов схемы на амплитудно-частотную характеристику неинвертирующего усилителя.

Соберите схему для измерения АЧХ неинвертирующего усилителя. Для этого установите перемычки между гнездами «X6»—«X7», «X4»—«X14».

Подключите выход цифрового осциллографа «Gen Out» ко входу исследуемого усилителя (гнезда «X12» и «X14»). К этим же гнездам лабораторного макета подключите канал 1 цифрового осциллографа. Канал 2 цифрового осциллографа подключите к выходу исследуемой схемы (гнезда «X10» и «X15»). Осциллограф переведите в режим «Analyze» (нажмите кнопку «Analyze»). Далее нажмите кнопку «Функции FRA» и выберите режим «Анализ частотной характеристики». Нажмите кнопку «Настройки» и установите минимальную частоту анализа — 20 Hz ; максимальную частоту анализа — 20 MHz ; ручкой «Entry» установите амплитуду входного напряжения — 100 mVpp .

Переключатель «SA1» установите в положение 1 ($R4 = 20 \text{ кОм}$).

4.4.2.8. Измерение амплитудно-частотной характеристики и определение верхней граничной частоты полосы пропускания произведите в следующей последовательности:

— нажмите кнопку «Пуск Анализ». На экране осциллографа через некоторое время (50—60 с) появится изображение АЧХ исследуемого усилителя;

— вращая ручку «Entry» и изменяя положение курсора, определите коэффициент усиления на частоте 1 кГц;

— перемещая курсор в сторону верхних частот определите частоту f_v , на которой коэффициент усиления уменьшится на 3 дБ относительно коэффициента усиления на частоте 1 кГц.

— полученная частота f_v является верхней граничной частотой полосы пропускания усилителя;

— изменяя положение курсора от 20 Гц до 20 МГц измерьте зависимость коэффициента усиления от частоты.

4.4.2.9. Переключатель «SA1» установите в положение 5 ($R4 = 210 \text{ кОм}$). Измерьте АЧХ усилителя (см. п. 4.4.2.8) и определите верхнюю граничную частоту полосы пропускания.

4.2.10. Резисторы $R1$ и $R2$ включите параллельно друг другу (установите перемычку между гнездами «X4»—«X9»). Переключатель «SA1» установите в положение 1 ($R4 = 20 \text{ кОм}$).

Снимите и постройте амплитудную характеристику (см. п. 4.4.2.8) при этих значениях сопротивлений резисторов, подключенных к инвертирующему входу операционного усилителя и определите верхнюю граничную частоту полосы пропускания.

4.5. Содержание отчета

4.5.1. Цель работы и постановка задач исследования

4.5.2. Схемы инвертирующего и неинвертирующего усилителей и структурная схема ОУ.

4.5.3. Результаты измерений по п.п. 4.4.1.5—4.4.1.10 и амплитудные характеристики инвертирующего усилителя, построенные по этим данным.

4.5.4. Результаты измерений по п.п. 4.4.2.3—4.4.2.6 и амплитудные характеристики неинвертирующего усилителя, построенные по этим данным.

4.5.5. Результаты измерений по п.п. 4.4.1.11—4.4.1.16 и амплитудно-частотные характеристики инвертирующего усилителя, построенные по этим данным.

4.5.6. Результаты измерений по п.п. 4.4.2.7—4.4.2.10 и амплитудно-частотные характеристики неинвертирующего усилителя, построенные по этим данным.

4.5.7. Экспериментально найденные коэффициенты усиления и граничные частоты полосы пропускания инвертирующего и неинвертирующего усилителей при различной глубине ООС.

4.5.8. Таблица сравнения значений рассчитанных коэффициентов усиления на частоте 1 кГц рассчитанных для инвертирующего и неинвертирующего усилителей, а также найденных при проведении измерений.

4.5.5. Выводы по работе, поясняющие влияние элементов схемы на коэффициент усиления, амплитудную характеристику и полосу пропускания усилителей.

4.6. Контрольные вопросы

4.6.1. Какой вид имеют УГО операционных усилителей на принципиальных схемах?

4.6.2. Поясните принципы обозначения интегральных микросхем.

4.6.3. Перечислите основные типичные параметры ОУ и укажите их типичные значения.

4.6.4. Какие основные каскады содержит операционный усилитель?

4.6.5. Поясните назначение выводов балансировки операционного усилителя.

4.6.6. Как изменится верхняя граничная частота полосы пропускания усилителя на основе ОУ, если его коэффициент усиления с помощью цепей обратной связи уменьшить в 10 раз?

4.6.7. Нарисуйте схему инвертирующего усилителя и поясните назначение элементов.

4.6.8. По каким формулам можно определить коэффициент усиления инвертирующего усилителя в рабочей полосе частот и его входное сопротивление?

4.6.9. Изобразите принципиальную схему неинвертирующего усилителя и поясните назначение элементов.

4.6.10. По каким формулам можно определить коэффициент усиления неинвертирующего усилителя в рабочей полосе частот и его входное сопротивление? Сравните значения этих параметров с параметрами инвертирующего усилителя.

4.6.11. Поясните назначение цепей высокочастотной коррекции в операционных усилителях и влияние этих цепей на полосу пропускания.

4.6.12. Поясните достоинства и недостатки внутренней коррекции ОУ.

4.6.13. Какими параметрами обладает идеальный операционный усилитель?

4.6.14. Какими свойствами обладает повторитель напряжения на операционном усилителе?

4.6.15. Поясните методику идеализации амплитудно-частотной характеристики операционного усилителя.

4.6.16. Поясните последовательность действий при проведении балансировки операционного усилителя.

4.6.17. Нарисуйте схему повторителя напряжения на ОУ. Определите входное сопротивление и коэффициент усиления схемы.

Библиографический список

1. Борисенко А.Л. Схемотехника аналоговых электронных устройств. Функциональные узлы: учебн. пособие для вузов / А.Л. Борисенко.— М.: Издательство Юрайт, 2022.— 126 с. — Режим доступа: <https://bibli-online.ru/viewer/shemotekhnika-analogovyh-elektronnyh-ustroystv-funkcionalnye-uzly-438274#page/1>
2. Проектирование функциональных узлов и модулей радиоэлектронных средств [Электронный ресурс] : учебное пособие / Д.Ю. Муромцев [и др.]. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 252 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/109513>
3. Шарыгина Л.И. Лекции по аналоговым электронным устройствам. Учебное пособие / Л.И. Шарыгина. — Томск: Томск. Гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2023, — 149 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/reader/book/110213/#2>

Учебное издание

**УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

Учебно-методическое пособие

Составитель: **Мельников** Анатолий Викторович

Издано в авторской редакции

Изд. № 60/2025. Объем 3,75 п.л. Усл. печ. л. 3,49. Уч.-изд. л. 3,675.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»