

Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Лабораторный практикум
по дисциплине
«АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА»

для студентов направления 6.050901 — «Радиотехника»
дневной и заочной форм обучения

(Часть 1)

Севастополь
2008

УДК 621.396.1

Методические указания «Лабораторный практикум по дисциплине «Аналоговые электронные устройства» / Сост. А.В. Мельников: Ч.1. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. — 62 с.

Целью методической разработки является оказание помощи студентам заочной и очной форм обучения в подготовке и проведении лабораторного практикума по дисциплине «Аналоговые электронные устройства», а также получении ими теоретических знаний и практических навыков исследования и анализа характеристик устройств аналоговой обработки сигналов.

Методические указания написаны на основании программы дисциплины «Аналоговые электронные устройства». Рассмотрены и утверждены на заседании кафедры радиотехники (протокол № 2 от « 16 » сентября 2008 г.).

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

Рецензент:

Заведующий кафедрой радиотехники, доктор технических наук, профессор Гимпилевич Ю.Б.

Ответственный за выпуск:

Заведующий кафедрой радиотехники, доктор технических наук, профессор Гимпилевич Ю.Б.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Лабораторная работа № 1	
Исследование каскада усиления напряжения на биполярном транзисторе	5
2. Лабораторная работа № 2	
Исследование эмиттерного повторителя	22
3. Лабораторная работа № 3	
Исследование каскада усиления напряжения на полевом транзисторе	30
4. Лабораторная работа № 4	
Исследование каскадов с большим входным сопротивлением ..	41
5. Лабораторная работа № 5	
Исследование цепей стабилизации режима работы транзистора по постоянному току	51
Библиографический список	61

ВВЕДЕНИЕ

Студенты дневной формы обучения изучают дисциплину «Аналоговые электронные устройства» в 4-ом семестре. Для студентов заочной формы обучения дисциплина разбита на две части и изучается в 5-ом и 6-ом семестрах. В данную методическую разработку включены пять лабораторных работ, выполняемых в первой части 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 КАСКАДА УСИЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

1.1. Цель работы

Определить основные показатели и изучить влияние элементов схемы на амплитудно-частотную характеристику каскада усиления напряжения на биполярном транзисторе, построенного на основе микросхемы К119УН1.

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 напряжения зависит от требуемого значения коэффициента усиления по напряжению.

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

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

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

резистор R_1 . Выходной ток покоя транзистора (ток коллектора $I_{к0}$) определяется величиной тока покоя базы $I_{б0}$.

Постоянные токи и напряжения в отсутствие 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 переменной составляющей. Отключение конденсатора C_3 приведет к уменьшению коэффициента усиления схемы.

Подача на вход каскада переменного напряжения от источника сигнала приводит к появлению переменной составляющей тока базы транзистора, а следовательно, переменной составляющей тока коллектора. За счет протекания этого тока через резистор R_k на нем создается переменная составляющая напряжения, которая через конденсатор C_2 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. 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 амплитудное значение переменных составляющих не превышало значение постоянных составляющих, то есть

$$I_{кт} \leq I_{к0} \quad \text{и} \quad U_{выхл} \leq U_{кэ0} . \quad (1.1)$$

Анализ работы каскада часто производят графоаналитическим методом, основанным на использовании графических построений и расчетных соотношений. Графические построения проводят с использованием выходных и входных статических характеристиках транзистора.

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 II закона Кирхгофа для выходной цепи каскада

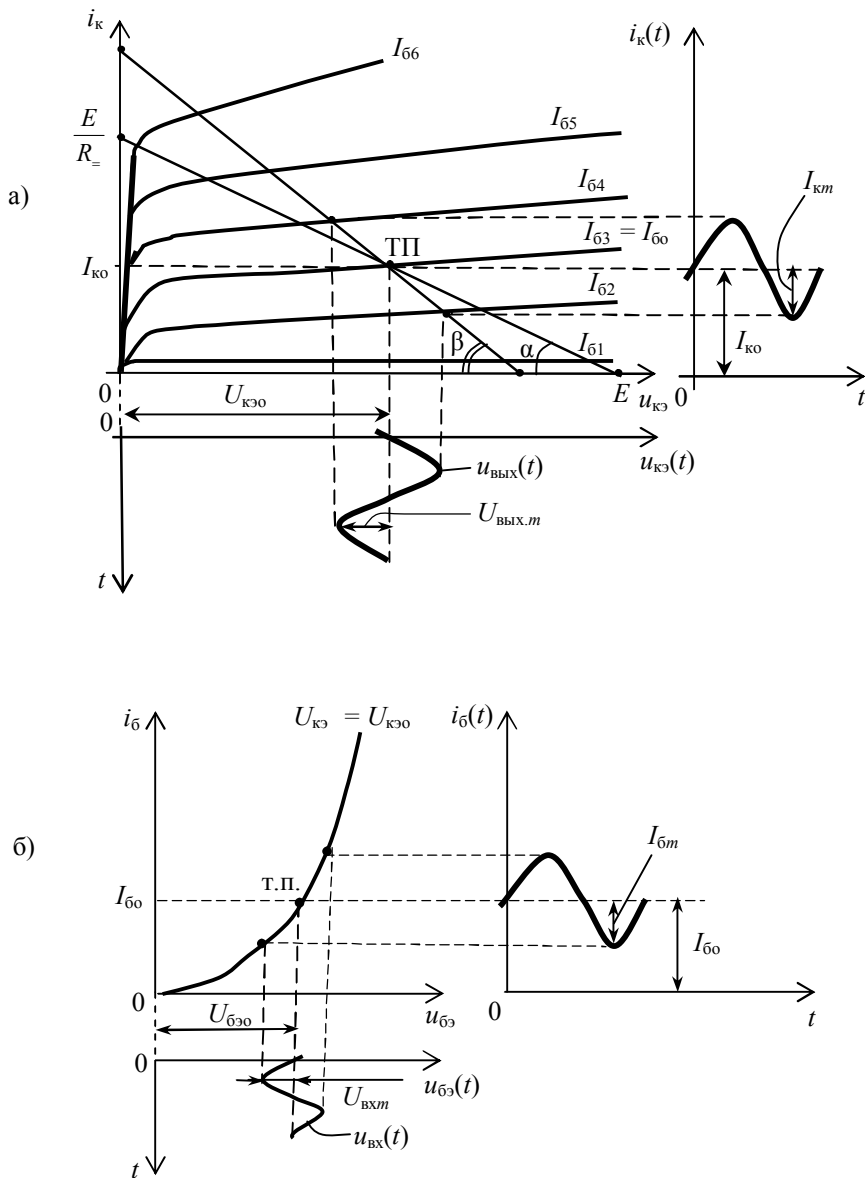


Рис. 1.2 — Диаграммы работы выходной цепи (а) и входной цепи (б) усилительного каскада

$$E = I_{\text{кз}} R_{\text{к}} + U_{\text{кз}} + I_{\text{з}} R_{\text{з}} . \quad (1.2)$$

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

$$U_{\text{кз}} = E - I_{\text{кз}} (R_{\text{к}} + R_{\text{з}}) . \quad (1.3)$$

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

$$R_{\text{с}} = R_{\text{к}} + R_{\text{з}} . \quad (1.4)$$

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

$$\begin{aligned} I_{\text{кз}} &= 0 ; \quad U_{\text{кз}} = E ; \\ U_{\text{кз}} &= 0 ; \quad I_{\text{кз}} = E / (R_{\text{к}} + R_{\text{з}}) = E / R_{\text{с}} . \end{aligned}$$

Нагрузочную характеристику по постоянному току можно провести под углом α , который определяется из выражения

$$\bar{\alpha} = \arctg\left(\frac{1}{R_{\text{с}}} \cdot \frac{m_{\text{u}}}{m_{\text{i}}}\right) , \quad (1.5)$$

где m_{u} и m_{i} — коэффициенты, учитывающие масштаб по оси абсцисс и ординат соответственно.

Точки пересечения нагрузочной прямой со статическими выходными характеристиками транзистора дают графическое решение уравнения (1.3) для заданного сопротивления $R_{\text{с}}$ и различных значений тока базы $I_{\text{б}}$. По этим точкам можно, задавшись током базы $I_{\text{б0}}$, определить коллекторный ток $I_{\text{кз}}$, а также напряжение $U_{\text{кз}}$.

Точка покоя (ТП) находится на пересечении нагрузочной прямой для постоянного тока и выходной статической характеристикой транзистора для заданного тока базы $I_{\text{б0}}$.

При определении переменных составляющих выходного напряжения каскада и коллекторного тока транзистора используют нагрузочную прямую каскада по переменному току.

При построении нагрузочной прямой каскада по переменному току учитывают, что резистор $R_{\text{з}}$ шунтируется в рабочей полосе частот кон-

денсатором 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 больше, чем по переменному 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

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

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

При подаче на вход каскада переменного напряжения $u_{вх}(t)$ создается переменная составляющая тока базы, определяемая входной характеристикой транзистора (рис. 1.3,б). При этом в коллекторной цепи транзистора создается переменная составляющая тока коллектора $i_k(t)$ (рис. 1.2,а) и переменное выходное напряжение $u_{вых}(t)$. Нагрузочная прямая по переменному току характеризует взаимосвязь мгновенных значений тока $i_k(t)$ и напряжения $u_{кз}(t)$. Рабочая точка при подаче на вход переменного сигнала перемещается по нагрузочной прямой переменного тока. При этом рабочая точка перемещается вниз от точки покоя при уменьшении тока базы, и вверх — при увеличении.

Очевидно, что для исключения искажений выходного сигнала необходимо, чтобы рабочая точка при перемещении вверх по нагрузочной прямой не заходила в область нелинейных начальных участков выходных характеристик, а при перемещении вниз — в область отсечки тока коллектора. Работа каскада без искажений выходного сигнала достигается за счет правильного выбора режима работы каскада.

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

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{\text{вых}m}}{\dot{U}_{\text{вх}m}} = K e^{j\varphi},$$

где $\dot{U}_{\text{вых}m}$, $\dot{U}_{\text{вх}m}$ — комплексные амплитуды напряжений на выходе и входе усилителя; K — модуль комплексного коэффициента усиления, называемый просто «коэффициент усиления»; φ — сдвиг фазы между выходным и входным напряжениями.

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

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

где $\dot{I}_{\text{вых}m}$, $\dot{I}_{\text{вх}m}$ — 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

$$K_p = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{0,5 \cdot U_{\text{вых}m} I_{\text{вых}m}}{0,5 \cdot U_{\text{вх}m} I_{\text{вх}m}} = K K_I.$$

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»:

$$K(f_{\text{cp}}) = K_0 = \frac{U_{\text{вых}m}(f_{\text{cp}})}{U_{\text{вх}m}(f_{\text{cp}})}.$$

Номинальный коэффициент усиления — действительное число.

Коэффициенты усиления часто выражают в логарифмических единицах (децибелах)

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

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).

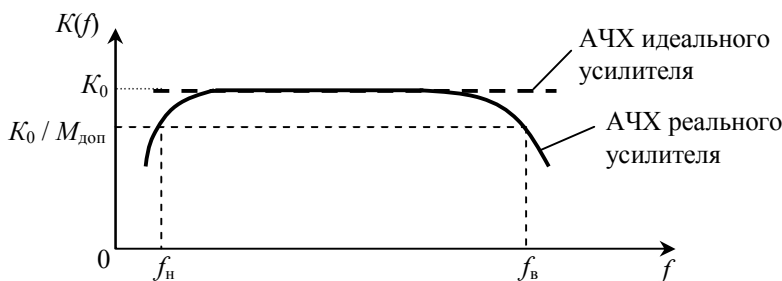


Рис. 1.3 — Амплитудно-частотная характеристика усилителя

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 , C_2) и влиянием конденсатора в цепи эмиттера транзистора (C_3), 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 $K(f)$ — 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.

Обычно коэффициент частотных искажений находят отдельно для нижних и верхних частот

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

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

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

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.

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 $M_{\text{н, дБ}} = M_{\text{в, дБ}} = 3$ дБ .

Амплитудной характеристикой (АХ) усилителя называют зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного напряжения. Типичная амплитудная характеристика усилителя изображена на рис. 1.4. АХ идеального усилителя представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат. АХ реального усилителя отличается от идеальной.

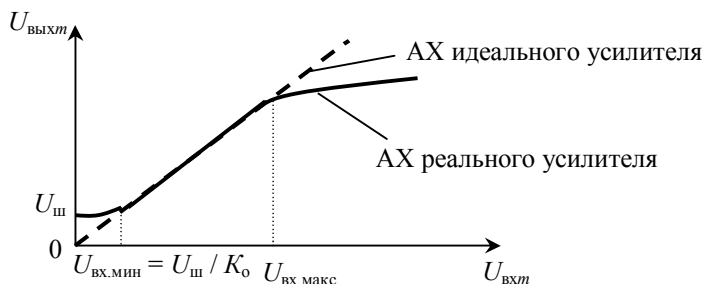


Рис. 1.4 — Амплитудная характеристика усилителя

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.

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

$$D = U_{\text{вх.макс.}}/U_{\text{вх.мин.}} \quad , \quad D_{\text{дБ}} = 20 \lg D \quad .$$

1.3. Описание лабораторного макета

Усилитель напряжения собран на основе микросхемы К119УН1.

Микросхемы серии 119 предназначены для работы в радиоэлектронной аппаратуре широкого назначения. Они выполнены на основе биполярных транзисторов в прямоугольном металлостеклянном корпусе (размеры 10х7х3 мм) с параллельным расположением выводов.

Параметры микросхемы К119УН1:

- напряжение питания, В — $\pm 6,3 \pm 10\%$;
- максимальное выходное напряжение, В — не менее 0,75;
- потребляемый ток, мА — не более 1,2;
- входное сопротивление, кОм — не менее 5,0;
- коэффициент усиления — 2,56 ... 3,84.

Принципиальная схема и типовая схема включения микросхемы К119УН1 изображены соответственно на рис. 1.5 и 1.6.

В микросхеме используется двухполярное питание. Это позволяет при нулевом напряжении на базе транзистора $VT1$ добиться того, чтобы точка покоя находилась на середине линейного участка проходной характеристики транзистора.

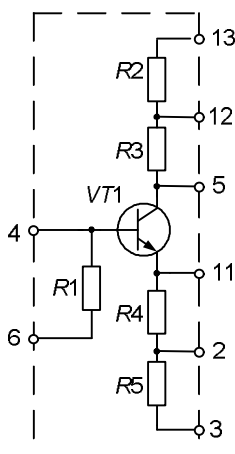


Рис. 1.5 — Принципиальная схема микросхемы К119УН1

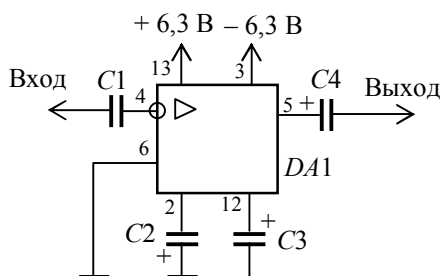


Рис. 1.6 — Типовая схема включения микросхемы К119УН1

Резистор $R1$ (см. рис. 1.5 и рис. 1.6) одним из своих выводов соединен с общим проводом, что обеспечивает на базе транзистора $VT1$ нулевой потенциал. Резистор $R3$ является коллекторной нагрузкой усилителя.

В эмиттерную цепь транзистора включен резистор $R4$, который предназначен для повышения стабильности работы каскада при изменении температуры, старении элементов схемы и т.д.

Резисторы $R2$ и $R5$ (рис. 1.5) совместно с конденсаторами $C2$ и $C3$ (рис. 1.6) образуют фильтры в цепи питания. Эти фильтры устраняют возможность проникновения на выход каскада пульсаций напряжения источника питания.

Конденсаторы $C1$ и $C4$ (рис. 1.6) являются разделительными конденсаторами, установленными на входе и выходе каскада.

Принципиальная схема лабораторного макета для исследования усилительного каскада на транзисторе с общим эмиттером изображена на рис. 1.7.

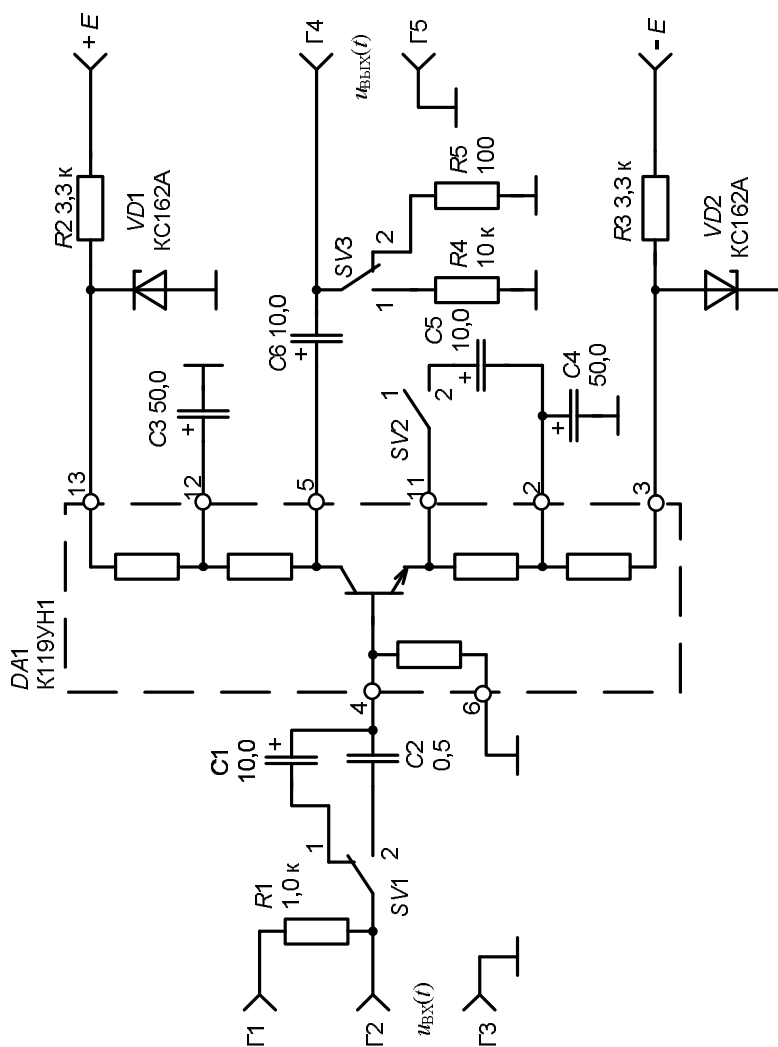


Рис. 1.7 — Принципиальная схема лабораторного макета

Входное напряжение подается на гнезда Г2-Г3. Гнездо Г3 соединено с общим проводом схемы. Гнездо Г1 используется для измерения входного сопротивления. Конденсатор $C1$ или $C2$ (в зависимости от положения переключателя $SV1$) является разделительным конденсатором.

Усиленное микросхемой $DA1$ напряжение с вывода 5 через разделительный конденсатор $C6$ подается на выход (гнездо Г4). При помощи переключателя $SV3$ можно изменять величину сопротивления нагрузки, подключенной к выходу усилителя.

Конденсатор большой емкости $C5$ при помощи переключателя $SV2$ может подключаться параллельно резистору, стоящему в эмиттерной цепи транзистора. Емкостное сопротивление конденсатора $C5$ в рабочей полосе частот мало

$$\frac{1}{2\pi f C_5} \ll R_4 ,$$

где $R4$ — сопротивление резистора в эмиттерной цепи транзистора (см. рис. 1.5).

Это позволяет устранить отрицательную обратную связь по переменной составляющей.

Конденсаторы $C3$ и $C4$ являются элементами фильтра по цепи питания. Питание осуществляется через параметрические стабилизаторы, собранные на элементах $VD1$, $R2$ и $VD2$, $R3$.

1.4. Порядок выполнения работы

1.4.1. Снимите амплитудную характеристику усилительного каскада на частоте $f = 1$ кГц при следующих положениях переключателей: $SV1$ — 1, $SV2$ — 1, $SV3$ — 1.

Для этого:

— подайте напряжение от генератора на вход усилителя (гнезда Г2-Г3);

— к выходу усилителя (гнезда Г4-Г5) подключите осциллограф;

— увеличивая напряжение на входе, определите максимальное действующее значение этого напряжения $U_{\text{вх. max}}$, при котором появляются заметные искажения формы сигнала на выходе;

— определите шаг изменения входного напряжения $\Delta U = U_{\text{вх. max}} / 10$;

— подключите к выходным клеммам усилителя вместо осциллографа вольтметр и изменяя входное напряжение с шагом ΔU в пределах от 0 до $1,3 \cdot U_{\text{вх. max}}$ снимите зависимость $U_{\text{вых.}} = f(U_{\text{вх.}})$;

— подайте на вход каскада нулевое напряжение $U_{\text{вх.}} = 0$ и определите напряжение шумов на выходе усилителя.

1.4.2. Переключатель $SV2$ включите в положение 2. Определите максимальное действующее значение входного напряжения $U_{\text{вх. max}}$ для этого положения переключателя $SV2$ и снимите амплитудную характеристику.

1.4.3. Снимите амплитудно-частотные характеристики каскада при следующих значениях элементов схемы:

- а) $C1 = 10,0$ мкФ ($SV1$ в пол. 1); $C5$ — отключен ($SV2$ в пол. 1);
- б) $C2 = 0,5$ мкФ ($SV1$ в пол. 2); $C5$ — отключен ($SV2$ в пол. 1);
- в) $C1 = 10,0$ мкФ ($SV1$ в пол. 1); $C5 = 10,0$ мкФ ($SV2$ в пол. 2);
- г) $C2 = 0,5$ мкФ ($SV1$ в пол. 2); $C5 = 10,0$ мкФ ($SV2$ в пол. 2).

При снятии АЧХ на входе усилителя необходимо поддерживать постоянное действующее напряжение равное $U_{\text{вх.}} = U_{\text{вх. max}}/\sqrt{3}$ и, изменяя частоту входного сигнала, измерять напряжение на выходе.

При проведении измерений рекомендуется следующая сетка частот: 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 20000, 50000, 100000, 200000 Гц.

Рассчитать коэффициент усиления на каждой частоте. Результаты измерений занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 — АЧХ усилителя ($U_{\text{вх.}} =$; $C1 =$; $C2 =$; $C5 =$)

f , Гц	$U_{\text{вых.}}$, В	$K = \frac{U_{\text{вых.}}}{U_{\text{вх.}}}$	$Y = \frac{K}{K_0}$	$M = \frac{K_0}{K}$
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...

Примечание: K_0 — значение коэффициента усиления на частоте $f = 1$ кГц.

1.4.4. Определите входное сопротивление усилителя на частоте $f = 1$ кГц при следующих положениях переключателей: $SV1$ — 1, $SV2$ — 2, $SV3$ — 1.

Для этого:

— подключите низкочастотный генератор к гнездам Г1-Г3 (см. рис. 1.8);

— установите напряжение на выходе низкочастотного генератора $U_{13} \approx 0,7 U_{\text{вх. max}}$;

— не переключая генератор, измерьте входное напряжение каскада $U_{\text{вх.}}$ между гнездами Г2-Г3.

Примечания:

1. Для уменьшения погрешности определения входного сопротивления при измерении напряжений U_{13} и $U_{вх.}$ необходимо использовать один и тот же вольтметр.

2. Входное сопротивление вольтметра, используемого при проведении измерений, должно быть не менее 1 МОм.

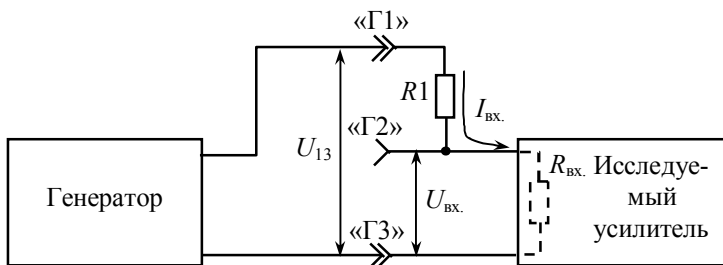


Рис. 1.8 — Структурная схема измерения входного сопротивления

Входное сопротивление усилителя может быть рассчитано по формуле

$$R_{вх.} = \frac{U_{вх.}}{I_{вх.}} = \frac{R_1 U_{вх.}}{U_{13} - U_{вх.}},$$

где $R_1 = 1 \text{ кОм}$.

1.4.5. Определите выходное сопротивление усилителя на частоте $f = 1 \text{ кГц}$ при следующих положениях переключателей: $SV1 — 1$; $SV2 — 2$.

Для этого установите на входе напряжение $U_{вх.} = 0,7 U_{вх. \max}$ и измерьте напряжения $U_{вых.1}$ и $U_{вых.2}$ соответственно при положениях 1 и 2 переключателя $SV3$.

Выходное сопротивление рассчитайте по формуле

$$R_{вых.} = \frac{\frac{U_{вых.1} - U_{вых.2}}{R_5} - \frac{U_{вых.1}}{R_4}}{\frac{U_{вых.2}}{R_5} - \frac{U_{вых.1}}{R_4}},$$

где $R_4 = 10 \text{ кОм}$; $R_5 = 100 \text{ Ом}$.

1.4.6. По результатам измерений проведенных в п.п. 1.4.1 и 1.4.2 постройте в одной координатной системе амплитудные характеристики усилителя и определите динамические диапазоны.

1.4.7. По результатам измерений проведенных в п.п. 1.4.3 постройте в одной координатной системе в полулогарифмическом масштабе нормированные частотные характеристики и определите полосы пропускания усилителя при различных значениях номиналов элементов схемы.

1.4.8. Сделайте выводы по работе.

1.5. Содержание отчета

1.5.1. Цель работы.

1.5.2. Принципиальная схема лабораторного макета.

1.5.3. Типы и заводские номера измерительных приборов, используемых в лабораторной установке.

1.5.4. Результаты измерений проведенных в п.п. 1.4.1 и 1.4.2, а также амплитудные характеристики, построенные по этим данным. Экспериментально найденное значение динамического диапазона.

1.5.5. Результаты измерений проведенных в п.п. 1.4.3 и амплитудно-частотные характеристики, построенные по этим данным.

1.5.6. Результаты измерений и расчеты входного и выходного сопротивлений усилителя.

1.5.7. 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?

1.6.9. Поясните назначение элементов схемы резистивного усилительного каскада.

1.6.10. При каком положении переключателей в лабораторном макете можно получить:

- а) максимальную полосу пропускания;
- б) максимальный коэффициент усиления в полосе пропускания;
- в) минимальные частотные искажения;
- г) максимальное входное сопротивление.

1.6.11. Покажите на схеме каскада пути прохождения постоянных токов.

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

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

1.6.14. Поясните работу каскада с использованием нагрузочных характеристик.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИТТЕРНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ

2.1. Цель работы

Определить основные показатели и изучить влияние элементов схемы на амплитудно-частотную характеристику и входное сопротивление эмиттерного повторителя, построенного на основе микросхемы K218УЕ2.

2.2. Краткие теоретические сведения

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

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

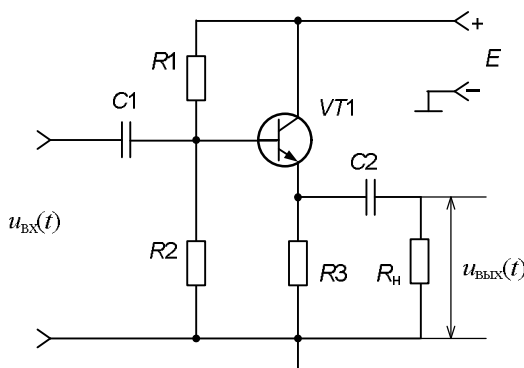


Рис. 2.1 — Схема эмиттерного повторителя

Конденсатор $C1$ необходим для разделения переменной и постоянной составляющих 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, а 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 $R3$, стоящий в эмиттерной цепи, является нагрузкой каскада для постоянной составляющей. Он совместно с резисторами $R1$ и $R2$ определяет режим работы каскада.

Конденсатор $C2$ 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 переменной составляющей является параллельное соединенные сопротивления $R3$ и R_n .

Коэффициент усиления эмиттерного повторителя 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 меньше единицы. Обычно коэффициент усиления эмиттерного повторителя лежит в пределах $K = 0,95 \dots 0,99$.

Коэффициент усиления каскада по току зависит от коэффициента передачи транзистора по току $h_{21э}$ и величины сопротивления нагрузки. При уменьшении величины сопротивления нагрузки коэффициент усиления по току увеличивается. Его предельно достижимое значение равно

$$K_{I_{max}} = h_{21э} + 1,$$

где $K_{I_{max}}$ — предельно достижимое значение коэффициента усиления по току;

$h_{21э}$ — коэффициент передачи по току транзистора.

Обычно коэффициент усиления эмиттерного повторителя по току лежит в пределах $K_I = 10 \dots 50$.

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

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

где $R_{\text{вх}}$ — входное сопротивление каскада:

R_1 и R_2 — сопротивления резисторов, образующих делитель напряжения на входе;

$r_{\text{вх} \text{ } VT}$ — сопротивление входной цепи транзистора, которое определяют по формуле [1]

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

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

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

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

Чтобы делитель напряжения R_1 , R_2 не снижал входное сопротивление каскада, стараются при проектировании каскада выполнить условие

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

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

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

Обычно входное сопротивление эмиттерного повторителя лежит в пределах $50 \dots 500$ кОм.

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

3. Описание лабораторного макета

Лабораторный макет эмиттерного повторителя собран на основе микросхемы K218YE2. Электрическая схема и схема включения микросхемы изображены на рис 2.2 и 2.3.

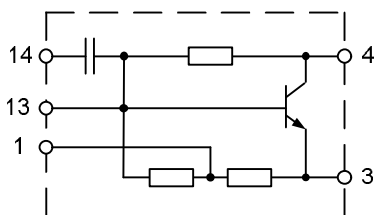


Рис. 2.2 — Принципиальная схема микросхемы K218YE2

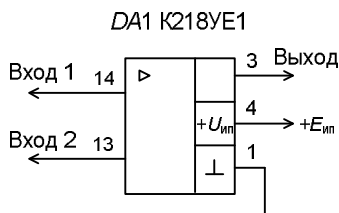


Рис. 2.3 — Типовая схема включения микросхемы K218YE2

Микросхемы серии 218 предназначены для работы в радиоэлектронной аппаратуре широкого назначения. Они выполнены на основе биполярных транзисторов в прямоугольном металlostеклянном корпусе с размерами 10x7x3 мм.

Параметры микросхемы K218YE2:

напряжение питания, В — $6,3 \pm 10\%$;

потребляемый ток, мА — не более 5;

входное сопротивление, кОм — не менее 5,0;

коэффициент гармоник, % — не более 10.

Схема лабораторного макета для исследования эмиттерного повторителя изображена на рис. 2.4.

Гнезда Г2-Г3 предназначены для подключения источника входного сигнала. Гнездо Г1 используется для измерения входного сопротивления схемы. При помощи переключателей *SV1* и *SV2* можно изменять величину разделительных конденсаторов, стоящих на входе и выходе каскада. Величину нагрузки каскада можно изменять с помощью переключателя *SV3*. Выходной сигнал снимают с гнезд Г4-Г5.

Стабилитрон *VD1* и резистор *R2* обеспечивают напряжение питания микросхемы равным паспортному значению $E_{и.п.} = 6,3$ В.

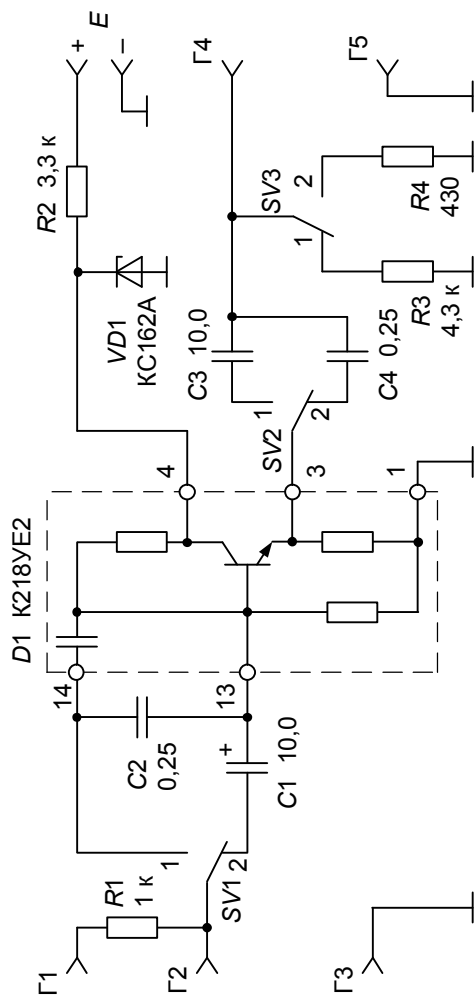


Рис. 2.4 — Принципиальная схема лабораторного макета

Напряжение от источника питания подается на усилительный каскад внутри корпуса лабораторной установки и на лицевую панель макета гнезда подключения питания не выведены.

2.4. Порядок выполнения работы

2.4.1. Снимите амплитудную характеристику эмиттерного повторителя на частоте $f = 1$ кГц при следующих положениях переключателей: $SV1$ в положении 2, $SV2$ в положении 1, $SV3$ в положении 1.

Для этого:

- установите напряжение на выходе генератора равным нулю, затем подключите генератор и вольтметр к входу эмиттерного повторителя (гнезда Г2-Г3);

- к выходу эмиттерного повторителя (гнезда Г4-Г5) подключите осциллограф;

- увеличивая напряжение на входе, определите максимальное действующее значение этого напряжения $U_{\text{вх. max}}$, при котором появляются заметные искажения формы сигнала на выходе;

- рассчитайте шаг изменения входного напряжения $\Delta U = U_{\text{вх. max}} / 10$;

- изменяя входное напряжение с шагом ΔU в пределах от 0 до $1,3U_{\text{вх. max}}$ снимите зависимость $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$. Для уменьшения погрешности измерения напряжений на входе и выходе производите одним вольтметром.

- рассчитайте коэффициент усиления каскада.

Подайте на вход каскада нулевое напряжение $U_{\text{вх}} = 0$ и определите напряжение шумов на выходе эмиттерного повторителя.

2.4.2. Снимите амплитудно-частотные характеристики каскада при следующих значениях элементов схемы:

а) $C1 = 10,0$ мкФ; $C3 = 10,0$ мкФ;

б) $C2 = 0,25$ мкФ; $C3 = 10,0$ мкФ;

в) $C1 = 10,0$ мкФ; $C4 = 0,25$ мкФ;

г) $C2 = 0,25$ мкФ; $C3 = 0,25$ мкФ.

При снятии АЧХ на входе усилителя необходимо поддерживать напряжение постоянной амплитуды равной $U_{\text{вх}} = U_{\text{вх. max}}/3$ и, изменяя частоту, определять коэффициент усиления на каждой частоте.

При проведении измерений рекомендуется следующая сетка частот: 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 20000, 50000, 100000 и 200000 Гц.

2.4.3. Определите входное сопротивление каскада на частоте $f = 1$ кГц для двух различных сопротивлений нагрузки: $R_3 = 4,3$ кОм (SV_3 в положении 1) и $R_4 = 430$ Ом (SV_3 в положении 2)

Для этого:

- генератор подключите к гнездам Г1-Г3;
- вольтметром измерьте напряжение на гнездах Г1-Г3 и Г2-Г3;
- рассчитайте входное сопротивление каскада по формуле:

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{Г2-Г3}}}{U_{\text{Г1-Г3}} - U_{\text{Г2-Г3}}} R_1, \quad (2.6)$$

где $R_1 = 1,0$ кОм.

Сравните полученные значения входных сопротивлений.

2.4.4. Определите выходное сопротивление эмиттерного повторителя на частоте $f = 1$ кГц.

Для этого установите на входе лабораторного макета (гнезда Г2-Г3) напряжение $U_{\text{вх}} = U_{\text{вх. макс}}/3$. Для положений 1 и 2 переключателя SV_3 измерьте соответственно напряжения на выходе U_1 и U_2 .

Рассчитайте выходное сопротивление каскада

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_4 - \frac{R_4 U_1}{U_2}}{\frac{R_4 U_1}{R_3 U_2} - 1}, \quad (2.7)$$

где $R_3 = 4,3$ кОм; $R_4 = 430$ Ом.

2.4.5. По результатам измерений, проведенных в п. 2.4.1, постройте амплитудную характеристику каскада и определите его динамический диапазон.

2.4.6. По результатам измерений, проведенных в п. 2.4.2, постройте в одной координатной системе амплитудно-частотные характеристики и определите полосу пропускания при различных значениях емкостей разделительных конденсаторов на входе и выходе каскада.

2.4.7. Сделайте выводы по работе.

2.5. Содержание отчета

2.5.1. Цель работы.

2.5.2. Принципиальная схема лабораторного макета.

2.5.3. Типы и заводские номера измерительных приборов, используемых в лабораторной установке.

2.5.4. Результаты измерений, проведенных в п. 2.4.1, и амплитудная характеристика, построенная по этим данным.

2.5.5. Результаты измерений, проведенных в п. 2.4.2, и амплитудно-частотные характеристики, построенные в одной координатной системе.

2.5.6. Результаты измерений и расчетов, проведенных в п. 2.4.3, и 2.4.4.

2.5.7. Выводы по работе.

2.6. Контрольные вопросы

2.6.1. Поясните назначение элементов схемы эмиттерного повторителя.

2.6.2. Покажите на схеме эмиттерного повторителя пути прохождения 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. Чему равна максимальная амплитуда выходного напряжения эмиттерного повторителя?

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

2.6.10. Поясните методику измерения входного и выходного сопротивлений.

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДА УСИЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОЛЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ

3.1. Цель работы

Ознакомление с методикой измерения основных параметров каскада усиления напряжения на полевом транзисторе и исследование его основных характеристик.

3.2. Краткие теоретические сведения

Принцип построения усилительных каскадов на полевых транзисторах тот же, что и каскадов на биполярных транзисторах. Особенность заключается в том, что полевой транзистор (ПТ) управляется по входной цепи напряжением, а не током. По этой причине задание режима покоя в каскаде на полевых транзисторах осуществляется подачей во входную цепь каскада постоянного напряжения соответствующей величины и полярности.

Полевые транзисторы, так же как и биполярные, имеют три схемы включения. В соответствии с названием электродов различают каскады с общим истоком, общим стоком и общим затвором.

Схема каскада с общим истоком выполненного на ПТ с управляемым p - n -переходом и каналом n -типа изображена на рис. 3.1. Основными элементами каскада являются источник питания с напряжением E , транзистор VT_1 , и резистор R_c . Нагрузка R_n подключается через разделительный конденсатор C_2 к стоку транзистора.

Резистор R_3 служит для замыкания токов затвора, и его значение для ПТ с управляемым p - n -переходом обычно лежит в пределах (0,1 ... 10) МОм, а у ПТ с изолированным затвором может достигать 100 МОм. С учетом того, что ток затвора ПТ обычно не превышает единиц наноампер, падение напряжения по постоянному току на резисторе R_3 практи-

чески равно нулю, и говорят, что резистор R_3 обнуляет потенциал затвора.

Резистор $R_{и}$ предназначен для задания напряжения затвор-исток $U_{зис}$ в режиме покоя. Кроме этого, резистор $R_{и}$ создает в каскаде отрицательную обратную связь по постоянному току, служащую для стабилизации положения точки покоя при изменении температуры и замене транзистора. Конденсатор $C_{и}$ предназначен для исключения отрицательной обратной связи по переменному току.

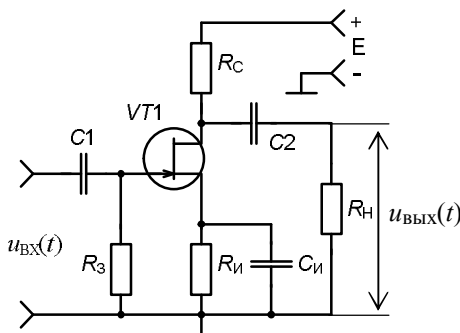


Рис. 3.1 — Схема усилительного каскада с общим истоком

Конденсаторы $C1$ и $C2$ являются разделительными. Величины номиналов разделительных конденсаторов $C1$ и $C2$ выбирают такими, чтобы их сопротивление переменному току в рабочей полосе частот было значительно меньше входного сопротивления каскада и сопротивления нагрузки соответственно.

Известно, что ПТ с управляемым $p-n$ -переходом при нулевом напряжении затвор-исток обладают высокой проводимостью. При этом линейный участок проходной характеристики расположен в области отрицательных напряжений затвор-исток, то есть в той области, где транзистор частично закрыт. Поэтому, чтобы разместить точку покоя на линейном участке проходной характеристики, необходимо подавать на затвор относительно истока потенциал запирающей полярности. Это осуществляется при помощи так называемой «цепочки автоматического смещения», образованной резистором $R_{и}$ и конденсатором $C_{и}$ включенными в цепи истока транзистора.

Формирование отрицательного потенциала на затворе относительно истока при положительном напряжении питания каскада происходит следующим образом. Постоянная составляющая тока истока, протекая по сопротивлению $R_{и}$, создает на нем падение напряжения. Полярность это-

го напряжения такова: «плюс» приложен к истоку транзистора, «минус» — к общему проводу. Так как ток затвора полевого транзистора практически равен нулю, то падение напряжения на резисторе R_3 равно нулю. Следовательно, затвор относительно общего провода имеет нулевой потенциал. Поскольку исток относительно общего провода имеет положительный потенциал, а затвор относительно общего провода — нулевой потенциал, то затвор относительно истока имеет отрицательный потенциал.

Напряжение затвор-исток $U_{зио}$ можно найти как разность напряжений на затворе относительно общего провода $U_{зo}$ и на истоке относительно общего провода $U_{иo}$.

$$U_{зио} = U_{зo} - U_{иo},$$

так как $U_{зo} \approx 0$, то

$$U_{зио} = -U_{иo} = -R_{и} I_{иo}.$$

С учетом того, что у ПТ ток стока практически равен току истока, то величина напряжения на затворе относительно истока может быть найдена из выражения

$$U_{зио} = -R_{и} I_{co}.$$

Поступление на вход, например, положительного напряжения вызывает увеличение тока стока и соответственно повышение падения напряжения на резисторе R_c и уменьшение напряжения на стоке транзистора относительно общего провода. Это приводит уменьшению выходного напряжения на нагрузке каскада.

Таким образом, каскад с общим истоком вносит в усиливаемый сигнал постоянный фазовый сдвиг величиной 180° (осуществляет инвертирование сигнала).

К основным параметрам усилительного каскада на ПТ относятся:

а) сквозной коэффициент усиления $K^* = U_{\text{вых.}} / E_{\text{г.}}$, где $E_{\text{г.}}$ — ЭДС источника сигнала. В некоторых случаях используют коэффициент усиления $K = U_{\text{вых.}} / U_{\text{вх.}}$, который отличается от K^* тем, что не учитывает коэффициент передачи входной цепи (или в многокаскадных усилителях не учитывает коэффициент передачи межкаскадной связи);

б) коэффициент частотных искажений M , характеризует частотные искажения, вызванные неодинаковым усилением колебаний различных частот. Его определяют обычно отдельно для низких и высоких частот по формулам:

$$M_{\text{н}} = \frac{K_0}{K_{\text{н}}} \quad \text{— на частоте } f_{\text{н}} ,$$

$$M_{\text{в}} = \frac{K_0}{K_{\text{в}}} \quad \text{— на частоте } f_{\text{в}} ,$$

где $M_{\text{н}}$ и $M_{\text{в}}$ — коэффициенты частотных искажений соответственно на частотах $f_{\text{н}}$ и $f_{\text{в}}$;

K_0 , $K_{\text{н}}$, $K_{\text{в}}$ — коэффициенты усиления соответственно в области средних, нижних и верхних частот.

Частотные искажения в области нижних частот вызваны наличием в схеме разделительных конденсаторов на входе (C1) и выходе (C2), а также конденсатора в цепи истока транзистора (C_и). В области верхних частот частотные искажения обусловлены уменьшением крутизны ПТ, а также влиянием паразитных емкостей схемы.

в) полоса пропускания $f_{\text{н}} \dots f_{\text{в}}$ — диапазон частот, в пределах которого коэффициент частотных искажений не превышает заданных допустимых значений (например, $M_{\text{н}} = M_{\text{в}} \leq M_{\text{доп}} = 1,41$)

К основным характеристикам усилительного каскада на полевом транзисторе относят следующие:

а) амплитудная характеристика — зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного при неизменной частоте.

Типичная амплитудная характеристика каскада на полевом транзисторе имеет такой же вид, как и у каскада на биполярном транзисторе (см. рис. 1.4).

б) амплитудно-частотная характеристика — зависимость коэффициента усиления от частоты.

Типичная амплитудно-частотная характеристика каскада на полевом транзисторе имеет такой же вид, как и у каскада на биполярном транзисторе (см. рис. 1.3).

Анализ каскада с общим истоком показывает [1...3], что сквозной коэффициент усиления в области средних частот определяется из выражения:

$$K_0^* = SR_{\text{н-}} = S \frac{R_{\text{с}} R_{\text{н}}}{R_{\text{с}} + R_{\text{н}}} , \quad (3.1)$$

где S — крутизна характеристики полевого транзистора,

$R_{\text{н-}}$ — сопротивление нагрузки каскада для переменного тока.

Из выражения (3.1) видно, что увеличения коэффициента усиления каскада можно добиться увеличением сопротивления нагрузки $R_{\text{н-}}$. Однако при этом необходимо учитывать, что при увеличении сопротивления стоящего в цепи стока транзистора $R_{\text{с}}$ одновременно уменьшается

значение постоянной составляющей тока стока и как следствие этого напряжения затвор-исток. Это приводит к сдвигу точки покоя каскада, появлению нелинейных искажений, уменьшению амплитуды выходного сигнала и уменьшению коэффициента усиления.

В области нижних частот уменьшение коэффициента усиления вызвано влиянием разделительных конденсаторов $C1$ и $C2$, а также конденсатором, стоящим в цепи истока $C_{и}$. Анализ показывает [1...3], что при учете влияния только конденсатора $C1$ или $C2$ сквозной коэффициент усиления каскада в области нижних частот определяется выражением

$$K_n^*(f) = K_0^* \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(2\pi f \tau_n)^2}}}, \quad (3.2)$$

где K_0^* — сквозной коэффициент усиления в области средних частот;

$$\begin{cases} \tau_n = C_1 (R_3 + R_{г}) & \text{при учете влияния конденсатора } C1 \text{ или} \\ \tau_n = C_2 (R_c + R_n) & \text{при учете влияния конденсатора } C2; \end{cases}$$

R_3 — сопротивление резистора стоящего в цепи затвора;

$R_{г}$ — сопротивление источника сигнала;

R_c — сопротивление резистора стоящего в цепи стока;

R_n — сопротивление нагрузки каскада.

Сквозной коэффициент усиления в области нижних частот при учете влияния только конденсатора $C_{и}$ (считая, что $C1, C2 \rightarrow \infty$) рассчитывается по формуле [1]

$$K_n^*(f) = K_0^* \frac{\sqrt{(1 + \frac{R_n}{r_{си}})^2 + (2\pi f C_{и} R_n)^2}}{\sqrt{(1 + \frac{R_u (R_c + R_n)}{r_{си} R_n + r_{си} R_c + R_c R_n})^2 + (2\pi f C_{и} R_n)^2}},$$

где $r_{си}$ — сопротивление сток-исток полевого транзистора.

В области верхних частот уменьшение коэффициента усиления вызвано влиянием паразитных емкостей схемы, шунтирующих цепи прохождения сигнала, а также ухудшением усилительных свойств полевого транзистора. Коэффициент усиления каскада в области верхних частот может быть найден из выражения [1]

$$K_B^*(f) = \frac{K_0^*}{\sqrt{1 + (2pf\tau_B)^2} \sqrt{1 + m^2}},$$

где $\tau_B = C_0 R_{H\sim}$ — постоянная времени выходной цепи;

$C_0 = C_H + C_{22H} + C_M$ — паразитная емкость выходной цепи каскада;

C_H — емкость нагрузки;

C_{22H} — выходная емкость ПТ в схеме с общим истоком;

C_M — емкость монтажа выходной цепи каскада;

$R_{H\sim} = \frac{R_c R_H}{R_c + R_H}$ — сопротивление выходной цепи каскада по пере-

менному току на высоких частотах;

$m = f/f_S$ — коэффициент, учитывающий ухудшение усилительных свойств транзистора на высоких частотах;

f_S — граничная частота транзистора по крутизне (частота, на которой крутизна транзистора S уменьшается до уровня 0,707 от своего значения на низких частотах).

Так как сопротивление затвор-исток собственно полевого транзистора обычно значительно превышает величину внешнего резистора R_3 , то входное сопротивление каскада в области средних частот определяется практически сопротивлением резистора стоящего в цепи затвора транзистора R_3 (см. рис. 2.1):

$$R_{вх.} = R_3. \quad (3.3)$$

Выходное сопротивление каскада

$$R_{вых.} \approx \frac{r_{ci} R_c}{r_{ci} + R_c}, \quad (3.4)$$

где r_{ci} — сопротивление сток-исток полевого транзистора.

Обычно выполняется соотношение $r_{ci} \gg R_c$, поэтому выходное сопротивление каскада определяется из выражения

$$R_{вых.} \approx R_c. \quad (3.5)$$

3.3. Описание лабораторного макета

Лабораторный макет (рис. 3.2) представляет собой однокаскадный резистивный усилитель, собранный на полевом транзисторе КП303В с управляемым p - n -переходом и каналом n -типа. Основные технические характеристики транзистора КП303В приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 — Характеристики транзистора КП303В

Параметр	Единица измерен.	Значение
Максимальное напряжение сток-исток, $U_{си\ max}$	В	25
Максимальная рассеиваемая мощность, P_{max}	мВт	200
Максимальный ток стока, $I_{с\ max}$	мА	20
Крутизна характеристики, S	мА/В	2 ... 5
Ток затвора (при $U_{зи} = 10$ В), I_z	нА	1
Сопротивление канала, $r_{си}$	кОм	50 ... 100
Входная емкость в схеме с ОИ, $C_{11и}$	пФ	6
Проходная емкость в схеме с ОИ, $C_{12и}$	пФ	2
Выходная емкость в схеме с ОИ, $C_{22и}$	пФ	1,5

Гнезда Г2-Г3 предназначены для подачи входного напряжения. При необходимости измерения входного сопротивления каскада входной сигнал подается на гнезда Г1-Г3.

Выходное напряжение снимают с гнезд Г4-Г5.

Усилительный каскад собран по схеме с общим истоком. Конденсатор $C1$ является разделительным конденсатором, стоящим на входе схемы, $C3$ — разделительный конденсатор на выходе схемы.

Резистор $R2$ задает нулевой потенциал затвора относительно общего провода.

Напряжение смещения формируется при помощи цепочки автоматического смещения $R3, C2$.

Величина сопротивления в цепи стока транзистора может изменяться при помощи переключателя $SV1$. Нагрузкой каскада по переменной составляющей являются параллельно включенные резистор $R11$, одно из сопротивлений $R4...R10$, подключаемого к стоку транзистора при помощи переключателя $SV1$ и конденсатор $C4$ емкостью 50 пФ, который моделирует емкость нагрузки.

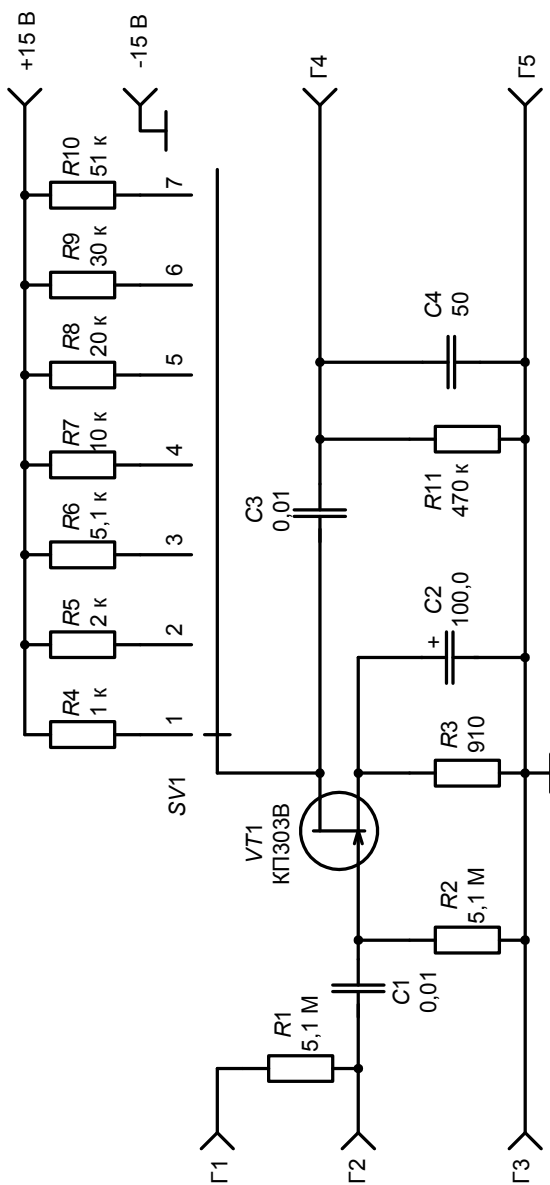


Рис. 3.2. — Принципиальная схема лабораторного макета

3.4. Расчетное задание

2.4.1. Используя справочные данные на полевой транзистор, а также известные номиналы элементов схемы рассчитать коэффициент усиления каскада в области средних частот для каждого из сопротивлений в цепи стока транзистора подключаемого при помощи переключателя $SV1$ (см. рис. 3.2).

3.4.2. Рассчитать коэффициент усиления каскада в области нижних частот (частоты 20, 50, 100, 200, 500 Гц) для трех значений сопротивления R_c (1, 10, 51 кОм) с учетом совместного влияния конденсаторов $C1$, $C2$ и $C3$ лабораторного макета.

3.4.3. Рассчитать коэффициент частотных искажений каскада в области нижних частот (20, 50, 100, 200, 500 Гц) для трех значений сопротивления R_c (1, 10, 51 кОм).

3.4.4. Рассчитать коэффициент усиления каскада в области верхних частот (частоты 20, 50, 100, 200 кГц) для трех значений сопротивления R_c (1, 10, 51 кОм).

3.4.5. Рассчитать коэффициент частотных искажений каскада в области верхних частот (20, 50, 100, 200 кГц) для трех значений сопротивления R_c (1, 10, 51 кОм).

3.5. Порядок выполнения работы

3.5.1. Снимите зависимость коэффициента усиления на частоте 1 кГц от величины сопротивления нагрузки, изменяя величину сопротивления нагрузки при помощи переключателя $SV1$ от 1 кОм до 51 кОм. Действующее значение входного напряжения поддерживайте постоянным, равным $U_{вх} = 50$ мВ.

3.5.2. Снимите амплитудную характеристику усилителя $U_{вых} = f(U_{вх})$ при $R_c = 1$ кОм; $R_c = 10$ кОм; $R_c = 51$ кОм. Определите линейный и нелинейный участки характеристики. Измерьте напряжение шумов на выходе.

3.5.3. Снимите амплитудно-частотную характеристику усилителя при $R_c = 1$ кОм; $R_c = 10$ кОм; $R_c = 51$ кОм. Частоту генератора изменяйте в диапазоне от 20 ... 200000 Гц.

3.5.4. Определите частотные искажения усилителя на частотах 20 Гц и 20 кГц и полосу пропускания усилителя на уровне 3 дБ для трех значений сопротивления R_c .

3.5.5. Определите входное сопротивление каскада на частоте 1 кГц при трех значениях сопротивления R_c : 1 кОм; 10 кОм; 51 кОм.

Для этого:

- генератор подключите к гнездам Г2-Г3;
- вольтметр и осциллограф подключите к гнездам Г4-Г5;
- установите напряжение на входе каскада такой величины, чтобы на выходе каскада наблюдался неискаженный сигнал;
- измерьте величину напряжения на выходе каскада $U_{\text{вых.1}}$;
- не изменяя величины напряжения на выходе генератора, переключите его к гнездам Г1-Г3 и измерьте при помощи вольтметра напряжение на выходе каскада $U_{\text{вых.2}}$.

Рассчитайте величину входного сопротивления каскада по формуле

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_1 \frac{U_{\text{вых.1}}}{U_{\text{вых.2}}}}{1 - \frac{U_{\text{вых.1}}}{U_{\text{вых.2}}}},$$

где $U_{\text{вых.1}}$ — напряжение на выходе каскада при подаче сигнала на клеммы Г1-Г3;

$U_{\text{вых.2}}$ — напряжение на выходе каскада при подаче сигнала на клеммы Г2-Г3;

R_1 — сопротивление резистора R_1 ($R_1 = 5,1 \text{ кОм}$).

3.5.6. По результатам измерений проведенных в п. 3.4.1 постройте зависимость коэффициента усиления от величины сопротивления нагрузки по переменной составляющей.

3.5.7. По результатам измерений проведенных в п. 3.4.2 постройте амплитудные характеристики каскада и определите динамический диапазон.

3.5.8. По результатам измерений проведенных в п. 3.4.3 постройте в одной координатной системе в логарифмическом масштабе нормированные амплитудно-частотные характеристики для трех значений сопротивления нагрузки.

3.5.9. Сделайте выводы по работе.

3.6. Содержание отчета

3.6.1. Цель работы.

3.6.2. Типы и заводские номера измерительных приборов, используемых в лабораторном макете.

3.6.3. Принципиальная схема лабораторного макета.

3.6.4. Результаты расчетов и экспериментальных исследований каскада

3.6.5. Выводы по работе.

3.7. Контрольные вопросы

3.7.1. Поясните назначение элементов схемы усилительного каскада на полевом транзисторе с общим истоком.

3.7.2. Покажите на принципиальной схеме каскада пути протекания постоянных и переменных токов.

3.7.3. Объясните принцип получения напряжения смещения при помощи цепочки автоматического смещения.

3.7.4. Каково назначение разделительных конденсаторов в усилительном каскаде на ПТ?

3.7.5. Что такое коэффициент частотных искажений?

3.7.6. Что называется полосой рабочих частот усилителя? Как она определяется?

3.7.7. Как изменяется коэффициент усиления каскада при изменении сопротивления нагрузки? Поясните наличие возрастающего и спадающего участков характеристики.

3.7.8. Какой вид имеет амплитудная характеристика усилителя? Поясните ее особенности.

3.7.9. Чем обусловлено уменьшение коэффициента усиления в области нижних и верхних частот?

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

3.7.11. Поясните методику измерения амплитудной характеристики. Какие приборы нужны для этого?

3.7.12. Поясните методику измерения входного сопротивления.

3.7.13. Поясните методику измерения АЧХ. Какие приборы для этого нужны?

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДОВ С БОЛЬШИМ ВХОДНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

4.1. Цель работы

Исследование основных характеристик каскадов, обладающих большим входным сопротивлением.

4.2. Краткие теоретические сведения

В устройствах радиоэлектроники, работающих с высокоомными источниками сигналов, на входе включают каскады, обладающие большим входным сопротивлением. Каскады с большим входным и низким выходным сопротивлением выполняют роль согласующих устройств в многокаскадных устройствах обработки аналоговых сигналов.

Из основных схем включения транзисторов (с общим эмиттером, общим коллектором, общей базой) наибольшим входным и наименьшим выходным сопротивлениями обладает каскад с общим коллектором, часто называемый эмиттерным повторителем. Это включение обычно используют для создания каскадов с большим входным сопротивлением.

4.2.1. Эмиттерный повторитель с обратной связью

В низкочастотном диапазоне простые схемы эмиттерных повторителей (см. рис. 2.1) обычно имеют входное сопротивление не превышающее нескольких десятков килоом. Повысить это сопротивление можно введя в схему параллельную по способу ввода положительную обратную связь (рис. 4.1).

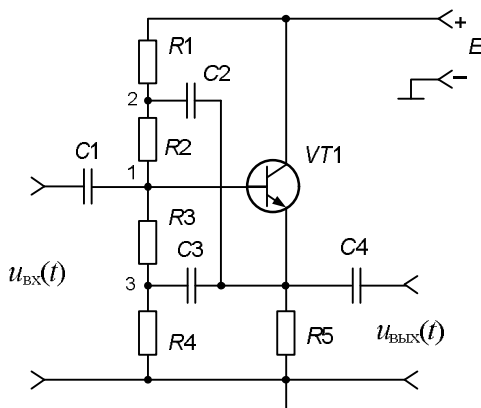


Рис. 4.1 — Эмиттерный повторитель с обратной связью

Резисторы $R1$, $R2$, $R3$, и $R4$ образуют делитель напряжения, обеспечивающий положение точки покоя. Выходное напряжение через конденсаторы $C2$ и $C3$, имеющие практически нулевое сопротивление в рабочей полосе частот, подается в верхнее и нижнее плечи делителя напряжения (точки 2 и 3). Так как коэффициент усиления по напряжению эмиттерного повторителя практически равен единице, то напряжение входного сигнала в точке 1 и точках 2 и 3 можно считать равными. Отсюда следует, что разности переменных напряжений между точками 1 и 2, а также 1 и 3 будут близки к нулю. Это приводит к значительному уменьшению тока, вызванного входным напряжением, в резисторах $R2$ (между точками 1 и 2) и $R3$ (между точками 1 и 3), что фактически равнозначно увеличению сопротивления этих резисторов переменному току.

С учетом влияния обратной связи эквивалентное сопротивление резистора $R2$ переменному току может быть найдено из соотношения [1, 2]:

$$R_{2\text{экв}} = \frac{R_2}{1 - K}, \quad (4.1)$$

где $R_{2\text{экв}}$ — сопротивление резистора $R2$ переменному току с учетом влияния обратной связи;

R_2 — номинальное значение сопротивления резистора $R2$;

K — коэффициент усиления каскада.

Эквивалентное сопротивление резистора $R3$ находится из выражения аналогичного выражению (4.1).

Таким образом, достигается частичная компенсация (но не полная ввиду того, что коэффициент усиления эмиттерного повторителя не-

сколько отличается от единицы) шунтирующего действия сопротивлений делителя цепи смещения.

Величина входного сопротивления такой схемы может составлять несколько сотен килоом.

4.2.2. Эмиттерный повторитель на составном транзисторе

Другим путем повышения входного сопротивления эмиттерного повторителя является применение в качестве усилительного элемента составного транзистора (схема Дарлингтона), представляющего собой совокупность двух (или более) транзисторов, в которых эмиттерный ток одного является базовым током другого транзистора (см. рис. 4.2).

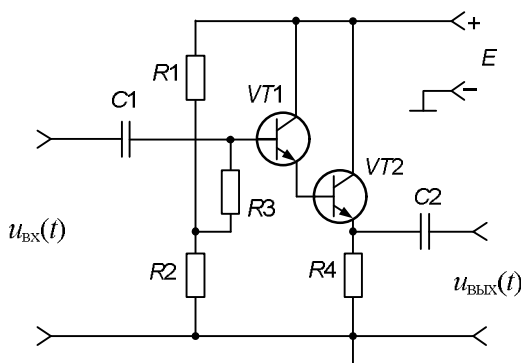


Рис. 4.2 — Эмиттерный повторитель на составном транзисторе

В результате, эквивалентный коэффициент передачи тока составного транзистора при включении с общим эмиттером будет равен [1, 2]:

$$(h_{21Э})_{\Sigma} \approx (h_{21Э})_{VT1} (h_{21Э})_{VT2}, \quad (4.2)$$

где $(h_{21Э})_{\Sigma}$ — коэффициент передачи по току составного транзистора;

$(h_{21Э})_{VT1}$, $(h_{21Э})_{VT2}$ — коэффициенты передачи по току транзисторов VT1 и VT2 соответственно.

Из (4.2) видно, что даже при наличии двух транзисторов с небольшим значением коэффициентов передачи по току порядка $h_{21Э} \approx 20 \dots 30$, коэффициент передачи по току составного транзистора может достигать величины порядка $(h_{21Э})_{\Sigma} \approx 400 \dots 900$. Это позволяет значительно увеличить сопротивление входной цепи транзистора, определяемое в соответствии с выражением (2.4), в котором вместо коэффициента $h_{21Э}$ необходимо использовать коэффициент $(h_{21Э})_{\Sigma}$. В результате этого сопротивле-

ние входной цепи составного транзистора может достигать величины $r_{\text{вх.}VT} \approx 100 \dots 1000 \text{ кОм}$.

В этой схеме для повышения входного сопротивления каскада используется сложная схема подачи напряжения смещения в цепь базы транзистора. Напряжение смещения формируется сравнительно низкоомным делителем $R1$, $R2$. Затем это напряжение через резистор $R3$, имеющий большое сопротивление (порядка единиц мегом), передается в цепь базы. Эквивалентная схема входной цепи каскада изображена на рис. 4.3.

Из эквивалентной схемы видно, что включение в цепь подачи смещения резистора $R3$ значительно уменьшает шунтирующее действие низкоомного делителя напряжения $R1$, $R2$.

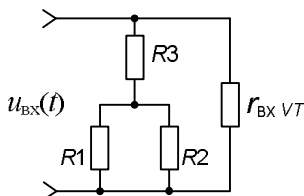


Рис. 4.3 — Эквивалентная схема входной цепи каскада на составном транзисторе

Входное сопротивление схемы, изображенной на рис. 4.2, может достигать нескольких сотен килоом.

4.2.3. Двухтактный эмиттерный повторитель на комплиментарной паре транзисторов

В выходных каскадах усилителей мощности, работающих в режиме больших амплитуд, часто используют двухтактные эмиттерные повторители, собранные на комплиментарных транзисторах (рис. 4.4). В этой схеме транзисторы $VT1$ и $VT2$ имеют одинаковые параметры, но разные типы проводимости ($n-p-n$ и $p-n-p$). Входное напряжение подается на базы обоих транзисторов одновременно. При нулевом напряжении на входе оба транзистора закрыты. При подаче на вход знакопеременного сигнала транзисторы открываются поочередно.

При подаче на вход напряжения положительной полярности открывается транзистор $VT1$, а при подаче на вход напряжения отрицательной полярности открывается транзистор $VT2$. На выходных зажимах напряжения, снимаемые с эмиттеров транзисторов, складываются, и форма выходного напряжения не отличается от формы входного напряжения.

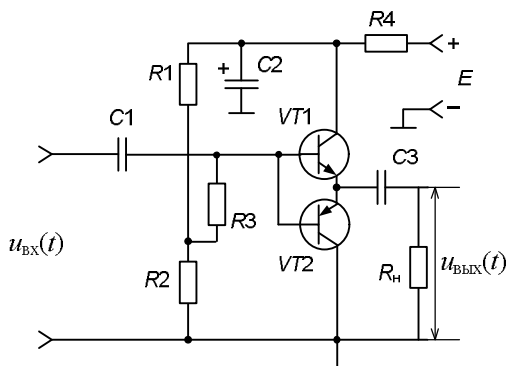


Рис. 4.4 — Двухтактный эмиттерный повторитель на комплиментарных транзисторах

Сопротивление входной цепи транзисторов в этой схеме определяется по формуле:

$$r_{\text{вх}, VT1, VT2} = h_{21\Omega} R_n, \quad (4.3)$$

где R_n — сопротивление, подключенное к выходу схемы.

Сравнивая выражения (2.4) и (4.3), (с учетом того, что $R_n > R_{n\sim}$) можно прийти к выводу, что входное сопротивление схемы изображенной на рис. 4.4 больше, чем у обычного эмиттерного повторителя (см. рис. 2.1).

4.2.4. Истоковый повторитель

Каскад на полевом транзисторе с общим стоком (называемый истоковым повторителем) (рис. 4.5) имеет повышенное входное сопротивление. Такой каскад также как эмиттерный повторитель не изменяет полярности напряжения и обладает коэффициентом усиления близким к единице.

В этой схеме входное напряжение подается через разделительный конденсатор $C1$ на затвор полевого транзистора. Сопротивление затвористок полевых транзисторов с управляемым p - n -переходом очень велико и обычно лежит в пределах $10^9 \dots 10^{12}$ Ом. Ток затвора практически равен нулю (обычно менее 10^{-9} А). Резистор $R1$ обеспечивает путь для протекания этого тока и его выбирают величиной в несколько мегаом.

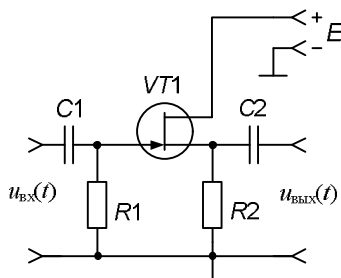


Рис. 4.5 — Истоковый повторитель

Резистор $R2$ является нагрузкой по постоянному току. Постоянное напряжение между затвором и истоком полевого транзистора равно падению напряжения на резисторе $R2$, поэтому, изменяя величину этого резистора, можно изменять положение точки покоя.

Для переменной составляющей тока источника сигнала входным сопротивлением каскада является параллельное соединение резистора $R1$ и сопротивление входной цепи полевого транзистора. Так как сопротивление входной цепи полевого транзистора велико (сотни мегом и более), то входное сопротивление каскада практически равно величине сопротивления резистора $R1$, которое в практических схемах истоковых повторителей выбирают равным нескольким мегаом.

4.3. Описание лабораторного макета

Принципиальная схема лабораторного макета изображена на рис. 4.6. Лабораторный макет содержит 4 схемы. Это эмиттерный повторитель с обратной связью, истоковый повторитель на полевом транзисторе, эмиттерный повторитель на составном транзисторе и двухтактный эмиттерный повторитель на комплементарных транзисторах.

Схема эмиттерного повторителя с обратной связью содержит переключатель $SV1$, который позволяет отключить обратную связь. Если переключатель $SV1$ разомкнут, то каскад эквивалентен обычному эмиттерному повторителю. При замыкании переключателя $SV1$ в схему подключаются цепи обратной связи, повышающие входное сопротивление.

В лабораторном макете в качестве усилительных элементов используются биполярные транзисторы типа КТ315 ($n-p-n$ проводимости) и КТ361 ($p-n-p$ проводимости), а также полевой транзистор типа КП303В.

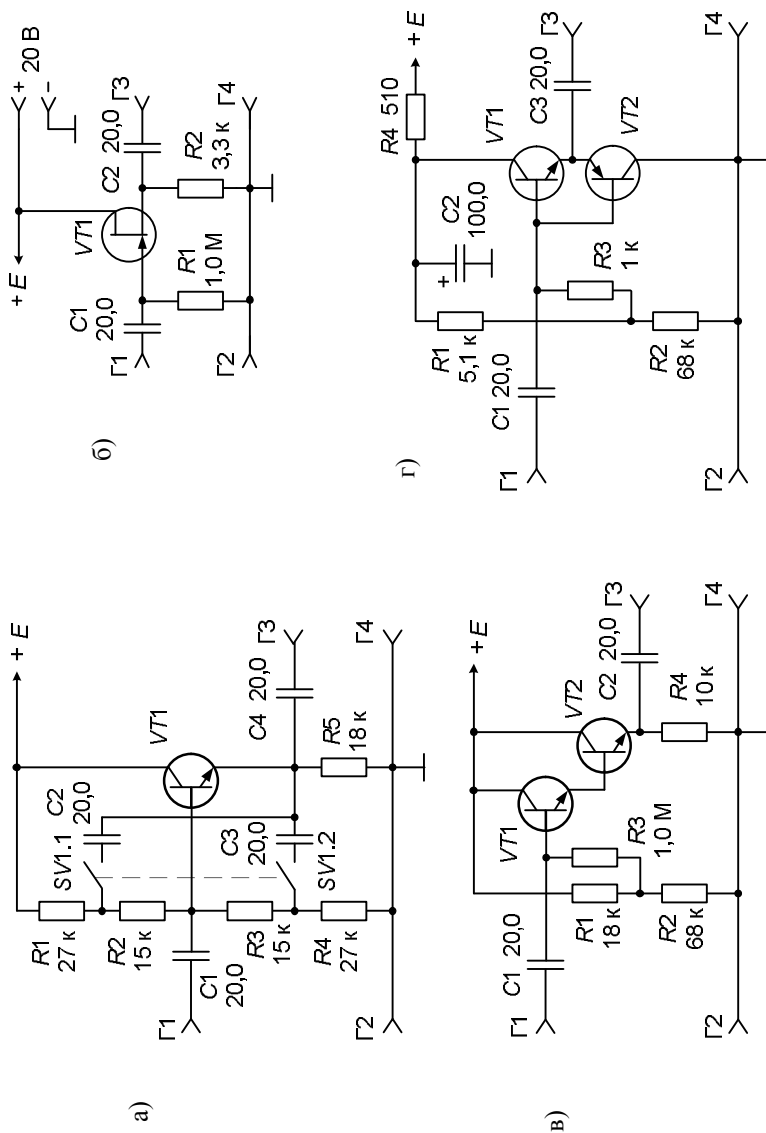


Рис. 4.6 — Схема лабораторного макета

Коэффициент передачи по току установленных в лабораторном макете транзисторов КТ315 и КТ361 лежит в пределах $h_{21Э} \approx 20 \dots 30$.

Каждый из каскадов собран в виде отдельной схемы и имеет свои входные и выходные гнезда. Гнезда Г1-Г2 являются входными, гнезда Г3-Г4 — выходными.

Напряжение питания подается внутри корпуса лабораторного макета

4.4. Порядок выполнения работы

4.4.1. Исследование схемы эмиттерного повторителя с обратной связью (рис. 4.6,а).

Тумблер *SV1* поставьте в положение «Выкл» и проведите экспериментальное исследование эмиттерного повторителя с выключенной обратной связью.

Для этого:

— установите напряжение на выходе генератора равным нулю, частоту сигнала равной 1 кГц.

— подключите генератор к входу (гнезда Г1-Г2) исследуемого каскада, к выходу каскада (гнезда Г3-Г4) подключите осциллограф;

— увеличивая амплитуду напряжения на входе исследуемого каскада, определите максимальное действующее значение напряжения входного сигнала $U_{вх.мах}$, при котором начинают появляться заметные искажения формы сигнала на выходе;

— подайте на вход каскада напряжение величиной $U_{вх} = U_{вх.мах} / 3$;

— к выходу каскада вместо осциллографа подключите вольтметр;

— определите входное сопротивление исследуемого каскада, выполнив операции:

а) измерьте напряжение на выходе $U_{вых.1}$;

б) включите между генератором сигналов и исследуемым каскадом дополнительный резистор $R_{доп}$ (см. рис. 4.7) и измерьте напряжение на выходе каскада $U_{вых.2}$.

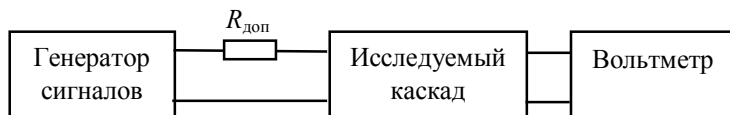


Рис. 4.7 — Структурная схема для измерения входного сопротивления

в) определите по маркировке нанесенной на корпусе дополнительного резистора $R_{\text{доп}}$ его номинал;

г) рассчитайте входное сопротивление исследуемого каскада по формуле:

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вых.2}}}{U_{\text{вых.1}} - U_{\text{вых.2}}} R_{\text{доп}}.$$

— снимите амплитудно-частотную характеристику исследуемого каскада в диапазоне частот 20 ... 200000 Гц.

— установите частоту генератора равной 1 кГц. Измерьте вольтметром напряжение на входных и выходных зажимах исследуемого каскада и рассчитайте коэффициент усиления.

4.4.2. Тумблер $SV1$ поставьте в положение «Вкл» и проведите экспериментальное исследование эмиттерного повторителя с подключенной обратной связью. Для этого повторите измерения проведенные в п. 4.4.1.

4.4.3. Проведите экспериментальное исследование истокового повторителя (рис. 4.6,б). Для этого повторите измерения проведенные в п.п. 4.4.1.

4.4.4. Проведите экспериментальное исследование эмиттерного повторителя на составном транзисторе (рис. 4.6,в). Для этого повторите измерения проведенные в п. 4.4.1.

4.4.5. Проведите экспериментальное исследование двухтактного повторителя на комплиментарных транзисторах (рис. 4.6,г). Для этого повторите измерения проведенные в п. 4.4.1.

4.4.6. Рассчитайте входные сопротивления исследуемых каскадов и сравните с экспериментально найденными значениями. При проведении расчетов используйте номиналы элементов схемы, приведенные на рис.4.6.

4.4.7 Сравните значения входных сопротивлений исследуемых каскадов.

4.4.8. Сделайте выводы по работе.

4.5. Содержание отчета

4.5.1. Цель работы.

4.5.2. Принципиальная схема лабораторного макета.

4.5.3. Типы и заводские номера измерительных приборов, используемых в лабораторной установке.

4.5.4. Результаты измерений и расчетов входных сопротивлений исследуемых каскадов.

4.5.5. Частотные характеристики исследуемых каскадов.

4.5.6. Выводы по работе.

4.6. Контрольные вопросы

4.6.1. Какие схемы включения транзисторов вы знаете? Сравните эти схемы по коэффициентам усиления, входному и выходному сопротивлениям, другим параметрам.

4.6.2. От параметров каких элементов схемы зависит входное сопротивление каскада?

4.6.3. Какие имеются пути увеличения входного сопротивления каскада?

4.6.4. Объясните принцип работы схем, используемых в лабораторном макете. Параметры каких элементов влияют на характеристики исследуемых каскадов?

4.6.5. Объясните методики измерения входного сопротивления каскада и его частотных характеристик.

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ СТАБИЛИЗАЦИИ РЕЖИМА РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРА ПО ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

5.1. Цель работы

Исследование основных схем стабилизации точки покоя транзисторных каскадов.

5.2. Краткие теоретические сведения

Известно, что токи и напряжения транзистора существенно зависят от температуры окружающей среды, а также от влияния других дестабилизирующих факторов (радиации, старения транзисторов, их замены и т.д.). Если не предусмотреть мер по стабилизации режима, то из-за влияния указанных факторов будут меняться и параметры транзистора и как следствие параметры усилительного каскада в целом.

Для нормальной работы усилительного каскада ток покоя выходной цепи при изменении температуры и воздействии других дестабилизирующих факторов не должен сильно отклоняться от своего номинального значения. Так, чрезмерное уменьшение тока покоя ведет к увеличению нелинейных искажений, уменьшению мощности на выходе и коэффициента усиления. Увеличение тока покоя снижает КПД каскада, приводит к перегреву усилительного элемента и также может повысить нелинейные искажения. Отклонение тока покоя от нормального значения в режиме А обычно допускается в каскадах мощного усиления не более чем на $\pm 10\%$, а в маломощных каскадах предварительного усиления — не более чем на $\pm 20\%$.

Различают две основные схемы подачи смещения во входную цепь: схема смещения фиксированным током базы и схема смещения фиксированным напряжением база-эмиттер.

На рис. 5.1 изображена схема смещения фиксированным током базы.

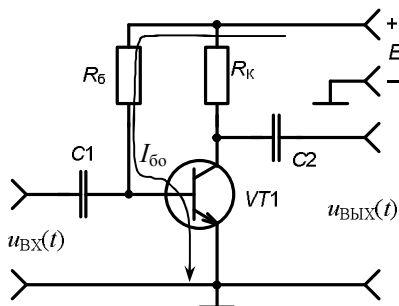


Рис. 5.1 — Схема смещения фиксированным током базы

Постоянный ток базы для этой схемы равен

$$I_{60} = \frac{E}{R_6 + r_{63}},$$

где r_{63} — сопротивление перехода база-эмиттер транзистора.

Для того, чтобы ток смещения не зависел от параметров транзистора выбирают $R_6 \gg r_{63}$, тогда

$$I_{60} \cong E/R_6. \quad (5.1)$$

Отсюда видно, что ток определяется величиной внешнего сопротивления R_6 и остается фиксированным при воздействии различных дестабилизирующих факторов.

На рис. 5.2 изображена схема смещения фиксированным напряжением база-эмиттер.

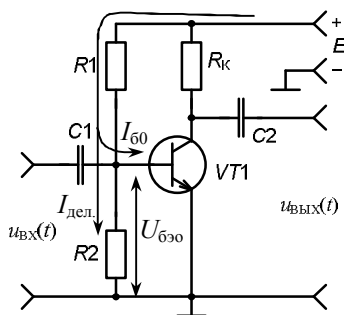


Рис. 5.2 — Схема смещения фиксированным напряжением база-эмиттер

В этой схеме смещение на базу подается от делителя напряжения, образованного резисторами $R1$ и $R2$. Чтобы напряжение $U_{бэ0}$ не зависело от параметров входной цепи транзистора, необходимо выбрать ток делителя

$$I_{\text{дел}} \gg I_{б0} \quad (5.2)$$

В этом случае напряжение смещения определяется из выражения

$$U_{бэ0} \approx R_2 I_{\text{дел.}}$$

и практически остается неизменным (фиксированным) при изменении условий эксплуатации.

Однако, рассмотренные схемы не обеспечивают высокой стабильности режима работы в широком диапазоне температур. Так замена транзистора или изменение температуры (на $20 \dots 50^\circ\text{C}$) сильно изменяют ток покоя выходной цепи (в 2 и более раз). Такая низкая температурная стабильность допустима лишь в некоторых случаях. Например, в простых лабораторных устройствах работающих при комнатной температуре, при этом резисторы, стоящие в цепях смещения, подбирают индивидуально к примененному экземпляру транзистора.

Широкое распространение получили схемы со стабилизацией положения точки покоя путем введения отрицательной обратной связи по постоянному току. Различают три основные схемы стабилизации:

- коллекторная;
- эмиттерная;
- комбинированная.

Простейшей и наиболее экономичной из этих схем является схема коллекторной стабилизации (см. рис. 5.3).

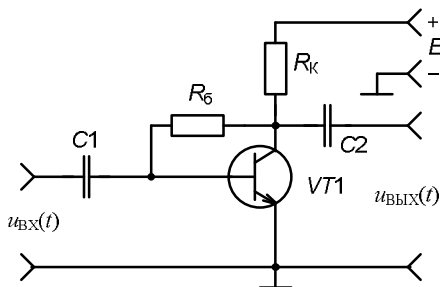


Рис. 5.3 — Схема коллекторной стабилизации

В этой схеме стабилизация положения точки покоя осуществляется при помощи параллельной отрицательной обратной связи (ООС) по напряжению. Напряжение обратной связи с коллектора транзистора через резистор R_6 подается на базу.

Коллекторная стабилизация удовлетворительно действует лишь при значительном падении постоянного напряжения на коллекторной нагрузке (порядка половины напряжения источника питания E), а также не слишком больших разбросах статического коэффициента усиления тока $h_{21э}$ (не более чем в 1,5 ... 2 раза) и изменении температуры транзистора не более чем на 20 ... 30°C.

Недостатком схемы коллекторной стабилизации является снижение входного сопротивления каскада и его усиления из-за наличия параллельной ООС по переменному току. Для устранения этого недостатка резистор цепи обратной связи R_6 делят на две части ($R_6 = R_{61} + R_{62}$) и среднюю точку через блокировочный конденсатор $C3$ по переменной составляющей соединяют с общим проводом (рис. 5.4). В этом случае обратная связь по постоянной составляющей остается прежней, что сохраняет стабильность точки покоя на прежнем уровне, а ООС по переменной составляющей устраняется с помощью блокировочного конденсатора $C3$. При этом не происходит уменьшения коэффициента усиления каскада.

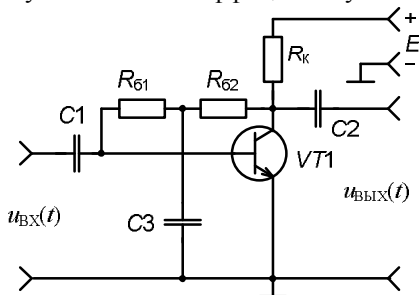


Рис. 5.4 — Схема коллекторной стабилизации с устранением ООС по переменному току

Более высокую стабильность точки покоя обеспечивает широко применяемая схема эмиттерной стабилизации. Эта схема может обеспечивать работоспособность каскада при изменении $h_{21э}$ транзистора в 5 ... 10 раз и изменении его температуры на 70 ... 100°C. Каскад с эмиттерной стабилизацией изображен на рис. 5.5.

Стабилизация происходит за счет возникновения на резисторе R_3 напряжения отрицательной обратной связи. Постоянное напряжение между базой и эмиттером в этой схеме равно:

$$U_{\text{бэо}} = U_{R_2} - U_{R_3} = I_{\text{дел}} \cdot R_2 - I_{\text{эо}} \cdot R_3 . \quad (5.3)$$

Механизм действия обратной связи следующий.

С увеличением температуры окружающей среды происходит увеличение постоянной составляющей тока эмиттера $I_{\text{эо}}$. Это в соответствии с выражением (5.3) уменьшает напряжение смещения $U_{\text{бэо}}$, что приводит к запиранию транзистора.

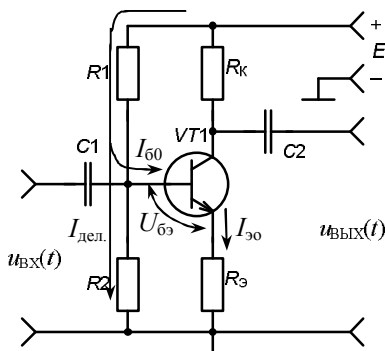


Рис. 5.5 — Каскад с эмиттерной стабилизацией

В схеме, приведенной на рис. 5.5, на резисторе R_3 возникает напряжение ООС как по постоянному, так и по переменному току. Для устранения отрицательной обратной связи по переменному току, снижающей коэффициент усиления каскада, резистор обратной связи R_3 обычно шунтируют конденсатором C_3 большой емкости, практически «закорачивающим» R_3 для переменной составляющей в рабочей полосе частот.

Эмиттерная стабилизация хорошо действует как при большом, так и при малом падении питающего напряжения на сопротивлении R_k , поэтому она применима и для трансформаторных каскадов, где коллекторная стабилизация непригодна. Стабилизирующее действие эмиттерной стабилизации увеличивается с увеличением сопротивления резистора обратной связи R_3 .

На рис. 5.6 изображена схема комбинированной стабилизации. Эта схема представляет собой комбинацию рассмотренных выше способов стабилизации. Она имеет место, например, при включении в каскад с эмиттерной стабилизацией резистора фильтра $R_{\text{ф}}$ и обеспечивает стабильность большую, чем схема эмиттерной стабилизации.

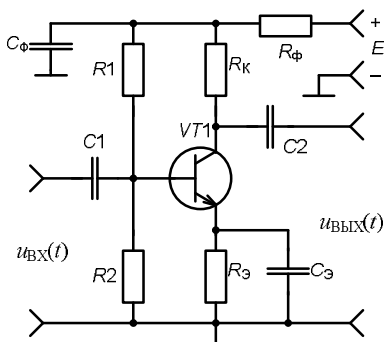


Рис. 5.6 — Схема комбинированной стабилизации

Для оценки температурной неустойчивости различных схем транзисторных усилителей часто пользуются коэффициентом температурной неустойчивости S_t

$$S_t = \frac{dI_{\text{ко}}}{dI_{\text{кбо}}} \approx \frac{I_{\text{ко}}(t^\circ) - I_{\text{ко}}(20^\circ)}{I_{\text{кбо}}(t^\circ) - I_{\text{кбо}}(20^\circ)}, \quad (5.4)$$

где $I_{\text{ко}}(20^\circ)$ — постоянная составляющая тока коллектора при температуре $t^\circ = 20^\circ\text{C}$;

$I_{\text{ко}}(t^\circ)$ — постоянная составляющая тока коллектора при температуре t° ;

$I_{\text{кбо}}(20^\circ)$ — обратный ток перехода коллектор-база при температуре $t^\circ = 20^\circ\text{C}$;

$I_{\text{кбо}}(t^\circ)$ — обратный ток перехода коллектор-база при температуре t° .

Здесь учтено, что увеличение постоянной составляющей тока базы с увеличением температуры вызывается в основном ростом обратного тока перехода коллектор-база транзистора $I_{\text{кбо}}$.

5.3. Описание лабораторного макета

Принципиальная схема лабораторного макета изображена на рис. 5.7. Каскад усиления с общим эмиттером собран на транзисторе МП41. С помощью переключателя $SV1$ можно изменить схемы подачи смещения транзистора:

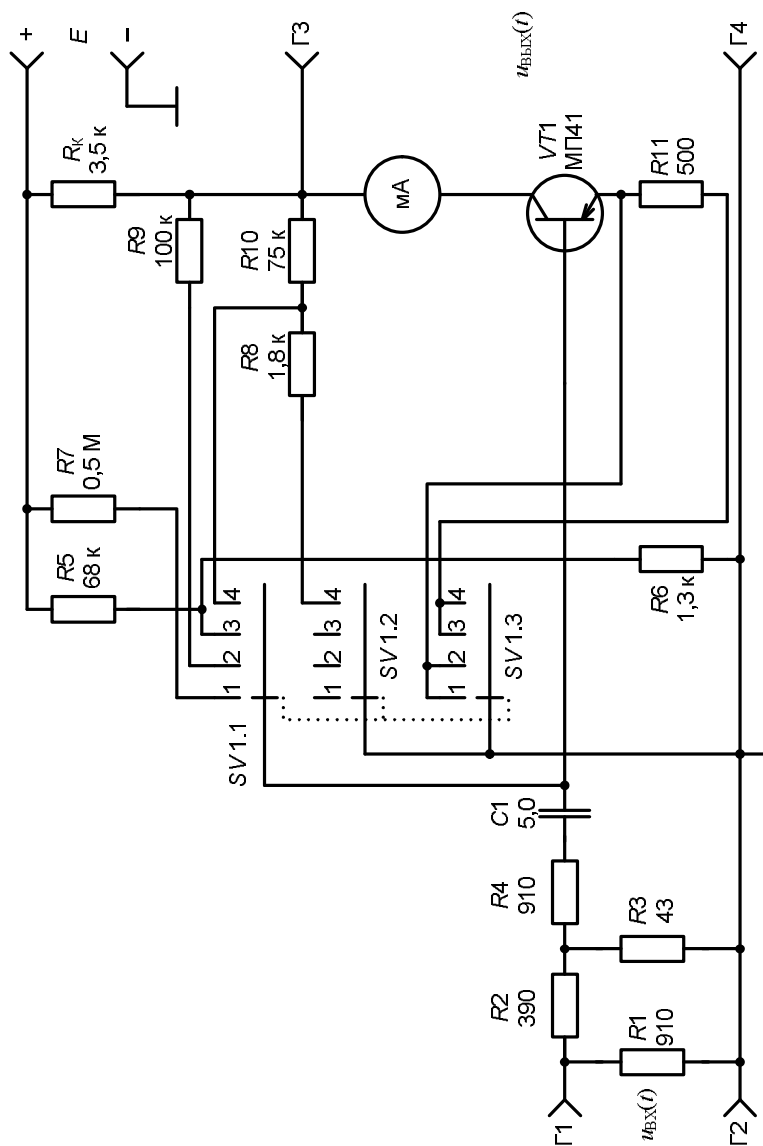


Рис. 5.7 — Принципиальная схема лабораторного макета

- положение 1 — смещение фиксированным током базы;
- положение 2 — коллекторная стабилизация;
- положение 3 — эмиттерная стабилизация;
- положение 4 — комбинированная стабилизация.

В цепь коллектора транзистора включен миллиамперметр, с помощью которого измеряется постоянная составляющая тока коллектора. Транзистор $VT1$ внутри корпуса лабораторного макета помещен в термостат.

На лицевую панель лабораторного макета выведены: переключатель $SV1$, миллиамперметр, измеритель температуры термостата и кнопка с надписью «термостат».

Для включения нагрева термостата необходимо удерживать кнопку с надписью «термостат» в нажатом состоянии. Нагревание термостата до температуры 60°C происходит в течение 10 ...15 мин.

5.4. Порядок выполнения работы

5.4.1. Изучите принципиальную схему лабораторного макета и ознакомьтесь с системой коммутации.

5.4.2. Установите переключатель на макете в положение 1, соответствующее схеме смещения фиксированным током базы и измерьте постоянную составляющую тока коллектора $I_{\text{кк}}$ при комнатной температуре ($\sim 20^{\circ}\text{C}$)

5.4.3. Повторите измерение, проведенное в п. 5.4.2, при комнатной температуре для схем коллекторной ($SV1$ в положении 2), эмиттерной ($SV1$ в положении 3) и комбинированной ($SV1$ в положении 4) стабилизаций.

5.4.4. Включите термостат и после установления температуры 60°C повторите измерения проведенные в п. 5.4.2 и п. 5.4.3.

5.4.5. По результатам эксперимента определите по формуле (5.4) коэффициент температурной нестабильности S_T исследуемых схем. При этом изменение тока коллектора берется из экспериментальных данных, а изменение тока базы рассчитывается теоретически (см. примечание).

Сопоставьте значения коэффициента температурной нестабильности S_T для каждой из схем.

Примечание.

При изменении температуры обратный ток коллекторного перехода $I_{\text{кб0}}$ изменяется по экспоненциальному закону и для германиевых транзисторов может быть рассчитан по формуле [2, 3]:

$$I_{\text{кбо}}(t^\circ) \cong I_{\text{кбо}}(20^\circ) 2^{\frac{t^\circ - 20^\circ}{10^\circ}}, \quad (5.5)$$

где $I_{\text{кбо}}(20^\circ) = 3 \text{ мкА}$ — значение обратного тока коллекторного перехода германиевого транзистора МП41, используемого в данном макете, при температуре 20°C ;

t° — температура коллекторного перехода в градусах Цельсия.

5.5. Содержание отчета

5.5.1. Цель работы.

5.5.2. Принципиальная схема лабораторного макета.

5.5.3. Результаты измерений и расчетов.

5.5.4. Выводы по работе.

5.6. Контрольные вопросы

5.6.1. Изобразите схему подачи смещения фиксированным напряжением база-эмиттер. Поясните принцип действия.

5.6.2. Изобразите схему подачи смещения фиксированным током базы. Поясните принцип действия.

5.6.3. Почему метод смещения фиксированным током базы непригоден для массовой аппаратуры и устройств, работающих в широком диапазоне температур?

5.6.4. Назовите причины изменения коллекторного тока с изменением температуры.

5.6.5. Как изменяются входные характеристики транзистора при изменении температуры?

5.6.6. Нарисуйте схему коллекторной стабилизации и поясните принцип действия.

5.6.7. Как зависит эффективность коллекторной стабилизации от величины сопротивления в цепи коллектора постоянному току?

5.6.8. Изобразите схему эмиттерной стабилизации и поясните принцип действия.

5.6.9. Как зависит эффективность эмиттерной стабилизации от величины сопротивления в цепи эмиттера постоянному току?

5.6.10. Как зависит эффективность эмиттерной стабилизации от величины сопротивления базового делителя?

5.6.11. Изобразите схему комбинированной стабилизации и поясните особенности ее работы.

5.6.12. Сравните эффективность рассмотренных схем температурной стабилизации.

5.6.13. Покажите пути протекания постоянных составляющих токов базы, эмиттера и коллектора в рассмотренных схемах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Войшвилло Г.В. Усилительные устройства: 2-е изд. перераб. и доп. / Г.В. Войшвилло. — М.: Радио и связь, 1983. — 264 с.
2. Остапенко Г.С. Усилительные устройства / Г.С. Остапенко. — М.: Радио и связь, 1989. — 400 с.
3. Павлов В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств / В.Н. Павлов, В.Н. Ногин. — М.: Горячая линия-Телеком, 2001. — 320 с.
4. Ежков Ю.С. Справочник по схемотехнике усилителей / Ю.С. Ежков. — М.: РадиоСофт, 2002. — 268 с.

Заказ № _____ от « _____ » _____ 2008 г. Тираж _____ экз.

Изд-во СевНТУ