

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Кафедра ЭАФУ

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА

Лабораторная работа №1 по курсу «Преобразование сигналов в
физических установках»

Томск – 2020

Оборудование, необходимое для проведения лабораторной работы:

Элементная база:

- транзистор – 2 шт.
- резистор постоянный 200 Ом – 1 шт.
- резистор подстроечный 1 кОм – 1 шт.
- резистор подстроечный 2 кОм – 2 шт.
- резистор подстроечный 5 кОм – 1 шт.
- конденсатор 0,1 мкФ – 1 шт.
- конденсатор 0,47 мкФ – 1 шт.
- конденсатор 1 мкФ – 1 шт.

Измерительные приборы:

- мультиметры – 2 ед.
- осциллографы – 1 ед.

Источники:

- источники напряжения постоянного тока – 2 ед.
- источники напряжения переменного тока – 1 ед.

Расходные материалы:

- плата макетная – 1 шт.
- провода.

Цель работы:

экспериментальное определение характеристик биполярного и полевого транзистора;
получение практических навыков расчета параметров усилительного каскада.

Порядок выполнения лабораторной работы

1 Изучение вольтамперных характеристик биполярного транзистора

Необходимое оборудование для проведения эксперимента: биполярный транзистор VT1, измерительные приборы (амперметр, вольтметр), источники постоянного тока.

1.1 Изучение входных вольтамперных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

1.1.1 С помощью мультиметра в режиме проверки диода определить

назначение выводов биполярного транзистора.

1.1.2 Собрать схему, представленную на рисунке 1. Мультиметр 1 необходимо перевести в режим измерения силы тока (режим амперметра). Мультиметр 2 – в режим вольтметра.

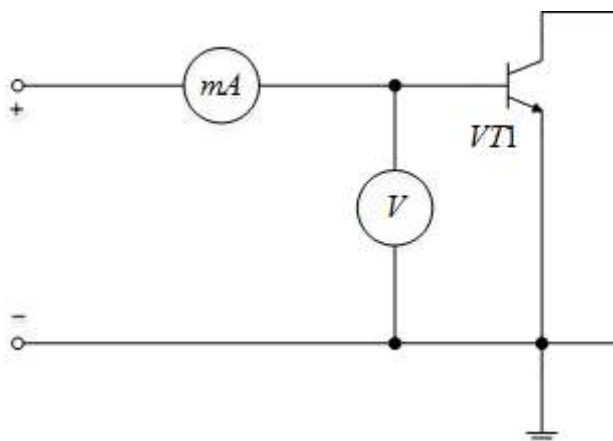


Рисунок 1 – Схема для изучения входной ВАХ биполярного транзистора

1.1.3 Показать собранную электрическую цепь преподавателю. Перевести ручку регулятора выходного напряжения источника постоянного тока в крайнее положение, соответствующее нулю выходного напряжения.

1.1.4 Получив разрешение преподавателя, подключить собранную цепь к источнику питания.

1.1.5 Включить тумблер питания. Меняя выходное напряжение источника питания, изменять напряжение на базе транзистора с шагом 0,05 В в диапазоне 0–1 В. Показания измерительных приборов записать в таблицу 1. После окончания измерений выключить тумблер питания источника. Удостовериться в нулевых показаниях измерительных приборов.

Таблица 1 – Входная вольтамперная характеристика биполярного транзистора при $U_{кэ} = 0$ В

$U_{бэ},$ В	$I_{б},$ мкА

1.1.6 Собрать схему, представленную на рисунке 2.

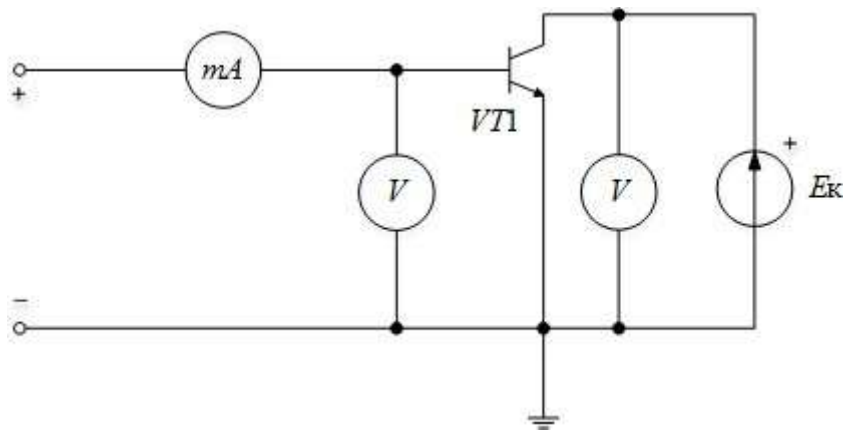


Рисунок 2 – Схема для изучения входной ВАХ биполярного транзистора

1.1.7 Показать собранную электрическую цепь преподавателю. Перевести ручки регуляторов выходного напряжения источников постоянного тока в крайнее положение, соответствующее нулю выходного напряжения.

1.1.8 Получив разрешение преподавателя, включить тумблер питания источника напряжения E_K .

1.1.9 Меняя выходное напряжение источника питания, добиться значения напряжения $U_{КЭ} = 5 \text{ В}$.

1.1.10 Провести серию экспериментов, указанную в пункте 1.1.5. Показания измерительных приборов записать в таблицу 2. После окончания измерений выключить тумблеры питания источников. Удостовериться в нулевых показаниях измерительных приборов.

Таблица 2 – Входная вольтамперная характеристика биполярного транзистора при $U_{КЭ} = 5 \text{ В}$

$U_{бэ},$ В	$I_б,$ мкА

По полученным данным построить семейство входных вольтамперных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером.

1.1.1 Сделать выводы по итогам выполнения соответствующего раздела лабораторной работы.

1.2 Изучение выходных вольтамперных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

1.2.1 Собрать схему, представленную на рисунке 3.

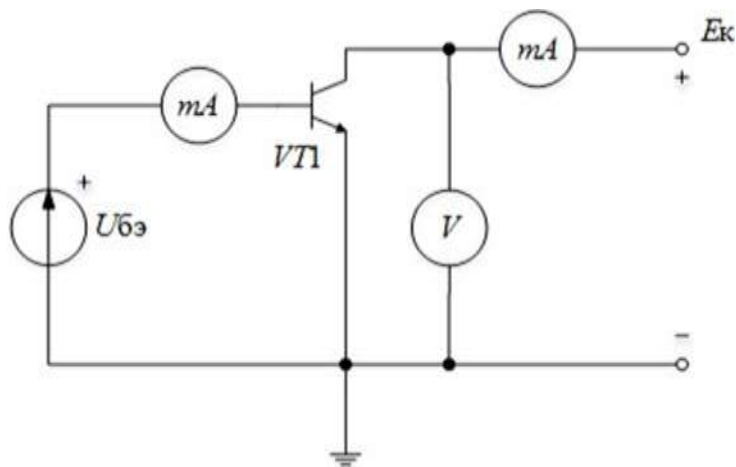


Рисунок 3 – Схема для изучения выходных ВАХ

1.1.11 Показать собранную электрическую цепь преподавателю. Перевести ручки регуляторов выходного напряжения источников постоянного тока в крайнее положение, соответствующее нулю выходного напряжения.

1.1.12 Получив разрешение преподавателя, подключить собранную цепь к источнику питания $U_{бэ}$.

1.1.13 Включить тумблеры питания. Меняя выходное напряжение источника питания $U_{бэ}$, добиться значения $I_{б} = 25$ мкА.

1.1.14 Изменять напряжение на коллекторе биполярного транзистора $U_{кэ}$, не допуская превышения рассеиваемой на транзисторе мощности $P_{к}$ паспортного значения. Показания измерительных приборов записать в таблицу 3. После окончания измерений выключить тумблеры питания источников. Удостовериться в нулевых показаниях измерительных приборов.

Таблица 3 – Выходные вольтамперные характеристики биполярного транзистора

		Примечание
$U_{кэ}, В$		$I_{б} = 0$

$I_K, \text{ мА}$		мкА
$U_{KЭ}, \text{ В}$		$I_6 = 25 \text{ мкА}$
$I_K, \text{ мА}$		

1.1.15 Повторить пункты 1.2.4–1.2.5, изменяя значение I_6 в диапазоне от 0 до 300 мкА с шагом 25 мкА. Построить семейство выходных вольтамперных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером.

Сделать выводы по итогам выполнения соответствующего раздела лабораторной работы.

2 Расчет параметров биполярного транзистора

2.1 Графоаналитическим методом определить h -параметры транзистора для схемы с общим эмиттером, полагая

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{6э}}{\Delta I_6} \right|_{U_{KЭ} = const} ; \quad h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{6э}}{\Delta U_{KЭ}} \right|_{I_6 = const} ;$$

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_6} \right|_{U_{KЭ} = const} ; \quad h_{22} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KЭ}} \right|_{I_6 = const} .$$

2.2 Рассчитать входное и выходное сопротивления транзистора

$$R_{\text{ВХТ}} = h_{11};$$

$$R_{\text{ВЫХТ}} = \frac{1}{h_{21}}.$$

2.3 Определить коэффициент передачи по току транзистора

$$\beta = h_{21}$$

2.4 Сделать выводы по итогам выполнения соответствующего раздела лр работы

3 Расчет усилительного каскада по постоянному току

3.1 Изобразить семейство выходных характеристик в схеме с общим эмиттером, входную характеристику и оси для построения переходной характеристики транзистора

На выходных характеристиках отобразить кривую максимальной мощности $P_{\text{кmax}}$, линии $U_{\text{кэmax}}$ и $I_{\text{кmax}}$.

3.2 Из условия передачи максимальной мощности от источника энергии к потребителю задать $R_{\text{к}} \approx R_{\text{ВЫХТ}}$.

3.3 На выходных характеристиках биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером построить нагрузочную линию в соответствии с уравнением:

$$U_{\text{кэ}} = E_{\text{к}} - I_{\text{к}} R_{\text{к}}.$$

3.4 Построить переходную характеристику. Отметить на оси $I_{\text{б}}$ входной характеристики точки, соответствующие значениям токов базы, для которых приведены выходные характеристики, пересекаемые нагрузочной линией. По точкам пересечения линий, проведенных из выделенных точек выходных и входных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером, построить переходную характеристику.

3.5 На переходной характеристике транзистора выбрать линейный участок, в диапазоне которого обеспечивается усилительный режим работы каскада без

искажений формы входного сигнала. На середине линейного участка нанести рабочую точку, соответствующую режиму работы транзистора по постоянному току.

3.6 По координатам рабочей точки определить токи и напряжения каскада в режиме покоя: $I_{\text{б0}}$, $I_{\text{к0}}$, $U_{\text{бэ0}}$, $U_{\text{кэ0}}$.

3.7 Сделать выводы по итогам выполнения соответствующего раздела лабораторной работы.

4 Расчет усилительного каскада по переменному току

4.1 По построениям, проведенным в п. 3, определить максимальные амплитуды входного и выходного токов и напряжений ($I_{\text{бт}}$, $I_{\text{кт}}$, $U_{\text{бэт}}$, $U_{\text{кэт}}$).

4.2 Графически показать изменение токов и напряжений, считая входной сигнал гармоническим. Записать выражения, соответствующие полученным зависимостям тока и напряжения от времени в виде:

$$\begin{aligned}i_{\bar{6}} &= I_{\bar{6}0} + I_{\bar{6}m} \sin(\omega t) & u_{\bar{6}\bar{3}} &= U_{\bar{6}\bar{3}0} + U_{\bar{6}\bar{3}m} \sin(\omega t) \\i_{\bar{k}} &= I_{\bar{k}0} + I_{\bar{k}m} \sin(\omega t) & u_{\bar{k}\bar{3}} &= U_{\bar{k}\bar{3}0} + U_{\bar{k}\bar{3}m} \sin(\omega t)\end{aligned}$$

4.3 Сделать выводы по итогам выполнения соответствующего раздела лабораторной работы.

5 Расчет параметров элементов усилительного каскада с ОЭ, работающего в классе «А»

5.1 Задать $R_{\text{Н}} \leq R_{\text{К}}$ и $R_{\text{К}} = R_{\text{КВЫХТ}}$, так чтобы величина сопротивления $R_{\text{К}}$ лежала в диапазоне от 0,5 до 10 кОм и обеспечивала максимум амплитуды выходного сигнала.

5.2 Определить значения сопротивлений $R1$ и $R2$ согласно уравнениям:

$$\begin{aligned}R1 &= \frac{E_{\text{к}} - U_{\bar{6}\bar{3}0}}{I_{\text{д}} + I_{\bar{6}0}}; \\R2 &= \frac{U_{\bar{6}\bar{3}0}}{I_{\text{д}} + I_{\bar{6}0}}.\end{aligned}$$

5.3 Выбрать значение $I_{\text{д}}$ в пределах от 2 до 5 $I_{\bar{6}0}$.

5.4 Рассчитать ёмкости разделительных конденсаторов C_{p1} и C_{p2} согласно выражениям:

$$C_{p1} \geq \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot R_{\text{ВхК}}} \cdot 10^6, \text{ мкФ};$$

$$R_{\text{ВхК}} = \frac{R_B \cdot R_{\text{ВхГ}}}{R_B + R_{\text{ВхГ}}};$$

$$R_B = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2};$$

$$C_{p2} \geq \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot R_H} \cdot 10^6, \text{ мкФ},$$

предполагая, что f_H лежит в пределах единиц кГц.

Рассчитать элементы цепи термостабилизации R_3 и C_3 по формулам:

$$R_3 \approx (0,05 \dots 0,15) R_K;$$

$$E_K = U_{KЭ0} + (R_K + R_3) \cdot I_{K0};$$

$$C_3 = \frac{10^7}{4 \cdot \pi \cdot f_H \cdot R_3}, \text{ мкФ.}$$

5.6 Сделать выводы по итогам выполнения соответствующего раздела лабораторной работы.

6 Определение параметров усилительного каскада

6.1 Коэффициент усиления каскада по току K_i

$$K_i = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} \approx \beta.$$

6.2 Входное сопротивление каскада $R_{ВХ}$:

$$R_{ВХ} = R_6 \parallel R_{ВХТ}, \text{ если } R_6 \gg R_{ВХТ}, \text{ то } R_{ВХ} \approx R_{ВХТ}.$$

6.3 Выходное сопротивление каскада $R_{ВЫХ}$:

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_K}{1 + h_{22} \cdot R_K} \approx R_K.$$

6.4 Коэффициент усиления каскада по напряжению K_u :

$$K_u = -\frac{U_{\text{maxВЫХ}}}{U_{\text{maxВХ}}} \approx -\beta \frac{R_K}{R_{ВХ}}.$$

7 Усилительный каскад с ОЭ

Необходимое оборудование для проведения эксперимента: конденсаторы C_{p1} , C_{p2} , $C_{э}$;

резисторы R_1 , R_2 , R_K , R_H , $R_{э}$; биполярный транзистор VT_1 , измерительные приборы (амперметры, осциллограф), источник постоянного тока, источник переменного тока.

7.1 На основании проведенных в пунктах. 2–6 расчетах реализовать усилительный каскад с ОЭ. Собрать схему, представленную на рисунке 4.

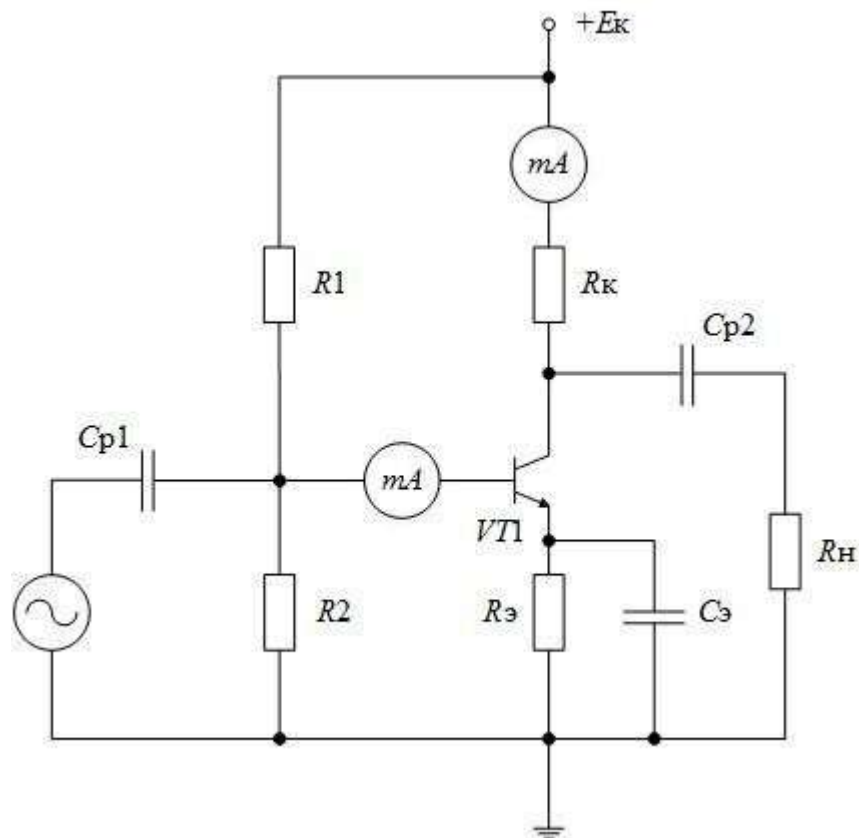


Рисунок 4 – Усилительный каскад с ОЭ

7.2 Показать собранную электрическую цепь преподавателю. Перевести ручки регуляторов выходного напряжения источников тока в крайнее положение, соответствующее нулю выходного напряжения.

7.3 Подключить к схеме осциллограф.

7.4 Получив разрешение преподавателя, включить тумблер питания источника напряжения E_K .

7.5 Меняя выходное напряжение источника питания, добиться значения напряжения

$U_{кэ}$, соответствующего координатам рабочей точки.

7.6 Включить тумблер питания источника напряжения переменного тока. Меняя выходное напряжение источника питания, установить значение, определенное в пункте 4.

7.7 Максимально точно зарисовать наблюдаемую осциллограмму напряжения.

7.8 Экспериментально определить границы активной зоны работы

усилителя, варьируя величиной выходного напряжения источника переменного тока; изменяя величину сопротивления делителя напряжения на резисторах R_1 , R_2 , а также при изменении величины сопротивления R_K .

7.9 Сделать выводы по итогам выполнения соответствующего раздела лабораторной работы.

8 Сделать общие выводы по лабораторной работе.

Написать отчет о выполнении лабораторной работы. Отчет выполнить без применения ЭВМ (рукописно). Все схемы электрические принципиальные выполнить в соответствии с действующими стандартами ЕСКД.

Усилительный каскад на полевом транзисторе

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

Наибольшее применение на практике нашла схема включения полевого транзистора с общим истоком (ОИ), аналогичная схеме на биполярном транзисторе с ОЭ.

На рис. 5 показана схема усилительного каскада на полевом транзисторе с затвором в виде *p-n*-перехода с каналом *n*-типа. Режим покоя каскада обеспечивается постоянным током стока I_{cp} и соответствующим ему постоянным напряжением на сток U_{cp} , которые устанавливаются при начальном смещении на затворе $U_{зп}$ отрицательной полярности.

В цепь истока включен резистор R_u , через который протекает ток I_{cp} , создающий необходимое падение напряжения, являющееся смещением между затвором и истоком:

Резистор R_3 предназначен для обеспечения связи затвора транзистора с нижним выводом резистора R_u , т.е. для подачи отрицательного напряжения $u_{зп}$ с резистора R_u между затвором и истоком транзистора.

Резистор R_u , кроме функции автоматического смещения на затвор, создает в каскаде отрицательную обратную связь по постоянному току стока, служащую для стабилизации режима покоя при изменении температуры и разбросе параметров транзисторов. Конденсатор C_u предназначен для исключения отрицательной обратной связи по

переменному току. Разделительные конденсаторы $C1$ и $C2$ выполняют такую же функцию, как и в каскаде с ОЭ.

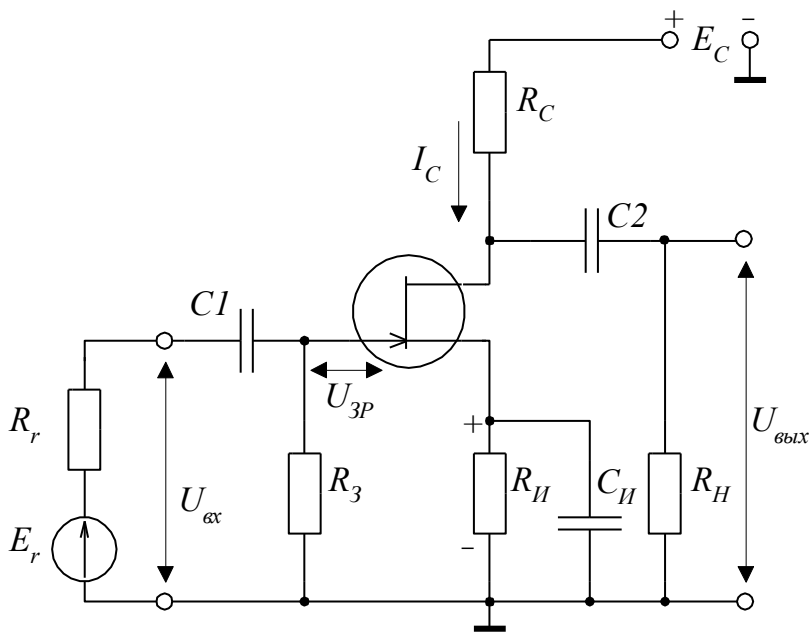


Рисунок 5 - Схема усилительного каскада на полевом транзисторе

Основные параметры каскада на полевом транзисторе можно определить по эквивалентной схеме замещения.

Входное сопротивление каскада определяется резистором R_3 , т.к. входная цепь транзистора практически не потребляет тока

$$R_{вх} = R_3 .$$

Значение R_3 принимают равным 0,5 – 1 МОм. Выходное сопротивление каскада

$$R_{вых} \approx R_c .$$

Коэффициент усиления каскада по напряжению

$$K_u = SR_c ,$$

где S - статическая крутизна характеристики полевого транзистора.

Принцип работы и анализ АЧХ усилительного каскада на полевом транзисторе аналогичен каскаду с ОЭ

На рис.6 приведена схема усилительного каскада на полевом транзисторе с затвором в виде p - n -перехода с каналом n -типа.

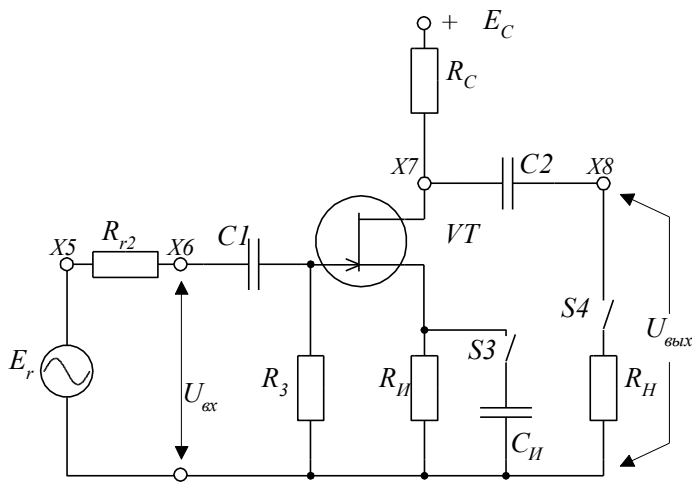


Рисунок 6 - Схема усилительного каскада на полевом транзисторе

Входной сигнал подается от источника E_r с внутренним сопротивлением R_{r2} . При замыкании ключа S3 в схеме отсутствует отрицательная обратная связь. Ключ S4 по аналогии с предыдущей схемой служит для включения или отключения нагрузки R_H .

Частота и амплитуда синусоидального по форме входного сигнала устанавливается соответствующими переключателями.

Данные схемы: $R_{r2}=10$ кОм, $R_3=470$ кОм, $R_c=3$ кОм, $R_H=3000$ Ом, $R_H=6,2$ кОм, $C1=0,1$ мкФ, $C2=3,3$ мкФ, $C_u=15$ мкФ.

Исследование усилительного каскада на полевом транзисторе

8.1 Снять амплитудные характеристики при отсутствии обратной связи для двух случаев:

нагрузка R_H отключена (кнопка S4 отжата);

нагрузка подключена (кнопка S4 нажата).

Для снятия характеристик следует нажать кнопку S3 и при частоте 1 кГц измерить напряжение $U_{вх}$ и $U_{вых}$ в контрольных точках X6 и X8. Данные измерений занести в таблицу.

Таблица

	$U_{вх}, В$						
$U_{вых}, В$	$R_H = \infty$						
	$R_H = 3$ кОм						

8.2 Подключить к контрольным точкам входы осциллографа и произвести измерения в соответствии с:

Кнопки S1 и S2 нажаты. Изменяя ручкой “Ег” входное напряжение от минимального до максимального значения, наблюдать появление искажений сигнала на выходе усилителя. Снять осциллограммы для неискаженного выходного сигнала и сигнала с искажениями.

8.3 Определить входное сопротивление каскада путем измерения падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника сигнала Rг1. Кнопки S1 и S2 нажаты. Установить при частоте 1кГц напряжение на выходе $U_{вых}=2$ В. Затем зафиксировать значения напряжений Ег и $U_{вх}$ в контрольных токах X1 и X2.

8.4 Снять амплитудно-частотные характеристики при включенной нагрузке для двух случаев:

при отсутствии обратной связи (кнопка S3 нажата);

при наличии обратной связи (кнопка S3 отжата).

Характеристики снимать при $U_{вх}=0,1$ В, которое следует поддерживать постоянным с помощью ручки “Ег” при изменении частоты от 0,08 до 20 кГц переключателем “кГц(α)”. Данные измерений занести в табл.

Таблица

	f , кГц							
$U_{вых}$, В	$C_3=15$ мкФ							
	$C_3=0$							

Обработка результатов эксперимента и оформление отчета

9.1 По полученным данным 8.1 построить амплитудные характеристики $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$. Для линейных участков амплитудных характеристик определить коэффициенты усиления $K_u = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$.

9.2 По экспериментальным данным 8.3 определить входное сопротивление каскада по формуле

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = R_{\Gamma 1} \left(\frac{U_{\text{вх}}}{E_{\Gamma} - U_{\text{вх}}} \right),$$

где $R_{\Gamma 1} = 1$ кОм.

9.3 По данным 8.4 построить АЧХ в полулогарифмическом масштабе, откладывая на оси частот не f , а $\lg f$. По частотным характеристикам определить:

коэффициент усиления на средних частотах K_0 ;

коэффициенты частотных искажений для $f_n = 150$ Гц и $f_v = 20$ кГц по формулам $M_n = K_0 / K_n$, $M_v = K_0 / K_v$, где K_n и K_v - коэффициенты усиления на частотах f_n и f_v .

9.4 По данным 8.3 построить амплитудные характеристики $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$. Для линейных участков характеристик определить коэффициенты усиления $K_u = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$.

9.5 По данным определить входное сопротивление каскада по формуле,

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = R_{\Gamma 1} \left(\frac{U_{\text{вх}}}{E_{\Gamma} - U_{\text{вх}}} \right)$$

где $R_{\Gamma 2} = 10$ кОм.

9.6 По данным 8.4 построить АЧХ и определить параметры в соответствии с п.9.3.

Отчет о выполненной работе должен содержать: цель работы, принципиальную схему эксперимента, таблицы, графики, осциллограммы и результаты расчетов.

Вопросы для самопроверки

- 1 Перечислите основные параметры усилителей.
- 2 Объясните причины нелинейных искажений.
- 3 Объясните причины возникновения частотных искажений в области низших и высших частот и какими коэффициентами они определяются.
- 4 Опишите работу усилительного каскада с ОЭ на биполярном транзисторе.
- 5 Объясните, как выбирается режим покоя каскада с ОЭ, используя линию нагрузки.
- 6 Объясните принцип термостабилизации в каскаде с ОЭ.
- 7 Объясните, почему в каскаде с ОЭ выходной сигнал находится в противофазе с входным сигналом.
- 8 Объясните назначение $C_э$ в каскаде с ОЭ.
- 9 Опишите эквивалентную схему каскада с ОЭ.
- 10 Объясните, какие элементы каскада с ОЭ влияют на частотные искажения в области низших и высших частот.
- 11 Объясните работу усилительного каскада на полевом транзисторе.
- 12 В чем принципиальная особенность каскада на полевом транзисторе от каскада с ОЭ.
- 13 Объясните влияние сопротивления нагрузки на параметры усилителей.