

БГУИР

Кафедра ЭВМ

Отчет по лабораторной работе № 2
Тема: «Исследование характеристик полевого транзистора»

Выполнил:

Проверил:

Минск
2023

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение характеристик полевого транзистора.

2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАБОТЕ

В данной работе используются лабораторный стенд NI ELVIS.

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль Lab5A для исследования характеристик полевого транзистора КП303В.

Целью работы является:

- получение передаточной характеристики полевого транзистора в схеме с общим истоком;
- получение зависимости сопротивления канала полевого транзистора от напряжения затвор-исток;
- получение семейства выходных характеристик полевого транзистора в схеме с общим истоком;
- исследование работы транзисторного каскада с общим истоком.

3 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Униполярными, или полевыми, транзисторами называются полупроводниковые приборы, в которых регулирование тока производится изменением проводимости проводящего канала с помощью электрического поля, перпендикулярного направлению тока. Оба названия этих транзисторов достаточно точно отражают их основные особенности: прохождение тока в канале обусловлено только одним типом зарядов, и управление током канала осуществляется при помощи электрического поля.

Электроды, подключенные к каналу, называются стоком (С) и истоком (И), а управляющий электрод называется затвором (З). Напряжение управления, которое создает поле в канале, прикладывается между затвором и истоком. В зависимости от выполнения затвора униполярные транзисторы делятся на две группы: с управляющим р-п-переходом и с изолированным затвором.

Устройство полевого транзистора с изолированным затвором (ПТИЗ) приведено на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Устройство полевого транзистора с изолированным затвором

В полевых транзисторах с изолированным затвором электрод затвора изолирован от полупроводникового канала с помощью слоя диэлектрика из двуоксида кремния SiO_2 . Поэтому полевой транзистор с такой структурой называют МОП-транзистором (металл-окисел-полупроводник). Электроды стока и истока располагаются по обе стороны затвора и имеют контакт с полупроводниковым каналом. Ток утечки затвора пренебрежимо мал даже при повышенных температурах. Полупроводниковый канал может быть обеднен носителями зарядов или обогащен ими. При обедненном канале электрическое поле затвора повышает его проводимость, поэтому канал называется индуцированным. Если канал обогащен носителями зарядов, то он называется встроенным. Электрическое поле затвора в этом, случае приводит к обеднению канала носителями зарядов.

Проводимость канала может быть электронной или дырочной. Если канал имеет электронную проводимость, то он называется n-каналом. Каналы с дырочной проводимостью называются p-каналами. В результате полевые транзисторы с изолированным затвором могут быть четырех типов: с каналом n- или p-типов, каждый из которых может иметь индуцированный или встроенный канал.

Условные изображения этих типов транзисторов приведены на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Условное графическое изображение полевых транзисторов с изолированным затвором

Графическое обозначение транзисторов содержит информацию о его устройстве. Штриховая линия обозначает индуцированный канал, а сплошная - встроенный. Подложка (П) изображается как электрод со стрелкой, направление которой указывает тип проводимости канала. Если корпус транзистора выполнен из металла, то подложка имеет с ним электрический контакт. На электрических схемах подложка обычно соединяется с общим проводом. Затвор изображается вертикальной линией, параллельной каналу. Вывод затвора обращен к электроду истока.

Устройство полевого транзистора с управляющим p-n-переходом (ПТУП) приведено на рисунке 3.3а В таком транзисторе затвор выполнен в виде обратно смещенного p-n-перехода. Изменение обратного напряжения на затворе позволяет регулировать ток в канале. На рисунке 3.3а показан

полевой транзистор с каналом р-типа и затвором, выполненным из областей п-типа. Увеличение обратного напряжения на затворе приводит к снижению проводимости канала, поэтому полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом работают только на обеднение канала носителями зарядов. Условное изображение полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом приведено на рисунке 3.3б.

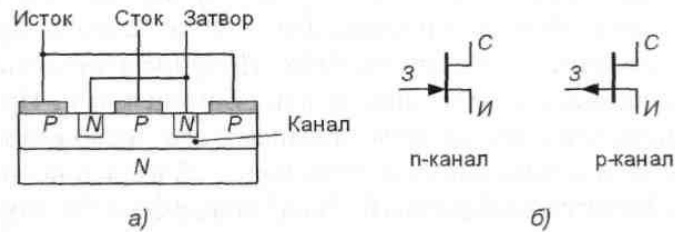


Рисунок 3.3 – Устройство полевого транзистора с управляющим р-п переходом

Поскольку ПТУП могут работать только с обеднением канала, то наличие встроенного канала показано на этом изображении сплошной линией, которая имеет контакты с электродами стока и истока. Направление стрелки на выводе затвора указывает тип проводимости канала.

Входное сопротивление полевых транзисторов составляет десятки - сотни МОм. При этом входной ток очень мал и практически не зависит от напряжения $U_{зи}$ между затвором и истоком, поэтому для полевых транзисторов входная характеристика, т.е. зависимость $I_з$ от $U_{зи}$ при фиксированном значении $U_{си}$, практического значения не имеет и при расчетах используют только передаточные и выходные вольтамперные характеристики (ВАХ).

Типовые передаточные характеристики п-канальных полевых транзисторов приведены на рисунке 3.4. Как видно, ток стока для п-канальных транзисторов имеет положительный знак, что соответствует положительному напряжению на стоке.



Рисунок 3.4 – Типовые передаточные характеристики п-канальных полевых транзисторов

ПТУП при нулевом напряжении на затворе имеют максимальное значение тока, которое называется начальным $I_{нач}$. При увеличении запирающего напряжения ток стока уменьшается и при напряжении отсечки $U_{отс}$ становится близким к нулю.

Характеристики ПТИЗ с индуцированным каналом таковы, что при нулевом напряжении на затворе ток стока транзистора нулевой. Появление тока стока в таких транзисторах происходит при напряжении на затворе больше порогового значения $U_{пор}$. Увеличение напряжения на затворе приводит к увеличению тока стока.

Характеристики ПТИЗ со встроенным каналом при нулевом напряжении на затворе имеют начальное значение тока $I_{с.нач}$. Такие транзисторы могут работать как в режиме обогащения, так и в режиме обеднения. При увеличении напряжения на затворе канал обогащается и ток стока растет, а при уменьшении напряжения на затворе канал обедняется и ток стока снижается.

Для полевых транзисторов с р-каналом передаточные характеристики имеют такой же вид, только располагаются в нижней половине графика и имеют отрицательное значение тока и отрицательное напряжение на стоке.

Типовые выходные характеристики полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом и каналом n-типа приведены на рисунке 3.5.

Характеристики других типов транзисторов имеют аналогичный вид. На этих ВАХ можно выделить две области: линейную и насыщения. В линейной области вольтамперные характеристики вплоть до точки перегиба представляют собой прямые линии, наклон которых зависят от напряжения на затворе. В области насыщения ВАХ идут практически горизонтально, что позволяет говорить о независимости тока стока I_c от напряжения на стоке $U_{си}$. Особенности этих характеристик обуславливают применение полевых транзисторов.

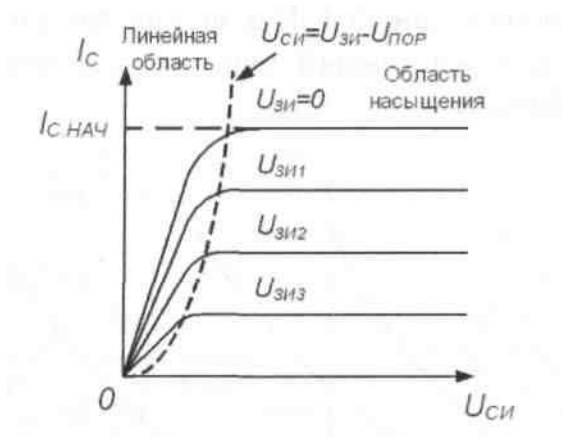


Рисунок 3.5 – Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим р-п переходом

В линейной области полевой транзистор используется как сопротивление, управляемое напряжением на затворе, а в области насыщения - как усилительный элемент.

Линейная область. В линейной области ток стока полевого транзистора определяется уравнением:

$$i_c = [(U_{\text{пор}} - U_{\text{зи}})U_{\text{си}} - \frac{U_{\text{си}}^2}{2}], \quad (3.1)$$

где k — постоянный коэффициент, зависящий от конструкции транзистора, $U_{\text{пор}}$ — пороговое напряжение (или напряжение отсечки), $U_{\text{зи}}$ - напряжение между затвором и истоком, $U_{\text{си}}$ - напряжение между стоком и истоком.

На начальном участке линейной области, учитывая малую величину напряжения на стоке ($U_{\text{си}} \sim 0$) можно воспользоваться упрощенным выражением:

$$i_c \approx 2k(U_{\text{пор}} - U_{\text{зи}})U_{\text{си}}. \quad (3.2)$$

Выражение 3.2 позволяет определить сопротивление канала в линейной области.

$$R_K = \frac{U_{\text{си}}}{i_c} = \frac{1}{2k(U_{\text{пор}} - U_{\text{зи}})}.$$

Из выражения 3.3 следует, что при $U_{\text{зи}} = 0$ сопротивление канала будет минимальным $R_{K,\text{min}} = 1/(2kU_{\text{пор}})$. Если напряжение на затворе стремится к пороговому значению $U_{\text{зи}} \rightarrow U_{\text{пор}}$, то сопротивление канала возрастает до бесконечности: $R_K \rightarrow \infty$. График зависимости сопротивления канала от управляющего напряжения на затворе приведен на рисунке 3.6.

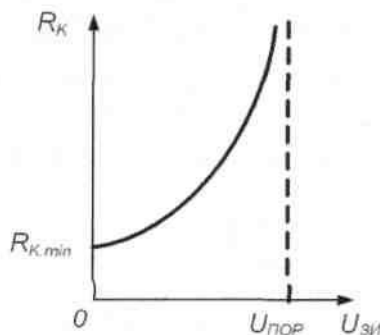


Рисунок 3.6 – Зависимость сопротивления канала полевого транзистора от напряжения на затворе

Основное применение полевых транзисторов в линейной области определяется их способностью изменять сопротивление при изменении напряжения на затворе. Это сопротивление для мощных полевых транзисторов

с изолированным затвором достигает долей Ома (0,5...2,0 Ом), что позволяет использовать их в качестве замкнутого ключа с весьма малым собственным сопротивлением канала. С другой стороны, если напряжение на затворе сделать равным пороговому значению (или больше его), то сопротивление канала транзистора увеличивается, что соответствует разомкнутому ключу с весьма малой собственной проводимостью. Таким образом, полевой транзистор можно использовать как ключ, управляемый напряжением на затворе.

Область насыщения. В области насыщения ток стока полевого транзистора определяется уравнением:

$$i_c = k(U_{\text{пор}} - U_{\text{зи}})^2, \quad (3.4)$$

из которого следует его независимость от напряжения на стоке. Практически такая зависимость есть, но в большинстве случаев она слабо выражена. Из уравнения 3.4 можно найти начальный ток стока при условии, что $U_{\text{зи}}=0$:

$$I_{\text{с.нач}} = kU_{\text{пор}}^2. \quad (3.5)$$

Из выражения 3.5 следует, что значение коэффициента k можно определить экспериментально, измерив начальный ток стока $I_{\text{нач}}$ и пороговое напряжение $U_{\text{пор}}$ (или напряжение отсечки $U_{\text{отс}}$).

Полевые транзисторы, в области насыщения используются в основном как усилительные приборы и их усилительные свойства определяются крутизной вольтамперной характеристики:

$$S = \left| \frac{di_c}{du_{\text{зи}}} \right| = 2k(U_{\text{пор}} - U_{\text{зи}}). \quad (3.6)$$

Из уравнения 3.6 следует, что максимальное значение крутизна имеет при $U_{\text{зи}}=0$. С увеличением напряжения на затворе крутизна уменьшается и при $U_{\text{зи}}=U_n$ становится равной нулю.

Используя максимальное значение крутизны $S_{\text{max}}=2kU_{\text{пор}}$, уравнение 3.6 можно записать в виде:

$$S = S_{\text{max}} \left(1 - \frac{U_{\text{зи}}}{U_{\text{пор}}} \right). \quad (3.7)$$

Усилительный каскад на полевом транзисторе. При построении усилителя на полевых транзисторах наибольшее распространение получила схема каскада с общим истоком. При этом в ней, как правило применяются либо полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом, либо МДП-транзисторы со встроенным каналом.

На рисунке 3.7 приведена типовая схема каскада на полевом транзисторе с управляющим р-п-переходом и каналом п-типа.

В этой схеме с помощью источника смещения $E_{см}$ устанавливается требуемый режим работы каскада. Наиболее часто эта схема используется при построении входных каскадов усилителей. Объясняется это следующими преимуществами полевого транзистора перед биполярным:

- большее входное сопротивление полевого транзистора упрощает его согласование с высокоомным источником сигнала;
- как правило, полевой транзистор имеет весьма малый коэффициент шума, что делает его более предпочтительным при усилении слабых сигналов;
- полевой транзистор имеет большую собственную температурную стабильность режима покоя.

Вместе с тем каскады на полевых транзисторах обычно обеспечивают меньший коэффициент усиления по напряжению, по сравнению с каскадами на биполярных транзисторах.

Как уже было отмечено, полевой транзистор с управляющим переходом может работать только с обеднением канала в режиме обеднения канала, т.е. полярности напряжений, приложенные к его стоку и затвору, должны быть противоположными. Поэтому для задания режима по постоянному току на практике широко используется введение в каскад последовательной отрицательной обратной связи (ООС) по току нагрузки. Схема такого каскада приведена на рисунке 3.8.

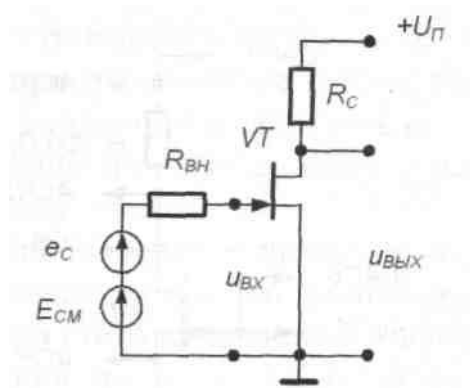


Рисунок 3.7 – Типовая схема усилительного каскада на полевом транзисторе

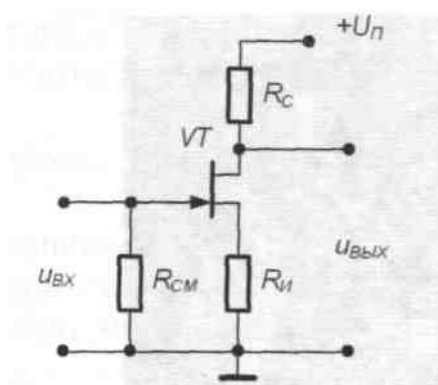


Рисунок 3.8 – Задание режима покоя в усилительном каскаде на полевом транзисторе с управляющим р-п переходом

4 ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ.

Для работы установлен лабораторный модуль Lab5A на макетную плату лабораторной станции NI ELVIS. Внешний вид модуля показан на рисунке 4.1.

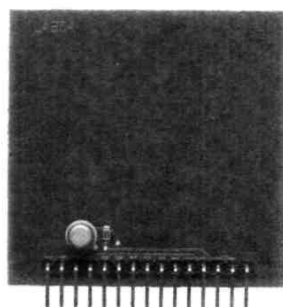


Рисунок 4.1 – Внешний вид модуля Lab5A для исследования характеристик полевого транзистора

При исследовании характеристик полевого транзистора используется схема, изображенная на рисунке 4.2.

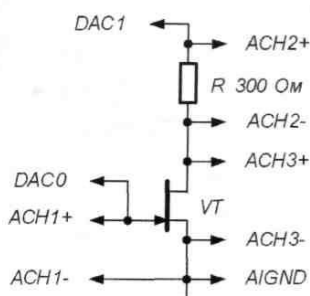


Рисунок 4.2 – Принципиальная электрическая схема для исследования характеристик полевого транзистора

4.1 Получение передаточной характеристики полевого транзистора в схеме с общим истоком

С помощью цифрового элемента управления, находящегося на передней панели ВП, установим значение напряжения питания стока E_C равным 5В. Нажмем на панели ВП кнопку «Измерение». На графическом индикаторе ВП появится график зависимости выходного тока I_C транзистора от входного напряжения $U_{зи}$.

Скопируем изображение, полученное на графическом индикаторе, на страницу отчета, представленное на рисунке 4.3.

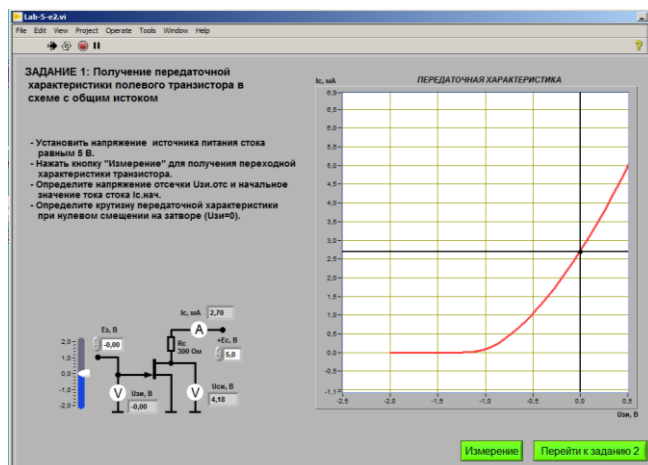


Рисунок 4.3 – Лицевая панель при выполнении задания 1

Изменяя напряжение источника ЭДС затвора E_3 с помощью ползункового регулятора, расположенного на панели ВП, установим значение тока стока I_C примерно равным 0,01 мА. Запишем в отчет значение напряжения отсечки затвор-исток $U_{3U.OTC}$:

$$U_{3U.OTC} = -1,2В.$$

Изменяя напряжение источника ЭДС затвора E_3 с помощью ползункового регулятора, расположенного на панели ВП, установим значение напряжения затвор-исток $U_{зи}$ равным 0 В. Запишем в отчет начальное значение тока стока $I_{C.НАЧ}$:

$$I_{C.НАЧ} = 2,87мА.$$

Вычислим значение коэффициента k , учитывающего конструктивные и технологические параметры транзистора, по формуле:

$$K = \frac{I_{нач}}{U_{зи.отс}^2} = \frac{0,00287}{(-1,2)^2} = 0,002. \quad (4.1)$$

Изменяя напряжение источника ЭДС затвора E_3 с помощью ползункового регулятора, расположенного на панели ВП, установим значение напряжения затвор-исток $U_{зи}$ сначала равным $U_{зи.1} = -0,1В$, а затем равным $U_{зи.2} = +0,1В$. Запишем в отчет значения тока стока $I_{C.1}$ и $I_{C.2}$ для этих точек передаточной характеристики:

$$I_{C.1} = 2,48мА,$$

$$I_{C.2} = 3,27мА.$$

Вычислим и запишем в отчет значение крутизны передаточной характеристики полевого транзистора в окрестности точки $U_{зи}=0$ по формуле:

$$S = \frac{I_{c.2} - I_{c.1}}{U_{3и} - U_{3и}} = \frac{(0,00327 - 0,00248)}{0,2} = 0,004 \text{ CМ.} \quad (4.2)$$

4.2 Получение зависимости сопротивления канала полевого транзистора от напряжения затвор-исток

Нажав на передней панели кнопку «Перейти к заданию 2», на экране появится лицевая панель, необходимая для выполнения задания 2, представленная на рисунке 4.4.

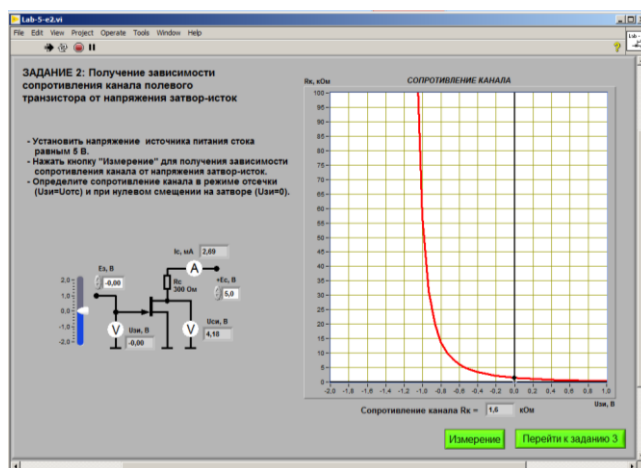


Рисунок 4.4 – Лицевая панель при выполнении задания 2

С помощью цифрового элемента управления, находящегося на передней панели ВП, установим значение напряжения питания стока E_c , равным 5В. Нажмем на панели кнопку «Измерение». На графическом индикаторе ВП появится график зависимости сопротивления канала R_K полевого транзистора от напряжения затвор-исток $U_{зи}$.

Скопируем изображение зависимости сопротивления канала полевого транзистора от напряжения затвор-исток в отчет.

Изменяя напряжение источника ЭДС затвора E_3 с помощью ползункового регулятора, расположенного на панели ВП, установим значение тока стока I_C примерно равным 0,01 мА. Запишем в отчет значение сопротивления $R_{к.макс} >$ соответствующее напряжению $U_{зи.отс}$ (закрытое состояние транзистора):

$$U_{3И.ОТС} = -1,23В.$$

Изменяя напряжение источника ЭДС затвора E_3 с помощью ползункового регулятора, расположенного на панели, установим значение напряжения затвор-исток равным 0В. Запишем в отчет значение сопротивления $R_{к.мин}$, соответствующее напряжению $U_{зи}=0$ (открытое состояние транзистора):

$$R_{к.мин} = 1,4 \text{ кОм.}$$

4.3 Получение семейства выходных характеристик полевого транзистора в схеме с общим истоком

Нажмем на передней панели кнопку «Перейти к заданию 3», на экране появится лицевая панель, необходимая для выполнения задания 3, представленная на рисунке 4.3.

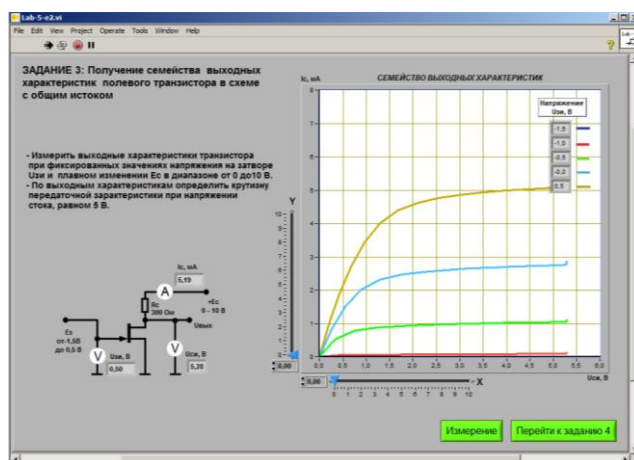


Рисунок 4.3 – Лицевая панель при выполнении задания 3

Нажмем на панели кнопку «Измерение». На графическом индикаторе появятся графики зависимостей тока стока I_C от напряжения сток-исток $U_{си}$, полученные при плавном изменении напряжения на стоке транзистора от 0 до 10В и фиксированных значениях напряжения источника ЭДС затвора $U_{зи} = -1,5\text{В}; -1,0\text{В}; -0,5\text{В}; 0\text{В}; +0,5\text{В}$. Установившиеся при этом значения напряжения $U_{зи}$ отображаются на поле графика.

Скопируем изображение выходных характеристик транзистора в отчет. Средствами MS Word для каждой кривой отметим соответствующие значения напряжения затвор-исток.

При фиксированном напряжении сток-исток, равном $U_{си} = 5 \text{ В}$, определим ток стока I_C , соответствующий значениям напряжения на затворе, при которых снимались выходные характеристики.

Для этого с помощью расположенного на панели ВП ползункового регулятора «Х» установим вертикальную визирную линию напротив деления «5В» горизонтальной оси графика выходных характеристик. Затем с помощью горизонтальной визирной линии, перемещаемой ползунковым регулятором «Y», получим значения тока стока в точках пересечения выходных

характеристик с вертикальным визиром. Полученные результаты запишем в отчет:

$$\begin{aligned} I_{C.1} &= 0\text{мА}, \\ I_{C.2} &= 0,14\text{мА}, \\ I_{C.3} &= 1,14\text{мА}, \\ I_{C.4} &= 2,85\text{мА}, \\ I_{C.5} &= 5,12\text{мА}. \end{aligned}$$

Определим крутизну передаточной характеристики транзистора S при изменении напряжения затвор-исток в диапазоне от $-0,5\text{ В}$ до $0,5\text{ В}$ по формуле $S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}}$. Полученное значение запишем в отчет.

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} = \frac{|5,12 - 1,14|}{|0,5 - (-0,5)|} = 3,98 * 10^{-3} \text{Ом}^{-1}$$

Оцениваем границы активного режима транзисторного каскада, которые определяются координатами точек пересечения линии нагрузки с выходными характеристиками, полученными соответственно, при значениях напряжения затвор исток $-0,5\text{В}$ и $+0,5\text{В}$:

$$\begin{aligned} U_{зи} = -0,5\text{В}, U_{си.max} &= 4,91\text{В}, I_{c.min} = 0,25\text{мА}, \\ U_{зи} = +0,5\text{В}, U_{си.min} &= 3,40\text{В}, I_{c.max} = 5,55\text{мА}. \end{aligned}$$

Вычислим ток стока для средней точки активного режима и определим по передаточной характеристике соответствующее значение напряжения затвор-исток $U_{зи}$:

$$\begin{aligned} I_c &= \frac{I_{c.max} - I_{c.min}}{2} = \frac{5,55\text{мА} - 0,25\text{мА}}{2} = 2,9\text{мА}, \\ U_{зи} &= -0,1\text{В}. \end{aligned}$$

4.4 Установка рабочей точки транзисторного каскада с общим эмиттером

Нажмем на передней панели кнопку «Перейти к заданию 4», на экране появится лицевая панель, необходимая для выполнения задания 4, представленная на рисунке 4.4.

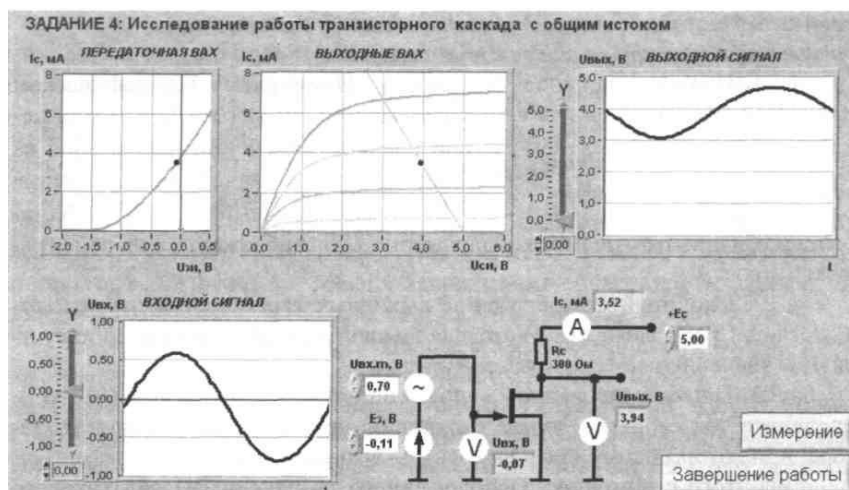


Рисунок 4.6 – Лицевая панель ВП при выполнении задания 4

На графике выходных характеристик транзистора появится изображение линии нагрузки. Сравниваем его с изображением, полученным при выполнении предыдущих измерений.

Установим напряжение источника ЭДС затвора E_3 , равное значению $U_{зи}$, полученному при выполнении предыдущих измерений. Измерим и запишем в таблицу 4.3 параметры статического режима транзисторного усилителя с общим истоком.

$U_{зи}, \text{В}$	$I_c, \text{мА}$	$U_{си}, \text{В}$
-0,1	2,73	4,15

Таблица 4.3 – Параметры статического режима транзисторного усилителя с общим эмиттером

Плавно увеличивая амплитуду входного сигнала и $U_{вх.м} >$ получим на графическом индикаторе ВП максимальный неискаженный выходной сигнал. Скопируем изображение выходного сигнала в отчет. Сопоставим осциллограммы и сделаем вывод о соотношении фаз входного и выходного сигналов транзисторного каскада с общим истоком.

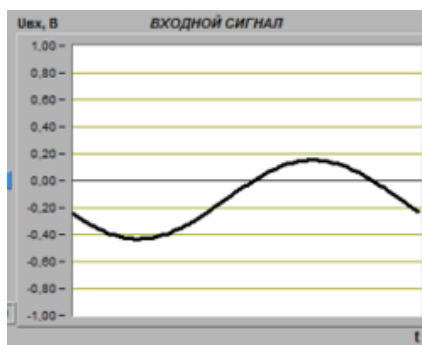


Рисунок 4.7 – Изображение входного сигнала

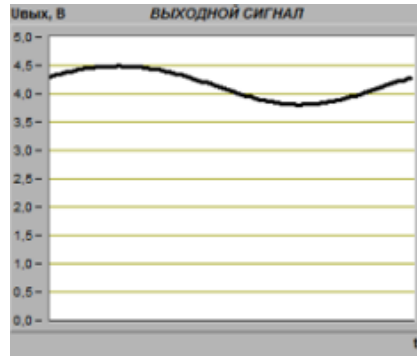


Рисунок 4.8 – Изображение выходного сигнала

Определим амплитуды сигналов:

$$U_{\text{вых.}m} = \frac{(U_{\text{вых.}max} - U_{\text{вых.}min})}{2} = \frac{(4,18\text{В} - 3,25\text{В})}{2} = 0,78\text{В},$$

$$U_{\text{вх.}m} = \frac{(U_{\text{вх.}max} - U_{\text{вх.}min})}{2} = \frac{(0,6\text{В} - (-0,8\text{В}))}{2} = 0,7\text{В}.$$

Используя полученные значения амплитуды входного и выходного сигналов, определим коэффициент усиления транзисторного каскада по формуле $K_y = U_{\text{вых.}m} / U_{\text{вх.}m}$. Результат запишем в отчет.

$$K_y = U_{\text{вых.}m} / U_{\text{вх.}m} = 0,78\text{В} / 0,7\text{В} = 1,11.$$

Вычислим коэффициент усиления транзисторного каскада по формуле $K_y = S * R_c$, где S - значение крутизны, полученное ранее. Результат запишем в отчет. Сравним измеренное и рассчитанное значения коэффициента усиления.

$$K_y = S * R_c = 4,25 * 10^{-3} \text{Ом}^{-1} * 30000 \text{Ом} = 1,28$$

Измеренное и рассчитанное значения коэффициента усиления практически равны.

Исследуем, как влияет положение рабочей точки на работу транзисторного каскада с общим истоком. Для этого, регулируя напряжение источника ЭДС затвора E_3 , изменим значение напряжения затвор-исток примерно на 30% от величины $U_{зи}$, полученной ранее, сначала в сторону увеличения, а затем в сторону уменьшения. Пронаблюдаем характер искажения выходного сигнала. Скопируем в отчет изображение, полученное на графическом индикаторе ВП в обоих случаях.

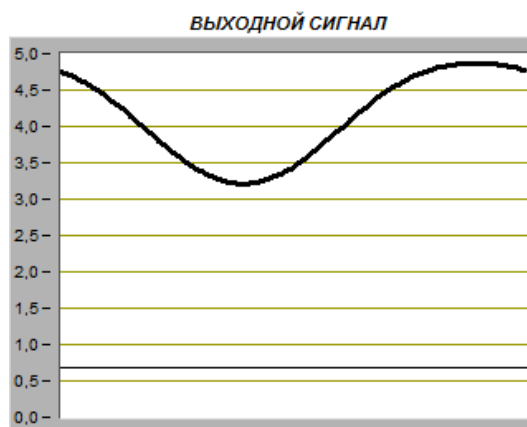


Рисунок 4.9 – Выходной сигнал при увеличении значения напряжения затвор-исток на 30%

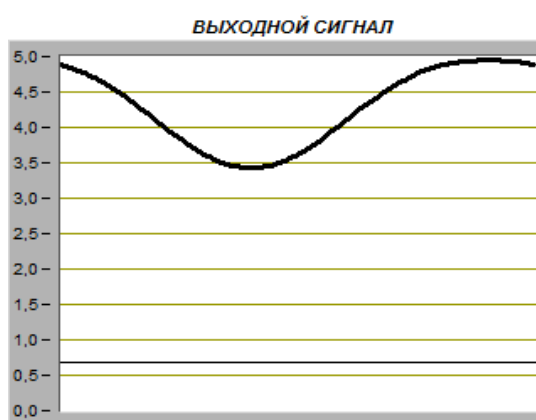


Рисунок 4.10 – Выходной сигнал при уменьшении значения напряжения затвор-исток на 30%

Изменение сигнала происходит в связи с изменением положения рабочей точки. Появление искаженного сигнала может свидетельствовать о выходе рабочей точки за пределы рабочей области.

5 ВЫВОДЫ

В ходе выполнения лабораторной работы была изучена работа полевого транзистора.

При изучении работы полевого транзистора были определены:

- передаточная характеристика полевого транзистора в схеме с общим истоком;
- зависимость сопротивления канала полевого транзистора от напряжения затвор-исток;
- семейство выходных характеристик полевого транзистора в схеме с общим истоком;
- работа транзисторного каскада с общим истоком.