

БГУИР

Кафедра ЭВМ

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

Выполнил:
студент группы 150501 Божко И.И.

Проверил:
к.т.н., доцент Селезнёв И.Л.

Минск
2023

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение работы полевого транзистора.

2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАБОТЕ

В ходе выполнения работы будут использованы базовый лабораторный стенд, а также следующие лабораторные модули:

- модуль Lab5A

Список задач для данной лабораторной работы выглядит следующим образом:

1 Получить передаточную характеристику полевого транзистора в схеме с общим истоком.

2 Получить зависимость сопротивления канала полевого транзистора от напряжения затвор-исток.

3 Получить семейство выходных характеристик полевого транзистора в схеме с общим истоком.

4 Исследовать работу транзисторного каскада с общим истоком.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

3.1 Устройство и принцип работы полевого транзистора

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-n-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.

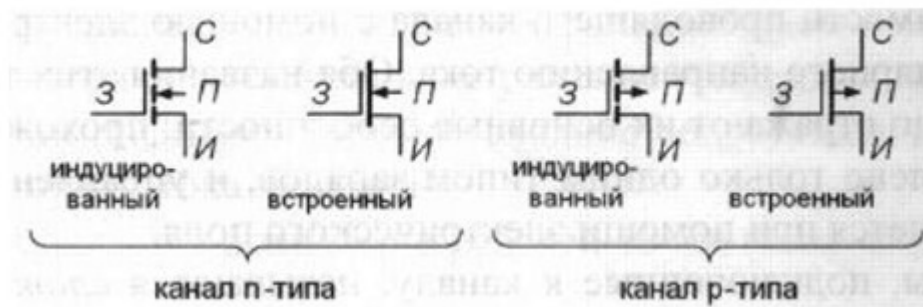


Рисунок 3.2 - Условное графическое изображение полевых транзисторов с изолированным затвором

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 р-п-переходом (ПТУП) приведено на рисунке 3.3 а. В таком транзисторе затвор выполнен в виде обратно смещенного р-п-перехода. Изменение обратного напряжения на затворе позволяет регулировать ток в канале. На рис. 3.3 а показан полевой транзистор с каналом р-типа и затвором, выполненным из областей n-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 3.3 б.

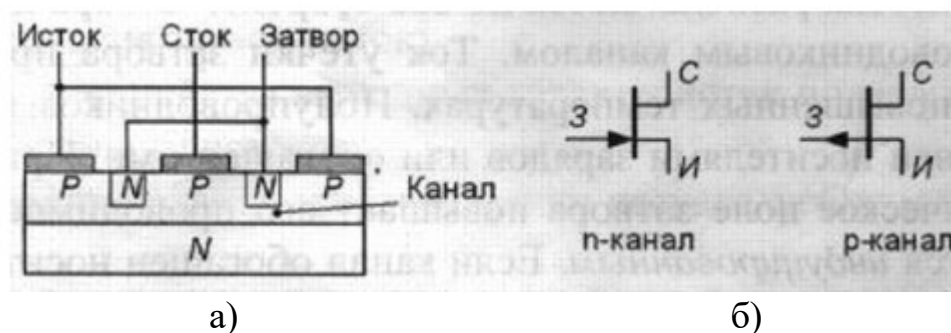


Рисунок 3.3 - Устройство полевого транзистора с управляющим р-п-переходом

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.

3.2 Основные характеристики полевого транзистора

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



Рисунок 3.4 - Типовые передаточные характеристики n-канальных полевых транзисторов

ПТУП при нулевом напряжении на затворе имеют максимальное значение тока, которое называется начальным $I_{\text{нач}}$. При увеличении запирающего напряжения ток стока уменьшается и при напряжении отсечки $U_{\text{отс}}$ 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 $U_{\text{пор}}$. Увеличение напряжения на затворе приводит к увеличению тока стока.

Характеристики ПТИЗ со встроенным каналом при нулевом напряжении на затворе имеют начальное значение тока $I_{\text{с.нач}}$. 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 p-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 p-n-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.

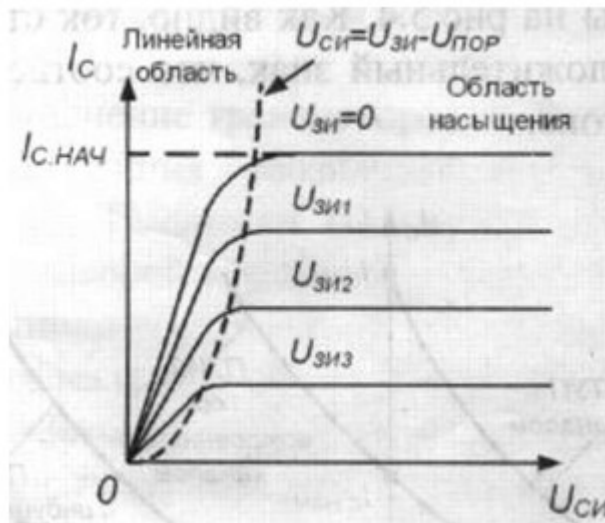


Рисунок 3.5 - Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим р-п-переходом

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

В линейной области ток стока полевого транзистора определяется уравнением:

$$i_c = 2k \left((U_{пор} - U_{зи}) U_{си} - \frac{U_{си}^2}{2} \right)$$

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

Выражение позволяет определить сопротивление канала в линейной области:

$$I_c \approx 2k (U_{пор} - U_{зи}) U_{си}$$

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

$$R_K = \frac{U_{СИ}}{i_C} = \frac{1}{2k(U_{ПОР} - U_{ЗИ})}$$

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

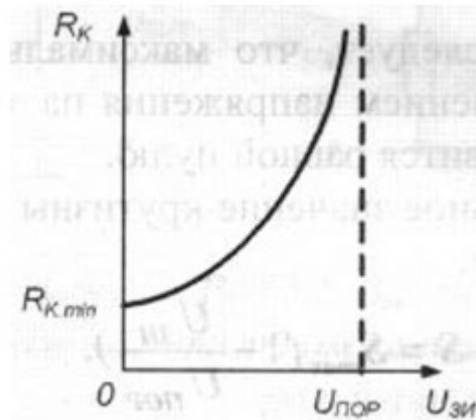


Рисунок 3.6 - Зависимость сопротивления канала полевого транзистора от напряжения на затворе

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.

В области насыщения ток стока полевого транзистора определяется уравнением:

$$i_C = k(U_{ПОР} - U_{ЗИ})^2$$

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

$$I_{C.HAЧ} = kU_{ПОР}^2$$

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

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

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

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

3.3 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 n-типа.

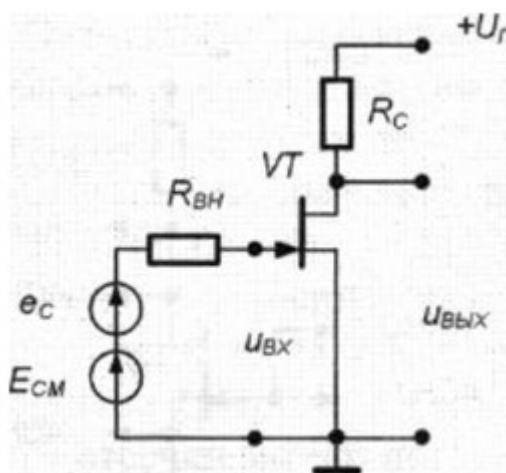


Рисунок 3.7 -Типовая схема усилительного каскада на полевом транзисторе

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.

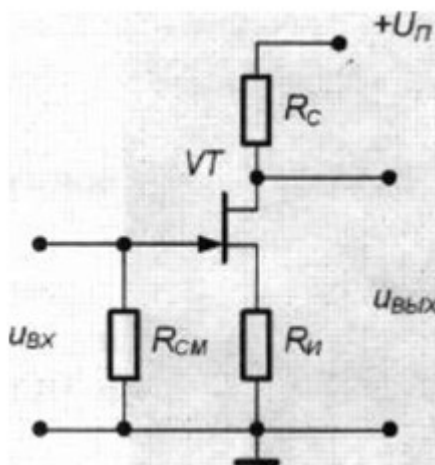


Рисунок 3.8 - Задание режима покоя в усилительном каскаде на полевом транзисторе с управляющим р-п-переходом

Особенность этой схемы заключается в том, что параллельно входным выводам усилительного каскада подключен резистор $R_{см}$. Этот резистор обеспечивает гальваническую связь затвора с общей шиной, что необходимо для замыкания цепи смещения, а также стабилизирует входное сопротивление каскада. Сопротивление резистора $R_{см}$ выбирается меньше собственного входного сопротивления транзистора (обычно $R_{см} < 1 \text{ МОм}$). Так как собственный входной ток полевого транзистора стремится к нулю, то падение напряжения на $R_{см}$ от протекания тока смещения также стремится к нулю и напряжение смещения практически равно падению напряжения на включенном в цепь истока резисторе $R_{и}$.

В рассматриваемой схеме резистор $R_{и}$ выполняет двойную роль. Во-первых, он обеспечивает начальное смещение рабочей точки каскада и, во-

вторых, вводит в него последовательную отрицательную обратную связь по току нагрузки, что приводит к уменьшению коэффициента усиления каскада и стабилизирует его рабочую точку.

4 ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

4.1 Получение передаточной характеристики полевого транзистора в схеме с общим истоком

Для выполнения заданий в пунктах 4.1 – 4.3 используется схема, показанная на рисунке 4.1

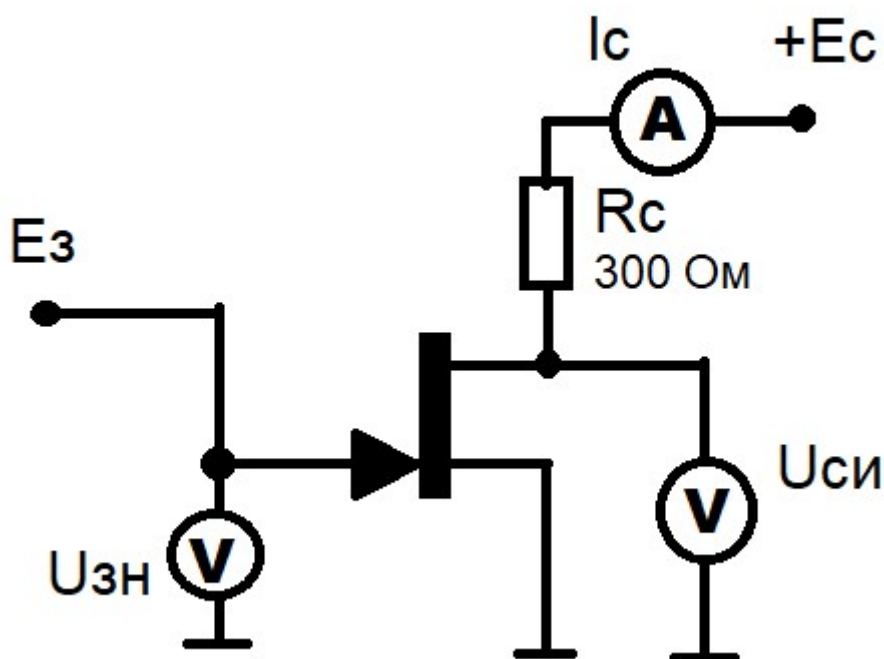


Рисунок 4.1 – схема для получения передаточной характеристики, графика сопротивления канала и выходных характеристик

При заданном значении напряжения источника ЭДС стока E_c получаем график зависимости выходного тока транзистора I_c от входного напряжения $U_{зи}$. График представлен на рисунке 4.2

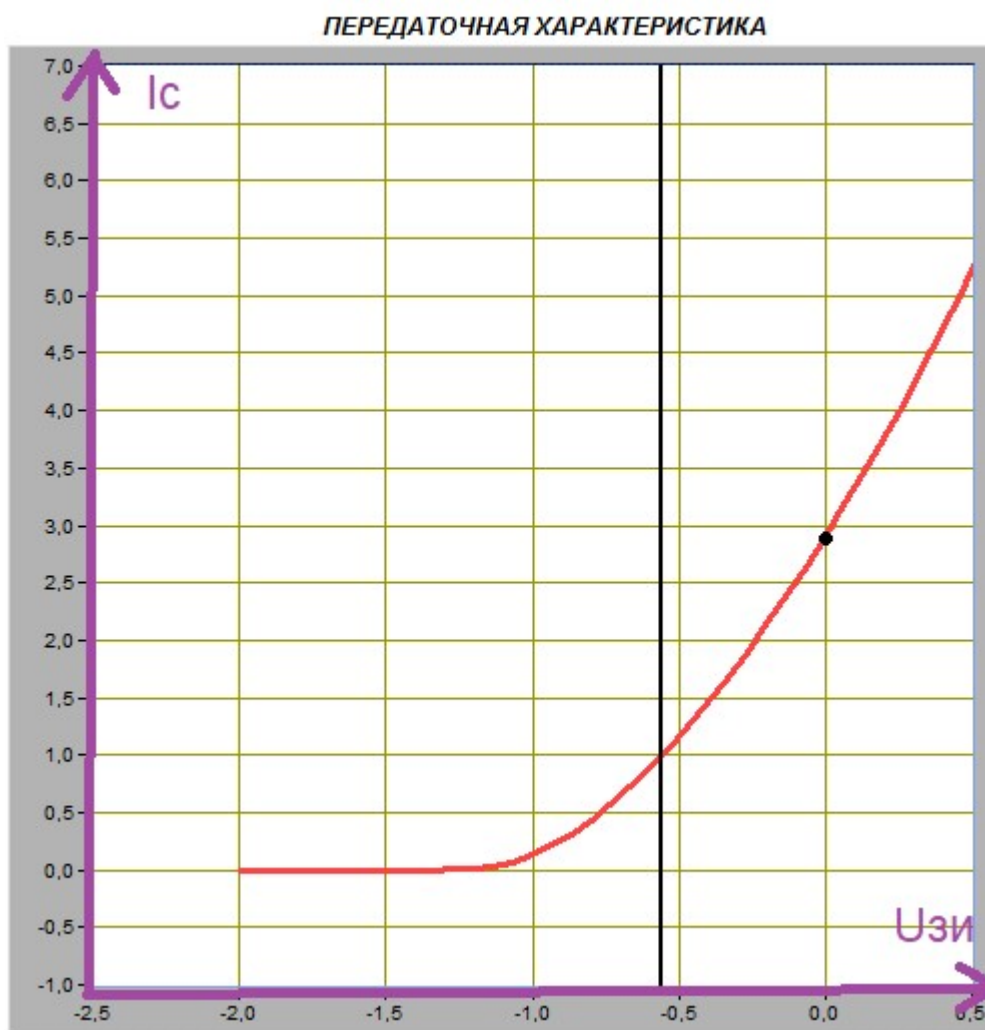


Рисунок 4.2 – график зависимости выходного тока транзистора от входного напряжения

Изменяя напряжение источника ЭДС затвора E_3 , устанавливаем значение I_c равное 0.01 мА и измеряем значение напряжения отсечки затвор-исток. Получаем значение $U_{зи.отс} = -1.2$ В

При значении напряжения затвор-исток $U_{зи} = 0$ В измеряем начальное значение тока стока. Получаем значение $I_{c.нач} = 2.88$ мА

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

$$k = I_{c.нач.} / (U_{зи.отс})^2 \quad (4.1)$$

$$\text{Получаем: } k = 2.88 \text{ мА} / (-1.2 \text{ В})^2 = 2 \text{ мА/В}^2$$

Измеряем значения тока стока I_{c1} и I_{c2} при $U_{зи1} = -0.1$ В и $U_{зи2} = +0.1$ В. Получаем: $I_{c1} = 2.49$ мА, $I_{c2} = 3.29$ мА.

Вычисляем значение крутизны передаточной характеристики в окрестности точки $U_{зи} = 0$ по формуле:

$$S = (I_{c2} - I_{c1}) / (U_{зи2} - U_{зи1}) \quad (4.2)$$

$$\text{Получаем: } S = (3.29 \text{ мА} - 2.49 \text{ мА}) / (0.1 \text{ В} + 0.1 \text{ В}) = 4 \text{ мА/В}$$

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

При заданном значении напряжения питания стока E_C получаем график зависимости сопротивления канала от напряжения затвор-исток. График представлен на рисунке 4.3

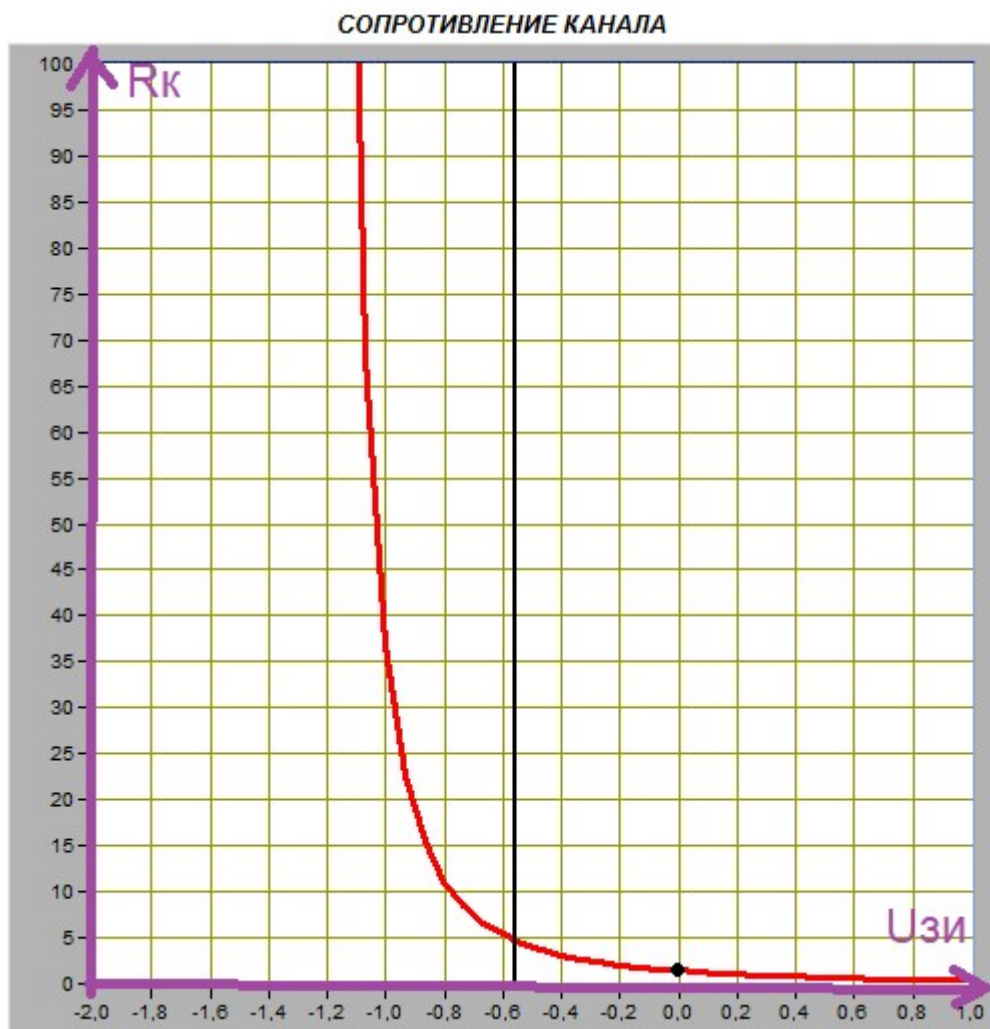


Рисунок 4.3 – график зависимости сопротивления канала от напряжения затвор-исток

Изменяя напряжение источника ЭДС затвора E_3 , устанавливаем значение I_c равное 0,01 мА и измеряем значение сопротивления канала $R_{k,max}$. Получаем значение 512,2 кОм.

При значении напряжения затвор-исток $U_{зи} = 0$ В измеряем значение сопротивления канала $R_{k,min}$. Получаем значение 1,4 кОм.

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

При плавном изменении напряжения на стоке транзистора от 0 В до 10 В и фиксированных значениях напряжения источника ЭДС затвора $U_{зи} = -1.5$ В, -1.0 В, -0.5 В, 0 В, $+0.5$ В, получаем графики зависимостей тока стока I_c от напряжения сток-исток $U_{си}$. Графики изображены на рисунке 4.4

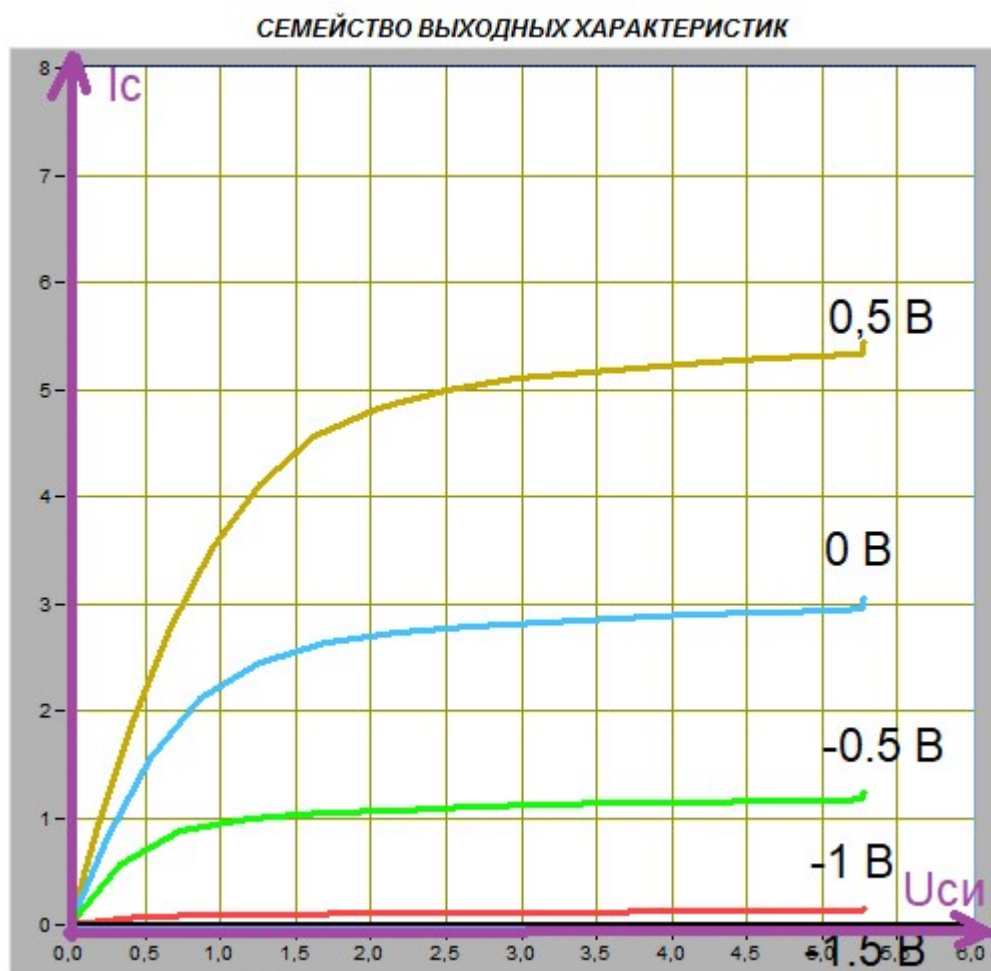


Рисунок 4.4 – семейство выходных характеристик транзистора

Определяем значения тока стока I_c , соответствующие значениям напряжения, для которых снимались выходные характеристики. Результаты представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – значения напряжения затвор-исток и тока истока

$U_{зи}, \text{В}$	-1.5	-1.0	-0.5	0	0.5
$I_c, \text{мА}$	0	0.13	1.15	2.96	5.31

Определяем крутизну передаточной характеристика транзистора при изменении напряжения затвор-исток в диапазоне от -0.5 В до $+0.5$ В по формуле:

$$S = \Delta I_C / \Delta U_{зи} \quad (4.3)$$

Получаем:

$$S = (5.31 \text{ мА} - 1.15 \text{ мА}) / (0.5 \text{ В} - (-0.5 \text{ В})) = 4.16 \text{ мА} / \text{В}$$

Выбрав сопротивление в цепи стока равным $R_C = 300 \text{ Ом}$ и величину напряжения источника ЭДС стока $E_C = 5 \text{ В}$, строим линию нагрузки на графике выходных характеристик транзистора (рис. 4.5)



Рисунок 4.5 – линия нагрузки и средняя точка активного режима

Оцениваем границы активного режима транзисторного каскада:

$$I_{C.мин.} = 0.13 \text{ мА}$$

$$I_{C.макс.} = 5.2 \text{ мА}$$

$$U_{СИ.мин.} = 3.45 \text{ В}$$

$$U_{СИ.макс} = 4.95 \text{ В}$$

Вычисляем ток стока для средней точки активного режима по формуле:

$$I_C = (I_{Cмакс} + I_{Cмин}) / 2 \quad (4.4)$$

Получаем:
 $I_C = (0.13 \text{ мА} + 5.2 \text{ мА}) / 2 = 2.625 \text{ мА}$

Определяем соответствующее значение напряжения затвор-исток:
 $U_{ЗИ} = -0.07 \text{ В}$

4.4 Исследование работы транзисторного каскада с общим истоком

Для исследования работы транзисторного каскада с общим истоком используется схема, представленная на рисунке 4.6

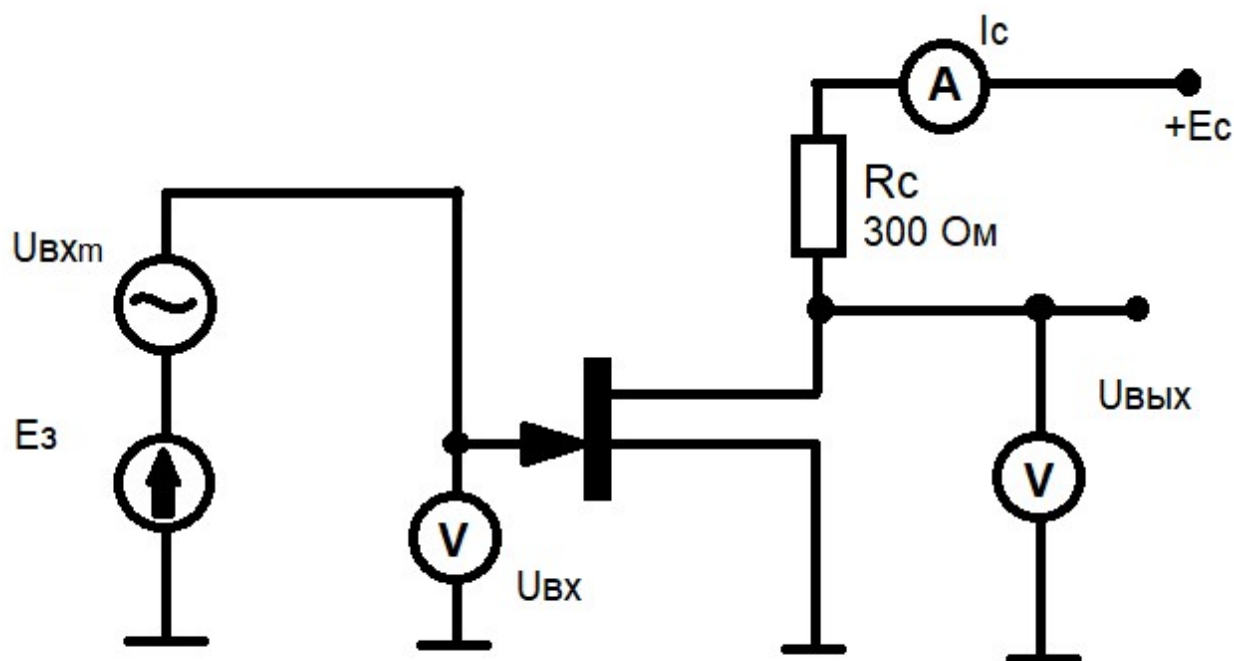


Рисунок 4.6 – схема для исследования работы транзисторного каскада

Устанавливая значения $E_з = -0.07 \text{ В}$, измеряем параметры статического режима транзисторного усилителя с общим истоком. Результаты измерений представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - параметры статического режима усилителя

$U_{ЗИ}, \text{ В}$	$I_C, \text{ мА}$	$U_{СИ}, \text{ В}$
-0.07	2.6	4.22

Увеличив амплитуду входного сигнала $U_{вх.м.}$ до 0,72В, получаем максимальный неискажённый выходной сигнал (рис. 4.7)

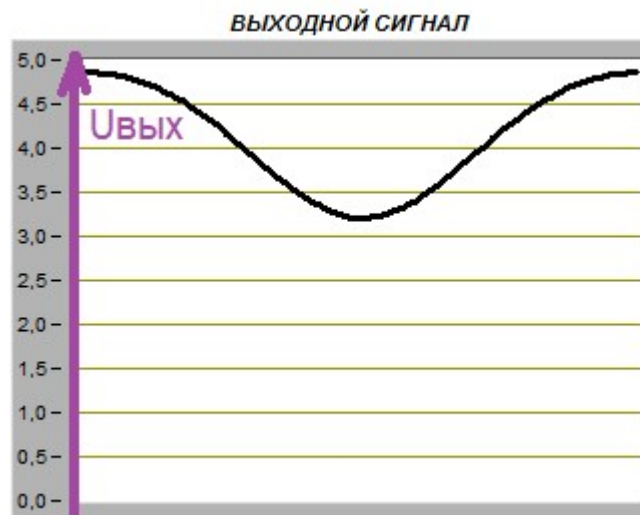


Рисунок 4.7 – максимальный неискажённый выходной сигнал

Рассчитываем значения амплитуд входного и выходного сигналов по формуле:

$$U_m = (U_{\max} - U_{\min}) / 2 \quad (4.5)$$

Получаем значения:

$$U_{\text{вх.}m} = 0,717\text{В}$$

$$U_{\text{вых.}m} = 0,925\text{В}$$

Вычисляем коэффициент усиления транзисторного каскада по формуле:

$$K_y = \frac{U_{\text{вых.}m}}{U_{\text{вх.}m}} \quad (4.6)$$

Получаем значение:

$$K_y = \frac{0,925}{0,717} = 1,248$$

Вычисляем коэффициент усиления транзисторного каскада по формуле:

$$K_y = S * R_c \quad (4.7)$$

Получаем значение:

$$K_y = 4.16 \text{ мА / В} * 10^{-3} * 300 \text{ Ом} = 1,248$$

Изменяя значения E_3 на 30% в большую (рис. 4.9) и меньшую (рис. 4.10) стороны, исследуем, как влияет положение рабочей точки на работу транзисторного каскада с общим истоком.



Рисунок 4.9 – выходной сигнал при изменении E_3 в большую сторону



Рисунок 4.10 – выходной сигнал при изменении E_3 в меньшую сторону

5 ВЫВОДЫ

В процессе выполнения лабораторной работы был изучен полевой транзистор.

Была получена передаточная характеристика полевого транзистора в схеме с общим истоком.

Была получена зависимость сопротивления канала полевого транзистора от напряжения затвор-исток.

Было получено семейство выходных характеристик полевого транзистора в схеме с общим истоком.

Была исследована работа транзисторного каскада с общим истоком.