

БГУИР

Кафедра ЭВМ

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

Выполнили:
студенты группы 150502
Альхимович Н.Г.
Скалозуб К.А.

Проверил:
Калютчик А.А.

Минск
2023

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить характеристики полевого транзистора.

2 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* (*C*) и *истоком* (*I*), 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 2.1.

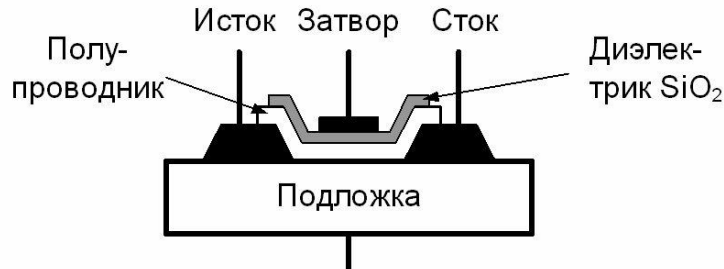


Рисунок 2.1 - Устройство полевого транзистора с изолированным затвором

В полевых транзисторах с изолированным затвором электрод затвора изолирован от полупроводникового канала с помощью слоя диэлектрика из двуокиси кремния SiO₂. 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 2.2.

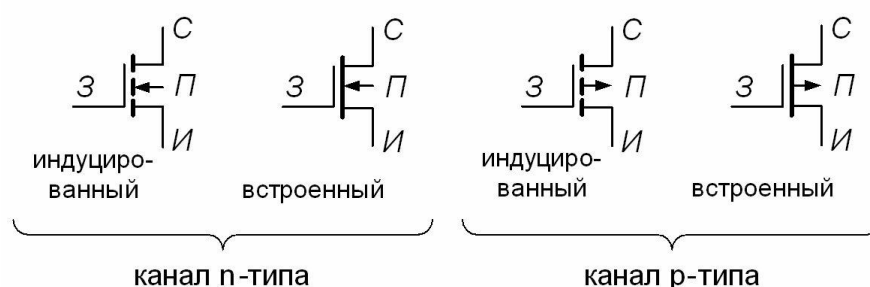


Рисунок 2.2 - Условное графическое изображение полевых транзисторов с изолированным затвором

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 2.3а. В таком транзисторе затвор выполнен в виде обратно смещенного p-n-перехода. Изменение обратного напряжения на затворе позволяет регулировать ток в канале. На рисунке 2.3а показан полевой транзистор с каналом p-типа и затвором, выполненным из областей n-типа. Увеличение обратного напряжения на затворе приводит к снижению проводимости канала, поэтому полевые транзисторы с управляющим p-n-переходом работают только на обеднение канала носителями зарядов.

Условное изображение полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом приведено на рисунке 2.3б.

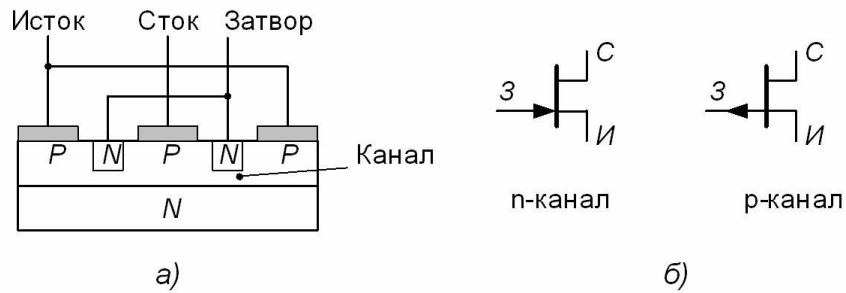


Рисунок 2.3 - Устройство полевого транзистора с управляющим р-n-переходом

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_3 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 2.4. Как видно, ток стока для n- канальных транзисторов имеет положительный знак, что соответствует положительному напряжению на стоке.

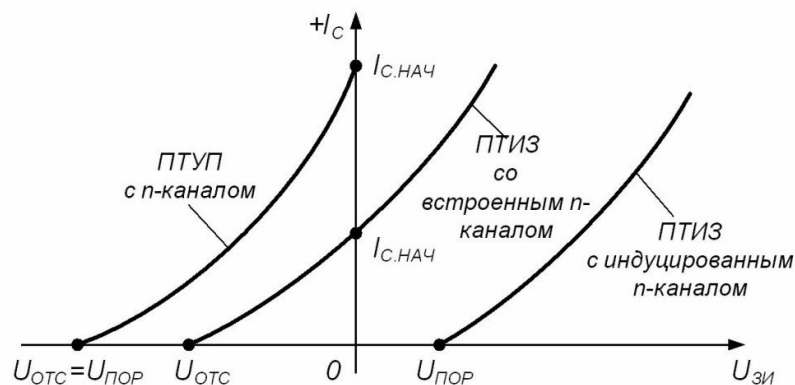


Рисунок 2.4 -Типовые передаточные характеристики n-канальных полевых транзисторов

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 2.5. 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.

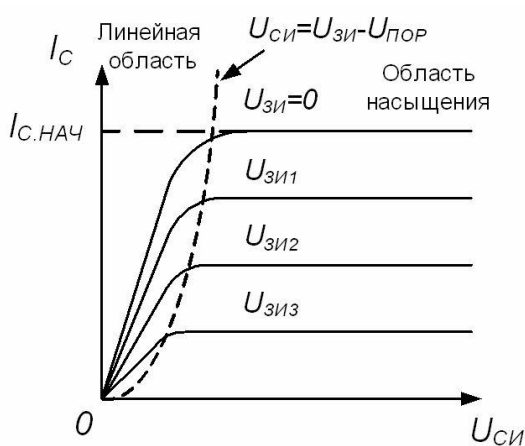


Рисунок 2.5 - Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим р-п-переходом

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:

$$i_C = 2k[(U_{пор} - U_{зи})U_{си} - \frac{U_{си}^2}{2}], \quad (2.1)$$

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.

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

$$i_C \approx 2k(U_{пор} - U_{зи})U_{си}. \quad (2.2)$$

Выражение (2.2) позволяет определить сопротивление канала в линейной области:

$$R_K = \frac{U_{си}}{i_C} = \frac{1}{2k(U_{пор} - U_{зи})}. \quad (2.3)$$

Из выражения (5.3) 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 2.6.

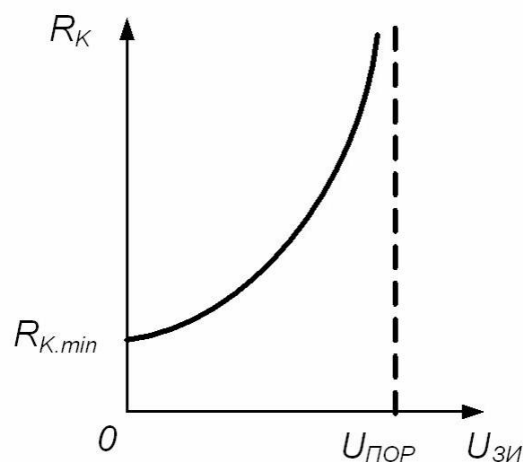


Рисунок 2.6 - Зависимость сопротивления канала полевого транзистора от напряжения на затворе

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:

$$i_c = k(U_{пор} - U_{зи})^2 \quad (2.4)$$

из которого следует его независимость от напряжения на стоке. Практически такая зависимость есть, но в большинстве случаев она слабо выражена. Из уравнения (2.4) можно найти начальный ток стока при условии, что $U_{зи}=0$:

$$I_{с.нач} = kU_{пор}^2 \quad (2.5)$$

Из выражения (2.5) следует, что значение коэффициента k можно определить экспериментально, измерив начальный ток стока $I_{нач}$ и пороговое напряжение $U_{пор}$ (или напряжение отсечки $U_{отс}$). Полевые транзисторы, в области насыщения используются в основном как усилительные приборы и их усилительные свойства определяются крутизной вольтамперной характеристики:

$$S = \left| \frac{di_c}{du_{зи}} \right| = 2k(U_{пор} - U_{зи}). \quad (2.6)$$

Из уравнения (2.6) 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 (2.6) можно записать в виде:

$$S = S_{\max} \left(1 - \frac{U_{3H}}{U_{\text{пор}}}\right) \quad (2.7)$$

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 2.7 приведена типовая схема каскада на полевом транзисторе с управляющим р-п-переходом и каналом n-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 2.8.

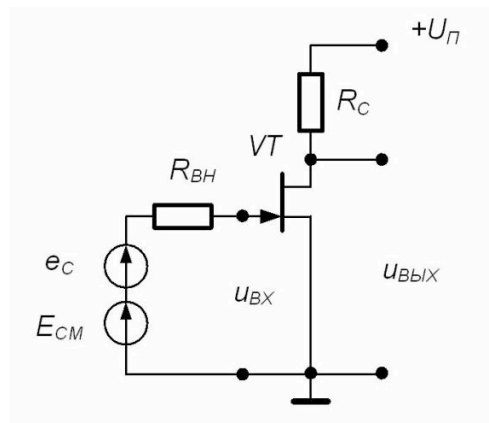


Рисунок 2.7 - Типовая схема усилительного каскада на полевом транзисторе

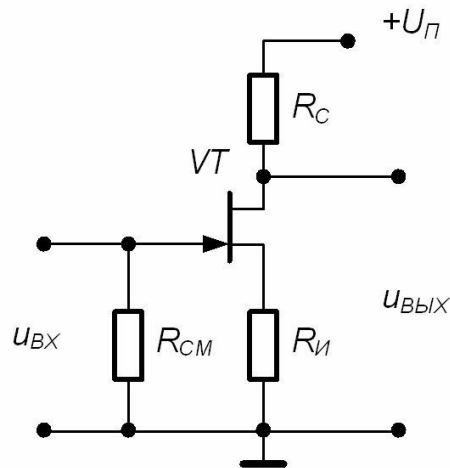


Рисунок 2.8 - Задание режима покоя в усилительном каскаде на полевом транзисторе с управляющим p-n- переходом

Ее особенность заключается в том, что параллельно входным выводам усилительного каскада подключен резистор R_{CM} . Этот резистор обеспечивает гальваническую связь затвора с общей шиной, что необходимо для замыкания цепи смещения, а также стабилизирует входное сопротивление каскада. Сопротивление резистора R_{CM} выбирается меньше собственного входного сопротивления транзистора (обычно $R_{CM} < 1 \text{ МОм}$).

Так как собственный входной ток полевого транзистора стремится к нулю, то падение напряжения на R_{CM} от протекания тока смещения также стремится к нулю и напряжение смещения практически равно падению напряжения на включенном в цепь истока резисторе R_I .

В рассматриваемой схеме резистор R_I 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.

3 ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

3.1 Получение передаточной характеристики полевого транзистора в схеме с общим истоком

Для получения передаточной характеристики необходимо подключить схему, изображенную на рисунке 3.1.

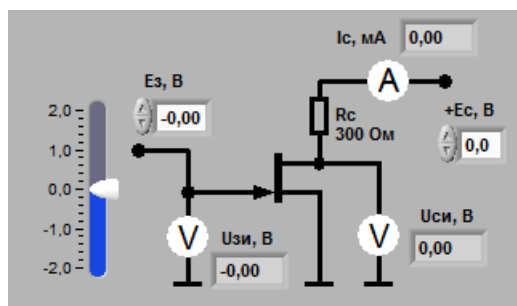


Рисунок 3.1 – Схема полевого транзистора

Зависимость выходного тока транзистора I_c от входного напряжения $U_{зи}$ была получена при значении напряжения питания стока $E_c = 5$ В. Изображение зависимости представлено на рисунке 3.2.

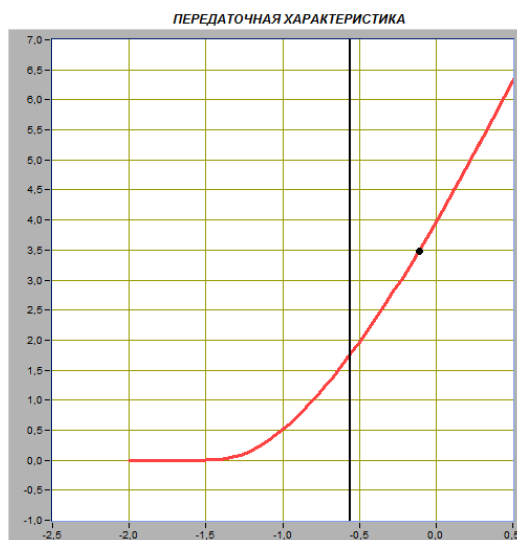


Рисунок 3.2 – Передаточная характеристика полевого транзистора

Путем изменения напряжения источника ЭДС затвора E_z с помощью ползункового регулятора установлено значение тока стока $I_c \approx 0,01$ мА. Получено значение напряжения отсечки затвор-исток $U_{зи.отс} = -1,43$ В.

После установки значения напряжения $U_{зи} = 0$ В, получаем начальное значение тока стока $I_{с.нач} = 3,91$ мА.

С помощью полученных данных, были вычислены следующие значения: коэффициент, учитывающий конструктивные и технологические параметры полевого транзистора и крутизна передаточной характеристики.

Коэффициент, учитывающий конструктивные и технологические параметры полевого транзистора, вычисляется по формуле:

$$k = \frac{I_{с.нач}}{(U_{зи.отс})^2} = 1,91 * 10^{-3}$$

После установки значения напряжения затвор-исток $U_{зи}$ равным $U_{зи.1} = -0,1$ В, а затем равным $U_{зи.2} = +0,1$ В, получаем соответствующие значения тока стока: $I_{с.1} = 3,45$ мА и $I_{с.2} = 4,35$ мА.

Крутизна передаточной характеристики вычисляется по формуле:

$$S = \frac{I_{с2} - I_{с1}}{U_{зи2} - U_{зи1}} = 4,5 * 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}$$

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

Зависимость сопротивления канала полевого транзистора R_k от напряжения затвор-исток $U_{зи}$ была получена при установленном значении напряжения питания стока $E_c = 5$ В. Изображение зависимости представлено на рисунке 3.3.

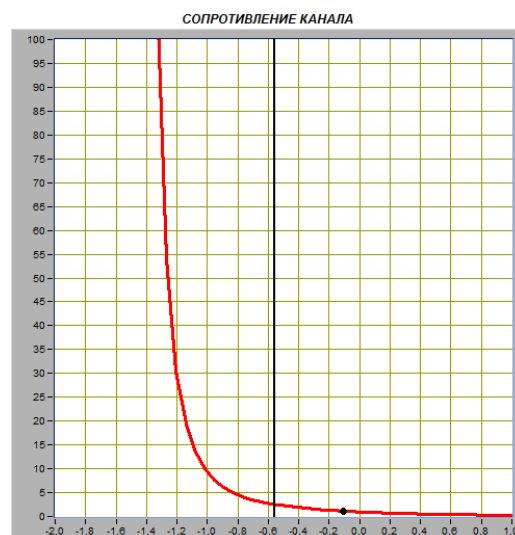


Рисунок 3.3 – Зависимость сопротивления канала R_k полевого транзистора от напряжения затвор-исток $U_{зи}$

При установленном значении тока стока $I_c \approx 0,01$ мА и изменяемом значении напряжения источника ЭДС затвора E_3 было измерено значение сопротивления $R_{к.макс} = 326,1$ кОм, соответствующее закрытому состоянию транзистора.

А при установленном напряжении затвор-исток $U_{зи} = 0$ значение сопротивления $R_{к.мин} = 0,9$ кОм.

3.3 Получение семейства выходных характеристик полевого транзистора в схеме с общим эмиттером

Плавное изменение напряжение на стоке транзистора от 0 до 10 В при фиксированных значениях напряжения источника ЭДС затвора $U_{зи} = -1,5$ В; $-1,0$ В; $-0,5$ В; 0 В; $+0,5$ В, были получены графики зависимостей тока стока I_c от напряжения сток-исток $U_{си}$. Изображение зависимостей представлено на рисунке 3.4.

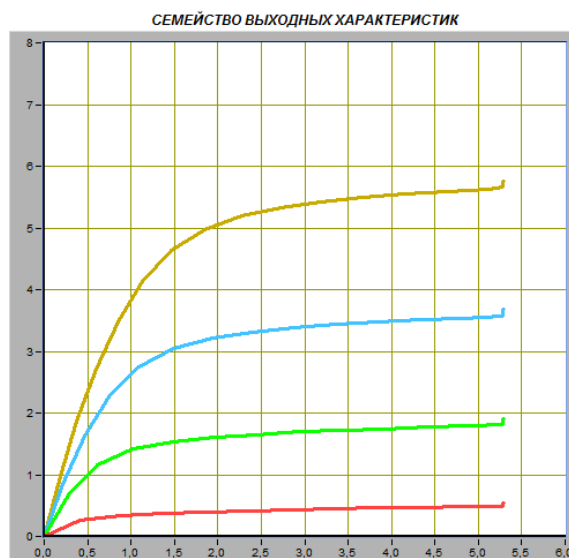


Рисунок 3.4 – Выходные характеристики полевого транзистора

Значения тока стока I_c , соответствующие значениям напряжения на затворе, при фиксированном значении напряжения сток-исток $U_{си} = 5$ В, представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения тока стока при соответствующих значениях напряжения на затворе

$U_{зи} = -1,5$ В	$I_{c1} = 0$ мА
$U_{зи} = -1,0$ В	$I_{c1} = 0,5$ мА
$U_{зи} = -0,5$ В	$I_{c1} = 1,81$ мА
$U_{зи} = -0,0$ В	$I_{c1} = 3,54$ мА
$U_{зи} = +0,5$ В	$I_{c1} = 5,58$ мА

Крутизна передаточной характеристики транзистора S при изменении напряжения затвор-исток в диапазоне от -1 В до 0 В определяется по формуле:

$$S = \Delta I_C / \Delta U_{зи} = (5,58 - 1,81) * 10^{-3} / 1 = 3,77 * 10^{-3}$$

При сопротивлении в цепи стока $R_c = 300$ Ом, величине напряжения источника ЭДС стока $E_c = 5$ В была построена линия нагрузки по двум точкам: $E_c = 5$ В на оси абсцисс и $I_c = E_c / R_c = 16,7$ мА на оси ординат (рисунок 3.5).

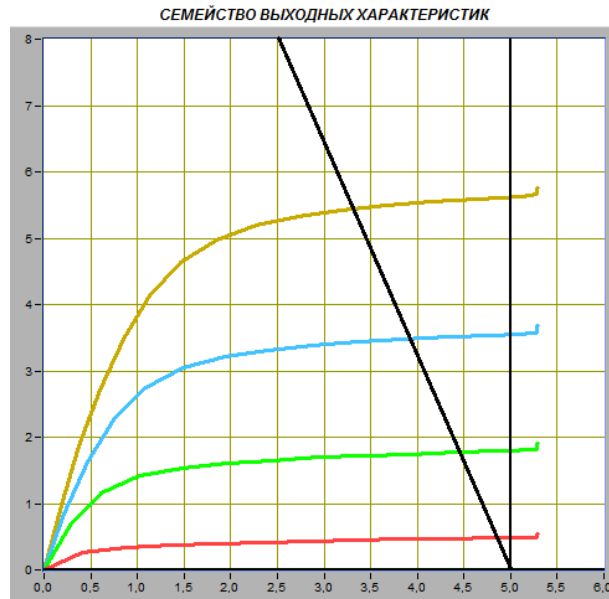


Рисунок 3.4 – Линия нагрузки

Координаты границы активного режима транзисторного каскада:

$$\begin{aligned} I_{c.макс} &= 5,45 \text{ мА} & U_{си.макс} &= 4,8 \text{ В} \\ I_{c.мин} &= 0,5 \text{ мА} & U_{си.мин} &= 3,3 \text{ В} \end{aligned}$$

Ток стока для средней точки активного режима и соответствующее значение напряжения затвор-исток $U_{зи}^*$:

$$I_c^* = (I_{c.макс} - I_{c.мин}) / 2 = \frac{5,45 + 0,5}{2} = 2,975 \text{ мА}$$

$$\Delta U_{зи} = \frac{\Delta I_c}{S} = \frac{-3,5 + 2,975}{3,77} = -0,14 \text{ В}$$

$$U_{зи}^* = -0,1 - 0,14 = -0,24$$

3.4 Исследование работы транзисторного каскада с общим истоком

Для исследования транзисторного каскада используется схема, представленная на рисунке 3.6. С помощью органов управления ВП была установлена амплитуда напряжения источника входного гармонического напряжения $u_{ВХ.м} = 0$ и величина напряжения источника ЭДС стока $E_c = 5$ В.

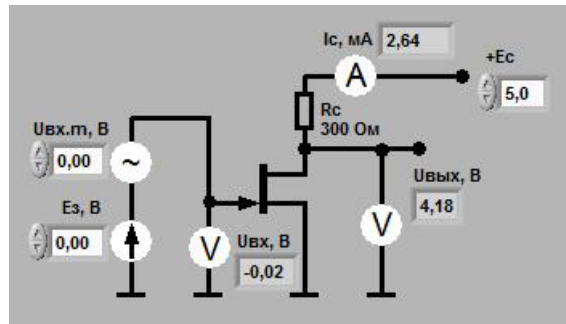


Рисунок 3.6 – Схема подключения полевого транзистора для установки рабочей точки транзисторного каскада

Появившееся на графике выходных характеристик транзистора изображение линии нагрузки (см. рисунок 3.7) аналогично полученному в пункте 3.3.

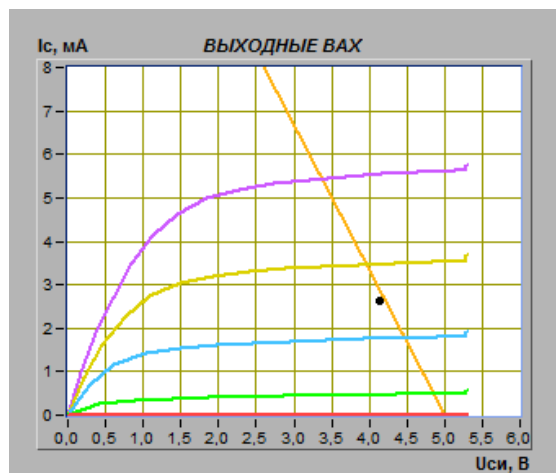


Рисунок 3.7 – Линия нарузки

При установленном значении напряжения источника ЭДС затвора $E_3 = U_{3и}^* = -0,24$ В (см. пункт 3.3) были получены параметры статического режима транзисторного усилителя с общим истоком. Значения параметров представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры статического режима транзисторного усилителя с общим истоком

$U_{зи}, В$	$I_{с}, мА$	$U_{си}, В$
-0,31	2,60	4,14

При плавном увеличении амплитуды входного сигнала $u_{вх.м}$ был получен максимальный неискаженный выходной сигнал (рисунок 3.8).

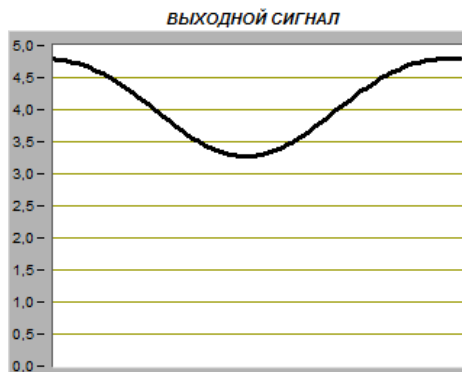


Рисунок 3.8 – Изображение максимально неискаженного выходного сигнала

Изображение входного сигнала представлено на рисунке 3.9.

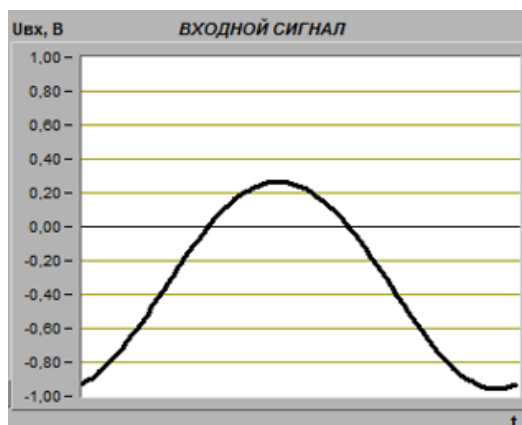


Рисунок 3.9 – Изображение максимально неискаженного входного сигнала

Входной и выходной сигналы имеют различные амплитуды и фазы. Амплитуды входного и выходного сигналов можно определить по формулам:

$$U_m = (u_{\max} - u_{\min})/2$$

$$U_{m \text{ вх}} = 0,575$$

$$U_{m \text{ Вых}} = 0,75$$

Используя полученные данные, определен коэффициент усиления транзисторного каскада.

$$K_y = \frac{U_{m \text{ Вых}}}{U_{m \text{ Вх}}} = 1,3$$

Тогда коэффициент усиления транзисторного каскада, учитывая коэффициент крутизны равен:

$$K_y = S * R_c = 1,35$$

Рассчитанное значение приблизительно равно измеренному. Несовпадение может быть обусловлено особенностями работы рассматриваемого полевого транзистора, а также выбора диапазона значений, в которых проводились измерения.

Исследуем влияние положения рабочей точки на работу транзисторного каскада с общим истоком.

Изменив значение напряжения затвор-исток путем регулирования напряжения источника ЭДС затвора E_z примерно на 30% от величины $U_{зи}$ сначала в сторону увеличения, а затем – уменьшения, получены искажения выходного сигнала, отраженные на рисунках 3.10 и 3.11.

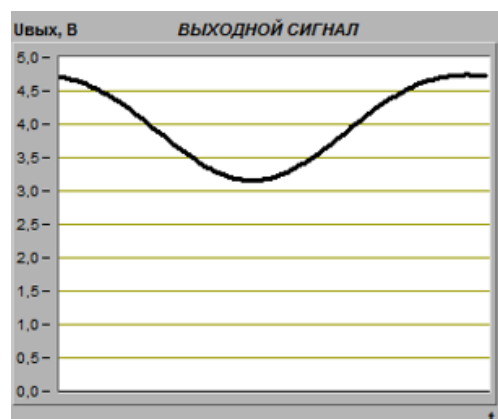


Рисунок 3.10 – Изображение искаженного выходного сигнала при увеличении значения напряжения затвор-исток

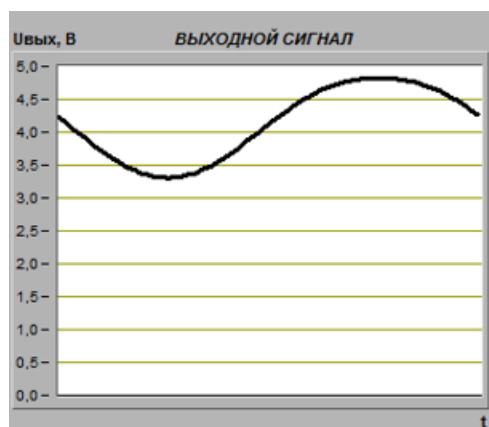


Рисунок 3.11 – Изображение искаженного выходного сигнала при уменьшении значения напряжения затвор-исток

5 ВЫВОДЫ

В ходе выполнения лабораторной работы была получена передаточная характеристика полевого транзистора в схеме с общим истоком, определена зависимость сопротивления канала полевого транзистора от напряжения затвор-исток, было получено семейство выходных характеристик полевого транзистора в схеме с общим истоком, исследована работа транзисторного каскада с общим истоком.