

Лабораторная работа №3

Исследование характеристик полевого транзистора

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Получение передаточной характеристики, зависимости сопротивления канала полевого транзистора от напряжения затвор-исток и семейства выходных характеристик полевого транзистора;
- Расчёт схемы автоматического смещения полевого транзистора

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. 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. Униполярные транзисторы делятся на две группы: с *изолированным затвором* и с *управляющим p-n-переходом*.

Устройство полевого транзистора с изолированным затвором (ПТИЗ) показано на рисунке 1.

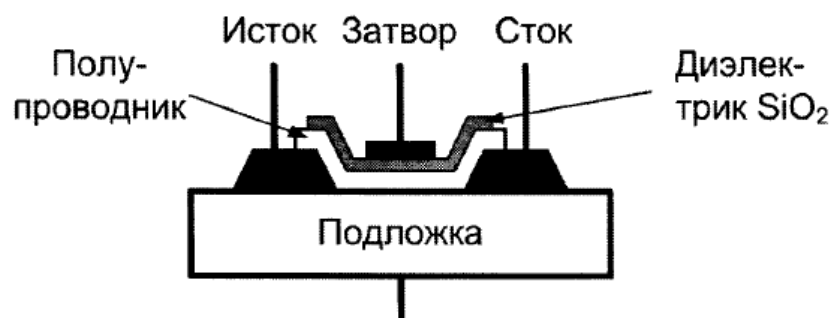


Рисунок 1 – Устройство полевого транзистора с изолированным затвором

В этих приборах электрод затвора изолирован от полупроводникового канала с помощью слоя диэлектрика из двуокиси 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 заряда.

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, каждый из которых может иметь индуцированный или встроенный канал.

Условные обозначения этих типов транзисторов приведены на рисунке 2. 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. Подложка также не может быть соединена с истоком. Затвор изображается вертикальной линией, параллельной каналу. Вывод затвора смещен к электроду истока.

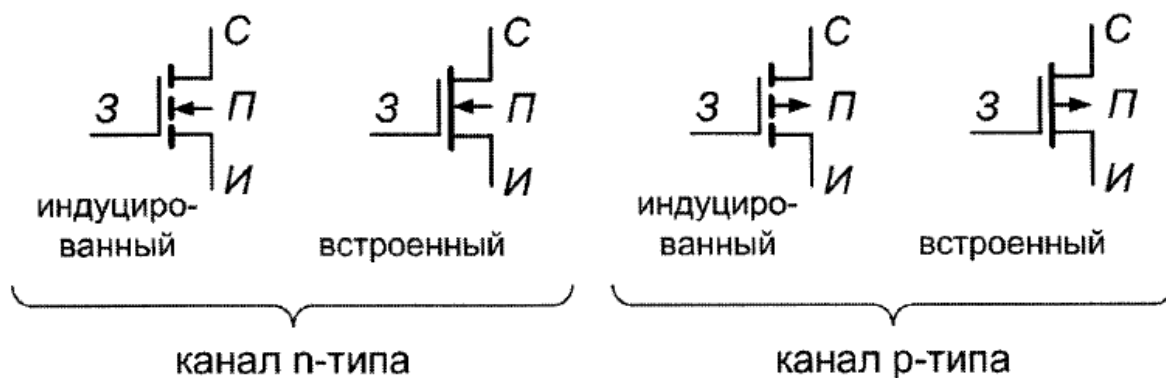


Рисунок 2 – Условное графическое изображение полевых транзисторов с изолированным затвором

Устройство полевого транзистора с управляющим p - n -переходом (ПТУП) приведено на рисунке 3. 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 показан полевой транзистор с каналом p -типа и затвором, выполненным в виде 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 графическое обозначение полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом приведено на рисунке 4.

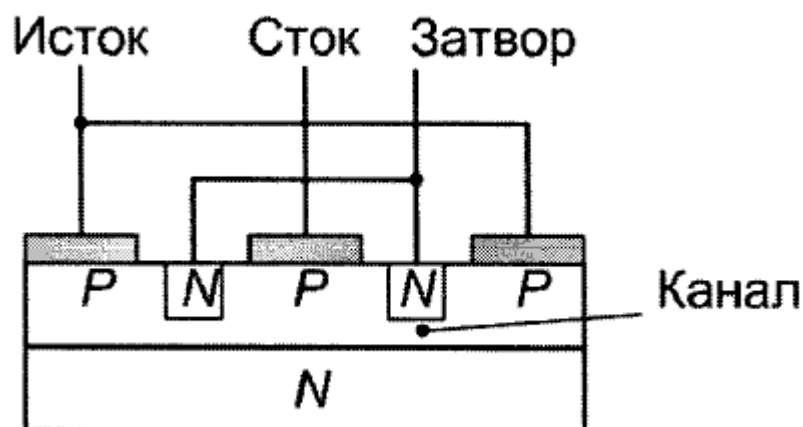


Рисунок 3 – Устройство полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

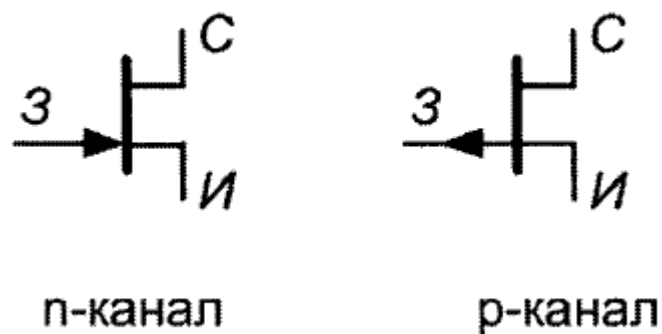


Рисунок 4 – Условное графическое обозначение полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом

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 мегаом. 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. При расчетах схем на полевых транзисторах используются только передаточные и выходные вольтамперные характеристики.

Типовые передаточные характеристики n -канальных полевых транзисторов приведены на рисунке 5. Как видно, ток стока для n -канальных транзисторов имеет положительный знак, что соответствует положительному напряжению на стоке.

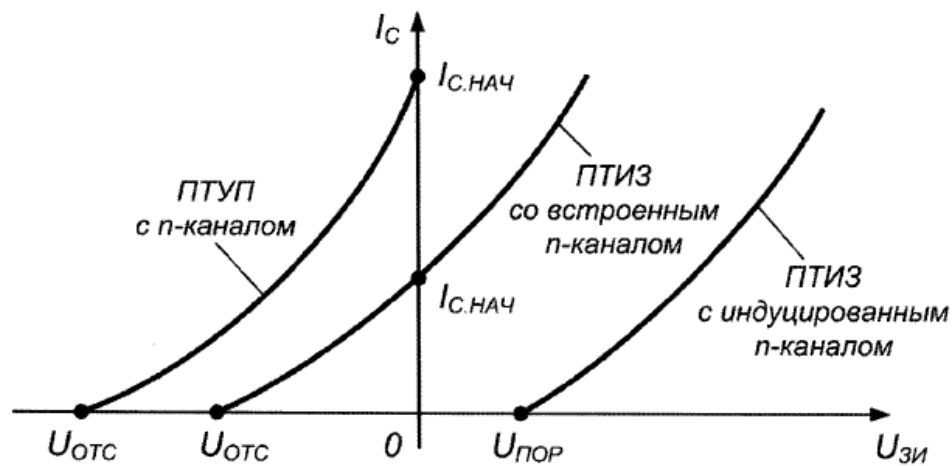


Рисунок 5 – Типовые передаточные характеристики n -канальных полевых транзисторов

ПТУП при нулевом напряжении на затворе имеют максимальное значение тока стока, которое называется начальным $I_{c,нач}$. При уменьшении напряжения на затворе 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 равен нулю. 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 $I_{c,нач}$. 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 – обедняется. При напряжении на затворе ниже напряжения отсечки $U_{отс}$, ток стока равен нулю.

Для полевых транзисторов с p -каналом передаточные характеристики имеют такой же вид, только располагаются в нижней половине графика. Ток стока и напряжение на стоке у таких транзисторов имеют отрицательное значение.

Типовые выходные характеристики полевых транзисторов с изолированным затвором и индуцированным каналом приведены на рисунке 6. Выходные характеристики других типов полевых транзисторов имеют аналогичный вид.

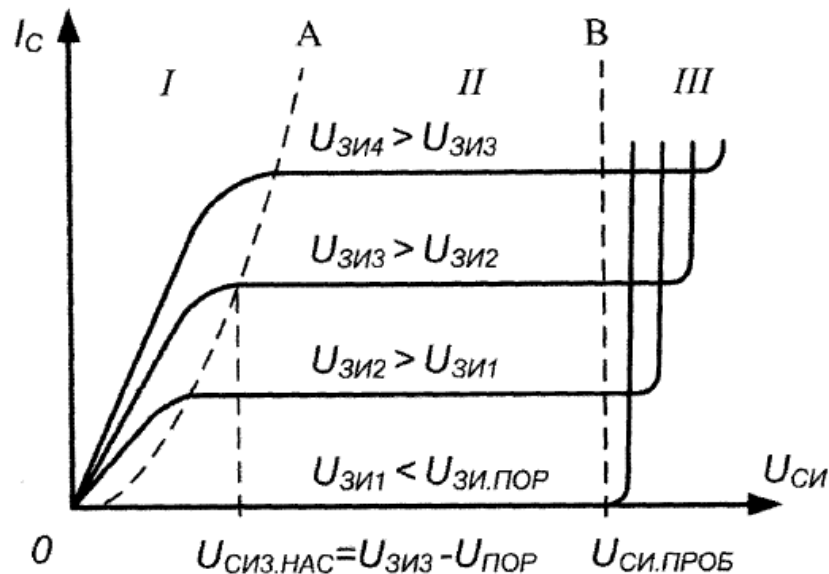


Рисунок 6 – Выходные характеристики ПТИЗ с индуцированным каналом:

I – линейная область, II – область насыщения, III – область пробоя,
пунктирные линии A и B – границы между областями

На ВАХ полевого транзистора можно выделить три характерные области: линейную, насыщения и пробоя. В линейной области при малых значениях $U_{СИ}$ вольтамперные характеристики представляют собой прямые линии, наклон которых зависит от напряжения на затворе. В области насыщения ВАХ идут практически горизонтально, что позволяет говорить о независимости тока стока I_C от напряжения на стоке $U_{СИ}$. В области пробоя транзистор становится неуправляемым – это аварийный режим.

Особенности характеристик в двух первых областях обуславливают применение полевых транзисторов. В линейной области полевой транзистор используется как сопротивление, управляемое напряжением на затворе, а в области насыщения – как усилительный элемент.

Рассмотрим *линейную область*. В линейной области ток стока полевого транзистора определяется уравнением:

$$I_C = b[(U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}})U_{\text{си}} - \frac{U_{\text{си}}^2}{2}], \quad (1)$$

где b – постоянный коэффициент, называемый удельной крутизной, $U_{\text{пор}}$ – пороговое значение, $U_{\text{зи}}$ – напряжение между затвором и истоком, $U_{\text{си}}$ – напряжение между стоком и истоком.

Удельная крутизна полевого транзистора равна:

$$b = \frac{\mu_n W C_d}{L}, \quad (2)$$

где μ_n – подвижность электронов в кремнии, W – ширина канала, L – длина канала, C_d – удельная емкость между затвором и каналом.

На начальном участке линейной области, учитывая малую величину напряжения на стоке, можно воспользоваться упрощенным выражением:

$$I_C \approx b(U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}})U_{\text{си}}. \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет определить сопротивление канала в линейной области:

$$R_K = \frac{U_{\text{си}}}{I_C} = \frac{1}{b(U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}})}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что если напряжение на затворе стремится к пороговому значению $U_{\text{зи}} \rightarrow U_{\text{пор}}$, то сопротивление канала возрастает до бесконечности. График зависимости сопротивления канала от напряжения на затворе приведен на рисунке 7.

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 значений 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 меньше 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.

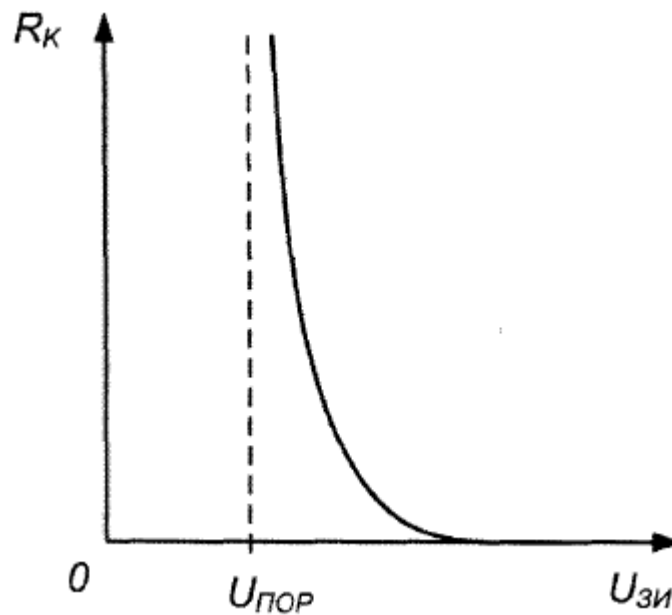


Рисунок 7 – Зависимость сопротивления канала полевого транзистора от напряжения на затворе

В области насыщения ВАХ идут практически горизонтально, т.е. $dI_c/dU_c=0$. Продифференцировав выражение 1 по U_c и приравняв к нулю, можно найти значение напряжения насыщения:

$$U_{\text{си.нас}} = (U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}}). \quad (5)$$

Подставив (5) в (1), получим выражение для тока стока полевого транзистора в области насыщения:

$$I_c = \frac{b}{2} (U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}})^2, \quad (6)$$

из которого следует его независимость от напряжения на стоке $U_{\text{си}}$. Практически такая зависимость есть, но в большинстве случаев она слабо выражена.

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

$$S = \left| \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} \right| = b(U_{ЗИ} - U_{ПОР}). \quad (7)$$

Из уравнения (7) следует, что крутизна линейно зависит от эффективного напряжения на затворе ($U_{ЗИ} - U_{ПОР}$). Параметр b называется удельной крутизной, потому что при $U_{ЗИ} - U_{ПОР} = 1$ величина b равна крутизне транзистора в режиме насыщения.

Крутизна МОП транзистора однозначно связана с протекающим через канал током. Выражение для этой зависимости можно получить из соотношений (6) и (7):

$$S = \sqrt{2bI_C}. \quad (8)$$

РАСЧЁТ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА НА ПОЛЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Схема усилительного каскада на полевом транзисторе с изолированным затвором (ПТИЗ) представлена на рисунке 8.

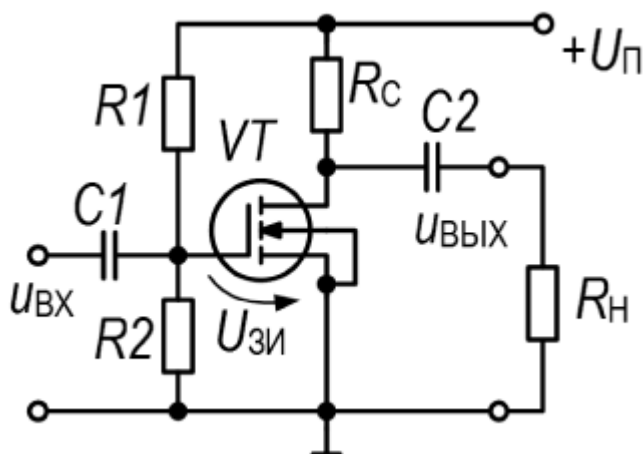


Рисунок 8 – Усилительный каскад с ПТИЗ

Исходными данными для расчёта могут являться различные параметры, например выходная мощность $P_{ВЫХ}$, сопротивление нагрузки R_H , максимальное напряжение на нагрузке U_{Hm} , максимальный ток в нагрузке I_{Hm} . Зная какую-либо пару заданных параметров, при необходимости можно найти остальные из следующих соотношений:

$$P_{\text{вых}} = U_{\text{Hm}} I_{\text{Hm}} / 2 = U_{\text{Hm}}^2 / (2R_{\text{H}}) = I_{\text{Hm}}^2 R_{\text{H}} / 2; I_{\text{Hm}} = U_{\text{Hm}} / R_{\text{H}}. \quad (9)$$

Для нормальной работы усилительного каскада необходимо установить определенные токи и напряжения во входной и выходной цепях транзистора при отсутствии входного сигнала. Такой режим называют *режимом покоя*.

Точка, координаты которой на ВАХ транзистора определяют напряжения и токи в его электродах, называется *рабочей*. При отсутствии входного сигнала эта точка называется *исходной рабочей точкой* (И.Р.Т). Исходная рабочая точка определяет режим работы транзистора по постоянному току.

В каскаде, изображенном на рисунке 8, транзистор VT совместно с резистором R_C образуют управляемый делитель напряжения. С помощью остальных резисторов реализуют цепи, обеспечивающие начальный режим работы транзистора. Разделительные конденсаторы C_1 и C_2 служат соответственно для предотвращения проникновения постоянной составляющей сигнала на затвор транзистора и на выход усилительного каскада. Их значения выбирают достаточно большими, порядка 1 мкФ.

Сопротивление R_C выбирают таким образом:

$$R_C = (0,2 \dots 0,5) R_{\text{H}}. \quad (10)$$

Так как по переменному току резисторы R_C и R_{H} оказываются включенными параллельно:

$$I_{\text{Cm}} = \frac{U_{\text{Hm}}}{R_C \parallel R_{\text{H}}}, \quad (11)$$

где \parallel обозначает параллельное соединение резисторов, т.е.:

$$R_C \parallel R_{\text{H}} = \frac{R_C R_{\text{H}}}{R_C + R_{\text{H}}}.$$

После определения максимального амплитудного значения тока стока задают:

- ток стока покоя: $I_{\text{C0}} = (1,2 \dots 1,8) I_{\text{Cm}}$;
- напряжение сток-исток покоя: $U_{\text{си0}} = (1,2 \dots 1,5) U_{\text{Hm}} + |U_{\text{зиmin}}|$, где $U_{\text{зиmin}}$ равно пороговому напряжению транзистора $U_{\text{пор}}$.

Следующим шагом выбирают напряжение источника питания:

$$U_{\text{П}} \geq U_{\text{СИ0}} + I_{\text{C0}} R_{\text{C}}. \quad (12)$$

При задании напряжения питания следует округлять полученное значение до большего целого значения.

После задания напряжения питания уточняют напряжение сток-исток:

$$U_{\text{СИ0}} = U_{\text{П}} - I_{\text{C0}} R_{\text{C}} > U_{\text{нм}} + |U_{\text{ЗИmin}}|. \quad (13)$$

Далее на семействе выходных ВАХ транзистора отмечают И.Р.Т с координатами $(U_{\text{СИ0}}; I_{\text{C0}})$, а из передаточной характеристики находят напряжение затвор-исток покоя $U_{\text{ЗИ0}}$, соответствующее току I_{C0} .

Затем строят статическую линию нагрузки (СЛН) по двум точкам $(U_{\text{СИ0}}; I_{\text{C0}})$ и $(U_{\text{П}}; 0)$ до пересечения её с осью токов (рисунок 9). В точке пересечения СЛН с осью токов определяют значение I_{Cmax} .

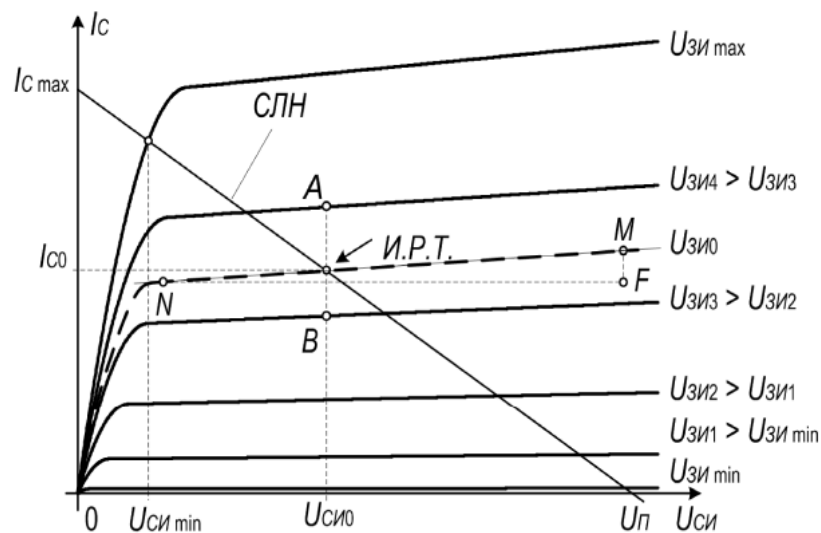


Рисунок 9 – Выходные ВАХ полевого транзистора и статическая линия нагрузки

После выбора режима покоя необходимо проверить выполнение условий:

$$U_{\text{СИтах.доп.}} > U_{\text{П}}; I_{\text{Стах.доп.}} > I_{\text{Стах}}; P_{\text{Стах.доп.}} > U_{\text{СИ0}} I_{\text{C0}}.$$

Все максимально допустимые значения можно найти в документации на используемый транзистор.

Требуемые значения тока стока покоя I_{C0} и напряжений $U_{си0}$, $U_{зи0}$ обеспечивают с помощью источника питания и резисторов цепей смещения. При этом для ПТИЗ необходимо задавать $U_{зи0} > U_{пор}$.

Напряжение между затвором и истоком в схеме на рисунке 8 равно потенциалу затвора:

$$U_{зи0} = U_3 - U_{и} = U_3. \quad (14)$$

Потенциал затвора можно определить по формуле:

$$U_3 = U_{п} \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (15)$$

Задаваясь значением $R_1 \parallel R_2 = (0,1 \dots 10) \text{ МОм}$, из выражений (14) и (15) находим:

$$R_1 = \frac{U_{п}}{U_{зи0}} (0,1 \dots 10) \text{ МОм}; \quad (16)$$

$$R_2 = \frac{U_{зи0}}{U_{п} - U_{зи0}} R_1. \quad (17)$$

РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

1 Получение передаточной характеристики полевого транзистора в схеме с общим истоком

1.1 Соберите в LTspice схему включения полевого транзистора в соответствии с рисунком 10.

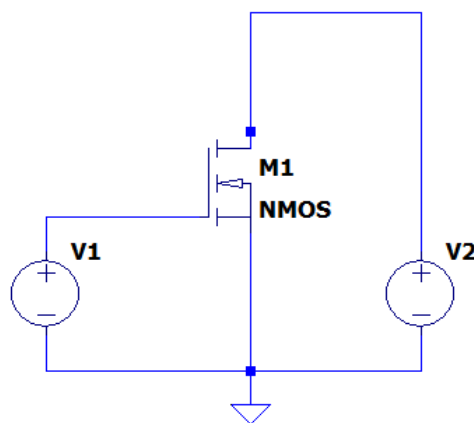


Рисунок 10 – Схема включения полевого транзистора с общим истоком

Транзистор выберите из таблицы 1 в соответствии с вариантом. Напряжение $E_{СИ}$ (V2) установите 5 В.

1.2 Снимите входную характеристику транзистора. Для этого запустите симуляцию в режиме DC sweep. В настройка симуляции в качестве источника укажите источник напряжения затвор-исток, начальное значение, конечное значение и шаг измерения выберите так, чтобы характеристика была удобна для наблюдения. Занесите передаточную характеристику в отчёт.

1.3 Определите по передаточной характеристике пороговое напряжение затвор-исток $U_{ПОР}$. Запишите его значение в отчёт.

1.4 Выберите на характеристике две точки. Занесите в отчёт токи I_{C2} и I_{C1} и напряжения $U_{ЗИ2}$ и $U_{ЗИ1}$, соответственно, в этих точках.

1.5 На основе значений из п. 1.4 вычислите крутизну передаточной характеристики полевого транзистора по формуле:

$$S = (I_{C2} - I_{C1}) / (U_{ЗИ2} - U_{ЗИ1}).$$

Полученное значение крутизны запишите в отчёт.

1.6 Определите значение удельной крутизны полевого транзистора по формуле:

$$b = S / (U_{ЗИ} - U_{ПОР}).$$

Используйте значения параметров, полученных в п. 1.3-1.5. Величину напряжения затвор-исток необходимо взять равной $U_{ЗИ} = (U_{ЗИ2} + U_{ЗИ1}) / 2$. Полученное значение удельной крутизны запишите в отчёт.

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

2.1 Для снятия выходных характеристик используется схема из п. 1.1. В настройках симуляции выберите режим DC sweep. В качестве первого источника укажите источник напряжения стока, начальное значение, конечное значение и шаг измерения выберите так, чтобы ВАХ была удобна для наблюдения. В качестве второго источника укажите источник напряжения затвор-исток. Начальное значение – 0.5, конечное значение выберите

используя документацию на транзистор, соответствующий вашему варианту. Конечное значение напряжения затвор-исток не должно превышать максимально допустимого. Шаг выберите таким образом, чтобы получить пять выходных характеристик на графике.

Запустите симуляцию, выберите для наблюдения ток стока. Таким образом вы получите семейство ВАХ при разных значениях напряжения затвор-исток.

2.2 Следующим шагом необходимо определить какому напряжению затвор-исток соответствует каждая из выходных характеристик. Для этого в меню Plot Settings выберите Add Plot Pane. В новом окне выберете для наблюдения напряжение затвор-исток. Соотнесите их с выходными характеристиками.

2.3 В отчёт занесите только семейство выходных характеристик. На графике отметьте какому напряжению затвор-исток соответствует каждая из характеристик.

2.4 Для каждой полученной выходной характеристики определите значение тока стока, соответствующее напряжению сток-исток 5 В. Полученные значения занесите в отчёт.

2.5 Используя полученные значения тока стока, вычислите соответствующие им значения крутизны S с помощью формулы (8). Сравните полученные результаты с величиной крутизны, полученной в п. 1.5. Выводы и результаты запишите в отчёт.

3 Расчёт усилительного каскада на полевом транзисторе

В данном подразделе необходимо произвести расчёт в соответствии с разделом «Расчёт усилительного каскада на полевом транзисторе» данного руководства. Исходными данными являются марка транзистора, сопротивление нагрузки R_H и максимальное напряжение на нагрузке U_H .

3.1 Используя характеристики, полученные в ходе выполнения предыдущих заданий и исходные данные произведите расчёт в соответствии с

разделом «Расчёт усилительного каскада на полевом транзисторе» данного руководства. Расчёт занесите в отчёт.

3.2 Соберите схему усилителя на полевом транзисторе, включенного по схеме с общим истоком, представленную на рисунке 8 в LTspice. Используйте значения, полученные при расчёте из п. 3.1.

3.3 Произведите моделирование работы схемы при постоянном входном сигнале. Осциллограммы выходных тока и напряжения занесите в отчёт. Сравните полученные значения с выбранными вами параметрами рабочей точки, запишите выводы в отчёт.

3.5 Произведите моделирование работы схемы при гармоническом входном сигнале. Осциллограммы выходных тока и напряжения занесите в отчёт. Проанализируйте полученные результаты и запишите выводы в отчёт.

3.6 Рассчитайте коэффициент усиления по напряжению как отношение амплитуды выходного напряжения к входному. Занесите полученный результат в отчёт.

Таблица 1 – Исходные данные

Вариант	Транзистор	U_{Hm} , В	R_H , Ом
1	2N7002	10	150
2	AO6608_N	5	200
3	BSC042N03MS	4	220
4	PH6325L	8	140
5	QS6K1	12	180
6	FDMS3622SQ2	6	300
7	HAT2165H	15	250
8	AONS32100	8	350
9	IRFH6200	5	100
10	Si7868DP	8	280