

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторной работе №3

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ**

## Содержание

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 1. Задание на подготовку к выполнению лабораторной работы..... | 3  |
| 2. Теоретическое введение.....                                 | 3  |
| 3. Задание на выполнение лабораторной работы .....             | 9  |
| 3.1 Расчетная часть работы .....                               | 9  |
| 3.2 Экспериментальная часть работы .....                       | 9  |
| 4. Рекомендации к выполнению исследований .....                | 10 |
| 5. Содержание отчета .....                                     | 14 |
| Рекомендуемая литература .....                                 | 14 |
| Приложение А.....                                              | 15 |
| Приложение Б.....                                              | 17 |

# **1 Задание на подготовку к выполнению лабораторной работы**

*Тема:* Исследование характеристик полевых транзисторов

*Цель работы:* Изучить статические ВАХ и другие определяющие характеристики полевых транзисторов

Выполнению данной работы должна предшествовать предварительная подготовка, состоящая в следующем:

1. Изучение темы и цели лабораторной работы.
2. При изучении теоретического материала в объеме материала лекций и теоретического введения обратить внимание на следующие основные вопросы:
  - достоинства и недостатки полевых транзисторов;
  - применение полевых транзисторов в элементарных схемах.

*Варианты приведены в Приложении А.*

## **2 Теоретическое введение**

Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, принцип действия которого основан на полевом эффекте – изменение электропроводимости поверхностного слоя под действием электрического поля, направленного перпендикулярно поверхности.

От биполярного транзистора полевой транзистор отличается:

- 1) принципом действия: в биполярном транзисторе управление выходным сопротивлением производится либо входным током, либо разностью потенциалов между входными выводами транзистора, а в полевом транзисторе - входным потенциалом затвора или электрическим полем;
- 2) полевой транзистор обладает *большим входным сопротивлением*.
- 3) в полевом транзисторе не происходит инжекции носителей заряда – отсюда уменьшение рекомбинационных явлений и низкий уровень шумов (особенно на низких частотах).

Таким образом:

– полевой транзистор (ПТ) – полупроводниковый прибор, в котором регулирование тока осуществляется изменением сопротивления проводящего канала с помощью поперечного электрического поля. Ток полевого транзистора обусловлен потоком основных носителей.

– электроды полевого транзистора называют истоком (И), стоком (С) и затвором (З). Управляющее напряжение прикладывается между затвором и истоком. Полевой транзистор можно рассматривать как источник тока, управляемый напряжением затвор-исток.

– по конструкции полевые транзисторы можно разбить на две группы: с управляющим р–п-переходом и с металлическим затвором, изолированным от канала диэлектриком.

Принцип действия полевого транзистора с управляющим р–п-переходом основан на изменении проводимости канала за счёт изменения его поперечного сечения. Между стоком и истоком включается напряжение такой полярности, чтобы основные носители заряда (электроны в канале n-типа) перемещались от истока к стоку. Между затвором и истоком включено отрицательное управляющее напряжение, которое запирает р–п-переход. Чем больше это напряжение, тем шире запирающий слой и уже канал. С уменьшением поперечного сечения канала его сопротивление увеличивается, а ток в цепи сток – исток уменьшается. Это позволяет управлять током стока с помощью напряжения затвор-исток  $U_{зи}$ . При некоторой величине напряжения затвор-исток запирающий слой полностью перекрывает канал, что приводит к уменьшению проводимости канала. Напряжение  $U_{зи}$ , при котором перекрывается канал, называют напряжением отсечки и обозначают  $U_{отс}$ . Для n-канального полевого транзистора напряжение отсечки отрицательно.

Входные (стоковые) характеристики у полевых транзисторов отсутствуют, так как входной ток равен нулю. Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим р–п-переходом и каналом n-типа показаны на рис. 2.2. На выходной характеристике можно выделить три области – отсечки, линейную (триодную) и насыщения. В линейной области ВАХ представляют прямые, наклон которых зависит от напряжения затвор-исток  $U_{зи}$ . Минимальное сопротивление канала достигается, когда напряжение  $U_{зи} = 0$ , так как проводящая часть канала в этом случае имеет наибольшее сечение. Таким образом, в линейной области полевой транзистор можно использовать как резистор, сопротивление которого регулируется напряжением затвора.

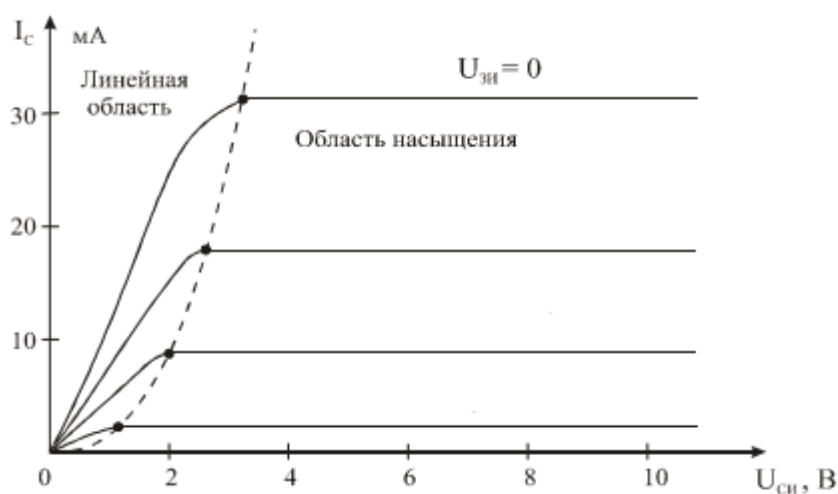


Рисунок 2.2 - Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим р–п-переходом и каналом n-типа показаны

В области насыщения ветви выходной характеристики расположены почти горизонтально. Это объясняется тем, что при увеличении напряжения сток-исток  $U_{си}$  область перекрытия канала вблизи стока расширяется и сопротивление канала увеличивается. В области насыщения полевой транзистор удобно моделировать передаточной характеристикой – зависимостью тока стока  $I_C$  от напряжения затвор-исток  $U_{зи}$  при постоянном напряжении сток-исток:

$$I_C = f(U_{зи}) | U_{си} = \text{Const}. \quad (2.1)$$

Передаточная (сток – затворная) характеристика n-канального полевого транзистора с управляющим р–п-переходом показана на рис. 2.3. При нулевом напряжении на затворе ток стока имеет максимальное значение, которое называют начальным  $I_{с\text{нач}}$ . При увеличении напряжения затвор-исток ток стока уменьшается и при напряжении отсечки  $U_{отс}$  становится близким к нулю.

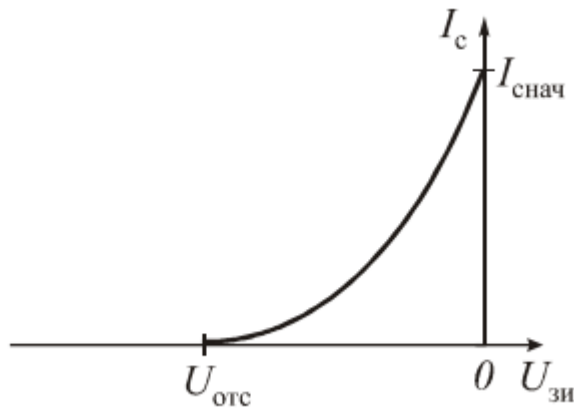


Рисунок 2.3 - Передаточная характеристика n-канального полевого транзистора с управляющим р–п-переходом

ВАХ полевого транзистора на участке, соответствующем линейному режиму, аппроксимируется выражением (2.2).

$$I_C = I_{снач} \left[ 2 \left( 1 - \frac{|U_{зи}|}{|U_{зиотс}|} \right) \left( \frac{|U_{си}|}{|U_{зи\max}|} \right) - \left( \frac{|U_{си}|}{|U_{зи\max}|} \right)^2 \right]. \quad (2.2)$$

В области усиления статистические характеристики идеального транзистора любой структуры описывается выражением (2.3)

$$I_C = \frac{\beta}{2} (U_0 - U_{зи})^2, \quad (2.3)$$

где  $\beta$  – постоянный коэффициент, зависящий от конструкции транзистора

$$(\beta = \frac{2I_c}{U_0^2});$$

$U_0$  – напряжение запираения ( $U_0 \approx U_{зи\max}$ ).

В режиме насыщения можно использовать формулу (2.4).

$$I_C = I_{снач} \left( 1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}} \right)^2. \quad (2.4)$$

Поведение р-канальных полевых транзисторов описывается такими же уравнениями. Следует учесть только, что для р-канальных ПТ напряжения имеют другую полярность, т. е.  $U_{отс} > 0$ , а  $U_{си} < 0$ .

Важным параметром полевого транзистора является крутизна характеристики, определяемая как отношение приращения тока стока  $\Delta I_c$  к приращению напряжения затвор-исток  $\Delta U_{зи}$ :

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} = \frac{dI_c}{dU_{зи}}, \quad (2.5)$$

$$\text{где } \Delta U_{зи} = U_{зи}(C) - U_{зи}(A), \quad (2.6)$$

$$\Delta I_c = I_c(B) - I_c(C). \quad (2.7)$$

МДП транзисторы имеют один или несколько затворов, электрически изолированных от проводящего канала одним или несколькими слоями диэлектрика. При приложении электрического напряжения к участку затвор-исток в полупроводнике на границе с диэлектриком появляется электрический заряд противоположного знака, который влияет на электропроводность прилегающего слоя полупроводника, образующего канал. В виде дискретных элементов выпускаются транзисторы с изолированным затвором двух разновидностей: со встроенным и индуцированным каналом. Транзистор с индуцированным каналом характеризуется тем, что канал возникает только при подаче на затвор напряжения определенной полярности. При нулевом напряжении канал отсутствует. При этом между стоком и истоком включены два обратнo смещенных р–п-перехода. Один р–п-переход образуется на границе между подложкой и стоком, а другой – между подложкой и истоком. Таким образом, при нулевом напряжении на затворе сопротивление между стоком и истоком очень велико, ток стока ничтожно мал и транзистор находится в состоянии отсечки.

Удельная крутизна транзистора с индуцированным каналом определяется по формуле (2.8).

$$b = \mu C_0 \frac{W}{L} \approx \frac{I_{с\max}}{U_{зи\min}^2}, \quad (2.8)$$

где  $\mu$  – приповерхностная подвижность носителей,  $C_0$  – удельная емкость затвор-канал,  $L$  – длина,  $W$  – ширина канала.

Если напряжение сток-исток мало, как часто бывает в импульсных и ключевых схемах, то выходная характеристика, соответствующая линейному режиму, аппроксимируется выражением (2.9).

$$I_C = b(U_{зи} - U_0)U_{си} . \quad (2.9)$$

Величину  $b(U_{зи} - U_0)$  - называют проводимостью канала, а обратную величину – сопротивлением канала.

Таким образом, при малых напряжениях сток-исток транзистора с индуцированным каналом эквивалентен линейному резистору, сопротивление которого регулируется напряжением затвора.

Передаточная характеристика транзистора с индуцированным каналом представлена на рисунке 2.4.

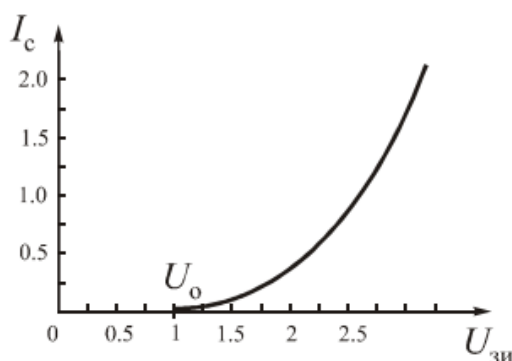


Рисунок 2.4 - Передаточная характеристика транзистора с индуцированным каналом

Транзистор со встроенным каналом  $n$  – типа при нулевом напряжении на затворе имеет ненулевое значение, называемое начальным  $I_{с\text{ нач}}$ . Если  $U_{зи} > 0$ , число электронов в канале увеличивается. Это приводит к увеличению проводимости канала. Такой режим работы транзистора со встроенным каналом, при котором концентрация носителей в канале больше равновесной, называют режимом обогащения. Передаточная характеристика транзистора со встроенным каналом представлена на рисунке 2.5.

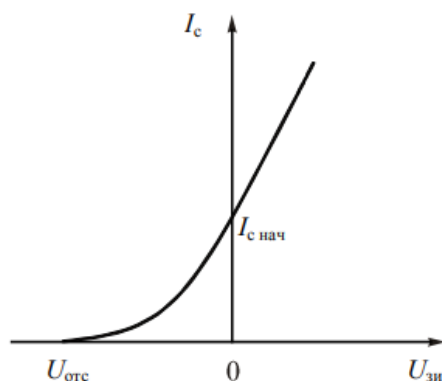


Рисунок 2.5 - Передаточная характеристика транзистора со встроенным каналом

Пример определения крутизны полевого транзистора по передаточной (стоко – затворной) характеристике представлен на рисунке 2.6.

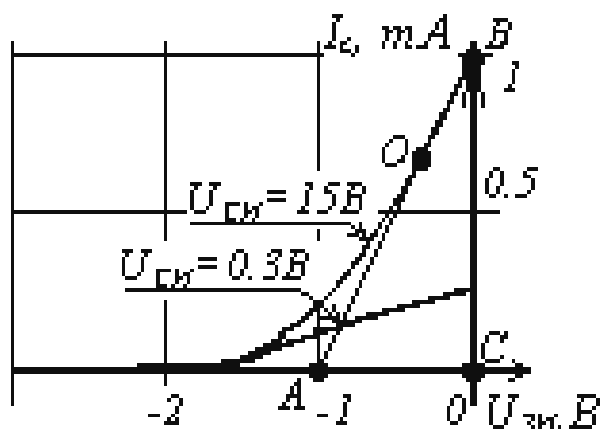


Рисунок 2.6 – Определение крутизны транзистора с  $n$ -каналом по передаточной характеристике

Методика определения крутизны полевого транзистора:

Выбирается произвольная точка  $O$  на линейном участке ВАХ при  $U_{cu} = 0.5 \cdot U_{cu \max}$ .

1. В выбранной точке строится касательная к графику ВАХ.
2. На касательной строится произвольный прямоугольный треугольник, например  $ACB$ .
3. Крутизна характеристики  $S$  определяется как отношение длин катетов  $CA$  и  $BC$ :

У полевых транзисторов выходное дифференциальное сопротивление показывает влияние напряжения сток - исток  $U_{cu}$  на выходной ток транзистора  $I_c$ . Оно определяется по наклону стоковой характеристики на участке насыщения. Методика определения дифференциального выходного сопротивления представлена ниже:

1. Выбирается произвольная точка  $O$  на произвольной ветви выходных ВАХ в области насыщения токов.
2. В выбранной точке строится касательная к графику ВАХ.
3. На касательной строится произвольный прямоугольный треугольник, например  $ACB$ .
4. Дифференциальное сопротивление  $r_{вых}$  определяется как отношение длин катетов  $CA$  и  $BC$ :

$$r_{вых} = \frac{\Delta U_{cu}}{\Delta I_c}, \quad (2.10)$$

$$\text{где } \Delta U_{cu} = U_{cu}(A) - U_{cu}(C), \quad (2.11)$$

$$\Delta I_c = I_c(C) - I_c(B). \quad (2.12)$$



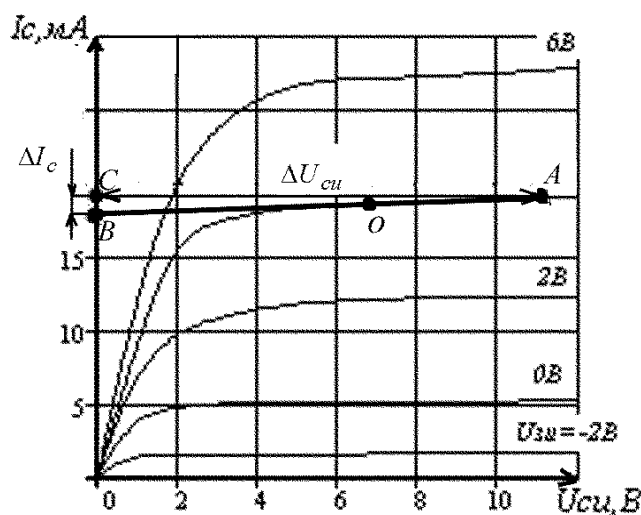


Рисунок 2.4 – Определение выходного дифференциального сопротивления

### 3 Задание на выполнение лабораторной работы

#### 3.1 Расчетная часть работы

1. Рассчитать основные параметры и построить сток – затворную и выходную (стоковую) характеристики полевого транзистора.
2. По графику сток-затворной характеристики определить дифференциальную крутизну  $S$ , по графику выходных (стоковых) ВАХ определить дифференциальное выходное сопротивление  $r_{вых}$ , используя методические указания раздела 2.

#### 3.2 Экспериментальная часть работы

1. Исследовать семейства проходных (сток-затворных) и выходных (стоковых) ВАХ полевого транзистора (тип транзистора выбирается из Приложения А в соответствии с вариантом) используя измерительную схему, приведенную на рисунке Б.6. Исследования проводить по методическим указаниям раздела 4.
2. По полученным данным построить графические характеристики в одних осях с характеристиками, полученными по расчетам (3.1).
3. Рассчитать крутизну характеристики и дифференциальное сопротивление по экспериментальным характеристикам.

## 4 Рекомендации к выполнению исследований

### 4.1 Расчетная часть

#### 4.1.1 Расчет характеристик транзисторов с управляющим $p$ - $n$ переходом

Выбрать тип (марку) полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$  переходом из Приложения А. Для выбора характеристик используйте ресурсы Интернет:

Характеристики:

[https://alltransistors.com/ru/mosfet/kak\\_podobrat\\_zamenu\\_dlia\\_mosfet.php](https://alltransistors.com/ru/mosfet/kak_podobrat_zamenu_dlia_mosfet.php)

аналог

[http://www.dectel.ru/philips/analogues/various/j-fet\\_transist.shtml](http://www.dectel.ru/philips/analogues/various/j-fet_transist.shtml)

Выписать параметры исследуемого транзистора, используя ресурсы Internet:

- a)  $I_{C \max}$ ,  $mA$  - максимально допустимый постоянный ток стока;
- b)  $U_{cu \max}$ ,  $B$  - предельно допустимое напряжение между стоком и истоком;
- c)  $U_{зи \text{отс}}$ ,  $B$  - напряжения отсечки для транзистора с управляющим  $p$ - $n$  переходом;
- d)  $U_{зи \max}$ ,  $B$  - предельно допустимое напряжение между затвором и истоком.

Занести значения и марку выбранного транзистора в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики транзистора

| Марка транзистора<br>(тип канала) |              |               |               |                     |
|-----------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------------|
| Параметры                         | $I_{C \max}$ | $U_{cu \max}$ | $U_{зи \max}$ | $U_{зи \text{отс}}$ |
| Ед.изм.                           | mA           | B             | B             | B                   |
| Количественные значения           |              |               |               |                     |

Построить статическую стоко - затворную характеристику транзистора при 2-х фиксированных рекомендуемых значениях  $U_{cu} = \text{const}$ , вычисляемых по выражениям в первой строке таблицы 4.2.

Таблица 4.2 – Семейство стоко-затворных характеристик транзистора с управляющим  $p$ - $n$  переходом

| №  | $ U_{зи \text{отс}} $ ,<br>B | $ U_{зи} $ , B                   | $ U_{зи} $ , B<br>(рассчитанные значения) | $U_{cu} = 0.01 \cdot U_{cu \max}$ , B | $U_{cu} = 0.5 \cdot U_{cu \max}$ , B |
|----|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
|    |                              |                                  |                                           | (рассчитанные значения)               | (рассчитанные значения)              |
|    |                              |                                  |                                           | $I_c$ , mA                            | $I_c$ , mA                           |
| 1. |                              | $0.95 \cdot  U_{зи \text{отс}} $ |                                           |                                       |                                      |
| 2. |                              | $0.75 \cdot  U_{зи \text{отс}} $ |                                           |                                       |                                      |

|    |  |                                 |  |  |  |
|----|--|---------------------------------|--|--|--|
| 3. |  | $0.5 \cdot  U_{зи\text{отс}} $  |  |  |  |
| 4. |  | $0.25 \cdot  U_{зи\text{отс}} $ |  |  |  |
| 5. |  | 0                               |  |  |  |

- вычислить  $I_C$  по формуле (2.2) и записать данные в таблицу 4.2. Учесть, что все значения подставляются в формулу (2.2) по модулю. Если ответ будет иметь отрицательное значение, то в таблицу 4.2. записывается значение  $I_C=0$ .

- построить семейство сток-затворных ВАХ.

#### 4.1.2 Расчет характеристик транзисторов с индуцированным каналом

Выбрать тип (марку) полевого транзистора с индуцированным каналом из Приложения А.

Выписать параметры исследуемого транзистора, используя ресурсы Internet:

- $I_{C\text{max}}$ , mA - максимально допустимый постоянный ток стока;
- $U_{си\text{max}}$ , В - предельно допустимое напряжение между стоком и истоком;
- $U_{зи\text{max}}$ , В - предельно допустимое напряжение между затвором и истоком;
- $U_{зи\text{min}}$ , В - минимальное напряжение между затвором и истоком;
- $U_{зи\text{пор}}$ , В – пороговое напряжение для транзистора с индуцированным каналом(выбрать максимальное значение порогового напряжения);

Занести значения и марку выбранного транзистора в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Характеристики транзистора с индуцированным каналом

| Марка транзистора<br>(тип канала) |                   |                    |                    |                    |                    |
|-----------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Параметры                         | $I_{C\text{max}}$ | $U_{си\text{max}}$ | $U_{зи\text{max}}$ | $U_{зи\text{min}}$ | $U_{зи\text{пор}}$ |
| Ед.изм.                           | mA                | В                  | В                  | В                  | В                  |
| Количественные значения           |                   |                    |                    |                    |                    |

Построить статическую стоко - затворную характеристику транзистора при 2-х фиксированных рекомендуемых значениях  $U_{зи} = \text{const}$ , вычисляемых по выражениям в первой строке таблицы 4.3:

- вычислить  $I_C$  по формуле (2.8) и (2.9) и записать данные таблицу 4.4;
- построить семейство сток-затворных ВАХ.

Таблица 4.4 – Семейство сток – затворных характеристик транзистора с индуцированным каналом

| №  | $U_{зипор}, В$ | $U_{зи}, В$             | $b$ | $U_{зи}, В$<br>(рассчитанные значения) | $U_{си} = 0.01 \cdot U_{си max}, В$ | $U_{си} = 0.5 \cdot U_{си max}, В$ |
|----|----------------|-------------------------|-----|----------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
|    |                |                         |     |                                        | (рассчитанные значения)             | (рассчитанные значения)            |
|    |                |                         |     |                                        | $I_c, mA$                           | $I_c, mA$                          |
| 1. |                | $U_{зи пор}$            |     |                                        |                                     |                                    |
| 2. |                | $2 \cdot U_{зи пор}$    |     |                                        |                                     |                                    |
| 3. |                | $3 \cdot U_{зи пор}$    |     |                                        |                                     |                                    |
| 4. |                | $0.5 \cdot U_{зи max}$  |     |                                        |                                     |                                    |
| 5. |                | $0.95 \cdot U_{зи max}$ |     |                                        |                                     |                                    |

## 4.2 Экспериментальная часть

### 4.2.1 Исследование ВАХ транзисторов с управляющим $p-n$ переходом

1. Собрать измерительную схему рисунка Б.6, для исследования семейств сток-затворных и стоковых характеристик (на рисунке приведён пример измерительной схемы для транзистора с  $n$ -каналом). Если по варианту требуется исследовать транзистор с  $p-n$  переходом с  $p$ -каналом, то схему рисунка Б.6 необходимо исправить так, чтобы полярности подключения источников  $E_1$  и  $E_2$ , а также подключение измерительных приборов соответствовали нормальному включению полевого транзистора с  $p-n$  каналом. То есть  $p-n$  переход между затвором и истоком должен быть смещён источником  $E_1$  в обратном направлении, а основные носители заряда в канале должны течь под действием  $E_2$  от истока к стоку. (При отсутствии в библиотеке программы требуемого транзистора, воспользуйтесь аналогом).

2. Исследовать семейство статических сток-затворных характеристик транзистора при 2-х фиксированных рекомендуемых значениях  $U_{си} = const$ , вычисляемых по выражениям в первой строке таблицы 4.5. Для исследования каждой ветви ВАХ выполнить следующие действия:

- установить значение источника  $E_2$  в соответствии с очередным значением  $U_{си}$ ;
- вычислить по выражениям во 2-м столбце таблицы 4.5 рекомендуемые значения  $U_{зи}$  и зафиксировать их во 2-м столбце таблицы 4.5 в отчёте;
- с помощью источника  $E_1$  установить вычисленные выше значения  $U_{зи}$  (устанавливать значения  $U_{зи}$  по модулю);
- для каждого установленного  $U_{зи}$  измерить по амперметру  $A1$  ток стока  $I_c$  и зафиксировать в таблицу 4.5;

Выполнить вышеуказанные действия для обоих указанных в таблице значений  $U_{cu}$ .

*Внимание!  $I_c$  записывать в таблицу со знаком «+», т.к. направление тока противоположно показаниям амперметра.*

По измеренным значениям построить семейство сток-затворных ВАХ полевых транзисторов в одних осях с расчетными характеристиками.

Таблица 4.5 – Семейство стоко – затворных характеристик транзистора с управляющим  $p$ - $n$  переходом

| №  | $ U_{zu} , В$                     | $U_{cu} = 0.01 \cdot U_{cu \max}, В$ | $U_{cu} = 0.5 \cdot U_{cu \max}, В$ | S |
|----|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---|
|    |                                   | $ I_c , мА$                          | $ I_c , мА$                         |   |
| 1. | $0.95 \cdot  U_{zu \text{ отс}} $ |                                      |                                     |   |
| 2. | $0.75 \cdot  U_{zu \text{ отс}} $ |                                      |                                     |   |
| 3. | $0.5 \cdot  U_{zu \text{ отс}} $  |                                      |                                     |   |
| 4. | $0.25 \cdot  U_{zu \text{ отс}} $ |                                      |                                     |   |
| 5. | 0                                 |                                      |                                     |   |

По графику сток-затворной характеристики определить дифференциальную крутизну  $S$ , используя методические указания раздела 2.

*Т.к. математические формулы приведены для идеальных транзисторов, то графики, построенные согласно расчетным значениям и измеренным параметрам могут отличаться.*

3. Исследовать семейство статических стоковых ВАХ транзистора при 2-х фиксированных рекомендуемых значениях  $U_{zu} = \text{const}$ , вычисляемых по выражениям в первой строке таблицы 4.6 (для расчетов принять значения  $U_{zu \text{ отс}}$  по модулю). Для исследования каждой ветви ВАХ выполнить следующие действия:

- с помощью источника  $E_1$  установить очередное рекомендуемое значение  $U_{zu}$ , определяемое по выражению первой строки таблицы 4.6;
- вычислить по рекомендуемым выражениям в соответствующем столбце таблицы 4.6 рекомендуемые значения  $U_{cu}$  и зафиксировать их в том же столбце таблицы 4.6 в отчёте;
- с помощью источника  $E_2$  установить вычисленные значения  $U_{cu}$ ;
- для каждого установленного значения  $U_{cu}$  измерить ток стока  $I_c$  по амперметру  $A1$  и зафиксировать в таблицу 4.6. *Внимание!  $I_c$  записывать в таблицу со знаком «+», т.к. направление тока противоположно показаниям амперметра.*

Повторить вышеуказанные действия для всех указанных в таблице значений  $U_{zu}$ .

По измеренным значениям построить график семейства стоковых (выходных) ВАХ.

Таблица 4.6 - Семейство выходных ВАХ полевого транзистора

| $U_{зи,1} = 0.9 \cdot  U_{зи\text{отс}} , \text{В}$ |                  | $U_{зи,3} = 0.1 \cdot  U_{зи\text{отс}} , \text{В}$ |                  | $r_{\text{вых}}$ |
|-----------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------|------------------|------------------|
| $U_{си}, \text{В}$                                  | $I_c, \text{мА}$ | $U_{си}, \text{В}$                                  | $I_c, \text{мА}$ |                  |
| $0.1( U_{зи\text{отс}}  - U_{зи,1})$                |                  | $0.1( U_{зи\text{отс}}  - U_{зи,3})$                |                  |                  |
| $0.5( U_{зи\text{отс}}  - U_{зи,1})$                |                  | $0.5( U_{зи\text{отс}}  - U_{зи,3})$                |                  |                  |
| $ U_{зи\text{отс}}  - U_{зи,1}$                     |                  | $ U_{зи\text{отс}}  - U_{зи,3}$                     |                  |                  |
| $0.5 \cdot U_{си\text{ max}}$                       |                  | $0.5 \cdot U_{си\text{ max}}$                       |                  |                  |
| $0.8 \cdot U_{си\text{ max}}$                       |                  | $0.8 \cdot U_{си\text{ max}}$                       |                  |                  |

По графику выходных (стоковых) ВАХ определить дифференциальное выходное сопротивление  $r_{\text{вых}}$ , используя методические указания раздела 2.

## 5 Содержание отчета

1. Тема и цель лабораторной работы.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Графики статических проходных и выходных ВАХ.
5. Расчет крутизны сток-затворной характеристики  $S$ .
6. Расчет дифференциального выходного сопротивления  $r_{\text{вых}}$ .
7. Выводы по результатам проведенных исследований.

## Приложение Б

Используя ресурсы интернета скачать программу EWB для работы на виртуальном стенде.

По ссылке [soft.sibnet.ru>soft/25729-electronic-workbench](http://soft.sibnet.ru>soft/25729-electronic-workbench) открывается программа EWB.

При входе в программу Electronics Workbench может появляться надпись could not file, которую следует закрыть и продолжить работу в программе.

Панель инструментов стенда представлена на рисунке Б.1.

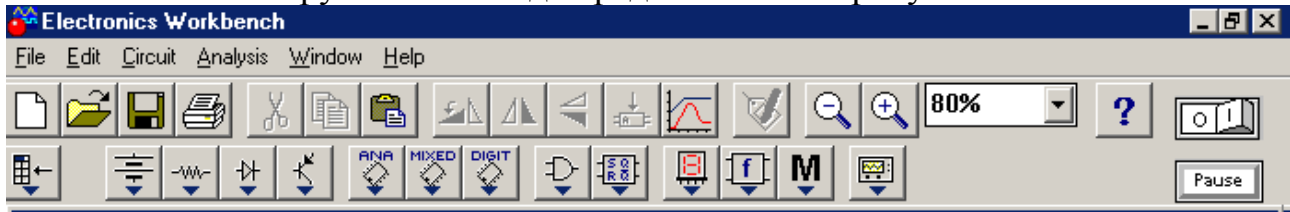


Рисунок Б.1 – Панель инструментов стенда

Схемы исследуемых устройств «собираются» с помощью панели инструментов для построения схемы (рисунок Б.2 а) и панели инструментов для измерений (рисунок Б.2 б):



Рисунок Б.2 – Панели инструментов для построения схемы (а) и для измерений (б)

Для выполнения данной лабораторной работы понадобятся *источник напряжений, амперметр, вольтметр и униполярный транзистор.*

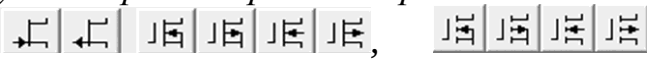
Униполярные транзисторы , вызывается из панели «Transistors» (рисунок Б.3), появляющейся при нажатии четвертой кнопки панели инструментов для построения схемы (рисунок Б.2 а).



Рисунок Б.2 – Панель «Transistors»

Источник напряжения  вызывается из панели источников «Sources» (рисунок Б.4), которая появляется в виде всплывающего меню нажатием первой кнопки панели, представленной на рисунке Б.2 а.

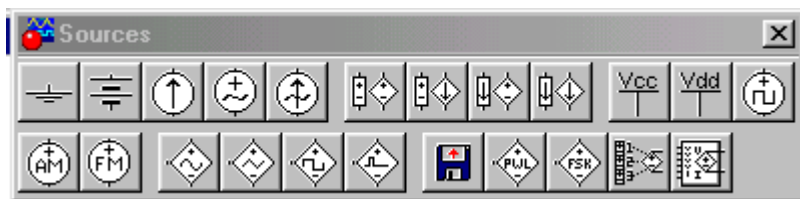


Рисунок Б.4 – Панель источников «Sources»

Амперметр и вольтметр выбираются из панели индикаторов (рисунок Б.5), вызываемой нажатием первой кнопки панели измерителей (рисунок Б.2 б).



Рисунок Б.5 – Панель индикаторов

Величина ЭДС, а также параметры *пассивных элементов* схем устанавливается следующим образом:

- а) курсор «мыши» наводится на соответствующий элемент схемы;
- б) «кликанием» правой кнопки вызывается всплывающее меню, из которого вызывается пункт «*component properties*»;
- с) далее выбирается пункт «*value*», в котором устанавливается требуемая величина и единица измерения настраиваемого параметра.

Типы униполярных транзисторов и других *активных элементов* выбираются следующим образом:

- а) курсор «мыши» наводится на соответствующий элемент схемы;
- б) «кликанием» правой кнопки вызывается всплывающее меню, из которого вызывается пункт «*component properties*»;
- с) далее из списка «*library*» выбирается библиотека, а из списка «*models*» – соответствующий тип диода.

Функционирование схемы запускается с помощью переключателя , расположенного в правой части панели инструментов (рисунок 3.2). Кнопкой «*raise*» можно останавливать функционирование; повторным нажатием – снова разрешать функционирование схемы.



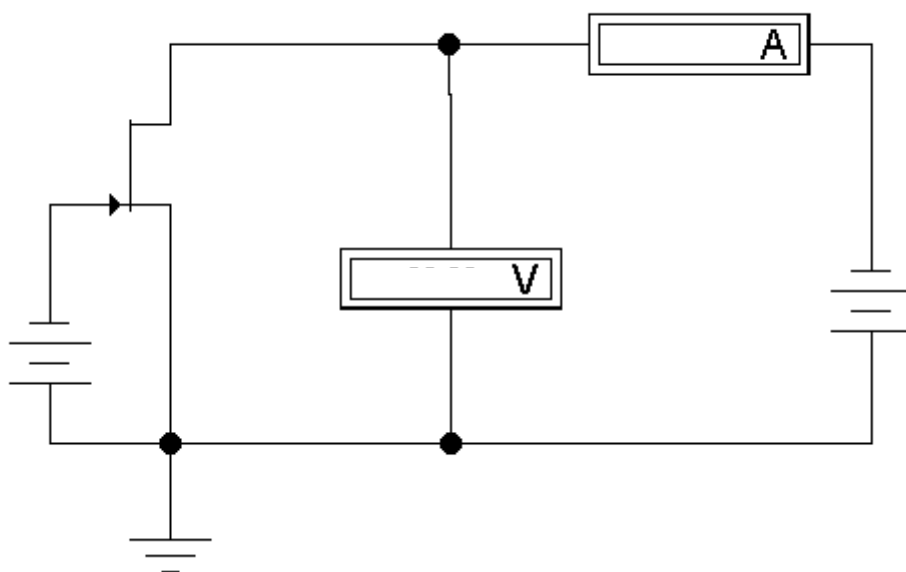


Рисунок Б.6 – Измерительная схема для исследования ВАХ  
ПТУП-транзистора с  $n$ -каналом