

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторным работам 1-4  
по курсу «Электроника»  
для студентов направления 11.03.01 «Радиотехника»,  
направленность: «Радиотехнические средства передачи, приема  
и обработки сигналов»  
очной и заочной форм обучения

Воронеж  
2019

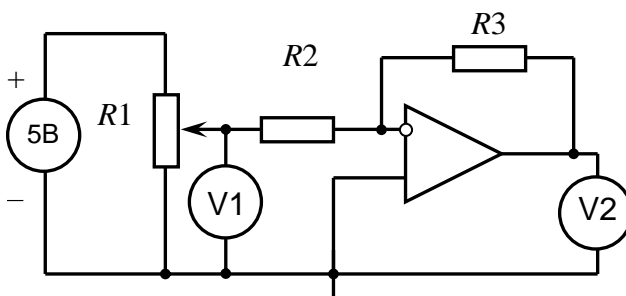
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический  
университет"

Кафедра радиотехники

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторным работам 1-4  
по курсу «Электроника»  
для студентов направления 11.03.01 «Радиотехника»,  
направленность: «Радиотехнические средства передачи, приема  
и обработки сигналов»  
очной и заочной форм обучения



Воронеж  
2019

УДК 621.396  
ББК 32.85

*Составитель канд. техн. наук, доц. Р. П. Краснов*

Методические указания к лабораторным работам 1-4 по курсу «Электроника» для студентов направления 11.03.01 «Радиотехника», направленность: «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов» очной и заочной форм обучения / ФГОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Р. П. Краснов. Воронеж, 2019. 35 с.

В методическом руководстве приведено описание лабораторных работ по дисциплине «Электроника» для студентов 2 курса очной и заочной форм обучения направления 11.03.01 «Радиотехника», направленность: «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов». Каждая лабораторная работа снабжена краткими теоретическими сведениями и контрольными вопросами. Содержатся также общие сведения о лабораторном оборудовании и правила техники безопасности.

**УДК 621.396**  
**ББК 32.85**

Табл. 4. Ил. 22. Библиогр.: 5 назв.

**Рецензент** канд. техн. наук, доц. А. В. Володько

Печатается по решению учебно-методического совета Воронежского государственного технического университета

## **ВВЕДЕНИЕ**

На лабораторных занятиях по курсу «Электроника» каждый студент выполняет лабораторное задание, включающее теоретическую и экспериментальную части.

Лабораторные занятия предполагают выполнение подготовительных (домашних) заданий, основным содержанием которых является ознакомление с принципом работы электронного прибора, его паспортными данными, изучение измерительных схем и методик проведения измерений.

Контроль правильности выполнения подготовительного задания и теоретической готовности к выполнению лабораторной работы проводится преподавателем перед началом занятия.

Заключительным этапом лабораторной работы является защита отчета, которая проводится в виде устного собеседования в рамках контрольных вопросов, помещенных в конце каждой работы и сдачи зачета по темам, приведенным в приложении.

### **Техника безопасности в лаборатории**

Режим техники безопасности на лабораторных занятиях по курсу «Электроника» включает:

– изучение правил техники безопасности при обслуживании электроустановок с напряжением до 1000 В и дополнительный инструктаж по электробезопасности в конкретных условиях учебной лаборатории;

– документальную регистрацию студентами знаний правил техники безопасности и дополнительного инструктажа в специальном журнале.

Дополнительный инструктаж включает в себя следующие рекомендации по сборке измерительных схем.

Перед началом сборки измерительной схемы убедиться, что все источники питания лабораторной установки выключены, а их регуляторы установлены в крайнее левое положение.

При сборке измерительной схемы использовать только надежные клеммные и штепсельные соединения и соединительные провода. Основания клемм должны иметь надежную фиксацию в посадочные отверстия. Соединение и разъединение штепсельных разъемов должно осуществляться при отключенных источниках питания плавно и с небольшим усилием.

Только после тщательной проверки собранной измерительной схемы и с разрешения преподавателя или лаборанта можно включать тумблеры источников питания.

Электрическая схема собирается без установленной на панели ИМС. С помощью вольтметра выставляется необходимое напряжение питания. Затем при выключенном источнике питания производится установка разъема с микросхемой.

Обо всех замеченных технических неисправностях немедленно сообщать преподавателю или лаборанту

Запрещается в процессе измерений прикасаться к токоведущим элементам (клеммам).

Перед внесением изменений в схему необходимо выключить источники питания лабораторной установки.

После окончания измерений необходимо установить регуляторы напряжения всех источников питания в крайнее левое положение, выключить источники питания и другие приборы, обесточить измерительный стенд, разобрать измерительную схему, привести в порядок рабочее место.

### **Краткие сведения об учебном измерительном оборудовании**

Для проведения учебной исследовательской работы в лаборатории электронных приборов используется стенд лабораторный универсальный типа СПЭ-8. Он предназначен для исследования полупроводниковых приборов в статическом режиме.

Для задания статических режимов полупроводниковых приборов и подключения дополнительного оборудования в стенде имеется пять источников питания.

Два источника стабилизированного постоянного напряжения, регулируемого в пределах 0...15В, с максимальным значением выходного тока 100 мА, при уровне пульсаций выходного напряжения не более 0,5%.

Для измерения тока, протекающего в цепях с исследуемыми приборами и напряжений на них, имеется шесть электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы.

Исследуемая схема собирается на макетной плате «Полупроводники-микросхемы», которая позволяет исследовать различные схемы, собранные на полупроводниковых приборах и ИС.

Макет выполнен в виде самостоятельного устройства настольного типа. Все органы управления и коммутации расположены на лицевой стороне панели макета. На левой и правой сторонах каркаса установлены по четыре пары гнезд Г4 и Г1-6, соединенных между собой, для подключения радиоизмерительных приборов.

Одно- и двухполярное напряжение питания подводится к гнездам Г4, обозначенных на макете «+», «⊥», «-». Индикация наличия напряжения осуществляется тумблером, обозначенным U, при этом загораются светодиоды. Дополнительное однополярное напряжение может быть также подведено к гнездам Г4, расположенным в правом верхнем углу макета. Напряжение от генератора подводится к гнездам Г4 «Генератор».

Макет имеет набор постоянных и переменных резисторов, емкостей, диодов, стабилитронов, светодиодов, транзисторов, номиналы которых указаны на лицевой панели стенда.

К разъемам ХТ4, ХТ5, ХТ6, ХТ9, ХТ10 подключаются их ответные части с распаянными на них полупроводниковыми приборами и интегральными схемами. Сами разъемы распаяны на гнезда Г1-6, расположенные около них.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## Исследование статических характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

### *Цели работы*

1. Углубление и расширение теоретических знаний по физическим основам полупроводниковой электроники и работы биполярных транзисторов.

2. Знакомство с конструкцией транзисторов различного назначения.

3. Освоение методики снятия вольт-амперных характеристик (ВАХ).

4. Освоение графоаналитического метода расчета основных статических параметров.

### *Состав используемого оборудования*

- Источник питания постоянного напряжения 0...15 В.
- Вольтметры постоянного напряжения.
- Амперметры постоянного тока.
- Стенд лабораторный с исследуемыми биполярными транзисторами типа КТ3102.
- Соединительные провода.

### *Подготовительное (домашнее) задание*

- Записать название, цель работы.
- Зарисовать измерительную схему.
- Изучить ВАХ транзистора в схеме с общим эмиттером и основные статические характеристики.

### *Краткие теоретические сведения*

*Биполярным транзистором* называют полупроводниковый прибор, состоящий из трех областей с чередующимися типами электропроводности и предназначенный для усиления сигнала.

Биполярный транзистор представляет собой полупроводниковый кристалл, в котором созданы три области

с различной электропроводностью. Соответственно, различают транзисторы  $pnp$  и  $npr$  – типа.

Средняя область транзистора называется базой, одна крайняя область – эмиттером, вторая – коллектором. Таким образом в транзисторе имеются два  $pn$ -перехода: эмиттерный – между эмиттером и базой и коллекторный – между базой и коллектором (рис. 1.1).

В зависимости от того, какой из выводов является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ), общим коллектором (ОК) (рис. 1.2).

Входная, или управляющая, цепь служит для управления работой транзистора. В выходной, или управляемой, цепи получают усиленные колебания. Источник усиливаемых колебаний включается во входную цепь, а в выходную включается нагрузка.

Рассмотрим принцип действия транзистора на примере транзистора  $npr$  – типа, включенного по схеме с общей базой (ОБ).

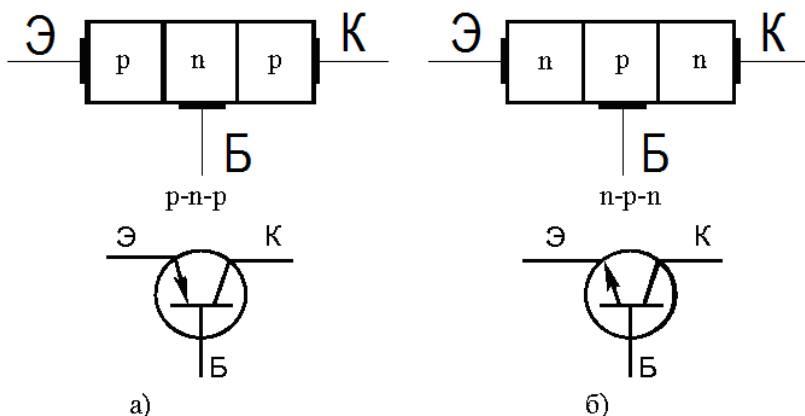


Рис. 1.1 Структура и условно-графическое обозначение транзисторов  $npr$  (а) и  $pnп$  (б) типа



Внешние напряжения двух источников питания подключают к транзистору таким образом, чтобы обеспечивалось смещение эмиттерного перехода в прямом направлении, а коллекторного перехода – в обратном направлении.

Выходной ток транзистора зависит от входного тока. Поэтому транзистор- прибор, управляемый током.

Для транзисторов  $npr$  и  $pnp$  в схемах включения изменяются лишь полярности напряжений и направление токов. При любой схеме включения транзистора, полярность включения источников питания должна быть выбрана такой, чтоб эмиттерный переход был включен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном.

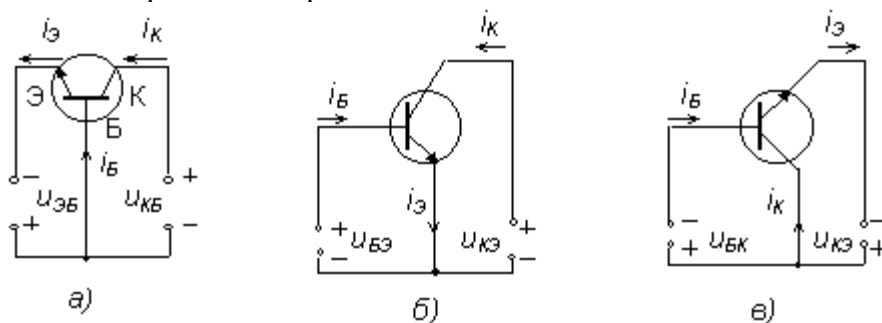


Рис. 1.2 Схемы включения биполярного транзистора: с общей базой – ОБ (а), с общим эмиттером – ОЭ (б), с общим коллектором – ОК (в).

*Статическим режимом работы* транзистора называется режим при отсутствии нагрузки в выходной цепи.

Статическими характеристиками транзисторов называют графически выраженные зависимости напряжения и тока входной цепи (входные ВАХ) и выходной цепи (выходные ВАХ). Вид характеристик зависит от способа включения транзистора.

Всего таких характеристик три:

- *входная*, представляющая собой зависимость входного тока от входного напряжения,

- *выходная*, представляющая собой зависимость выходного тока от выходного напряжения и
- *проходная (сквозная)*, представляющая собой зависимость выходного тока от входного напряжения.

Для схемы включения ОЭ эти характеристики приобретут следующий вид (рис. 2.3):

- входная характеристика:  $I_B = f(U_{БЭ})$ ;
- выходная характеристика:  $I_K = f(U_{КЭ})$ ;
- сквозная характеристика:  $I_K = f(U_{БЭ})$ ;

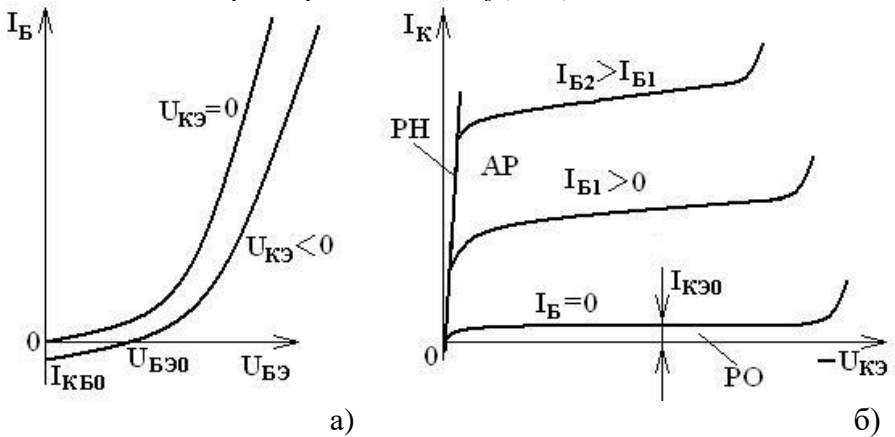


Рис. 1.3 Общий вид входной (а) и выходной (б) характеристик биполярного транзистора, включенного по схеме ОЭ

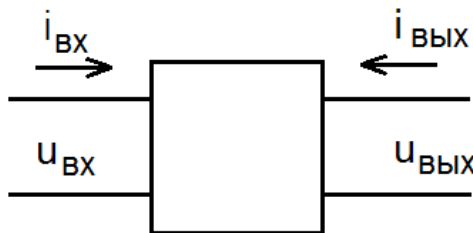


Рис. 1.4 Представление транзистора в виде линейного четырехполюсника

Транзисторный каскад усиления как четырехполюсник (рис. 1.4) описывают при помощи совокупности четырех

характеристик, называемых  $h$ -параметрами. В системе  $h$ -параметров токи и напряжения четырехполосника связаны следующими линейными уравнениями:

$$\begin{cases} \Delta U_{\hat{a}\hat{o}} = h_{11}\Delta I_{\hat{a}\hat{o}} + h_{12}\Delta U_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}, \\ \Delta I_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} = h_{21}\Delta I_{\hat{a}\hat{o}} + h_{22}\Delta U_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}. \end{cases} \quad (1.1)$$

Решая систему, определим  $h$ -параметры четырехполосника и найдем физическую интерпретацию каждого из них, полагая, что четырехполосник описывает включение биполярного транзистора по схеме с общим эмиттером. Принадлежность параметра к соответствующей схеме включения транзистора отражается добавлением индексов «э», «б» или «к».

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{\hat{a}\hat{o}}}{\Delta I_{\hat{a}\hat{o}}} \right|_{\Delta U_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} = 0}, h_{11y} = \left. \frac{\Delta U_{\hat{a}y}}{\Delta I_{\hat{a}}} \right|_{\Delta U_{\hat{e}y} = 0}, \quad (1.2)$$

- входное сопротивление транзистора при короткозамкнутой выходной цепи;

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{\hat{a}\hat{o}}}{\Delta U_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}} \right|_{\Delta I_{\hat{a}\hat{o}} = 0}, h_{12y} = \left. \frac{\Delta U_{\hat{a}y}}{\Delta U_{\hat{e}y}} \right|_{\Delta I_{\hat{a}} = 0}, \quad (1.3)$$

- коэффициент обратной связи по напряжению при холостом ходе входной цепи;

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}}{\Delta I_{\hat{a}\hat{o}}} \right|_{\Delta U_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} = 0}, h_{21} = \left. \frac{\Delta I_{\hat{e}}}{\Delta I_{\hat{a}}} \right|_{\Delta U_{\hat{e}y} = 0}, \quad (1.4)$$

- коэффициент передачи тока при коротком замыкании выходной цепи. Этот параметр описывает усилительные свойства транзистора и иногда обозначается также символом  $\beta$ ;

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}}{\Delta U_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}} \right|_{\Delta I_{\hat{a}\hat{o}} = 0}, h_{22y} = \left. \frac{\Delta I_{\hat{e}}}{\Delta U_{\hat{e}y}} \right|_{\Delta I_{\hat{a}} = 0}, \quad (1.5)$$

- выходная проводимость при холостом ходе входной цепи.

Преимущество системы  $h$ -параметров состоит в удобстве экспериментального определения параметров, поскольку осуществление холостого хода входной цепи и короткого замыкания выходной цепи (шунтированием конденсатором) транзистора затруднений не вызывает.

На рис. 1.5 показана эквивалентная схема, составленная на основании системы уравнений. Задавшись определенной рабочей точкой графоаналитическим методом по семействам входных и выходных ВАХ биполярного транзистора можно найти входное и выходное сопротивления, коэффициент усиления по току и, соответственно,  $h$ -параметры (первый параметр определяется по семейству входных ВАХ, остальные – выходных).

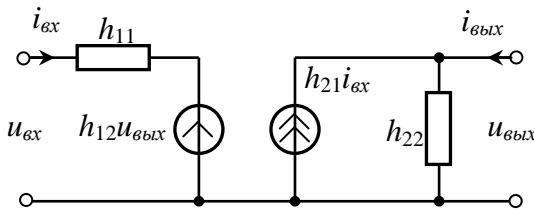


Рис. 1.5 Формальная эквивалентная схема транзистора в системе  $h$ -параметров

### Лабораторное задание

- 1 Получить допуск у преподавателя или лаборанта.
- 2 Включить стенд, установить напряжение источников питания согласно значениям, указанным на рис. 1.6, контролируя результат по вольтметру.

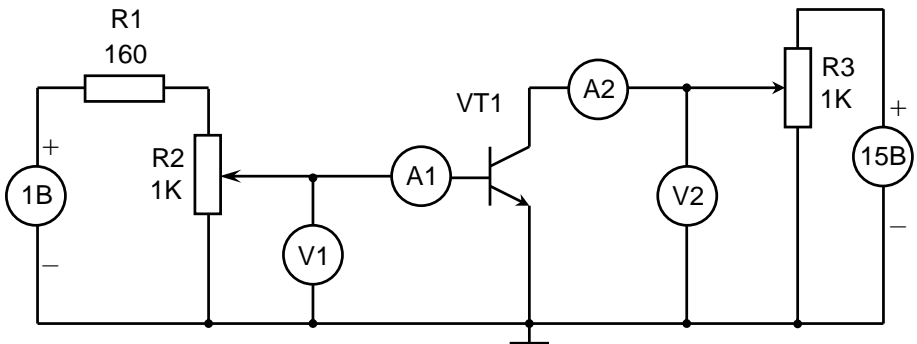


Рис. 1.6 Схема для снятия семейства входных и выходных ВАХ биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ

3 Собрать схему для снятия семейства ВАХ биполярного транзистора в схеме с ОЭ аналогично приведенной на рис. 1.6. После разрешения преподавателя или лаборанта подать питание на лабораторный стенд.

4 Установив согласно данным табл. 1.1 фиксированное напряжение  $U_{кэ}$ , снять по точкам семейство входных ВАХ (две кривые), результаты занести в табл.1.1. Количество точек выбирать исходя из удобства получения ВАХ.

5 Установив согласно данным табл. 1.1 фиксированный ток  $I_{б}$ , снять по точкам семейство выходных ВАХ (две кривые), результаты занести в табл.1.1. Количество точек выбирать исходя из удобства получения ВАХ.

Табл.1.1 ВАХ биполярного транзистора

Входная характеристика			Выходная характеристика		
$U_{бэ}$	$I_{б}$	Условие изм.	$U_{кэ}$	$I_{к}$	Условие изм.
		$U_{кэ}=4В$			$I_{б}=1 мА$
		$U_{кэ}=8В$			$I_{б}= 1,5мА$

6 Отключить питание лабораторного стенда. По данным табл. 1.1 построить семейство входных и выходных ВАХ биполярного транзистора. Представить преподавателю полученные результаты.

7 Определить набор  $h$  – параметров транзистора:  $h_{11э}$ ,  $h_{21э}$ ,  $h_{22э}$ . Расчет  $h$  – параметров проводится по семейству входных и выходных ВАХ. Необходимо выбрать расчетную точку на линейном участке ВАХ, затем, задав малые приращения токов и напряжений, рассчитать основные параметры каскада с общим эмиттером: входное, выходное сопротивления, коэффициент усиления по току.

#### Содержание отчета

– Название, цель работы, состав используемого оборудования.

- Измерительная схема.
- Данные измерений и результаты расчетов.
- Краткие выводы по результатам работы.

*Контрольные вопросы*

1. Поясните принцип действия биполярного транзистора.
2. В чем отличие работы биполярных транзисторов ррр и рпн. – типа?
3. Приведите схемы включения биполярного транзистора, поясните их отличия.
4. Перечислите основные режимы работы транзистора в усилительном каскаде.
5. Перечислите виды и поясните смысл ВАХ биполярного транзистора в схеме с ОЭ.
6. Каков физический смысл  $h$ -параметров биполярного транзистора в схеме с ОЭ?
7. Поясните назначение смещения в усилительных схемах на биполярных транзисторах.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### Исследование статических характеристик полевого транзистора в схеме с общим истоком

#### *Цели работы*

1. Углубление и расширение теоретических знаний по физическим основам полупроводниковой электроники и работы полевых транзисторов с управляющим рп–переходом.
2. Знакомство с конструкцией полевых транзисторов различного назначения.
3. Освоение методики снятия вольтамперных характеристик (ВАХ).
4. Освоение графоаналитического метода расчета основных статических параметров.

#### *Состав используемого оборудования*

- Источник питания постоянного напряжения 0...15 В.
- Вольтметры постоянного напряжения.
- Амперметры постоянного тока.
- Стенд лабораторный с исследуемыми полевыми транзисторами типа КП303.
- Соединительные провода.

#### *Подготовительное (домашнее) задание*

- Записать название, цель работы.
- Зарисовать измерительную схему.
- Изучить ВАХ транзистора в схеме с общим истоком и основные статические характеристики.

#### *Краткие теоретические сведения*

В полевом транзисторе с управляющим рп-переходом затвор отделяется в электрическом отношении от канала рп-переходом, смещенным в обратном направлении.

Оставшаяся область в полупроводнике, где протекает ток основных носителей заряда, носит название канала. Ток может регулироваться изменением его поперечного сечения.

Устройство полевого транзистора представлено на рис. 2.1.

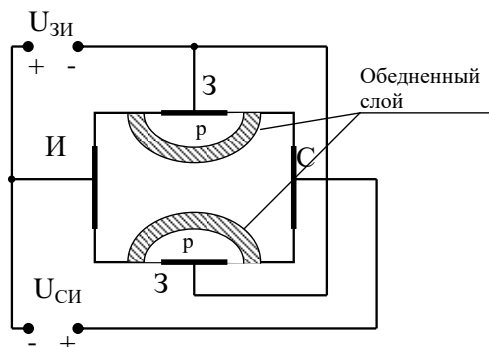


Рис.2.1 Полевой транзистор с каналом n-типа

Управляющее (входное) напряжение подается между затвором и истоком. Напряжение  $U_{зи}$  является обратным для обоих рп- переходов. Если между истоком и стоком включить источник напряжения  $U_{си}$ , то с помощью напряжения, подаваемого на затвор, можно регулировать его толщину, и, следовательно, ток  $I_c$ .

Электрод (вывод), через который в канал входят основные носители заряда, называют истоком (source). Электрод, через который из канала уходят основные носители заряда, называют стоком (drain). Электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала за счет управляющего напряжения, называют затвором (gate). Условные обозначения полевых транзисторов с каналом n- и р- типов приведены на рис. 3.2.

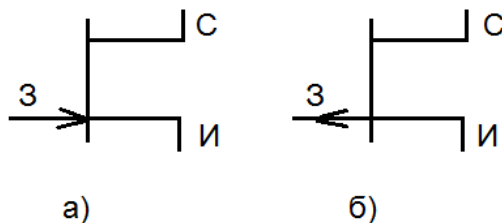


Рис.2.2 Условное обозначение полевого транзистора с рп- переходом и каналом n- типа (а) и каналом р- типа (б)



Полевой транзистор в качестве элемента схемы представляет собой активный несимметричный четырехполюсник, у которого один из зажимов является общим для цепей входа и выхода. В зависимости от того, какой из электродов полевого транзистора подключен к общему выводу, различают схемы: с общим истоком (ОИ); с общим стоком (ОС); с общим затвором (ОЗ). Схемы включения полевого транзистора показаны на рис. 2.3. Схема с общим истоком позволяет усиливать мощность сигнала.

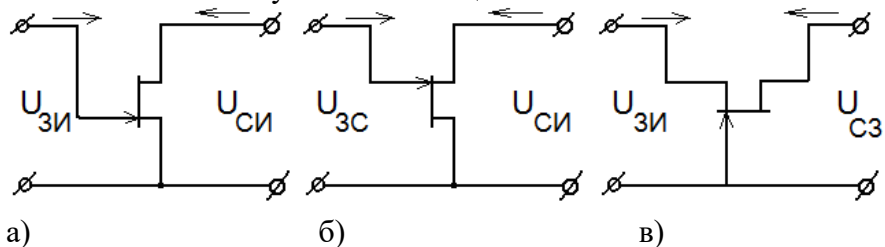
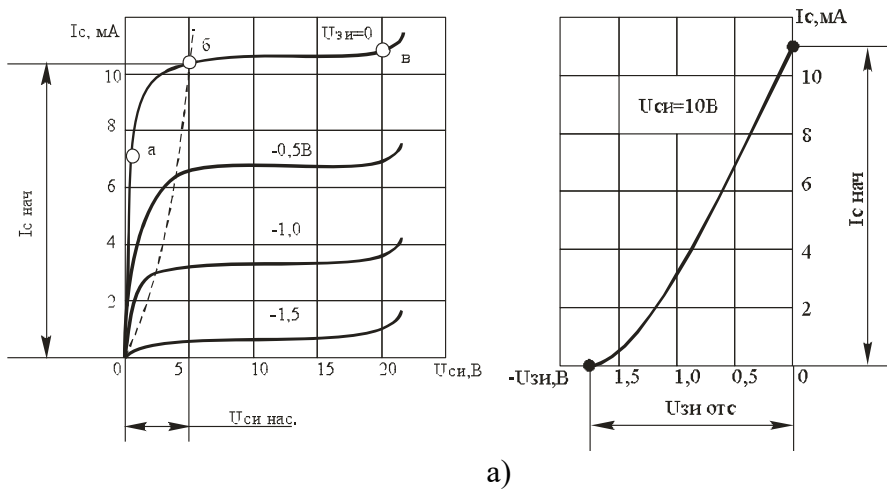


Рис. 3.3 Схемы включения полевого транзистора: с общим истоком (а), общим стоком (б), общим затвором (в)

Для полевых транзисторов представляют интерес два вида вольт - амперных характеристик: стоковые (выходные) и стоко - затворные (сквозные).



б)

Рис. 3.4 Выходные (а) и сквозная (б) вольт-амперные характеристики полевого транзистора

Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора отражают зависимость тока стока от напряжения  $U_{си}$  при фиксированном напряжении  $U_{зи}$  (рис. 3.4, а). Стоко - затворная характеристика полевого транзистора показывает зависимость тока  $I_c$  от напряжения  $U_{зи}$  при фиксированном напряжении  $U_{си}$  (рис. 3.4, б).

Основными параметрами полевого транзистора являются:

1) внутреннее (выходное) сопротивление  $r_i$  – представляет собой сопротивление транзистора между стоком и истоком (сопротивление канала) для переменного тока:

$$r_i = \left. \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \right|_{U_{зи} = \text{const}} ;$$

2) крутизна стоко-затворной характеристики:

$$S = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \right|_{U_{си} = \text{const}} ;$$

3) коэффициент усиления по напряжению:

$$\mu = S \cdot r_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}}$$

### Лабораторное задание

- 1 Получить допуск у преподавателя или лаборанта.
- 2 Включить стенд, установить напряжение источников питания согласно значениям, указанным на рис. 2.5, контролируя результат по вольтметру.

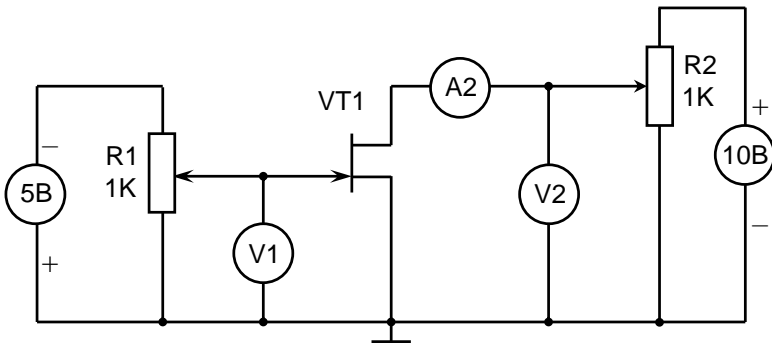


Рис. 2.5 Схема для снятия семейства входных и выходных ВАХ полевого транзистора в схеме с ОИ

3 Собрать схему для снятия семейства ВАХ полевого транзистора в схеме с ОИ аналогично приведенной на рис. 2.5. После разрешения преподавателя или лаборанта подать питание на лабораторный стенд.

4 Установив согласно данным табл. 2.1 фиксированное напряжение  $U_{си}$ , снять по точкам семейство сквозных ВАХ (две кривые), результаты занести в табл.2.1. Количество точек выбирать исходя из удобства получения ВАХ.

5 Установив согласно данным табл. 2.1 фиксированное напряжение  $U_{зи}$ , снять по точкам семейство выходных ВАХ (две кривые), результаты занести в табл.2.1. Количество точек выбирать исходя из удобства получения ВАХ.

Табл.2.1 ВАХ полевого транзистора

Сквозная характеристика			Выходная характеристика		
$U_{зи}$	$I_c$	Условие изм.	$U_{си}$	$I_c$	Условие изм.
		$U_{си}=4В$			$U_{зи}= 0,2 В$
		$U_{си}=8В$			$U_{зи}= 0,4 В$

6 Отключить питание лабораторного стенда. По данным табл. 2.1 построить семейство сквозных и выходных ВАХ полевого транзистора. Представить преподавателю полученные результаты.

7 По результатам измерений определить внутреннее сопротивление, крутизну характеристики, коэффициент усиления по напряжению исследуемого транзистора. Результаты расчетов занести в отчет.

#### *Содержание отчета*

- Название, цель работы, состав используемого оборудования.
- Измерительная схема.
- Данные измерений и результаты расчетов.
- Краткие выводы по результатам работы.

#### *Контрольные вопросы*

1. Поясните принцип действия полевого транзистора.
2. Приведите схемы включения полевого транзистора, пояснить их отличия.
3. Перечислите виды и поясните смысл ВАХ полевого транзистора в схеме с ОИ.
4. Какими характеристиками описывается полевой транзистор?
5. В чем заключаются основные различия между полевыми и биполярными транзисторами?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3**

### **Исследование статических характеристик МДП-транзистора в схеме с общим истоком**

#### *Цели работы*

1. Углубление и расширение теоретических знаний по физическим основам полупроводниковой электроники и работы МДП-транзисторов.
2. Знакомство с конструкцией полевых транзисторов различного назначения.
3. Освоение методики снятия вольтамперных характеристик (ВАХ).
4. Освоение графоаналитического метода расчета основных статических параметров.

#### *Состав используемого оборудования*

- Источник питания постоянного напряжения 0...15 В.
- Вольтметры постоянного напряжения.
- Амперметры постоянного тока.
- Стенд лабораторный с исследуемыми МДП-транзисторами типа IRF7413.
- Соединительные провода.

#### *Подготовительное (домашнее) задание*

- Записать название, цель работы.
- Зарисовать измерительную схему.
- Изучить ВАХ транзистора в схеме с общим истоком и основные статические характеристики.

*Краткие теоретические сведения* Дальнейшим развитием полевых транзисторов являются транзисторы с изолированным затвором. У них металлический затвор отделен от полупроводникового канала тонким слоем диэлектрика. Поскольку металлический затвор отделен от полупроводника слоем диэлектрика, то входное сопротивление таких

транзисторов велико (для современных транзисторов достигает  $10^{17}$  Ом).

Полевые транзисторы с изолированным затвором бывают двух типов:

- со встроенным (собственным) каналом;
- с индуцированным (инверсионным) каналом.

Структура в обоих типах полевых транзисторов с изолированным затвором одинакова: металл – окисел (диэлектрик) – полупроводник, то такие транзисторы еще называют МОП-транзисторами (метал – окисел – полупроводник) или МДП-транзисторами (металл – диэлектрик – полупроводник).

Устройство полевого транзистора с изолированным затвором и встроенным каналом показано на рис. 3.1. Он представляет собой монокристалл полупроводника; обычно кремния, где создана электропроводность какого-либо типа, в рассматриваемом случае *p*-типа. В нем созданы две области с электропроводностью противоположного типа (в нашем случае *n*-типа), которые соединены между собой тонким приповерхностным слоем этого же типа проводимости. От этих двух зон сформированы электрические выводы, которые называют истоком и стоком. На поверхности канала имеется слой диэлектрика (обычно диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ ) толщиной порядка 0,1 мкм, а на нем методом напыления наносится тонкая металлическая пленка, от которой также делается электрический вывод – затвор. Иногда от основания (называемого *подложкой* ( $\Pi$ )) также делается вывод, который накоротко соединяют с истоком.

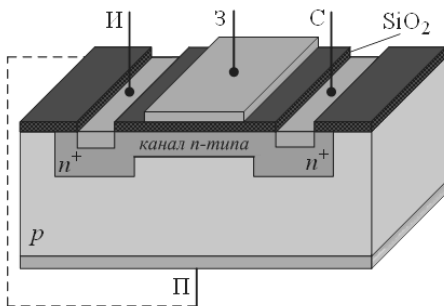


Рис. 3.1 Структура полевого транзистора с изолированным затвором со встроенным каналом  $n$ -типа

Если в отсутствие напряжения на затворе приложить между истоком и стоком напряжение  $U_{си}$  любой полярности, то через канал потечет ток, представляющий собой поток электронов. Через подложку ток не потечет, так как один из  $p$ - $n$ -переходов будет находиться под действием обратного напряжения.

При подаче на затвор отрицательного напряжения относительно истока, а следовательно и кристалла, в канале возникает поперечное электрическое поле, которое будет выталкивать электроны из области канала в основание. Канал обедняется основными носителями – электронами, его сопротивление увеличивается, и ток стока уменьшается. Чем больше отрицательное напряжение на затворе, тем меньше этот ток. Такой режим называется *режимом обеднения*.

При подаче на затвор положительного напряжения, относительно истока, направление поперечного электрического поля изменится на противоположное, и оно будет, наоборот, притягивать электроны из областей истока и стока, а также из кристалла полупроводника. Проводимость канала увеличивается, и ток стока возрастает. Такой режим называется *режимом обогащения*.

Рассмотренный транзистор, таким образом, может работать как в режиме обеднения, так и режиме обогащения

токопроводящего канала, что иллюстрируют его выходные (рис. 3.2, а) и проходные характеристики (рис.3.2,б).

Выходные характеристики МДП-транзистора подобны выходным характеристикам полевого транзистора с управляющим *pn*-переходом. Это объясняется тем, что при увеличении напряжения  $U_{си}$  от нуля, сначала действует закон Ома и ток растет практически прямо пропорционально напряжению, а затем при некотором напряжении  $U_{си}$  канал начинает сужаться, в большей мере возле стока, т. к. на *pn*-переходе между каналом и кристаллом увеличивается обратное напряжение, область этого перехода, обедненная носителями, расширяется, и сопротивление канала увеличивается. В результате этого ток стока испытывает два взаимно противоположных процесса и остается практически постоянным до такого напряжения  $U_{си}$  при котором наступает электрический пробой.

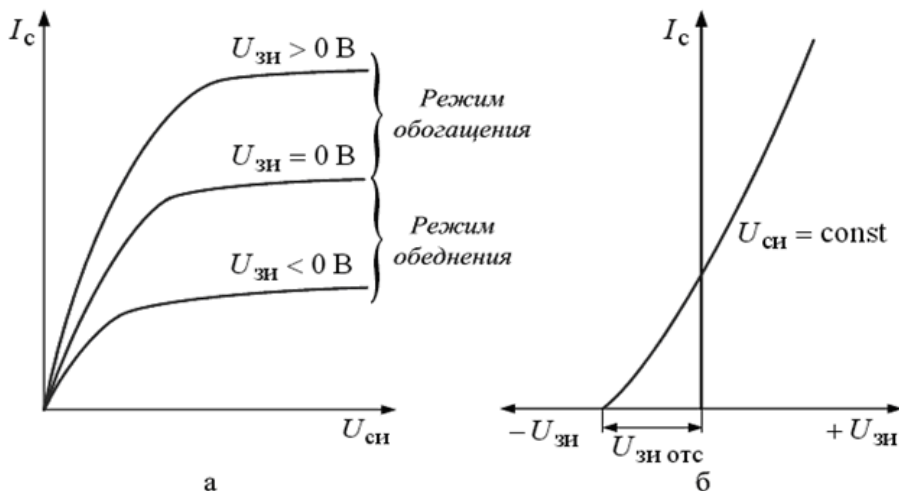


Рис. 3.2 Статические характеристики МДП-транзистора со встроенным каналом *n*-типа

Если кристалл полупроводника полевого транзистора имеет электропроводность *n*-типа, токопроводящий канал



должен быть  $p$ -типа. При этом полярность напряжений необходимо изменить на противоположную.

Полевые транзисторы со встроенным каналом на электрических схемах изображают условными графическими обозначениями, приведенными на рис. 3.3.

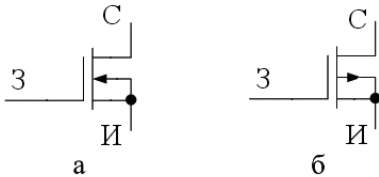


Рис. 3.3 Условные графические обозначения МДП-транзистора со встроенным каналом  $n$ -типа (а) и  $p$ -типа (б)

Устройство транзистора с индуцированным (инверсионным) каналом показано на рис 3.4.

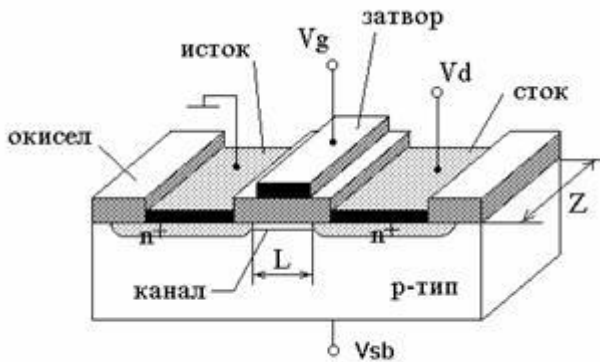


Рис. 3.4 Структура полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом  $n$ -типа

От предыдущего транзистора он отличается тем, что у него нет встроенного канала между областями истока и стока. При отсутствии напряжения на затворе ток между истоком и стоком

не потечет ни при какой полярности напряжения, так как один из  $p$ - $n$ -переходов будет обязательно заперт.

Если подать на затвор напряжение положительной полярности относительно истока, то под действием возникающего поперечного электрического поля электроны из областей истока и стока, а также из областей кристалла, будут перемещаться в приповерхностную область по направлению к затвору. Когда напряжение на затворе превысит некоторое пороговое значение, то в приповерхностном слое концентрация электронов повысится настолько, что превысит концентрацию дырок в этой области и здесь произойдет инверсия типа электропроводности, т.е. образуется тонкий канал  $n$ -типа и в цепи стока появится ток. Чем больше положительное напряжение на затворе, тем больше проводимость канала и больше ток стока.

Таким образом, такой транзистор может работать только в режиме обогащения. Вид его выходных характеристик и характеристики управления показан на рис.3.5.

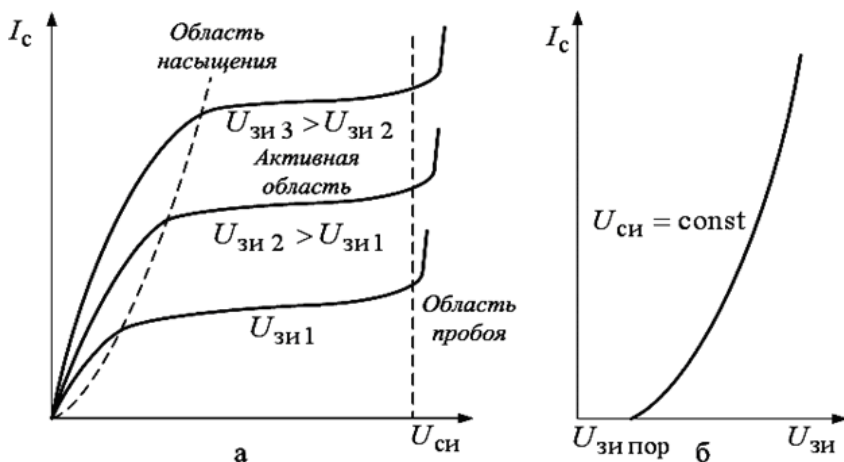


Рис. 3.5 Статические характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом  $n$ -типа

Если кристалл полупроводника имеет электропроводность  $n$ -типа, то области истока и стока должны быть  $p$ -типа. Такого же

типа проводимости будет индуцироваться и канал, если на затвор подавать отрицательное напряжение относительно истока.

Графическое изображение полевых транзисторов с изолированным затвором показано на рис 3.6.

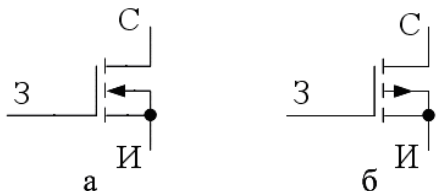


Рис. 3.6 Условные графические обозначения МДП-транзистора индуцированным каналом  $n$ -типа (а) и  $p$ -типа (б)

В последнее время МДП-транзисторы всё чаще обозначают термином, заимствованным из зарубежной литературы, – MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*).

### Лабораторное задание

- 1 Получить допуск у преподавателя или лаборанта.
- 2 Включить стенд, установить напряжение источников питания согласно значениям, указанным на рис. 3.7, контролируя результат по вольтметру.

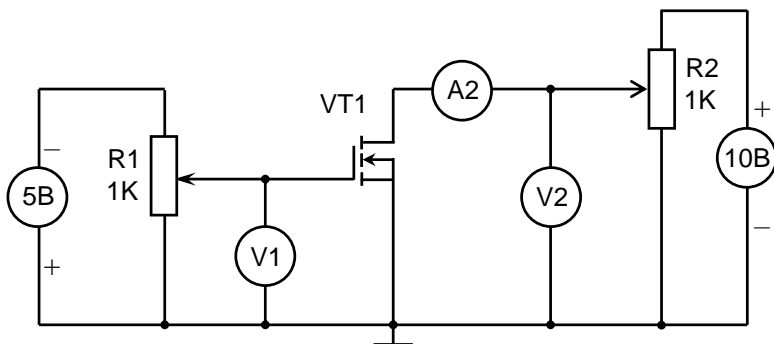


Рис. 3.7 Схема для снятия семейства входных и выходных ВАХ полевого транзистора в схеме с ОИ

3 Собрать схему для снятия семейства ВАХ полевого транзистора в схеме с ОИ аналогично приведенной на рис. 3.7. После разрешения преподавателя или лаборанта подать питание на лабораторный стенд.

4 Установив согласно данным табл. 3.1 фиксированное напряжение  $U_{СИ}$ , снять по точкам семейство сквозных ВАХ (две кривые), результаты занести в табл.3.1. Количество точек выбирать исходя из удобства получения ВАХ.

5 Установив согласно данным табл. 3.1 фиксированное напряжение  $U_{ЗИ}$ , снять по точкам семейство выходных ВАХ (две кривые), результаты занести в табл.3.1. Количество точек выбирать исходя из удобства получения ВАХ.

Табл.3.1 ВАХ полевого транзистора

Сквозная характеристика			Выходная характеристика		
$U_{ЗИ}$	$I_C$	Условие изм.	$U_{СИ}$	$I_C$	Условие изм.
		$U_{СИ}=4В$			$U_{ЗИ}= 2 В$
		$U_{СИ}=8В$			$U_{ЗИ}= 4 В$

6 Отключить питание лабораторного стенда. По данным табл. 3.2 построить семейство сквозных и выходных ВАХ полевого транзистора. Представить преподавателю полученные результаты.

7 По результатам измерений определить внутреннее сопротивление, крутизну характеристики, коэффициент усиления по напряжению исследуемого транзистора. Результаты расчетов занести в отчет.

#### *Содержание отчета*

– Название, цель работы, состав используемого оборудования.

– Измерительная схема.

– Данные измерений и результаты расчетов.

– Краткие выводы по результатам работы.

*Контрольные вопросы*

1 Поясните кратко принципы работы МДП транзистора с индуцированным каналом.

2 Поясните кратко принципы работы МДП транзистора со встроенным каналом.

3 В чем отличие между МДП транзисторами различных типов?

4 Что такое пороговое напряжение МДП транзистора?

5 Чем отличаются МДП транзисторы от полевых транзисторов с управляющим рп-переходом?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### Исследование каскадов с применением операционных усилителей

#### *Цели работы*

1 Углубление и расширение теоретических знаний по основам микроэлектроники и работы операционных усилителей.

2 Знакомство с конструкцией и особенностями применения операционных усилителей.

#### *Состав используемого оборудования*

Источники питания постоянного напряжения 0...15В.

Вольтметры постоянного напряжения.

Стенд лабораторный с исследуемым операционным усилителем типа LM386.

Соединительные провода.

#### *Подготовительное (домашнее) задание*

Записать название, цель работы.

Изучить основные статические параметры и применение операционных усилителей.

#### *Краткие теоретические сведения*

*Операционный усилитель (ОУ)* — это малогабаритный многокаскадный усилитель постоянного тока с непосредственными связями между каскадами и большим коэффициентом усиления.

Операционные усилители предназначены как для усиления электрических сигналов, так и для осуществления различных операций над сигналами: сложение, вычитание, логарифмирование и др. Такие усилители имеют дифференциальный высокоомный вход, высокий коэффициент усиления, низкоомный (сравнительно мощный) выход и сконструированы таким образом, что к ним могут быть подключены различные корректирующие цепи и цепи

обратной связи.

Операционный усилитель имеет два входа: инвертирующий и неинвертирующий. Их название связано с тем, что в первом случае выходное напряжение находится в противофазе с входным, а во втором случае – в фазе с входным напряжением. Для питания ОУ обычно используют два разнополярных источника питания  $+U_n$  и  $-U_n$  или один биполярный источник, средняя точка трансформатора которого соединена с общей шиной, относительно которой измеряются напряжения  $+U_n$  и  $-U_n$ .

Для получения нужных свойств к дополнительным выводам ОУ подключают звенья обратной связи.

Основными параметрами ОУ наряду с коэффициентом усиления  $K_U$  являются:

- входное сопротивление  $R_{ex} = 10^4 \dots 10^7 \text{ Ом}$ ;
- выходное сопротивление  $R_{вых} = 10^2 \text{ Ом}$ ;
- входное напряжение смещения нуля  $U_{см}$  (единицы милливольт);
- частота единичного усиления  $f_1$  (единицы и десятки мегагерц), т. е. частота, при которой  $K_U = 1$ ;

Операционные усилители часто используют при конструировании компараторов, генераторов гармонических колебаний и сигналов различной формы, избирательных усилителей, аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей и других устройств.

В зависимости от того, на какой из входов ОУ подается входной сигнал, различают инвертирующее и неинвертирующее включения операционных усилителей.

Инвертирующее включение ОУ – это такое включение, при котором неинвертирующий вход ОУ соединяется с общей шиной (см. рис. 4.1).

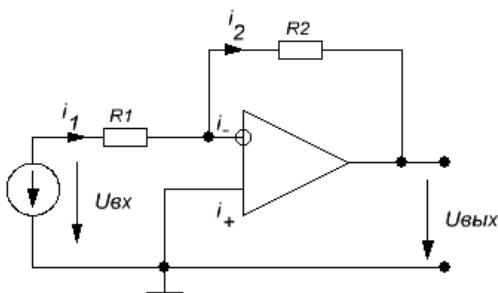


Рис. 4.1 Инвертирующее включение ОУ

Коэффициент усиления будет определяться соотношением:  
 $K_U = U_{\text{вых}} / U_2 = R_2 / R_1$

Выходное напряжение усилителя в инвертирующем включении находится в противофазе по отношению ко входному. Коэффициент усиления по напряжению этой схемы в зависимости от соотношения сопротивлений резисторов может быть как больше, так и меньше единицы.

Поскольку напряжение на неинвертирующем входе относительно общей шины равно нулю, входной ток схемы  $I_1 = U_2 / R_1$ . Следовательно, входное сопротивление схемы  $R_{\text{вх}} = R_1$ . Поскольку напряжение на неинвертирующем входе усилителя равно нулю, а разность потенциалов между его входами равна нулю, то инвертирующий вход в этой схеме иногда называют виртуальным (т.е. воображаемым) нулем.

Неинвертирующее включение - это такое включение, при котором входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ, а на инвертирующий вход через делитель на резисторах  $R_1$  и  $R_2$  поступает сигнал с выхода усилителя (рис. 4.2). Здесь коэффициент усиления схемы  $K$  будет определяться следующим выражением:

$$K_U = U_{\text{вых}} / U_1 = 1 + R_2 / R_1$$



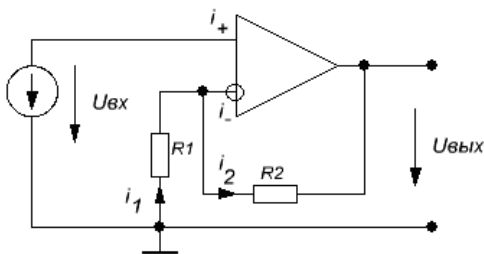


Рис. 4.2 Неинвертирующее включение ОУ

В такой схеме выходной сигнал синфазен входному. Коэффициент усиления по напряжению не может быть меньше единицы. В предельном случае, если выход ОУ накоротко соединен с инвертирующим входом, этот коэффициент равен единице. Такие схемы называют неинвертирующими повторителями, или просто повторителями на ОУ. Их могут изготавливать серийно в виде отдельных ИМС по несколько усилителей в одном корпусе. Входное сопротивление этой схемы в идеале бесконечно. На самом же деле, сопротивление у такой схемы есть, хотя оно достаточно велико.

#### *Лабораторное задание*

4.1 Подключить двухполярное питание к стенду. С помощью вольтметра с пределом измерения 20 В выставить напряжения на клеммах «+» и «-» соответственно +15 и -15 В.

4.2 Руководствуясь рис. 4.3 собрать схему для исследования инвертирующего включения операционного усилителя.

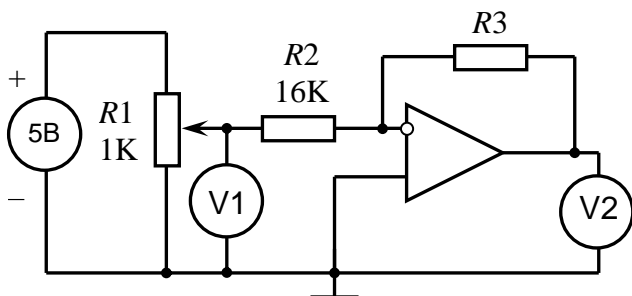


Рис. 4.3 Схема для исследования инвертирующего включения операционного усилителя

3.3 После проверки схемы преподавателем или лаборантом подать питание на стенд.

3.4 Провести три серии измерений с сопротивлением обратной связи  $R3$  равным 8.2, 16, 32 кОм, результаты занести в табл. 4.1. Построить график зависимости  $U_{\text{вых}}=f(U_{\text{ex}})$ . Рассчитать коэффициент усиления по напряжению  $K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{ex}}$ .

Таблица 4.1

$R3 = 8.2 \text{ кОм}$		$R3 = 16 \text{ кОм}$		$R3 = 32 \text{ кОм}$	
$U_{\text{вых}}$	$U_{\text{ex}}$	$U_{\text{вых}}$	$U_{\text{ex}}$	$U_{\text{вых}}$	$U_{\text{ex}}$

4.5 Руководствуясь рис. 4.4 собрать схему для исследования неинвертирующего включения операционного усилителя.

4.6 После проверки схемы преподавателем или лаборантом подать питание на стенд.

4.7 Провести три серии измерений с сопротивлением обратной связи  $R3$  равным 8.2, 16, 32 кОм, результаты занести в таблицу, аналогичную табл. 4.1. Построить график зависимости  $U_{\text{вых}}=f(U_{\text{ex}})$ . Рассчитать коэффициент усиления по

напряжению  $K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$ .

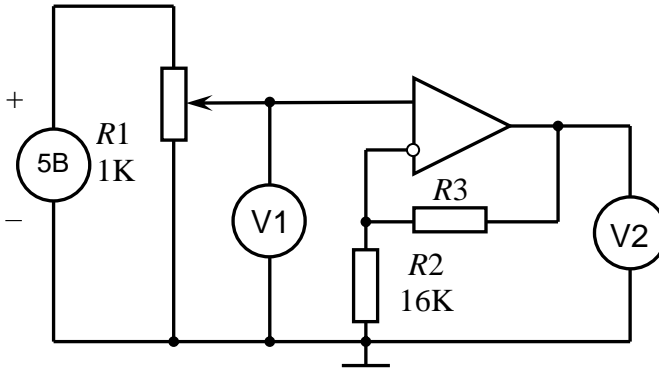


Рис. 4.4 Схема для исследования неинвертирующего включения операционного усилителя

4.8 Сделать вывод о сходствах и отличиях исследуемых схем включения.

#### *Содержание отчета*

- Название, цель работы, состав используемого оборудования.
- Измерительная схема.
- Данные измерений и результаты расчетов.
- Краткие выводы по результатам работы.

#### *Контрольные вопросы*

1. Дайте определение операционного усилителя, поясните назначение его выводов.
2. Какой тип обратной связи используется в усилительных каскадах с ОУ?
3. В чем отличие прямого и инвертирующего включения ОУ?
4. Поясните принцип работы дифференциального усилителя.
5. Какими основными свойствами характеризуются ОУ?

## Библиографический список

1 Наундорф, У. Аналоговая электроника. Основы, расчет, моделирование [Текст] / У. Наундорф. – М.: Техносфера, 2008. – 472 с.

2 Марченко, А.Л. Основы электроники [Текст] / А.Л. Марченко. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 296 с.

3 Кучумов, А.И. Электроника и схемотехника [Текст] / А.И. Кучумов. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 336 с.

4 Лачин, В.И., Савёлов, Н.С. Электроника [Текст] / В.И. Лачин, Н.С. Савёлов. – Ростов-на-Дону.: "Феникс" 2004. - 576 с.

5 Лаврентьев, Б.Ф. Аналоговая и цифровая электроника: Учебное пособие [Текст] / Б.Ф. Лаврентьев. – Йошкар-Ола.: МарГТУ. – 2000. – 155 с.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам 1-4  
по курсу «Электроника»  
для студентов направления 11.03.01 «Радиотехника»,  
направленность: «Радиотехнические средства передачи, приема  
и обработки сигналов»  
очной и заочной форм обучения

Составитель  
**Краснов Роман Петрович**

В авторской редакции

Компьютерный набор Р.П. Краснова

Подписано в печать 00. 00. 2019. Формат 60x84/16. Бумага для  
множительных аппаратов. Усл. печ. л 2,2, Уч.-изд. л. 1. Тираж  
50 экз. «С» Заказ №

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический  
университет»  
394026, Воронеж, Московский просп., 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ  
394026, Воронеж, Московский просп., 14