

ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический  
университет"

Кафедра радиотехники

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторным работам 5-8  
по курсу «Электроника»  
для студентов направления 11.05.01  
«Радиоэлектронные системы и комплексы» (направленность  
«Радиоэлектронные системы передачи информации») очной и  
заочной форм обучения



Воронеж  
2017

Составитель канд. техн. наук Р.П. Краснов

УДК 621.396

ББК 32.85

Методические указания к лабораторным работам 5-8 по курсу «Электроника» для студентов направления 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» (направленность «Радиоэлектронные системы передачи информации») очной и заочной форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Р.П. Краснов. Воронеж, 2017. 37 с.

В методических указаниях приводится описание лабораторных работ по дисциплине «Электроника» для студентов 2 курса очной и заочной форм обучения направления 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы». Каждая лабораторная работа снабжена краткими теоретическими сведениями и контрольными вопросами.

Табл. 3. Ил. 23. Библиогр.: 5 назв.

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

Ответственный за выпуск зав. кафедрой канд. техн. наук  
Б. В. Матвеев

Печатается по решению учебно-методического совета  
Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный технический  
университет», 2017

## **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 установленного на панели исследуемого элемента. С помощью вольтметра выставляется необходимое напряжение питания. Затем при выключенном источнике питания производится подключение элемента.

О 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, при уровне пульсаций выходного напряжения не более 0,5%.

Источник переменного напряжения 12,6 В частотой 50Гц;

Два источника переменного напряжения 220В частотой 50Гц.

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

Для проведения измерений при различных температурах используется нагреватель, устанавливаемый сверху на исследуемые приборы. Он подключается к источнику переменного напряжения 12.6В. Температура внутри нагревателя 60°C время нагрева рабочего объема - 5 минут.

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 116, 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 № 5**

### **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:*

1. Источник питания постоянного напряжения 0...15 В.

2. Вольтметры постоянного напряжения.

3. Амперметры постоянного тока.

4. Стенд лабораторный с исследуемыми МДП транзисторами типа IRF7413.

5. Соединительные провода.

#### *Подготовительное (домашнее) задание*

1. Записать название, цель работы.

2. Зарисовать измерительную схему.

3. 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 затвор отделен от полупроводникового канала тонким слоем диэлектрика. Поскольку затвор отделен от полупроводника слоем диэлектрика, 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. 5.1. 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* (П)) также делается вывод, который накоротко соединяют с истоком.

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 *pn*-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*.

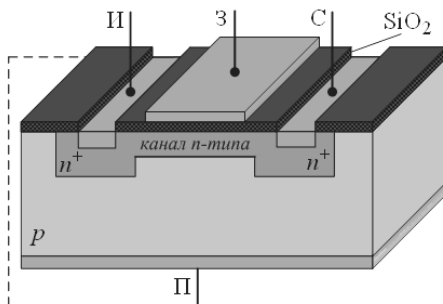


Рис. 5.1. Структура полевого транзистора с изолированным затвором со встроенным каналом *n*-типа

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. 5.2, а) и проходные характеристики (рис.5.2,б).

Выходные характеристики МДП-транзистора подобны выходным характеристикам полевого транзистора с управляющим рп-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 рп-переходе между каналом и кристаллом увеличивается обратное

напряжение, область этого перехода, обедненная носителями, расширяется, и сопротивление канала увеличивается. В результате этого ток стока образуется как результат двух взаимно противоположных процессов и остается практически постоянным до такого напряжения  $U_{\text{СИ}}$  при котором наступает электрический пробой.

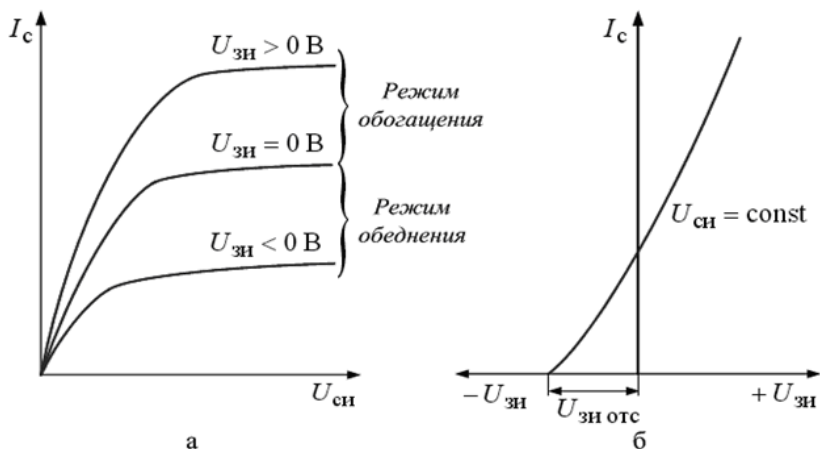


Рис. 5.2. Статические характеристики МДП-транзистора со встроенным каналом  $n$ -типа

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. 5.3.

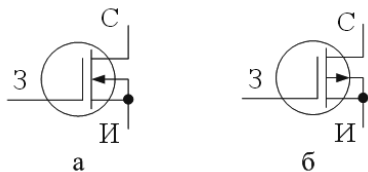


Рис. 5.3. Условные графические обозначения МДП-транзистора со встроенным каналом  $n$ -типа (а) и  $p$ -типа (б)

Устройство транзистора с индуцированным (инверсионным) каналом показано на рис. 5.4.

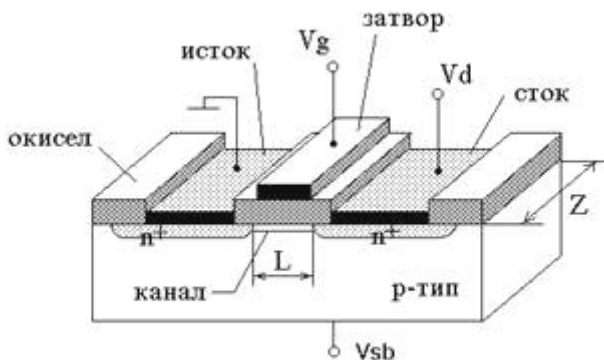


Рис. 5.4. Структура полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом  $n$ -типа

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  $pn$ -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, и образуется тонкий канал  $n$ -типа, а 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 проходной и выходных характеристик показан на рис. 5.5.

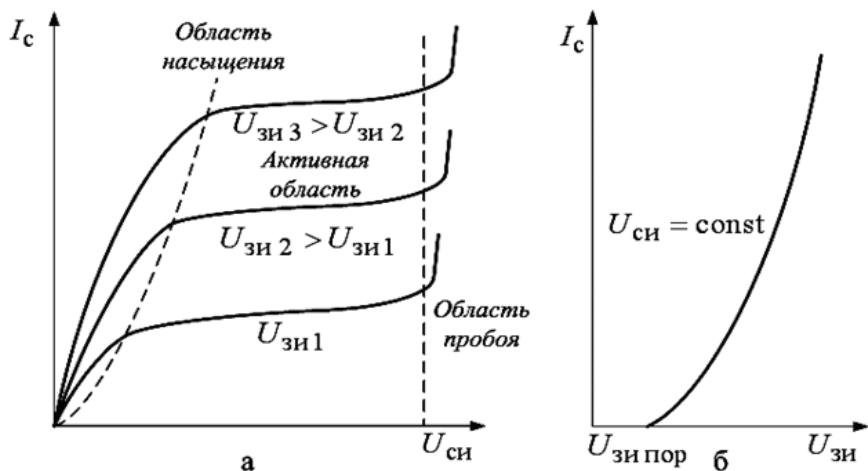


Рис. 5.5. Статические характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом *n*-типа

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. 5.6.

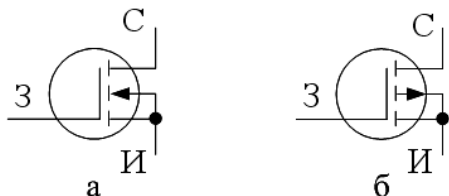


Рис. 5.6. Условные графические обозначения МДП-транзистора индуцированным каналом *n*-типа (а) и *p*-типа (б)

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. 5.7, контролируя результат по вольтметру.

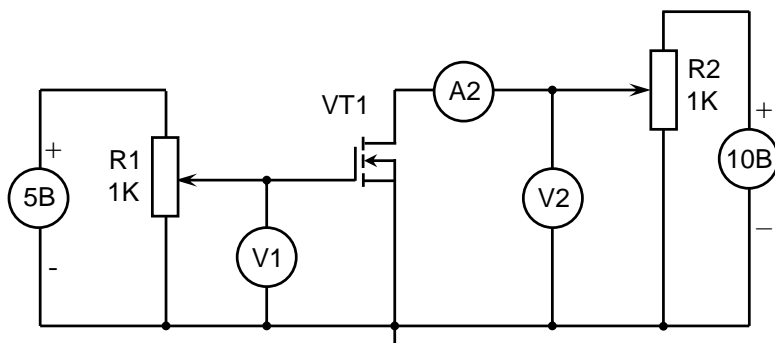


Рис. 5.7. Схема для снятия семейства входных и выходных ВАХ полевого транзистора в схеме с ОИ

3. Собрать схему для снятия семейства ВАХ полевого транзистора в схеме с ОИ аналогично приведенной на рис. 5.7. После разрешения преподавателя или лаборанта подать питание на лабораторный стенд.

4. Установив согласно данным табл. 5.1 фиксированное напряжение  $U_{си}$ , снять по точкам семейство сквозных ВАХ (две кривые), результаты занести в табл.5.1. Количество точек выбирать исходя из удобства получения ВАХ.

5. Установив согласно данным табл. 5.1 фиксированное напряжение  $U_{зи}$ , снять по точкам семейство выходных ВАХ (две кривые), результаты занести в табл.5.1. Количество точек выбирать исходя из удобства получения ВАХ.

Таблица 5.1

Сквозная характеристика			Выходная характеристика		
$U_{зи}$	$I_C$	Условие изм.	$U_{си}$	$I_C$	Условие изм.
		$U_{си} = 4 \text{ В}$			$U_{зи} = 2 \text{ В}$
		$U_{си} = 8 \text{ В}$			$U_{зи} = 4 \text{ В}$

6. Отключить питание лабораторного стенда. По данным табл. 5.1 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:*

1. Название, цель работы, состав используемого оборудования.
2. Измерительная схема.
3. Данные измерений и результаты расчетов.
4. 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 № 6

### 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:*

1. Источники питания постоянного напряжения 0...15В.
2. Вольтметры постоянного напряжения.
3. Стенд лабораторный с исследуемым операционным усилителем.
4. Соединительные провода.

#### *Подготовительное (домашнее) задание*

1. Записать название, цель работы.
2. 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 со 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  $R_{вх} = 10^4 \dots 10^7 \text{ Ом}$ ;
- 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. 6.1).

Коэффициент усиления будет определяться соотношением:

$$K_U = U_{вых} / U_2 = - R_2 / R_1.$$

Знак «минус» указывает на то, что 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.

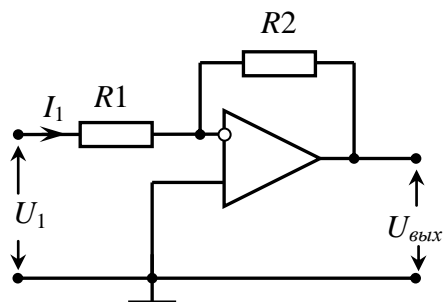


Рис. 6.1. Инвертирующее включение ОУ

Поскольку напряжение на неинвертирующем входе относительно общей шины равно нулю, входной ток схемы  $I_1 = U_2 / R1$ . Следовательно, входное сопротивление схемы  $R_{вх} = R1$ . 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  $R1$  и  $R2$  поступает сигнал с выхода усилителя (рис. 6.2). Здесь коэффициент усиления схемы  $K_U$  будет определяться следующим выражением:

$$K_U = U_{вых} / U_1 = 1 + R2/R1.$$

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.

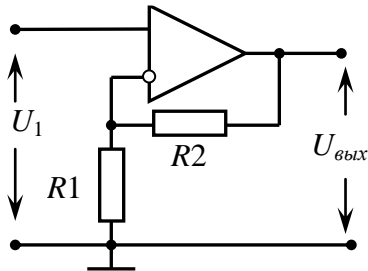


Рис. 6.2. Неинвертирующее включение ОУ

### Лабораторное задание

1. Получить допуск у преподавателя или лаборанта.
2. Включить стенд, установить напряжение источников питания согласно значениям, указанным на рис. 6.3, контролируя результат по вольтметру.
3. Руководствуясь рис. 6.3 собрать схему для исследования инвертирующего включения операционного усилителя.

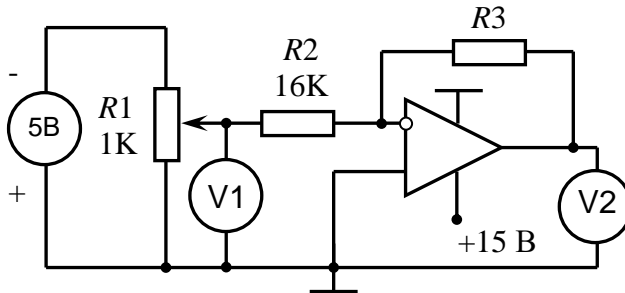


Рис. 6.3. Схема для исследования инвертирующего включения операционного усилителя

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

5. Провести три серии измерений с сопротивлением обратной связи  $R_3$  равным 8,2, 16, 33 кОм, результаты занести в табл. 6.1. Построить график зависимости  $U_{\text{вых}}=f(U_{\text{вх}})$ . Рассчитать коэффициент усиления по напряжению

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

Таблица 6.1

$R_3 = 8.2 \text{ кОм}$		$R_3 = 16 \text{ кОм}$		$R_3 = 33 \text{ кОм}$	
$U_{\text{вых}}$	$U_{\text{вх}}$	$U_{\text{вых}}$	$U_{\text{вх}}$	$U_{\text{вых}}$	$U_{\text{вх}}$

6. Руководствуясь рис. 6.4 собрать схему для исследования неинвертирующего включения операционного усилителя.

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

8. Провести три серии измерений с сопротивлением обратной связи  $R_3$  равным 8,2, 16, 33 кОм, результаты занести в таблицу, аналогичную табл. 4.1. Построить график зависимости  $U_{\text{вых}}=f(U_{\text{вх}})$ . Рассчитать коэффициент усиления по напряжению  $K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$ .

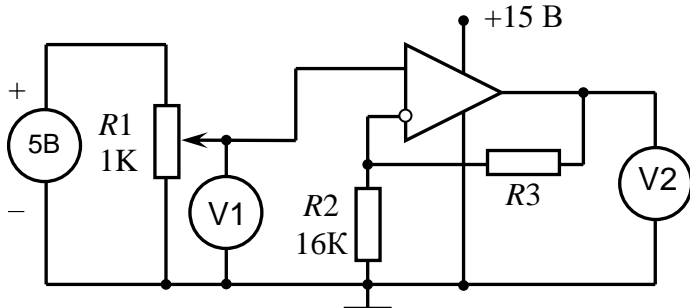


Рис. 6.4 Схема для исследования неинвертирующего включения операционного усилителя

9. Сделать вывод о сходствах и отличиях исследуемых схем включения.

*Содержание отчета:*

1. Название, цель работы, состав используемого оборудования.
2. Измерительная схема.
3. Данные измерений и результаты расчетов.
4. 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?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7**

### **Исследование работы логического элемента ТТЛ**

*Цели работы:*

- 1 Углубление теоретических знаний по основам микроэлектроники и цифровой техники.
- 2 Ознакомление с сигнальными параметрами ТТЛ элементов.

*Состав используемого оборудования:*

1. Источники питания постоянного напряжения 0...15В.
2. Вольтметры постоянного напряжения.
3. Стенд лабораторный с исследуемым элементом ТТЛ.
4. Соединительные провода.

*Подготовительное (домашнее) задание:*

1. Записать название, цель работы.
2. Изучить сигнальные параметры и применение логических элементов ТТЛ.

*Краткие теоретические сведения*

*Логические элементы (ЛЭ)* – это цифровые устройства, реализующие элементарные логические функции. Они являются базой для создания более сложных цифровых элементов комбинационного типа.

Для разработки корректно функционирующих цифровых устройств необходимо знание характеристик этих элементов.

Принято различать статические и динамические характеристики ЛЭ. Статические определяют работу ЛЭ в установившемся режиме, а динамические – в переходном. Эти характеристики позволяют определить основные параметры ЛЭ: нагрузочную способность, помехоустойчивость, быстродействие и т. д.

Определим основные характеристики логического элемента

*Коэффициент объединения по входу* определяет число входов элемента, предназначенных для подачи логических переменных.

*Нагрузочная способность* (коэффициент ветвления по выходу) показывает максимальное число элементов, которые можно подключать к выбранному выходу без снижения быстродействия и значимых искажений сигналов.

*Быстродействие* есть скорость перехода от одного логического уровня к другому. Обычно скорость перехода «0» – «1» отличается от скорости перехода «1» – «0».

*Помехоустойчивость* характеризует способность ЛЭ противодействовать заданному виду помех. Различают помеху нулевого сигнала (помеха нуля) и единичного (помеха единицы).

*Потребляемая мощность*  $P_{nom}$  от источника питания в статическом режиме работы элемента определяется как:

$$P_{nom} = \frac{1}{2} E_n (I_n^0 + I_n^1),$$

где  $I_n^0, I_n^1$  – токи, потребляемые интегральной схемой в состоянии «0» и «1» соответственно;  $E_n$  – напряжение питания.

Различают три статических характеристики ЛЭ: передаточную, входную и выходную.

*Передаточная характеристика* ЛЭ представляет собой зависимость выходного напряжения ЛЭ от входного:  $U_{вых} = f(U_{вх})$ .

Для получения этой характеристики в многовыходовых ЛЭ предварительно объединяют входы. При этом входные контакты можно замкнуть накоротко (рис. 7.1, а), что приведет к увеличению входной ёмкости и снижению быстродействия. Более корректно соединение входных контактов с источниками напряжения логического нуля или единицы (рис. 7.1, б). Входная ёмкость при этом воздействует только на одном из входов, следовательно, быстродействие несколько выше.



Рис. 7.1. Схемы объединения входов ЛЭ

По характеру связи входного и выходного напряжений передаточной характеристики все элементы делят на инвертирующие и неинвертирующие. Общий вид передаточной характеристики приведен на рис. 7.2, а.

*Входная характеристика* представляет собой зависимость входного тока от входного напряжения:  $I_{вх} = f(U_{вх})$ . Так как входы схемы идентичны, то можно исследовать только один вход. Эта характеристика также позволяет определять входные токи, входное сопротивление и некоторые другие параметры.

Общий вид входной характеристики представлен на рис. 7.2, б.

*Выходная (нагрузочная) характеристика* ЛЭ – это зависимость выходного напряжения от тока нагрузки. Её угол наклона определяется выходным сопротивлением ЛЭ. Обычно рассматривают две характеристики: выходную характеристику нуля и единицы. Общий вид такой характеристики представлен на рис. 7.2, в.

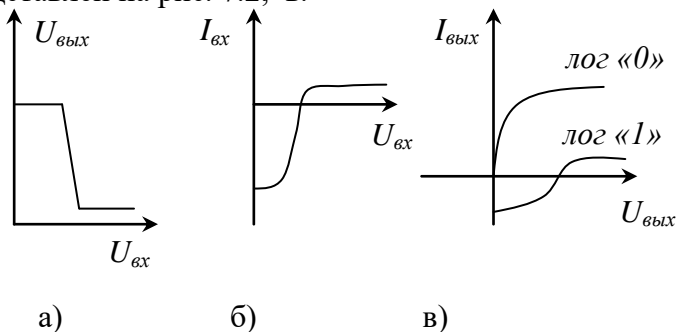


Рис. 7.2. Статические характеристики элемента ТТЛ

В основе логического элемента ТТЛ лежит многоэмиттерный транзистор, называемый так потому, что у него в базе сформировано несколько (от 2 до 8) эмиттерных областей. Такой транзистор можно рассматривать как два транзистора, базы и коллекторы которых соединены параллельно.

Когда на все входы многоэмиттерного транзистора  $VT1$  (рис. 7.3) поданы сигналы логической «1» все эмиттерные переходы входного транзистора закрыты, и ток от источника через резистор  $R1$  и открытый коллекторный переход транзистора  $VT1$  открывает  $VT2$  до насыщения. При этом открывается до насыщения и транзистор  $VT4$ , обеспечивая низкий уровень выходного напряжения. Транзистор  $VT3$  в это время закрыт, поскольку напряжение на коллекторе открытого транзистора  $VT2$  мало. Диод  $VD1$  служит для повышения порога открывания транзистора  $VT3$ .

При наличии хотя бы на одном входе сигнала 0 открывается соответствующий эмиттерный переход входного транзистора, транзисторы  $VT2$  и  $VT4$  закрываются, а транзистор  $VT3$  открывается. На выходе обеспечивается уровень логической «1». Таким образом, рассмотренный элемент ТТЛ выполняет логическую операцию И - НЕ. Для ограничения тока через открытый транзистор  $VT3$  при коротком замыкании выхода элемента включен резистор  $R4$ .

Микросхемы ТТЛШ построены по тем же схемотехническим принципам, что и ТТЛ, но вместо обычного транзистора в них использован транзистор с диодом Шоттки, включенным параллельно коллекторному переходу. Диод Шоттки, открываясь при напряжении 0.2—0.3В, фиксирует этот уровень напряжения на коллекторном переходе, не позволяя переходу открыться, а транзистору войти в режим насыщения. Поэтому уменьшается время выключения логического элемента.



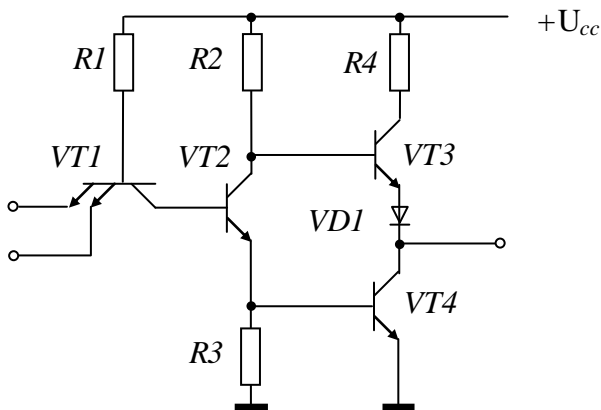


Рис. 7.3. Базовый элемент ТТЛ

Существует несколько градаций быстродействия элементов ТТЛ: стандартные серии 74xxxx (отечественные аналоги К155 и К133) имеют среднее быстродействие 10нс. В случае использования микросхем с пониженным энергопотреблением серии 74Lxxx (К134) быстродействие снижается до 33нс. Повысить быстродействие, правда, за счет повышенного потребления энергии, позволяют микросхемы ТТЛШ серий 74Sxxx (К531) и 74LSxxx (К555). Последние имеют несколько меньшее энергопотребление по сравнению с 74Sxxx. Более совершенны серии 74Fxxx (КР1531) с быстродействием 3нс и 74ALSxxx (КР1533) с быстродействием 4нс и пониженным энергопотреблением.

Напряжение питания ТТЛ логики составляет +5В с разрешенным разбросом не более 250мВ (5%).

Вход логических элементов ТТЛ представляет собой токовую нагрузку (потребление тока составляет до 1мА) Порог переключения имеет значение 1.3...1.4В. Напряжение ниже этого порога воспринимается как низкий логический уровень, выше – как высокий (см. рис. 7.4, а). Неподключенный вход воспринимается как имеющий *высокий логический уровень*. Такой вход является подверженным действию разнообразных наводок, и потому рекомендуется его подключать к источнику

высокого или низкого логического уровня. В качестве источника высокого логического уровня обычно используют шину питания +5В, входы подключаются к ней через балластный резистор номиналом около 10кОм, предназначенный для защиты от скачков напряжения, возникающих, например, при включении питания. Источником низкого логического уровня выступает общий провод. Подача на вход микросхем ТТЛ уровней, превышающих напряжение питания, приводит к пробое ИМС и выходу ее из строя.

В случае применения логических элементов типа ТТЛШ при переключении задействованы так называемые *триггеры Шмита*. У таких ИМС имеется гистерезис переключения около 0.8В, симметричный относительно обычного порога ТТЛ (см. рис. 7.4 б). Такие элементы обеспечивают повышенную помехозащищенность. О том, что логический элемент относится к ТТЛШ типу, свидетельствует условное обозначение  $\sqcap$ , указываемое в верхнем правом углу основного поля на графическом обозначении элемента.

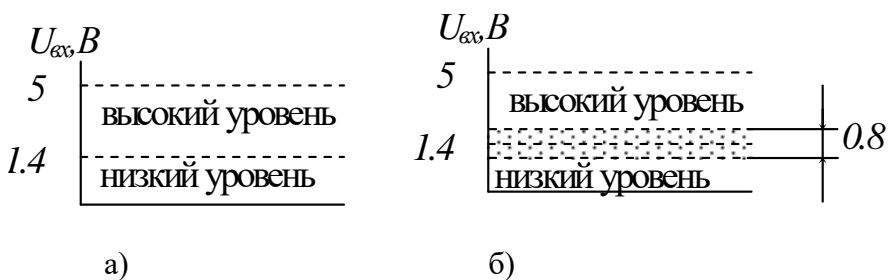


Рис. 7.4. Логические уровни элементов ТТЛ

В ТТЛ логике различают обычные выходы, выходы с открытым коллектором, а также тристабильные выходы.

Обычный выход ТТЛ формирует сигналы с уровнями ниже 0.5В, соответствующие низкому логическому уровню, либо выше 2.4В, соответствующие высокому логическому уровню. Выходы можно коммутировать на общий провод, однако, коммутация на цепь питания может привести к выходу ИМС из строя.

Одной из особенностей выходов микросхем ТТЛ логики является то, что если соединить вместе несколько выходов, которые будут формировать различные уровни, в итоге «победит» выход с низким логическим состоянием. Этот прием иногда используется при построении цифровых устройств, однако такое объединение нежелательно.

*Выход с открытым коллектором (ОК).*

В выходной схеме логического элемента отсутствует транзистор, являющийся активной нагрузкой. Таким образом, выход представляет собой ключ, способный коммутировать сигнал на общую шину. Следовательно, этот тип выхода формирует лишь низкий логический уровень. Высокий же уровень формируется при помощи резистора, «подтягивающего» сигнал к напряжению питания, называемого подтягивающим или pullup резистором. Подтягивающий резистор можно подключать к любому источнику. Величина резистора не детерминирована; малые значения обеспечивают повышенное быстродействие и помехоустойчивость, высокие – снижение рассеиваемой мощности и нагрузочного тока. Элементы с открытым коллектором, имеющие повышенную нагрузочную способность используют для управления реле, индикаторами и т.п.

Выход с открытым коллектором обозначается либо аббревиатурой (ОК, ОС), либо условным знаком  $\diamond$ .

*Тристабильный выход*

Недостаток ИМС с открытым коллектором – снижение быстродействия и помехоустойчивости по сравнению с обычными выходами ТТЛ - может быть преодолен при использовании логических элементов, имеющих тристабильный выход. Такой тип выхода применяется в том случае, когда требуется передавать информацию от нескольких источников по общей по шине. Длинная шина легко может быть подвержена воздействию помех.

Кроме формирования высокого и низкого логических уровней, такой выход может быть переведен в третье, высокоимпедансное состояние (называемое High-Z или просто

Z)– «обрыв».

Элементы с тристабильным выходом имеют специальный вход управления переходом в третье высокоимпеданное состояние, который обозначается ОЕ (Output Enable, выход подключен). О наличии тристабильного выхода свидетельствует знак  $\diamond$ .

Поскольку входы элементов ТТЛ являются потребителями выходного тока, уровни сигналов на выходах ИМС ТТЛ по мере увеличения подключаемых входов все больше приближаются к порогу переключения. Поэтому существует предел количества входов ИМС, подключаемых к одному выходу. Для его повышения применяют специальный тип – *буферные элементы*, или просто *буферы*, имеющие повышенную нагрузочную способность.

В лабораторной работе исследуются параметры логической интегральной схемы К155ЛА3, представляющей собой четыре логических элемента 2И-НЕ, объединенных в одном корпусе. Расположение выводов, соответствующих входам и выходам логических элементов, а также линиям питания, приведено на рис. 7.5, а. На рис. 7.5, б представлено расположение выводов интегральной схемы, выполненной в корпусе формата DIP14 (201.14-1).

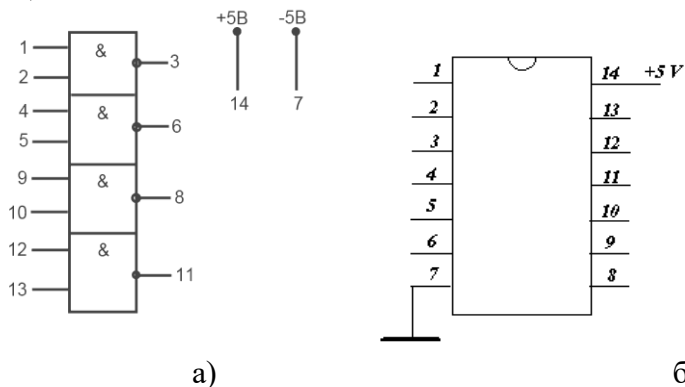


Рис. 7.5. Расположение выводов интегральной схемы

Основные электрические характеристики К155ЛА3

сведены в таблицу 7.1.

Таблица 7.1

Номинальное напряжение питания	5 В $\pm$ 5 %
Выходное напряжение низкого уровня	не более 0,4 В
Выходное напряжение высокого уровня	не менее 2,4 В
Входной ток низкого уровня	не более -1,6 мА
Входной ток высокого уровня	не более 0,04 мА
Ток потребления при $U_{вых} = \langle 0 \rangle$	не более 22 мА
Ток потребления при $U_{вых} = \langle 1 \rangle$	не более 8 мА

### Лабораторное задание

1. Получить допуск у преподавателя или лаборанта.
2. Включить стенд, установить напряжение источников питания согласно значениям, указанным на рис. 7.5, контролируя результат по вольтметру.
3. Руководствуясь рис. 7.6 собрать схему для исследования передаточной характеристики ЛЭ.

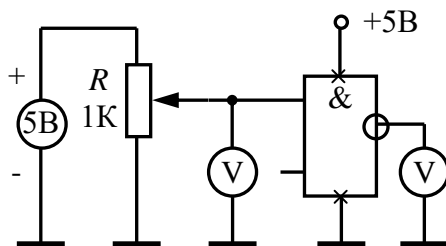


Рис. 7.6. Схема для снятия передаточной характеристики

4. После проверки схемы преподавателем или лаборантом подать питание на стенд.
5. Провести измерения входных и выходных напряжений, результат свести в таблицу, построить график зависимости  $U_{вых} = f(U_{вх})$ , аналогичный представленному на рис. 7.2, а. Масштабы осей должны совпадать.
6. Провести прямую с углом наклона  $45^{\circ}$  от начала

координат. Точка пересечения с графиком передаточной характеристики соответствует пороговому напряжению переключения  $U_{пор}$ . Выписать в отчет полученное значение напряжения.

7. Руководствуясь рис. 7.7 собрать схему для исследования входной характеристики ЛЭ.

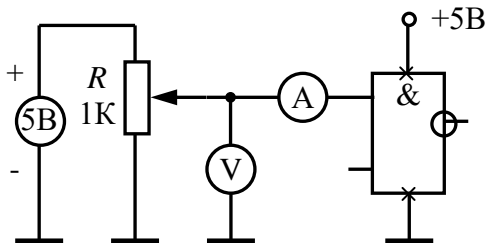


Рис. 7.7. Схема для снятия входной характеристики

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

9. Провести измерения входного тока и напряжения, результат свести в таблицу, построить график зависимости  $I_{вх} = f(U_{вх})$ , аналогичный представленному на рис. 7.2, б.

**Внимание!** При проведении измерений необходимо менять полярность подключения амперметра.

10 Руководствуясь рис. 7.8, а собрать схему для исследования выходной характеристики единицы.

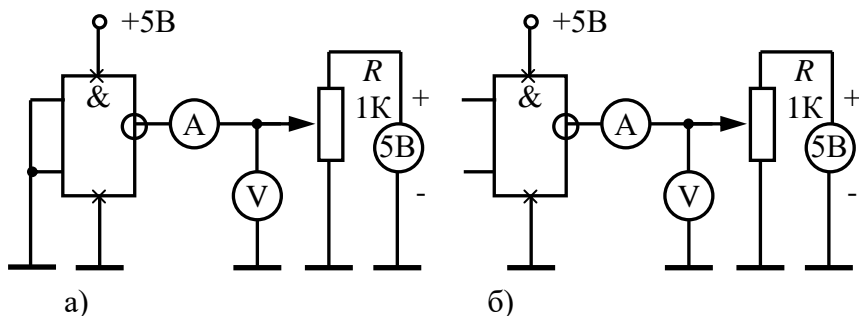


Рис. 7.8. Схема для снятия выходной характеристики

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

12. Провести измерения выходного тока и напряжения, результат свести в таблицу, построить график зависимости  $I_{вых} = f(U_{вых})$ , аналогичный представленному на рис. 7.2, в.

13. Руководствуясь рис. 7.8, б собрать схему для исследования выходной характеристики нуля.

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

15. Провести измерения выходного тока и напряжения, результат свести в таблицу, построить график зависимости  $I_{вых} = f(U_{вых})$ , аналогичный представленному на рис. 7.2, в.

#### *Содержание отчета:*

1. Название, цель работы, состав используемого оборудования.

2. Измерительная схема.

3. Таблицы и графики передаточной характеристики, входной характеристики, выходных характеристик нуля и единицы, величина порогового напряжения.

4. Краткие выводы по результатам работы.

#### *Контрольные вопросы*

1. Что показывает передаточная характеристика ЛЭ?

2. Что характеризует нагрузочная способность ЛЭ?

3. Каково назначение многоэмиттерного транзистора в схеме ЛЭ?

4. Перечислите электрические характеристики входных сигналов ТТЛ.

5. Перечислите электрические характеристики выходных сигналов ТТЛ.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

### Исследование работы универсального логического элемента КМОП

#### *Цели работы:*

1. Углубление теоретических знаний по основам микроэлектроники и цифровой техники.
2. Ознакомление с сигнальными параметрами КМОП элементов.

#### *Состав используемого оборудования:*

1. Источники питания постоянного напряжения 0...15В.
2. Вольтметры постоянного напряжения.
3. Стенд лабораторный с исследуемым элементом КМОП.
4. Соединительные провода.

#### *Подготовительное (домашнее) задание*

1. Записать название, цель работы.
2. Изучить сигнальные параметры и применение логических элементов КМОП.

#### *Краткие теоретические сведения*

Базовый элемент КМОП строится на полевых МОП (МДП)-транзисторах обеих полярностей, работающих в ключевом режиме. Такие пары МОП-транзисторов называют комплементарными (КМДП или КМОП).

Базовый элемент КМОП, представленный на рис. 8.1, работает следующим образом. В случае, когда на входы  $X1$  и  $X2$  подаются сигналы логических «1», транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  закрываются, а  $VT3$  и  $VT4$  открываются, устанавливая на выходе сигнал логического «0». Если же хотя бы на одном из входов базового элемента присутствует уровень логического нуля, открываются  $VT1$  и  $VT2$ , играющие роль нагрузочных транзисторов по отношению к последовательно соединенным  $VT3$  и  $VT4$ , тем самым обеспечивая подачу высокого уровня на выход схемы.



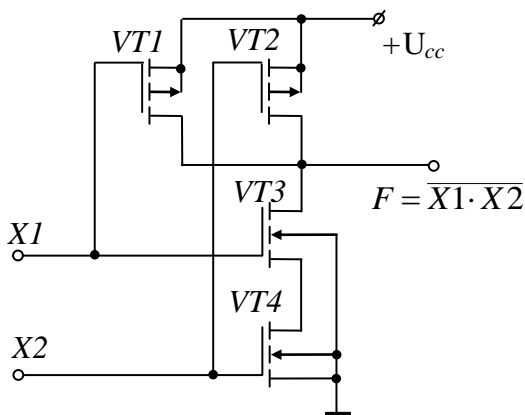


Рис. 8.1. Элемент КМОП 2И-НЕ

Для микросхем КМОП требуется напряжение питания в диапазоне от +5 до +15В, наиболее распространенные значения +5 и +12В.

Входы элементов КМОП не потребляют тока. Логический порог равен примерно половине напряжения питания. Все входы весьма чувствительны к статическому электричеству и могут выйти из строя даже при неосторожном контакте с рукой или паяльником. В современных элементах КМОП предусмотрены системы защиты входов от статических разрядов, однако, сохраняется требование осторожного обращения при монтаже, рекомендуется также применять заземление для паяльника. Как и в ТТЛ логике, неиспользуемые входы элементов КМОП нужно подключать к источникам низкого или высокого логических уровней, в зависимости от требований к работе.

Выход элемента КМОП представляет собой открытый полевой транзистор, подключаемый либо к общему проводу, либо к шине питания.

Наиболее распространенными сериями ИМС стандартной логики, выполненными по технологии КМОП, являются: 74НСxxx (К1564) имеет разброс напряжения питания от 2 до 6В при довольно низком быстродействии, 20нс. 74LVxxx - низковольтный вариант 74НС. Оптимизирована для

напряжения питания +3.3В; 74LVCxxx - еще более низковольтный вариант. Оптимизирована для напряжения питания +2.7В, время задержки – 5.1нс. Допускается подача на вход сигналов напряжением до 5.5В; 74ALVCxxx - более быстродействующий вариант 74LVCxxx. Имеет время задержки распространения всего 2.8нс при напряжении питания 2.5В; 74VHCxxx - полный аналог 74LVxxx. Выпускаются 74VHCT с напряжением питания 4.5...5.5В и ТТЛ-уровнями выходов. Быстродействие улучшено до 9нс. 74ACTxxx (КР1594) предназначены для работы в диапазоне питающих напряжений 4.5...5В, имеют время задержки 9.5нс.

Используемая в лабораторной работе микросхема К176ЛП1 является универсальным логическим элементом. Ее можно использована как три самостоятельных логических элемента НЕ, как элемент ЗИЛИ-НЕ, как элемент ЗИ-НЕ и как элемент НЕ с большим коэффициентом разветвления. Последнее решение позволяет подключать к выходу большое число соответствующих входов.

На рис. 8.2, а показана принципиальная электрическая схема. Микросхема К176ЛП1 содержит 6 полевых транзисторов, три из которых с р-каналом, три другие – с n-каналом. Напряжение питания подают на выводы 14 (+5В) и 7 (общий). Выводы 6, 3 и 10 – выводы первого-третьего элементов.

Выводы 13, 8, 1 и 5 – стоки комплементарной пары полевых транзисторов первого и второго элементов, 12-выход третьего элемента (рис.8.2, а). Для первого элемента: к выводу 14 подключается напряжение питания, а вывод 7 – общий; для второго: к выводу 2 – напряжение питания, а вывод 4 общий; третьего: к выводу 11-напряжение питания, а вывод 9-общий. Разные по функциональному назначению логические элементы получают путем соответствующих соединений выводов. На рис. 8.2, б представлено включение К176ЛП1 как трех инверторов или буферных элементов (если использовать неинвертирующие выходы).

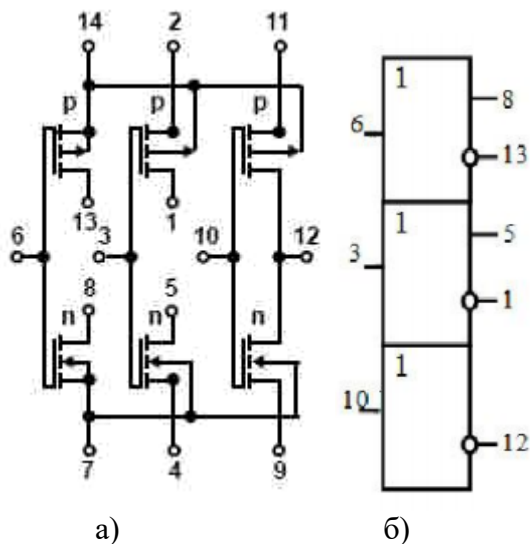


Рис. 8.2. Структура микросхемы К176ЛП1

### Лабораторное задание

1. Получить допуск у преподавателя или лаборанта.
2. Включить стенд, установить напряжение источников питания согласно значениям, указанным на рис. 8.3, контролируя результат по вольтметру.
3. Руководствуясь рис. 8.3 собрать схему для исследования передаточной характеристики ЛЭ.

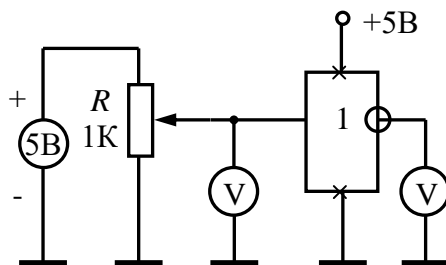


Рис. 8.3. Схема для снятия передаточной характеристики

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

5. Провести измерения входных и выходных напряжений, результат свести в таблицу, построить график зависимости  $U_{вых} = f(U_{вх})$ . Масштабы осей должны совпадать.

6. Провести прямую с углом наклона  $45^0$  от начала координат. Точка пересечения с графиком передаточной характеристики соответствует пороговому напряжению переключения  $U_{пор}$ . Выписать в отчет полученное значение напряжения.

7. Руководствуясь рис. 8.4, а собрать схему для исследования выходной характеристики единицы.

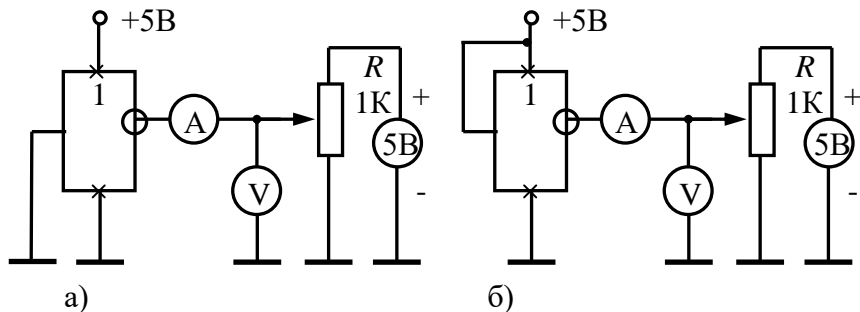


Рис. 8.4. Схема для снятия выходной характеристики

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

9. Провести измерения выходного тока и напряжения, результат свести в таблицу, построить график зависимости  $I_{вых} = f(U_{вых})$ .

10. Руководствуясь рис. 8.4, б собрать схему для исследования выходной характеристики нуля.

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

12. Провести измерения выходного тока и напряжения, результат свести в таблицу, построить график зависимости  $I_{вых} = f(U_{вых})$ .

#### Содержание отчета:

1. Название, цель работы, состав используемого

оборудования.

2. Измерительная схема.

3. Таблицы и графики передаточной характеристики, выходных характеристик нуля и единицы, величина порогового напряжения.

4. Краткие выводы по результатам работы.

#### *Контрольные вопросы*

1. Каковы особенности работы комплементарных пар КМОП?

2. Как работает базовый элемент КМОП?

3. Почему К176ЛП1 называют универсальным логическим элементом?

4. Как подавать на входы сигналы логической единицы и нуля?

5. Перечислите электрические характеристики входных и выходных сигналов КМОП.

## 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. Электроника [Текст] / В. И. Лачин, Н. С. Савёлов. – Ростов-на-Дону: "Феникс" 2004. - 576 с.
5. Лаврентьев, Б. Ф. Аналоговая и цифровая электроника: учеб. пособие [Текст] / Б. Ф. Лаврентьев. – Йошкар-Ола.: МарГТУ. – 2000. – 155 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	1
Техника безопасности в лаборатории .....	1
Краткие сведения об учебном измерительном оборудовании .....	2
Лабораторная работа № 5 Исследование статических характеристик МДП-транзистора в схеме с общим истоком .....	5
Лабораторная работа № 6 Исследование каскадов с применением операционных усилителей .....	13
Лабораторная работа № 7 Исследование работы логического элемента ТТЛ .....	19
Лабораторная работа № 8 Исследование работы универсального логического элемента КМОП .....	30
Библиографический список .....	36

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам 5-8 по курсу «Электроника»  
для студентов направления 11.05.01  
«Радиоэлектронные системы и комплексы» (направленность  
«Радиоэлектронные системы передачи информации») очной и  
заочной форм обучения

Составитель  
Краснов Роман Петрович

В авторской редакции

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

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