

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Электроснабжение»

В. В. Курганов, Д. И. Зализный

ЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
для студентов специальности
1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»
дневной и заочной форм обучения**

В 2 частях

Часть 1

Промышленная электроника

Гомель 2010

УДК 621.396.6(075.8)
ББК 32.859я73
К93

*Рекомендовано научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 6 от 29.06.2009 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Промышленная электроника»
ГГТУ им. П. О. Сухого *Ю. В. Крышнев*

Курганов, В. В.
К93 Электроника и информационно-измерительная техника : лаборатор. практикум для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» днев. и заоч. форм обучения : в 2 ч. Ч. 1. Промышленная электроника / В. В. Курганов, Д. И. Зализный. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 70 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Содержит описание лабораторных работ, где исследуются электронные компоненты, а также аналоговые и цифровые электронные цепи в объеме, необходимом для подготовки инженеров-энергетиков.

Для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.396.6(075.8)
ББК 32.859я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2010

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Исследование полупроводниковых диодов и тиристоров

Цель работы: Изучить принципы работы диодов, стабилитронов и тиристоров на основе их вольтамперных характеристик.

Краткие теоретические сведения

Электронно-дырочный переход (p - n переход) – это область на границе двух полупроводников с противоположным типом электропроводности. Основными электрическими зарядами в полупроводнике типа n являются электроны, а в полупроводнике типа p – дырки.

Диод – это полупроводниковый элемент электронной техники, выполненный на основе одного p - n перехода и обладающий вентиляционными свойствами, то есть способностью проводить электрический ток только в одном направлении. Диод имеет два электрода – анод и катод.

Стабилитрон – это полупроводниковый диод, функционирующий в условиях электрического пробоя обратносмещенного p - n перехода и обладающий способностью стабилизировать постоянное напряжение. Условные обозначения и вольтамперные характеристики диода и стабилитрона показаны на рис. 1.1 (a – диод; b – стабилитрон).

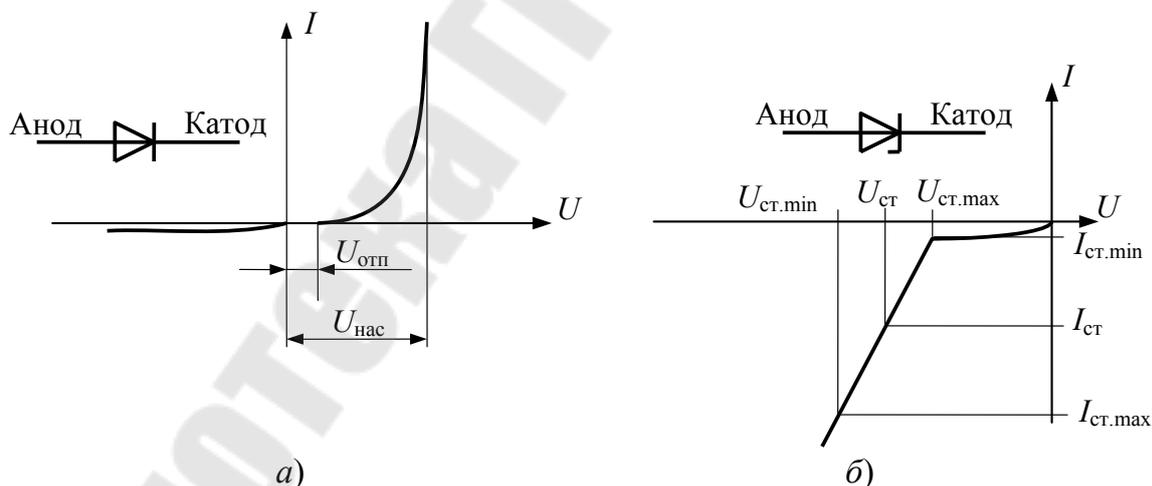


Рис. 1.1

Тиристор – это элемент, состоящий из трех p - n переходов и выполняющий функцию управляемого диода или электронного (бесконтактного) ключа. Тиристор имеет три электрода: анод, катод и управляющий электрод. Условное обозначение и семейство вольтамперных характеристик тиристора показаны на рис. 1.2.

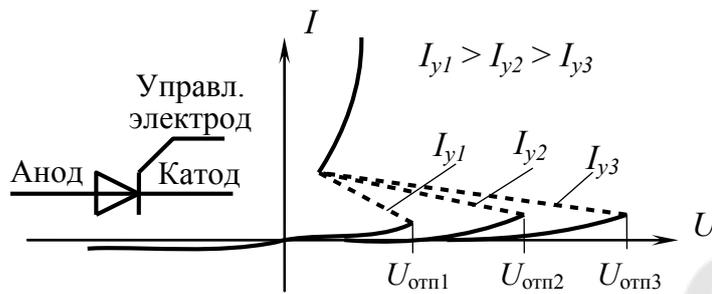
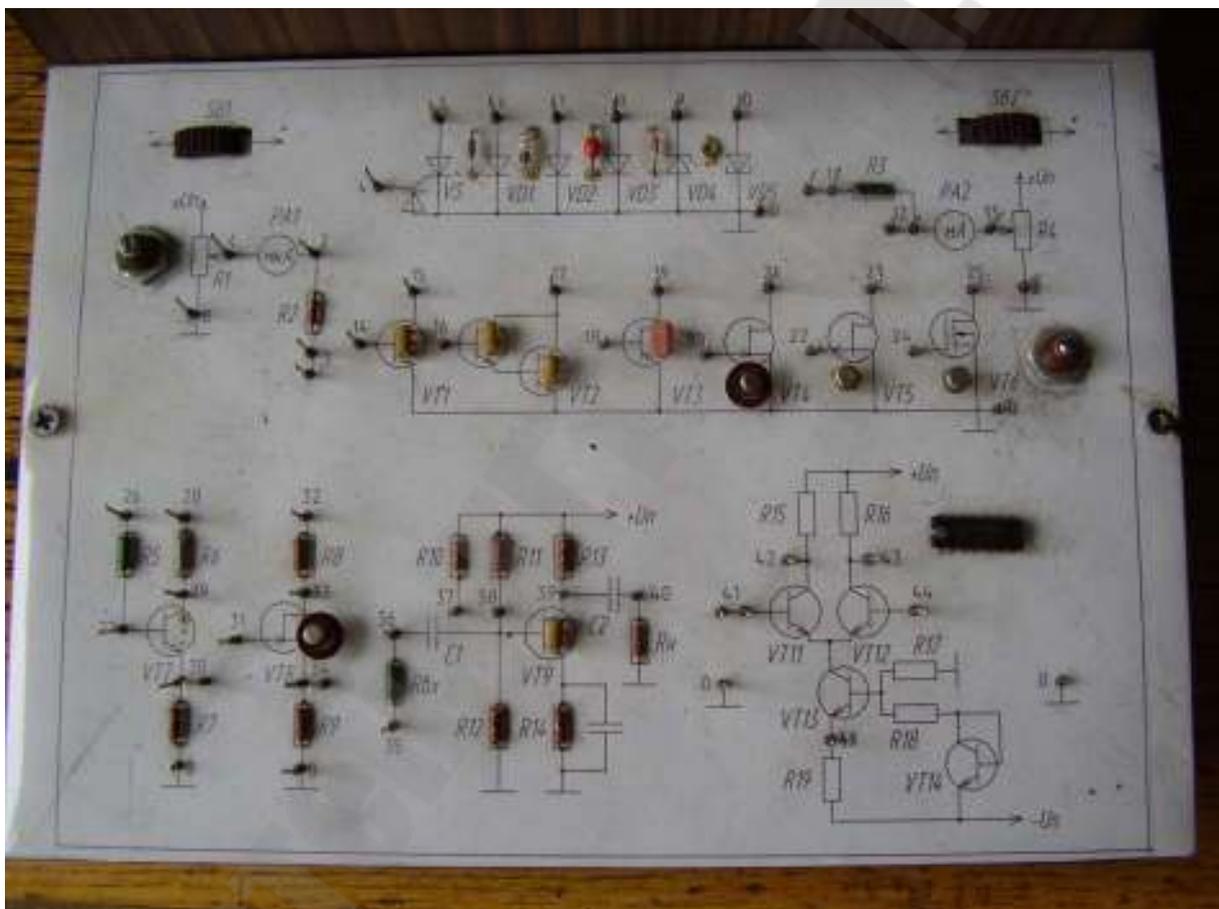


Рис. 1.2

Описание лабораторной установки

Внешний вид лабораторной установки



На плате лабораторного стенда размещены исследуемые полупроводниковые элементы: точечный кремниевый диод VD_1 , точечный германиевый диод VD_2 , кремниевый выпрямительный диод VD_3 , стабилитрон VD_4 , тиристор VS . На вертикальной панели стенда установлены микроамперметры PA_1 и PA_2 . С помощью переключателей SB_1 и SB_2 изменяются полярности подключения источников питания U_{Π} к потенциометрам R_1 и R_2 , регуляторы которых выведены на плату

под шлиц отвертки. Питание стенда осуществляется от сети 220 В и включается тумблером «Сеть» с сигнальным светодиодом.

Внимание! Во избежание выхода из строя полупроводниковых элементов перед включением тумблера «Сеть» необходимо регуляторы потенциометров R_1 и R_4 установить в крайнее левое положение.

Для выполнения работы помимо лабораторного стенда необходим также цифровой вольтметр.

Порядок выполнения работы

1. Исследование вольтамперных характеристик (ВАХ) диодов

1.1. Установите регуляторы потенциометров R_1 и R_4 в крайнее левое положение. Переключатели SB_1 и SB_2 установите в положение «+».

1.2. С помощью гибкой перемычки соберите схему для исследования начального участка ВАХ точечного кремниевого диода VD_1 , показанную на рис. 1.3. Для этого соедините на стенде точки 3-6. Цифровой вольтметр подключите между точками 3 и 0.

1.3. Включите питание стенда и цифрового вольтметра.

1.4. Увеличивая напряжение потенциометром R_1 , снимите показания микроамперметра и вольтметра. Результаты измерений занесите в табл. 1.1.

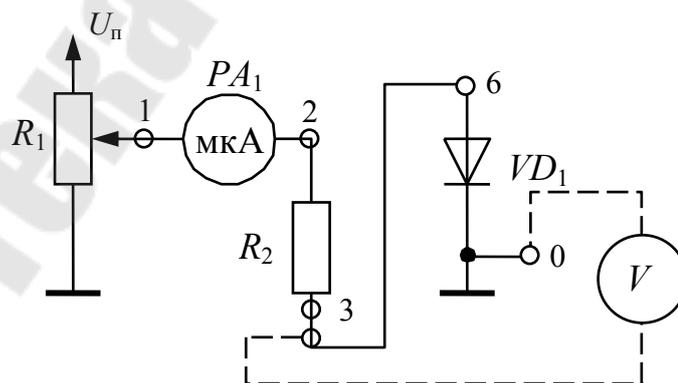


Рис. 1.3

Таблица 1.1

$I_{пр}$, мА							
$U_{пр}$, В							

1.5. Установите потенциометр R_1 в крайнее левое положение и отключите стенд. Разберите схему.

1.6. С помощью гибкой перемычки соберите схему для исследования насыщенного участка ВАХ диода VD_1 , показанную на рис. 1.4. Для этого соедините на стенде точки 11-6. Цифровой вольтметр подключите между точками 11 и 0.

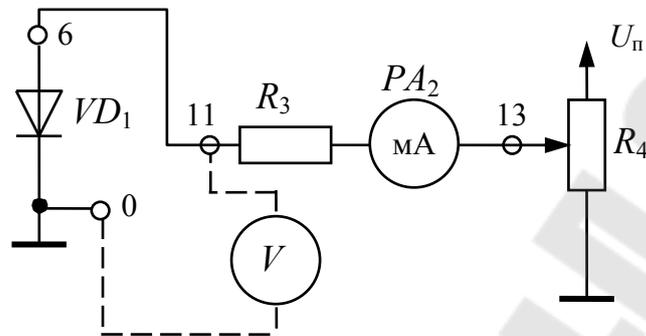


Рис. 1.4

1.7. Включите питание стенда. Увеличивая напряжение потенциометром R_4 , снимите показания миллиамперметра и вольтметра. Результаты измерений занесите в таблицу, аналогичную табл. 1.1.

1.8. Установите переключатель SB_2 в положение «-». Убедитесь, что диод не проводит ток в обратном направлении. Установите переключатель SB_2 в положение «+».

1.9. Установите потенциометр R_4 в крайнее левое положение и отключите стенд. Разберите схему.

1.10. Используя две таблицы, полученные в результате измерений, постройте характеристику $I_{пр}(U_{пр})$. Определите графически напряжение отпираания диода $U_{отп}$ и напряжение насыщения диода $U_{нас}$ (см. рис. 1.1).

1.11. Повторите пункты 1.2-1.10 для точечного германиевого диода VD_2 , подключенного между точками 7 и 0.

1.12. Повторите пункты 1.2-1.10 для кремниевого выпрямительного диода VD_3 , подключенного между точками 8 и 0.

2. Исследование ВАХ стабилитрона

2.1. С помощью гибкой перемычки соберите схему для исследования обратной ветви ВАХ стабилитрона VD_4 , показанную на рис. 1.5. Для этого соедините на стенде точки 11-9. Переключатель

SB_2 должен быть в положении «+». Цифровой вольтметр подключите между точками 11 и 0.

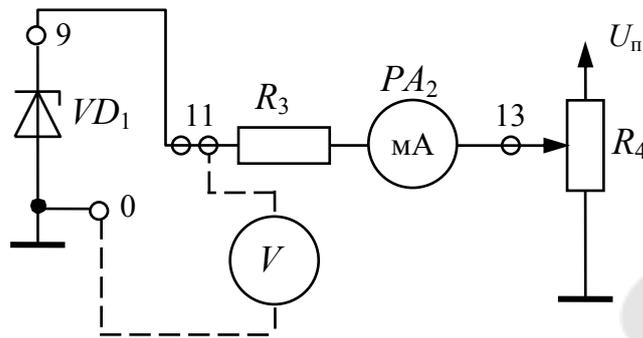


Рис. 1.5

2.2. Включите стенд. Увеличивая напряжение, снимите показания миллиамперметра и вольтметра, начиная с момента отпирания (пробоя) стабилитрона (когда начнет возрастать ток). Результаты измерений занесите в таблицу, аналогичную табл. 1.1, записывая значения обратного тока $I_{обр}$ со знаком «-» и значения обратного напряжения $U_{обр}$.

2.3. Установите потенциометр R_4 в крайнее левое положение.

2.4. Установите переключатель SB_2 в положение «-» и снимите прямую ветвь ВАХ стабилитрона.

2.5. Отключите стенд. Разберите схему.

2.6. Постройте на одном графике прямую и обратную ветви ВАХ стабилитрона. На обратной ветви определите графически значение напряжения стабилизации $U_{ст}$, а также дифференциальное сопротивление стабилитрона $r_{ст} = \frac{U_{ст.макс} - U_{ст.мин}}{I_{ст.макс} - I_{ст.мин}}$ (см. рис. 1.1).

3. Исследование работы тиристора

3.1. С помощью гибких перемычек соберите схему для исследования тиристора VS , показанную на рис. 1.7. Для этого соедините на стенде точки 3-4 и 5-11. Переключатели SB_1 и SB_2 должны быть в положении «+». Цифровой вольтметр подключите между точками 11 и 0.

3.2. Установите потенциометр R_1 в крайнее левое положение, а потенциометр R_2 – в крайнее правое. Включите стенд и плавно увеличивайте ток управления тиристора с помощью R_1 до момента отпирания тиристора (когда ток анода возрастет скачком). В момент отпи-

раная тиристора зафиксируйте значения тока управления $I_{упр}$, тока анода I_a и напряжения анод-катод $U_{пр}$.

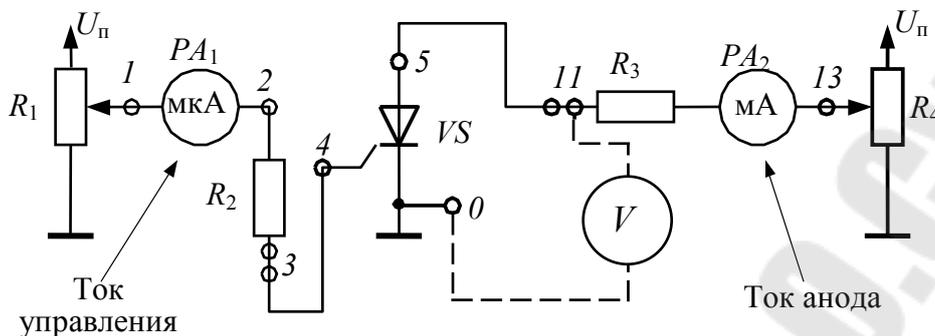


Рис. 1.6

3.3. Уменьшите ток управления до нуля и убедитесь, что тиристор остается в открытом состоянии. Медленно уменьшая ток анода I_a с помощью потенциометра R_4 , определите минимальный анодный ток удержания $I_{уд}$ тиристора в тот момент, когда ток анода I_a упадет скачком до нулевого значения.

3.4. Вновь добейтесь отпирания тиристора и снимите его ВАХ.

3.5. Отключите стенд. Разберите схему.

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, названия опытов, принципиальные схемы измерений, таблицы измерений, графики ВАХ, результаты расчетов, краткие выводы по каждому опыту.

Контрольные вопросы

1. Полупроводниковые материалы: классификация, типы электропроводности, физические свойства, области применения в электронике.

2. Физика процессов в $p-n$ переходе при отсутствии и наличии внешнего электрического поля. Области применения $p-n$ перехода в электронике.

3. Физические основы функционирования, ВАХ, основные параметры, схемы включения, назначение и области применения диодов и стабилитронов.

4. Физические основы функционирования, ВАХ, основные параметры, схемы включения, назначение и области применения тиристор.

Литература: [1], [2], [3], [4].

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Исследование биполярных и полевых транзисторов

Цель работы: Изучить принципы работы биполярных и полевых транзисторов на основе их вольтамперных характеристик.

Краткие теоретические сведения

Транзистор – это элемент, способный усиливать электрический ток или выполнять функцию электронного (бесконтактного) ключа.

Биполярный транзистор выполняют на основе двух $p-n$ переходов. Он имеет три электрода: базу, коллектор и эмиттер. В зависимости от конструкции биполярные транзисторы бывают $n-p-n$ и $p-n-p$ типа.

Условное обозначение и семейство вольтамперных (ВАХ) характеристик биполярного транзистора типа $n-p-n$ показаны на рис. 2.1 (б – выходные ВАХ; в – входная ВАХ).

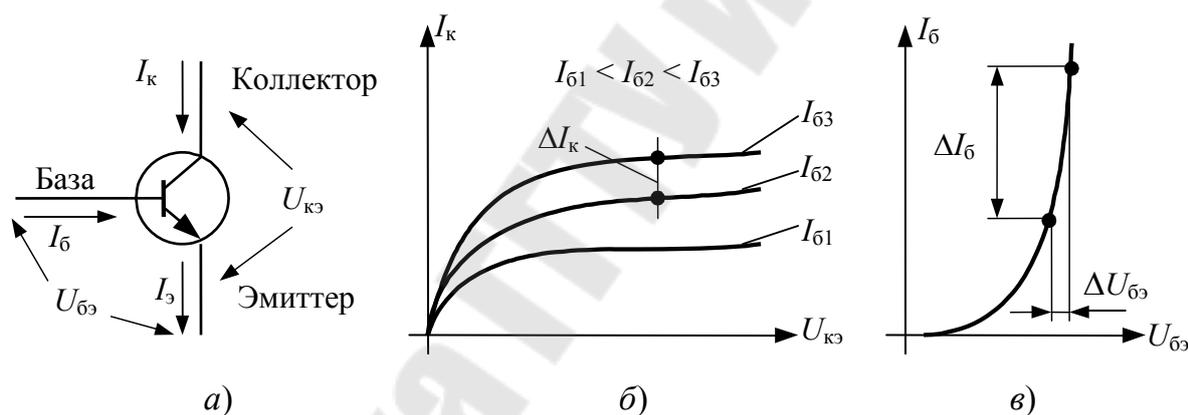


Рис. 2.1

Основными параметрами биполярных транзисторов является система так называемых h – параметров, определяемая в соответствии с уравнением в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{бэ} \\ \Delta I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta I_б \\ \Delta U_{кэ} \end{bmatrix},$$

где наиболее важны параметры: h_{11} – входное сопротивление транзистора, Ом; h_{21} – коэффициент передачи тока коллектора транзистора. Эти параметры можно найти по формулам:

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{\text{бэ}}}{\Delta I_{\text{б}}} \text{ при } \Delta U_{\text{кэ}} = \text{const}; \quad (2.1)$$

$$h_{21} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}} \text{ при } \Delta U_{\text{кэ}} = \text{const}. \quad (2.2)$$

Полевой транзистор с управляющим *p-n* переходом – это элемент, выполненный на основе одного *p-n* перехода, работающий по принципу сопротивления, управляемого напряжением, и имеющий три электрода: затвор, сток и исток. Конструкция такого транзистора показана на рис. 2.2.

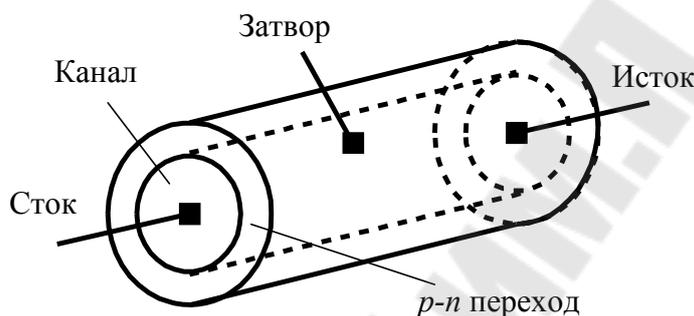


Рис. 2.2

Чем выше значение напряжения между затвором и истоком, тем шире обратносмещенный *p-n* переход, и тем меньше ширина канала сток-исток, и, соответственно, тем выше его сопротивление и ниже значение тока.

Условное обозначение полевого транзистора с управляющим *p-n* переходом и *n*-каналом, а также его ВАХ приведены на рис. 2.3 (б – выходные ВАХ; в – входная ВАХ).

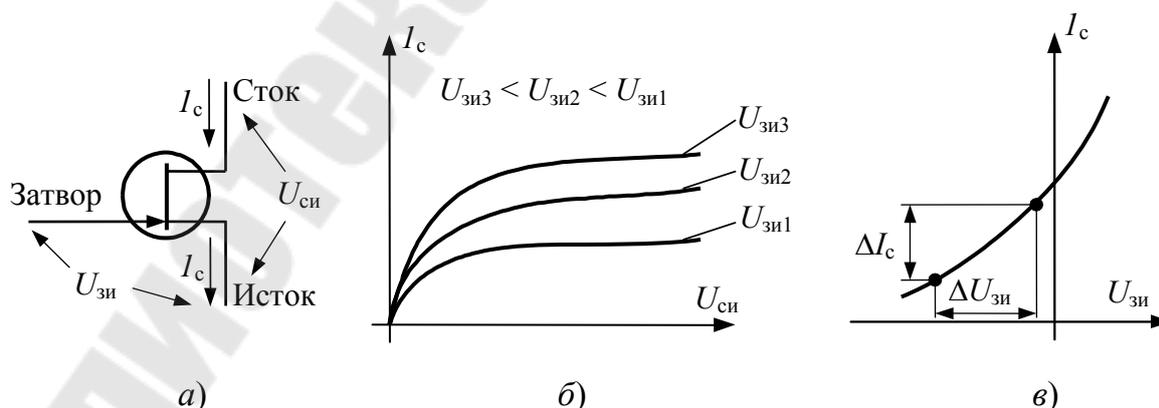


Рис. 2.3

Основным параметром полевого транзистора является крутизна сток-затворной характеристики (входной ВАХ), определяемая по формуле:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \text{ при } U_{си} = const. \quad (2.3)$$

Полевой транзистор с изолированным затвором – это элемент, выполненный на основе конструкции «металл - диэлектрик - полупроводник» (МДП), работающий по принципу сопротивления, управляемого напряжением, и имеющий четыре электрода: затвор, сток, исток и подложку.

Условное обозначение полевого транзистора с изолированным затвором и индуцируемым *n*-каналом, а также его ВАХ приведены на рис. 2.4 (б – выходные ВАХ; в – входная ВАХ).

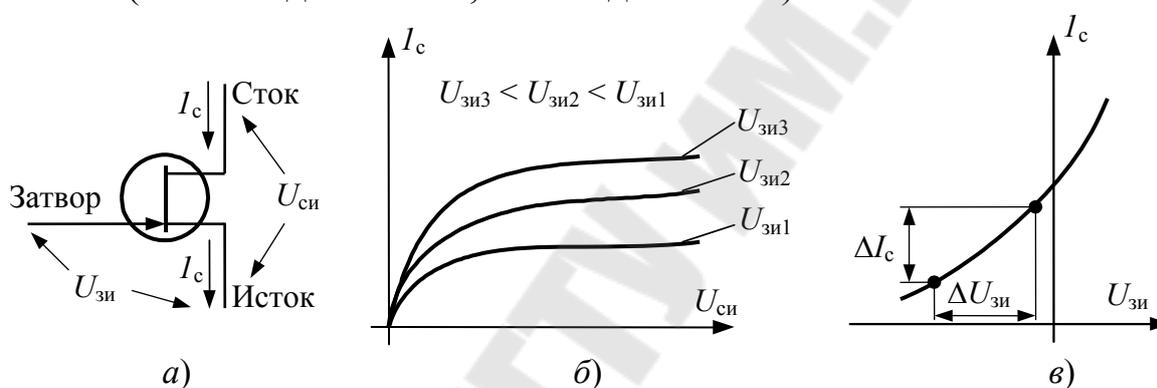


Рис. 2.4

Описание лабораторной установки

Внешний вид лабораторной установки приведен в лабораторной работе № 1.

На плате лабораторного стенда размещены исследуемые полупроводниковые элементы: биполярный транзистор *n-p-n* VT_1 , биполярный сдвоенный транзистор *n-p-n* VT_2 , биполярный транзистор *p-n-p* VT_3 , полевой транзистор с управляющим *p-n* переходом и *n*-каналом VT_4 , полевой транзистор с управляющим *p-n* переходом и *p*-каналом VT_5 , полевой транзистор с изолированным затвором и индуцируемым *p*-каналом VT_6 . На вертикальной панели стенда установлены микроамперметры PA_1 и PA_2 . С помощью переключателей SB_1 и SB_2 изменяются полярности подключения источников питания $U_{п}$ к потенциометрам R_1 и R_2 , регуляторы которых выведены на плату

под шлиц отвертки. Питание стенда осуществляется от сети 220 В и включается тумблером «Сеть» с сигнальным светодиодом.

Внимание! Во избежание выхода из строя полупроводниковых элементов перед включением тумблера «Сеть» необходимо регуляторы потенциометров R_1 и R_4 установить в крайнее левое положение.

Для выполнения работы помимо лабораторного стенда необходим также цифровой вольтметр.

Порядок выполнения работы

1. Исследование работы биполярных транзисторов

1.1 С помощью гибких перемычек соберите схему для исследования семейства выходных ВАХ биполярного транзистора VT_1 , показанную на рис. 2.5. Для этого соедините на стенде точки 3-14 и 15-11. Переключатели SB_1 и SB_2 должны быть в положении «+». Цифровой вольтметр подключите между точками 11 и 0.

1.2 Включите стенд и с помощью потенциометра R_1 установите фиксированный ток базы $I_{б1}$ транзистора. Затем, изменяя напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ транзистора с помощью потенциометра R_4 , записывайте значения тока коллектора $I_к$ транзистора. Результаты измерений занесите в табл. 2.1.

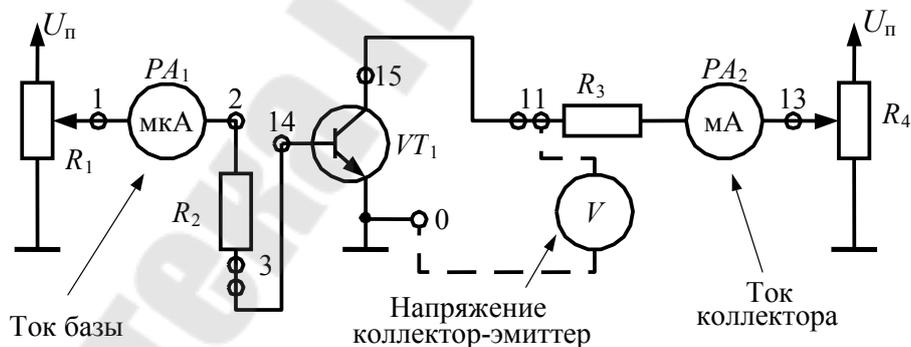


Рис. 2.5

Таблица 2.1

$U_{кэ}, В$								
$I_к, мА$ при	$I_{б1} =$							
	$I_{б2} =$							
	$I_{б3} =$							
	$I_{б4} =$							
	$I_{б5} =$							

1.3 Установите новый ток базы $I_{б2}$ транзистора и повторите измерения, записывая результаты в табл.2.1. Повторите измерения еще при трех значениях тока базы транзистора.

1.4 Установите потенциометры в крайнее левое положение и отключите стенд.

1.5 Постройте семейство выходных ВАХ транзистора $I_k(U_{кэ})$ на одном графике.

1.6 Для среднего значения напряжения $U_{кэ}$ рассчитайте для каждой кривой семейства ВАХ коэффициент передачи тока коллектора транзистора по формуле (2.2) в соответствии с рис. 2.1, б. Рассчитайте среднее значение этого коэффициента.

1.7 Соберите схему для исследования входной ВАХ транзистора. Для этого оставьте на стенде только переключку между точками 3-14. Подключите вольтметр между точками 3 и 0, то есть для измерения напряжения база-эмиттер $U_{бэ}$ транзистора.

1.8 Включите стенд и снимите входную ВАХ транзистора. Результаты измерений занесите в табл. 2.2.

Таблица 2.2

$U_{бэ}, В$							
$I_b, мкА$							

1.9 Установите потенциометр R_1 в крайнее левое положение и отключите стенд.

1.10 Постройте входную ВАХ транзистора.

1.11 Рассчитайте значение входного сопротивления транзистора в соответствии с формулой (2.1) и рис. 2.1, в.

1.12 С помощью гибких переключек соберите схему для исследования биполярного транзистора VT_2 . Для этого соедините на стенде точки 3-16 и 17-11. Переключатели SB_1 и SB_2 должны быть в положении «+». Цифровой вольтметр подключите между точками 11 и 0.

1.13 Повторите пункты 1.2 – 1.11.

1.14 С помощью гибких переключек соберите схему для исследования биполярного транзистора VT_3 . Для этого соедините на стенде точки 3-18 и 19-11. Переключатели SB_1 и SB_2 должны быть в положении «-». Цифровой вольтметр подключите между точками 11 и 0.

1.15 Повторите пункты 1.2 – 1.11.

2. Исследование работы полевых транзисторов

2.1 С помощью гибких перемычек соберите схему для исследования семейства выходных ВАХ полевого транзистора с управляющим $p-n$ переходом и n -каналом VT_4 , показанную рис. 2.6. Для этого соедините на стенде точки 3-20 и 21-11. Переключатель SB_1 должен быть в положении «-», а SB_2 в положении «+». Цифровой вольтметр необходимо будет переключать между точками 3-0 и 11-0.

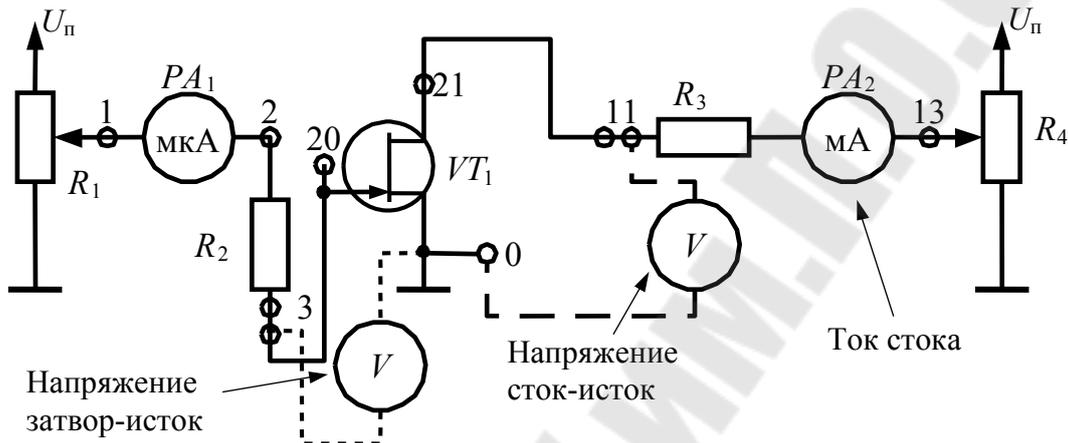


Рис. 2.6

2.2 Включите стенд и с помощью потенциометра R_1 установите фиксированное напряжение затвор-исток $U_{зи}$ транзистора. Затем, изменяя напряжение сток-исток $U_{си}$ транзистора с помощью потенциометра R_4 , записывайте значения тока стока I_c транзистора. Результаты измерений занесите в табл. 2.3. Заполните таким образом всю таблицу.

Таблица 2.3

$U_{си}, В$								
$I_c, мА$ при	$U_{зи1} =$							
	$U_{зи2} =$							
	$U_{зи3} =$							
	$U_{зи4} =$							
	$U_{зи5} =$							

2.3 Постройте семейство выходных ВАХ транзистора $I_c(U_{си})$ на одном графике.

2.4 Соберите схему для исследования входной ВАХ транзистора. Для этого установите потенциометр R_4 в крайнее правое поло-

жение. Подключите вольтметр между точками 3 и 0, то есть для измерения напряжения затвор-исток $U_{зи}$ транзистора.

2.5 Включите стенд и снимите входную ВАХ транзистора. Результаты измерений занесите в табл. 2.4.

Таблица 2.4

$U_{зи}, В$							
$I_c, мкА$							

2.6 Установите потенциометры в крайнее левое положение и отключите стенд.

2.7 Постройте входную ВАХ транзистора.

2.8 Рассчитайте значение крутизны ВАХ транзистора в соответствии с формулой (2.3) и рис. 2.4, в.

2.9 Соберите схему для исследования семейства выходных ВАХ полевого транзистора с управляющим $p-n$ переходом и p -каналом VT_5 . Для этого соедините на стенде точки 3-22 и 23-11. Переключатель SB_1 должен быть в положении «+», а SB_2 в положении «-».

2.10 Повторите пункты 2.2-2.8.

2.11 Соберите схему для исследования семейства выходных ВАХ полевого транзистора и индуцируемым n -каналом VT_6 VT_6 . Для этого соедините на стенде точки 3-24 и 25-11. Переключатели SB_1 и SB_2 должны быть в положении «+».

2.12 Повторите пункты 2.2-2.8.

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, названия опытов, принципиальные схемы измерений, таблицы измерений, графики ВАХ, результаты расчетов, краткие выводы по каждому опыту.

Контрольные вопросы

1. Биполярные транзисторы: классификация, условные обозначения, ВАХ, области применения.
2. Физика работы биполярного транзистора.
3. Полевые транзисторы: классификация, условные обозначения, ВАХ, области применения.
4. Физика работы МДП транзистора.

Литература: [1], [2], [3], [4], [5].

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Исследование неуправляемых выпрямителей, сглаживающих фильтров и стабилизаторов напряжения

Цель работы: Изучить принципы работы однофазных и трехфазных неуправляемых выпрямителей, сглаживающих фильтров, параметрических и компенсационных стабилизаторов напряжения.

Краткие теоретические сведения

Однофазный выпрямитель – схема на основе одного и более диодов, предназначенная для преобразования двухполярного напряжения в однополярное (выпрямленное) напряжение. Однофазные выпрямители бывают однополупериодные и двухполупериодные.

Трехфазный выпрямитель – схема на основе трех и более диодов, предназначенная для преобразования трехфазной системы напряжений в однополярное (выпрямленное) напряжение. Трехфазные выпрямители бывают с нулевым проводом и мостовые (без нулевого провода).

Основными параметрами выпрямителей являются: среднее значение выпрямленного напряжения U_d ; максимальное обратное напряжение на закрытом диоде $U_{обр.маx}$ и коэффициент пульсаций

$$p = \frac{2}{m^2 - 1},$$
 где m – число пульсаций за один период переменного тока частотой 50 Гц.

Схемы, диаграммы работы, а также основные параметры однофазных выпрямителей приведены на рис. 3.1 (*а* – однополупериодный выпрямитель; *б* – двухполупериодный выпрямитель) и трехфазных выпрямителей на рис. 3.2 (*а* – с нулевым выводом; *б* – мостовой).

Сглаживающий фильтр – схема на основе емкости, индуктивности или их сочетания, предназначенная для преобразования пульсирующего выпрямленного напряжения в постоянное напряжение. Качество фильтра оценивается коэффициентом сглаживания, который показывает, во сколько раз размах пульсации напряжения на выходе

фильтра меньше, чем на его входе: $q = \frac{P_{вх}}{P_{вых}}$, где $p_{вых} = \frac{\Delta U_{\phi}}{U_{\phi}}$; ΔU_{ϕ} – размах пульсаций на выходе фильтра; U_{ϕ} – среднее значение напряжения на выходе фильтра.

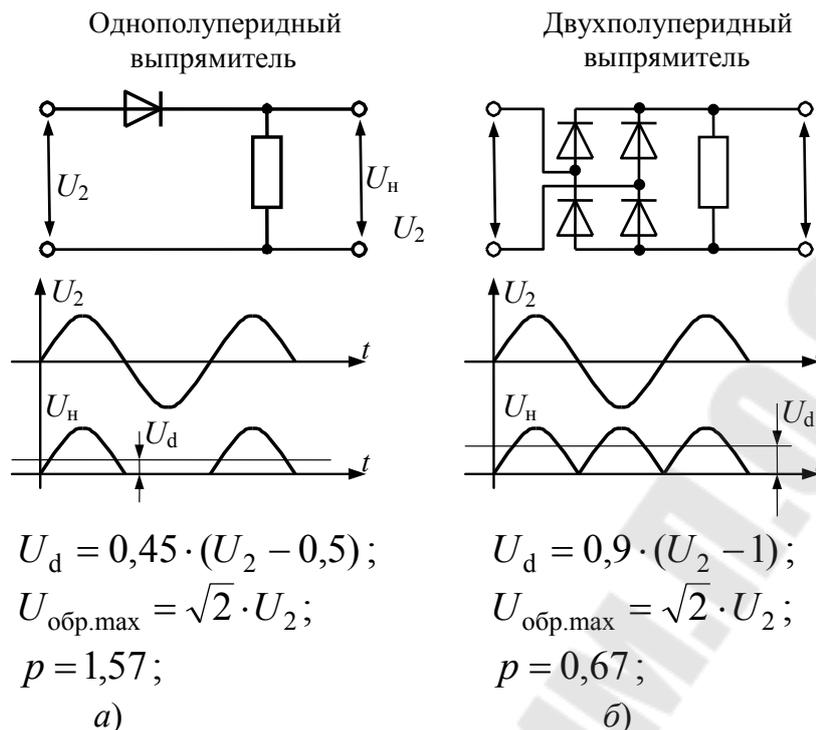


Рис. 3.1

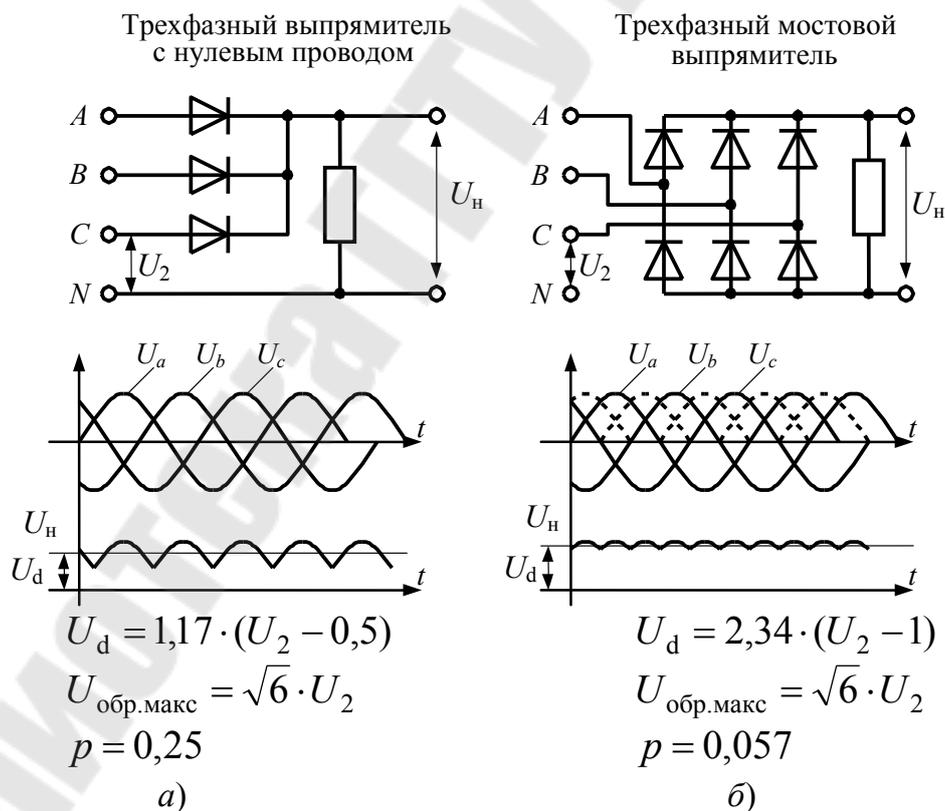


Рис. 3.2

Схемы, диаграммы работы и параметры основных типов фильтров приведены на рис. 3.3.

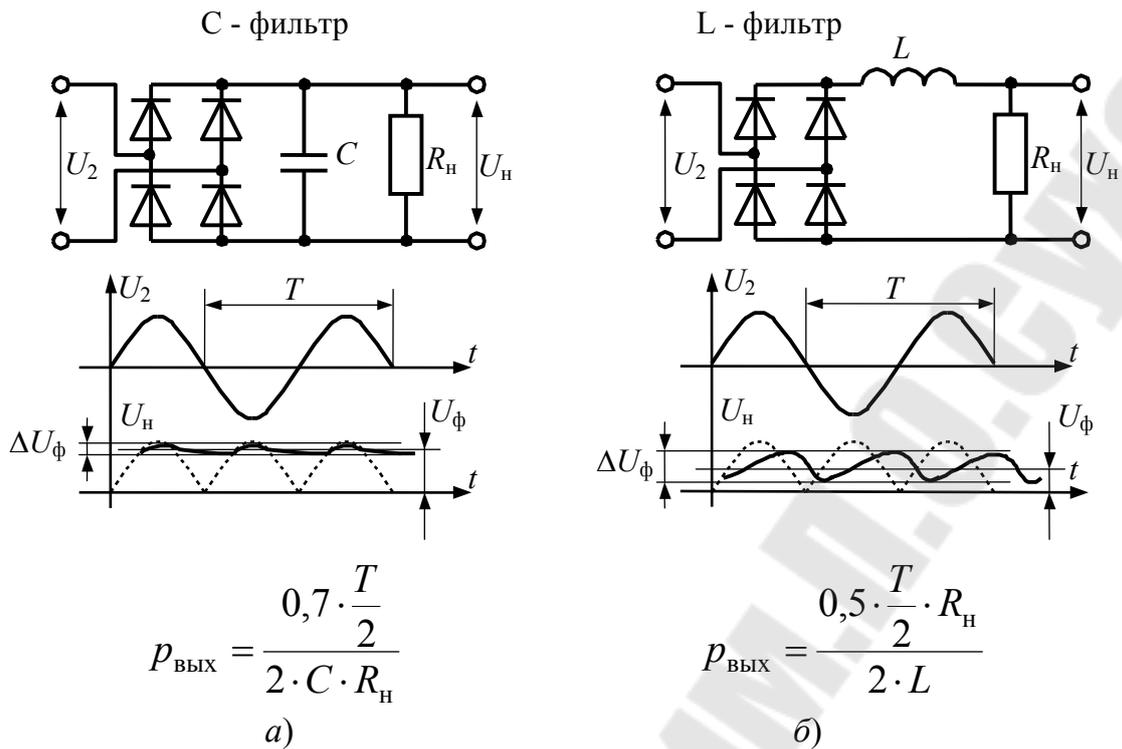


Рис. 3.3

Электронный стабилизатор напряжения – схема на основе стабилитрона и других электронных компонентов, предназначенная для преобразования пульсирующего постоянного напряжения в стабилизированное напряжение. Одним из основных параметров стабилизатора является коэффициент нестабильности по току – отношение изменения выходного напряжения $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ к вызвавшему его относительному изменению тока нагрузки:

$$K_{\text{НС}} = \Delta U_{\text{ВЫХ}} \cdot I_{\text{H}} \cdot 100 / (U_{\text{ВЫХ}} \cdot \Delta I_{\text{ВЫХ}}), \quad \% \quad (3.1)$$

Стабилизаторы напряжения бывают параметрическими и компенсационными. Схемы простейших из них приведены на рис. 3.4 (а – параметрический стабилизатор; б – компенсационный стабилизатор).

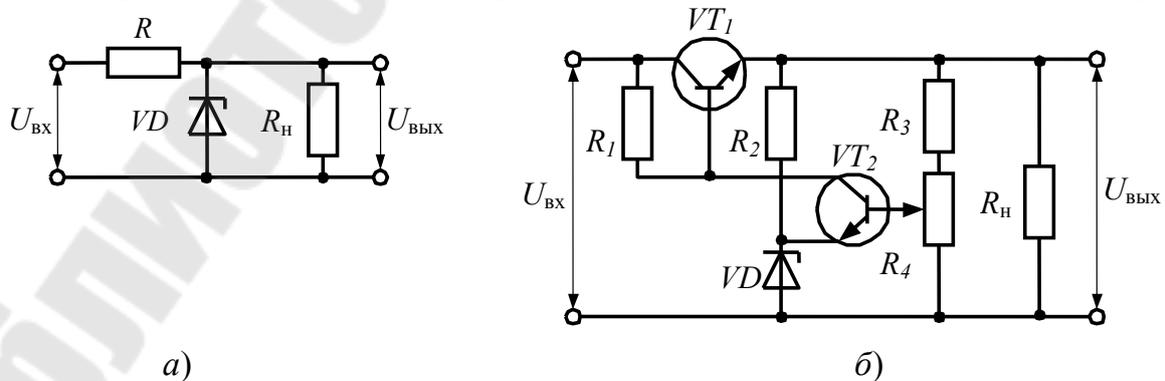
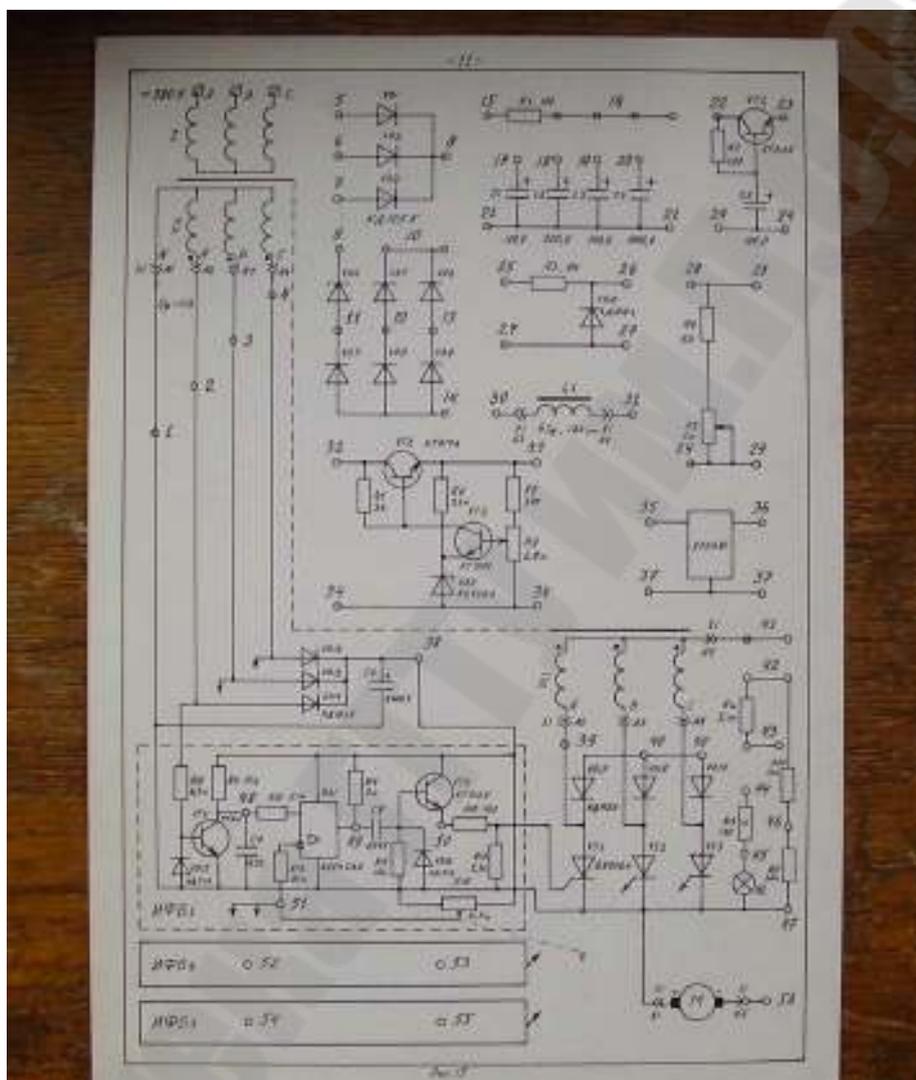


Рис. 3.4.

Последовательное соединение выпрямителя, сглаживающего фильтра и стабилизатора напряжения, называется **блоком питания** электронного устройства.

Описание лабораторной установки

Внешний вид лабораторной установки



На плате лабораторного стенда размещены необходимые электронные компоненты для исследования требуемых схем. Питание стенда осуществляется от специального разъема. При подключении разъема питание сразу подается на стенд.

Внимание! Во избежание выхода из строя электронных компонентов при сборке и разборке схемы, напряжение питания стенда необходимо обязательно отключать, то есть отсоединять питающий разъем (удерживая его за пластмассовый корпус).

На лицевую панель платы вынесены контрольные точки (штырьки), которые можно соединить с помощью гибких перемычек. В зависимости от комбинации контрольных точек получают различные функциональные устройства, приведенные в табл. 3.1.

Для проведения работы необходим двухканальный осциллограф, универсальный цифровой вольтметр и миллиамперметр.

Порядок выполнения работы

Номера соединения контрольных точек, а также точки подключения измерительных приборов в соответствии с заданным вариантом сведены в табл. 3.1.

В таблице 3.1 использованы следующие обозначения: ЭО – электронный осциллограф; ~PV – вольтметр для измерения действующего значения переменного напряжения; =PV – вольтметр для измерения постоянной составляющей напряжения (среднее значение); =PI – миллиамперметр для измерения постоянного тока. Для каждого выпрямителя, сглаживающего фильтра или стабилизатора напряжения проводятся однотипные опыты.

Таблица 3.1

№ п/п	Наименование схемы	№ вар.	Номера соединения контрольных точек	Подкл. измерит. приборов	№ рис.
1.	Однофазный однополупериодный выпрямитель	1	2-5; 8-28; 1-29	ЭО: 28-29; ~PV: 1-2; =PV: 28-29	3.1, а
		2	3-5; 8-28; 2-29	ЭО: 28-29; ~PV: 2-3; =PV: 28-29	
2.	Однофазный двухполупериодный выпрямитель	1	2-12; 1-13; 10-28; 14-29	- // -	3.1, б
		2	2-12; 3-13; 10-28; 14-29	- // -	
3.	Трехфазный выпрямитель с нулевым проводом	нет	2-5; 3-6; 4-7; 8-28; 1-29	ЭО: 28-29; ~PV: 1-2; =PV: 28-29	3.2, а
4.	Трехфазный мостовой выпрямитель	нет	9-10; 2-11; 3-12; 4-13; 10-28; 14-29	- // -	3.2, б
5.	С - фильтр	1	2-12; 1-13; 10-16; 19-16; 14-21; 21-29	ЭО: 28-29; =PV: 28-29; =PI: 16-28	3.3, а
		2	2-12; 3-13; 10-16; 18-16; 14-21; 21-29	- // -	

6.	RC - фильтр	1	2-12; 1-13; 10-15; 16-18; 14-21; 21-29	ЭО: 28-29; =PV: 28-29; =PI: 16-28	-
		2	2-12; 3-13; 10-15; 16-19; 14-21; 21-29	- // -	
7.	L - фильтр	1	2-12; 1-13; 10-30; 14-29	ЭО: 28-29; =PV: 28-29; =PI: 31-28	3.3, б
		2	2-12; 3-13; 10-30; 14-29	- // -	
8.	Параметрический стабилизатор напряжения	нет	2-12; 1-13; 10-16; 18-16; 14-21; 16-25; 21-27; 27-29.	ЭО: 28-29; =PV: 28-29; =PI: 26-28.	3.4, а
9.	Компенсационный стабилизатор напряжения	1	2-12; 1-13; 10-16; 18-16; 14-21; 16-32; 21-34; 34-29.	ЭО: 28-29; =PV: 28-29; =PI: 33-28.	3.4, б
		2	2-12; 3-13; 10-16; 19-16; 14-21; 16-35; 21-37; 37-29.	ЭО: 28-29; =PV: 28-29; =PI: 36-28.	-

1. Исследование неуправляемых выпрямителей (табл. 3.1, п. 1, 2, 3, 4)

1.1 В соответствии с заданным вариантом измерить вольтметром переменного тока ($\sim PV$) напряжение U_2 и вольтметром постоянного тока ($=PV$) среднее выпрямленное напряжение U_d . При этом нагрузочное сопротивление R_5 необходимо установить в среднее положение.

1.2 Зарисовать с экрана электронного осциллографа (ЭО) осциллограмму напряжения на нагрузке U_H . Определить по осциллограмме выпрямленного напряжения число пульсаций m за период входного сигнала и рассчитать коэффициент пульсаций p .

1.3 Зарисовать осциллограмму напряжения между анодом и катодом одного из задействованных в выпрямителе диодов, подключив сигнальный щуп осциллографа к аноду, а земляной – к катоду этого диода. Определить по осциллограмме максимальное обратное напряжение на диоде $U_{обр.маx}$.

1.4 Сравнить полученные значения величин U_d , $U_{обр.маx}$ и p с их расчетными значениями (см. рис. 3.1,).

2. Исследование сглаживающих фильтров (табл. 3.1, п. 5, 6,7)

2.1 При сборке схемы обратить внимание на наличие миллиамперметра (PI), который замыкает цепь нагрузки. Миллиамперметр должен быть постоянно подключен к схеме.

2.2 Для среднего положения нагрузочного сопротивления R_5 с помощью осциллографа определить размах пульсаций на выходе фильтра ΔU_ϕ , а с помощью вольтметра постоянного тока - среднее значение напряжения на выходе фильтра U_ϕ . Рассчитать коэффициент сглаживания q и сравнить его с расчетным (см. рис. 3.1, б и рис. 3.3). При этом $R_H = \frac{U_H}{I_H}$.

2.3 Изменяя в широких пределах сопротивление R_5 , снять зависимости $\Delta U_\phi(I_H)$ и $U_\phi(I_H)$ (не менее восьми точек). Результаты занести в таблицу и построить соответствующие графики.

2.4 Используя два канала осциллографа, зарисовать осциллограммы напряжений на входе и выходе фильтра (для С – фильтра на вход включить диод VD₁: т.10 перенести в т. 5, а т. 8 дополнительным проводом подключить к т. 16).

3. Исследование стабилизаторов напряжения (занятие 2) (табл. 3.1, п. 8, 9)

3.1 Для крайних положений нагрузочного сопротивления R_5 (повернуть регулировочный винт влево до упора, затем вправо до упора), измеряя значения тока нагрузки с помощью осциллографа определить максимальное отклонение выходного напряжения $\Delta U_{\text{вых}}$ стабилизатора, а с помощью вольтметра постоянного тока измерить среднее значение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$. Рассчитать коэффициент неустойчивости $K_{\text{нс}}$ в соответствии с (3.1).

3.2 Изменяя в широких пределах сопротивление R_5 , снять зависимость $U_{\text{вых}}(I_H)$ (не менее восьми точек). Результаты занести в таблицу и построить соответствующую выходную (нагрузочную) характеристику стабилизатора.

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, названия опытов, принципиальные схемы измерений, таблицы измерений, осциллограммы,

результаты расчетов, краткие выводы по каждому опыту с объяснением полученных осциллограмм.

Контрольные вопросы

1. Однофазные выпрямители: схемы, принципы работы, основные параметры.
2. Трехфазные выпрямители: схемы, принципы работы, основные параметры.
3. C – фильтр и L – фильтр: схемы, принципы работы, основные параметры.
4. Параметрический и компенсационный стабилизаторы напряжения: схемы, принципы работы, основные параметры.

Литература: [1], [5]

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Исследование управляемого выпрямителя

Цель работы: Изучить принципы работы мостового управляемого выпрямителя как основного функционального элемента силовой электроники

Краткие теоретические сведения

Управляемый выпрямитель – это выпрямитель, в котором вместо части или всех диодов используются электронные ключи – тиристоры или транзисторы. Управляемый выпрямитель является регулятором активной мощности, так как позволяет плавно изменять действующее значение напряжения на нагрузке.

Схема управляемого выпрямителя, исследуемая в лабораторной работе, приведена на рис. 4.1.

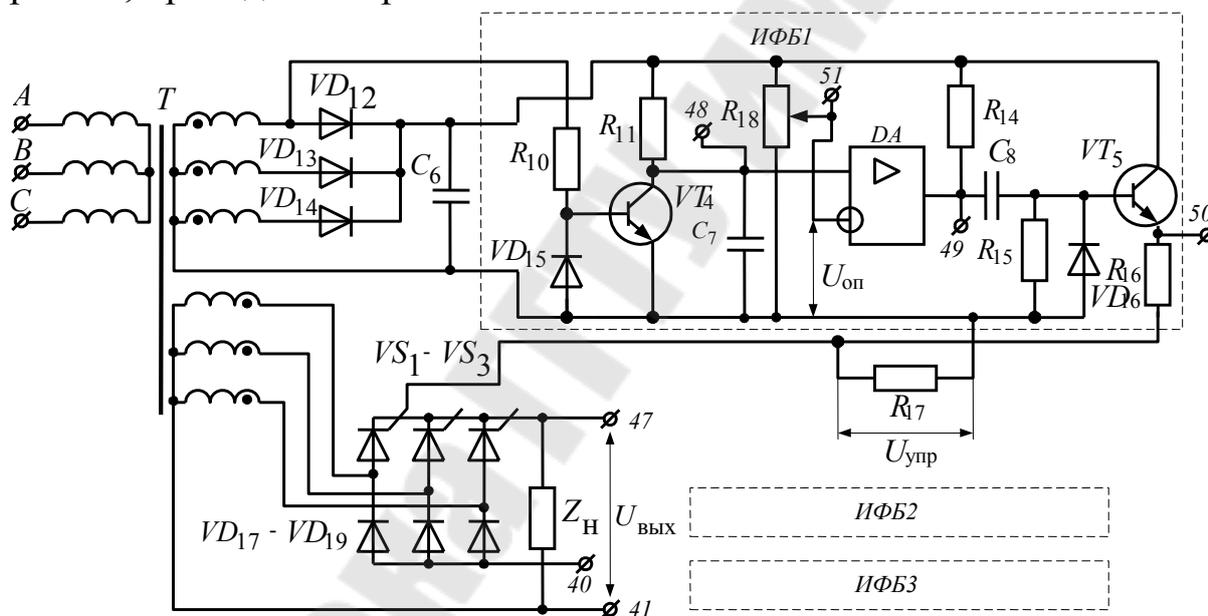


Рис. 4.1

Схема содержит трехфазный понижающий трансформатор T , от которого запитывается трехфазный управляемый выпрямитель, собранный на тиристорах $VS_1 - VS_3$ и диодах $VD_{17} - VD_{19}$. Цепи управления тиристоров подключены к выходам соответствующих импульсно-фазовых блоков ИФБ1 – ИФБ3. Эти блоки запитываются от постоянного напряжения, получаемого с помощью трехфазного выпрямителя, собранного на диодах $VD_{12} - VD_{14}$, и сглаживающего фильтра на конденсаторе C_6 . На входы каждого блока ИФБ подается переменное напряжение, обратное по знаку по отношению к напря-

жению соответствующей фазы выпрямителя. Это напряжение преобразуется в короткие импульсы, отпирающие тиристоры в нужные моменты времени. Рассмотрим работу ИФБ подробнее.

На транзисторе VT_4 собран электронный ключ. При положительной полуволне напряжения, поданного на вход ИФБ, транзистор VT_4 открывается и конденсатор C_7 быстро разряжается, то есть напряжение на нем стремится к нулю. В результате на выходе компаратора, собранного на операционном усилителе DA , появляется отрицательное напряжение насыщения (около -13 В).

При отрицательной полуволне входного напряжения транзистор VT_4 закрывается, и конденсатор C_7 заряжается через резистор R_{11} , то есть напряжение на нем нарастает по экспоненциальному закону. При достижении равенства напряжения на конденсаторе C_7 (т. 48) и опорного напряжения $U_{оп}$ на выходе резистивного делителя (т. 51), реализованного на переменном резисторе R_{18} , компаратор DA переключается и на его выходе появляется положительное напряжение насыщения (около $+13$ В). В результате на выходе дифференцирующей цепи, собранной на резисторе R_{15} и конденсаторе C_8 , появляется короткий импульс напряжения $U_{упр}$, поступающий в цепь управления тиристора через эмиттерный повторитель (усилитель тока), собранный на транзисторе VT_5 .

Изменяя значение переменного сопротивления R_{18} , можно изменять время подачи короткого импульса напряжения по отношению к началу отрицательной полуволны входного напряжения ИФБ, то есть изменять угол отпирания тиристора α . Диаграммы работы управляемого выпрямителя с нулевым проводом для активной нагрузки приведены на рис. 4.2.

При изменении опорного напряжения от нуля до амплитудного значения фазного напряжения угол отпирания тиристоров будет изменяться от 0 до 180 электрических градусов, а среднее выпрямленное напряжение U_d от максимального значения $U_{d,max}$, соответствующего неуправляемому выпрямителю, до нуля. На рис. 4.2 показан случай, когда $\alpha = 60^\circ$.

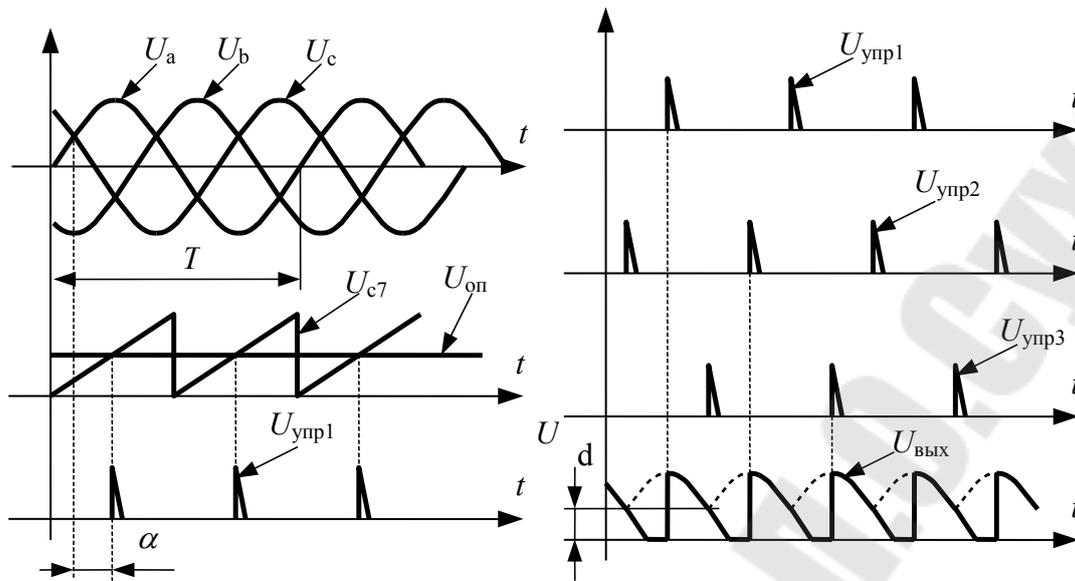


Рис. 4.2

Зависимость напряжения U_d от угла α называется регулировочной характеристикой управляемого выпрямителя. В случае активной нагрузки справедливо соотношение:

$$U_d = U_{d.\max} \cdot (1 + \cos \alpha) / 2. \quad (4.1)$$

При чисто индуктивной нагрузке в отрицательный полупериод тиристоры остаются некоторое время открытыми, так как через них и вторичные обмотки трансформатора будут проходить токи, создаваемые ЭДС самоиндукции индуктивности. Если индуктивность стремится к бесконечности, то в кривой напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ появятся участки отрицательной полярности длительностью, равной углу α . Очевидно, что при $\alpha = 90^\circ$ участки положительной и отрицательной полярности будут равны друг другу и среднее напряжение U_d также будет равно нулю. Таким образом, регулировочная характеристика при чисто индуктивной нагрузке описывается выражением:

$$U_d = U_{d.\max} \cdot \cos \alpha. \quad (4.2)$$

Описание лабораторной установки

Для проведения работы используется тот же стенд, что и в лабораторной работе № 3.

Порядок выполнения работы

1. Исследование импульсно-фазового блока

- 1.1. Убедитесь, что на стенде нет никаких подключенные перемычек.
- 1.2. Подключите двухлучевой осциллограф общим проводом к т. 47, а первый и второй каналы, соответственно, к т. 2 и т. 48.
- 1.3. Включите питание стенда и зарисуйте осциллограммы.
- 1.4. Не изменяя положения второго канала, подключите первый канал осциллографа к т. 51 и установите переменный резистор R_{18} в произвольное положение. Зарисуйте осциллограммы.
- 1.5. Подключите первый канал осциллографа к т. 49. Зарисуйте осциллограммы.
- 1.6. Подключите первый канал осциллографа к т. 50. Зарисуйте осциллограммы.
- 1.7. Подключите **второй** канал осциллографа к т. 53. Зарисуйте осциллограммы.
- 1.8. Подключите **второй** канал осциллографа к т. 55. Зарисуйте осциллограммы.
- 1.9. Отключите питание от стенда.

2. Исследование работы выпрямителя на активную нагрузку

- 2.1. Соедините точки 41-42; 43-44.
- 2.2. Подключите осциллограф: общий провод к т. 42; первый канал (ток) к т. 43; второй канал (напряжение) к т. 46.
- 2.3. Вольтметр постоянного тока подключите к т. 42 и т. 47.
- 2.4. Включите питание стенда и зарисуйте осциллограммы для произвольного положения переменного резистора R_{18} .
- 2.5. Изменяя значение сопротивления R_{18} от максимума до минимума, снимите зависимость (не менее семи точек) среднего значения напряжения на нагрузке U_d (по показаниям вольтметра) от угла отпираания тиристорov α (по осциллограмме в соответствии с рис. 4.2). Одновременно наблюдайте за изменением яркости сигнальной лампы.
- 2.6. Отключите питание от стенда. Разберите схему.
- 2.7. Постройте полученную зависимость $U_d(\alpha)$ на одном графике с теоретической зависимостью в соответствии с формулой (4.1), считая, что $U_{d.\max} = 0,83 \cdot U_m$, где U_m – амплитудное значение фазного напряжения (определить по осциллограмме в т.46).

3. Исследование работы выпрямителя на индуктивную нагрузку

3.1. Во избежание коммутационных перенапряжений за счет ЭДС самоиндукции, установите переменный резистор R_{18} в крайнее левое или крайнее правое положение.

3.2. Соедините точки 41-42; 43-30; 31-45.

3.3. Повторите пункты 2.2 – 2.6.

3.4. Постройте полученную зависимость $U_d(\alpha)$ на одном графике с теоретической зависимостью в соответствии с формулой (4.2), считая, что $U_{d.max} = 0,83 \cdot U_m$, где U_m – амплитудное значение фазного напряжения (определить по осциллограмме в т.46).

4. Исследование работы выпрямителя на микродвигатель

4.1. Во избежание коммутационных перенапряжений за счет ЭДС самоиндукции, установите переменный резистор R_{18} в крайнее левое положение.

4.2. Соедините точки 40-42; 43-56.

4.3. Подключите первый канал осциллографа и вольтметр постоянного тока к т.42 и т.56.

4.4. Включите стенд.

4.5. Произведите регулирование скорости вращения двигателя. Во избежание перегрева двигателя при пуске необходимо быстро увеличивать напряжение до напряжения трогания за время не более 2 ... 3 с.

Определите значения U_d и α , при которых двигатель останавливается.

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, названия опытов, принципиальные схемы измерений, таблицы измерений, осциллограммы, результаты расчетов, краткие выводы по каждому опыту с объяснением полученных осциллограмм.

Контрольные вопросы

1. Принципы работы управляемых выпрямителей.
2. Принципы работы импульсно-фазового блока.
3. Особенности работы управляемых выпрямителей на индуктивную нагрузку.

Литература: [1], [5].

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Исследование функциональных элементов на операционном усилителе

Цель работы: Изучить принципы работы функциональных элементов (простейших схем) на основе операционного усилителя.

Краткие теоретические сведения

Операционный усилитель – универсальная аналоговая интегральная микросхема с дифференциальными, т.е. реагирующими на разность потенциалов входами и собственным коэффициентом усиления, превышающим значение 100000. Условное обозначение операционного усилителя показано на рис. 5.1.



Рис. 5.1

Для операционного усилителя справедливо соотношение:

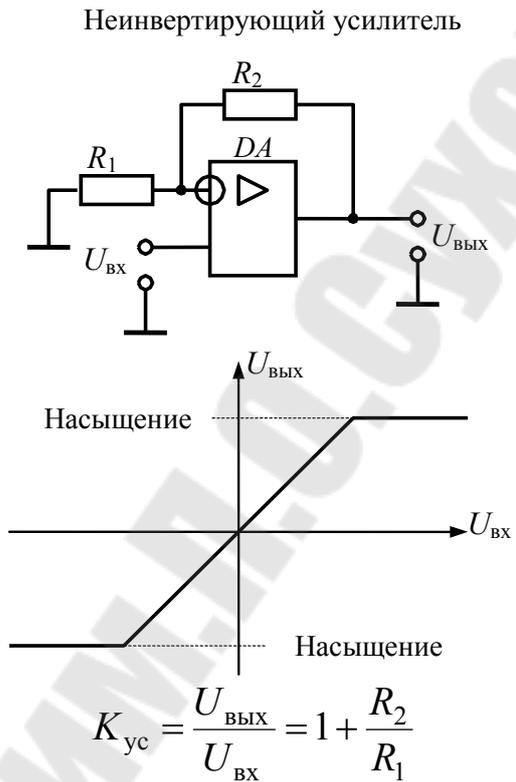
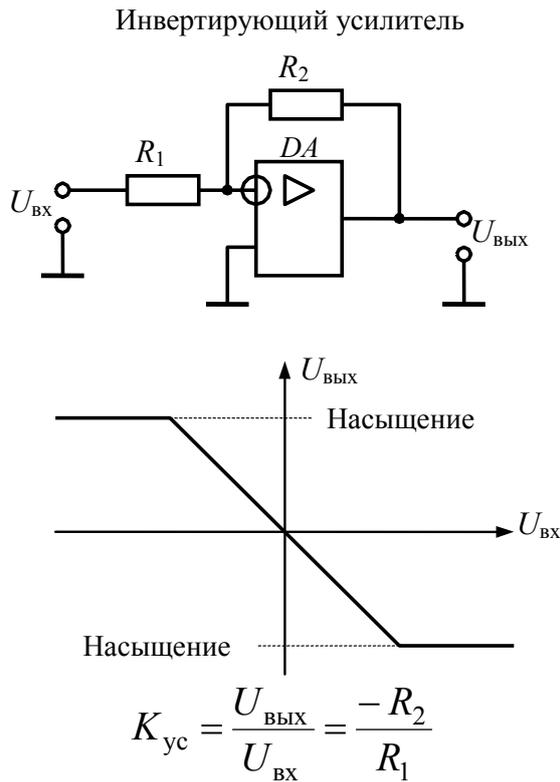
$$U_{\text{вых}} = K_{\text{оу}} \cdot (U_2 - U_1), \quad K_{\text{оу}} = 10^5 \dots 10^6.$$

Основные функциональные элементы на операционном усилителе: инвертирующий усилитель, неинвертирующий усилитель, интегратор, дифференциатор, избирательный усилитель, компаратор, триггер Шмитта.

Принципиальные схемы, передаточные характеристики и расчетные соотношения для коэффициентов усиления $K_{\text{ус}}$ инвертирующего и неинвертирующего усилителей показаны на рис. 5.2.

Принципиальные схемы, временные диаграммы работы и расчетные соотношения для масштабных коэффициентов K инвертирующего интегратора и инвертирующего дифференциатора показаны на рис. 5.3.

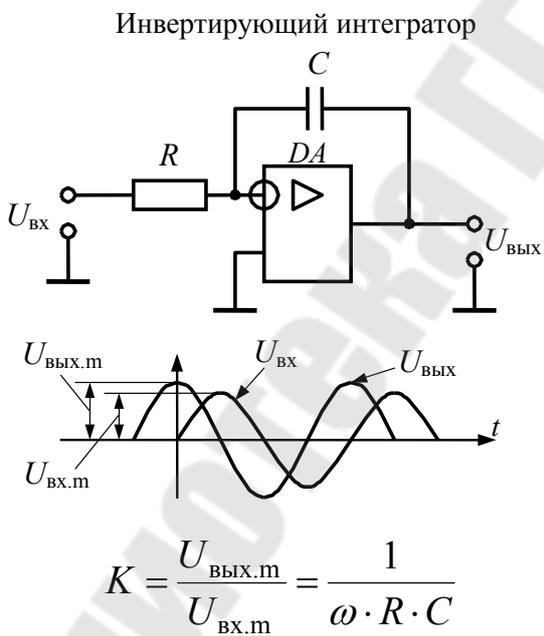
Принципиальная схема, амплитудно-частотная характеристика и расчетные соотношения для частоты квазирезонанса f_0 и добротности Q избирательного усилителя показаны на рис. 5.4.



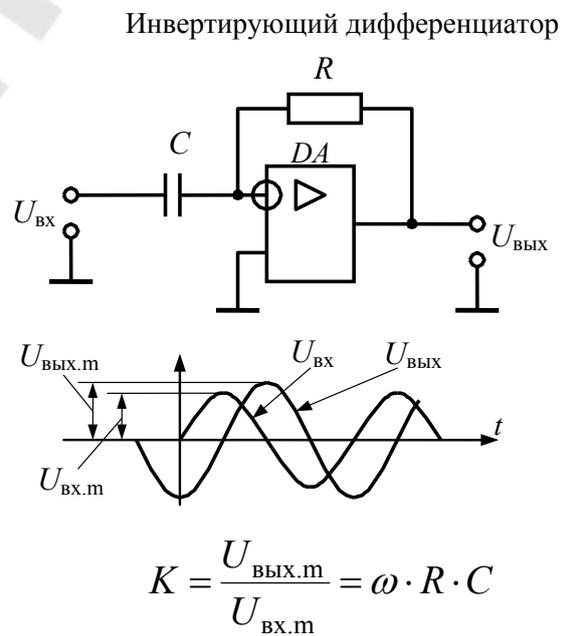
а)

б)

Рис. 5.2

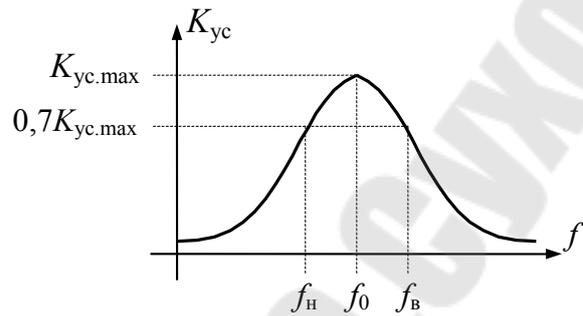
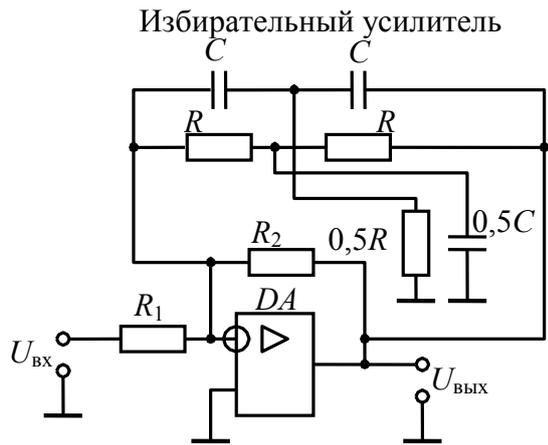


а)



б)

Рис 5.3



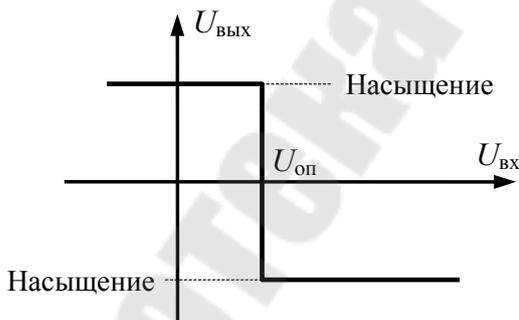
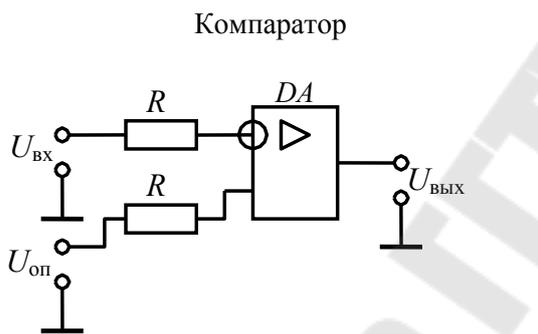
$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}$$

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{f_0}{f_B - f_H}$$

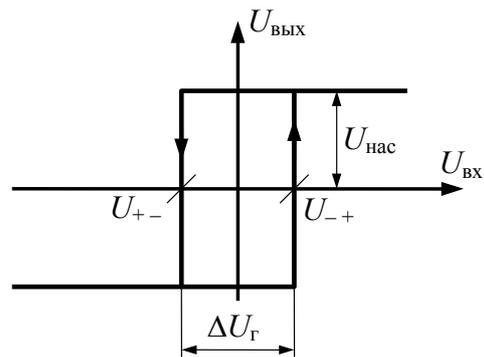
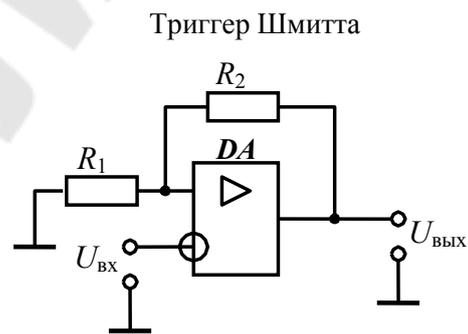
а)

б)

Рис. 5.4



а)



$$\Delta U_{\Gamma} = \frac{R_1 \cdot 2 \cdot U_{\text{нас}}}{R_1 + R_2}$$

б)

Рис. 5.5

Принципиальные схемы и передаточные характеристики для компаратора и триггера Шмитта показаны на рис. 5.5.

Описание лабораторной установки

Внешний вид лабораторной установки



На плате лабораторного стенда размещены необходимые электронные компоненты для исследования требуемых схем. Питание стенда осуществляется от специального разъема. При подключении разъема питание (разнополярное напряжение $+15\text{В}$ и -15В) сразу подается на стенд.

Внимание! Во избежание выхода из строя электронных компонентов при сборке и разборке схемы питание стенда необходимо обязательно отключать, то есть отсоединить питающий разъем (удерживая его за пластмассовый корпус). Вращение регуляторов переменных сопротивлений осуществлять только с помощью отвертки, не прикладывая больших усилий.

На лицевую панель платы вынесены контрольные точки (штырьки), которые можно соединить с помощью гибких перемычек. В зависимости от комбинации контрольных точек получают различные функциональные устройства, приведенные в табл. 3.1.

Для проведения работы необходим двухканальный осциллограф, универсальный цифровой вольтметр и омметр.

Порядок выполнения работы

Номера соединения контрольных точек, а также точки подключения измерительных приборов в соответствии с заданным вариантом сведены в табл. 5.1. При этом использованы следующие обозначения: ЭО – электронный двухканальный осциллограф; =PV – цифровой вольтметр постоянного тока; ГПС – генератор периодических сигналов. Значения сопротивлений и емкостей необходимо определять по надписям на корпусах соответствующих резисторов и конденсаторов, за исключением переменного сопротивления R_{10} , которое необходимо измерять с помощью омметра при отключенном от платы питающем разъеме и разобранной схеме.

5. Исследование инвертирующего и неинвертирующего усилителей (табл. 5.1, п. 1, 2)

Вначале собрать и исследовать инвертирующий усилитель, а затем неинвертирующий усилитель.

5.1. После сборки схемы установить в произвольное (но не крайнее) положение переменное сопротивление R_{10} .

5.2. Вращая во всем диапазоне потенциометр R_2 , снять передаточную характеристику усилителя, то есть зависимость выходного напряжения (т. 18) от входного напряжения (т. 4). Полученные значения (не менее 12 точек), а также значения экспериментального коэффициента усиления $K_{ус.э}$ записать в табл. 5.2. Рассчитать среднее значение $K_{ус.э}$. Построить передаточную характеристику усилителя.

5.3. При разобранной схеме и отключенном от платы питания измерить с помощью омметра (при участии преподавателя) сопротивления R_6 и R_{10} .

5.4. Рассчитать теоретический коэффициент усиления, который для инвертирующего усилителя равен $K_{ус.т} = \frac{-R_{10}}{R_6}$ (знак «-» означает, что входное напряжение и выходное противоположны по знаку), а для неинвертирующего $K_{ус.т} = 1 + \frac{R_{10}}{R_6}$. Сравнить этот коэффициент со средним значением экспериментального коэффициента усиления.

Таблица 5.1

№ п/п	Наименование схемы	Номера соединения контрольных точки	Источник входного сигнала	Подключение измерительных приборов	№ рис.
1.	Инвертирующий усилитель	10-11; 7-9; 6-4	от резистора R2 на плате	=PV: 4-9;18-9	3.2, а
2.	Неинвертирующий усилитель	10-11; 6-9; 7-4	от резистора R2 на плате	=PV: 4-9;18-9	3.2, б
3.	Интегратор	11-16; 7-4	ГПС: 6-9	ЭО: 6-9;18-9	3.3, а
4.	Дифференциатор	10-11; 7-9	ГПС: 5-9	ЭО: 5-9;18-9	3.3, б
5.	Избирательный усилитель	11-3;11-13; 17-18	ГПС: 7-9	ЭО: 18-9	3.4
6.	Генератор гармонических колебаний	11-3; 11-10; 17-18; 12-13; 6-9	нет	ЭО: 18-9	-
7.	Компаратор	7-2; 6-4	от резистора R2 на плате	ЭО: 18-9 =PV: 2-9; 4-9	3.5, а
8.	Триггер Шмитта	12-13; 6-4	от резистора R2 на плате	ЭО: 18-9 =PV: 4-9	3.5, б
9.	Мультивибратор	10-11; 12-13; 5-9	нет	ЭО: 18-9; 11-9	-

Таблица 5.2

$U_{вх}, В$												
$U_{вых}, В$												
$K_{ус.э} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$												

6. Исследование интегратора и дифференциатора (табл. 5.1, п. 3,4)

Вначале собрать и исследовать интегратор, а затем дифференциатор.

6.1. Генератор периодических сигналов и осциллограф при помощи преподавателя настроить, установив на генераторе синусоидальную форму сигнала.

6.2. Срисовать с экрана осциллографа осциллограммы входного (т. 6 для интегратора и т. 5 для дифференциатора) и выходного (т. 18) напряжений.

6.3. Определить амплитуды входного $U_{вх.м}$ и выходного $U_{вых.м}$ напряжений. Рассчитать экспериментальный масштабный коэффициент

ент $K_3 = \frac{U_{\text{вых.м}}}{U_{\text{вх.м}}}$, и сравнить его с теоретическим масштабным коэф-

фициентом, равным для интегратора $K_T = \frac{1}{\omega \cdot R_6 \cdot C_6}$ и для дифферен-

циатора $K_T = \omega \cdot R_{10} \cdot C_2$.

6.4. Установить на генераторе периодических сигналов сигнал прямоугольной формы для интегратора и сигнал треугольной формы для дифференциатора. Срисовать и объяснить в отчете полученные осциллограммы.

7. Исследование избирательного усилителя (полосопропускающего фильтра) (табл. 5.1, п. 5)

7.1. Генератор периодических сигналов и осциллограф настроить при помощи преподавателя и установить на генераторе синусоидальную форму сигнала.

7.2. Изменяя частоту входного сигнала (т. 7) на генераторе в заданных преподавателем пределах, снять амплитудно-частотную характеристику частотного фильтра, то есть зависимость амплитуды выходного сигнала $U_{\text{вых.м}}$ (т. 18) от частоты f (не менее 12 точек).

7.3. Построить график зависимости $U_{\text{вых.м}}(f)$. Определить графически основные параметры избирательного усилителя: частоту квазирезонанса f_0 , верхнюю $f_{\text{в}}$ и нижнюю $f_{\text{н}}$ частоты полосы пропускания, добротность Q , как это показано на рис. 5.4, б.

8. Исследование генератора гармонических колебаний (табл. 5.1, п. 6)

8.1. Зарисовать схему генератора.

8.2. После подачи питания изменением сопротивления R_{10} добиться устойчивого синусоидального сигнала на экране осциллографа.

8.3. Срисовать осциллограмму и измерить частоту сигнала. Сравнить эту частоту с расчетной частотой, определяемой по форму-

ле: $f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_5 \cdot C_1}$.

9. Исследование компаратора (табл. 5.1, п. 7)

Собрать схему компаратора (см. табл. 3.1, п. 6) и изменяя входное напряжение (т. 4) с помощью переменного сопротивления R_2 , добиться переключения компаратора (контролировать выходной сигнал

в т. 18 с помощью осциллографа). На границе переключения измерить входное напряжение $U_{\text{вх}}$ (т. 4) и опорное напряжение $U_{\text{оп}}$ (т. 18). Определить чувствительность компаратора $\Delta U = U_{\text{вх}} - U_{\text{оп}}$. Построить передаточную характеристику компаратора, как это показано на рис. 3.5, а.

10. Исследование триггера Шмита (табл. 5.1, п. 8)

10.1. Изменяя входное напряжение (т. 4) с помощью переменного сопротивления R_2 , добиться переключения триггера Шмитта (контролировать выходной сигнал в т. 18 с помощью осциллографа). На границе переключения триггера Шмитта из положительного выходного напряжения в отрицательное напряжение измерить входное напряжение переключения $U_{+ -}$. Аналогично на границе переключения из отрицательного выходного напряжения в положительное напряжение измерить входное напряжение переключения $U_{- +}$.

10.2. Построить передаточную характеристику триггера Шмитта, как это показано на рис. 3.5, б.

10.3. Определить экспериментальное значение ширины петли гистерезиса $\Delta U_{\text{г.э}} = U_{-+} - U_{+-}$ и сравнить его с теоретическим значением $\Delta U_{\text{г.т}} = \frac{R_{13} \cdot 2 \cdot U_{\text{нас}}}{R_{13} + R_{12}}$, где $U_{\text{нас}}$ – напряжение насыщения операционного усилителя (определить по осциллографу).

10.4. Добавить к собранной схеме переключку 13-19 и повторить пункты 5.1 – 5.3, учитывая при этом, что параллельно к сопротивлению R_{13} подключено сопротивление R_{14} .

11. Исследование мультивибратора (табл. 5.1, п. 9)

11.1. После сборки схемы установить в произвольное (но не крайнее) положение переменное сопротивление R_{10} .

11.2. После подачи питания срисовать осциллограммы напряжений на выходе схемы (т. 18) и на конденсаторе (т. 11).

11.3. Определить частоту выходного сигнала и сравнить ее с расчетной частотой, определяемой по формуле

$$f = \frac{1}{2 \cdot R_{10} \cdot C_2 \cdot \ln(1 + 2 \cdot R_{13} / R_{12})}.$$

Для этого необходимо при разобранной схеме и отключенном от платы питания измерить с помощью омметра (при участии преподавателя) сопротивление R_{10} .

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, названия опытов, принципиальные схемы измерений, таблицы измерений, осциллограммы, результаты расчетов, краткие выводы по каждому опыту с объяснением полученных осциллограмм.

Контрольные вопросы

1. Операционный усилитель: условные обозначения, принципы работы, основные параметры, области применения.
2. Инвертирующий и неинвертирующий усилители: схемы, принципы работы, основные параметры, области применения.
3. Интегратор и дифференциатор: схемы, принципы работы, основные параметры, области применения.
4. Избирательный усилитель на основе двойного Т-образного моста: схема, принципы работы, основные параметры, области применения.
5. Компаратор и триггер Шмитта: схемы, принципы работы, основные параметры, области применения.
6. Мультивибратор: схемы, принципы работы, основные параметры, области применения.

Литература: [1], [2], [3], [4].

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

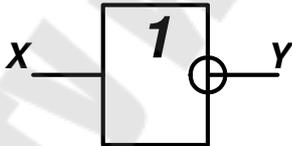
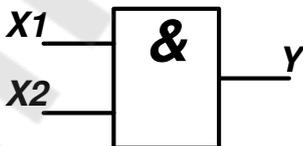
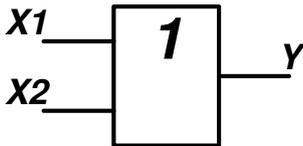
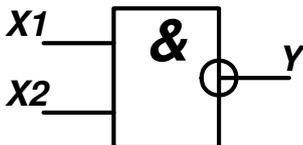
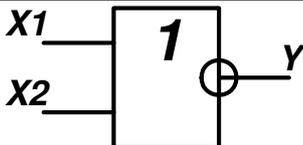
Исследование логических и функциональных элементов на цифровых интегральных микросхемах

Цель работы: Изучить принципы работы основных логических и функциональных элементов (простейших схем) на основе цифровых интегральных микросхем.

Краткие теоретические сведения

Цифровая интегральная микросхема – сложное электронное устройство, выполненное в пределах одного корпуса одного полупроводникового кристалла и предназначенное для работы с цифровыми сигналами.

Таблица 6.1

№ п/п	Логическая операция	Название логического элемента	Условное обозначение логического элемента	Таблица истинности															
1	Отрицание	НЕ		<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	X	Y	0	1	1	0									
X	Y																		
0	1																		
1	0																		
2	Конъюнкция	И		<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>X1</th> <th>X2</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	X1	X2	Y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
X1	X2	Y																	
0	0	0																	
0	1	0																	
1	0	0																	
1	1	1																	
3	Дизъюнкция	ИЛИ		<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>X1</th> <th>X2</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	X1	X2	Y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
X1	X2	Y																	
0	0	0																	
0	1	1																	
1	0	1																	
1	1	1																	
4	Конъюнкция с отрицанием	И-НЕ		Исследуется в работе															
5	Дизъюнкция с отрицанием	ИЛИ-НЕ		Исследуется в работе															

Цифровыми называют сигналы, имеющие два устойчивых состояния, одно из которых соответствует логическому «0», а другое – логической «1».

Логический элемент – часть цифровой интегральной микросхемы, выполняющая одну или несколько логических операций: конъюнкцию (логическое умножение), дизъюнкцию (логическое сложение) и отрицание (логическую инверсию).

Основные логические элементы, их названия, условные обозначения и таблицы истинности приведены в табл. 6.1.

Основными функциональными элементами на цифровых интегральных микросхемах являются: RS – триггер, D – триггер, T – триггер, двоичный счетчик, формирователь коротких импульсов, одновибратор, мультивибратор. Схемы (или условные обозначения) этих элементов приведены на рис. 6.1. и рис. 6.2.

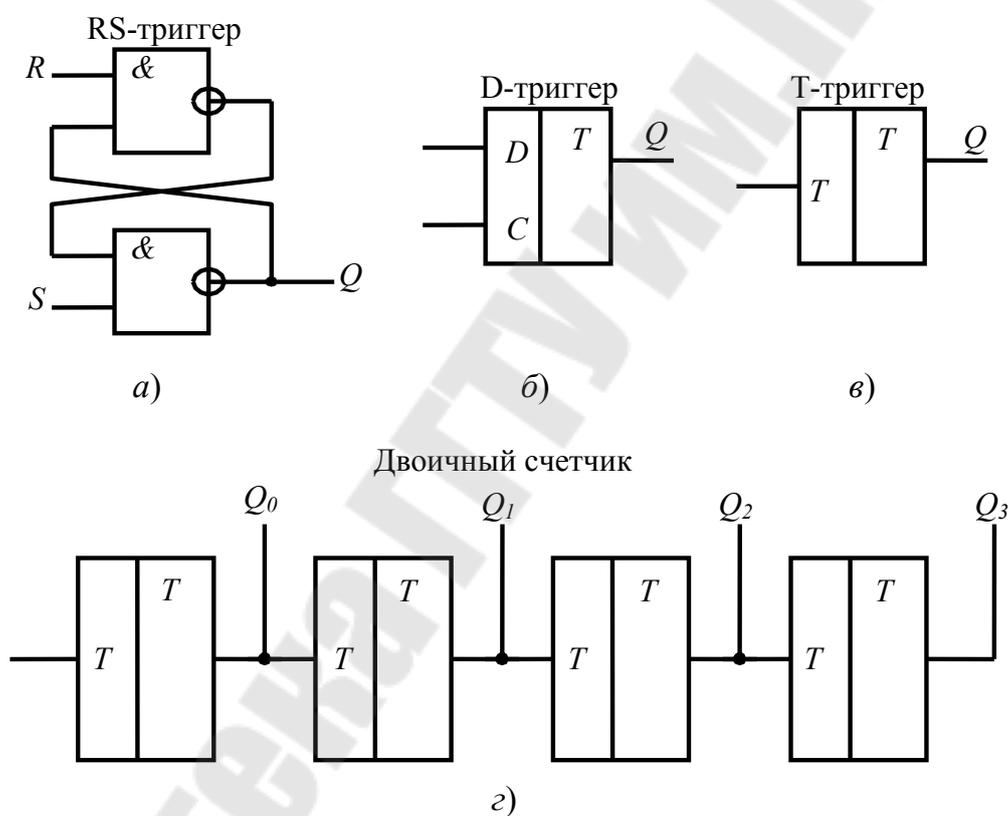
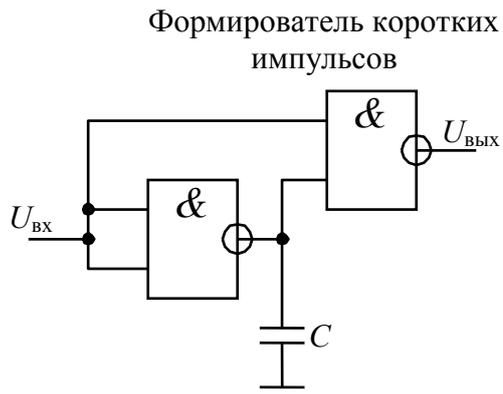
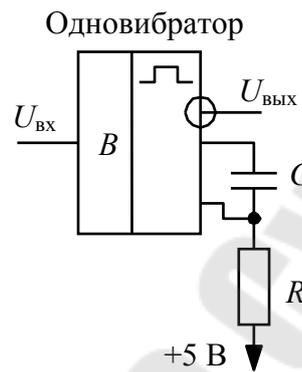


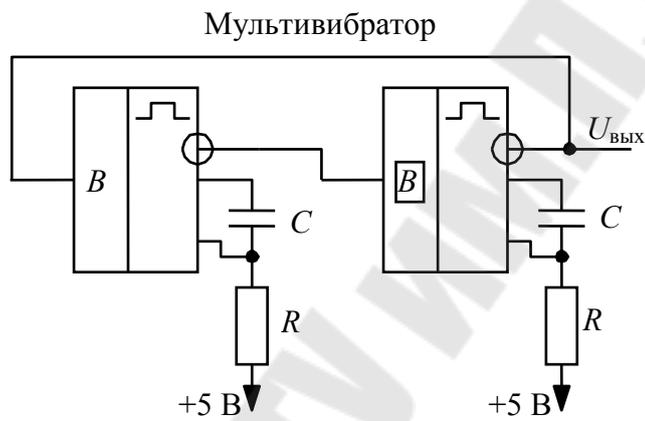
Рис. 6.1



а)



б)

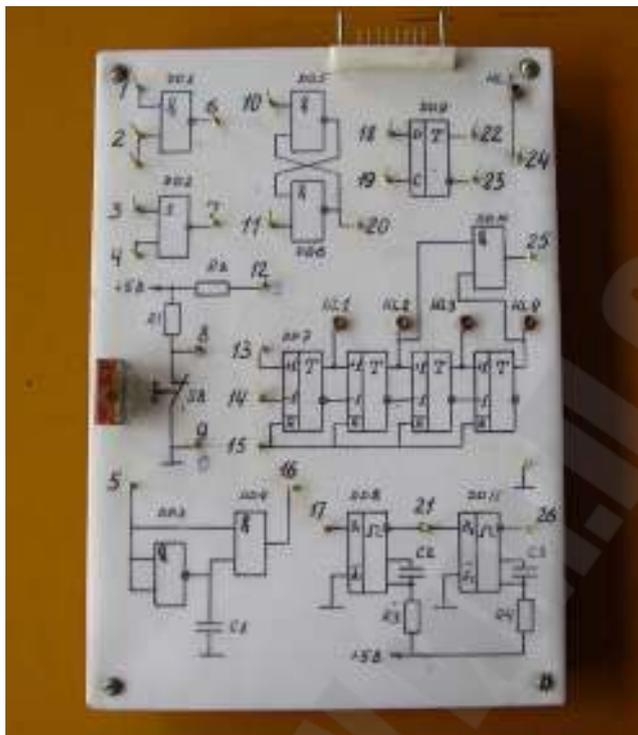


в)

Рис. 6.2

Описание лабораторной установки

Внешний вид лабораторной установки



На плате лабораторного стенда размещены необходимые электронные компоненты для исследования требуемых схем. Питание стенда осуществляется от специального разъема. При подключении разъема питание напряжением +5В сразу подается на стенд.

Внимание! Во избежание выхода из строя электронных компонентов при сборке и разборке схемы, питание стенда необходимо обязательно отключить, то есть отсоединить питающий разъем (удерживая его за пластмассовый корпус). При работе с входами цифровых микросхем питание можно не отключать.

На лицевую панель платы вынесены контрольные точки (штырьки), которые можно соединить с помощью гибких перемычек.

В качестве средства отображения информации на плате стенда используются светодиоды. Если светодиод светится, то он отображает логическую «1», если не светится – логический «0».

На плате логическая «1» снимается с т. 12, а логический «0» – с т. 9.

Порядок выполнения работы

1. Исследование простейших логических элементов

1.1. Логический элемент И-НЕ (табл. 6.1, п. 4)

Соедините точки 6-24. Зарисуйте в черновик заготовку таблицы истинности логического элемента по аналогии с табл. 6.1, п. 2, оставив третий столбец пустым. При включенном питании платы подавайте на входы логического элемента логические уровни сигналов с помощью соединительных проводов в соответствии с таблицей истинности. При этом X1 – это точка 1; X2 – это точка 2. Результат контролируйте по светодиоиду. Если светодиод светится, то $Y = 1$, если не светится, то $Y = 0$. Подайте все возможные комбинации логических уровней на входы логического элемента и заполните третий столбец таблицы истинности. Разберите схему.

1.2. Логический элемент ИЛИ-НЕ (табл. 6.1, п. 5)

Соедините точки 7-24 и повторите пункт 1.1. При этом X1 – это т. 3; X2 – это т. 4. Разберите схему.

2. Исследование цифровых триггеров.

2.1. RS – триггер (рис. 6.1, а)

Соедините точки 20-24. Возьмите соединительный провод и подключите его одним контактом к точке 9, а другой контакт просто положите на стол. Больше соединительных проводов в данном опыте не требуется. Зарисуйте заготовку таблицы состояний RS – триггера.

Таблица 6.2

R	S	Q_n	Q_{n-1}
1	1		
1	0		
1	1		
0	1		
1	1		

R – это т. 10; S – т. 11; Q_n – текущее состояние триггера (контролируется по светодиоду); Q_{n-1} – предыдущее состояние триггера.

Подайте питание на стенд.

Внимание! не дотрагивайтесь пальцами до входных штырьков триггера!

Обратите внимание, что вначале на входы триггера R и S ничего не подано, и они находятся «в воздухе». В таком состоянии на входах автоматически наводится логическая «1». Занесите это начальное состояние в первую строку таблицы состояний. Для реализации второй строки таблицы подайте помощью провода логический «0» на вход S (с т. 9-11). На вход R не подавайте ничего (т. е. логическая «1»).

Для реализации третьей строки таблицы отсоедините провод с т. 11. Подобным образом заполните всю таблицу.

Отметьте в таблице три основных состояния RS – триггера:

- 1) режим хранения информации (когда $Q_n = Q_{n-1}$);
- 2) режим установки в «1»;
- 3) режим сброса в «0».

Разберите схему.

2.2. D – триггер (рис. 6.1, б)

Соедините т. 22-24; 8-19; 18-12. Продумайте назначение кнопки SB, рассмотрев ее чертеж на стенде. Обратите внимание, что контакт нормально замкнут. Задача опыта – составить времяимпульсную диаграмму работы триггера. Нарисуйте заготовку диаграммы произвольной формы, но подобной диаграмме, показанной на рис. 6.3.

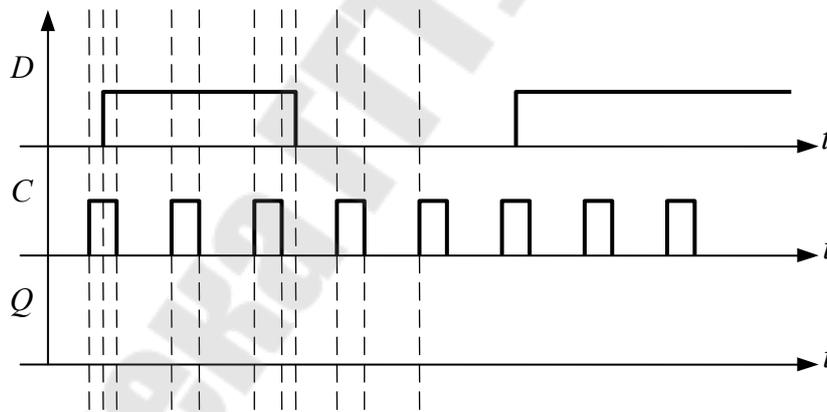


Рис. 6.3

Сделайте отсечки временных интервалов с помощью штрихпунктирных линий, как показано на рисунке. Подайте питание на стенд, а затем проделайте следующие действия:

- а) с помощью провода установите необходимый логический уровень на входе D триггера (для данного временного интервала);
- б) с помощью кнопки SB установите необходимый логический уровень на входе C триггера (нажмите или отпустите кнопку в зави-

симости от значения сигнала на входе C для данного временного интервала);

в) в соответствии с показаниями светодиода для каждого временного интервала зарисуйте форму сигнала на выходе Q триггера.

Разберите схему.

2.3. Т – триггер (рис. 6.1, в)

Соедините точки 8-19; 18-23; 22-24. Зарисуйте заготовку время-импульсной диаграммы, как показано на рис. 6.4.

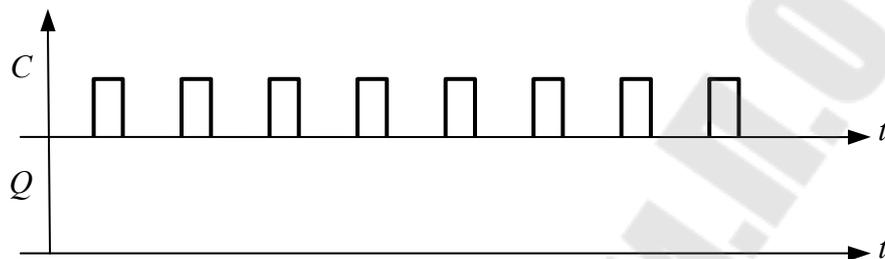


Рис. 6.4

Для формирования последовательности импульсов на входе C триггера понажимайте на кнопку SB . Проследите за состояниями светодиода и зарисуйте сигнал, получаемый на выходе Q триггера. Разберите схему.

3. Исследование цифровых счетчиков (рис. 6.1, г)

3.1. Двоичный реверсивный счетчик в режиме прямого счета

Соберите схему: 8-13; 14-12; 9-15. Зарисуйте заготовку таблицы состояний (табл. 6.3).

Таблица 6.3

№ импульса	HL ₄	HL ₃	HL ₂	HL ₁
0	0	0	0	0

Нажимая на кнопку SB , добейтесь показания логических «0» на светодиодах HL₁-HL₄. Подавая счетные импульсы с помощью кнопки SB , заполните таблицу состояний.

3.2. Двоичный реверсивный счетчик в режиме обратного счета

Не разбирая предыдущую схему, поменяйте местами провода в точках 13 и 14. Подавая счетные импульсы с помощью кнопки SB , за-

полните таблицу состояний, аналогичную табл. 6.3, начиная со всех «1». Разберите схему.

3.3. Двоично-десятичный счетчик

Соберите схему: 8-13; 12-14; 15-25. Подавая счетные импульсы с помощью кнопки SB, заполните таблицу состояний, аналогичную табл. 6.3. Разберите схему.

4. Исследование функциональных элементов для формирования импульсов

4.1. Формирователь коротких импульсов (рис. 6.2, а)

Соберите схему: 8-5; 16-24. Зарисуйте заготовку времяимпульсной диаграммы, как показано на рис. 6.5.

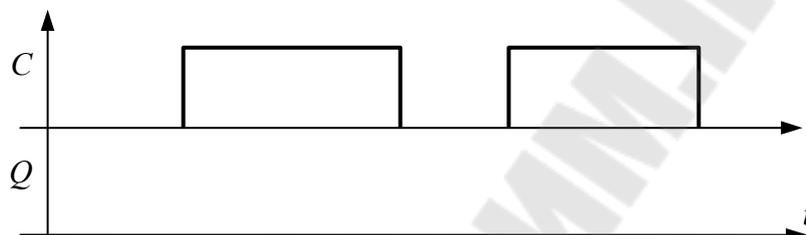


Рис. 6.5

С помощью кнопки SB подайте единичный импульс на вход схемы. Проследите, что происходит со светодиодом. Зарисуйте форму сигнала на выходе Q схемы. Разберите схему.

4.2. Одновибратор (формирователь синхронизирующих импульсов) (рис. 6.2, б)

Соберите схему: 8-17; 21-24. Зарисуйте заготовку времяимпульсной диаграммы, как показано на рис. 6.6.

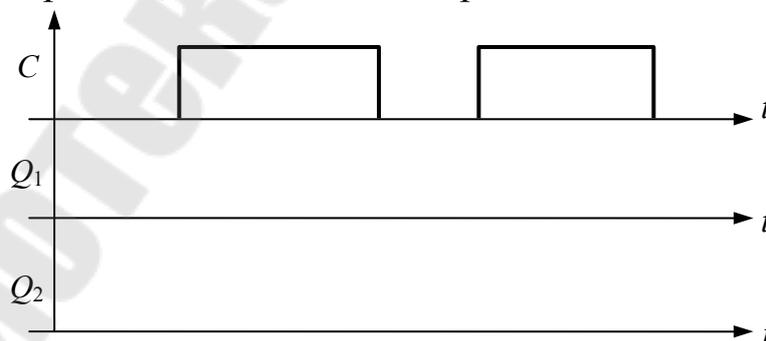


Рис. 6.6

При поданном питании с помощью кнопки SB подайте длинный единичный импульс на вход схемы. Проследите, что происходит со светодиодом. Зарисуйте форму сигнала на выходе Q_1 схемы (т. 21).

Проделайте то же самое для выхода Q_2 схемы, переключив провод из т. 21 в т. 26. Разберите схему.

4.3. Мультивибратор (генератор импульсов) (рис. 6.2, в)

Соберите схему: 17-26; 21-24. При поданном питании проследите, что происходит со светодиодом. Зарисуйте форму сигнала на выходе Q схемы. Подсчитайте количество колебаний мультивибратора за 100 секунд. Рассчитайте частоту f и период T колебаний мультивибратора. Повторите опыт еще два раза и вычислите среднее значение периода T . Разберите схему.

5. Элемент задержки (реле времени)

Соберите схему: 25-24; 3-24; 17-26; 21-4; 7-13; 6-15; 2-8. С помощью преподавателя зарисуйте функциональную схему элемента задержки. При поданном питании и нажатой кнопке SB дождитесь срабатывания схемы (по светодиоду HL₅). Используя ручной секундомер (например, в сотовом телефоне), определите время срабатывания схемы t_3 . Повторите опыт еще пять раз и вычислите среднее значение времени t_3 . Сравните полученное значение t_3 с теоретическим значением, составляющим $10T$, где T значение периода, полученное из предыдущего опыта. Вычислите относительную погрешность и разберите схему.

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, названия опытов, условные обозначения элементов или исследуемые схемы, таблицы истинности, диаграммы, результаты расчетов, краткие выводы по каждому опыту с объяснением полученных диаграмм.

Контрольные вопросы

1. Логические элементы: классификация, условные обозначения, таблицы истинности, области применения.
2. Цифровые триггеры RS, D и T: условные обозначения, схемы, принципы работы, области применения.
3. Двоичный счетчик: схема, принципы работы, области применения.
4. Формирователи коротких и синхронизирующих импульсов: схемы, принципы работы, области применения.
5. Принцип работы элемента задержки (реле времени), исследованного в лабораторной работе.

Литература: [1], [2], [3], [5].

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Исследование цифро-аналоговых и аналогово-цифровых преобразователей

Цель работы: Изучить принципы работы цифро-аналоговых (ЦАП) и аналогово-цифровых преобразователей (АЦП).

Краткие теоретические сведения

ЦАП – это функциональный элемент электронной техники, преобразующий входной двоичный код (набор логических «0» и «1») в пропорциональное аналоговое постоянное напряжение.

АЦП – это функциональный элемент электронной техники, преобразующий входное аналоговое напряжение в пропорциональный двоичный код (выполняет обратное преобразование ЦАП).

Условные обозначения n -разрядных ЦАП и АЦП, а также основные расчетные соотношения приведены на рис. 7.1.

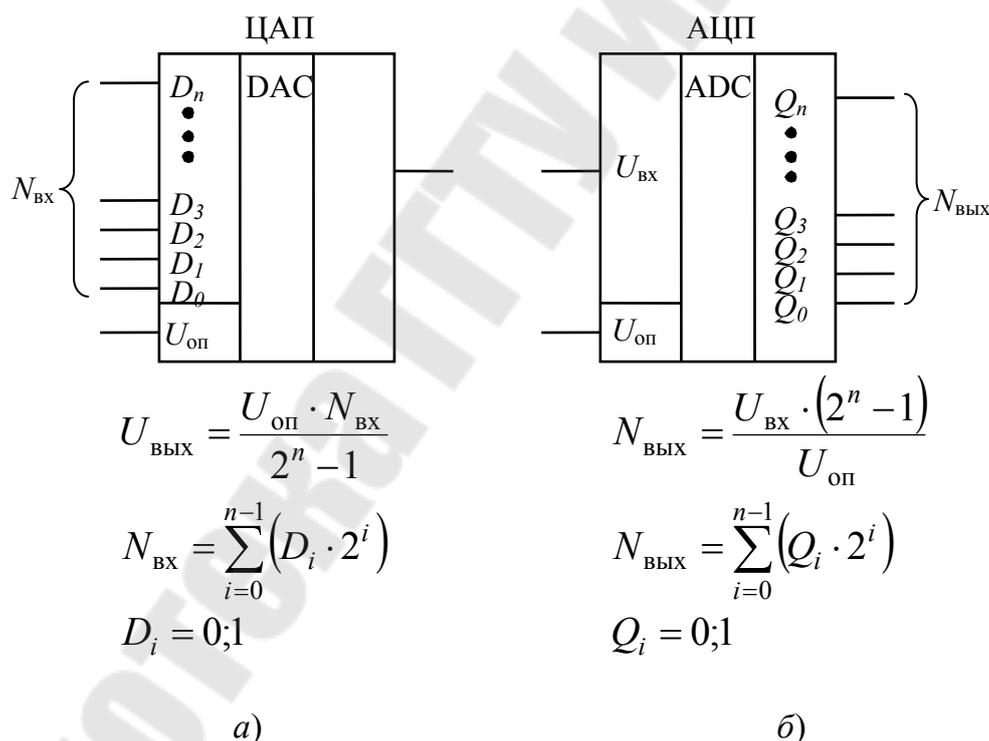


Рис. 7.1

На рис. 7.1 обозначено: $N_{\text{ВХ}}$ и $N_{\text{ВЫХ}}$ – соответственно входной и выходной двоичные коды; $U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}$ – соответственно значения входного и выходного напряжений; D_i и Q_i – логические уровни цифровых входов и выходов соответственно; $U_{\text{оп}}$ – опорное напряжение.

Двухквadrантными называют ЦАП и АЦП, у которых опорное напряжение $U_{\text{оп}}$ может принимать как положительные, так и отрицательные значения, а двоичный код N – только положительные значения.

Четырехквadrантными называют ЦАП и АЦП, у которых и опорное напряжение $U_{\text{оп}}$ и двоичный код N могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. При этом старший разряд двоичного кода считается знаковым, т.е. когда он равен единице, двоичное число является отрицательным.

Передаточные характеристики ЦАП и АЦП приведены на рис. 7.2.

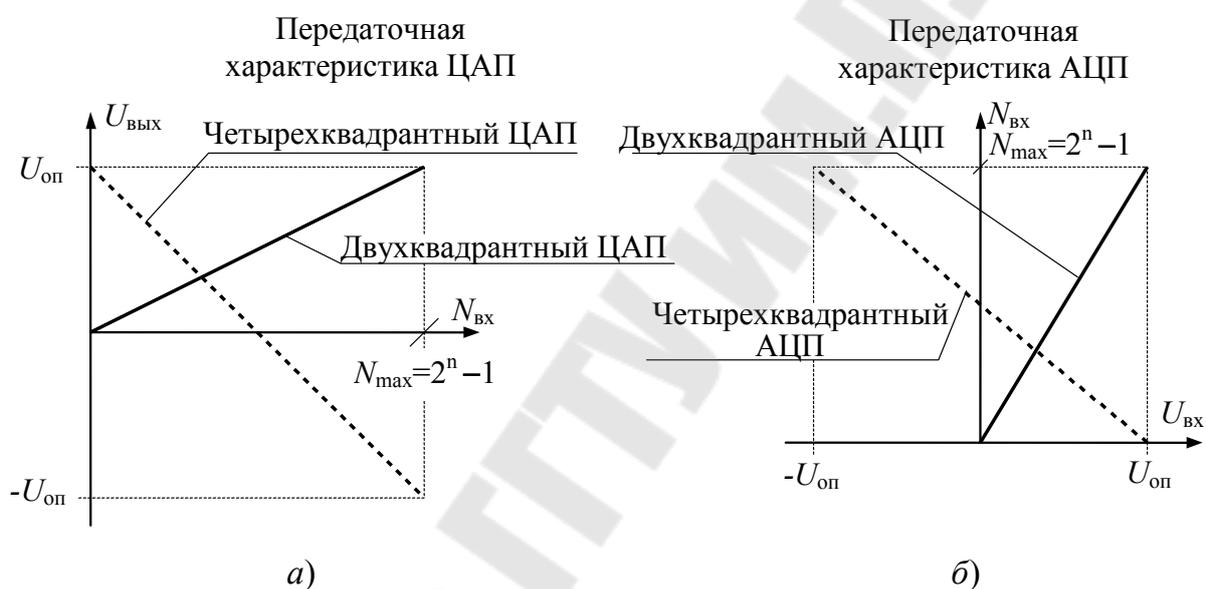


Рис. 7.2

Одним из самых распространенных типов АЦП является АЦП последовательных приближений, который реализуется на основе ЦАП. Структурная схема такого АЦП приведена на рис. 7.3.

Генератор импульсов ГИ вырабатывает последовательность цифровых импульсов, которая с помощью двоичного счетчика СЧ преобразуется в двоичный код. Этот код поступает на цифровые входы ЦАП, где преобразуется в пропорциональное постоянное напряжение $U_{\text{ЦАП}}$, подаваемое на один из входов компаратора K . На второй вход компаратора подается входное напряжение $U_{\text{вх}}$. Компаратор сравнивает напряжения на своих входах, и при достижении равенства $U_{\text{вх}} = U_{\text{ЦАП}}$ выдает сигнал, останавливающий работу генератора импульсов. При этом на выходе счетчика фиксируется двоичный код, пропорциональный напряжению $U_{\text{вх}}$.

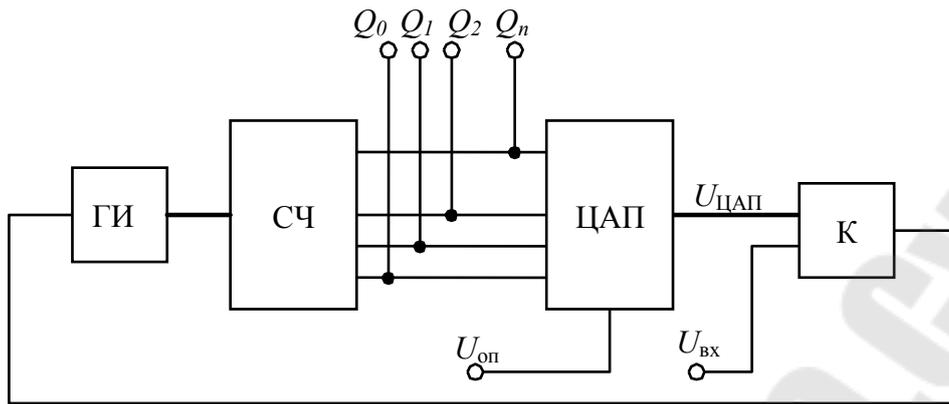
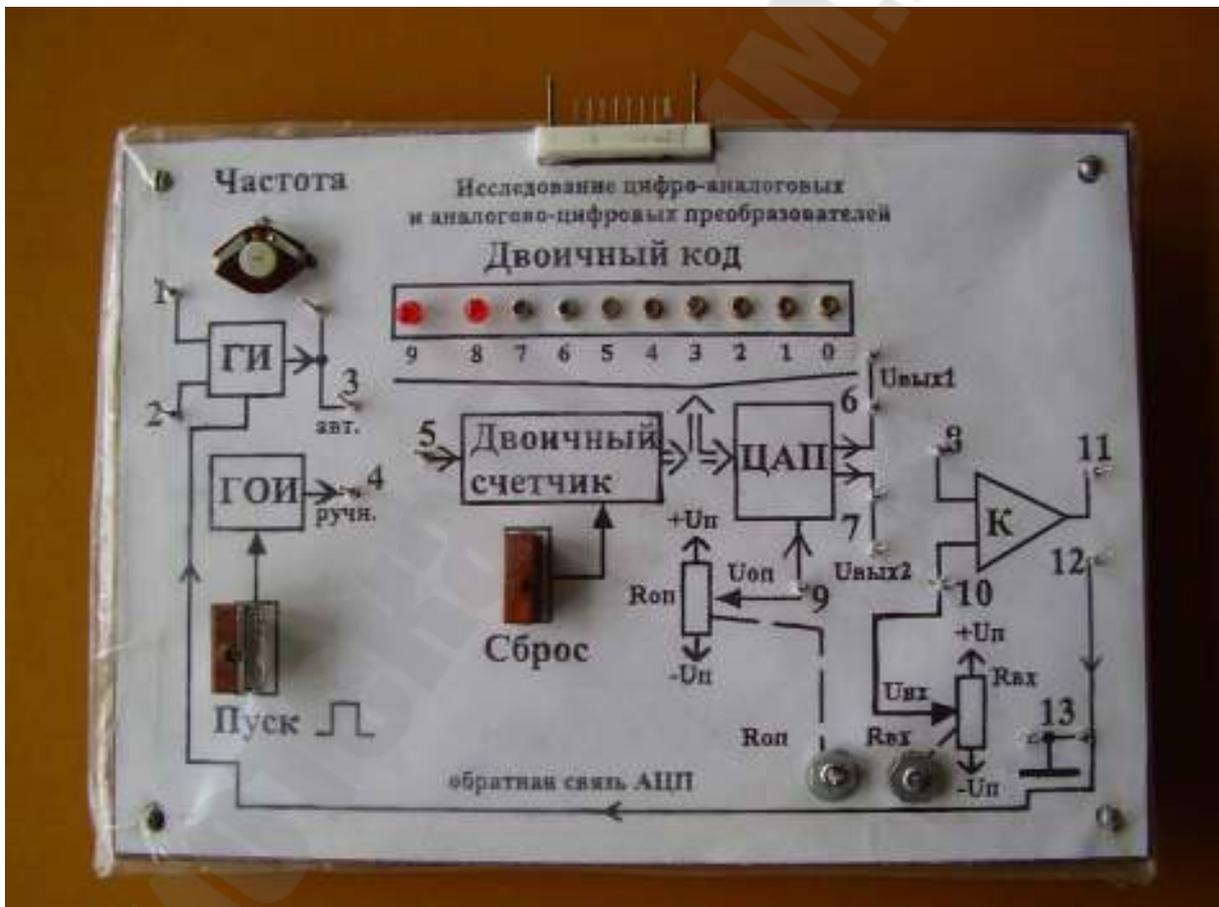


Рис. 7.3

Описание лабораторной установки

Внешний вид лабораторной установки



На плате лабораторного стенда размещены необходимые электронные компоненты для исследования требуемых схем. Питание стенда осуществляется от специального разъема. При подключении разъема питание сразу подается на стенд.

Внимание! Во избежание выхода из строя электронных компонентов при сборке и разборке схемы питание стенда необходимо обязательно отключить, то есть отсоединить питающий разъем, удерживая его за пластмассовый корпус.

На лицевую панель платы вынесены контрольные точки (штырьки), которые можно соединить с помощью гибких перемычек.

В качестве средства отображения информации на плате стенда используются светодиоды. Если светодиод светится, то он отображает логическую «1», если не светится – логический «0».

На плате расположены следующие элементы: ГИ – генератор импульсов; ГОИ – генератор одиночных импульсов, формирующий цифровой импульс при нажатии кнопки «Пуск»; двоичный счетчик, который можно установить в исходное (нулевое) состояние нажатием кнопки «Сброс»; ЦАП с двумя выходами: $U_{\text{вых1}}$ – выход двухквadrантного ЦАП, $U_{\text{вых2}}$ – выход четырехквadrантного ЦАП; K – компаратор; $R_{\text{вх}}$ и $R_{\text{оп}}$ – соответственно, переменные резисторы для регулировки входного и опорного напряжений.

Порядок выполнения работы

1. Исследование ЦАП (рис. 7.1, а; рис. 7.2, а)

1.1. Подключите генератор одиночных импульсов к двоичному счетчику, соединив т. 4-5 (следите, чтобы провод надежно держался на штырьках).

1.2. При поданном на плату питания установите заданное преподавателем опорное напряжение $U_{\text{оп}}$, подключив вольтметр между т. 9-13.

1.3. Обнулите двоичный счетчик однократным нажатием кнопки «Сброс».

1.4. Снимите зависимости $U_{\text{вых1}}(N_{\text{вх}})$ и $U_{\text{вых2}}(N_{\text{вх}})$, периодически подавая импульсы на счетчик с помощью кнопки «Пуск». При этом для измерения напряжений $U_{\text{вых1}}$ и $U_{\text{вых2}}$ поочередно подключайте вольтметр между т. 6-13 и 7-13. Измерения проводите каждые 32 импульса, т.е. в результате необходимо иметь 32 значения для каждого из напряжений. Результаты измерений занесите в таблицу, аналогичную табл. 7.1.

1.5. Разберите схему.

1.6. Рассчитайте требуемые значения $U_{\text{вых1}}$ и $U_{\text{вых2}}$ по форму-

лам: $U_{\text{вых1}} = \frac{-U_{\text{оп}} \cdot N_{\text{вх}}}{N_{\text{max}}}$; $U_{\text{вых2}} = \frac{2 \cdot U_{\text{оп}} \cdot \left(N_{\text{вх}} - \frac{N_{\text{max}}}{2} \right)}{N_{\text{max}}}$ и занесите ре-

зультаты расчета в таблицу.

Таблица 7.1

$N_{\text{вх}}$	Двоичный код	Измерения		Расчет	
		$U_{\text{вых1}}, \text{В}$	$U_{\text{вых2}}, \text{В}$	$U_{\text{вых1}}, \text{В}$	$U_{\text{вых2}}, \text{В}$
0	0000000000				
32	0000010000				
64	0000100000				
...	...				
1023	1111111111				

1.7. Постройте измеренные и расчетные зависимости $U_{\text{вых1}}(N_{\text{вх}})$ и $U_{\text{вых2}}(N_{\text{вх}})$.

1.8. Определите погрешности нелинейности ЦАП $\Delta U_{\text{вых1}}$ и $\Delta U_{\text{вых2}}$ как максимальные отклонения экспериментальных значений от расчетных.

2. Исследование АЦП (рис. 7.1, б; рис. 7.2, б; рис. 7.3)

2.1. Соберите схему двухквadrантного АЦП последовательных приближений, соединив т. 1-2; 3-5; 6-8; 11-12.

2.2. При поданном на плату питания установите заданное преподавателем опорное напряжение $U_{\text{оп}}$, подключив вольтметр между т. 9-13.

2.3. Подключите вольтметр между т. 10-13 и установите входное напряжение $U_{\text{вх}}$ обратного знака по отношению к опорному напряжению $U_{\text{оп}}$ так, чтобы выполнялось условие $|U_{\text{вх.мах}}| \leq |U_{\text{оп}}|$.

2.4. Для запуска АЦП нажмите кнопку «Сброс». Если на светодиодах установился некоторый код, то АЦП функционирует нормально, в противном случае наблюдается свечение всех светодиодов.

2.5. Снимите зависимость $N_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$. Для этого установите не менее семи значений $U_{\text{вх}}$ в требуемом диапазоне, запустите АЦП и запишите полученный код. Результаты измерений занесите в таблицу, аналогичную табл. 7.2.

2.6. Рассчитайте требуемые значения $N_{\text{ВЫХ}}$ по формуле

$$N_{\text{ВЫХ}} = \frac{-U_{\text{ВХ}} \cdot N_{\text{max}}}{U_{\text{оп}}}. \text{ Результаты занесите в таблицу.}$$

2.7. Постройте экспериментальную и расчетную зависимости $N_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$.

2.8. Определите максимальную погрешность преобразования АЦП $\Delta N_{\text{ВЫХ}}$ как разность между измеренными и расчетными значениями $N_{\text{ВЫХ}}$.

Таблица 7.2

$U_{\text{ВХ}}, \text{ В}$	Измерения		Расчет
	Выходной двоичный код	$N_{\text{ВЫХ}}$	$N_{\text{ВЫХ}}$

2.9. Соберите схему четырехквadrантного АЦП последовательных приближений, оставив предыдущую схему, но соединив т. 7-8 вместо 6-8.

2.10. Повторите опыты по п. 2.3-2.8, устанавливая при этом входное напряжение $U_{\text{ВХ}}$ как положительного, так и отрицательного знака по отношению к опорному напряжению (не менее семи значений). Расчетная формула при этом запишется в виде:

$$N_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}} \cdot N_{\text{max}}}{2 \cdot U_{\text{оп}}} + \frac{N_{\text{max}}}{2}.$$

2.11. Разомкните перемычку 11-12. Подключите осциллограф между т. 6-13. Зарисуйте и объясните письменно полученную осциллограмму. Разберите схему.

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, названия опытов, условные обозначения ЦАП и АЦП, исследуемую схему АЦП последовательных приближений, результаты измерений и расчетов, графики, краткие выводы по каждому опыту с объяснением полученных результатов.

Контрольные вопросы

1. ЦАП: условное обозначение, способы организации, принципы работы, основные параметры и характеристики, области применения.

2. АЦП: условное обозначение, способы организации, принципы работы, основные параметры и характеристики, области применения.

Литература: [1], [2], [3], [4]

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

Исследование цифрового сумматора и арифметическо-логического устройства (АЛУ)

Цель работы: Ознакомиться с принципами функционирования основного блока микропроцессора – арифметическо-логического устройства (АЛУ).

Краткие теоретические сведения

АЛУ – это основной внутренний блок (ядро) микропроцессора, выполняющий простейшие арифметические и логические операции.

Аппаратно АЛУ кроме набора логических элементов содержит многоразрядный сумматор, например, 16-ти или 32-х разрядный.

Схема простейшего одноразрядного сумматора изображена на рис. 8.1. Сумматор состоит из двух полусумматоров, каждый из которых содержит по два логических элемента: "Исключающее ИЛИ" (=1) и "И" (&).

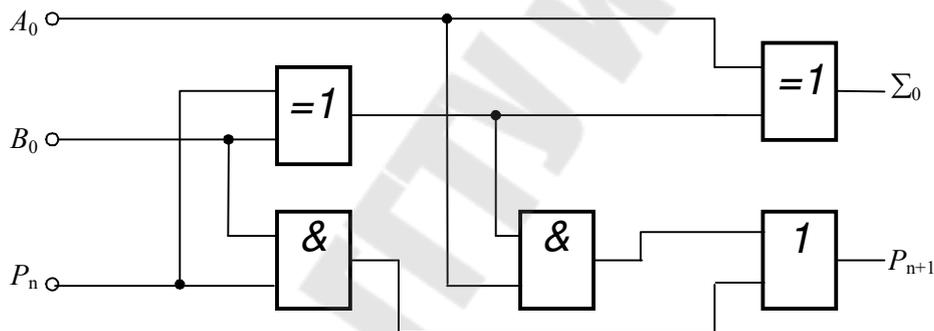


Рис. 8.1

Первый полусумматор арифметически складывает два бита: число B_0 и перенос P_n . Результат суммы по модулю 2 появляется на выходе элемента «=1». В случае поступления двух логических единиц от B_0 и P_n на выходе элемента «И» появляется «1». Второй полусумматор аналогично производит сложение бита суммы от первого полусумматора с битом числа A_0 . В результате этого на выходе полного сумматора Σ_0 появляется сумма 3-х бит по модулю 2 и общий перенос P_{n+1} , снимаемый с выхода логического элемента «ИЛИ» (1), который используется для передачи сигнала переполнения на следующий сумматор старшего разряда. Для сложения двух четырехразрядных чисел (операндов) A и B требуется 4 сумматора, выходы которых $\Sigma_0, \Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$ отображают результат сложения, а

общий выход переноса P_{n+4} подается в следующий 5-ый разряд, в случае, если результат сложения не вписывается в 4-х разрядный формат, т.е. $\Sigma > 15$.

Логическая операция "ИЛИ" дизъюнкция обозначается символом \vee ($A \vee B$), операция "И" конъюнкция – символом \wedge ($A \wedge B$) и операция "Исключающее ИЛИ" – символом \oplus ($A \oplus B$).

Таблица 8.1

Пример выполнения арифметическо-логических операций над числами $A = 3$ и $B = 6$ и записью результата F

	Логические операции			Арифметические операции	
	$A \vee B$	$A \wedge B$	$A \oplus B$	$A + B$	$A - B$
A	0011	0011	0011	0011 (3)	0011 (3)
B	0110	0110	0110	0110 (6)	0110 \rightarrow 1001 + 0001 = 1010 (-6)
F	0111	0010	0101	1001 (9)	1101 (-3) \rightarrow 0010 + 0001 = 0011 (3)

Пример выполнения указанных операций над числами A и B приведен в табл. 8.1. Аналогичные операции с инверсным кодом одного из чисел обозначается черточкой, например, $\overline{A} \wedge B$, а если результат инверсный, то $\overline{A \wedge B}$.

Арифметические операции сложение (+) и вычитание (-) отображены в табл. 8.1. Для выполнения операции вычитания, например $A - B$, используется тот же сумматор $A + (-B)$, но отрицательное число $-B$ предварительно должно быть представлено в дополнительном коде. Для этого прямой код положительного числа B инвертируют, а затем прибавляют к нему единицу (в АЛУ эта операция выполняется автоматически). Например, представить в дополнительном коде число $B = 0110$:

$$-B = 0110 \rightarrow \text{инв. } 1001 + 0001 = 1010.$$

Знак «1» в старшем разряде означает, что число отрицательное. Если после вычитания результат оказался отрицательным, то для представления его в положительном эквиваленте полученное число переводят из дополнительного кода в прямой код по такому же правилу, т.е. сначала число инвертируют, а затем прибавляют единицу (см. табл. 8.1).

В таблице 8.2 приведен выбор логических или арифметических операций над операндами A и B , выполняемых микросхемой К155ИПЗ (АЛУ) в зависимости от кода команды S и сигнала на входе переноса P_n .

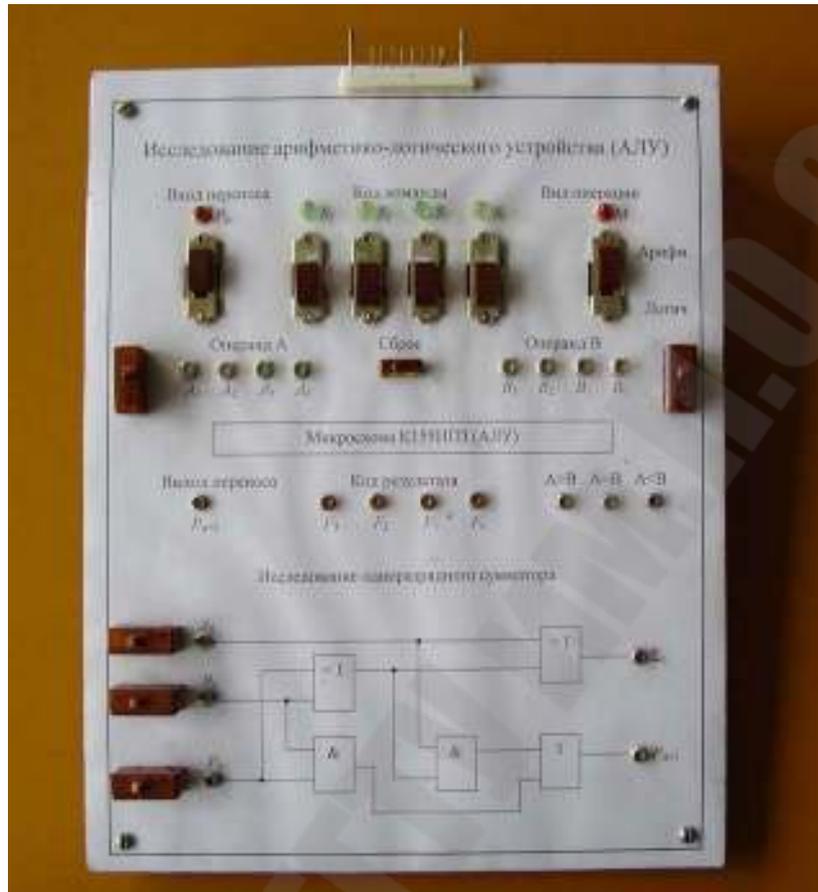
Выбор функций АЛУ

Код команды $S_3 S_2 S_1 S_0$		Операции над числами A и B		
10-ый	2-ый	Логическая операция ($M=0$)	Арифметическая операция ($M=1$)	
			Функция F без переноса ($P_n=0$)	Функция F' с переносом ($P_n=1$)
0	0000	\bar{A}	A	$F' = F + 1$
1	0001	$\overline{A \vee B}$	$(A \vee B)$	
2	0010	$\overline{A \wedge B}$	$(A \vee \bar{B})$	
3	0011	0	-1	0
4	0100	$\overline{A \wedge B}$	$A + (A \wedge \bar{B})$	
5	0101	\bar{B}	$(A \vee B) + (A \wedge \bar{B})$	
6	0110	$A \oplus B$	$A - B - 1$	$A - B$
7	0111	$A \wedge \bar{B}$	$(A \wedge \bar{B}) - 1$	
8	1000	$\overline{A \vee B}$	$A + (A \wedge B)$	
9	1001	$\overline{B \oplus B}$	$A + B$	$A + B + 1$
10	1010	B	$(A \vee \bar{B}) + (A \wedge B)$	
11	1011	$A \wedge B$	$(A \wedge B) - 1$	
12	1100	-1	$A + A$	$A + A + 1$
13	1101	$A \vee \bar{B}$	$(A \vee B) + A$	
14	1110	$A \vee B$	$(A \vee \bar{B}) + A$	
15	1111	A	$A - 1$	A

Если при сложении двух чисел результат превысит 15, то на выходе переноса P_{n+4} появится единица (высвечивает светодиод). При операции вычитания, если результат оказался положительным числом, то перенос $P_{n+4} = 1$, что означает прямой код числа, а при отрицательном результате $P_{n+4} = 0$ – обратный код числа. Надо иметь в виду, что в АЛУ чисто арифметических операций (сложение, вычитание) всего выполняется 3, это команды 6, 9, 12. Остальные команды совмещенные, т.е. и логические и арифметические. В табл. 8.2 в скобках обозначены логические функции.

Описание лабораторной установки

Внешний вид лабораторной установки



На лабораторном стенде изображены входы и выходы четырехразрядного АЛУ типа К155ИП3. Из двух последовательно соединенных таких АЛУ можно получить 8-ми разрядное АЛУ. На вход АЛУ подаются два операнда A и B в 4-х разрядном формате, с которыми производятся логические или арифметические операции. Вид операции выбирается положением переключателя M . Команды на выполнение различных логических или арифметических операций задаются переключателями S . Число таких команд равно $2^4 = 16$. В реальных микропроцессорных системах коды команд хранятся в постоянном запоминающем устройстве ПЗУ. На вход АЛУ поступает также сигнал переноса P_n от младшего АЛУ при последовательном их соединении. С выхода АЛУ снимается код результата выполнения команды F , перенос P_{n+4} , а также результат цифрового сравнения операндов $A > B$, $A = B$, $A < B$, флаги которых обычно хранятся в регистре признаков состояния микропроцессора.

При логической операции ($M = 0$) положение переключателя P_n не имеет значения, а при арифметической операции ($M = 1$), если на вход переноса поступил сигнал $P_n = 1$, то к полученному результату при $P_n = 0$ прибавляется единица, т. е. 0001.

Порядок выполнения работы

1. Исследование одноразрядного сумматора

Перед началом исследования по лабораторной работе № 6 необходимо изучить и практически освоить простейшие логические функции И, ИЛИ, Исключающее ИЛИ при различной комбинации входных сигналов, понимать принцип действия цифрового сумматора и назначение его входов и выходов. Включить стенд (вставить разъем питания) и последовательно нажимая на кнопки A_0 , B_0 , P_n в различной их комбинации, зарегистрировать показания выходных светодиодов Σ_0 и P_{n+1} . Результаты регистрации заносятся в табл. 8.3, предварительно заполнив ее аналитически.

Таблица 8.3

Вход			Выход	
P_n	B_0	A_0	P_{n+1}	Σ_0
0	0	0		
0	0	1		
0	1	0		
0	1	1		
1	0	0		
1	0	1		
1	1	0		
1	1	1		

2. Исследование АЛУ

Каждой бригаде, выполняющей данную лабораторную работу, преподаватель задает значения операндов A и B в десятичной системе счисления (диапазон чисел от 1 до 15). Студенты переводят эти числа в двоичный формат и выставляют их значения на стенде. Для этого кратковременно нажимают на кнопку "Сброс", приводя двоичные счетчики в нуль, затем последовательно нажимая на кнопочные переключатели операндов A и B по светодиодам, выставляют заданные числа. Высвечивающий светодиод означает логическую единицу.

Вначале над операндами A и B выполняют логические операции. Для этого переключатель "Вид операции" устанавливают в положение

"Логич." ($M = 0$), переключатель P_n может находиться в любом положении. Переключателями "Код команды" $S_3 - S_0$ последовательно от 0 до 15 выставляют коды команд на выполнение логических операций в соответствии с табл. 8.4 и фиксируют результаты операции по показаниям светодиодов $F_3 - F_0$. Значения результатов записываются в табл. 8.4, где обязательно должна быть приведена теоретическая проверка результатов показаний для заданных значений A и B . В табл. 8.4 для примера приведена проверка логических операций над числами $A = 3$ и $B = 6$.

Для перевода АЛУ в режим арифметических операций переключатель "Вид операции" устанавливают в положение «Арифм.» $M = 1$ (высвечивается светодиод M). При этом отключают переключатель «Вход переноса» P_n (светодиод P_n погашен). Не изменяя значения заданных операндов A и B , также как в первом случае последовательно выставляют коды команд переключателями $S_3 - S_0$ и записывают показания индикатора F «Код результата». Значения полученных результатов и их проверку представляют в форме табл. 8.5, где для примера приведена проверка арифметических операций над числами $A = 3$ и $B = 6$.

Для нескольких команд, например, № 3, 6, 9, 12, 15, произвести аналогичные измерения при введенном положении переключателя «Вход переноса» $P_n = 1$. Для этого случая убедиться, что код результата увеличивается на единицу.

В заключении для произвольных значений A и B проверить работу флагов $A > B$, $A = B$, $A < B$.

Таблица 8.4

**Логические операции ($M = 0$) над числами
 $A = 3(0011)$ и $B = 6(0110)$**

Код команды S	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Операция	\overline{A}	$\overline{A \vee B}$	$\overline{A \wedge B}$	0	$\overline{A \wedge B}$	\overline{B}	$A \oplus B$	$A \wedge \overline{B}$	$\overline{A \vee B}$	$\overline{A \oplus B}$	B	$A \wedge B$
Код результата F	1100	1000	0100	0000	1101	1001	0101	0001	1110	1010	0110	0010
Проверка	$\begin{array}{r} 0\ 0\ 1\ 1 \\ \hline 1\ 1\ 0\ 0 \end{array}$	$\begin{array}{r} 0\ 0\ 1\ 1 \\ 0\ 1\ 1\ 0 \\ \hline 0\ 1\ 1\ 1 \\ 1\ 0\ 0\ 0 \end{array}$	$\begin{array}{r} 0\ 0\ 1\ 1 \\ 1\ 1\ 0\ 0 \\ \hline 0\ 1\ 1\ 0 \\ 0\ 1\ 0\ 0 \end{array}$	0000	$\begin{array}{r} 0\ 0\ 1\ 1 \\ 0\ 1\ 1\ 0 \\ \hline 0\ 0\ 1\ 0 \\ 1\ 1\ 0\ 1 \end{array}$	$\begin{array}{r} 0\ 1\ 1\ 0 \\ \hline 1\ 0\ 0\ 1 \end{array}$	$\begin{array}{r} 0\ 0\ 1\ 1 \\ 0\ 1\ 1\ 0 \\ \hline 0\ 1\ 0\ 1 \end{array}$	$\begin{array}{r} 0\ 1\ 1\ 0 \\ 1\ 0\ 0\ 1 \\ \hline 0\ 0\ 1\ 1 \\ 0\ 0\ 0\ 1 \end{array}$	$\begin{array}{r} 0\ 0\ 1\ 1 \\ 1\ 1\ 0\ 0 \\ \hline 0\ 1\ 1\ 0 \\ 1\ 1\ 1\ 0 \end{array}$	$\begin{array}{r} 0\ 0\ 1\ 1 \\ 0\ 1\ 1\ 0 \\ \hline 0\ 1\ 0\ 1 \\ 1\ 0\ 1\ 0 \end{array}$	0110	$\begin{array}{r} 0\ 0\ 1\ 1 \\ 0\ 1\ 1\ 0 \\ \hline 0\ 1\ 1\ 0 \\ 0\ 0\ 1\ 0 \end{array}$

Продолжение табл. 9.4

Код команды S	12	13	14	15
Операция	-1	$\overline{A \vee B}$	$\overline{A \vee B}$	\overline{A}
Код результата F	1111	1011	0111	0011
Проверка	перевод в пр. код $\begin{array}{r} 0\ 0\ 0\ 0 \\ 0\ 0\ 0\ 1 \\ \hline 0\ 0\ 0\ 1 \end{array}$	$\begin{array}{r} 0\ 1\ 1\ 0 \\ 1\ 0\ 0\ 1 \\ \hline 0\ 0\ 1\ 1 \\ 1\ 0\ 1\ 1 \end{array}$	$\begin{array}{r} 0\ 0\ 1\ 1 \\ 0\ 1\ 1\ 0 \\ \hline 0\ 1\ 1\ 1 \end{array}$	0011

Таблица 8.5.

**Арифметические операции ($M = 1$) над числами $A = 3$ и $B = 6$
при отсутствии сигнала на входе переноса $P_n = 0$**

Код команды S	0	1	2	3	4	5	6
	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110
Операция	A	$A \vee B$	$A \vee \bar{B}$	-1	$A + (A \wedge \bar{B})$	$(A \vee B) + (A \wedge \bar{B})$	$A - B - 11$
Код результата F	0011	0111	1011	1111	0100	1000	1100
Выход переноса P_{n+1}	0	0	0	0- доп. код	0	0	0- доп. код
Проверка	0011	из табл. 8.4 0111	из табл. 8.4 1011		из табл. 8.4 0 0 0 1 $(A \wedge \bar{B}) = \frac{0 0 1 1}{0 1 0 0}$	из табл. 8.4 $\frac{0 1 1 1}{0 0 0 1}$ $\frac{0 0 0 1}{1 0 0 0}$	см. табл.8.1 $\frac{1 1 0 1}{1 1 1 1}$ $\frac{1 1 1 1}{1 1 0 0}$ пр.код 0100 = 4 3 - 6 - 1 = 4

Продолжение таблицы 8.5

Код команды S	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	0111	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111
Операция	$(A \wedge \bar{B}) - 1$	$A + (A \wedge B)$	$A + B$	$(A \vee \bar{B}) + (A \wedge B)$	$(A \wedge B) - 1$	$A + A$	$(A \vee B) + A$	$(A \vee \bar{B}) + A$	$A - 1$
Код результата F	0000	0101	1001	1101	0001	0110	1010	1110	0010
Выход переноса P_{n+1}	1- пр. код	0	0	0	1- пр. код	0	0	0	1- пр. код
Проверка	из табл. 8.4 $\begin{array}{r} 0\ 0\ 0\ 1 \\ \hline 1\ 1\ 1\ 1 \\ \hline 0\ 0\ 0\ 0 \end{array}$	из табл. 8.4 $\begin{array}{r} 0\ 0\ 1\ 0 \\ \hline 0\ 0\ 1\ 1 \\ \hline 0\ 1\ 0\ 1 \end{array}$	$\begin{array}{r} 0\ 0\ 1\ 1 \\ \hline 0\ 1\ 1\ 0 \\ \hline 1\ 0\ 0\ 1 \\ \hline 3+6=9 \end{array}$	из табл. 8.4 $\begin{array}{r} 1\ 0\ 1\ 1 \\ \hline 0\ 0\ 1\ 0 \\ \hline 1\ 1\ 0\ 1 \end{array}$	из табл. 8.4 $\begin{array}{r} 0\ 0\ 1\ 0 \\ \hline 1\ 1\ 1\ 1 \\ \hline 0\ 0\ 0\ 1 \end{array}$	$\begin{array}{r} 0\ 0\ 1\ 1 \\ \hline 0\ 0\ 1\ 1 \\ \hline 0\ 1\ 1\ 0 \\ \hline 3+3=6 \end{array}$	из табл. 8.4 $\begin{array}{r} 0\ 1\ 1\ 1 \\ \hline 0\ 0\ 1\ 1 \\ \hline 1\ 0\ 1\ 0 \end{array}$	из табл. 8.4 $\begin{array}{r} 1\ 0\ 1\ 1 \\ \hline 0\ 0\ 1\ 1 \\ \hline 1\ 1\ 1\ 0 \end{array}$	$\begin{array}{r} 0\ 0\ 1\ 1 \\ \hline 1\ 1\ 1\ 1 \\ \hline 0\ 0\ 1\ 0 \\ \hline 3-1=2 \end{array}$

Примечание: при наличии сигнала на входе переноса $P_n = 1$ к результатам операций по табл. 8.5 прибавляется единица (0001)

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, названия опытов, схему одноразрядного сумматора, результаты исследований и расчетов, выводы.

Контрольные вопросы

1. Правила простейших логических операций: конъюнкции и дизъюнкции.
2. Правила арифметического сложения и вычитания двоичных чисел.
3. Принцип работы одноразрядного сумматора.
4. Назначение и принципы работы АЛУ.

Литература: [5], [6].

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

Исследование множительного блока комбинационного типа

Цель работы: Ознакомиться с принципами перемножения двоичных чисел и работой множительных логических блоков

Краткие теоретические сведения

Операции арифметического умножения и деления в микропроцессорных системах традиционно выполняются с помощью специальных подпрограмм. Подпрограмма умножения – это последовательное многократное суммирование множимого. После первого суммирования осуществляется сдвиг кода суммы вправо, затем снова суммирование с множимым и так продолжается несколько раз в зависимости от разрядности множителя. Подпрограмма умножения занимает большое машинное время, поскольку каждая элементарная операция суммирования или сдвига занимает один машинный цикл. В промышленных микропроцессорных управляющих системах сложные математические операции выполняются в реальном масштабе времени в темпе технологического процесса. Поэтому в таких системах требуется применять быстродействующие микропроцессоры.

В последнее время в связи с успехами технологии изготовления интегральных микросхем (ИС) были разработаны специализированные ИС, выполняющие операции умножения и деления аппаратным способом – DSP (*Digital Signal Processor*) – цифровые сигнальные процессоры. С помощью таких ИС сам процесс умножения или деления занимает один машинный цикл, что позволяет значительно увеличить быстродействие вычислительных систем.

На рис. 9.1 приведен пример реализации аппаратного множительного блока 4-х разрядного числа на 2-х разрядное. Множительный блок относится к устройствам комбинационного типа. Результат операции умножения на его выходе появляется сразу после введения исходных данных без промежуточных последовательных действий. Устройство состоит из 8-ми логических элементов «И» $DD_1 - DD_8$ и 4-х одноразрядных сумматоров $DD_9 - DD_{12}$, имеющих входы слагаемых A и B , вход переноса предыдущего слагаемого P , результат суммы S и выход переноса в следующий разряд P .

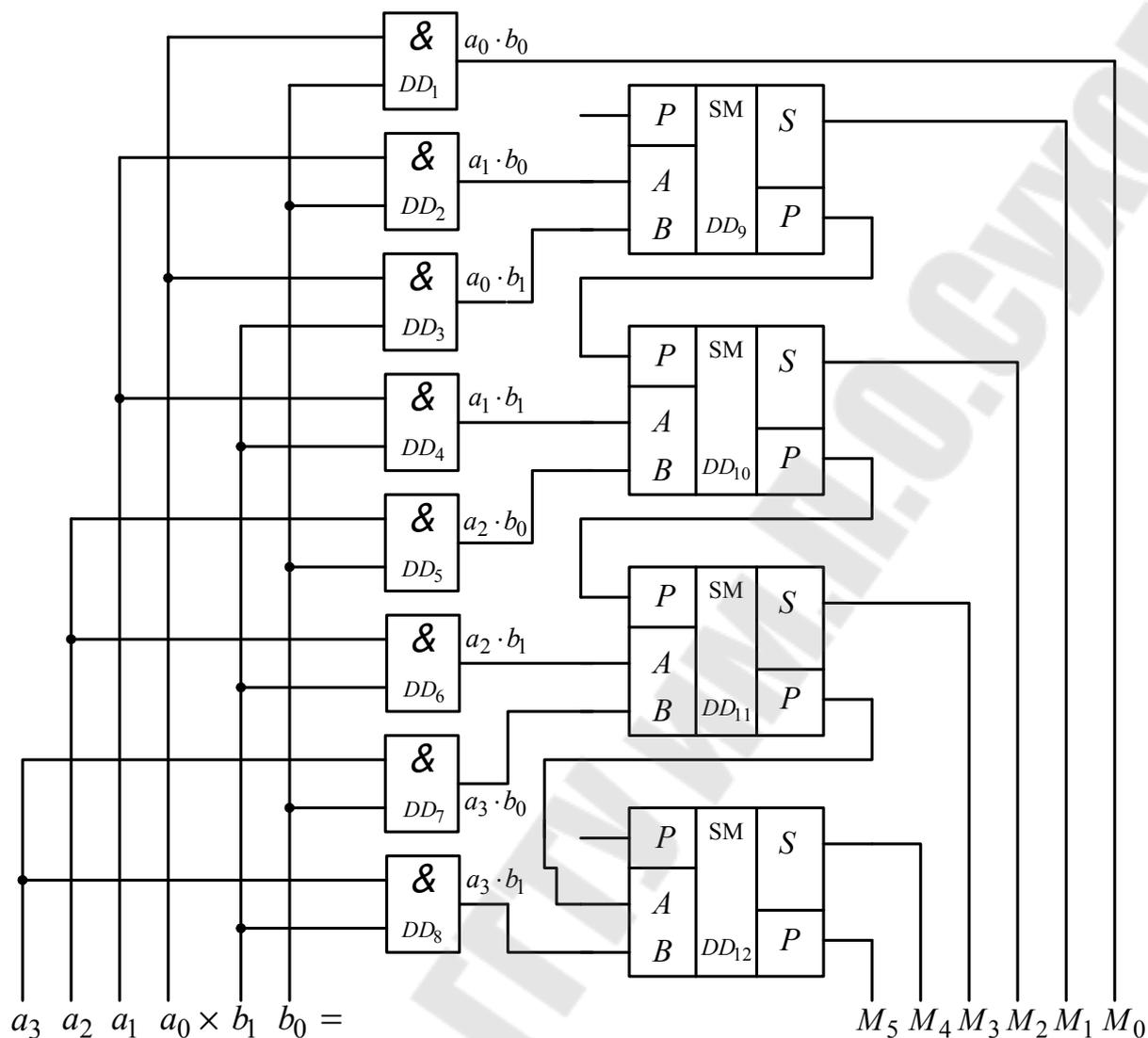


Рис. 9.1

Логические элементы «И» осуществляют операцию логического умножения (конъюнкцию) двух входных одноразрядных чисел a_i ; и b_i . В результате появляется одноразрядное число, равное частному произведению $a_i \wedge b_i = a_i \cdot b_i$. Если один из множителей равен нулю, то и частное произведение равно нулю. Логическая единица на выходе элемента «И» появляется только при умножении двух единиц. При поразрядном умножении многоразрядных чисел требуется такое количество двухвходовых элементов «И», которое равно произведению разрядов обоих сомножителей, то есть в данном случае 8. Для получения искомого результата умножения требуется в определенной последовательности сложить частные произведения элементарных

функций «И», точно так же как это делается при умножении двух десятичных чисел «столбиком».

Ниже показан алгоритм умножения 4-х разрядного числа на 2-х разрядное. Сигнал переноса P от последнего сумматора выводится как старший разряд M_5 искомого произведения.

$$\begin{array}{r}
 \\
 a_3 \ a_2 \ a_1 \ a_0 \\
 \times b_1 \ b_0 \\
 \hline
 + a_3 \cdot b_0 \ a_2 \cdot b_0 \ a_1 \cdot b_0 \ a_0 \cdot b_0 \\
 a_3 \cdot b_1 \ a_2 \cdot b_1 \ a_1 \cdot b_1 \ a_0 \cdot b_1 \\
 \hline
 M_5 \quad M_4 \quad M_3 \quad M_2 \quad M_1 \\
 M_0
 \end{array}$$

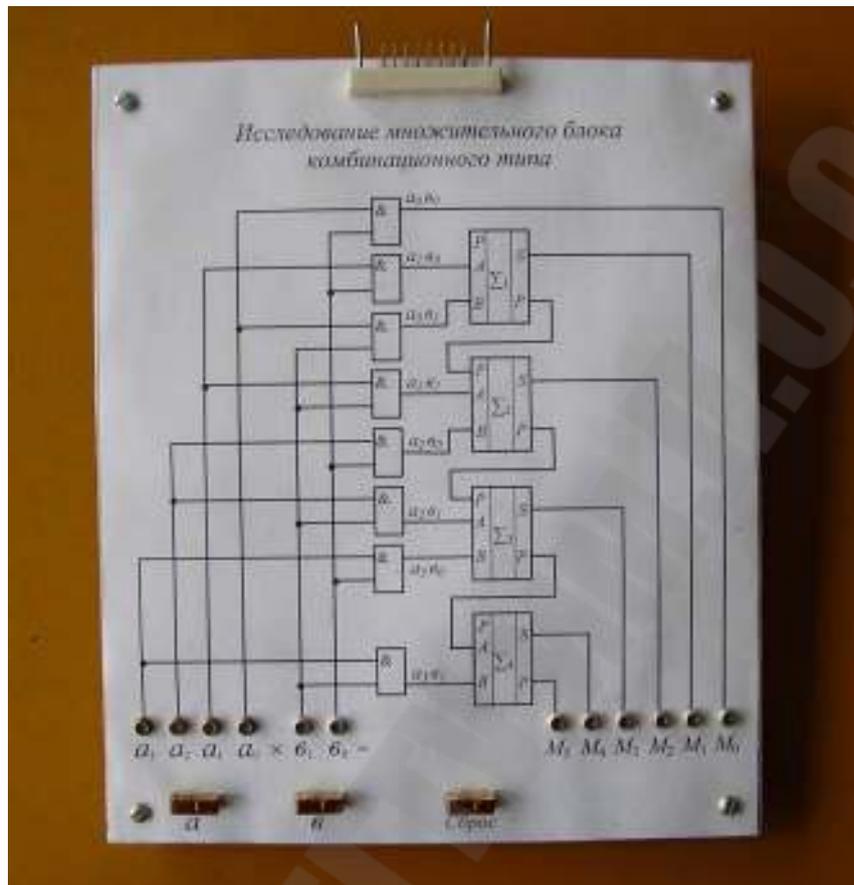
Рассмотрим численный пример умножения двух чисел $11 \cdot 2 = 22$:

$$\begin{array}{r}
 \\
 \\
 = 11 \\
 \times = 2 \\
 \hline
 + \\
 \\
 \hline
 = 22
 \end{array}$$

Приведенная на рис. 9.1 схема множительного блока имеет разрядность 4×2 . Аналогично можно построить схему множителя с разрядностью 2×2 (нарисовать самостоятельно). Аппаратный множитель с большим числом разрядов сомножителей получают путем наращивания однотипных блоков в виде матрицы. Например, множитель 4×4 можно составить из 2-х блоков множителей 4×2 или из 4-х блоков 2×2 .

Описание лабораторной установки

Внешний вид лабораторной установки



На лабораторной установке приведена принципиальная схема устройства, светодиоды для отображения значений каждого бита перемножаемых чисел A и B и результата перемножения M , а также кнопки для набора чисел A и B кнопка сброса.

Порядок выполнения работы

1. Получите задание у преподавателя в виде трёх примеров умножения двух чисел (примеры задаются в десятичном эквиваленте).
2. Переведите заданные сомножители в двоичный код и перемножьте их столбиком (в двоичном коде).
3. Включите стенд (подключите разъем питания) и обнулите исходные данные, кратковременно нажав кнопку «Сброс».
4. Поочерёдно нажимая на установочные кнопки a и b , установите на стенде двоичные коды заданных чисел.
5. Сравните результаты полученных произведений M с аналитическим расчетом по п. 2.

6. Разработайте схему множительного блока на два двухразрядных числа.

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, примеры расчёта произведений заданных чисел и схему множительного блока на два двухразрядных числа.

Контрольные вопросы

1. Правила перемножения двоичных чисел.
2. Принципы работы множительных блоков комбинационного типа.

Литература: [5], [6]

ЛИТЕРАТУРА

1. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника / Ю.С. Забродин. – М.: Высшая школа, 1982. – 496 с.
2. Жеребцов, И.И. Основы электроники / И.И. Жеребцов. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
3. Лачин, В.И. Электроника / В.И. Лачин, Н.С. Савелов. - Ростов-На-Дону: Феникс, 2005. – 703 с.
4. Кучумов, А.И. Электроника и схемотехника / А.И. Кучумов. – М.: Гелиос АРВ, 2004. – 335 с.
5. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному / Б.Ю. Семенов. – М.: Высшая школа, 2005. – 452 с.
6. Кузин, А.В. Микропроцессорная техника / А.В. Кузин, М.А. Жаворонков, М.: Академия, 2004. – 304 с.
7. Новиков Ю.В. Основы микропроцессорной техники / Ю.В. Новиков, П.К. Скоробогатов. М.: Интернет-Университет Информационных технологий, 2004. – 421 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа 1 "Исследование полупроводниковых диодов и тиристоров"	3
Лабораторная работа 2 "Исследование биполярных и полевых транзисторов"	9
Лабораторная работа 3 "Исследование неуправляемых выпрямителей, сглаживающих фильтров и стабилизаторов напряжения"	16
Лабораторная работа 4 "Исследование управляемых выпрямителей"	24
Лабораторная работа 5 "Исследование функциональных элементов на операционном усилителе"	29
Лабораторная работа 6 " Исследование функциональных элементов на цифровых интегральных микросхемах"	38
Лабораторная работа 7 "Исследование цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователей"	47
Лабораторная работа 8 "Исследование цифрового сумматора и арифметическо-логического устройства"	54
Лабораторная работа 9 "Исследование множительного блока комбинационного типа	64
Литература	69

**Курганов Владимир Васильевич
Зализный Дмитрий Иванович**

ЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

**Лабораторный практикум
для студентов специальности
1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»
дневной и заочной форм обучения
В 2 частях
Часть 1
Промышленная электроника**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 13.01.10.

Рег. № 111Е.
E-mail: ic@gstu.by
<http://www.gstu.by>