

Министерство образования и науки Российской Федерации
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»**

З.М. СЕЛИВАНОВА

СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся в магистратуре по магистерским программам: «Проектирование систем связи и телекоммуникаций» и «Информационные технологии проектирования электронных средств»



Тамбов

• Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ» •
2012

УДК 621.3(075)
ББК з21я73-5
С291

Рецензенты:

Доктор технических наук,
профессор ФГБОУ ВПО «ТГУ им. Г.Р. Державина»
И.И. Пасечников

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
А.А. Чуриков

Селиванова, З.М.

С291 Схемотехническое проектирование электронных средств :
лабораторный практикум / З.М. Селиванова. – Тамбов : Изд-во
ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. – 100 экз.
ISBN 978-5-8265-1135-0.

Рассмотрены теоретические и практические сведения по схемотехническому проектированию электронных устройств, изучению принципа действия и функционирования усилительных устройств при воздействии обратных связей, дифференциальных усилителей, предварительных и оконечных усилителей, генераторов, аналоговых устройств на операционных усилителях, функциональных узлов цифровых автоматов, комбинационных цифровых устройств, аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей.

Предназначено для студентов, обучающихся в магистратуре по магистерским программам: «Проектирование систем связи и телекоммуникаций» и «Информационные технологии проектирования электронных средств».

УДК 621.3(075)
ББК з21я73-5

ISBN 978-5-8265-1135-0

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2012

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие «Схемотехническое проектирование электронных средств» предназначено для студентов, обучающихся в магистратуре по магистерским программам: «Проектирование систем связи и телекоммуникаций» и «Информационные технологии проектирования электронных средств», изучающих дисциплину «Схемотехническое проектирование электронных средств» в рамках учебной программы в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования направления подготовки 211000 «Конструирование и технология электронных средств».

В учебном пособии приведены теоретические сведения по аналоговым, импульсным и цифровым устройствам, которые исследуются в лабораторных работах. В пособии представлены методические рекомендации по выполнению лабораторных работ и описание лабораторных стендов.

При выполнении лабораторных работ исследуются усилительные устройства при воздействии обратных связей, дифференциальные усилители, предварительные и оконечные усилительные каскады, LC - и RC -генераторы, аналоговые устройства на операционных усилителях, функциональные узлы цифровых автоматов, комбинационные цифровые устройства, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи.

Полученные знания и практические навыки при изучении дисциплины «Схемотехническое проектирование электронных средств» могут использоваться студентами при схемотехническом проектировании аналоговых, импульсных и цифровых устройств в курсовом проектировании и при написании магистерской диссертации.

Теоретические и практические знания по схемотехническому проектированию электронных средств, принципы выбора и практической реализации методов расчёта электронных схем в установившихся (статических) и переходных (динамических) режимах необходимы студентам при разработке аналоговых, импульсных и цифровых устройств на предприятиях и организациях радиотехнического профиля, при реализации информационных технологий проектирования электронных средств, в сервисных центрах по обслуживанию радиоэлектронных средств и бытовой радиоаппаратуры в рамках практического и научно-исследовательского сотрудничества.

ВЛИЯНИЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА ПОКАЗАТЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЯ

Цель работы: исследование влияния цепи отрицательной обратной связи на амплитудно-частотную и амплитудную характеристики двухкаскадного усилителя на резисторах с резистивно-ёмкостной связью.

Описание лабораторного стенда и методические указания

Ознакомиться со схемой (рис. 1.1) лабораторной установки, измерительными приборами и оборудованием, необходимым при выполнении работы.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить лабораторную установку к выполнению работы. Для этого к выходу и входу усилителя подключить: источник входного синусоидального сигнала переменной частоты – звуковой генератор (ЗГ); цифровой вольтметр для контроля значения входного сигнала; цифровой вольтметр для измерения значения выходного сигнала; стабилизированный источник постоянного напряжения питания $U = 12$ В; осциллограф для контроля формы выходного сигнала усилителя.

2. Включить напряжение питания измерительных приборов, звукового генератора и исследуемого усилителя и установить на выходе звукового генератора напряжение $U = 50$ мВ. При этом выключатель SA_1 находится в положении 1, а выключатель SA_2 в положении ВЫКЛ ООС.

3. Снять и построить амплитудную характеристику $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ усилителя при частоте входного сигнала $f = 1000$ Гц.

При снятии амплитудной характеристики форму сигнала на выходе усилителя контролировать с помощью осциллографа. Зарисовать осциллограммы входного и выходного сигналов усилителя, соответствующих линейному и нелинейному участками амплитудной характеристики усилителя. Положения выключателей прежние. Результаты занести в табл. 1.1 (без ООС).

Таблица 1.1

$U_{\text{вх}}, \text{ мВ}$	10	25	50	75	100	125	150
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$	3,68	4,12	4,5	4,6	4,64	4,64	4,63

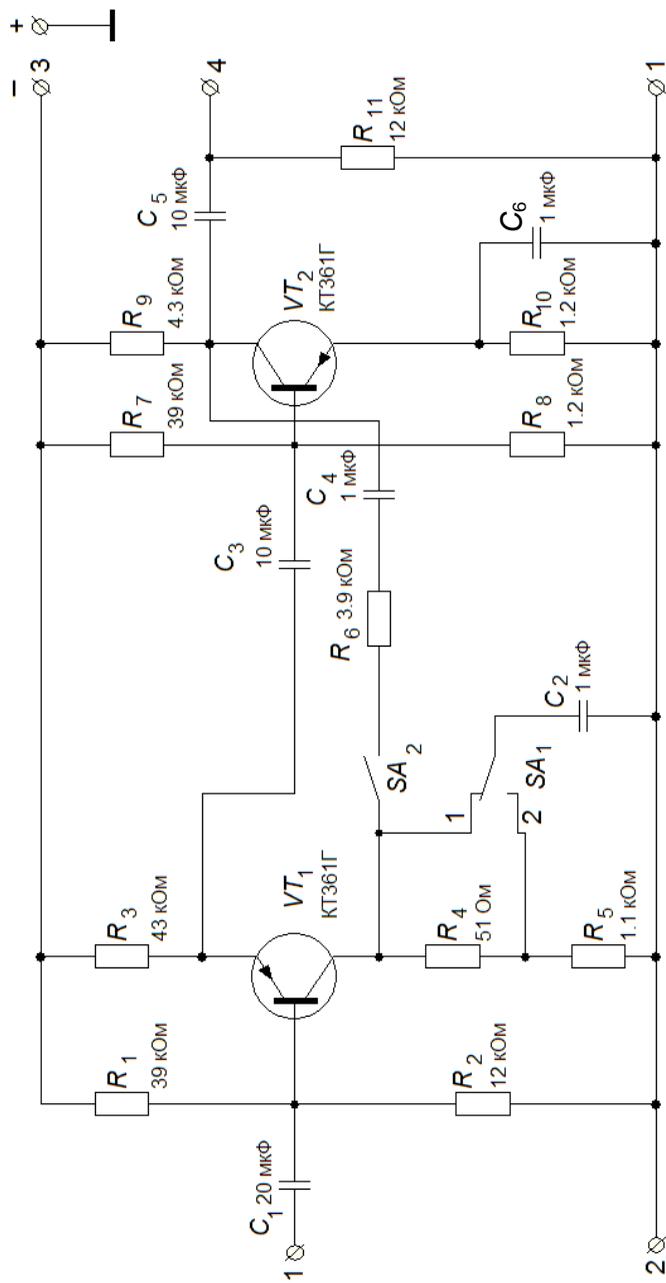


Рис. 1.1. Принципиальная электрическая схема двухкаскадного усилителя с обратной связью

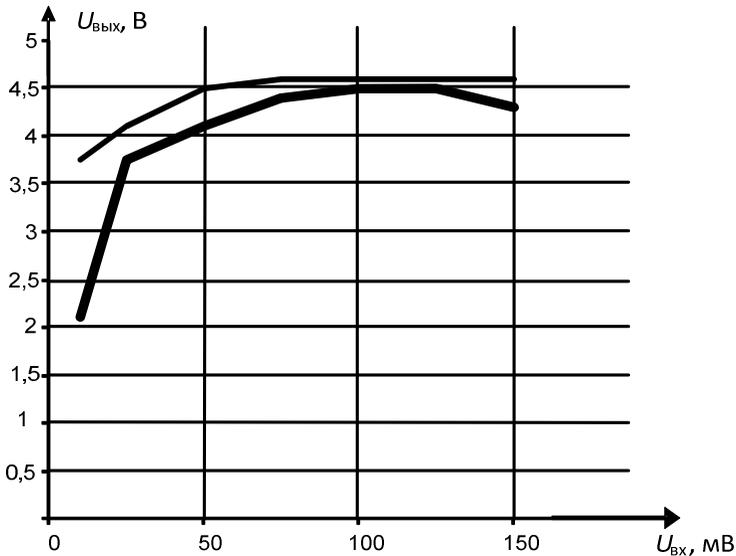


Рис. 1.2. Зависимость выходного напряжения от входного и напряжения без OOC и с OOC

Пример амплитудной характеристики приведён на рис. 1.2.

4. Снять и построить амплитудно-частотную характеристику двухкаскадного усилителя в диапазоне частот 200...100 000 Гц, подерживая напряжение сигнала на входе усилителя неизменным. Измерения напряжений сигнала на входе и выходе усилителя произвести на частотах: 200, 500, 1000, 5000, 10 000, 20 000, 50 000, 100 000 Гц (табл. 1.1).

При построении амплитудно-частотной характеристики по оси координат откладывается коэффициент усиления усилителя $K(f)$ по напряжению, равный $K_U = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$, а по оси абсцисс – частота входного сигнала в логарифмическом масштабе. Примеры результатов экспериментальных исследований приведены в табл. 1.2 и показаны на рис. 1.3 ($U_{\text{ВХ}} = 50 \text{ мВ}$).

Таблица 1.2

$F, \text{ кГц}$	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$	3,4	3,72	4,54	4,7	4,88	4,80	4,66	4,27	3,7

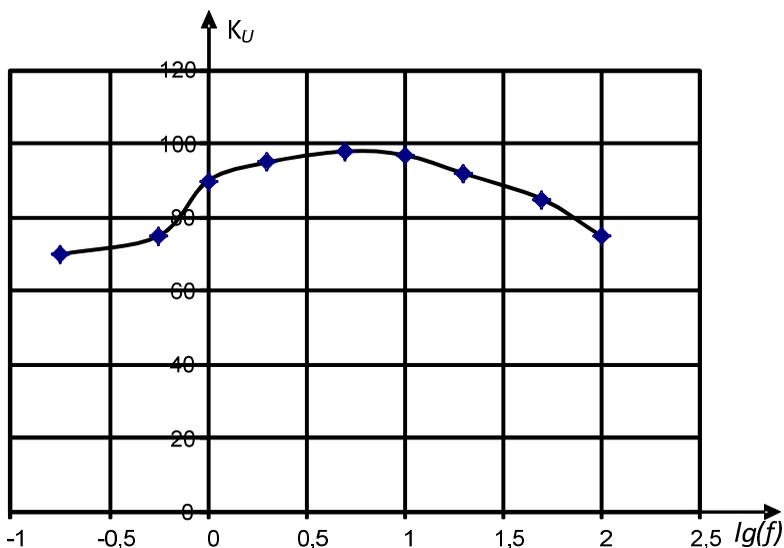


Рис. 1.3. Зависимость коэффициента усиления (K_U) от логарифма частоты ($\lg(f)$)

5. Снять и построить амплитудно-частотную характеристику двухкаскадного усилителя при наличии отрицательной обратной связи по напряжению между вторым и первым каскадом. Цель обратной связи R_6C_4 включается выключателем SA_2 – положение ВКЛ, ООС – к точкам «а» и «b» в схеме усилителя. В этом случае конденсатор цепи температурной компенсации C_2 первого каскада должен быть подключен параллельно только резистору R_2 , выключатель SA_1 переключить в положение 2. Построение амплитудно-частотной характеристики произвести на том же графике и в том же масштабе, на котором построена частотная характеристика усилителя без обратной связи. Результаты измерений с ООС внести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

$U_{вх}, мВ$	10	25	50	75	100	125	150
$U_{вых}, В$	2,14	3,64	4,14	4,29	4,36	4,38	4,22

6. Провести обработку результатов опытов:

а) по полученным в п. 4 и 5 частотным характеристикам $K_U(f)$ усилителя определить рабочий диапазон частот усилителя без ООС и при её наличии;

б) по полученной в п. 3 амплитудной характеристике $U_{\text{вых}} (U_{\text{вх}})$ усилителя определить динамический диапазон усилителя без ООС и при её наличии.

Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Схема лабораторной установки.
3. Таблицы с экспериментальными данными.
4. Графики передаточных и амплитудно-частотных характеристик.
5. Расчётные параметры.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Определение передаточной и амплитудно-частотной характеристик усилителя.
2. Какое назначение отрицательной обратной связи в усилителе?
3. Как определить полосу пропускания усилителя?
4. Как влияет ООС на амплитудную и амплитудно-частотную характеристики усилителя?

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ С АКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Цель работы: исследование различных вариантов включения дифференциального усилителя: симметричной схемы с дифференциальным входом, при заземленном втором входе усилителя и со стабилизацией тока в цепи эмиттеров транзисторов.

Дифференциальный усилитель (ДУ) на биполярных транзисторах предназначен для усиления разности напряжений, подаваемых на два входа усилителя ($U_{вх1}$ и $U_{вх2}$).

ДУ состоит из двух усилительных каскадов на биполярных транзисторах $VT1$ и $VT2$ (рис. 2.1), на входы которых поступают $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$, выходной сигнал снимается с выходов $VT1(U_{вых1})$ и $VT2(U_{вых2})$ и с сопротивления нагрузки R_n , подключённой к коллекторам $VT1$ и $VT2$. В этом случае ДУ является устройством с симметричным выходом и $U_{вых}$ будет равно: $U_{вых} = U_{вых2} - U_{вых1}$.

Дифференциальные усилители имеют следующие преимущества перед усилительными каскадами:

- а) высокий коэффициент усиления;
- б) устойчивость к воздействию дестабилизирующих факторов;
- в) значительная степень подавления синфазных помех.

В дифференциальном усилителе отмечается дрейф нуля. Для устранения дрейфа нуля применяют два способа:

1. Обеспечение идентичности параметров элементов схемы ДУ, входящих в его состав.

Этот способ реализуется применением интегральных схем, где расстояния между элементами составляет несколько микрон.

2. Увеличение сопротивления R_n (рис. 2.1).

Недостатком второго способа является уменьшение коэффициента усиления ДУ.

Дифференциальный сигнал на входе усилителя определяется по формуле

$$U_d = U_{вх2} - U_{вх1}.$$

Синфазный сигнал определяется по зависимости

$$U_{сф} = \frac{U_{вх1} + U_{вх2}}{2}.$$

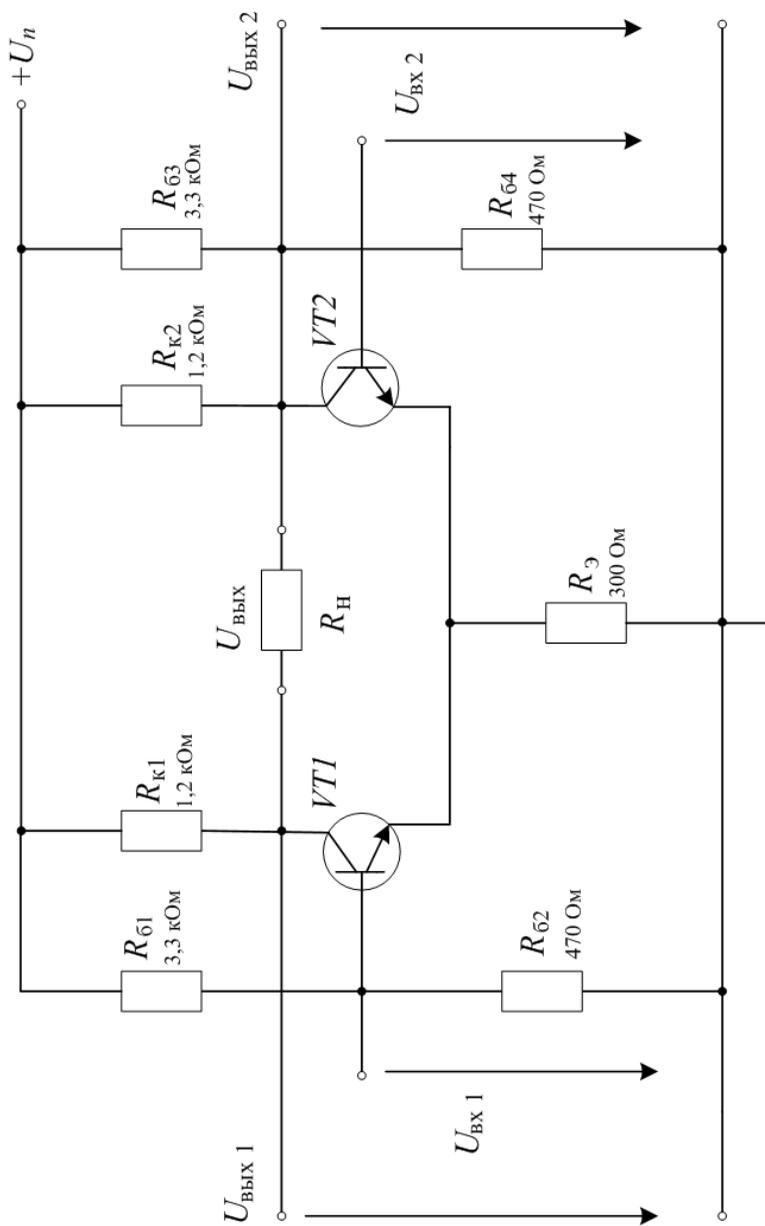


Рис. 2.1. Схема ДУ (симметричная) с дифференциальным входом

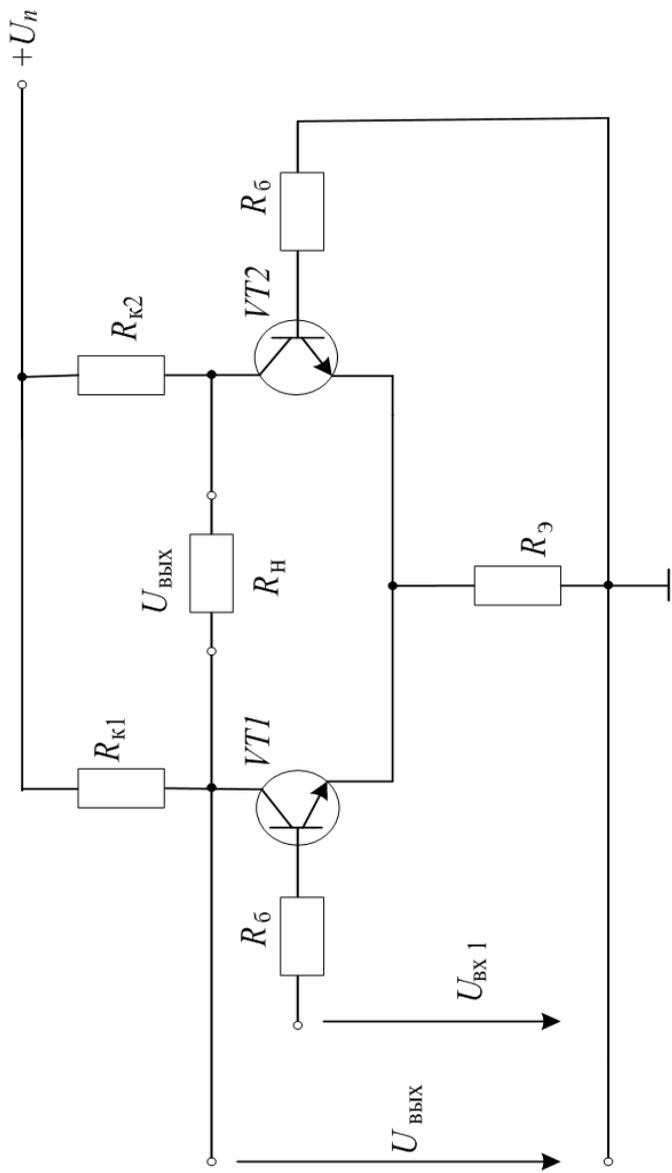


Рис. 2.2. Схема ДУ2 при заземлённом втором входе усилителя ($U_{\text{вх2}} = 0$)

К параметрам дифференциального усилителя относятся следующие:

а) коэффициент усиления по напряжению дифференциального сигнала

$$K_{Uд} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{д}}};$$

б) коэффициент усиления синфазного сигнала

$$K_{\text{сф}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{сф}}};$$

в) коэффициент ослабления синфазного сигнала, который устанавливает зависимость – во сколько раз $K_{Uд}$ больше $K_{\text{сф}}$.

$$K_{\text{о.сф}} = \frac{K_{Uд}}{K_{\text{сф}}}.$$

г) входное дифференциальное сопротивление между входами дифференциального усилителя

$$R_{\text{вх.ДУ}} \approx 2r_{\text{вх}},$$

где $r_{\text{вх}}$ – входное сопротивление транзистора;

д) входное сопротивление синфазное

$$R_{\text{вх.сф}} \approx R_3(1 + \beta),$$

где β – коэффициент передачи тока базы транзистора;

е) выходное сопротивление между выходами ДУ

$$R_{\text{ВЫХ}} \approx 2R_{\text{к}}.$$

На рисунке 2.1 представлена схема ДУ симметричная с дифференциальным входом. Резисторы R_{61} , R_{62} и R_{63} , R_{64} являются делителями напряжений на входе транзисторов $VT1$ и $VT2$, служат для задания рабочей точки транзисторов $VT1$ и $VT2$. Резисторы $R_{к1}$ и $R_{к2}$ – нагрузочные в цепи коллекторов $VT1$ и $VT2$.

На рисунке 2.3 в цепь эмиттера включён источник тока на транзисторе $VT3$.

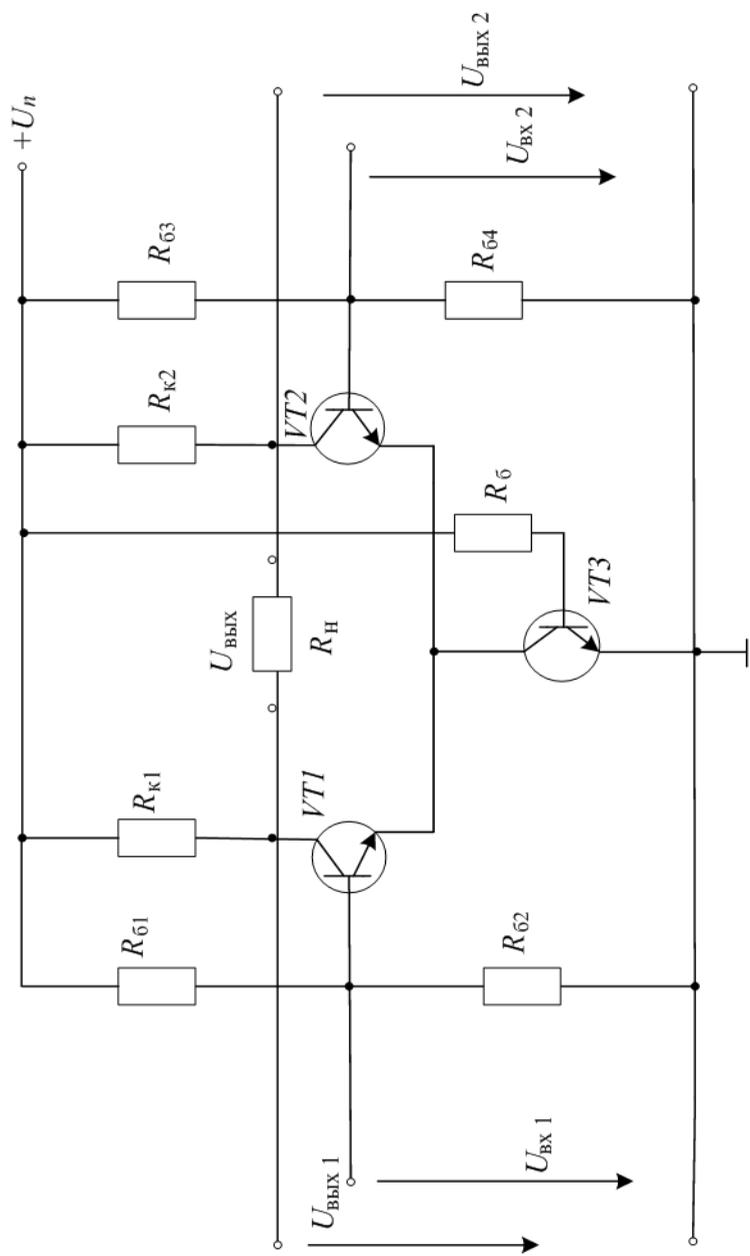


Рис. 2.3. Схема ДУЗ со стабилизатором тока в цепи эмиттеров транзисторов

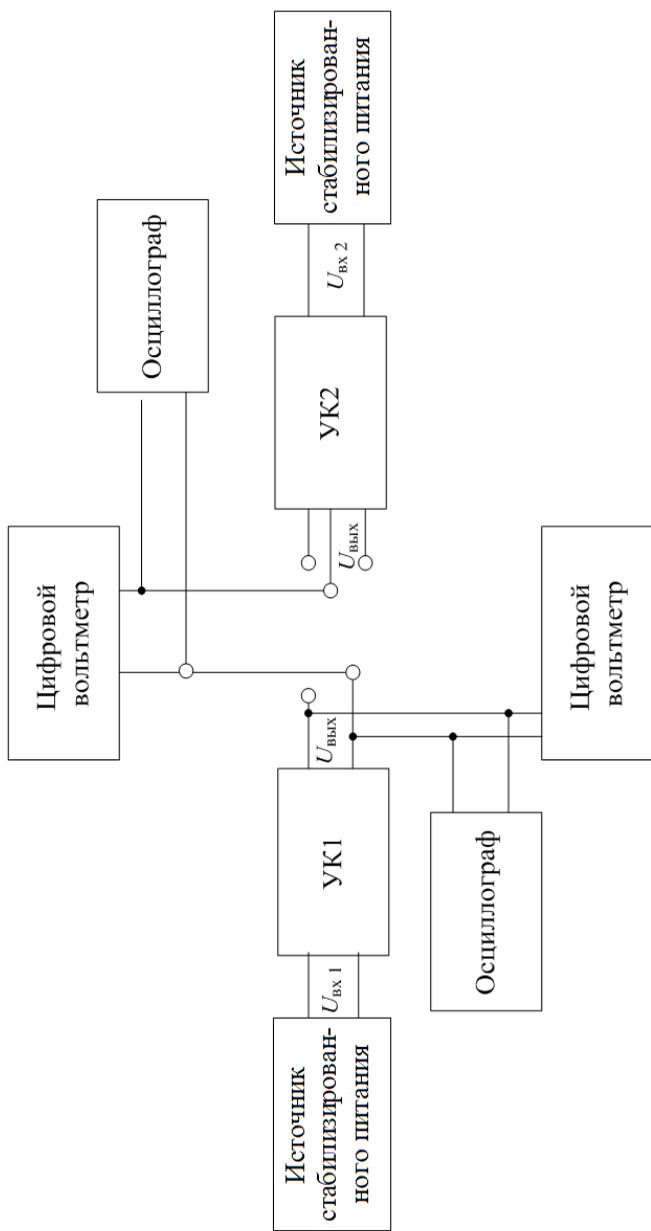


Рис. 2.4. Структурная схема лабораторного стенда

Порядок выполнения работы

1. Провести экспериментальные исследования ДУ.

Снять амплитудную характеристику для каждой из схем на рис. 2.1 – 2.3 $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх1}}, U_{\text{вх2}})$.

Для этого на входы усилительных каскадов УК1 и УК2 подключить источники стабилизированного питания, а на выходы осциллограф и цифровой вольтметр. С помощью осциллографа контролировать сигналы на входе и выходе ДУ, зарисовать осциллограммы на выходе ДУ (рис. 2.4) с помощью подключения измерительных приборов при проведении экспериментальных исследований ДУ.

1. Снять амплитудно-частотную характеристику для среднего входного сигнала $U_{\text{вх.ср}}$.

2. Выполнить теоретические расчёты параметров ДУ и сравнить с экспериментальными:

- коэффициент усиления дифференциального сигнала $K_{\text{уд}}$;
- коэффициент усиления синфазного сигнала $K_{\text{сф}}$;
- коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{\text{о.сф}}$;
- дифференциальное входное сопротивление $K_{\text{вх.д}}$;
- входное сопротивление синфазного сигнала $K_{\text{вх.сф}}$;
- выходное сопротивление между выходами ДУ $R_{\text{вых}}$.

При расчёте использовать следующие значения параметров транзисторов и номиналы элементов в схеме ДУ:

$$r_{\text{вх}} = 100 \text{ Ом}; \beta = 90; R_{\text{к}} = 1,2 \text{ кОм}; R_{\text{э}} = 300 \text{ Ом}.$$

Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Схема измерений.
3. Экспериментальные амплитудные характеристики.
4. Расчётные параметры ДУ.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие усилительные каскады называют дифференциальными?
2. Назовите особенности схемотехнического проектирования ДУ.
3. Какие способы устранения дрейфа нуля ДУ известны?
4. В чём преимущество ДУ?
5. Поясните назначение различных схем включения ДУ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОНЕЧНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ

Цель работы: изучение усилителя мощности и измерение основных параметров, характеризующих качество работы усилителя.

Краткие теоретические сведения

Назначение усилителей мощности. Предназначены для получения необходимой (заданной) мощности в нагрузке.

Классификация усилителей мощности. Усилители мощности делятся на два основных класса: однотактные и двухтактные.

Параметры усилителей мощности. Основными параметрами являются коэффициент полезного действия (η) и коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник K_{Γ}).

Коэффициент полезного действия определяется по следующей зависимости:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{п}}},$$

где $P_{\text{н}}$ – мощность, выделяющаяся в нагрузке; $P_{\text{п}}$ – мощность источника питания.

Мощность, выделяющаяся в нагрузке, определяется по следующей зависимости [1]:

$$P_{\text{н}} = \left(\frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{J_{\text{н}}}{\sqrt{2}} \right) = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{2}} \left(\frac{U_{\text{н}}/R_{\text{н}}}{\sqrt{2}} \right) = \gamma \frac{(U_{\text{н}})^2}{2R_{\text{н}}},$$

где $U_{\text{н}}$ – амплитуда выходного напряжения (напряжение в нагрузке); $J_{\text{н}}$ – выходной ток (ток в нагрузке); $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки; γ – относительная амплитуда выходного напряжения усилителя, $0 \leq \gamma \leq 1$; $U_{\text{п}}$ – напряжение источника питания.

Коэффициент нелинейных искажений служит для количественной оценки искажений в усилителе и характеризует отличие формы выходного сигнала от гармонической, и представляет собой отношение среднеквадратичного напряжения суммы всех гармоник выходного сигнала усилителя, кроме первой, к напряжению первой гармоники:

$$K_{\Gamma} = \frac{\left(\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2} \right)}{U_1},$$

где U_i – амплитуда напряжения i -й гармоники на выходе усилителя; U_1 – амплитуда напряжения первой гармоники в выходном сигнале.

Исходные данные для расчёта усилителя мощности.

Для расчёта усилителей мощности исходными данными являются заданные сопротивление нагрузки (R_H) и мощность (P_H), которая выделяется в нагрузке, границы частотного диапазона входного сигнала (нижняя частота, верхняя частота), коэффициент нелинейных искажений, коэффициенты частотных искажений, рабочий диапазон температур, коэффициент температурной неустойчивости.

Двухтактные усилители мощности применяются при большой мощности в нагрузочном устройстве.

Режимы работы (классы усиления) усилителей мощности.

Основными классами усиления, применяемых в усилителях мощности, являются классы A , B и AB . Класс усиления определяется полярностью и значением напряжения смещения $U_{см}$, а также выходным напряжением.

Характеристика класса усиления A . В классе A ток в выходной цепи транзистора протекает весь период изменения напряжения на входе усилителя.

Для класса усиления A характерно следующее [1]:

1. Транзистор работает в линейной области, поэтому на выходе формируется сигнал с минимальными искажениями, практически форма напряжения выходного сигнала повторяет форму напряжения входного сигнала.

2. Низкий коэффициент полезного действия ($\eta \approx 0,5$), поэтому класс усиления A реализуется в предварительных усилительных каскадах, в которых необходимо обеспечить незначительный коэффициент нелинейных искажений.

Характеристика класса B . В классе усиления B ток в выходной цепи транзистора протекает половину периода изменения напряжения на входе усилителя.

Особенности класса усиления B следующие:

1. Присутствуют значительные нелинейные искажения выходного напряжения, поэтому в усилителях реализуется довольно редко.

2. Коэффициент полезного действия равен приблизительно 0,7.

3. Применяется класс усиления B в усилителях средней и большой мощности.

Характеристика класса усиления AB . В этом режиме работы усилителя ток в выходной цепи транзистора протекает больше половины периода изменения напряжения входного сигнала.

Класс усиления AB характеризуется следующими особенностями.

1. Обеспечивается высокий коэффициент полезного действия и при этом формируются невысокие искажения выходного напряжения.

2. Применяется при проектировании выходных каскадов усилителей мощности.

В классах усиления A , B и AB рабочие точки на нагрузочной линии усилителя мощности по постоянному току расположены, как показано на рис. 3.1 [2].

На рисунке 3.1 представлено семейство выходных статических характеристик биполярного транзистора, на базе которого выполнен усилитель мощности, где J_k – ток коллектора транзистора, $U_{кз}$ – напряжение коллектор-эмиттер, $J_б$ – ток базы транзистора, $E_{п}$ – напряжение питания.

На нагрузочной прямой линии рабочая точка T_A , соответствующая классу усиления A , выбирается в центре активной области, приращения сигнала относительно рабочей точки должны быть не более 40%.

Класс усиления A используется в одноктных усилителях.

В классе усиления B рабочая точка усилителя T_B смещается в нижний участок линии нагрузки в режиме отсечки транзистора, при котором $J_B = 0$. Класс усиления B используется в двухтактных усилителях.

В классе усиления AB рабочая точка T_{AB} находится посередине нагрузочной прямой на интервале между рабочими точками класса A – T_A и класса B – T_B .

Устройство усилителя мощности. Усилители мощности реализуются по трансформаторной и бестрансформаторной схемам. В основном применяются бестрансформаторные схемы для упрощения структуры усилителя, так как при этом исключаются объёмные элементы – трансформаторы. В многокаскадных усилителях усилитель мощности применяется в качестве выходного каскада. В усилителях мощности реализуются следующие условия: обеспечивается низкое выходное сопротивление, цепи отрицательной обратной связи формируются по напряжению [1].

Описание лабораторного стенда и методические указания

Принципиальная электрическая схема усилителя показана на рис. 3.2. Первый каскад построен по схеме с общим эмиттером на транзисторе $VT1$. Предоконечный фазоинверсный каскад построен по последовательной двухтактной схеме на транзисторах $VT2(n-p-n)$ и $VT3(p-n-p)$ [3].

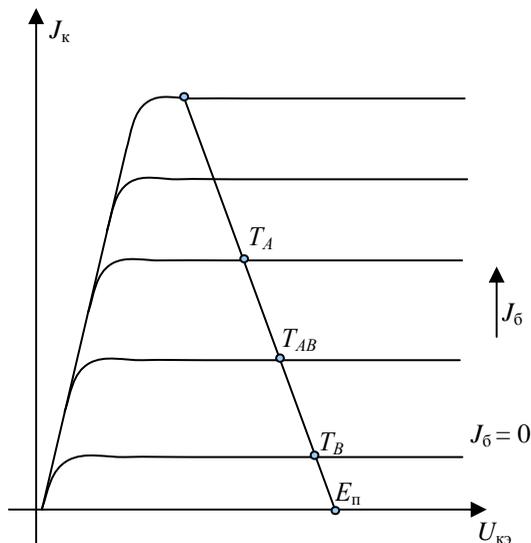


Рис. 3.1. Расположение рабочих точек усилителя мощности при работе в классах усиления *A*, *B* и *AB*

Выходной каскад выполнен по двухтактной бестрансформаторной схеме с последовательно соединёнными транзисторами *VT4* и *VT5*.

В усилителе мощности обеспечивается равномерная амплитудно-частотная характеристика благодаря глубокой частотно-независимой отрицательной обратной связи. Напряжение обратной связи снимается с нагрузки выходного каскада и подаётся в цепь базы первого каскада через резистор R_2 и цепочку C_3, R_4 .

Для устранения искажения сигнала типа «Ступенька» на базы транзисторов *VT2* и *VT3* подано напряжение смещения, снимаемое с диодов *VD1* и *VD2*. Кроме того, как термочувствительные элементы, эти диоды поддерживают в заданных пределах ток покоя выходных транзисторов *VT4* и *VT5* при изменении температуры окружающей среды. Входное сопротивление усилителя мощности равно 3,5 кОм. Мощность, развиваемая усилителем на нагрузке в 4 Ом, равна 4 Вт. Максимальная мощность нагрузки – 0,5 Вт. Максимальный входной сигнал – 1,3 В.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему измерений в соответствии с рис. 3.2, где 1А, 2А, 3А, 4А – обозначение коммутирующих клемм на стенде:

1А – земля;

2А – подключение генератора;

3А – подключение питания усилителя;

4А – выход схемы усилителя, подключение цифрового вольтметра или осциллографа.

2. Определить чувствительность схемы и максимальный искажающий сигнал.

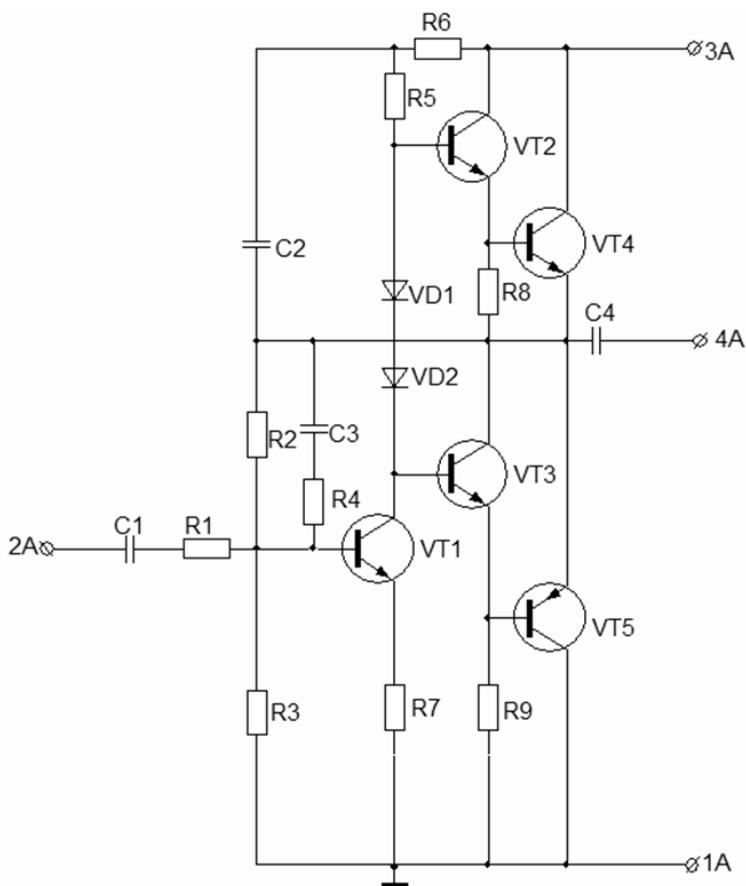


Рис. 3.2. Принципиальная схема усилителя мощности



Рис. 3.3. Структурная схема измерений параметров усилителя мощности:
 ГГС – генератор гармонического сигнала; ОС – осциллограф;
 ЦЭВ – цифровой электронный вольтметр

3. Снять проходную характеристику $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ и определить её линейность.

Нелинейность в процентах оценить величиной

$$\delta = \Delta U / U_{\text{max}},$$

где ΔU – максимальное отклонение характеристики от линии; U_{max} – максимальное значение проходной характеристики.

ЦЭВ – цифровой электронный вольтметр

4. Подать среднее значение входного сигнала и зарисовать чёткие эпюры напряжения. По осциллограмме полагается оценить качественно наличие 2-й и 3-й гармоник в выходном спектре сигнала. С этой целью на осциллограмме измерить с помощью калибратора время достижения заданного уровня A_0 двумя полупериодами (рис. 3.4) τ_1 и τ_2 , а также амплитуды полупериодов A_1 и A_2 . Как известно, в случае идеальной симметрии двухтактной схемы на нагрузке выделяется первая гармоника, а все остальные отсутствуют. Практически это не выполня-

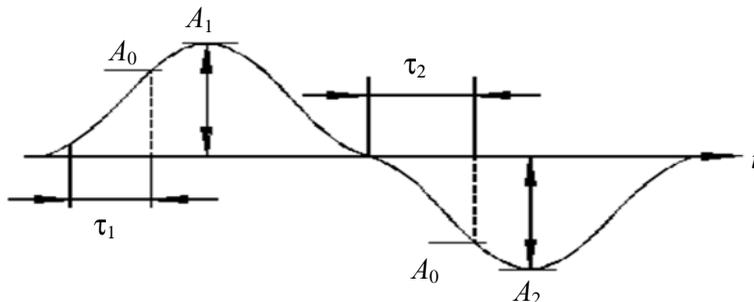


Рис. 3.4. Осциллограмма выходного сигнала

ется и, если $\tau_1 \neq \tau_2$, то присутствует 2-я гармоника, а в случае $A_1 \neq A_2$ присутствует 3-я и другие гармоники. Количественно оценку величины гармоник можно выполнить, например методом пяти ординат.

Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Рисунки измерительных стендов.
3. Таблицы и графики результатов измерений, эпюры и осциллограммы основных сигналов.
4. Выводы.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается основное отличие усилителя мощности от усилителя напряжения?
2. Чем определяется режим работы усилительного элемента по току?
3. Какими показателями режим *A* превосходит режим *B* и наоборот?
4. Какими преимуществами обладает двухтактный усилитель мощности перед одноктактным?

ИССЛЕДОВАНИЕ LC- И RC-АВТОГЕНЕРАТОРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ТРАНЗИСТОРАХ

Цель работы: изучить принцип действия генераторов гармонических колебаний: LC и RC-генераторов на транзисторах и цифрового генератора на логических элементах, их принципиальные электрические схемы.

Краткие теоретические сведения

Определение. Генератором называют устройство, в котором энергия переменного тока преобразуется в энергию переменного тока с заданными параметрами и формой выходного сигнала.

Классификация. Генераторы по форме выходного сигнала делятся на два вида: гармонических колебаний и импульсные (релаксационные).

Режимы работы. Генераторы работают в двух режимах: автоколебательном и ждущем. В автоколебательном режиме на выходе генератора формируются колебания при подключении к источнику питания. В ждущем режиме на выходе генератора формируются колебания только при поступлении на его вход внешнего запускающего сигнала.

Устройство автогенератора. Автогенератор состоит из активного элемента – усилительного каскада или устройства с отрицательным сопротивлением и фазосдвигающей цепи. Фазосдвигающие цепи в LC-генераторах – трансформаторные, в RC-генераторах – резистивно-ёмкостные. Структурная схема автогенератора представлена на рис. 4.1.

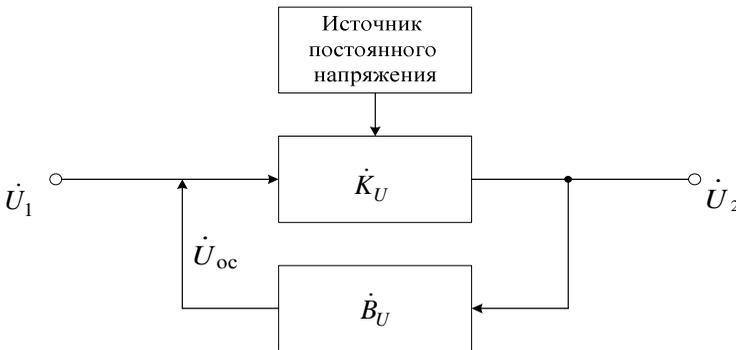


Рис. 4.1. Структурная схема автогенератора

На структурной схеме обозначены комплексные величины: \dot{U}_1 , \dot{U}_2 , \dot{U}_{oc} – соответственно входное, выходное, обратной связи напряжения усилителя; \dot{K}_U – коэффициент усиления усилителя; \dot{B}_U – коэффициент передачи цепи обратной связи.

Коэффициенты передачи по напряжению усилителя и цепи обратной связи определяются по следующим зависимостям:

$$\dot{K}_U = K_U(\omega) e^{j\varphi_{12}(\omega)};$$

$$\dot{B}_U = B_U(\omega) e^{j\varphi_{21}(\omega)},$$

где $K_U(\omega)$ и $B_U(\omega)$ – модули передаточных функций; $\varphi_{12}(\omega)$ – сдвиг фаз между входным и выходным напряжением; φ_{21} – сдвиг фаз между выходным и входным напряжением.

Принцип действия автогенератора и условия самовозбуждения.

В LC -генераторах в цепь положительной обратной связи усилительного каскада включается параллельный колебательный LC -контур. Фазосдвигающая цепь в цепи обратной связи усилительного каскада (рис. 4.2).

На рисунке 4.2 L_1 , L_2 – индуктивности, M – взаимная индуктивность.

В колебательном контуре под действием напряжения источника стабилизированного питания конденсатор C заряжается до напряжения источника питания и в контуре возникают затухающие колеба-

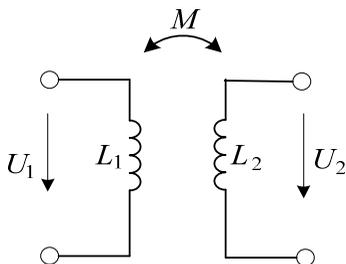


Рис. 4.2. Схема взаимноиндуктивной фазосдвигающей цепи

ния с частотой $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, так как действует активное сопротивление

катушки. Для формирования незатухающих колебаний дополнительно поступает энергия от источника напряжения через цепь положительной обратной связи и активный элемент-усилитель. Конденсатор в контуре опять заряжается и формируются колебания. Обеспечение незатухающих колебаний осуществляется в результате подачи энергии в контур синхронно с колебаниями тока в контуре.

При подключении к источнику питания в автогенераторе возникают колебания, часть энергии которых за счёт положительной обратной связи поступает на его вход. Колебательные процессы происходят в узком диапазоне частот на заданной частоте и затухают при других частотах. При включении автогенератора наблюдается две стадии его работы. Первая стадия – это переходные процессы в усилительном элементе, при которых изменяется амплитуда выходных колебаний генератора в результате влияния нелинейных свойств активного элемента. Вторая стадия – стационарный режим автогенератора – генерация колебаний с постоянной установившейся амплитудой в результате завершения переходных процессов в элементах генератора.

Условия самовозбуждения генератора. Устойчивые колебания в генераторе формируются с частотой ω при выполнении условий самовозбуждения:

баланса амплитуд:

$$K_U(\omega)B_U(\omega) = 1;$$

баланса фаз:

$$\varphi_{12}(\omega)\varphi_{21}(\omega) = 2\pi n,$$

где n – целое число ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$).

В автогенераторе баланс амплитуд достигается в результате определения соответствующих параметров активного элемента, а баланс фаз – фазосдвигающими цепями (трансформаторной и резистивно-ёмкостной).

Искажения в генераторе. Искажения формы колебаний генератора могут быть в результате нелинейной схемы стабилизации амплитуды колебаний, которые могут быть устранены или уменьшены

введением цепи автоматической регулировки коэффициента усиления активного элемента. Искажения, обусловленные нелинейностью характеристик активных элементов, устраняются применением отрицательной обратной связи в усилительном каскаде.

Порядок выполнения лабораторной работы

I. Исследовать LC -генератор гармонических колебаний (рис. 4.3).

На рисунке 4.3 в колебательном контуре возникают незатухающие колебания в результате внесения в контур отрицательного сопротивления устройством с отрицательным дифференциальным сопротивлением на полевых транзисторах VT_2 , VT_3 , которое компенсирует положительное активное сопротивление. Отрицательное сопротивление формируется при действии положительной обратной связи в усилительном каскаде.

Амплитуда выходного сигнала изменяется при изменении напряжения на базе транзистора VT_1 переменным резистором R_1 .

1. На выход генератора подключить осциллограф. Изменяя ручкой положение переменного резистора, определить напряжение смещения минимального и максимального, при котором наступает режим генерации.

$U_{\text{см min}}$ и $U_{\text{см max}}$ измерить цифровым вольтметром и осциллографом.

2. Измерить осциллографом амплитуды генерируемых колебаний: U_{min} , U_{max} .

3. Измерить частотный диапазон генерируемых колебаний в генераторе: F_{min} , F_{max} с помощью осциллографа, определяя частоту по формуле

$$F = \frac{n}{lT_p},$$

где n – количество периодов, которые занимают расстояние l ; T_p – длительность развёртки.

II. Исследовать RC -генератор (рис. 4.4).

В схеме генератора условия самовозбуждения реализуются следующими элементами: баланс амплитуд – активным элементом (усилительным каскадом на транзисторе VT); баланс фаз – с помощью

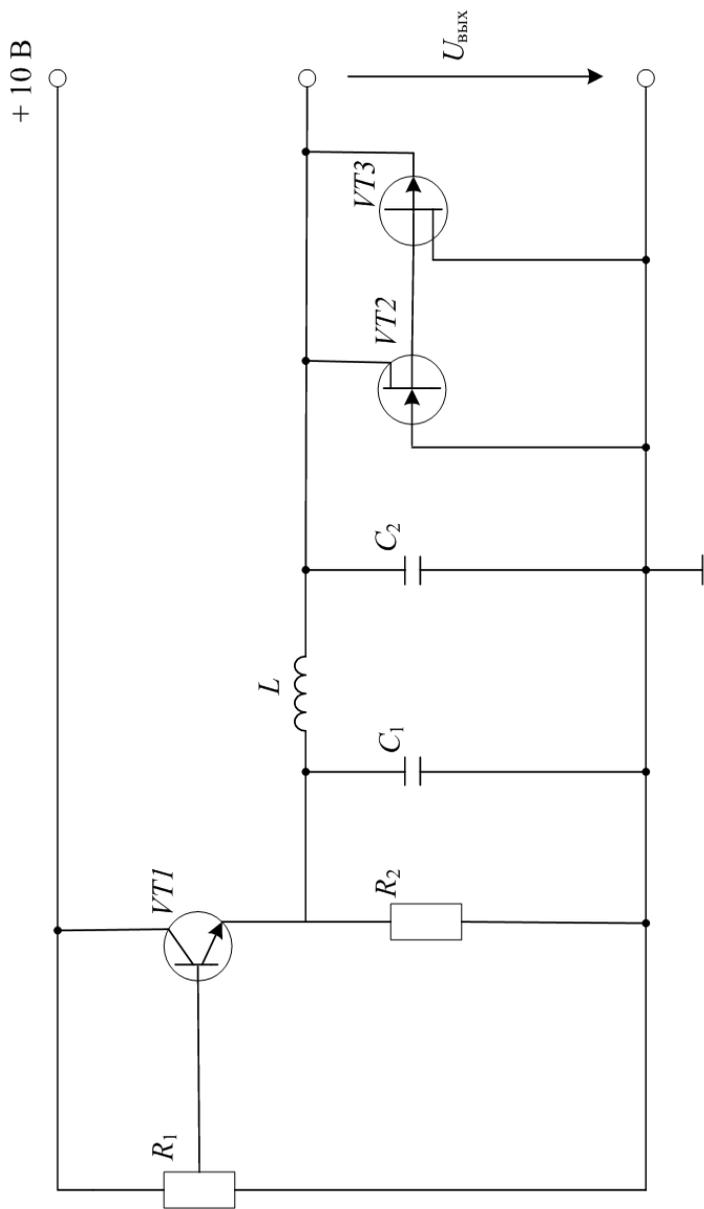


Рис. 4.3. Принципиальная электрическая схема LC-генератора

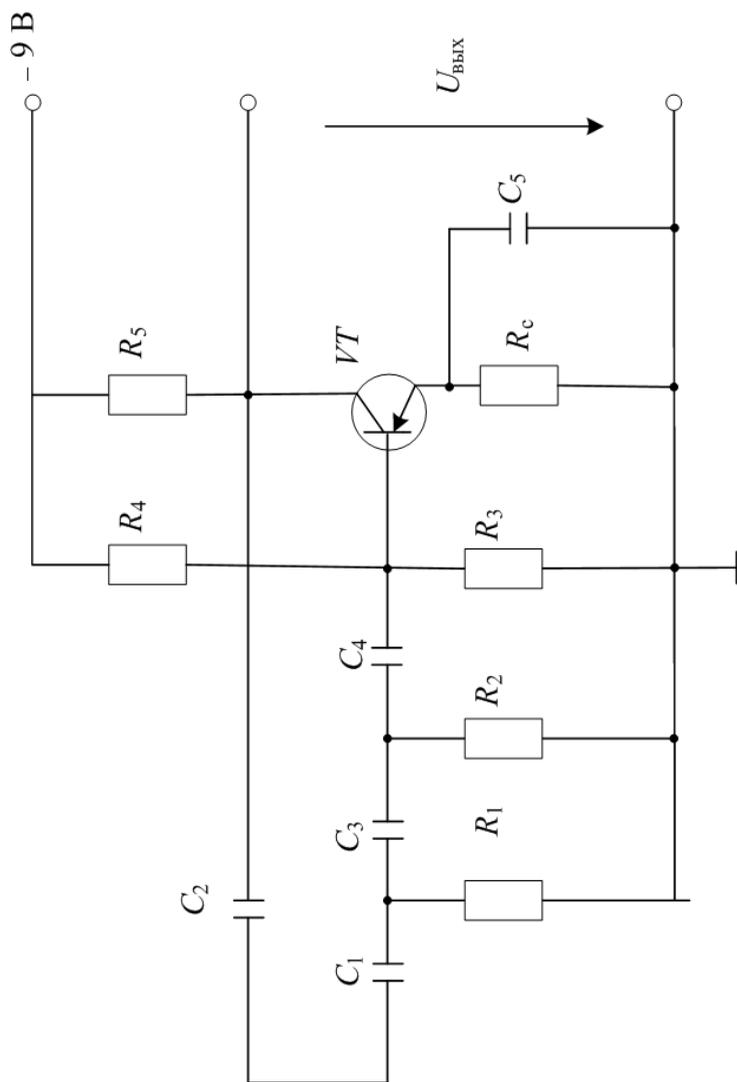


Рис. 4.4. Принципиальная электрическая схема RC-генератора

резистивно-ёмкостной фазосдвигающей цепи на элементах $C_1, C_2, C_3, R_1, R_2, R_3$. Резистор R_3 входит также в делитель напряжения R_3, R_4 на входе транзистора .

1. Измерить частоту колебаний генератора по осциллографу и цифровому вольтметру.

2. Рассчитать частоту колебаний генератора по формуле

$$F = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}},$$

где $R = 1,5$ кОм, $C = 10$ нФ.

Содержание отчёта

1. Принципиальные электрические схемы LC и RC -генераторов.
2. Экспериментальные данные.
3. Осциллограммы генерируемых колебаний LC и RC -генераторов.
4. Расчётные данные.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия и электрическую схему RC -генератора.
2. Поясните принцип действия цифрового генератора на логических элементах.
3. Изобразите структурную схему автогенератора.
4. Поясните назначение обратной связи в автогенераторе.
5. Как в схемах LC и RC -генераторов реализуются условия самовозбуждения?
6. Запишите условие самовозбуждения генератора.

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОГЕНЕРАТОРОВ НА ИНВЕРТОРАХ ТТЛ С ВРЕМЯЗАДАЮЩЕЙ RC-ЦЕПЬЮ

Цель работы: изучить принцип действия цифрового генератора периодического сигнала, определить частотный диапазон опорного и цифрового генераторов.

Краткие теоретические сведения

По сравнению с аналоговыми генераторами цифровые обладают высокой стабильностью и точностью воспроизведения сигнала, что в ряде случаев является решающим фактором. Кроме того, цифровые генераторы могут воспроизводить такие формы сигналов, которые другими средствами генерировать нельзя. Структурная схема цифрового генератора показана на рис. 5.1 [5].

Цифровой генератор состоит из генератора тактовых импульсов ГТИ, делителя частоты с переменным коэффициентом деления ДПКД, управляемого внешним кодом, адресного счётчика СЧ и функционального преобразователя ФП. ДПКД необходим для изменения временного масштаба генерируемого сигнала. Форма сигнала задаётся ФП по мере изменения выходного кода счётчика СЧ, который при постоянной частоте счётчика изменяется линейно.

В цифровых генераторах периодического сигнала при генерировании сигнала (например, синусоидального) требуется, чтобы выходной код счётчика СЧ нарастал до максимального значения, а затем уменьшался до нуля, снова нарастал и т.д. Для этого используется схема, приведённая на рис. 5.2 [19].

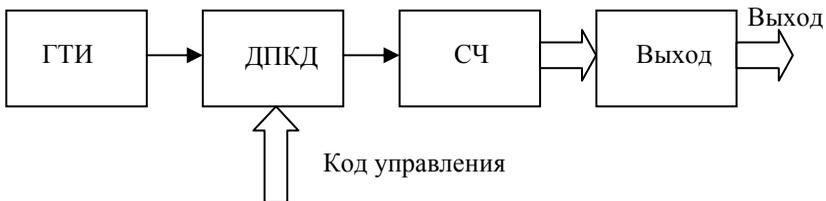


Рис. 5.1. Структурная схема цифрового генератора

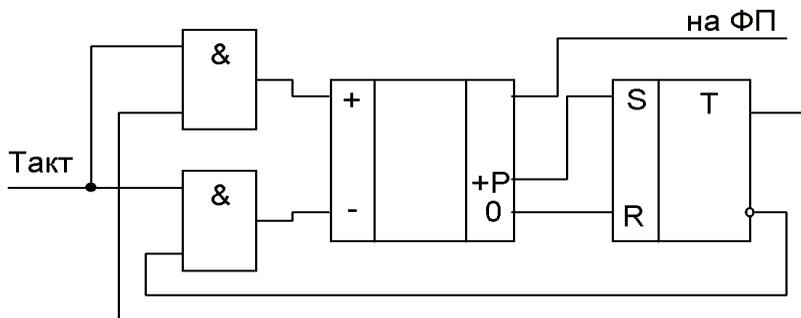


Рис. 5.2. Генератор периодического симметричного сигнала

Предположим, что открыт верхний по схеме элемент И, тактовые импульсы поступают на суммирующий (+) вход счётчика. Выходной код счётчика нарастает до максимального значения. В этот момент на выходе переполнения (+P) появляется импульс, который по входу S запускает триггер. На прямом выходе триггера появляется потенциал логической 1, которым открывается нижний по схеме элемент И. Теперь тактовые импульсы поступают на вычитающий (-) вход счётчика и выходной код счётчика уменьшается. Когда он становится равным нулю, на нулевом выходе счётчика (0) появляется импульс, который по выходу R сбрасывает триггер. На инверсном выходе триггера появляется потенциал логической 1, которым открывается верхний по схеме элемент И, снова тактовые импульсы поступают на суммирующий вход счётчика и т.д. Выходы переполнения и нуля имеются во многих микросхемах счётчиков, в частности в КР555ИЕ7. Если таких выводов нет, необходимо устанавливать дешифраторы.

Описание лабораторного стенда и методические указания

Схема опорного генератора приведена на рис. 5.3 [5]. Диапазон рабочих частот опорного генератора равен от 280 Гц до 790 кГц. Генератор выполнен на трёх инверторах и одной времязадающей RC-цепи. Её особенностью является использование резистора RC-цепи как для перезарядки конденсатора, так и для улучшения условий самовозбуждения схемы.

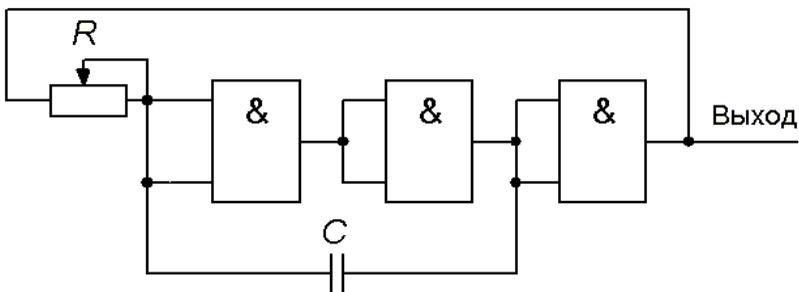


Рис. 5.3. Электрическая схема опорного генератора

Этот резистор, охватывая инвертор цепью ООС, выводит его линейный (усилительный) участок передаточной характеристики. Это в первый момент позволяет гарантированно получить значение петлевого усиления > 1 , т.е. способствует выполнению условий самовозбуждения генератора.

Следует заметить, что если модули максимального и минимального значения напряжения на конденсаторе в общем случае не равны друг другу, то интервалы заряда и разряда времязадающего конденсатора также неодинаковы. Следовательно, на выходе генератора существует периодическая последовательность импульсов со скважностью q .

Электрическая схема лабораторной установки цифрового генератора периодического сигнала показана на рис. 5.4.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему для определения частотных диапазонов генераторов в соответствии с рис. 5.5.

2. Определить частотный диапазон опорного генератора и цифрового генератора периодического сигнала. Для этого, изменяя сопротивление переменного резистора R_1 на стенде (рис. 5.4), контролировать частоту на выходе цифрового генератора периодического сигнала по частотомеру на выходах 5, 6, 7, 8. Полученные данные занести в табл. 5.1.

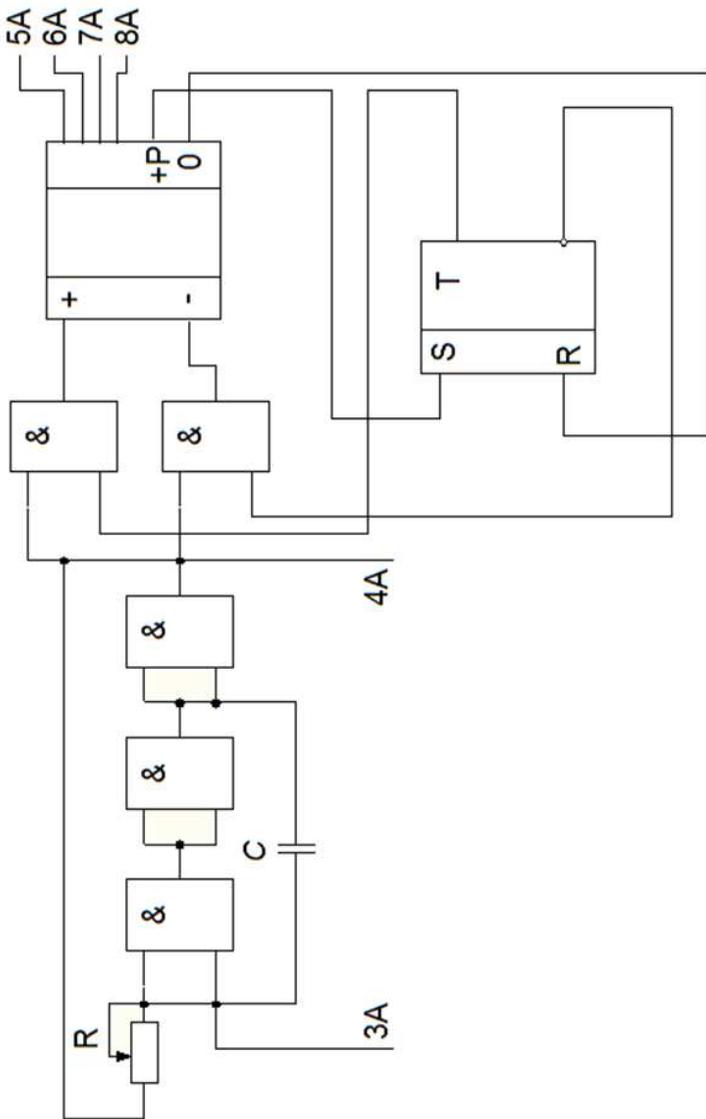


Рис. 5.4. Электрическая схема лабораторной установки:
 2А – питание; 1А, 1Б – 8Б (на стенде) – общий

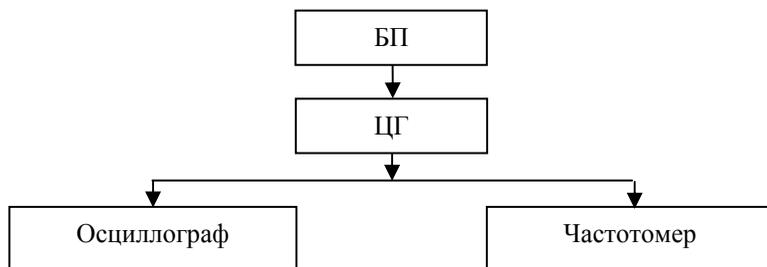


Рис. 5.5. Структурная схема определения параметров генераторов:

БП – блок питания (источник постоянного напряжения);

ЦГ – цифровой генератор; Частотомер – Ф5041

Таблица 5.1

Положение резистора R_1 , Ом									
$F_{оп.ген.}$, Гц									
$F_{ц.г.}$, Гц	ВЫХ. 5								
	ВЫХ. 6								
	ВЫХ. 7								
	ВЫХ. 8								

3. Зарисовать осциллограммы выходных сигналов для каждого выхода на одном графике, пример которых представлен на рис. 5.6.

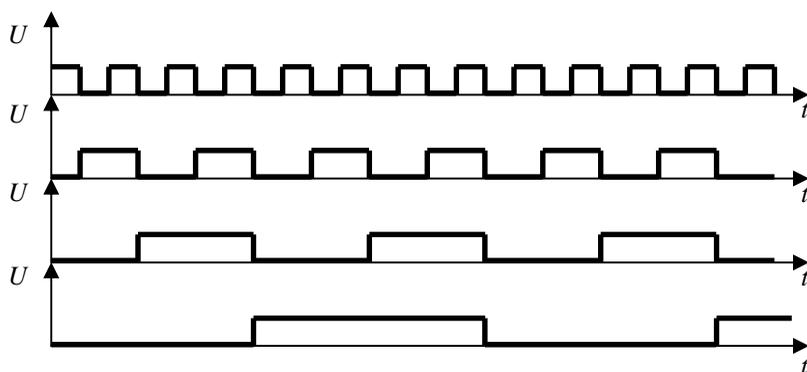


Рис. 5.6. Осциллограммы выходных сигналов цифрового генератора

Отчёт по лабораторной работе

1. Построить зависимость частоты цифрового генератора периодического сигнала от частоты опорного генератора для каждого выхода цифрового генератора.

2. Зарисовать осциллограммы выходных сигналов цифрового генератора.

Контрольные вопросы

1. Какими преимуществами обладают цифровые генераторы по сравнению с аналоговыми?

2. Каким образом формируется сигнал в генераторах периодического сигнала?

3. Для чего служит резистор в RC -цепи опорного генератора?

4. В чём назначение функционального преобразователя в схеме цифрового генератора?

5. Изложить принцип действия и электрическую схему LC -генератора.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ НА БАЗЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Цель работы: изучение режимов работы операционного усилителя (ОУ).

Краткие теоретические сведения

Назначение операционного усилителя (ОУ). ОУ – это усилитель постоянного тока, имеющий коэффициент усиления входного сигнала по напряжению от 10^3 до 10^6 . Усилитель называется операционным, так как в вычислительной технике применяется для реализации математических операций: суммирования, дифференцирования, интегрирования и др.

Обозначение ОУ на электрических схемах приведено на рис. 6.1.

Операционный усилитель имеет два входа и один выход:

1 – инвертирующий вход (обозначен кружком); 2 – неинвертирующий вход; 3 – выход.

У ОУ двухполярное питание: $+U_{п}$ и $-U_{п}$. При работе с операционным усилителем входные сигналы подают или на оба входа ОУ, или один из входов, при этом второй вход заземляется.

Параметры, свойства и характеристики ОУ.

Основными параметрами операционного усилителя являются [1]:

1. Напряжение смещения ($U_{см}$) – это входное напряжение, при котором напряжение на выходе ($U_{вых}$) равно нулю.

2. Коэффициент усиления по напряжению (K_U) – это отношение приращения напряжения на выходе к приращению напряжения на входе

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}}.$$

3. Входной ток ($J_{вх}$) – это ток, который протекает по инвертирующему ($J_{вх1}$) и неинвертирующему ($J_{вх2}$) входам ОУ.

4. Разность входных токов $\Delta J_{вх} = |J_{вх1} - J_{вх2}|$.

5. Входное сопротивление ($R_{вх}$) – сопротивление между входами ОУ.

6. Выходное сопротивление ($R_{вых}$) определяется по формуле

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{J_{\text{ВЫХ}}}.$$

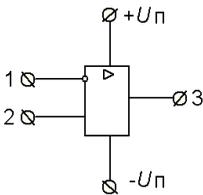


Рис. 6.1. Обозначение ОУ на электрических схемах

Динамические свойства ОУ характеризуются максимальной скоростью нарастания выходного напряжения, которая определяется при подаче на вход ОУ импульса напряжения прямоугольной формы.

Частотная полоса ОУ определяется частотой усиления, т.е. частотой, на которой коэффициент усиления ОУ уменьшается до единицы.

Параметры операционного усилителя зависят от температуры окружающей среды. В большей степени этой зависимости подвержены напряжение смещения, входные токи, коэффициент усиления.

ОУ имеет высокое входное и низкое выходное сопротивление.

Передаточная характеристика ОУ расположена в двух квадрантах, как показано на рис. 6.2 [1], так как ОУ имеет двухполярное питание.

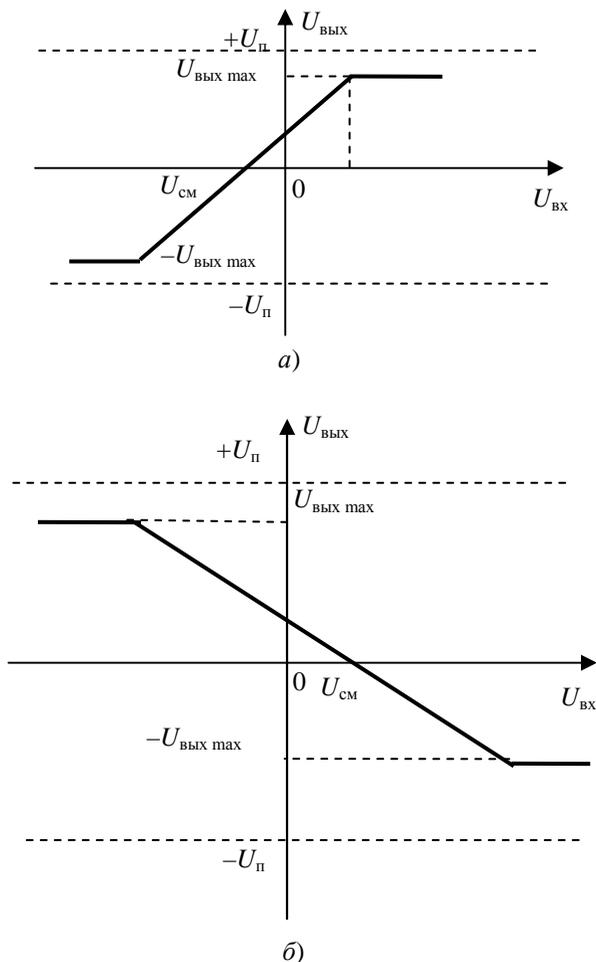


Рис. 6.2. Передаточные характеристики ОУ по неинвертирующему (а) и инвертирующему (б) входам

Как отражено на характеристиках, максимальное выходное напряжение ОУ ограничено напряжением питания усилителя.

Устройство ОУ следующее. Интегральные операционные усилители состоят в основном из нескольких усилительных каскадов по напряжению на транзисторах. Входной каскад, как правило, выполнен по дифференциальной схеме. Согласующий каскад обеспечивает согласование выходного сигнала дифференциального усилителя с выходным каскадом ОУ, а также требуемое усиление сигнала по току и напряжению и согласование фаз сигналов. Выходной каскад является усилителем мощности.

Описание лабораторного стенда

Стенд для исследования ОУ состоит из ОУ, набора резисторов и конденсаторов с гнездами коммутации, а также элементов включения и контроля питания стенда [3].

Сборка необходимой схемы для исследования осуществляется соединительными шнурами со штекерами на концах, подбор необходимых элементов входных цепей ОУ и обратной связи осуществляется в соответствии с заданием.

Схема лабораторного стенда приведена на рис. 6.3.

Порядок выполнения работы

Инвертирующий усилитель

1. Рассчитать инвертирующий усилитель и собрать схему (рис. 6.4, а) для следующих данных: коэффициент усиления по напряжению $K_U = 10$; собственный коэффициент усиления операционного усилителя $K_0 = 5 \cdot 10^5$; сопротивление нагрузки $R_n = 100$ кОм; температурный коэффициент ТКЕ = 50 мкВ/К; напряжение смещения $U_{см} = 50$ мВ; $C = 1$ мкФ. В процессе расчёта определить: $R_{ос}$, R_1 , балластный резистор $R_{бал}$, реальный коэффициент усиления $K_{реал}$, коэффициент обратной связи β , температурный дрейф $\Delta U_{вых}$.

2. Определить максимальный уровень входного сигнала и оценить коэффициент усиления.

3. Определить полосу пропускания при малом сигнале на входе (0; 1 В).

4. Определить полосу пропускания при максимальном сигнале на входе.

5. Оценить усиление переменного сигнала (искажение, коэффициент усиления), добавив к схеме на рис. 6.4, б конденсатор C .

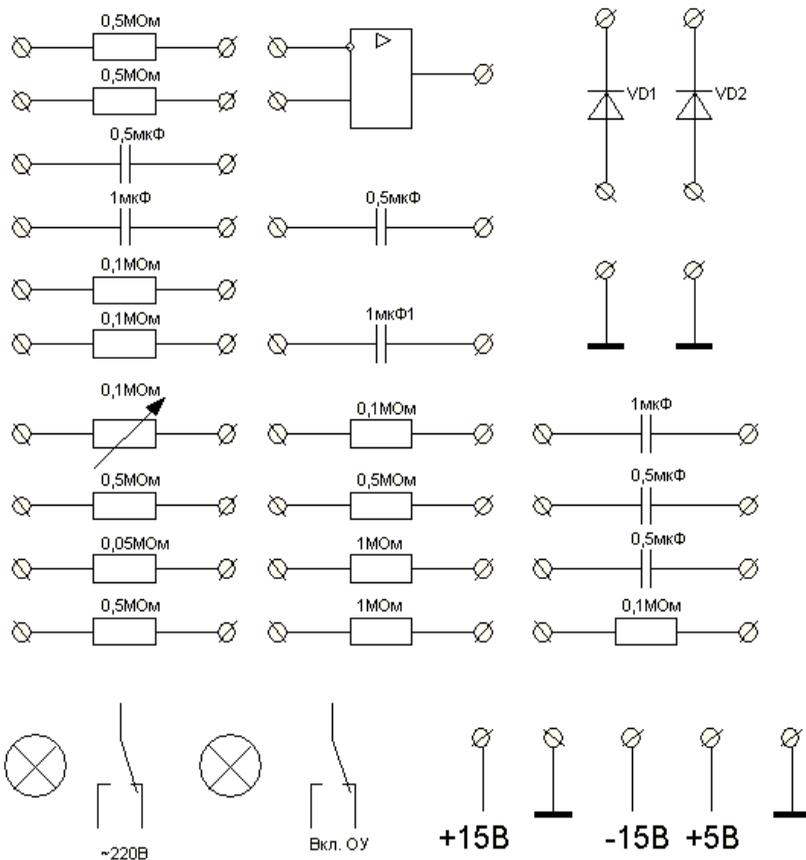


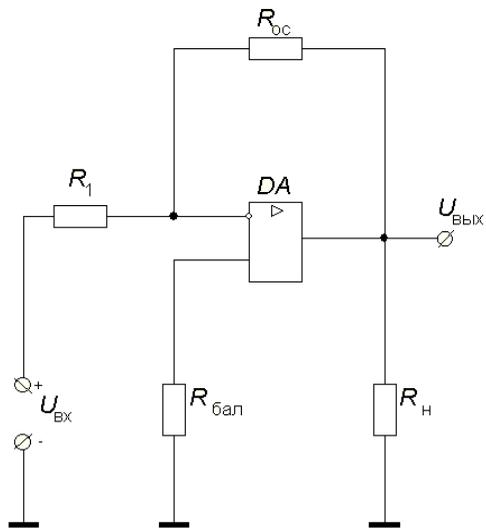
Рис. 6.3. Схема стенда для исследования различных схем на ОУ

Неинвертирующий усилитель

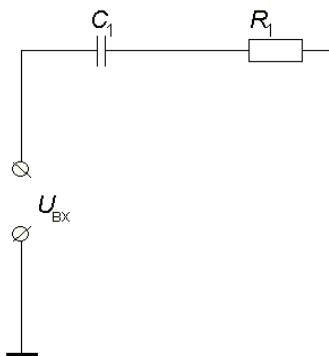
1. Рассчитать неинвертирующий усилитель и собрать схему (рис. 6.5, а) для следующих данных: $K_U = 11$; $K_0 = 5 \cdot 10^5$; $R_{\text{н}} = 100 \text{ кОм}$; $\text{ТКЕ} = 50 \text{ мкВ/К}$; $U_{\text{см}} = 50 \text{ мВ}$; напряжение входного сигнала $E_c = (0,1; 1; 1,2 \text{ В})$; $C = 1 \text{ мкФ}$. В процессе расчёта определить: $R_{\text{ос}}$, R_1 , $R_{\text{бал}}$, $K_{\text{реал}}$, β , $\Delta U_{\text{вых}}$.

2. Определить максимальный выходной сигнал и коэффициент усиления.

3. Определить полосу пропускания для малого (0, 1 В) и большого (предельного) сигнала.

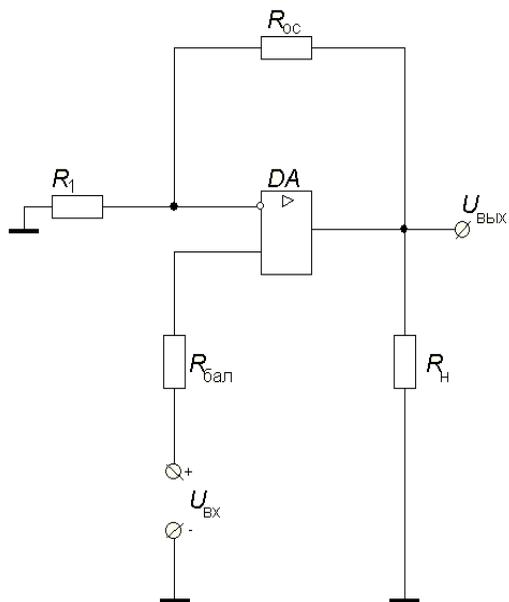


a)

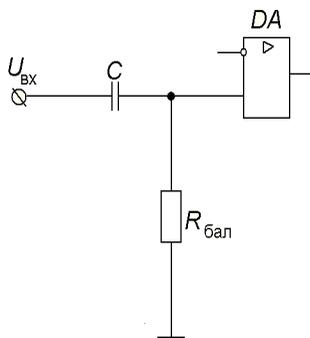


b)

Рис. 6.4. Схема инвертирующего усилителя (a) и усилителя с конденсатором на входе (б)



a)



b)

Рис. 6.5. Схема усилителя:
a – неинвертирующего; *б* – переменного напряжения

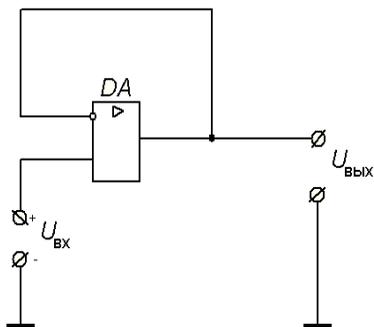


Рис. 6.6. Схема повторителя напряжения

4. Реализовать повторитель напряжения и убедиться в его работоспособности (рис. 6.6).

В соответствии с рис. 6.5, б собрать усилитель переменного напряжения и определить его коэффициент усиления и качество усиления.

Дифференциальный усилитель

1. Собрать схему ОУ в соответствии с рис. 6.7 для следующих данных: $R_1 = R_2 = 100 \text{ кОм}$; $R_{oc} = R_{бал} = 1 \text{ МОм}$; $R_H = 100 \text{ кОм}$.

2. Оценить коэффициент усиления при максимальном выходном напряжении.

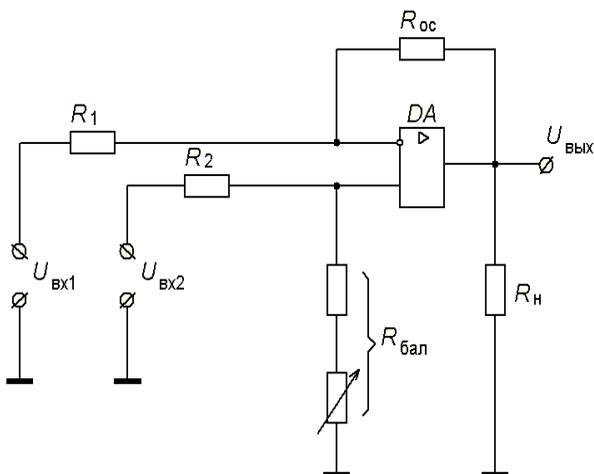


Рис. 6.7. Схема дифференциального усилителя

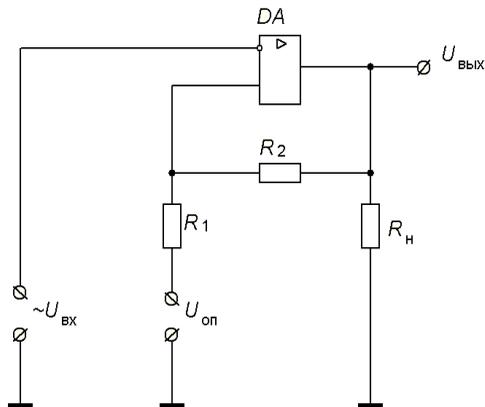


Рис. 6.8. Схема однополярного компаратора

Импульсные схемы на основе ОУ

Аналоговый компаратор

1. Собрать схему однополярного компаратора (рис. 6.8) для следующих данных: опорное напряжение $U_{оп} = 2 \text{ В}$; $U_{вх} = 5 \text{ В}$; $R_н = 100 \text{ кОм}$; $R_1 = 1 \text{ кОм}$; $R_2 = 1 \text{ МОм}$.

2. Зарисовать эпюры напряжений на входе и выходе с экрана осциллографа. Сделать выводы о стабильности работы схемы при гармоническом сигнале на входе.

Мультивибратор

1. Собрать схему (рис. 6.9) и рассчитать её элементы для следующих данных: напряжения насыщения $U_{+нас} = U_{-нас}$; полупериоды колебаний равны $T_1 = T_2$; $T = 2C$.

2. Зарисовать эпюры напряжений на входах ОУ и выходе и оценить период колебания.

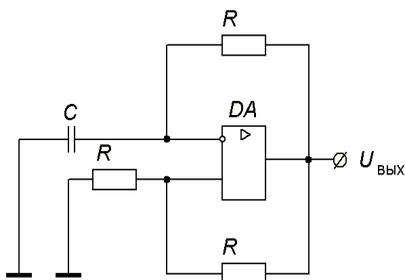


Рис. 6.9. Схема мультивибратора

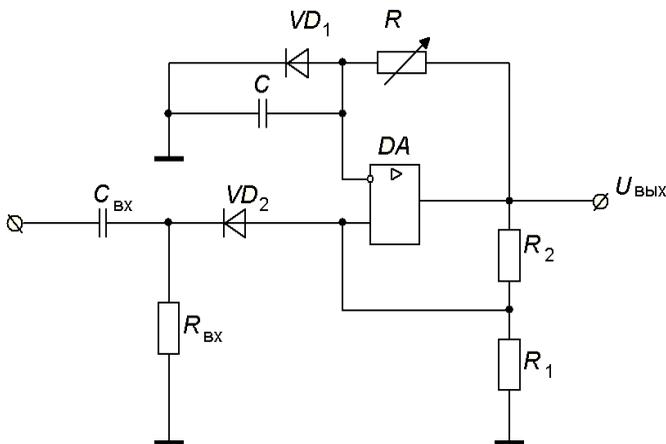


Рис. 6.10. Схема ждущего мультивибратора

Ждущий мультивибратор

1. Собрать схему ждущего мультивибратора (рис. 6.10) с параметрами: $R = 10 \dots 100$ кОм; $C = 0,5$ мкФ; $R_1 = 100$ кОм; $R_2 = 1$ МОм; $C_{\text{вх}} = 0,5$ мкФ; $R_{\text{вх}} = 100$ кОм.

2. Отключив диод D_1 , добиться регулировкой чёткого изображения импульсов на экране осциллографа. Определить длительность импульсов.

3. Включить диод D_1 и синхронизирующим импульсом отрицательной полярности запустить одновибратор. Эпюры напряжения зарисовать и объяснить все выходные данные.

Применение программы Electronics Workbench для изучения режимов работы операционных усилителей

Виртуальный стенд для исследования ОУ состоит из программного комплекса Electronics Workbench, в котором моделируются ОУ резисторы и конденсаторы, а также элементы включения, питания и приборы контроля показаний стенда.

Сборка необходимой схемы для исследования осуществляется непосредственно на рабочем поле для моделирования схем, подбор необходимых элементов входных цепей ОУ и обратной связи осуществляется в соответствии с заданием.

Схема виртуального стенда приведена на рис. 6.11.

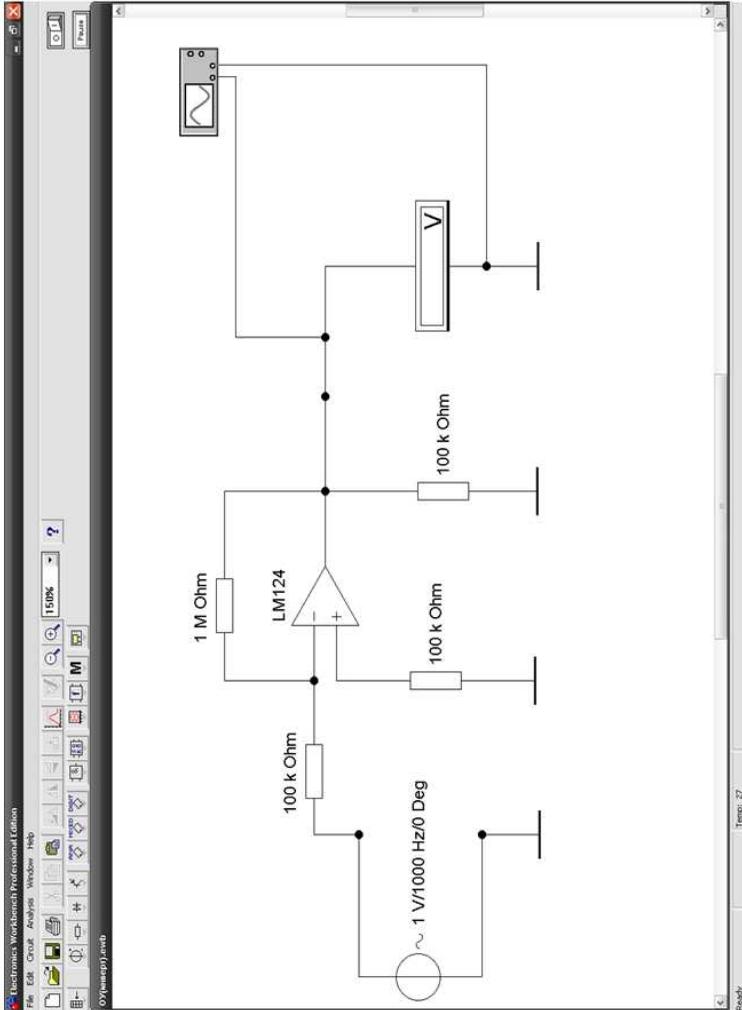


Рис. 6.11. Схема виртуального стенда

Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Рисунки всех схем операционного усилителя.
3. Расчётные параметры всех измерений.
4. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какой тип обратной связи образуется при подключении сопротивления между выходом и инвертирующим звеном?
2. Перечислить достоинства и недостатки инвертирующего усилителя.
3. С какой целью в схему включается сопротивление $R_{\text{бал}}$ и каким образом выбирается его величина?
4. Как определяется температурный дрейф усилителя?
5. Чем определяется минимальный уровень входного сигнала?
6. Назовите достоинства и недостатки неинвертирующего усилителя.
7. Чем определяется входное сопротивление неинвертирующего усилителя?
8. Как определяется ошибка, создаваемая синфазным сигналом на входе?
9. Где предпочтительно применять неинвертирующий усилитель?
10. Каково назначение дифференциального ОУ?
11. Какой усилитель называют измерительным?
12. Обоснуйте целесообразность включения положительной обратной связи в практических схемах компараторов.
13. Почему часто на практике приходится ограничивать величину выходного напряжения компаратора?
14. Какие типы обратных связей используются в схеме автоколебательного мультивибратора?
15. Чем определяется период колебаний мультивибратора?
16. Каким образом реализовать несимметричный мультивибратор?
17. Назовите назначения диодов D_1 и D_2 в одновибраторе.
18. Как изменяется работа одновибратора, если поменять полярность включения диода D_1 ?

ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ЦИФРОВЫХ АВТОМАТОВ

Цель работы: изучение методики построения функциональных логических устройств комбинационного и последовательностного типов.

Краткие теоретические сведения

В цифровых устройствах для приёма, передачи, обработки и хранения информации применяются элементы, принцип действия которых основан на использовании теории алгебры логики, разработанной Дж. Булем (ирландский математик). При этом используются понятия логической единицы (лог. 1), соответствующей высокому уровню сигнала в положительной логике и низкому уровню сигнала в отрицательной логике. Логическому нулю (лог. 0) соответствует низкий уровень сигнала в положительной логике и высокий уровень сигнала в отрицательной логике. Функция алгебры логики (ФАЛ) – зависимость выходных переменных Y_i от совокупности входных переменных X_j . Устройства, работа которых записывается с помощью ФАЛ, называются логическими (ЛУ).

Способы задания ФАЛ следующие:

1. В виде таблицы истинности (табл. 7.1) в двоичном коде.
2. В виде алгебраических выражений:
 - а) логическое сложение (дизъюнкция) ИЛИ (табл. 7.2);
 - б) логическое умножение (конъюнкция) И (табл. 7.3);
 - в) инверсия (отрицание) НЕ (табл. 7.4).

Таблица 7.1

X_3	X_2	X_1	Y
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Таблица 7.2

X_2	X_1	$Y = X_1 + X_2$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Таблица 7.3

X_2	X_1	$Y = X_1 X_2$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Таблица 7.4

X	Y
0	1
1	0

Функцию алгебры логики можно представить в виде дизъюнктивно-нормальной формы (ДНФ) и конъюнктивно-нормальной формы (КНФ).

ДНФ – логическая сумма произведений всех входных переменных, ФАЛ которых равна лог. 1. КНФ – логическое произведение всех входных переменных, ФАЛ которых равна лог. 0.

Функции алгебры логики реализуются с помощью основных базисных логических элементов, осуществляющих операции логического умножения (И) рис. 7.1, а, логического сложения (ИЛИ) рис. 7.1, б и инверсии (НЕ) рис. 7.1, в, а также логические операции И-НЕ рис. 7.1, г и ИЛИ-НЕ рис. 7.1, д.

Логические устройства классифицируются по принципу действия и по способу записи и вывода информации следующим образом.

По принципу действия различают последовательностные устройства, в которых выходная информация зависит не только от выходных

сигналов, но и от предыдущего состояния устройства. В комбинационных логических устройствах выходная информация зависит от комбинации входных сигналов.

По способу записи и вывода информации ЛУ делятся на последовательные и параллельные. В последовательных ЛУ входные сигналы последовательно поступают на вход, а выходные сигналы последовательно фиксируют. В параллельных устройствах информация одновременно поступает на все разряды устройства и одновременно считывается с выходов ЛУ.

В качестве примеров последовательностных устройств рассмотрим в лабораторной работе триггеры, счётчики, регистры. Триггер – элемент памяти с двумя устойчивыми состояниями, выходной сигнал которого скачкообразно изменяется при подаче на его вход управляющего сигнала. Счётчик служит для счёта, записи и хранения входных сигналов в двоичном коде. Регистр предназначен для записи, хранения и сдвига входной информации.

Основные базисные логические элементы приведены на рис. 7.1.

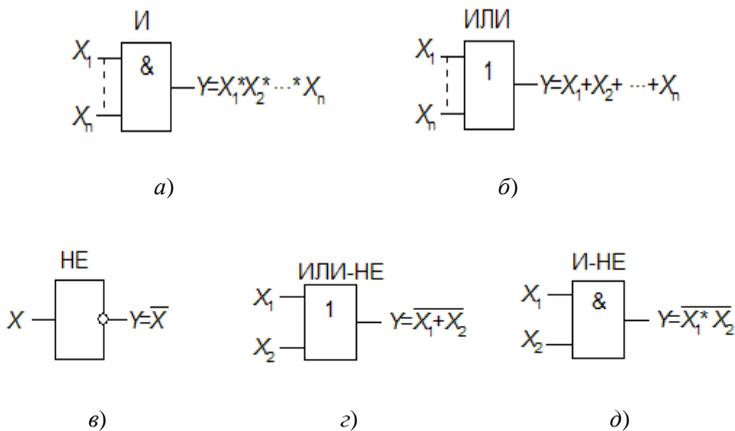


Рис. 7.1. Основные базисные ЛЭ:
 а – И; б – ИЛИ; в – НЕ; г – И-НЕ; д – ИЛИ-НЕ

Описание лабораторного стенда и методические указания

Лабораторный стенд выполнен в виде блока, на передней панели которого расположены: тумблер включения питания от сети, лампочка сигнализации сетевого напряжения и наборное поле (рис. 7.2).

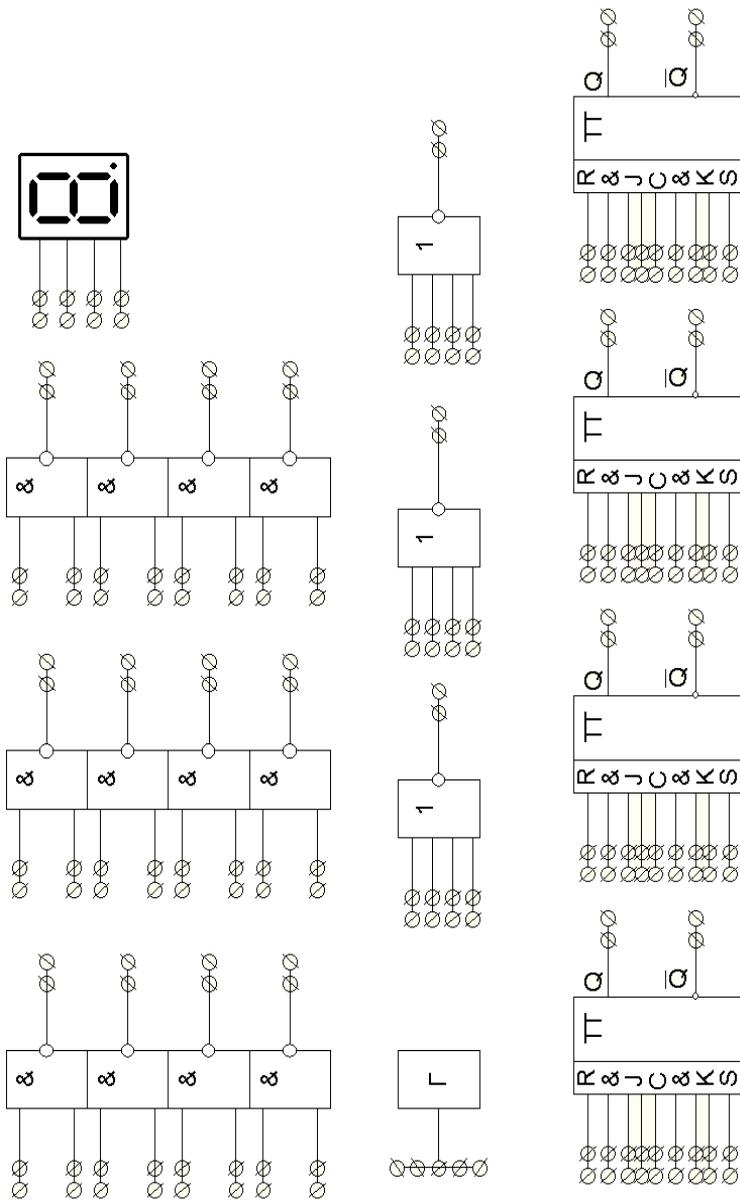


Рис. 7.2. Схема лабораторного стенда

На наборном поле показаны условными обозначениями логические элементы базисов И-НЕ, ИЛИ-НЕ, дешифратор с индикаторной лампой, триггерные устройства *D*-типа, генератор импульсов, гнезда с напряжениями логической 1 и логического 0. Входы и выходы логических элементов и триггерных устройств соединены со светодиодами, сигнализирующими наличие одного из логических сигналов на гнездах. Элементной базой реализованных на стенде схем являются интегральные микросхемы серии К155: 155ЛА3, 155ЛА6, 155ТМ2, 155ИД1. Лабораторный стенд имеет стабилизированный источник питания, напряжение +5 В, встроенный генератор тактовых импульсов.

Порядок выполнения работы

Заданная схема или устройство реализуются с помощью коммутационных проводов. Свободные входы соответствуют «1» входам.

1. На *D*-триггерах организовать сдвигающий вправо регистр, для чего:

- 3.1. соединить соответствующим образом триггеры;
- 3.2. через установленные входы записать «1» во все триггеры;
- 3.3. на входы левого триггера подать сигнал «01»;
- 3.4. подключить тактовый вход триггеров к генератору импульсов и убедиться, что записанное число сдвинулось вправо, и все триггеры обнулились.

4. на элементах И-НЕ собрать схемы *RS*-, *JK*- и *D*-триггеров. Проверить их функционирование по таблицам истинности.

5. На *JK*-триггерах собрать схемы счётчиков:

5.1. последовательного двоичного счётчика с индикацией результата счёта (рис. 7.3); в исходном состоянии установить все триггеры в «0»;

5.2. на сдвигающих регистрах (рис. 7.4); в исходном состоянии установить все триггеры в «0»;

5.3. унитарный кольцевой счётчик (рис. 7.5).

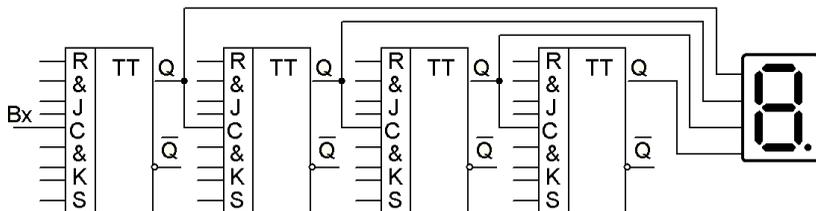


Рис. 7.3. Схема двоичного счётчика

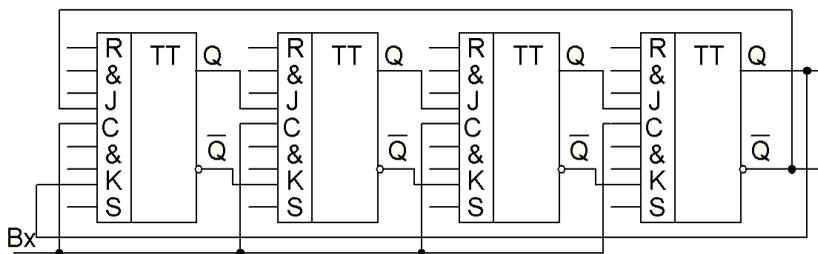


Рис. 7.4. Схема счётчика на сдвигающих регистрах

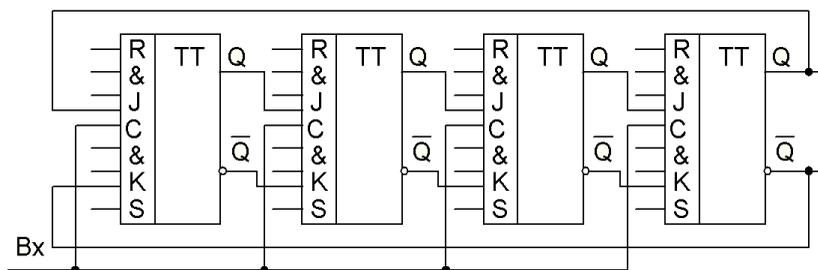


Рис. 7.5. Схема унитарного кольцевого счётчика

Применение программы Electronics Workbench для исследования функциональных логических устройств

Лабораторный стенд представляет собой электронный комплекс «*Electronics Workbench*», содержащий строку основных типовых электронных устройств, поле для составления исследуемой схемы и полосы управления прокруткой (рис. 7.6).

Для создания схем достаточно воспользоваться имеющимися типовыми компонентами.

Для открытия нужной библиотеки компонентов нужно подвести курсор мыши к соответствующей иконке и нажать один раз её кнопку. В выпадающем множестве выбирается необходимый значок, и передвигается при удержании левой клавиши мыши на рабочее поле программы. Для установки параметров необходимо двойным нажатием левой кнопкой мыши раскрыть меню настройки параметров компонента. Выбор подтверждается нажатием кнопкой Accept или клавишей Enter.

После размещения компонентов производится соединение их выводов проводниками. При этом необходимо учитывать, что к выводу компонента можно подключить только один проводник.

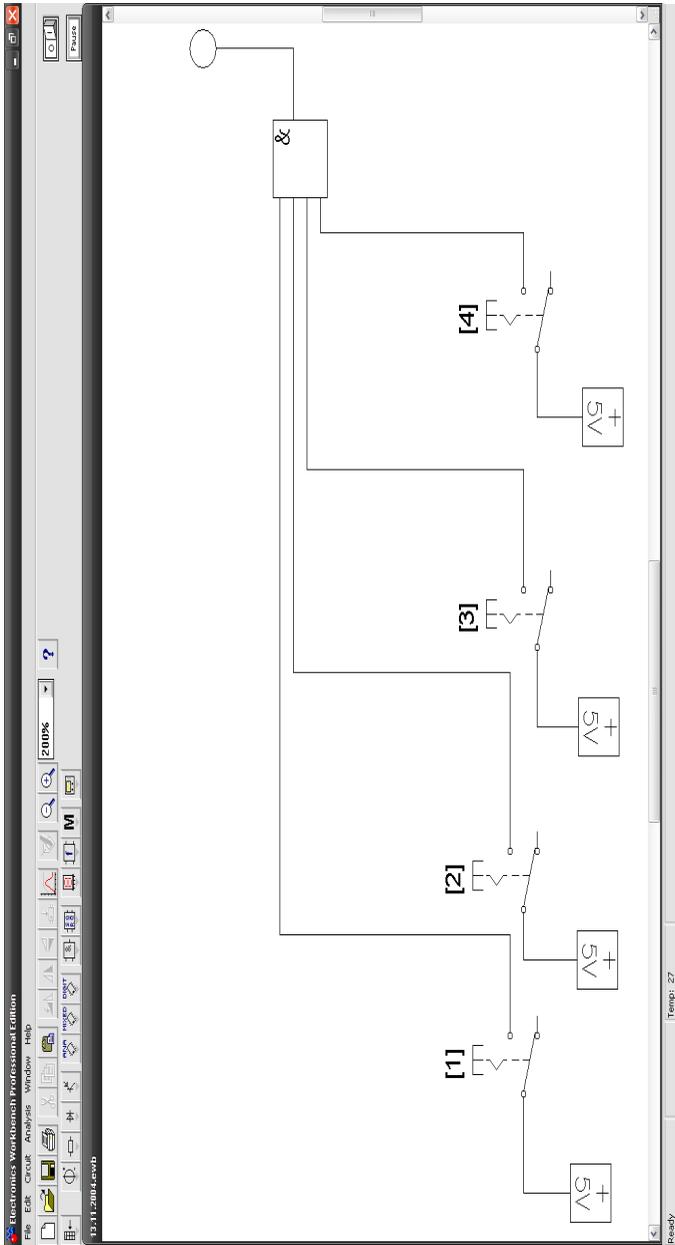
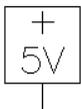


Рис. 7.6. Окно программы Electronics Workbench

Для выполнения подключения курсор мыши подводится к выводу компонента и после появления прямоугольной площадки синего цвета, нажимается левая кнопка и появляющийся при этом проводник протягивается к выводу другого компонента до появления на нём такой же прямоугольной площадки, после чего кнопка мыши отпускается и соединение готово. При необходимости подключения к этим выводам других проводников в библиотеке Passive выбирается точка (символ соединения) и переносится на ранее установленный проводник. После удачной постановки точки к проводнику подсоединяется ещё два проводника.

Точка соединения может быть использована не только для подключения проводников, но и для введения надписей. Если необходимо переместить отдельный сегмент проводника, к нему подводится курсор, нажимается левая кнопка и после появления в вертикальной или горизонтальной плоскости двойного курсора производятся нужные перемещения.

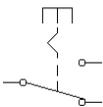
Используемые элементы программы Electronics Workbench



Voltage Source.

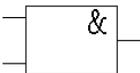
С помощью этого источника на вход триггеров и логических элементов подаётся логическая единица

[Space]



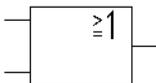
Переключатель (Basic>Switch).

Переключение производится нажатием на клавишу, указанную в скобках над этим элементом



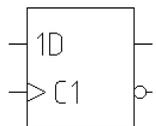
Логический элемент И-НЕ

(Logicgates> 2-inputNANDgate)

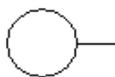


Логический элемент ИЛИ-НЕ

(Logic gates> 2-input NOR gate)

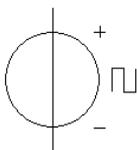


Триггер тина D (Digital > D Flip-Flop)



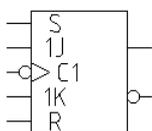
Светоиндикатор (indicators>redProb).

При подаче на этот элемент логической единицы светодиод загорается красным цветом

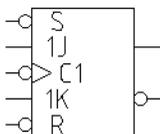


Источник прямоугольных сигналов (Sources>Clock).

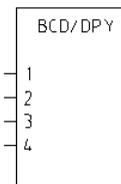
Выполняет функцию синхронизатора, который обеспечивает одновременность подачи сигналов на входы триггеров



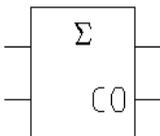
Универсальный JK-триггер



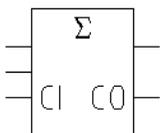
Универсальный JK-триггер с установочными входами



Семисегментный цифровой индикатор



Одноразрядный полусумматор



Одноразрядный полный сумматор

Заданная схема или устройство моделируются в электронном комплексе «Electronics Workbench» с использованием соответствующих логических элементов, индикаторов (светодиоды), элементов питания и генератора тактовых импульсов. Свободные входы соответствуют логическому 0.

Содержание отчёта

1. Наименование и цель задания.
2. Таблицы истинности и схемы реализаций в различных базисах триггеров, счётчиков и регистров.
3. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Классификация триггерных устройств по функциональному признаку.
2. Особенности тактируемых и асинхронных триггерных устройств.
3. Требования к длительности тактовых импульсов *RS*-триггеров.
4. Особенности *JK*-триггеров и их функциональная надёжность.
5. Схемы *D*-триггеров на элементах И-НЕ.
6. Чем определяется задержка в тактируемых и асинхронных *D*-триггерах?
7. Сравните по реализации *D*-, *RS*-, *JK*-триггерные системы по аппаратным затратам, быстродействию и помехоустойчивости.
8. Параметры, которыми характеризуются счётчики.
9. Методы организации переноса в счётчиках.
10. Отличительные особенности двоичных и недвоичных счётчиков.
11. На какие классы делятся регистры?
12. Приведите примеры реализации регистров сдвига на основе различных триггеров.
13. Счётчики на основе регистров сдвига.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНАЦИОННЫХ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

Цель работы: изучение методики построения и функционирования цифровых устройств комбинационного типа.

Краткие теоретические сведения

К комбинационным цифровым устройствам относятся арифметико-логические устройства (АЛУ). Арифметико-логические устройства предназначены для выполнения арифметических и логических операций при обработке информации в электронно-вычислительных устройствах.

Сумматоры относятся к составным элементам АЛУ. Сумматор – это логическое комбинационное устройство, служащее для реализации операции арифметического сложения чисел, которые представлены двоичными кодами.

В качестве примеров комбинационных устройств в лабораторной работе исследуются сумматоры.

Сумматор является логическим устройством, выполняющим операции арифметического сложения чисел, представленных в виде двоичных кодов. ФАЛ операции сложения двух одноразрядных двоичных кодов имеет следующий вид:

$$S = \overline{X_1}X_2 + X_1\overline{X_2};$$

$$P = X_1X_2,$$

где S – функция «Исключающее ИЛИ»; P – сигнал переноса.

При сложении многоразрядных двоичных кодов ФАЛ имеет следующий вид:

$$S = (X_1 \oplus X_2)\overline{P_{-1}} + \overline{(X_1 \oplus X_2)}P_{-1};$$

$$P = X_1X_2 + (X_1 \oplus X_2)P_{-1},$$

где P_{-1} – сигнал переноса из младшего разряда в старший.

Двоичный сумматор предназначен для сложения двух одноразрядных чисел, которые имеют два входа и два выхода и формирования сигналов суммы и переноса в старший разряд.

Для построения схемы, реализующей функцию операции исключающей ИЛИ, ФАЛ записывается в базе И-НЕ:

$$S = x_1 \oplus x_0 = \overline{x_1}x_0 + x_1\overline{x_0} = (\overline{x_1}|x_0)|(x_1|\overline{x_0}).$$

Изображение схемы приведено на рис. 8.1, а. На рисунке 8.1, б показано обозначение элемента функции «Исключающее ИЛИ».

Схема и обозначение полусумматора приведены на рис. 8.2 а, б.

Одноразрядный сумматор – это устройство, предназначенное для сложения двух одноразрядных кодов, которое имеет три входа и два выхода.

В одноразрядном сумматоре формируются сигналы суммы и переноса в старший разряд (рис. 8.3).

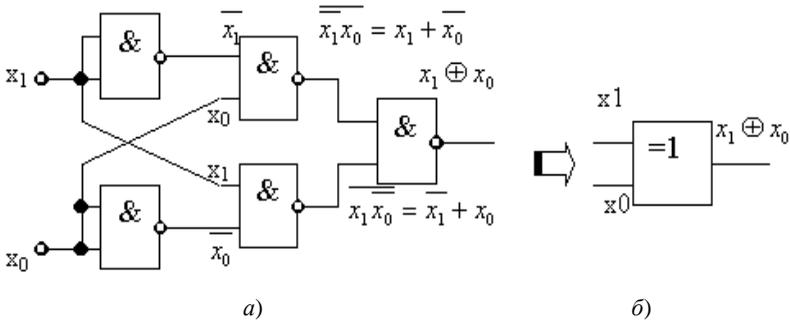


Рис. 8.1. Схема реализации операции «Исключающее ИЛИ» (а); обозначение элемента, реализующего данную операцию (б)

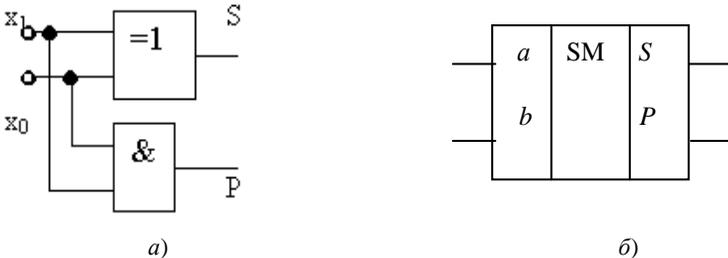


Рис. 8.2. Схема полусумматора (а); обозначение полусумматора (б)

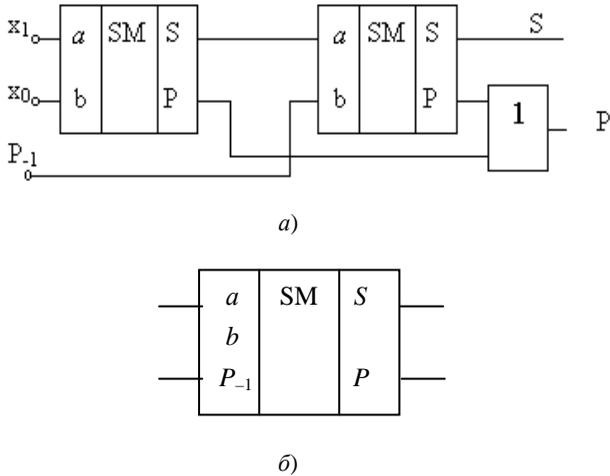


Рис. 8.3. Одноразрядный сумматор (а); обозначение сумматора (б)

Одноразрядный сумматор осуществляет сложение входных кодовых чисел и формирует сигнал переноса в старший разряд по следующим зависимостям:

$$\begin{cases} S = (x_1 \oplus x_0)P_{-1} + \overline{(x_1 \oplus x_0)}P_{-1}; \\ P = x_1x_0 + (x_1 \oplus x_0)P_{-1}. \end{cases}$$

Описание лабораторного стенда и методические указания

Лабораторный стенд выполнен в виде блока, на передней панели которого расположены: тумблер включения питания от сети, лампочка сигнализации сетевого напряжения и наборное поле (рис. 8.4).

На наборном поле показаны условными обозначениями логические элементы базисов И-НЕ, ИЛИ-НЕ, дешифратор с индикаторной лампой, триггерные устройства D -типа, генератор импульсов, гнезда с напряжениями логической 1 и логического 0. Входы и выходы логических элементов и триггерных устройств соединены со светодиодами, сигнализирующими наличие одного из логических сигналов на гнездах. Элементарной базой реализованных на стенде схем являются интегральные микросхемы серии К155: 155ЛА3, 155ЛА6, 155ТМ2, 155ИД1. Лабораторный стенд имеет стабилизированный источник питания, напряжение +5 В, встроенный генератор тактовых импульсов.

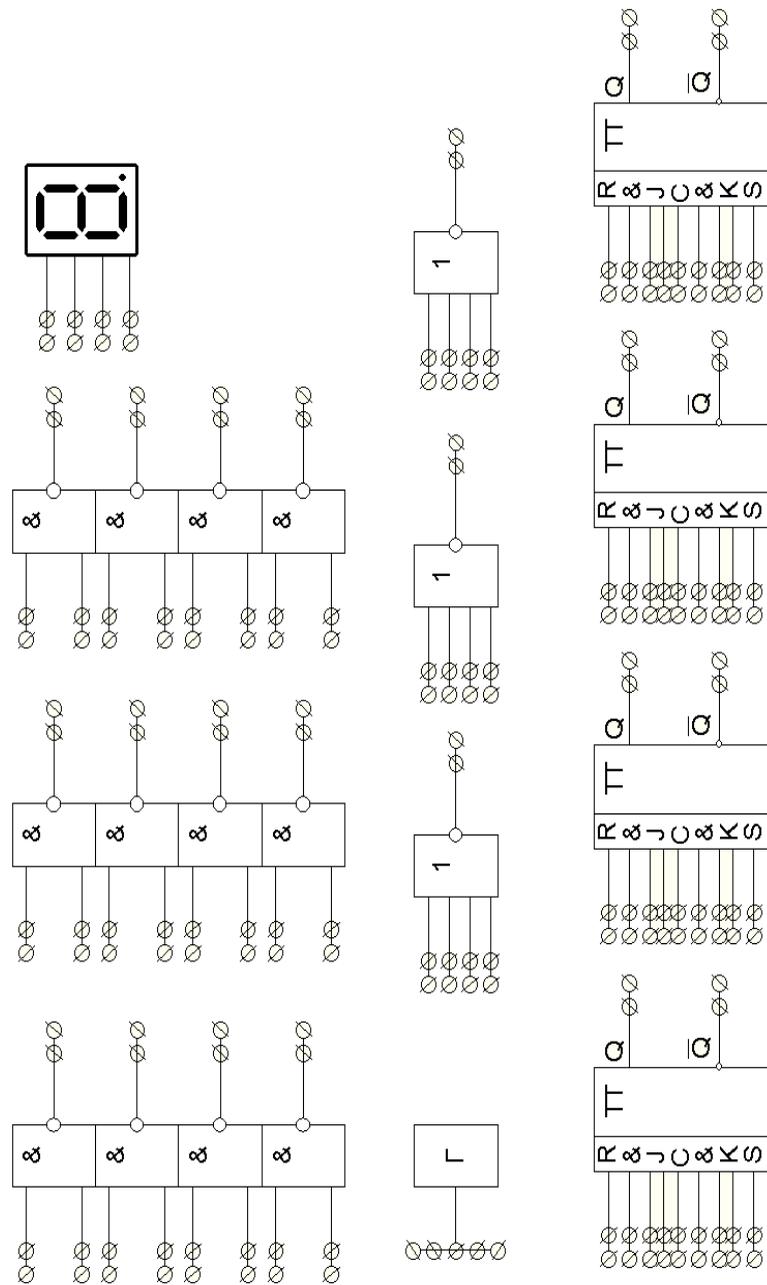


Рис. 8.4. Схема лабораторного стенда

Порядок выполнения работы

Заданная схема или устройство реализуются с помощью коммутационных проводов. Свободные входы соответствуют «1» входам.

1. На элементах И-НЕ построить схему устройства, выполняющего операцию «Исключающее ИЛИ» и проверить её функционирование по таблице истинности и ФАЛ, реализующей эту функцию.

2. Построить одноразрядный двоичный полусумматор, заданный таблицей истинности (табл. 8.1).

2.1. Функциональные логические управления записать в базисе И-НЕ и реализовать на элементах схемы.

Таблица 8.1

N	a	B	S	P
0	0	0	0	0
1	0	1	1	0
2	1	0	1	0
3	1	1	0	1

2.2. Функциональные логические управления, преобразованные для прямых переменных $S = \overline{OP} + \overline{BP}$; $P = \overline{OB}$, реализовать на элементах базисов И-ИЛИ-НЕ, НЕ, И-НЕ.

3. С использованием элементов И-НЕ и «Исключающее ИЛИ» на лабораторном стенде собрать схему одноразрядного сумматора и проверить её функционирование по таблице истинности и ФАЛ, реализующей операцию сложения одноразрядных чисел.

Содержание отчёта

1. Наименование и цель задания.
2. Таблица истинности и схема реализации устройства «Исключающее ИЛИ».
3. Таблица истинности и схема полусумматора.
4. Таблица истинности и схема одноразрядного сумматора.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Для каких целей используются сумматоры?
2. Поясните операцию сложения одноразрядных чисел.
3. Как выполняется сложение многоразрядных чисел?
4. Напишите зависимости операции «Исключающее ИЛИ».
5. Поясните принцип действия полусумматора.
6. Принцип действия и схема одноразрядного сумматора.

АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Цель работы: Исследовать работу аналого-цифрового преобразователя.

Краткие теоретические сведения

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) предназначены для преобразования аналоговой величины (напряжения, тока) в цифровой код.

К основным типам АЦП относятся следующие.

На рисунке 9.1, *a* показана функциональная схема последовательного АЦП. На один вход компаратора K поступает преобразуемое напряжение $U_{\text{вх}}$, на второй – напряжение пилообразной развёртки с выхода ЦАП. В счётчике СТ2 при счёте импульсов образуется линейно нарастающий код, который преобразуется с помощью ЦАП в линейно нарастающее (пилообразное) напряжение. В начале цикла преобразования счётчик устанавливается в нулевое состояние. Напряжение на выходе ЦАП равно нулю, при этом на выходе компаратора устанавливается напряжение логической 1. При подаче импульса разрешения «Строб» на счётчик, начинается счёт импульсов генератора тактовых импульсов ГТИ, проходящих через открытый элемент И. При этом напряжение на выходе ЦАП линейно нарастает, пока не станет равным входному напряжению $U_{\text{вх}}$. В этот момент напряжение на выходе компаратора становится равным нулю, элемент И закрывается и счёт импульсов в счётчике останавливается. Число, установившееся на счётчике, пропорционально $U_{\text{вх}}$ и остаётся неизменным пока длится входной «Строб». После прекращения строба счётчик устанавливается в нуль и схема возвращается в исходное состояние. АЦП такого типа имеют низкое быстродействие, например, для получения 10 разрядов потребуется время 1024 тактов интервалов.

Более быстродействующими являются АЦП последовательного приближения (рис. 9.1, *б*), в которых в качестве регистра используется специальный регистр последовательных приближений [5]. После подачи импульса «Пуск» на выходе самого старшего разряда регистра появляется напряжение логической 1, следовательно, на выходе ЦАП появляется напряжение U_1 . Если это напряжение меньше $U_{\text{вх}}$, то включается логическая 1 на выходе следующего по счёту разряда регистра, если больше, то «1» на выходе старшего разряда отменяется.

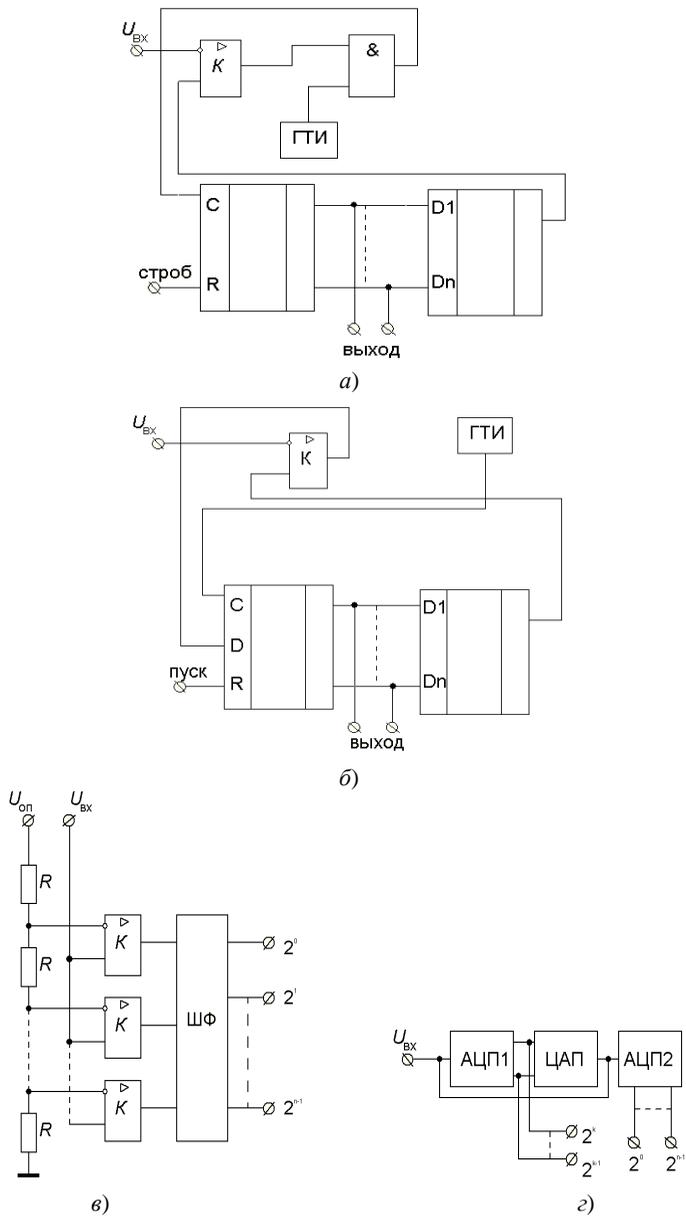


Рис. 9.1. Схемы АЦП:

а – последовательного; *б* – последовательного приближения;
в – параллельного; *з* – двухтактного

Так, методом проб перебираются все разряды до самого младшего. На это требуется количество импульсов ГТИ всего в 2 раза больше чем число разрядов. Самым быстродействующим является параллельный АЦП (рис. 9.1, в). Напряжение $U_{вх}$ сравнивается в компараторах K с набором опорных напряжений, снимаемых с резистивного делителя. На тех компараторах, где $U_{вх}$ больше чем соответствующее напряжение с делителя, на выходе будет логическая 1, на остальных – логический 0. Шифратор (ШФ) преобразует цифровой код такого вида в двоичный. Быстродействие такого АЦП определяется в основном быстродействием компараторов и может быть до десятков наносекунд. Недостаток параллельного АЦП – аппаратная сложность, определяемая числом компараторов, которое равно 2^n , где n – число двоичных разрядов.

Уменьшение числа компараторов и сохранение высокого быстродействия достигаются в двухтактных схемах (рис. 9.1, г). АЦП1 преобразует в цифровой код $k-1$ старших разрядов. Этот цифровой код преобразуется ЦАП в напряжение, которое вычитается из $U_{вх}$. Разность напряжений преобразуется АЦП2 в код младших разрядов. Например, оба АЦП – 4-разрядные (по 16 компараторов), всего потребуется 32 компаратора, а если строить АЦП параллельного типа на 8 разрядов, то потребуется $2^8 = 256$ компараторов. Быстродействие такого АЦП несколько хуже (примерно в 2 раза), чем параллельного, но это окупается экономией числа компараторов.

В последнее время большое распространение получил способ аналого-цифрового преобразования с использованием сигма-дельта модуляторов. В этом способе обеспечивается гораздо более высокая разрядность (16 – 24) и высокое отношение сигнал/шум. Ведущей фирмой по разработке таких устройств является Analog Devices.

Аналого-цифровые сигма-дельта преобразования содержат два основных этапа: сигма-дельта модуляцию и цифровое преобразование сигма-дельта модулированного сигнала. Сигма-дельта модулятор представляет собой преобразователь напряжения – частота, который синхронизован тактовой частотой f_T . Его выходной сигнал представляет собой последовательность единичных и нулевых посылок, длительность которых $t = 1/f_T$, а общая частота следования – f_T .

Основными параметрами АЦП является разрядность и время установления. Как правило, параллельные АЦП имеют невысокую разрядность: 6 и 8, а время установления составляет 0,02 мкс. АЦП последовательных приближений имеют более высокую разрядность: 10 или 12, но их время установления составляет, например, 0,9 мкс. Кроме того, микросхемы АЦП различаются по виду цифровых микросхем, к которым их можно подключить (ТТЛ, МОП, ЭСЛ).

Описание лабораторного стенда и методические указания

Параллельный АЦП может быть построен по схеме, приведённой на рис. 9.2. Входное напряжение, которое может изменяться в диапазоне от нуля до напряжения источника питания ($U_{п}$), представляется на выходах преобразователя в параллельном дополнительном двоичном коде.

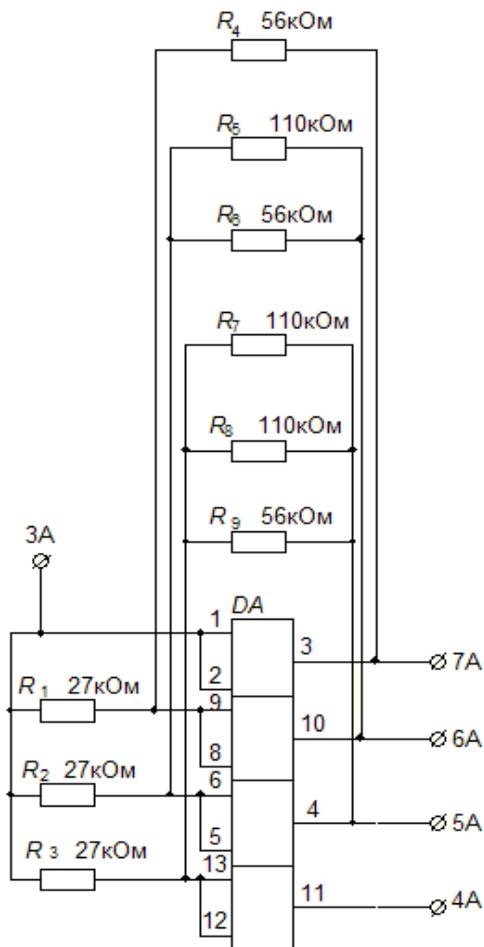


Рис. 9.2. Схема параллельного АЦП

Для нормальной работы АЦП инверторы-компараторы должны переключаться при напряжении на их входах, равном $U_n/2$, а выходные напряжения компараторов в устойчивых состояниях должны быть близки к нулю и U_n . Кроме того, компараторы должны обладать высоким входным и низким выходным сопротивлениями.

Перечисленным требованиям удовлетворяет большинство современных ОУ, инвертирующие входы которых подключены к потенциалу $U_n/2$.

В качестве основы для АЦП можно использовать КМОП логические элементы И-НЕ или ИЛИ-НЕ, состоящие из четырёх элементов. Входное сопротивление такого АЦП около 22 кОм, а время преобразования – не более 300 нс.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему измерений согласно рис. 9.3.

2. Подать напряжение питания с БП1 (+9 В).

3. Включить БП2. Плавно вращая ручку потенциометра, изменять величину входного напряжения на входе АЦП (0...+9 В), при этом визуально наблюдать как изменяется код на выходе с помощью светодиодов, расположенных на верхней крышке лабораторного стенда. Свечение светодиода означает наличие логической единицы на соответствующем разряде, отсутствие свечения – логического нуля.

4. Установить БП2 в положение «0» В. Изменяя напряжение от 0 до +9 В с шагом 1 В, контролировать с помощью осциллографа значение кода на выходе (клеммы 4А – 7А). Данные занести в табл. 9.1. Примечание: при контроле сигнала осциллографа на одном из разрядов светодиод этого разряда гаснет (в случае наличия на нём логической 1).

На схеме обозначено: 1А, 1Б – 8Б – общий; 2А – +9 В; 3А – 0...9 В.

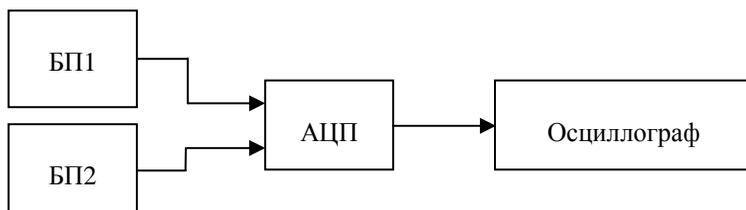


Рис. 9.3. Структурная схема измерений:

БП1, БП2 – источники питания; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Таблица 9.1

$U_{вх}, В$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
21	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
22	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
23	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Схемы последовательного и параллельного АЦП.
3. Таблицы, графики и эпюры напряжений.
4. Основные параметры.
5. Выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначены аналого-цифровые преобразователи?
2. Какие существуют типы АЦП?
3. Какое АЦП считается наиболее быстродействующим?
4. Чем определяется быстродействие АЦП?
5. В чём заключается недостаток АЦП параллельного действия?

ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Цель работы: изучить принцип действия цифро-аналогового преобразователя, исследовать зависимость выходного напряжения от цифрового кода.

Краткие теоретические сведения

Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи являются устройствами сопряжения аналоговой (усилители, фильтры и др.) и цифровой аппаратуры. От их характеристик во многом зависят параметры всей аппаратуры цифровой обработки сигналов.

Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) предназначены для преобразования цифровых кодов в аналоговые величины – напряжение, ток, сопротивление. Построение ЦАП основано на суммировании напряжений и токов, пропорциональных весам двоичных разрядов. В двоичном коде вес от разряда к разряду изменяется вдвое. На рисунке 10.1 показаны две наиболее распространённые схемы суммирования токов: параллельная (рис. 10.1, а) и последовательная (рис. 10.1, б). В схеме (рис. 10.1, а) ключи $S_1 \dots S_n$ открываются, если соответствующий разряд кода равен логической 1, при этом опорное напряжение $U_{оп}$ подаётся на соответствующий резистор. Сопротивления резисторов от старших разрядов к младшим прогрессивно увеличиваются в 2 раза [5].

Недостаток этой схемы в необходимости подбирать резисторы с высокой точностью. Например, при 10-разрядном коде точность резисторов должна достигать 0,1%. Поэтому такую схему применяют лишь при малом числе двоичных разрядов.

Описание лабораторного стенда и методические указания

В схеме (рис. 10.1, б) ключи $S_1 \dots S_n$ имеют более сложную структуру. При логической 1 на входе какого-либо разряда соответствующий резистор подключён к напряжению $U_{оп}$, при логическом 0 – к общему проводу. Но зато в этой схеме используют резисторы только двух номиналов R и $2R$. Естественно, требования к точности этих резисторов намного меньше. Поэтому все современные микросхемы ЦАП строят по этой схеме.

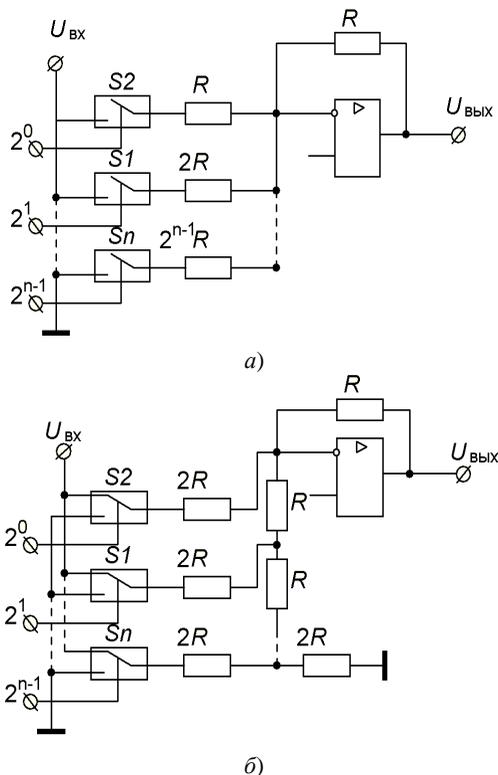


Рис. 10.1. Схемы суммирования токов:
a – параллельная; *б* – последовательная

Если есть возможность изменять напряжение $U_{оп}$, то образуется разновидность ЦАП, называемая «перемножающий ЦАП». Поскольку выходное напряжение ЦАП прямо пропорционально опорному напряжению $U_{оп}$, то изменение $U_{оп}$ эквивалентно умножению его значения на значение цифрового кода. Такие схемы ЦАП имеют широкое применение в схемах обработки сигналов.

Основными параметрами ЦАП являются разрядность и время установления, под которым подразумевается время, прошедшее с момента появления сигнала двоичного разряда до полной установки выходного напряжения. Отечественные микросхемы ЦАП имеют разрядность от 6 (К1118ПА3) до 16 (К427ПА2). Время установления колеблется от 0,005 мкс (5нс.) для микросхемы КС1118ПА6А до 30 мкс (К427ПА1). Кроме того, микросхемы ЦАП различаются по классу

цифровых микросхем, к которым они подключаются. Большинство микросхем ЦАП рассчитаны на работу с микросхемами ТТЛ и КМОП. Есть ЦАП, работающие только с микросхемами ТТЛ (К1108ПА1), только с микросхемами ЭСЛ К1118ПА1) или микросхемами ЭСЛ и ТТЛ (К1118ПА2). Различают микросхемы ЦАП также по количеству и номенклатуре источников питания.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с принципиальной схемой лабораторного стенда для изучения действия ЦАП (приведённой на рис. 10.2 или лабораторном стенде).
2. Подключить питание к выводам 1А, 2А и 3А (2А – +12 В, 3А – –12 В, 1 А – общий). Не допускать отсутствия какого либо напряжения (+12 В или –12 В).
3. Подключить выход ЦАП (вывод 4А) к цифровому вольтметру.
4. Изменяя положение переключателей $S_1 \dots S_4$, поочередно задать двоичные коды от 0 до 16, и фиксируя при этом показание вольтметра.
5. Полученные данные занести в табл. 10.1 экспериментальных данных и построить зависимость выходного напряжения от цифрового кода.
6. Сделать вывод.

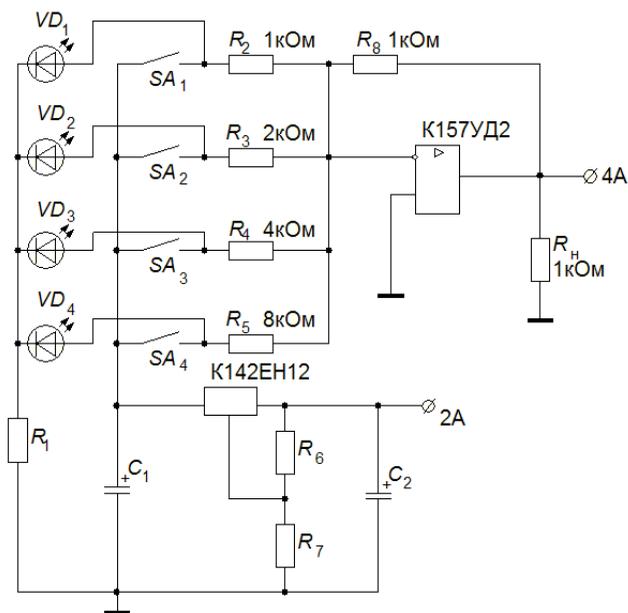


Рис. 10.2. Принципиальная схема ЦАП

Пример выполнения работы

1. Ознакомиться с принципиальной схемой лабораторного стенда для изучения действия ЦАП (приведённой на рис. 10.2 или лабораторном стенде).

2. Подключаем питание к выводам 1А, 2А и 3А (2А – +12 В, 3А – –12В, 1А – общий).

3. Подключаем выход ЦАП (вывод 4А) к цифровому вольтметру.

4. Изменяем положение переключателей $S_1 \dots S_4$, задавая при этом двоичные коды от 0 до 16, и фиксируем показание вольтметра.

5. Полученные данные заносим в табл. 10.1 экспериментальных данных и строим зависимость выходного напряжения от цифрового кода.

Пример заполнения табл. 10.1 показан в табл. 10.2

На схеме обозначено: 1А, 1Б – 8Б – общий; 2А – $+U_{\text{пит}}(+12 \text{ В})$; 3А – $-U_{\text{пит}}(-12 \text{ В})$; 4А – выход.

Таблица 10.1

Десятичное число	Двоичный код	Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, В
0	0000	
1	0001	
2	0010	
3	0011	
4	0100	
5	0101	
6	0110	
7	0111	
8	1000	
9	1001	
10	1010	
11	1011	
12	1100	
13	1101	
14	1110	
15	1111	

Таблица 10.2

Десятичное число	Двоичный код	Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, В
0	0000	0
1	0001	0,7
2	0010	1,33
3	0011	2,02
4	0100	2,6
5	0101	3,29
6	0110	3,9
7	0111	4,6
8	1000	5,22
9	1001	5,91
10	1010	6,53
11	1011	7,23
12	1100	7,81
13	1101	8,50
14	1110	9,13
15	1111	9,83

Пример построения графика зависимости выходного напряжения от набираемого цифрового кода показан на рис. 10.3.

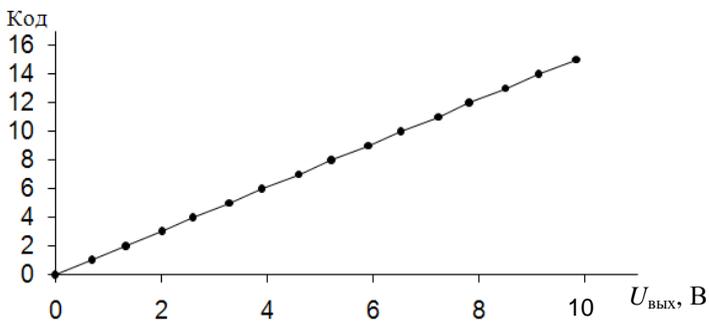


Рис. 10.3. Зависимость $U_{\text{вых}}$ от цифрового кода

Содержание отчёта

1. Таблица экспериментальных данных.
2. График зависимости выходного напряжения от цифрового кода.
3. Выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Для чего служат цифро-аналоговые преобразователи?
2. В чём преимущества и недостатки последовательной и параллельной схем суммирования токов?
3. Какие основные параметры ЦАП?
4. Какой принцип положен в основу построения ЦАП?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение учебного пособия «Схемотехническое проектирование электронных средств», где приведены основные теоретические и практические сведения, даны рекомендации по проведению лабораторного практикума, позволит студентам в полной мере исследовать основные аналоговые, импульсные и цифровые устройства, изучаемые в рамках учебной программы.

Применение полученных знаний при освоении курса «Схемотехническое проектирование электронных средств» во время выполнения лабораторных работ при изучении воздействия обратных связей на усилительные устройства, их амплитудно-частотных и передаточных характеристик; при исследовании дифференциальных усилительных каскадов, LC - и RC -генераторов гармонических колебаний на транзисторах и автогенераторов на инверторах ТТЛ (транзисторно-транзисторной логики) с времязадающей цепью, преобразователей аналоговых сигналов на базе операционных усилителей, оконечных усилительных каскадов, функциональных узлов цифровых автоматов, комбинационных цифровых устройств, аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей позволит студентам приобрести опыт исследования электронных устройств.

Практические знания студенты реализуют при анализе и синтезе разрабатываемых электронных устройств.

Расширение сферы познания в области схемотехнического проектирования электронных средств при изучении теоретических и практических аспектов схемотехнического проектирования формирует у студентов направление модернизации и разработки современных электронных устройств.

Более подробно с теорией схемотехнического проектирования электронных средств студенты могут ознакомиться в рекомендуемой учебной и справочной литературе, периодических изданиях, электронных и Internet-ресурсах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опадчий, Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника : учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров – М. : Радио и связь, 2002. – 768 с. : ил.
2. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника : учебное пособие для вузов / Ю.Л. Бобровский, С.А. Корнилов, И.А. Кратиров и др. – М. : Радио и связь, 1998. – 560 с. : ил.
3. Панфилов, Д.И. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях : практикум на Electronics Workbench : в 2 т. / Д.И. Панфилов, В.С. Иванов, И.Н. Чепурин ; под общ. ред. Д.И. Панфилова. – М. : ДОДЭКА, 1999.
4. Прянишников, В.А. Электроника : полный курс лекций / В.А. Прянишников. – 4-е изд. – СПб. : КОРОНА принт, 2004. – 416 с. : ил.
5. Быстров, Ю.А. Электронные приборы и устройства на их основе : справочная книга / Ю.А. Быстров, С.А. Гамкремидзе, Е.Б. Иссерлин, В.П. Черепанов. – М. : ИП Радио Софт, 2002. – 656 с. : ил.
6. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы / С.И. Баскаков. – М. : Высш. шк., 2000. – 462 с.
7. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника : учебник для вузов / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – 4-е изд., доп. – М. : Высш. шк., 2006. – 799 с. : ил.
8. Жаворонков, М.А. Электротехника и электроника : учебное пособие для вузов / М.А. Жаворонков, А.В. Кузин. – М. : Академия, 2005. – 400 с. : ил.
9. Рекус, Г.Г. Основы электротехники и электроники в задачах с решениями : учебное пособие для вузов / Г.Г. Рекус. – М. : Высш. шк., 2005. – 343. : ил.
10. Миловзоров, О.В. Электроника : учебник для вузов / О.В. Миловзоров, И.Г. Панков. – М. : Высш. шк., 2004. – 288 с. : ил.
11. Терехов, В.А. Задачник по электронным приборам : учебное пособие для вузов / В.А. Терехов. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Лань. – 2003. – 280 с.
12. Аксенов, А.И. Отечественные полупроводниковые приборы : справочное пособие / А.И. Аксенов, А.В. Нефедов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : «СОЛОН-Р», 2002. – 544 с.
13. Аксенов, А.И. Резисторы, конденсаторы, провода, припои, флюсы : справочное пособие / А.И. Аксенов, А.В. Нефедов. – М. : «СОЛОН-Р», 2002. – 239 с.

14. Павлов, В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств : учебник для вузов / В.Н. Павлов, В.Н. Ногин. – 2-е изд. – М. : Горячая линия – Телеком, 2003. – 320 с. : ил.
15. Схемотехника электронных систем. Аналоговые и импульсные устройства / В.И. Бойко, А.Н. Гуржий, В.Я. Жуйков и др. – СПб. : БХВ – Петербург, 2004. – 496 с. : ил.
16. Шустов, М.А. Практическая схемотехника / М.А. Шустов. – М. : «Альтекс», 2004. – 304 с. : ил.
17. Граф, Р.Ф. Энциклопедия электронных схем / Р.Ф. Граф, В. Шитс ; пер. с англ.– М. : ДМК Пресс, 2002. – Т. 6.4.1. – Кн. 4 – 280 с. : ил.
18. Цифровые интегральные микросхемы : справочник / М.И. Богданович, И.Н. Грель, С.А. Дубина и др. – Минск : Беларусь, Полымя, 2000. – 605 с.
19. Портала, О.Н. Цифровая электроника / О.Н. Портала. – 2-е изд., доп. – СПб. : Наука и Техника, 2001. – 224 с. : ил.
20. Селиванова, З.М. Схемотехника электронных средств : учебное пособие / З.М. Селиванова. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 80 с.
21. Муханин, Л.Г. Схемотехника измерительных устройств : учебное пособие для вузов / Л.Г. Муханин. – СПб. : Лань, 2009. – 288 с.
22. Пухальский, Г.И. Проектирование цифровых устройств [Электронный ресурс] : учебное пособие / Г.И. Пухальский, Т.Я. Новосельцева, 2012. – URL : http://www.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=68&p11_id=757. – Загл. с экрана.
23. Авдеев, В.А. Интерактивный практикум по компьютерной схемотехнике на Delphi [Электронный ресурс] / В.А. Авдеев, 2009. – URL : http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=25&p11_id=899. – Загл. с экрана.
24. Схемотехника электронных средств : методические указания / сост. З.М. Селиванова. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 32 с.
25. Шустов, М.А. Практическая схемотехника / М.А. Шустов. – М. : «Альтекс», 2002. – 304 с.
26. Муромцев, Ю.Л. Микропроцессорные системы контроля : учебное пособие / Ю.Л. Муромцев, В.Н. Чернышов, З.М. Селиванова. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 96 с.
27. Степаненко, И.П. Основы микроэлектроники / И.П. Степаненко. – 2-е изд. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2000. – 488 с.

28. Хоровец, П. Искусство схемотехники : в 3 т. / П. Хоровец, У. Хилл ; пер. с англ. – М. : Мир, 1993.

29. Игнатов, А.Н. Микросхемотехника и электроника [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.Н. Игнатов, 2011. – URL : http://www.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=127&p11_id=726. – Загл. с экрана.

30. Федосов, В.П. Цифровая обработка сигналов [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.П. Федосов. – URL : http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=25&p11_id=1090. – Загл. с экрана.

31. Батоврин, В.К. Lab View: практикум по электронике и микропроцессорной технике [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов / В.К. Батоврин, А.С. Бессонов, В.В. Мошкин, 2010. – URL : http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=25&p11_id=1096. – Загл. с экрана.

32. Павлов, В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств : учебник для вузов / В.Н. Павлов, В.Н. Ногин. – 2-е изд., испр. – М. : Горячая линия-Телеком, 2003. – 320 с.

Периодическая литература

1. Реферативный журнал «Электроника».
2. Реферативный журнал «Радиотехника».
3. Журнал «Микроэлектроника».

Internet-ресурсы

1. <http://www.e.lanbook.com>. Электронно-библиотечная система.
2. <http://window.edu.ru/>
3. <http://elibrary.ru>. Научная электронная библиотека.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Лабораторная работа 1	
ВЛИЯНИЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА ПОКАЗАТЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЯ	4
Лабораторная работа 2	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ С АКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ	9
Лабораторная работа 3	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОНЕЧНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ	16
Лабораторная работа 4	
ИССЛЕДОВАНИЕ LC- И RC-АВТОГЕНЕРАТОРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ТРАНЗИСТОРАХ	23
Лабораторная работа 5	
ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОГЕНЕРАТОРОВ НА ИНВЕРТОРАХ ТТЛ С ВРЕМЯЗАДАЮЩЕЙ RC-ЦЕПЬЮ	30
Лабораторная работа 6	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ НА БАЗЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ	36
Лабораторная работа 7	
ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ЦИФРОВЫХ АВТОМАТОВ	47
Лабораторная работа 8	
ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНАЦИОННЫХ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ.....	57

Лабораторная работа 9	
АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ	62
Лабораторная работа 10	
ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ	68
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	74
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	75

Учебное издание

СЕЛИВАНОВА Зоя Михайловна

**СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Лабораторный практикум

Редактор Л.В. Комбарова

Инженер по компьютерному макетированию И.В. Евсева

Подписано в печать 24.10.2012.

Формат 60×84 /16. 4,65 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 541

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14