

З.М. Селиванова

СХЕМОТЕХНИКА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

• ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ •

УДК 621.396.6(075)

ББК 85я73-5

С291

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, начальник кафедры передающих и
приемных радиоустройств Тамбовского высшего военного авиационного инженерного училища радиоэлектроники
(военного института)

И.И. Пасечников

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой компьютерного и математического моделирования Тамбовского государственного университета
им. Г.Р. Державина

А.А. Арзамасцев

Селиванова, З.М.
С291 Схемотехника электронных средств : учебное пособие /
З.М. Селиванова. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. –
80 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-0683-7.

Представлены теоретические и практические сведения по исследованию усилителей, фильтров на аналоговых микросхемах, цифровых генераторов, функциональных преобразователей, аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей.

Предназначено для студентов дневного и заочного отделений, экстерната и дистанционного образования специальности 210201.

УДК 621.396.6(075)
ББК ←85я73-5

ISBN 978-5-8265-0683-7 © ГОУ ВПО "Тамбовский государственный
технический университет" (ТГТУ), 2008
Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОУ ВПО "Тамбовский государственный технический университет"

З.М. Селиванова

СХЕМОТЕХНИКА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебного пособия для студентов 3, 4 курсов дневного и заочного отделений, экстерната и дистанционного обучения специальности 210201



Тамбов
Издательство ТГТУ
2008

Учебное издание

СЕЛИВАНОВА Зоя Михайловна

СХЕМОТЕХНИКА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Учебное пособие

Редактор З.Г. Чернова

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано в печать 11.03.2008.

Формат 60 × 84/16. 4,65 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 121

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие посвящено изучению аналоговых и цифровых устройств при проведении учебных занятий в процессе выполнения лабораторных работ по дисциплине "Схемотехника электронных средств".

Дисциплина "Схемотехника электронных средств" является одной из основных при обучении студентов по специальности "Проектирование и технология радиоэлектронных средств". При изучении этой дисциплины основное внимание необходимо уделить изучению вопросов, связанных с устройством и построением типовых электронных блоков и узлов различных радиоэлектронных устройств.

Целью дисциплины "Схемотехника электронных средств" является обучение студентов принципам анализа и расчета типовых схемотехнических решений, используемых при построении электронных схем, а также комплексу вопросов, связанных с синтезом, эффективным использованием и правильной эксплуатацией аналоговых, импульсных и цифровых электронных устройств.

При выполнении лабораторных работ студенты должны освоить принципы функционирования, методы анализа и способы расчета устройств аналоговой, импульсной и цифровой электроники; принципы выбора и практической реализации методов расчета электронных схем в установившихся (статических) и переходных (динамических) режимах.

В процессе лабораторного практикума студенты должны научиться выбирать оптимальные, с точки зрения решения поставленной задачи, типовые схемотехнические решения для реализации электронных устройств; синтезировать структурную схему электронного устройства, предназначенного для решения поставленной задачи; обобщать динамические показатели электронных устройств, используя понятия передаточной функции, амплитудной и фазовой характеристик; рассчитывать узлы аналоговых, импульсных и цифровых электронных устройств.

В лабораторном практикуме приведены краткие теоретические сведения, методические указания для выполнения лабораторных работ по исследованию принципа действия, параметров и характеристик усилителя мощности, операционных усилителей при различных схемах их включения, активного фильтра на аналоговых микросхемах, цифрового генератора, функционального преобразователя, аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователей.

Кроме того, в лабораторном практикуме рассмотрено применение программы Electronics Workbench в исследовании электронных устройств.

Лабораторная работа 1

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ ELECTRONICS WORKBENCH В ИССЛЕДОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Цель работы: ознакомление с программным комплексом для моделирования радиоэлектронных схем Electronics Workbench, построение простейших электронных схем.

Краткое описание программного комплекса Electronics Workbench

Разработка современных радиоэлектронных устройств требует высокой точности и глубокого анализа. Поэтому при разработке радиоэлектронного оборудования невозможно обойтись без компьютерных методов разработки, ввиду сложности и объемности выполняемых работ.

Приложение Electronics Workbench представляет собой средство программной разработки и имитации электрических цепей. Программный комплекс может применяться как на предприятиях, занимающихся разработкой электрических цепей, так и в высших учебных заведениях, занимающихся изучением и разработкой радиоэлектронных устройств [1].

Electronics Workbench может производить большое количество анализов радиоэлектронных устройств, занимающих достаточно много времени при стандартных методах разработки, а также включает в себя большое количество моделей радиоэлектронных устройств наиболее известных производителей.

Electronics Workbench прост в обращении и не требует глубоких знаний в компьютерной технике. Интерфейс программы можно освоить буквально за несколько часов работы.

Интерфейс программного комплекса Electronics Workbench

Интерфейс пользователя состоит из полосы меню, панели инструментов и рабочей области (рис. 1.1).

Полоса меню состоит из следующих компонент: меню работы с файлами (File), меню редактирования (Edit), меню работы с цепями (Circuit), меню анализа схем (Analysis), меню работы с окнами (Window), меню работы с файлами справок (Help).

Особенностью программы является наличие в панели инструментов ряда кнопок с изображением элементов радиоэлектронных схем (рис. 1.2).

Нажатие одной из этих кнопок приводит к появлению соответствующего раздела на панели инструментов, в котором находятся элементы схем.

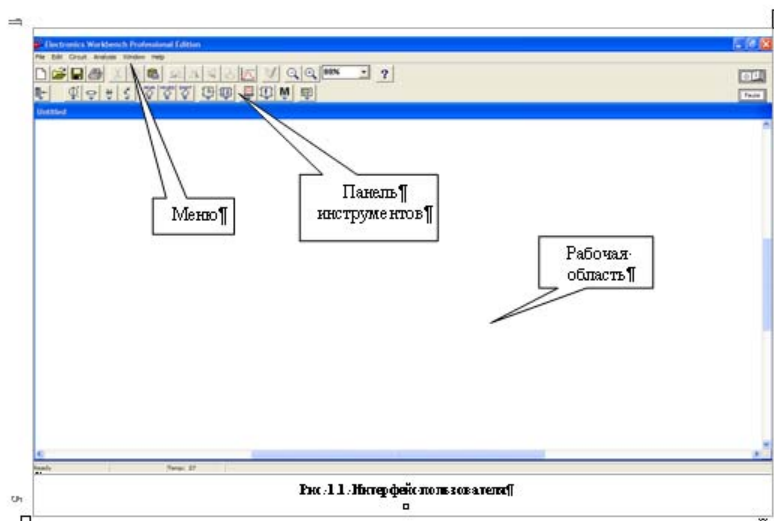


Рис. 1.2. Панель инструментов

Построение схем. Процесс построения схемы состоит из двух этапов.

Этап 1. Перенос элементов из панелей инструментов на рабочую область и примерное расположение элементов на своих местах. При этом полезно пользоваться кнопками вращения элементов, изображенными на рис. 1.3.

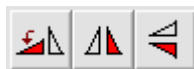
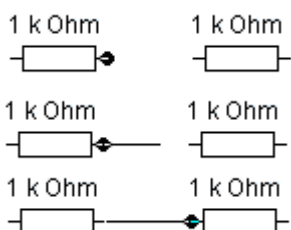



Рис. 1.3. Кнопки управления вращением элементов

Этап 2. Соединение контактов элементов. Для соединения необходимо:



- навести курсор мыши на вывод элемента так, чтобы появилась черная точка контакта;
- нажать левую клавишу мыши, и не отпуская ее, провести проводник к элементу, с которым надо установить соединение;
- отпустить клавишу мыши, когда проводник достигнет вывода другого элемента и появится его точка контакта.

В случае необходимости можно добавить дополнительные узлы (разветвления). Для этого нужно перетащить элемент (узел)  с панели инструментов на проводник, который надо разветвить.

Этап 3. Задание номиналов элементов. Двойной щелчок на элементе приводит к появления диалогового окна его свойств. Содержание окна свойств существенно зависит от типа элемента. Общими для всех окон свойств являются закладки Label и Fault. В первой из них задается имя элемента и его обозначение (название) на схеме, во второй – возможные неисправности элемента.

Для удаления участка цепи необходимо его выделить и нажать клавишу Del.

Элементарная база Electronics Workbench. Программный комплекс обладает богатой элементарной базой. Рассмотрим наиболее часто используемые элементы.

На рис. 1.4 представлены источники постоянного напряжения и тока, применяемые в программе для питания электронных схем. Источники напряжения и тока собраны в панели инструментов Sources.

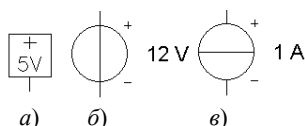


Рис. 1.4. Источники постоянного напряжения

Источник постоянного напряжения VCC (рис. 1.4, а) применяется для питания цифровых схем. Батарея (рис. 1.4, б) используется для питания аналоговых и цифровых схем. На рис. 1.4, в показан источник постоянно- го тока.

Источники переменного напряжения и тока применяются в качестве входных сигналов в электронных схемах. На рис. 1.5 приведены различные источники сигналов.

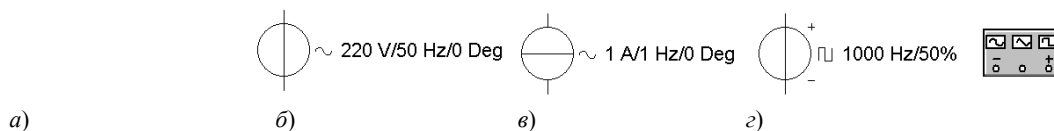


Рис. 1.5. Источники переменного напряжения

В источнике переменного напряжения (рис. 1.5, а) задаются эффективное значение напряжения, частота и фаза сигнала. В источнике переменного синусоидального тока (рис. 1.5, б) задаются эффективное значение тока, частота и фаза сигнала. В источнике прямоугольных импульсов (рис. 1.5, в) задаются амплитуда, частота и коэффициент заполнения импульсов.

Коэффициент заполнения

$$K_3 = \frac{\tau_{и}}{T} 100 \%,$$

где $\tau_{и}$ – длительность входного импульса; T – период колебаний.

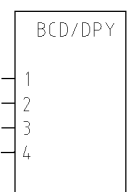
Величина коэффициента заполнения обратна скважности. Коэффициент заполнения проставляется в строке Duty Cycle диалогового окна свойств элемента. Функциональный генератор (рис. 1.5, з) находится в панели Instruments, имеет два противофазных выхода и может генерировать сигналы синусоидальной, треугольной или прямоугольной формы.

Для индикации сигналов в программе Electronics Workbench имеется ряд индикаторных приборов.



Вольтметр: измеряет в режиме DC постоянное напряжение и в режиме AC – переменное. Утолщенная линия вывода соответствует отрицательному потенциалу.

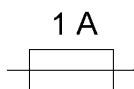
Амперметр: имеет режимы AC и DC (на схемах применены обозначения амперметра и вольтметра согласно отечественным ГОСТ).



Цифровой индикатор: подключается к выводам двоично-десятичного счетчика. Левый вывод подсоединяется к старшему разряду.



Светодиод.



Плавкий предохранитель.



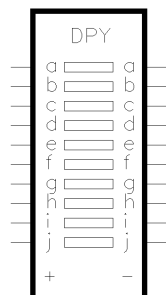
Логический пробник.

200 Hz



Звуковая сигнализация.

2 V



Десятиsegmentный светодиодный индикатор.

Панель инструментов *Basic* содержит *пассивные компоненты* (рис. 1.6).

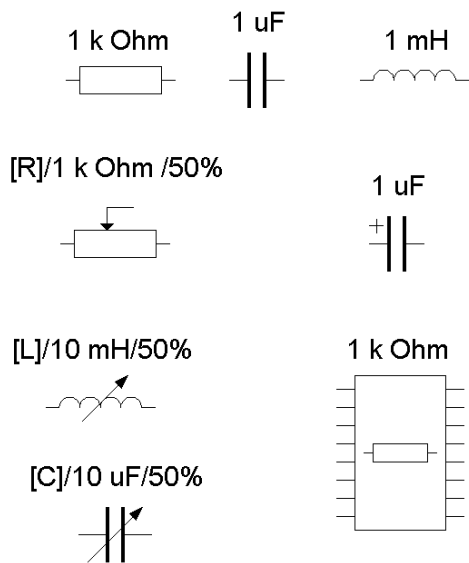
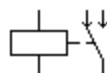


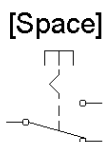
Рис. 1.6. Пассивные компоненты

Коммутационные элементы:

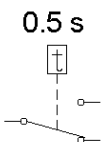
Реле.



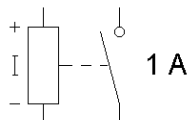
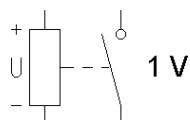
Однополюсный тумблер: переключается клавишей "пробел" (*Space*).



Реле времени с программируемым временем переключения.



Выключатель, срабатывающий в заданном диапазоне входных напряжений.

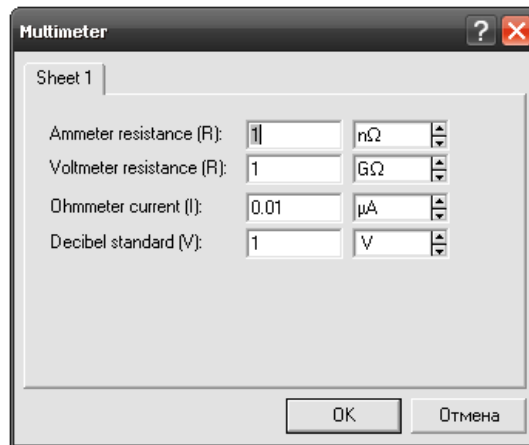


Выключатель, срабатывающий в заданном диапазоне входного тока.

Активные приборы представлены как дискретными компонентами: диоды (панель Diodes), биполярные, полевые, МДП транзисторы (панель Transistors), так и аналоговыми (панель Analog ICs) и цифровыми (панели Digital ICs, Logic Gates, Digital) микросхемами. Аналогово-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи находятся в панели Mixed ICs.



a)



б)

Рис. 1.7. Лицевая панель мультиметра

Контрольно-измерительные приборы программного комплекса Electronics Workbench находятся в панели Instruments и включают: цифровой мультиметр, функциональный генератор, двухканальный осциллограф, измеритель амплитудно-частотных характеристик, генератор слов (кодový генератор), 16-канальный логический анализатор и логический преобразователь.

Общий порядок работы с приборами следующий.

Мультиметр. На лицевой панели мультиметра (рис. 1.7, а) расположен дисплей для отображения результатов измерения, клеммы для подключения к схеме и кнопки управления.

Нажатие кнопки Setting на лицевой панели мультиметра открывает диалоговое окно (рис. 1.7, б), на котором обозначены:

Ammeter resistance – внутреннее сопротивление амперметра;

Voltmeter resistance – входное сопротивление вольтметра;

Ohmmeter current – ток через контролируемый объект;

Decibel standard – установка эталонного напряжения $V1$ при измерении ослабления или усиления в децибелах (по умолчанию $V1 = 1В$).

При этом для коэффициента передачи используется формула

$$K = 20 \log \frac{V2}{V1}, \text{ дБ,}$$

где $V2$ – напряжение в контролируемой точке.

Осциллограф. Лицевая панель осциллографа приведена на рис. 1.8.

Осциллограф имеет два канала (CHANNEL A и B) с отдельной регулировкой чувствительности от 10 мкВ/дел до 5 кВ/дел и регулировкой смещения по вертикали (YPOS). Режим по входу выбирается кнопками AC (наблюдается только переменный сигнал) и DC (наблюдается переменная и постоянная составляющие сигнала). Обычный режим развертки (по вертикали – напряжение сигнала, по горизонтали – время) выбирается кнопкой Y/T. В режиме В/А по вертикали откладывается напряжение канала В, по горизонтали – канала А. В режиме Y/T длительность развертки (Time Base) может быть задана в пределах от 0,1 нс/дел до 1 с/дел. Развертка может иметь ждущий режим (Trigger) с запуском (Edge) по переднему или заднему фронту запускающего сигнала при регулируемом уровне (Level) запуска. Режимы запуска развертки выбираются либо Auto (от канала А или В), от канала А, от канала В или от внешнего источника (Ext). При нажатии на кнопку Expand экран осциллографа увеличивается. Появляются две визирные линии, с помощью которых можно измерять напряжение, временные интервалы и их приращения. Возврат к исходному состоянию осциллографа осуществляется нажатием на кнопку Reduce.

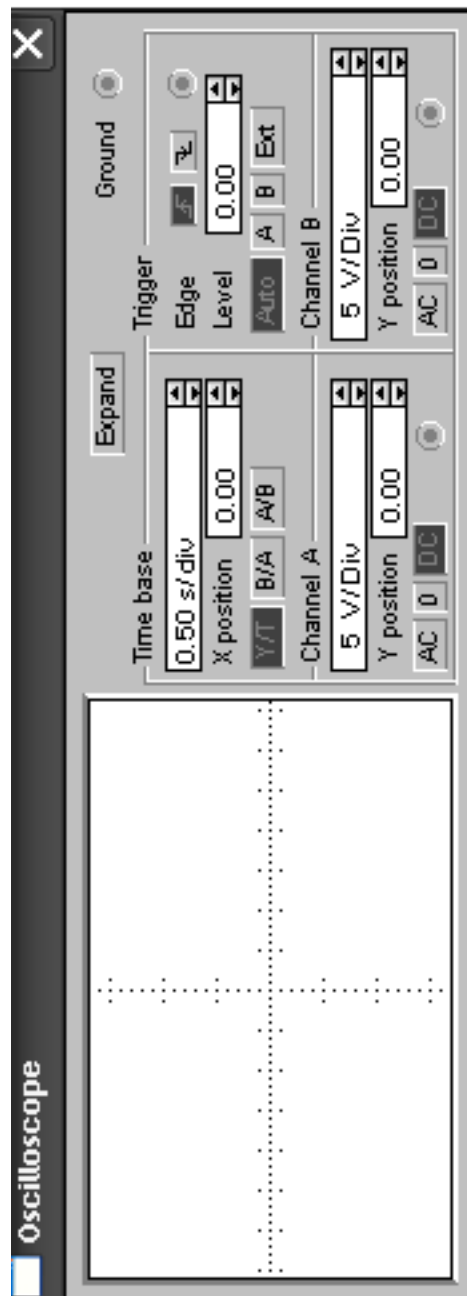



Рис. 1.8. Лицевая панель осциллографа

Измеритель амплитудно-частотных (АЧХ) и фазо-частотных характеристик (ФЧХ), (Bode Plotter). Лицевая панель измерителя АЧХ-ФЧХ приведена на рис. 1.9. Измеритель предназначен для анализа АЧХ (при нажатой кнопке Magnitude) и ФЧХ (при нажатой кнопке Phase) в логарифмическом или линейном масштабе (кнопки Log и Lin). Настройка измерителя заключается в выборе пределов измерения коэффициента передачи по вертикальной оси и вариации частоты по горизонтальной оси (F – максимальное значение, I – минимальное). Считывание показаний АЧХ-ФЧХ производится с помощью визирной линии, перемещаемой мышью или кнопками ← и →. Входы измерителя Vx и Vyx подключаются ко входу и выходу исследуемого устройства, соответственно.

Моделирование схем можно проводить одним из следующих способов.



Первый способ. Если в схеме установлены измерительные приборы, то она запускается на моделирование включением напряжения питания тумблером, расположенным в правой верхней части экрана . Там же расположена кнопка Pause, с помощью которой можно зафиксировать процесс моделирования в определенном состоянии. На экране осциллографа просматриваются графики сигналов в выбранных узлах. Для лучшего визуального просмотра на осциллографе подбираются необходимые чувствительность по вертикальному каналу и длительность развертки.

Второй способ. Измерительные приборы (например, осциллограф) при этом способе на схеме не устанавливаются. Желательно сделать видимыми номера узлов с помощью команды Circuit/Schematic Options/Show nodes. Затем назначается вид анализа из меню Analysis. Например, анализ АЧХ выполняется по команде Analysis/ AC Frequency, анализ переходных процессов – по команде Analysis/Transient, анализ по постоянному току – по команде Analysis/ DC Operating Point и др.

Далее в диалоговом окне устанавливаются параметры анализа и узлы, в которых просматриваются результаты моделирования (в поле Nodes for Analysis). Процесс моделирования запускается нажатием на кнопку Simulate. Графики моделирования представляются в окне Analysis Graphs. Окно можно увеличить на весь экран. Параметры сигналов

просматриваются с помощью двух визирных линий, появляющихся после щелчка на значке Toggle Cursors. (Эту команду можно выполнить и из контекстного меню.) Визирные линии перемещаются мышкой и устанавливаются в необходимом месте. Параметры сигналов отражаются в динамическом окне.

Виды анализа в Electronics Workbench. Рассмотрим меню Analysis программного комплекса. Первые три команды Activate, Pause и Stop аналогичны кнопкам

и .
DC Operating  –  режима по постоянному току. В этом режиме из моделируемой схемы исключаются все конденсаторы и закорачиваются все индуктивности.

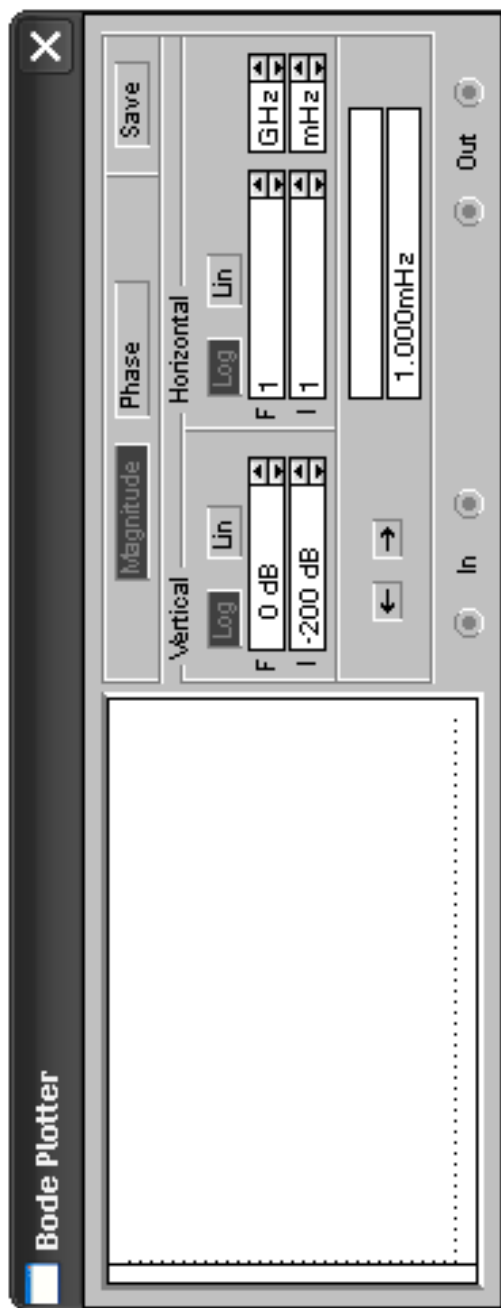


Рис. 1.9. Лицевая панель измерителя АЧХ и ФЧХ

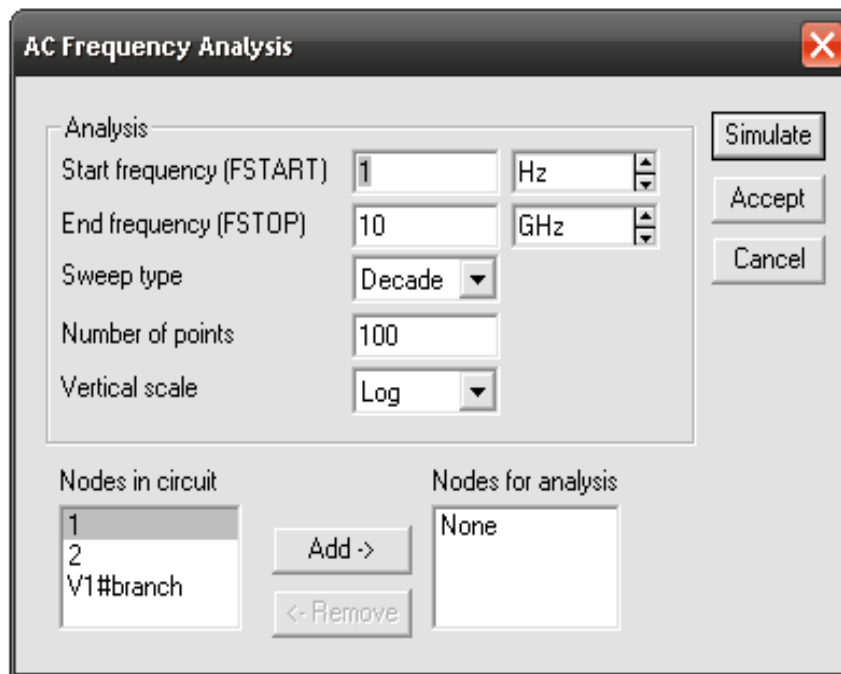


Рис. 1.10. Диалоговое окно задания параметров

AC Frequency... – расчет частотных характеристик. Выполнение команды начинается с задания в диалоговом окне (рис. 1.10) следующих параметров:

FSTART, FSTOP – границы частотного диапазона;

Sweep type – масштаб по горизонтали (декадный, линейный или октавный);

Number of point – число рассчитываемых точек;

Vertical scale – масштаб по вертикали (линейный, логарифмический или в децибелах);

Nodes in circuit – список контрольных точек (нод) узлов цепи;

Nodes for analysis – номера нод, для которых рассчитываются характеристики.

Transient... – расчет переходных процессов. Диалоговое окно команды (рис. 1.11) содержит следующие пункты:

Initial conditions – установка начальных условий моделирования (Set to Zero – нулевое исходное состояние;

User-defined – под управлением пользователя;

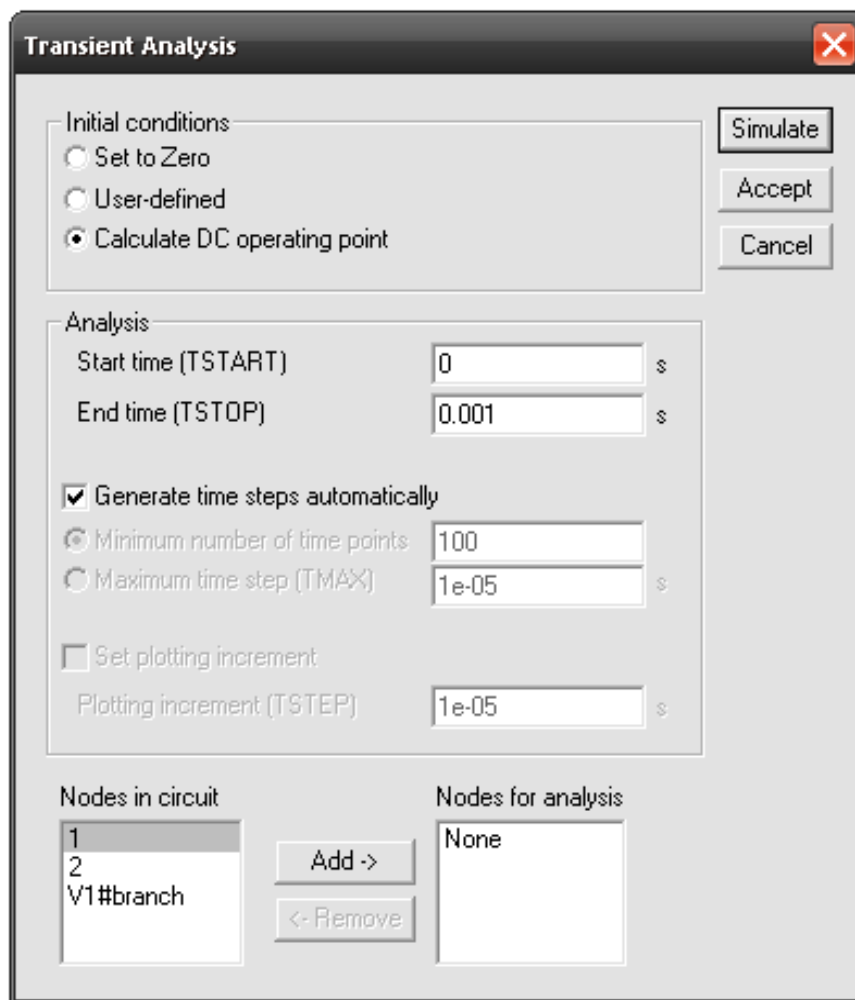


Рис. 1.11. Диалоговое окно команды

Calculate DC operating point – начальные условия берутся из расчета режима по постоянному току);
 TSTART и TSTOP – время начала и окончания анализа переходных процессов;
 Generate time steps automatically – расчет переходных процессов с переменным шагом, выбираемым автоматически;
 Tsteps – временной шаг вывода результатов моделирования на экран.

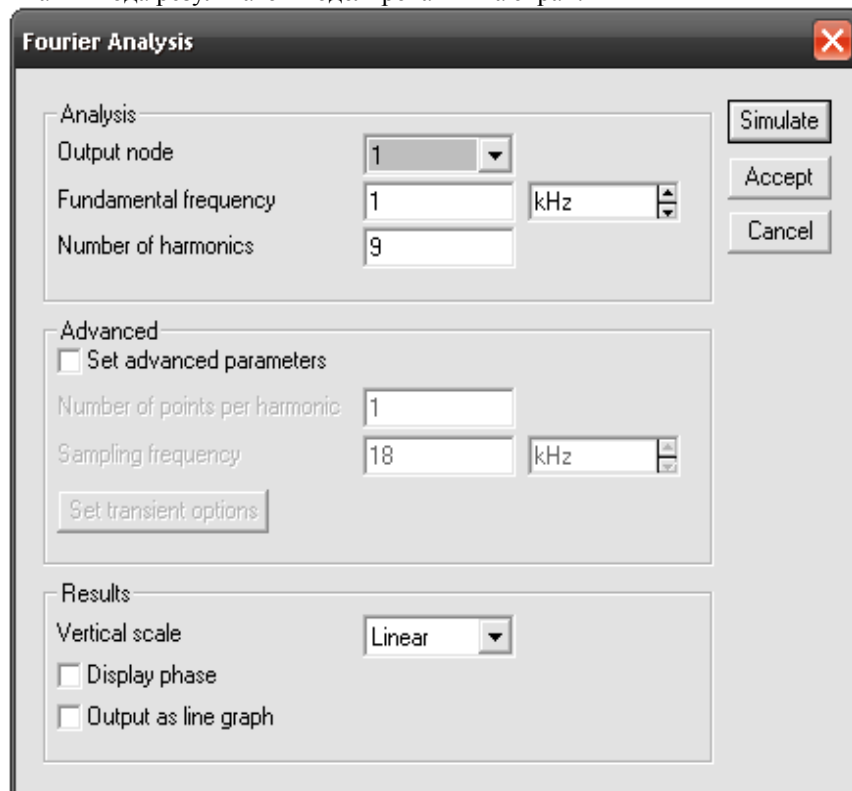


Рис. 1.12. Диалоговое окно задания параметров моделирования

Fourier... – проведение спектрального анализа. Параметры моделирования задаются с помощью диалогового окна (рис. 1.12), в котором опции имеют следующие назначения:

Output node – номер контрольной точки, в которой анализируется спектр сигнала;

Fundamental frequency – основная частота колебания (частота первой гармоники);

Number harmonic – число анализируемых гармоник;

Vertical scale – масштаб по оси Y;

Advanced – набор опций этого блока предназначен для проведения более тонкой структуры анализируемого сигнала;

Number of points per harmonic – количество отсчетов на одну гармонику;

Sampling frequency – частота следования выборок;

Display phase – вывод на экран распределения фаз всех составляющих в виде непрерывной функции (по умолчанию выводится только график амплитуд);

Output as line graph – вывод на экран распределения амплитуд гармоник в виде непрерывной функции (по умолчанию – в виде линейчатого спектра).

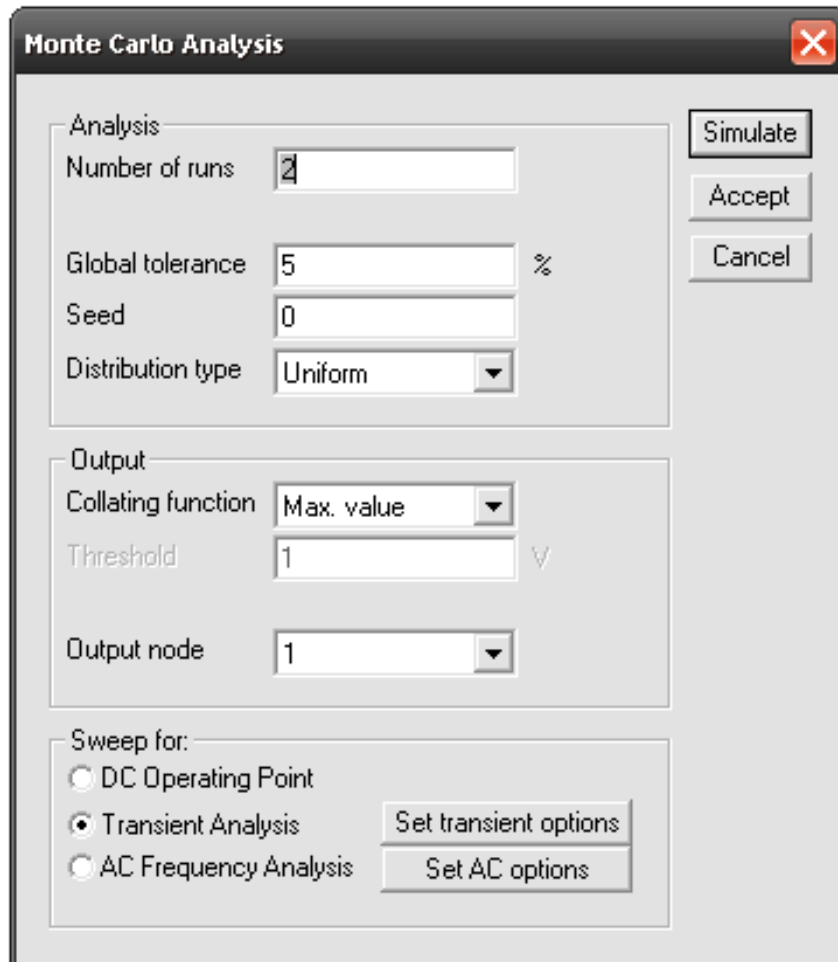


Рис. 1.13. Диалоговое окно параметров

Monte Carlo ... – статистический анализ по методу Монте-Карло. В диалоговом окне (рис. 1.13) задаются следующие основные параметры:

Number of runs – количество статистических испытаний;

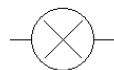
Tolerance – отклонения параметров резисторов, конденсаторов, индуктивностей, источников переменного и постоянного тока и напряжения;

Speed – начальное значение случайной величины (0...32767);

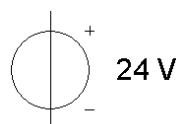
Distribution type – закон распределения случайных чисел.

Порядок выполнения работы

1. Из группы *Indicators* набираем две лампочки **10 W/12 V**



и выносим на рабочее поле. Из этой же группы элементов выносим амперметр и вольтметр.



2. Из группы *Sources* выносим источник постоянного напряжения, при этом в свойствах изменяем напряжение на 24 В.

3. Выносим переключатель из группы *Basic* и присваиваем ему клавишу переключения "Q".

4. Затем все элементы соединяем в следующем порядке (рис. 1.14).

5. Запустить симуляцию собранной схемы и переключателем "Q" проверить работу лампочек.

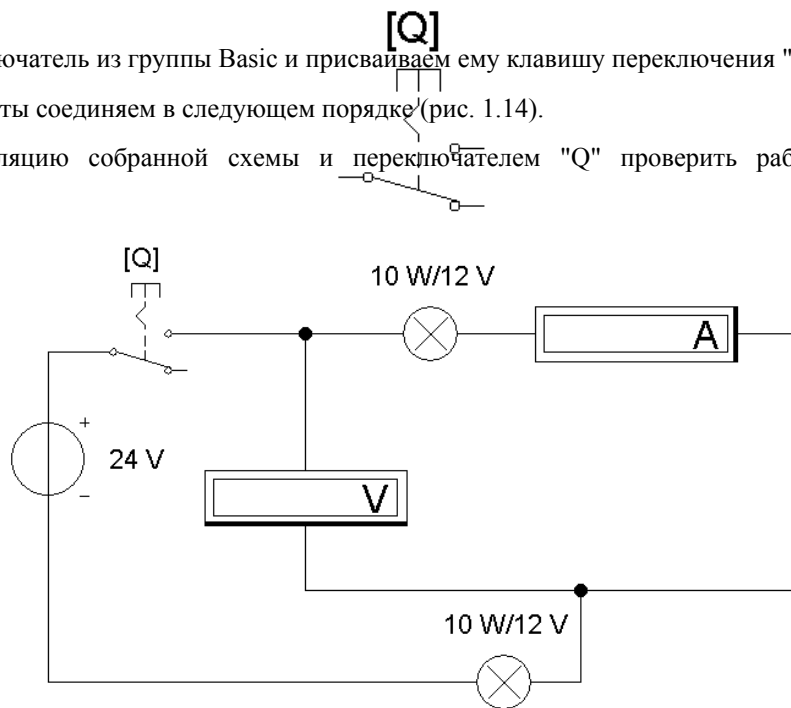


Рис. 1.14. Схема соединения элементов
Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Правила запуска и настройки программного комплекса Electronics Workbench.
3. Перечень основных элементов из библиотеки Electronics Workbench, необходимых для моделирования электронных схем.
4. Примеры, выполненные по заданию преподавателя. Последовательность составления моделируемой схемы.

Контрольные вопросы

1. Какие стандартные элементы имеются в библиотеке Electronics Workbench?
2. Как производится соединение более двух входов или выходов?
3. Какой командой можно скопировать изображение схемы в отчет по лабораторной работе, подготавливаемый в текстовом редакторе MS Word?
4. Как в программе Electronics Workbench выполнить анализ цепи по постоянному току?
5. Как в программе Electronics Workbench выполнить анализ частотных характеристик цепи?
6. Как в программе Electronics Workbench выполнить анализ переходных процессов?

Лабораторная работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

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_T).

Коэффициент полезного действия определяется по зависимости

$$\eta = \frac{P_n}{P_{\text{п}}},$$

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

Мощность, выделяющаяся в нагрузке, определяется по следующей зависимости [2]

$$P_n = \left(\frac{U_n}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{J_n}{\sqrt{2}} \right) = (\gamma U_n)^2,$$

где U_n – амплитуда выходного напряжения (напряжение в нагрузке); J_n – выходной ток (ток в нагрузке); R_n – сопротивление нагрузки; γ – относительная амплитуда выходного напряжения усилителя, $0 \leq \gamma \leq 1$; U_n – 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

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

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

Исходные данные для расчета усилителя мощности. Для расчета усилителей мощности исходными данными являются заданные сопротивление нагрузки R_n и мощность P_n , которая выделяется в нагрузке, границы частотного диапазона входного сигнала (нижняя частота, верхняя частота), коэффициент нелинейных искажений, коэффициенты частотных искажений, рабочий диапазон температур, коэффициент температурной нестабильности.

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 [2]:

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 следующим образом, как показано на рис. 2.1 [3].

На рис. 2.1 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_6 – ток базы транзистора; E_n – 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 одноктактных 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 .

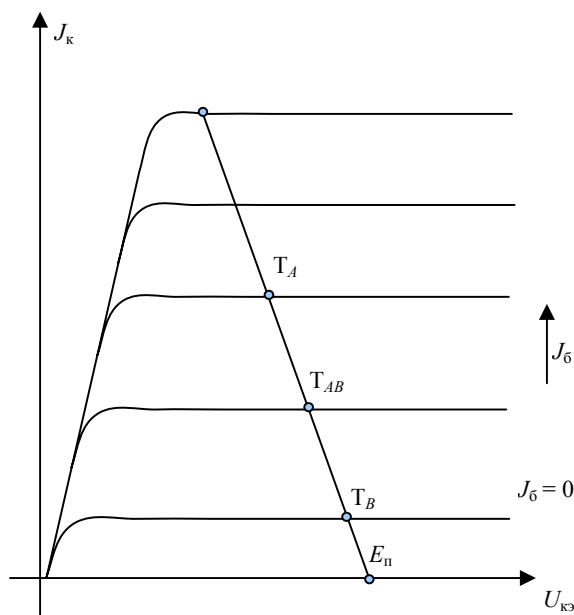


Рис. 2.1. Расположение рабочих точек усилителя мощности при работе в классах усиления *A*, *B* и *AB*

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 объемные 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 [2].

Описание лабораторного стенда

Принципиальная электрическая схема усилителя показана на рис. 2.2. 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*) [4].

Выходной каскад выполнен по двухтактной бестрансформаторной схеме с последовательно соединенными 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 подается в цепь базы первого каскада через резистор *R2* и цепочку *C3*, *R4*.

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 – 1,3В.

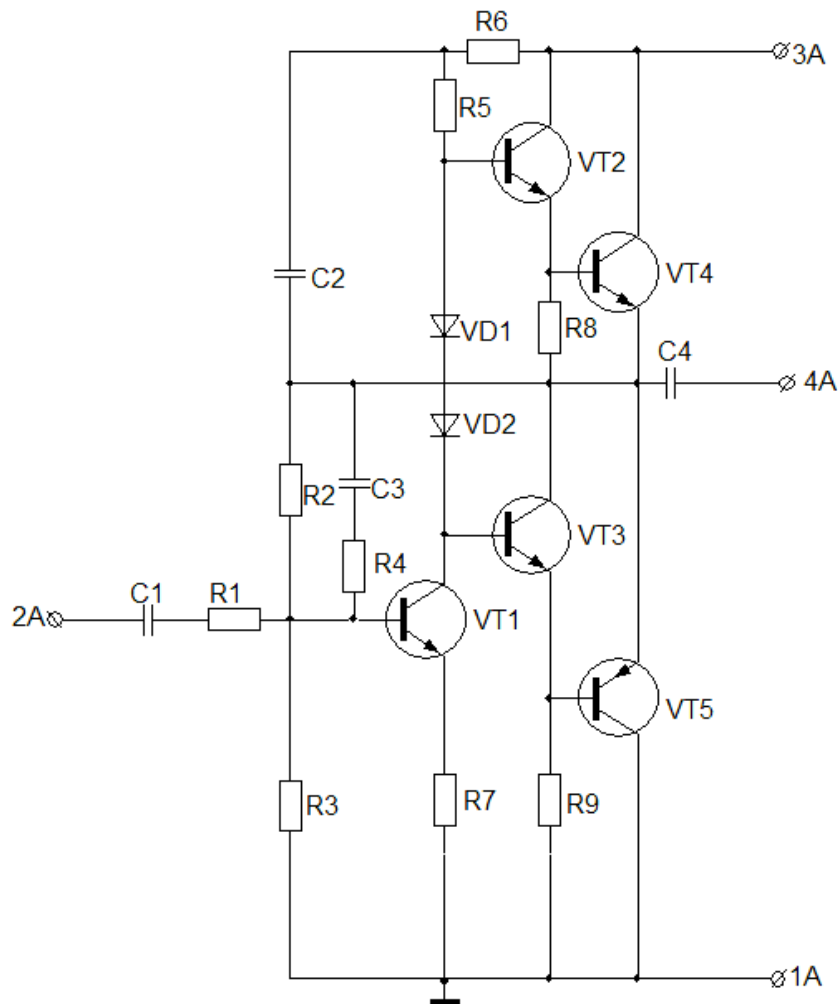


Рис. 2.2. Принципиальная схема усилителя мощности

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему измерений в соответствии с рис. 2.3, 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.

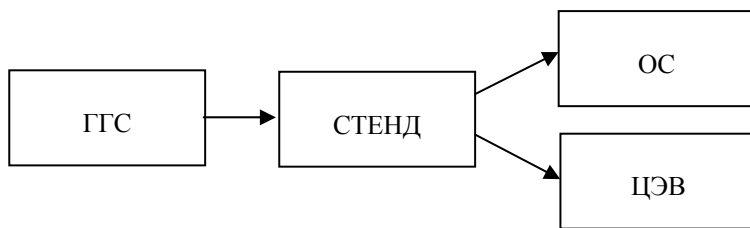


Рис. 2.3. Структурная схема измерений параметров усилителя мощности:

ГГС – генератор гармонического сигнала; ОС – осциллограф;
ЦЭВ – цифровой электронный вольтметр

2. Определить чувствительность схемы и максимальный искажающий сигнал.
3. Снять проходную характеристику $U_{\text{вых}} = F(U_{\text{вх}})$ и определить ее 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.
4. Подать среднее значение входного сигнала и зарисовать четкие эпюры напряжения. По осциллограмме полагаются оценить качественно наличие второй и третьей гармоник в выходном спектре сигнала. С этой целью на осциллограмме измерить с помощью калибратора время достижения заданного уровня A_0 двумя полупериодами (рис. 2.4) 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 выполняется и,

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

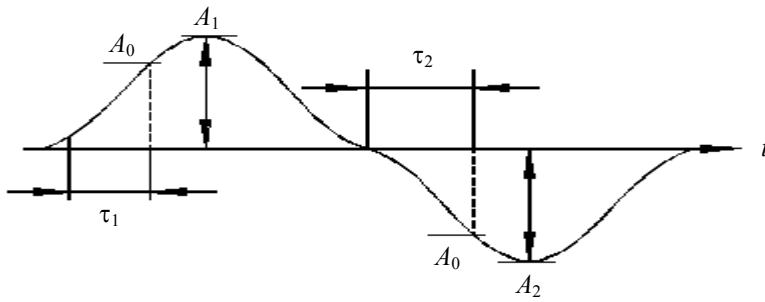


Рис. 2.4. Осциллограмма выходного сигнала

Содержание отчета

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?

Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

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. 3.1.

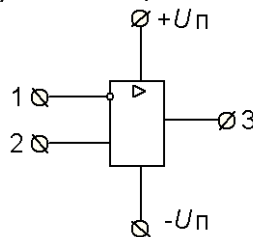


Рис. 3.1. Обозначение ОУ на электрических схемах

Операционный усилитель имеет два входа и один выход: 1 – инвертирующий вход (обозначен кружком); 2 – неинвертирующий вход; 3 – выход.

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

Параметры, свойства и характеристики ОУ. Основными параметрами операционного усилителя являются [2]:

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 $R_{\text{вых}}$ определяется по формуле

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

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.

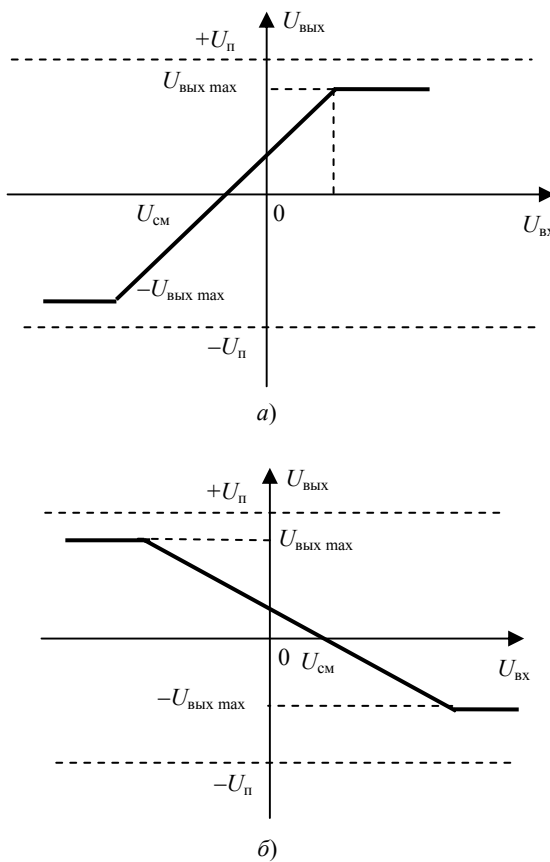
Параметры операционного усилителя зависят от температуры окружающей среды. В большей степени этой зависимости подвержены напряжение смещения, входные токи, коэффициент усиления.

ОУ имеет высокое входное и низкое выходное сопротивление.

Передающая характеристика ОУ расположена в двух квадрантах (рис. 3.2) [2], так как ОУ имеет двухполярное питание.

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

Устройство ОУ. 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.



**Рис. 3.2. Передаточные характеристики ОУ по
неинвертирующему (а) и инвертирующему (б) входам**
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 [4].

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. 3.3.

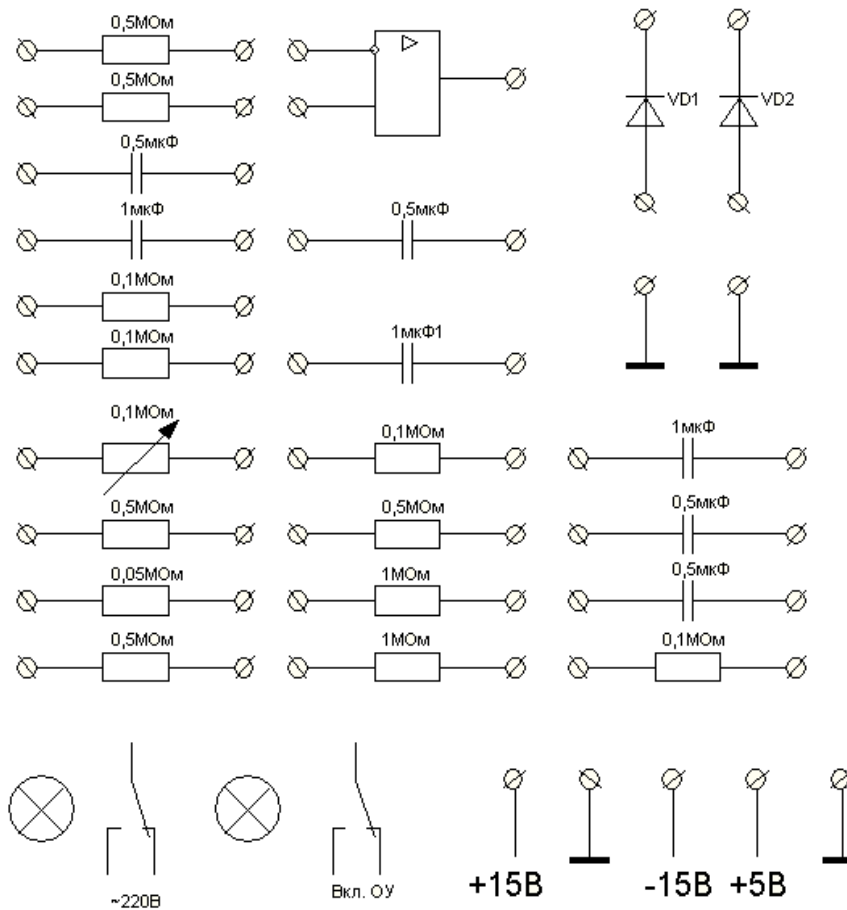


Рис. 3.3. Схема стенда для исследования различных схем на ОУ
Порядок выполнения работы

Инвертирующий усилитель

1. Рассчитать инвертирующий усилитель и собрать схему (рис. 3.4, 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 $\text{ТКЕ} = 50$ мкВ/К; напряжение смещения $U_{см} = 50$ мВ; $C = 1$ мкФ. В процессе расчета 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. 3.4, б конденсатор C .

Неинвертирующий усилитель

1. Рассчитать неинвертирующий усилитель и собрать схему (рис. 3.5, а) для следующих данных: $K_n = 11$; $K_0 = 5 \cdot 10^5$; $R_n = 100$ кОм; $\text{ТКЕ} = 50$ мкВ/К; $U_{см} = 50$ мВ; напряжение входного сигнала $E_c = (0,1; 1; 1,2$ В); $C = 1$ мкФ. В процессе расчета определить: $R_{ос}$, R_1 , $R_{бал}$, $K_{реал}$, β , $\Delta U_{вых}$.

2. Определить максимальный выходной сигнал и коэффициент усиления.
3. Определить полосу пропускания для малого (0, 1 В) и большого (предельного) сигнала.
4. Реализовать повторитель напряжения и убедиться в его работоспособности (рис. 3.6).

В соответствии с рис. 3.5, б собрать усилитель переменного напряжения и определить его коэффициент усиления и качество усиления.

Дифференциальный усилитель

1. Собрать схему ОУ в соответствии с рис. 3.7 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.

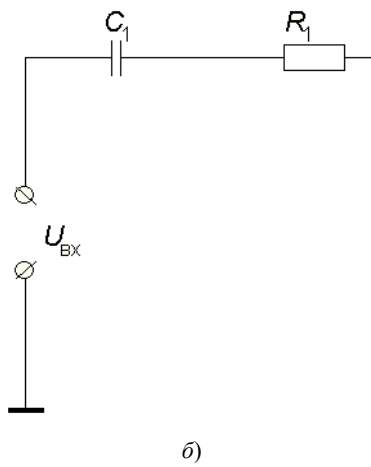
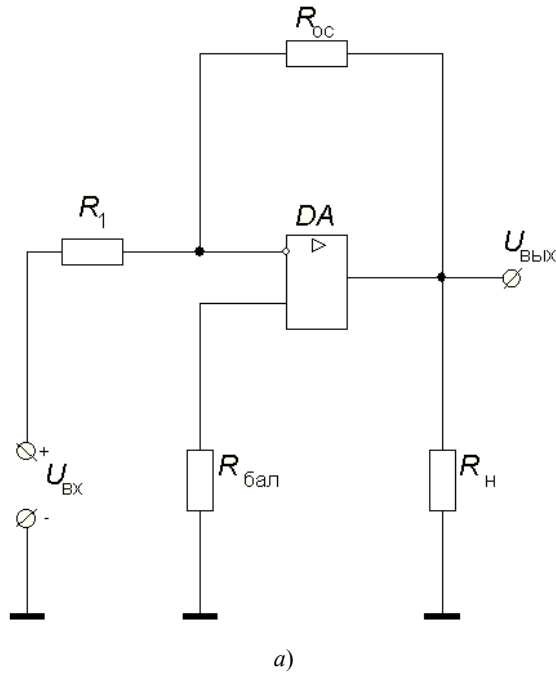
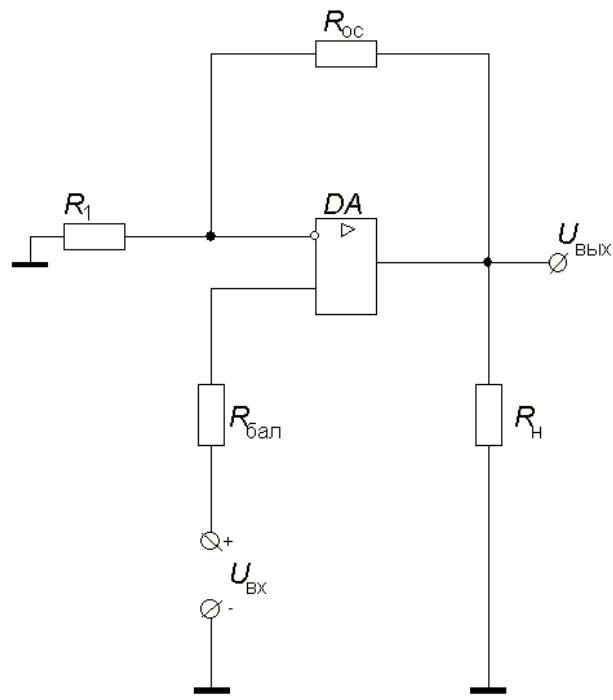
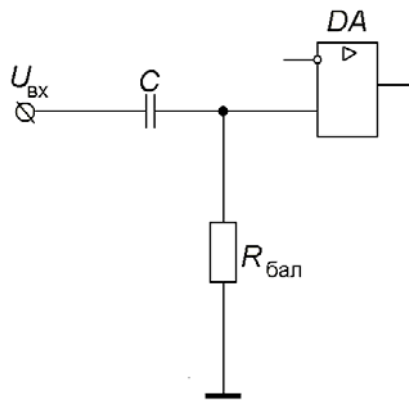


Рис. 3.4. Схема инвертирующего усилителя (а) и усилителя с конденсатором на входе (б)



а)



б)

Рис. 3.5. Схема усилителя:
 а – неинвертирующего; б – переменного напряжения

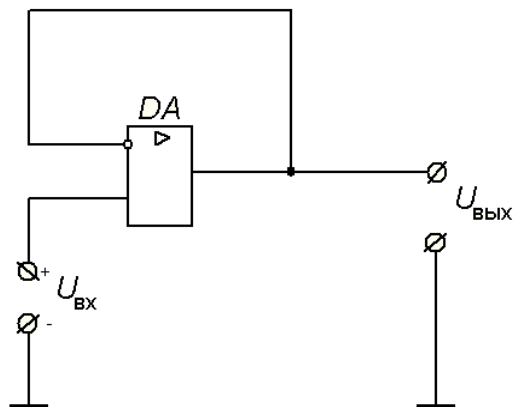


Рис. 3.6. Схема повторителя напряжения

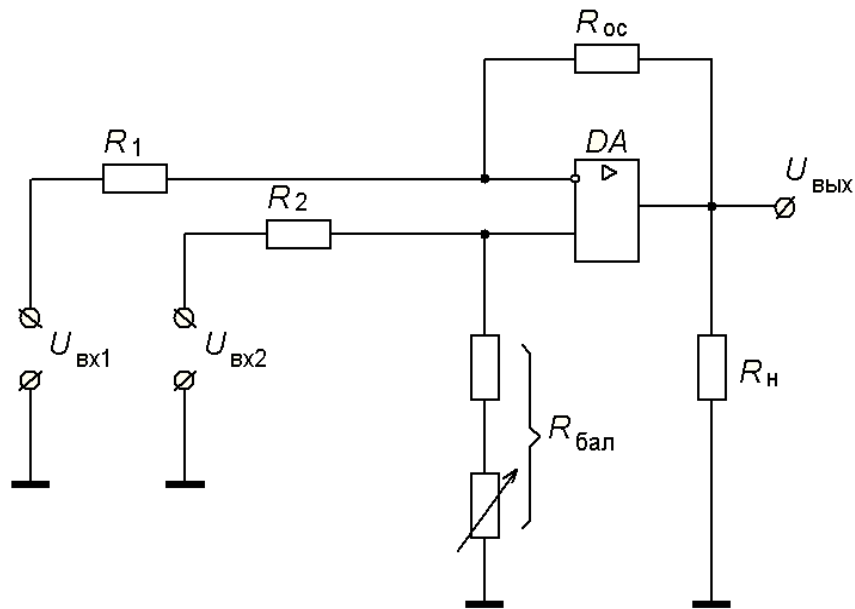


Рис. 3.7. Схема дифференциального усилителя
Импульсные схемы на основе операционного усилителя

Аналоговый компаратор

1. Собрать схему однополярного компаратора (рис. 3.8) для следующих данных: опорное напряжение $U_{оп} = 2$ В; $U_{вх} = 5$ В; $R_{н} = 100$ кОм; $R_1 = 1$ кОм; $R_2 = 1$ МОм.

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

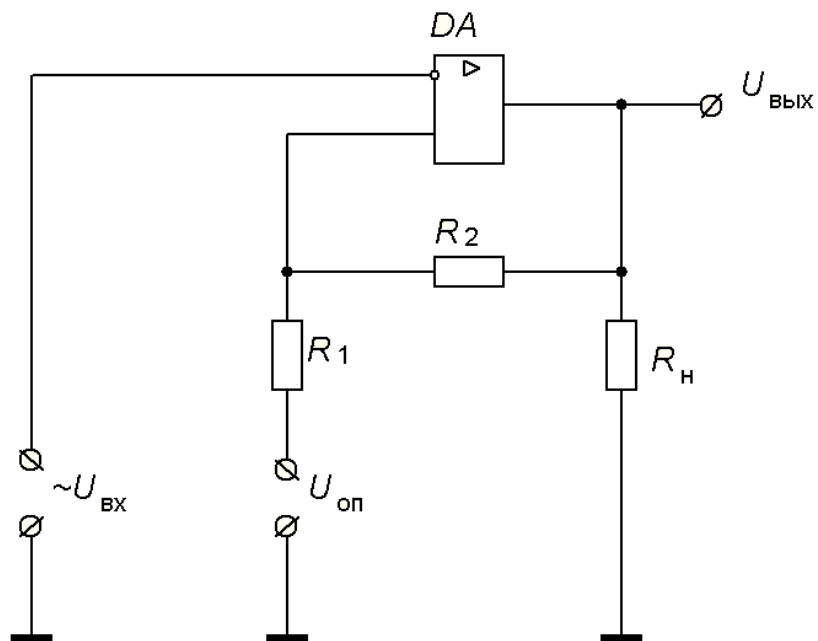


Рис. 3.8. Схема однополярного компаратора

Мультивибратор

1. Собрать схему (рис. 3.9) и рассчитать ее 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.

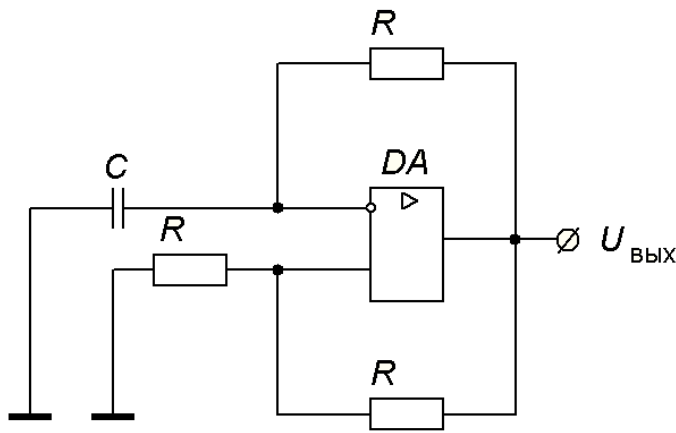


Рис. 3.9. Схема мультивибратора

Ждущий мультивибратор

1. Собрать схему ждущего мультивибратора (рис. 3.10) с параметрами: $R = 10 \dots 100$ кОм; $C = 0,5$ мкФ; $R_1 = 100$ кОм; $R_2 = 1$ МОм; $C_{ВХ} = 0,5$ мкФ; $R_{ВХ} = 100$ кОм.

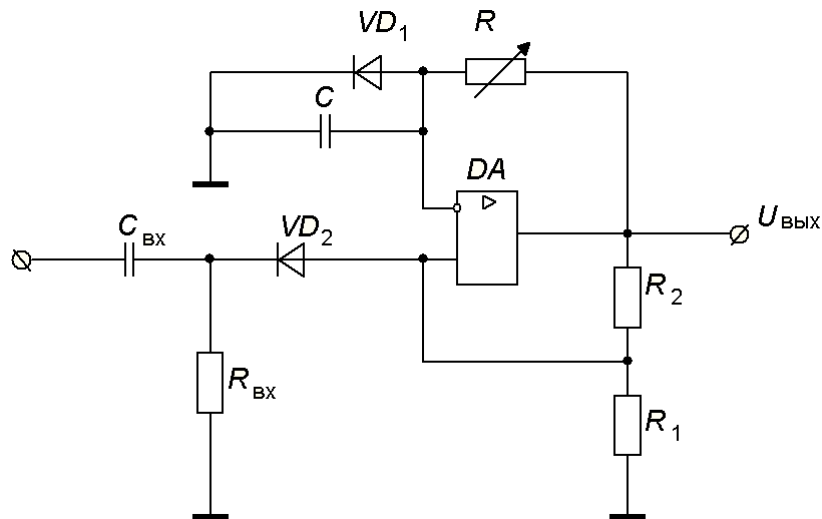


Рис. 3.10. Схема ждущего мультивибратора

2. Отключив диод $D1$, добиться регулировкой четкого изображения импульсов на экране осциллографа. Определить длительность импульсов.

3. Включить диод $D1$ и синхронизирующим импульсом отрицательной полярности запустить одновибратор. Эшоры 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. 3.11.

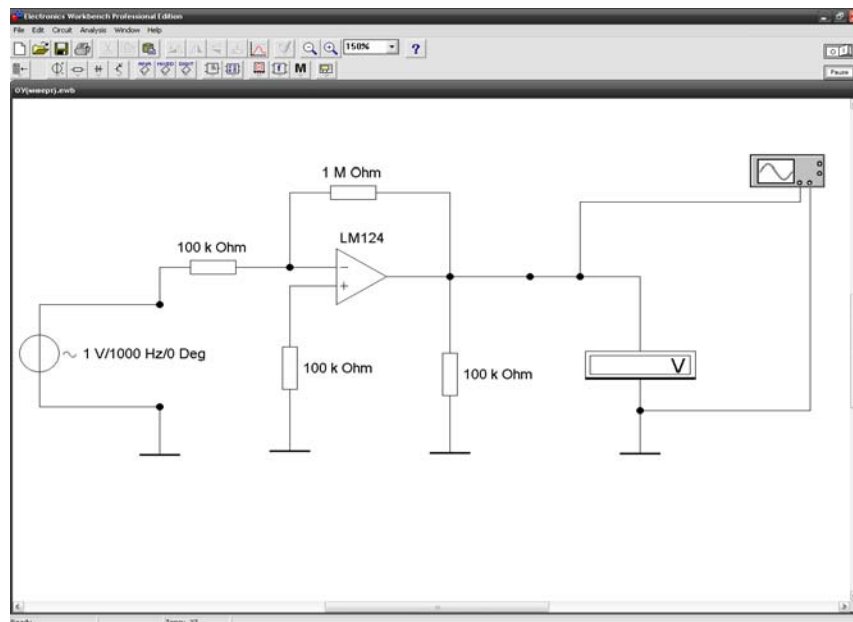


Рис. 3.11. Схема виртуального стенда
Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Рисунки всех схем операционного усилителя.
3. Расчетные 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 $R_{\text{бэл}}$ 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 $D1$ и $D2$ в одновибраторе.
18. Как изменится работа одновибратора, если поменять полярность включения диода $D1$?

Лабораторная работа 4

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОГО RC-ФИЛЬТРА НА АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ

Цель работы: исследование частотных и избирательных свойств активного RC-фильтра.

Краткие теоретические сведения

Частотные характеристики формируются как пассивными (R , L , C), так и активными элементами (усилительными). Операционные усилители применяются в активных фильтрах, так как их высокое входное сопротивление не нагружает частотозадающие RC-цепи. Необходимо, чтобы ОУ, охваченный ООС, обеспечивал заданный коэффициент усиления как в полосе пропускания, так и за его пределами [2].

Активные фильтры на ОУ строятся для частот до 0,1 МГц.

Классификация:

- 1) фильтры низких частот (НЧ), пропускающие сигналы с частотой от $\omega = 0$ до некоторого $\omega_{\text{ср}}$ (рис. 4.1, а);

- 2) фильтры высоких частот (ВЧ), пропускающие сигналы с частотой от $\omega = \omega_{cp}$ до $\omega \rightarrow \infty$ (рис. 4.1, б);
- 3) полосовые фильтры, пропускающие сигналы в диапазоне частот от ω_1 до ω_2 (рис. 4.1, в);
- 4) режекторные (заградительные) фильтры, не пропускающие сигналы в узком диапазоне частот от ω_1 до ω_2 (рис. 4.1, г).

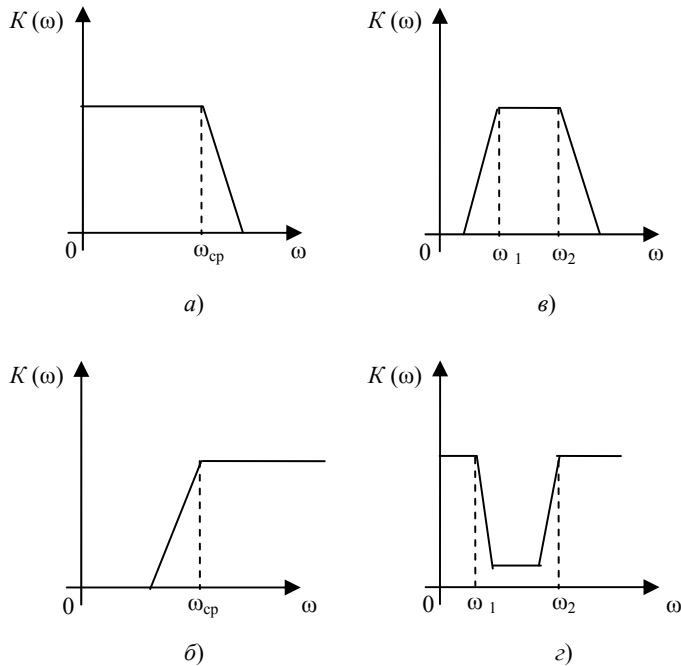


Рис. 4.1. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) активных фильтров:

a – низких частот; *б* – высоких частот; *в* – полосовой; *г* – режекторный

Основной параметр: полоса пропускания, которая определяется по уровню падения коэффициента передачи в 1,41 раза (на 3 дБ).

Полосовой фильтр осуществляют последовательным включением фильтров НЧ и ВЧ.

Режекторный фильтр формируют при параллельном включении входов и выходов фильтров НЧ и ВЧ.

Активные фильтры по реализации частотных характеристик делятся на фильтры Баттерворта, Чебышева и Бесселя.

Фильтр Баттерворта обеспечивает при большом порядке фильтра равномерное усиление по амплитуде всех частот в полосе пропускания за исключением частот, соответствующих частоте среза. Недостатки фильтра: нелинейность фазочастотной характеристики и невысокое затухание за пределами полосы пропускания.

Фильтр Чебышева характеризуется наличием нескольких максимумов и минимумов в полосе пропускания. Достоинством фильтра Чебышева являются значительно лучшая фильтрация за пределами полосы пропускания, по сравнению с другими фильтрами. Недостаток фильтра – значительная нелинейность фазочастотной характеристики.

Фильтр Бесселя формирует наибольшее приближение реальной фазочастотной характеристики к линейной зависимости, поэтому фильтры Бесселя не имеют выбросов при подаче ступенчатых сигналов и применяются для фильтрации сигналов прямоугольной формы.

Параметры фильтров: коэффициент затухания, который определяет форму характеристики фильтра на переходном участке и добротность. Добротность определяется по формуле [5]

$$Q = \frac{t_{cp}}{f_B - f_H},$$

где t_{cp} – средняя частота; f_B – верхняя частота; f_H – нижняя частота.

Активные фильтры применяются в устройствах связи, для фильтрации аналоговой информации, в качестве частотоизбирательных устройств в звуковоспроизводящей аппаратуре (рис. 4.2).

Описание лабораторного стенда

На рис. 4.2 изображена принципиальная электрическая схема исследуемого RC-фильтра, выполненного на основе аналоговых микросхем типа K553УД2 и расположенного на съемной плате клеммы передней панели стенда [4]. На схеме функциональное назначение клемм следующее: 1А – земля; 2А – (+15В); 3А – (–15В); 4А – вход схемы; 5А – выход схемы АФ.

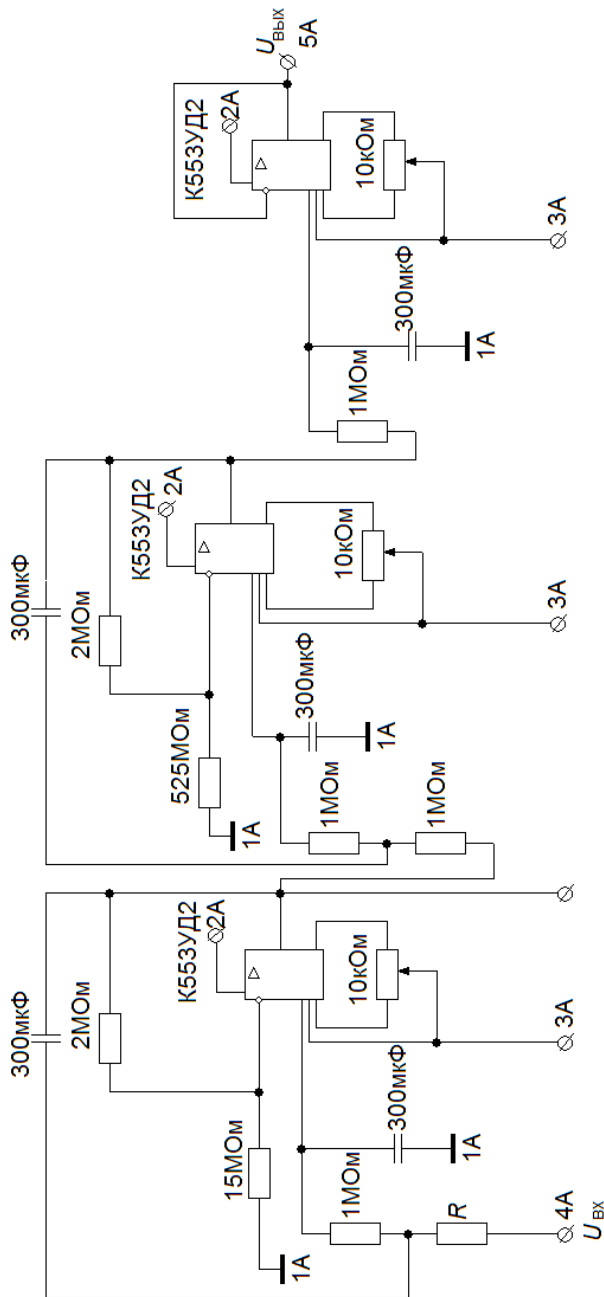


Рис. 4.2. Схема лабораторного стенда для исследования RC-фильтра на ОУ

В предлагаемой работе исследуется схема фильтра пятого порядка с полосой пропускания до 500 Гц, с неравномерностью АЧХ не более 7 %. Частота среза равна 1 кГц или $\omega_c = 2\pi f_c$. Передаточная функция фильтра имеет вид

$$F(S) = \frac{1}{(S^2 + 0,618S + 1)(S^2 + 1,618S + 1)(S + 1)}$$

Порядок выполнения работы

1. Снять передаточную характеристику фильтра, для чего собрать схему по рис. 4.3, снять проходную характеристику фильтра $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ на частоте 100 Гц. На рис. 4.3 введены следующие обозначения: Г – генератор, ИП – источник питания, ЦВ – цифровой вольтметр, ПБАФ – проверяемый блок активного фильтра.
2. Определить входное сопротивление, для чего собрать схему по рис. 4.4, где МС – магазин сопротивлений, ДН – делитель напряжения.
3. Для определения выходного сопротивления собрать схему в соответствии с рис. 4.5.
4. Снять частотную характеристику фильтра (рис. 4.3), по которой определить скорость спада АЧХ и неравномерность АЧХ в полосе пропускания. Определить частоту среза фильтра.

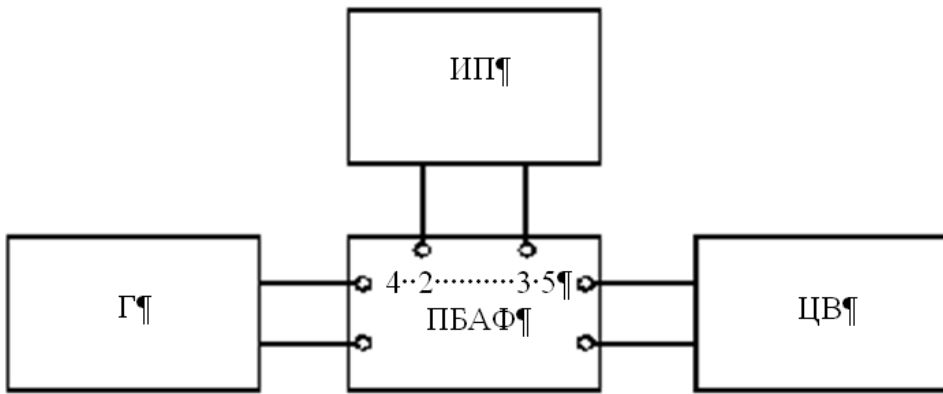


Рис. 4.3. Схема подключения фильтра для снятия характеристик

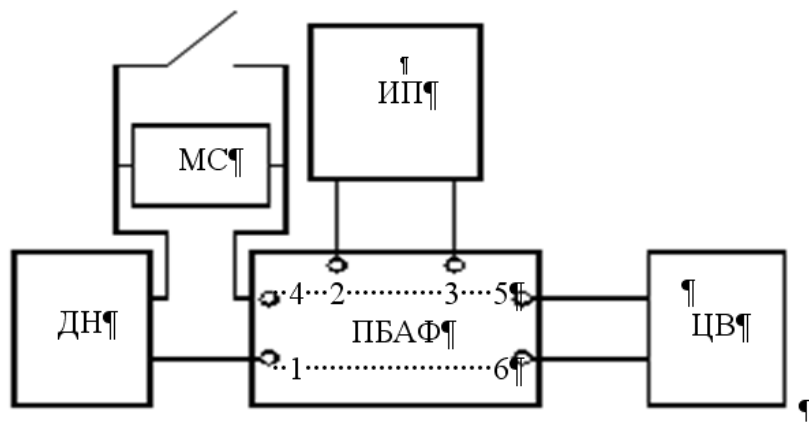


Рис. 4.4. Схема подключения фильтра для определения входного сопротивления

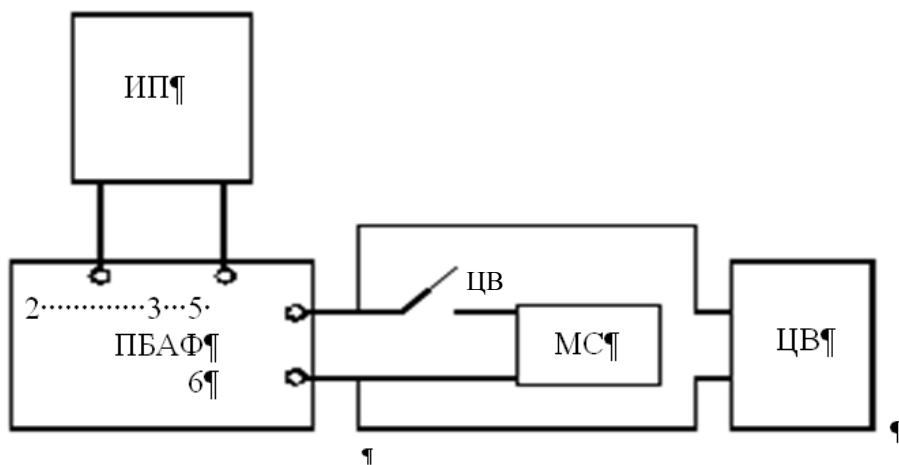


Рис. 4.5. Схема подключения фильтра для определения выходного сопротивления

Применение программы Electronics workbench для исследования активного RC-фильтра на аналоговых интегральных схемах

На рис. 4.6 изображена принципиальная электрическая схема исследуемого RC-фильтра, выполненного на основе аналоговых микросхем типа K553УД2 и смоделированная в электронном комплексе "Electronics Workbench".

Порядок применения программы Electronics Workbench

1. Запустить программный комплекс Electronics Workbench и при помощи меню файл, открыть требуемую электронную схему, расположенную на диске по адресу: C:\Lab\lab\rc-фильтр(ОУ).ewb.
2. Используя измерительные приборы программного комплекса, собрать схему измерений в соответствии с рис. 4.6.
3. Снять передаточную характеристику фильтра, снять проходную характеристику фильтра $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ на частоте 100 Гц.
4. Снять частотную характеристику фильтра, по которой определить скорость АЧХ и неравномерность АЧХ в полосе пропускания. Определить частоту среза фильтра.

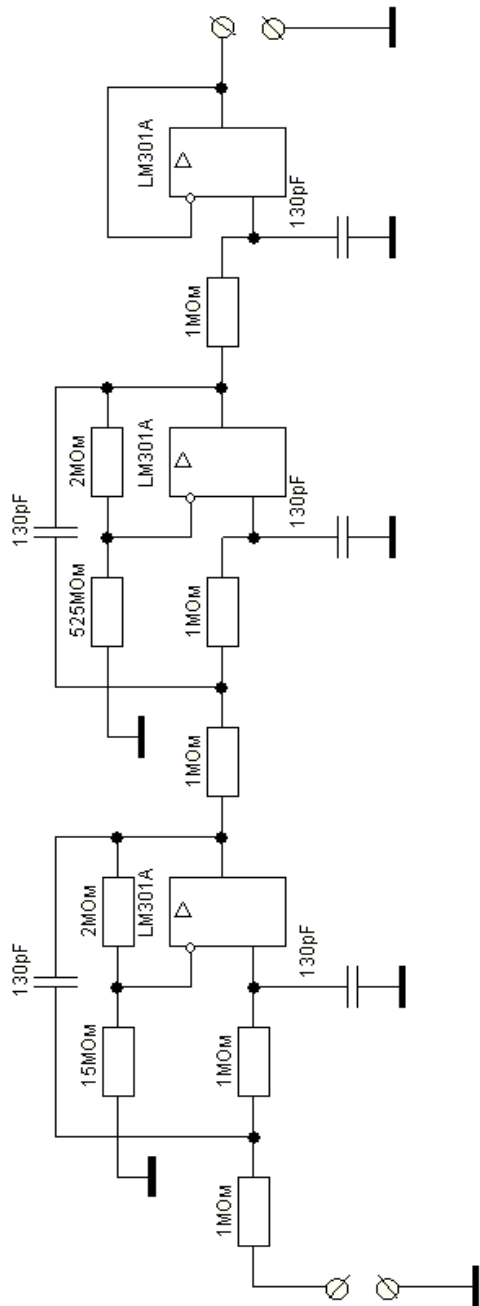


Рис. 4.6. Электрическая принципиальная схема RC-фильтра

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Схема измерений.
3. Расчетные параметры.
4. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Типы электрических фильтров, их АЧХ.
2. Записать общий вид передаточной функции фильтра.
3. Какие критерии используются при решении задач аппроксимации АЧХ фильтров Чебышева и Баттерворта?
4. По какой причине аппроксимация выполняется для квадрата АЧХ?
5. Почему при решении задач аппроксимации фильтров используется нормированный по частоте вид передаточной функции?
6. Из каких соображений рассчитывается порядок фильтра Баттерворта?
7. Сравните АЧХ фильтров Баттерворта и Чебышева.

Лабораторная работа 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

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

Краткие теоретические сведения

В цифровых устройствах для приема, 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_i . Устройства, работа которых записывается с помощью ФАЛ, называются логическими (ЛУ).

Способы задания ФАЛ следующие:

- 1) в виде таблицы истинности (табл. 5.1) в двоичном коде;
- 2) в виде алгебраических выражений:
 - а) логическое сложение (дизъюнкция) ИЛИ (табл. 5.2);
 - б) логическое умножение (конъюнкция) И (табл. 5.3);
 - в) инверсия (отрицание) НЕ (табл. 5.4).

Таблица 5.1

| 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 5.2

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

Таблица 5.3

| X_2 | X_1 | $Y = X_1 X_2$ |
|-------|-------|---------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |

Таблица 5.4

| 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 логической 1. КНФ – логическое произведение всех входных переменных, ФАЛ которых равна логическому 0.

Функции алгебры логики реализуются с помощью основных базисных логических элементов, осуществляющих операции логического умножения И (рис. 5.1, а), логического сложения ИЛИ (рис. 5.1, б) и инверсии НЕ (рис. 5.1, в), а также логические операции И-НЕ (рис. 5.1, з) и ИЛИ-НЕ (рис. 5.1, д).

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

По принципу действия различают последовательные 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 последовательных устройств рассмотрим в лабораторной работе триггеры, счетчики, регистры. Триггер – элемент памяти с двумя устойчивыми состояниями, выходной сигнал которого скачкообразно изменяется при подаче на его вход управляющего сигнала.

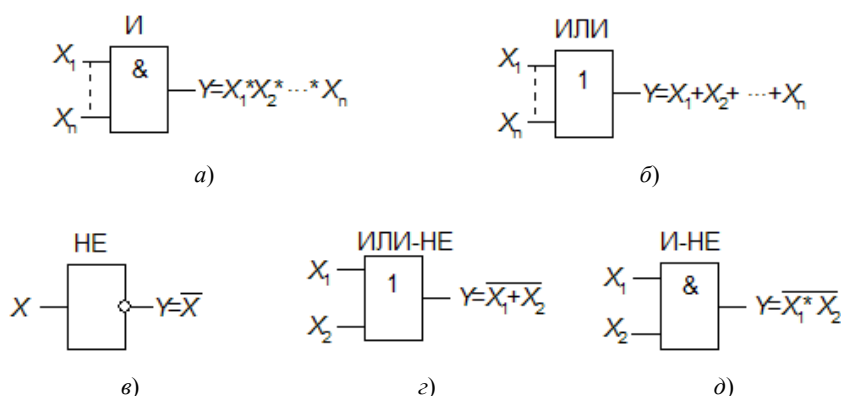


Рис. 5.1. Основные базисные ЛЭ:
а – И; б – ИЛИ; в – НЕ; з – И-НЕ; д – ИЛИ-НЕ

Счетчик служит для счета, записи и хранения входных сигналов в двоичном коде. Регистр предназначен для записи, хранения и сдвига входной информации.

В качестве примеров комбинационных устройств в лабораторной работе исследуются сумматоры и дешифраторы.

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

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

$$P = X_1 X_2,$$

где S – функция "Исключающее ИЛИ"; P – сигнал переноса.

При сложении многоразрядных двоичных кодов ФАЛ имеет следующий вид:

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

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

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

Дешифратор относится к преобразованию кодов информации. Это комбинационное устройство, служащее для преобразования чисел из двоичной системы счисления в десятичную.

Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд выполнен в виде блока, на передней панели которого расположены: тумблер включения питания от сети, лампочка сигнализации сетевого напряжения и наборное поле (рис. 5.2) [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. 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.

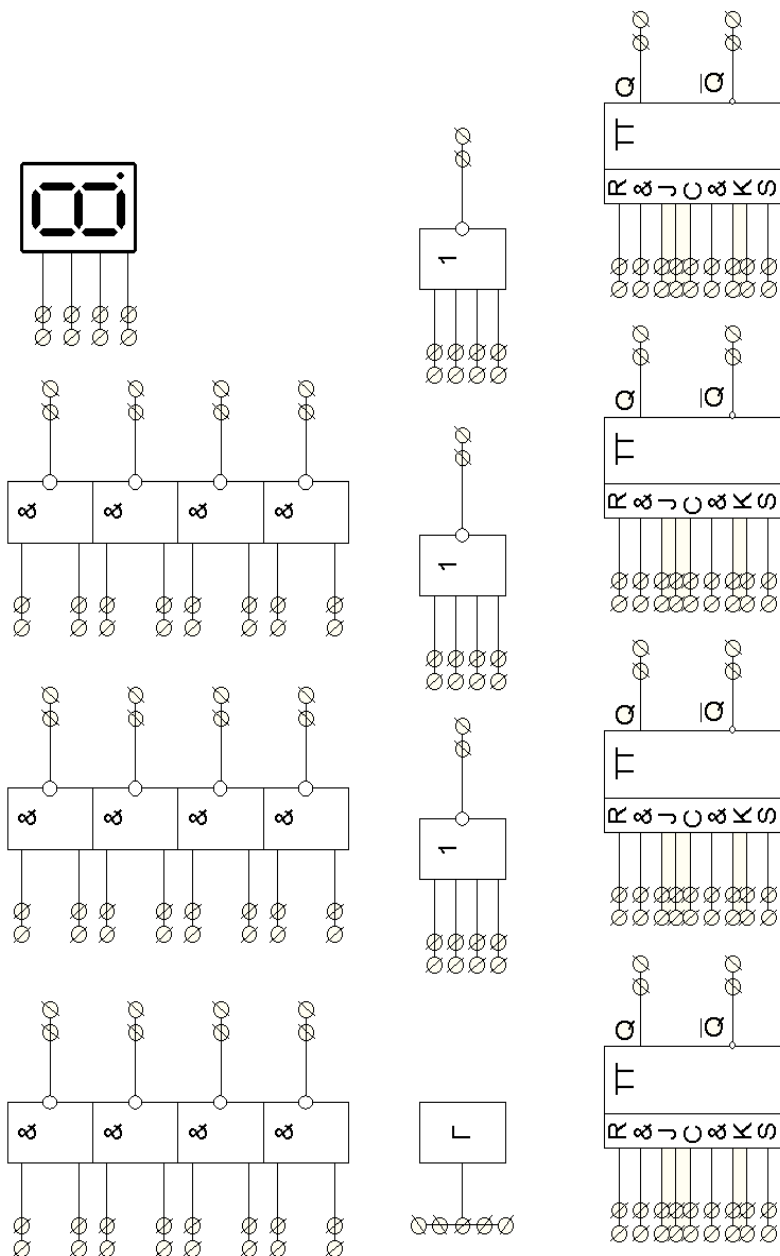


Рис. 5.2. Схема лабораторного стенда

Порядок выполнения работы

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

1. Построить комбинационное логическое устройство, заданное таблицей истинности (табл. 5.5).
 - 1.1. Минимизировать функциональное логическое управление с помощью диаграммы Вейча и записать в базисе "И-НЕ".
 - 1.2. Реализовать устройство на элементах макета и проверить функционирование по таблице истинности.
 - 1.3. Оценить функциональную надежность логического устройства по критерию Хаффмена.
2. Построить одноразрядный двоичный полусумматор, заданный таблицей истинности (табл. 5.6).

Таблица 5.5

| Десятичный код N | Входы | | | Выход Y |
|--------------------|-------|-------|-------|-----------|
| | X_3 | X_2 | X_1 | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 5 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 0 |

Таблица 5.6

| Десятичный код 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 |

- 2.1. Функциональные логические управления записать в базисе "И-НЕ" и реализовать на элементах схемы.
- 2.2. Функциональные логические управления, преобразованные для прямых переменных $S = \overline{OP} + \overline{BP}$; $P = OB$, реализовать на элементах базисов "И-ИЛИ-НЕ", "НЕ", "И-НЕ".
3. На D-триггерах организовать сдвигающий вправо регистр.
 - 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 счетчиков.
 - 5.1. Последовательного двоичного счетчика с индикацией результата счета (рис. 5.3); в исходном состоянии установить все триггеры в "0".
 - 5.2. На сдвигающих регистрах (рис. 5.4); в исходном состоянии установить все триггеры в "0".
 - 5.3. Унитарный кольцевой счетчик (рис. 5.5).

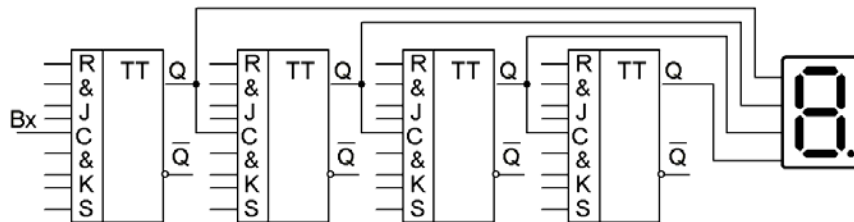


Рис. 5.3. Схема двоичного счетчика

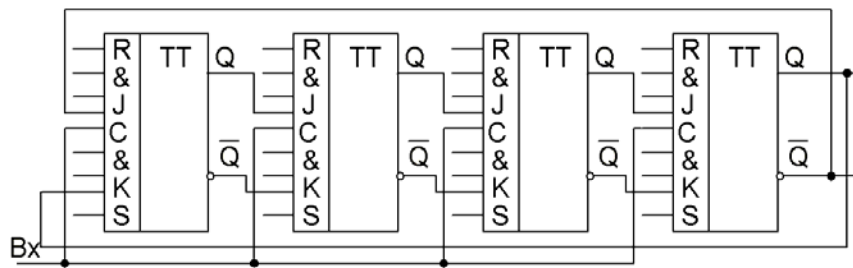


Рис. 5.4. Схема счетчика на сдвигающих регистрах

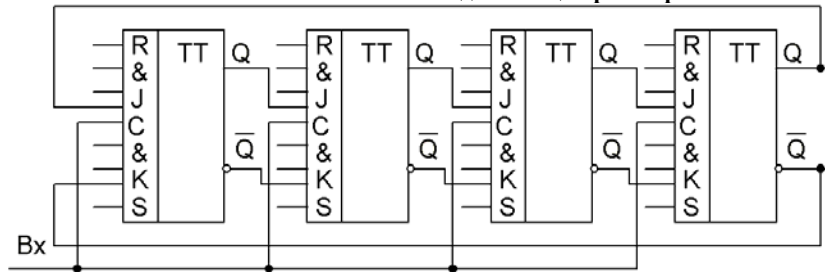


Рис. 5.5. Схема унитарного кольцевого счетчика

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. 5.6).

Для создания схем достаточно воспользоваться имеющимися типовыми компонентами.

Для открытия нужной библиотеки компонентов нужно подвести курсор мыши к соответствующей иконке и нажать один раз ее 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.

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 нем 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 еще 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 производится нужные перемещения.

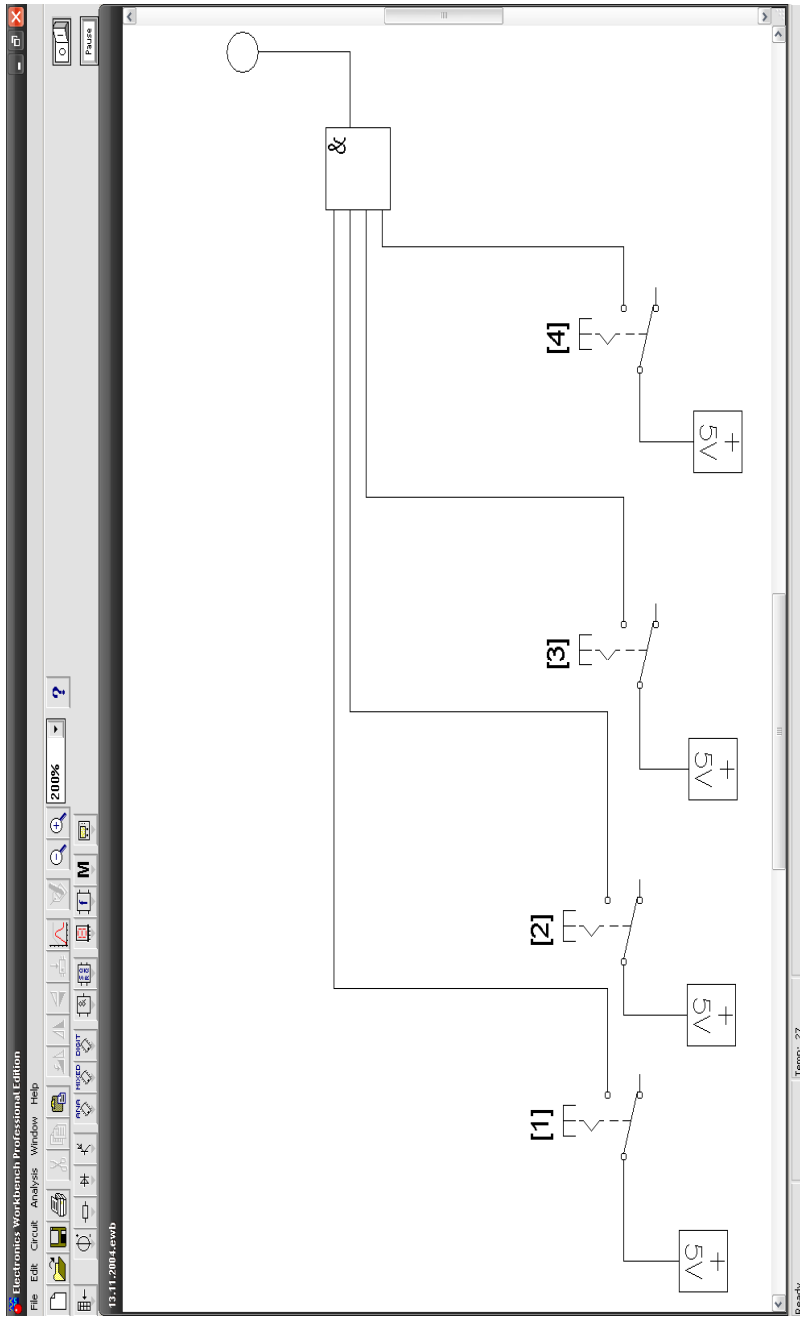


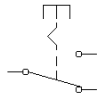
Рис. 5.6. Окно программы Electronics Workbench

Используемые элементы программы Electronics Workbench

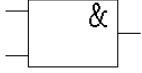


Voltage Source: с помощью этого источника на вход триггеров и логических элементов подается логическая единица.

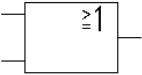
[Space]



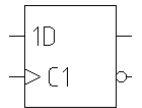
Переключатель (Basic > Switch): переключение производится нажатием на клавишу, указанную в скобках над этим элементом.



Логический элемент "И-НЕ" (Logic gates > 2-input NAND gate).



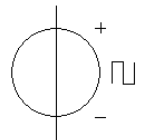
Логический элемент "ИЛИ-НЕ" (Logic gates > > 2-input NOR gate).



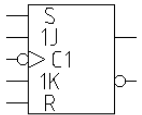
Триггер типа D (Digital > D Flip-Flop).



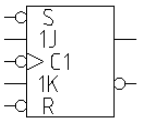
Светоиндикатор (indicators > red Prob): при подаче на этот элемент логической единицы светодиод загорается красным цветом.



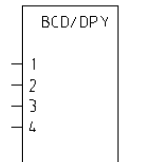
Источник прямоугольных сигналов (Sources > Clock): выполняет функцию синхронизатора, который обеспечивает одновременность подачи сигналов на входы триггеров.



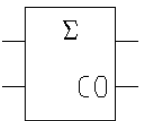
Универсальный J-K триггер.



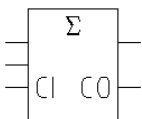
Универсальный J-K триггер с установочными входами.



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 генератор тактовых импульсов. Свободные входы соответствуют логическому "0".

Содержание отчета

- 1 Наименование и цель задания.
- 2 Рисунок стенда.
- 3 Таблицы истинности и схемы реализаций в различных базисах.
- 4 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 надежность.
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 счетчики.
9. Методы организации переноса в счетчиках.
10. Отличительные особенности двоичных и недвоичных счетчиков.
11. На какие классы делятся регистры?
12. Приведите примеры реализации регистров сдвига на основе различных триггеров.
13. Счетчики на основе регистров сдвига.

Лабораторная работа 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ГЕНЕРАТОРА ПЕРИОДИЧЕСКОГО СИГНАЛА

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. 6.1 [6].

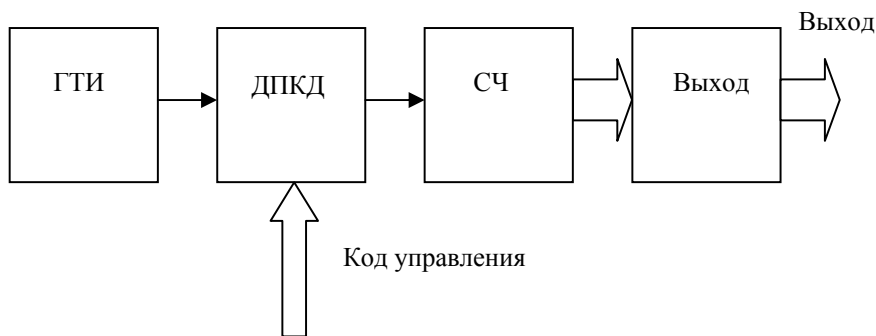


Рис. 6.1. Структурная схема цифрового генератора

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

В цифровых генераторах периодического сигнала при генерировании сигнала (например, синусоидального) требуется, чтобы выходной код счетчика СЧ нарастал до максимального значения, а затем уменьшался до нуля, снова нарастал и т.д. Для этого используется схема, приведенная на рис. 6.2 [6].

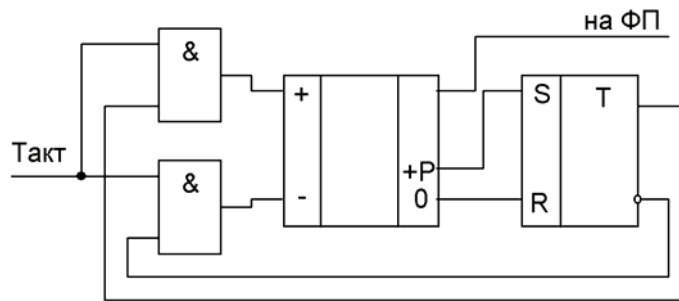


Рис. 6.2. Генератор периодического симметричного сигнала

Предположим, что открыт верхний по схеме элемент И, тактовые импульсы поступают на суммирующий (+) вход счетчика. Выходной код счетчика 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 счетчика и выходной код счетчика уменьшается. Когда он становится равным нулю, на нулевом выходе счетчика (0) появляется импульс, который по выводу 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 счетчика и т.д. Выходы переполнения и нуля имеются во многих микросхемах счетчиков, в частности, в КР555ИЕ7. Если таких выводов нет, необходимо устанавливать дешифраторы.

Описание лабораторного стенда

Схема опорного генератора приведена на рис. 6.3 [6]. Диапазон рабочих частот опорного генератора равен от 280 Гц до 790 кГц. Генератор выполнен на трех инверторах и одной времязадающей RC-цепи. Ее особенностью является использование резистора RC-цепи как для перезарядки конденсатора, так и для улучшения условий самовозбуждения схемы.

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 .

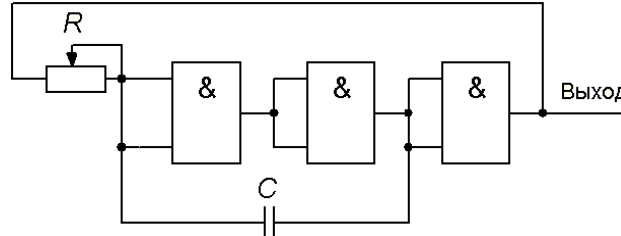


Рис. 6.3. Электрическая схема опорного генератора

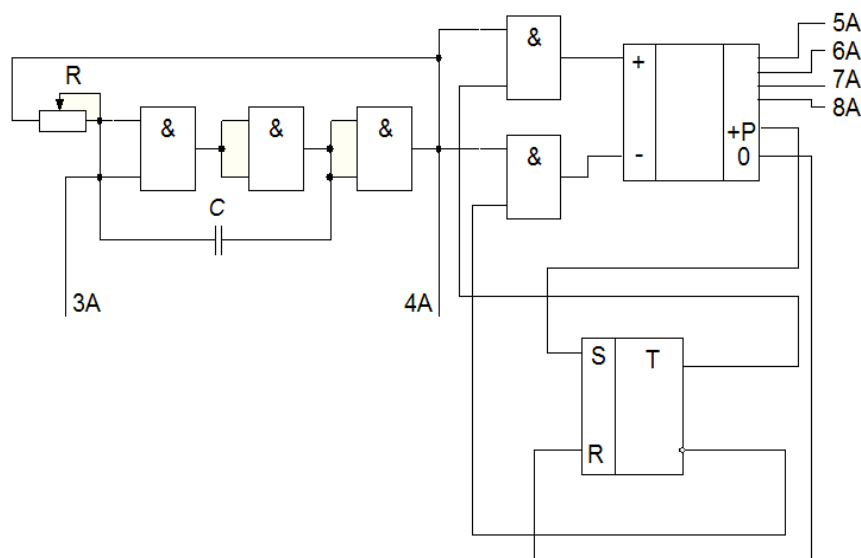


Рис. 6.4. Электрическая схема лабораторной установки:
2А – питание; 1А, 1Б – 8Б (на стенде) – общий

Электрическая схема лабораторной установки цифрового генератора периодического сигнала показана на рис. 6.4.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему для определения частотных диапазонов генераторов в соответствии с рис. 6.5.
2. Определить частотный диапазон опорного генератора и цифрового генератора периодического сигнала. Для этого, изменяя сопротивление переменного резистора $R1$ на стенде (рис. 6.4), контролировать частоту на выходе цифрового генератора периодического сигнала по частотомеру на выходах 5, 6, 7, 8. Полученные данные занести в табл. 6.1.
3. Зарисовать осциллограммы выходных сигналов для каждого выхода на одном графике, пример которых представлен на рис. 6.6.

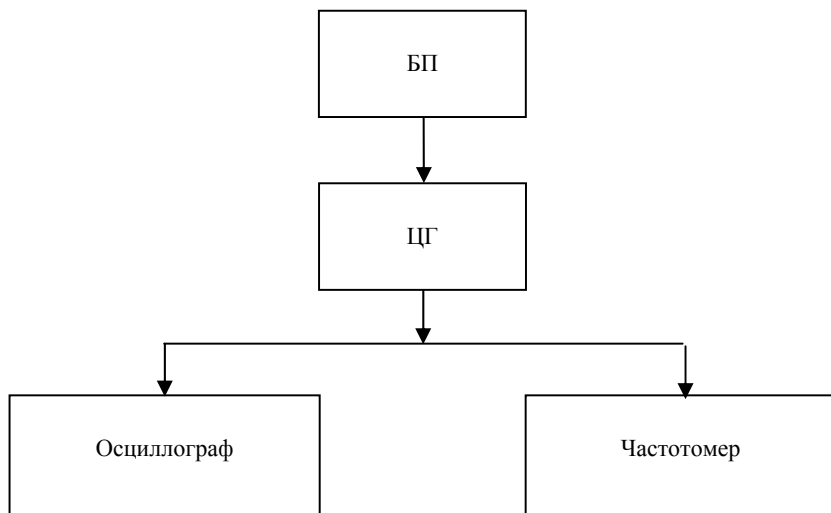


Рис. 6.5. Структурная схема определения параметров генераторов:

БП – блок питания (источник постоянного напряжения);

ЦГ – цифровой генератор; частотомер – Ф5041

Таблица 6.1

| | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------|--|--|--|--|--|--|--|
| Положение резистора $R1$, Ом | | | | | | | | |
| $F_{оп.ген}$, Гц | | | | | | | | |
| $F_{ц.г}$, Гц | вых. 5 | | | | | | | |
| | вых. 6 | | | | | | | |
| | вых. 7 | | | | | | | |
| | вых. 8 | | | | | | | |

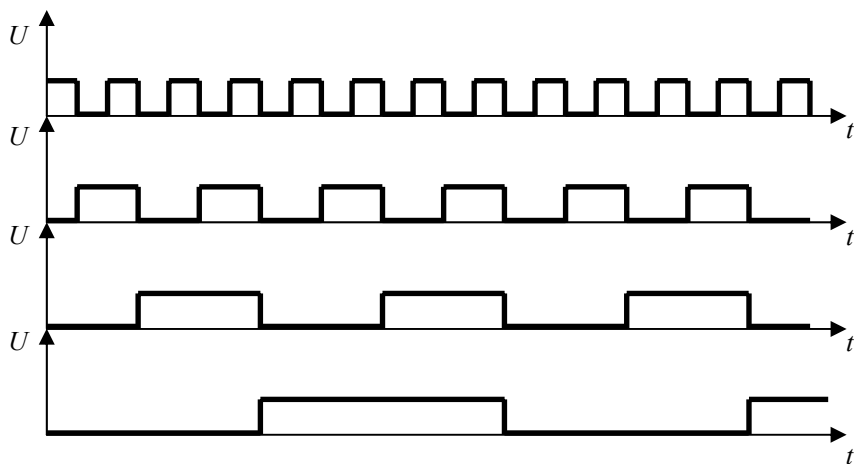


Рис. 6.6. Осциллограммы выходных сигналов цифрового генератора

Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. График зависимости частоты цифрового генератора периодического сигнала от частоты опорного генератора для каждого выхода цифрового генератора.
3. Осциллограммы выходных сигналов цифрового генератора.
4. Выводы.

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 чем назначение функционального преобразователя в схеме цифрового генератора?

Лабораторная работа 7

ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ДЕШИФРАТОРЕ

Цель работы: исследовать процесс преобразования цифровых кодов на примере функционального преобразователя, выполненного на дешифраторе

Краткие теоретические сведения

Функциональными преобразователями (ФП) называются устройства, которые преобразуют одну группу цифровых кодов в другую группу кодов, значения которых связаны с первой группой функциональной зависимостью. К ФП можно отнести устройства возведения в степень и извлечения корня, нахождения тригонометрических, логарифмических и других функций.

Описание лабораторного стенда

Рассмотрим принцип действия функционального преобразователя на дешифраторе. Входной код подается на управляющие входы дешифратора $DD1$ (рис. 7.1) [6].

Для пояснения схемы построим устройство возведения в квадрат для четырехразрядного входного кода (16 значений). Составим табл. 7.1, в которой приведены коды квадратов чисел.

Таблица 7.1

| X | Y | Двоичный код квадрата |
|-----|-----|-----------------------|
| 0 | 0 | 00000000 |
| 1 | 1 | 00000001 |
| 2 | 4 | 00000100 |
| 3 | 9 | 00001001 |
| 4 | 16 | 00010000 |
| 5 | 25 | 00011001 |
| 6 | 36 | 00100100 |
| 7 | 49 | 00110001 |
| 8 | 64 | 01000000 |
| 9 | 81 | 01010001 |
| 10 | 100 | 01100100 |
| 11 | 121 | 01111001 |
| 12 | 144 | 10010000 |
| 13 | 169 | 10101001 |
| 14 | 196 | 11000100 |
| 5 | 225 | 11100001 |

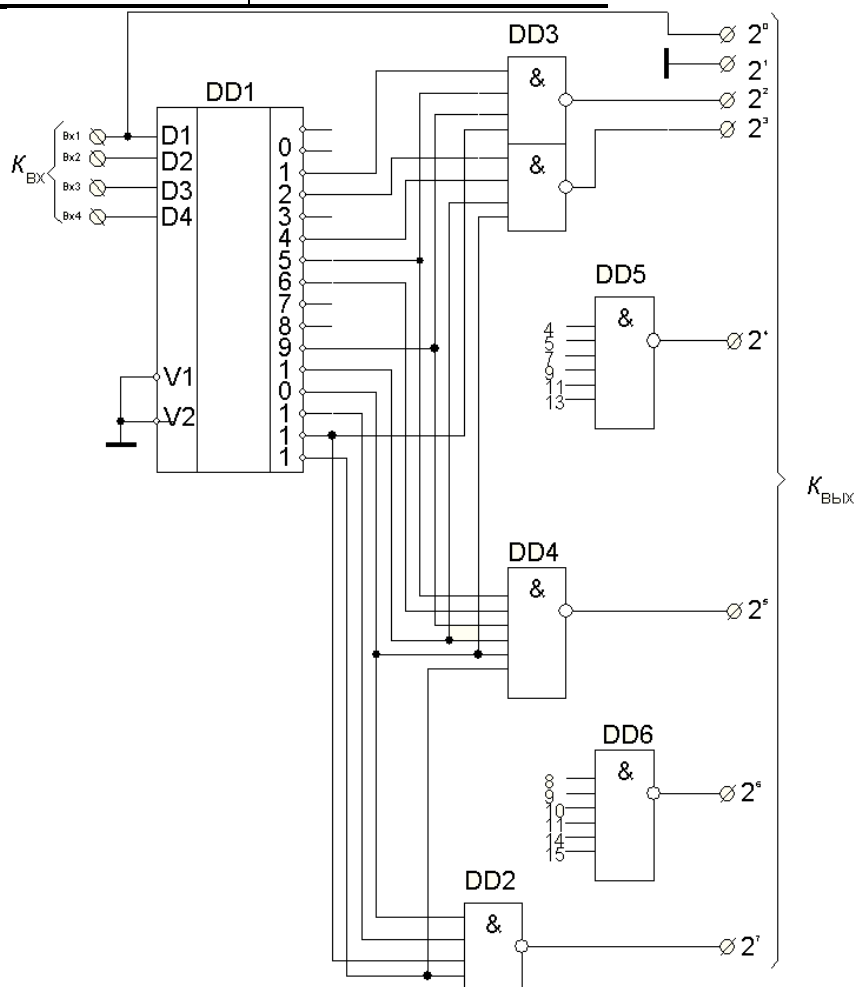


Рис. 7.1. Функциональный преобразователь на дешифраторе

Рассмотрим запись квадратов чисел в двоичном коде. Для каждого разряда выходного кода нужно объединить единицы, встречающиеся в вертикальных колонках. Например, для старшего 8-го разряда единицы есть в позиции от 12 до 15. Соответствующие входы дешифратора DD1 подключаются к микросхеме DD2, выход которой является выходом старшего разряда (2⁷). Для разряда 2⁵ единицы имеются для чисел 6, 7, 10, 13, 15, которые объединяются на микросхеме DD4 и т.д.

Следует обратить внимание на то, что поскольку выходы дешифратора *DD1* инверсные, то объединяющими элементами являются элементы И (для прямых выходов были бы элементы ИЛИ).

В описанных способах реализуется ступенчатое приближение к заданной функциональной зависимости. Более совершенным является кусочно-линейное приближение, показанное на рис. 7.2.

Функция задается набором начальных отсчетов $A_0, A_1, A_2...$ и коэффициентов наклона функции на различных участках $B_0, B_1, B_2...$ В этом случае нужны два ФП для коэффициентов.

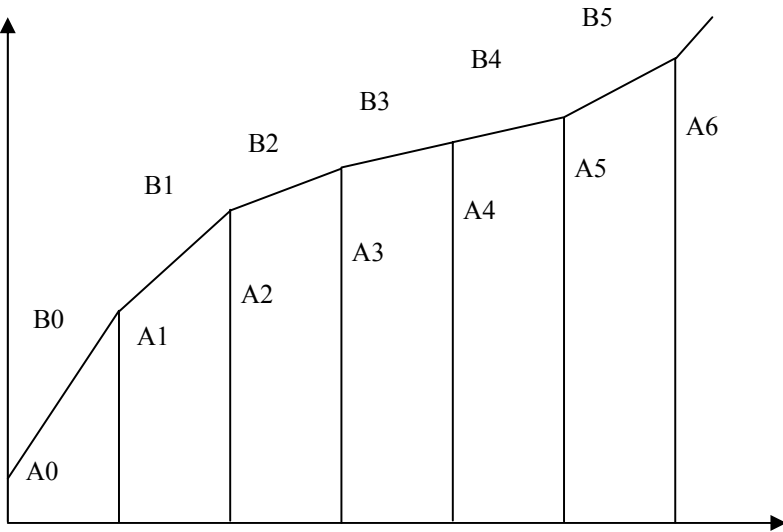


Рис. 7.2. Кусочно-линейное приближение функции

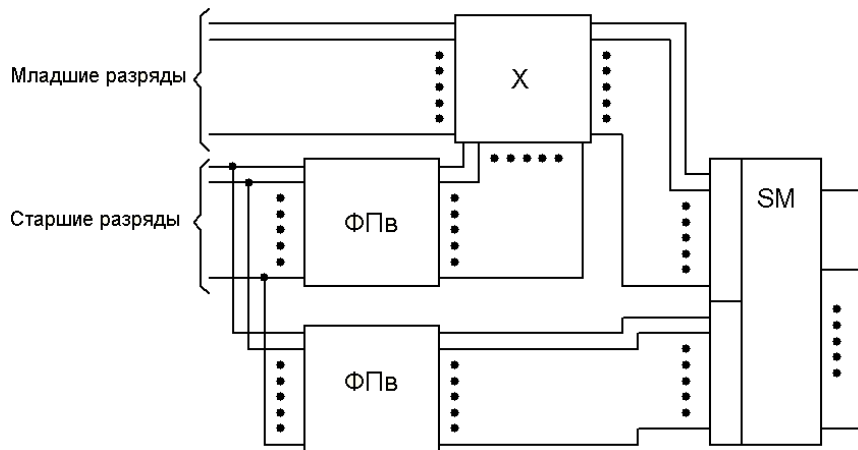


Рис. 7.3. Схематическое представление кусочного приближения

В качестве адресов для этих ФП используются старшие адреса аргумента, а младшие адреса подаются на умножитель, где умножаются на коэффициенты $B_0, B_1, B_2...$ С умножителя и ФП отсчетов $A_0, A_1, A_2...$ результаты суммируются (рис. 7.3). В такой схеме с помощью двух ФП, например, на 8 отсчетов каждый, можно построить ФП на 64 отсчета.

Порядок выполнения работы

1. Подключить питание к выводам 1А и 2А (2А – +5В, 1А – корпус).
2. Подключить выходы 1, 2, 4, 8 генератора, выполненного в лабораторном стенде "Цифровой генератор прямоугольных импульсов" к выводам 5Б, 6Б, 7Б и 8Б соответственно.
3. Установить резистор R на генераторе, выполненном в лабораторном стенде "Цифровой генератор прямоугольных импульсов", в положение 1. Измерить частоту на выходах 1, 2, 4, 8 генератора (выводы 5Б, 6Б, 7Б, 8Б); данные занести в табл. 7.2. Зарисовать эпюры этих сигналов с экрана осциллографа. Далее измерить частоту на выходах $2^0, 2^1, 2^2, 2^3, 2^4, 2^5, 2^6, 2^7$ (выводы 3А, 4А, 5А, 6А, 7А, 8А); занести данные в табл. 7.2 и зарисовать эпюры сигналов с экрана осциллографа.
4. Выполнить действия, описанные в п. 3 для всех положений резистора R генератора.
5. Снять экспериментальные данные и занести в табл. 7.2, где приведен пример заполнения.

| Вых. | D1 | D2 | D3 | D4 | 2 ⁰ | 2 ¹ | 2 ² | 2 ³ | 2 ⁴ | 2 ⁵ | 2 ⁶ | 2 ⁷ |
|------|-------|------|-----|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | F, Гц | | | | | | | | | | | |
| R1 | 3124 | 1552 | 778 | 389 | 3124 | 0 | 1173 | 768 | 1567 | 587 | 1337 | 392 |
| R2 | 893 | 452 | 204 | 114 | 893 | 0 | 397 | 380 | 509 | 170 | 397 | 113 |
| R3 | 489 | 246 | 123 | 72 | 489 | 0 | 257 | 311 | 247 | 93 | 216 | 62 |
| R4 | 350 | 175 | 88 | 45 | 350 | 0 | 263 | 309 | 220 | 79 | 138 | 45 |
| R5 | 252 | 126 | 82 | 40 | 252 | 0 | 157 | 191 | 157 | 72 | 134 | 64 |
| R6 | 206 | 103 | 67 | 35 | 206 | 0 | 104 | 122 | 117 | 66 | 154 | 53 |
| R7 | 182 | 92 | 51 | 28 | 182 | 0 | 94 | 125 | 115 | 52 | 150 | 85 |
| R8 | 184 | 91 | 46 | 20 | 184 | 0 | 113 | 130 | 103 | 49 | 118 | 69 |

На экране осциллографа показаны эпюры сигналов, которые подаются на функциональный преобразователь с выходов лабораторного стенда "Цифровой генератор прямоугольных импульсов" и сигналов на выходах функционального преобразователя, которые следует зарисовывать для отчета (рис. 7.4) [6].

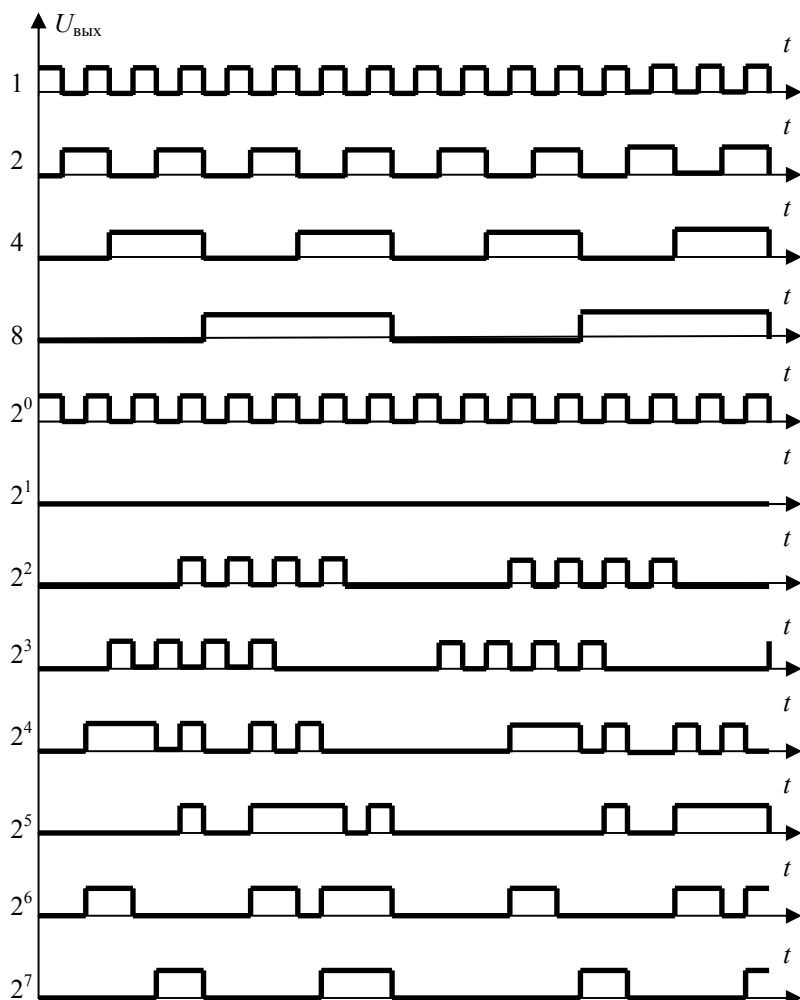


Рис. 7.4. Эпюры сигналов, которые подаются на функциональный преобразователь с выходов лабораторного стенда "Цифровой генератор прямоугольных импульсов" и сигналов на выходах функционального преобразователя
Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Таблица экспериментальных данных.
3. Эпюры сигналов, которые подаются на функциональный преобразователь с выходов лабораторного стенда "Цифровой генератор прямоугольных импульсов" и сигналов на выходах функционального преобразователя.
4. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие устройства называются функциональными преобразователями?
2. Какие устройства можно отнести к функциональным преобразователям?
3. В чем заключается принцип действия функционального преобразователя на дешифраторе?

Лабораторная работа 8

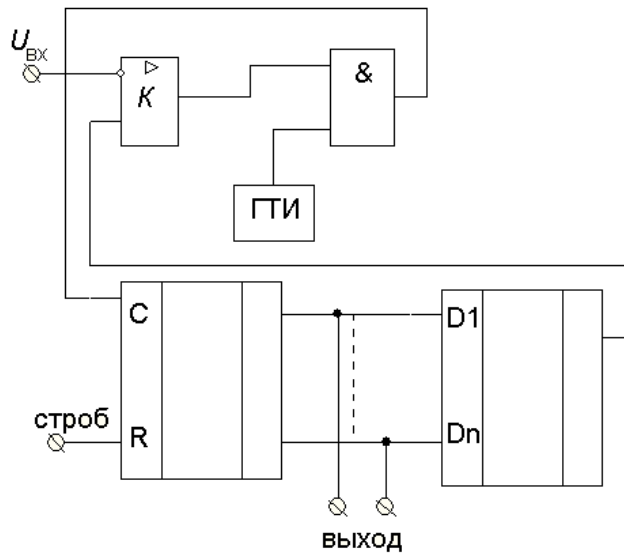
ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Цель работы: исследовать работу аналого-цифрового преобразователя.

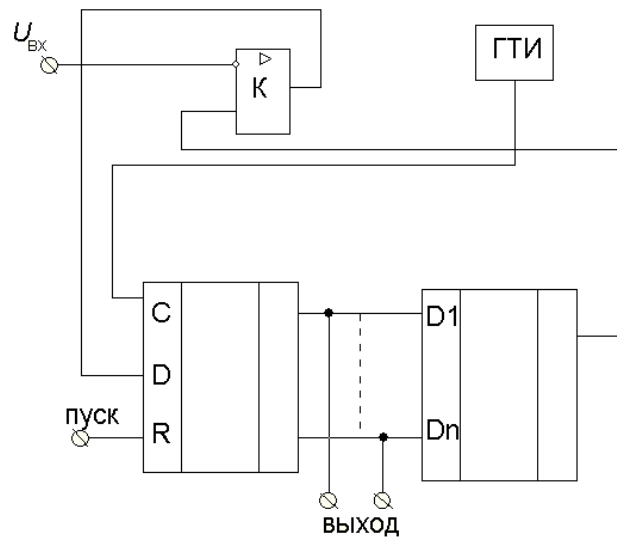
Краткие теоретические сведения

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

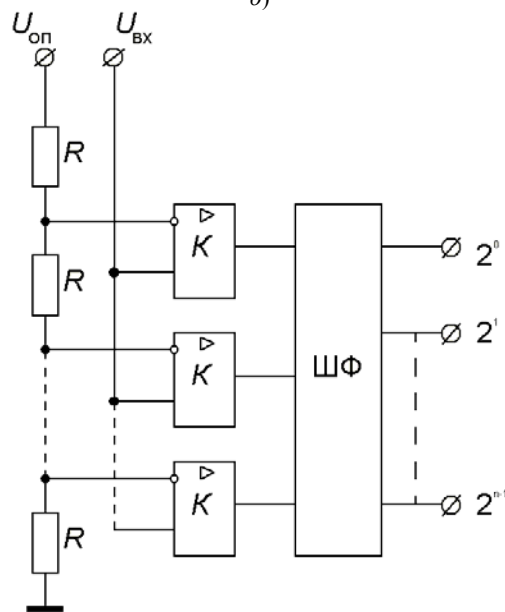
На рис. 8.1, а показана функциональная схема последовательного АЦП. На один вход компаратора K поступает преобразуемое напряжение $U_{вх}$, на второй – напряжение пилообразной развертки с выхода ЦАП [6]. В счетчике СТ2 при счете импульсов образуется линейно нарастающий код, который преобразуется с помощью ЦАП в линейно нарастающее (пилообразное) напряжение. В начале цикла преобразования счетчик устанавливают в нулевое состояние. Напряжение на выходе ЦАП равно нулю, при этом на выходе компаратора устанавливается напряжение логической 1. При подаче импульса разрешения "Строб" на счетчик, начинается счет импульсов генератора тактовых импульсов ГТИ, проходящих через открытый элемент И. При этом напряжение на выходе ЦАП линейно нарастает, пока не станет равным входному напряжению $U_{вх}$. В этот момент напряжение на выходе компаратора становится равным нулю, элемент И закрывается и счет импульсов в счетчике останавливается.



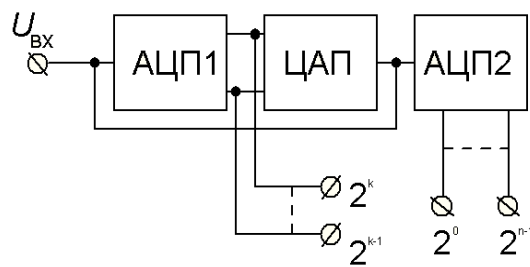
а)



б)



в)



г)

Рис. 8.1. Схемы АЦП:

а – последовательного; б – последовательного приближения;
в – параллельного; г – двухтактного

Число, установившееся на счетчике, пропорционально $U_{вх}$ и остается неизменным пока длится входной строб. После прекращения строба счетчик 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. 8.1, 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 $U_{вх}$, то включается логическая 1 на выходе следующего по счету разряда регистра, если больше, то "1" на выходе старшего разряда отменяется. Так методом проб перебираются все

разряды до самого младшего. На это требуется количество импульсов ГТИ всего в два раза больше, чем число разрядов. Самым быстродействующим является параллельный АЦП (рис. 8.1, 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. Недосток параллельного АЦП – аппаратурная 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. 8.1, 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 – четырехразрядные (по 16 компараторов), всего потребуется 32 компаратора, а если строить АЦП параллельного типа на восемь разрядов, то потребуется $2^8 = 256$ компараторов. Быстродействие такого АЦП несколько хуже (примерно в два 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 мк·с. 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

Параллельный АЦП может быть построен по схеме, приведенной на рис. 8.2. Входное напряжение, которое может изменяться в диапазоне от нуля до напряжения источника питания U_n , представляется на выходах преобразователя в параллельном дополнительном двоичном коде [6].

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 удовлетворяют большинство современных ОУ, инвертирующие входы которых подключены к потенциалу $U_n/2$.

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

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему измерений согласно рис. 8.3.
2. Подать напряжение питания с БП 1 (+9 В).
3. Включить БП 2. 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 БП 2 в положение "0" В. Изменяя напряжение от 0 до +9 В с шагом 1 вольт, контролировать с помощью осциллографа значение кода на выходе (клеммы 4А – 7А). Данные занести в табл. 8.1.

Примечание: при контроле сигнала осциллографа на одном из разрядов, светодиод этого разряда гаснет (в случае наличия на нем логической 1).

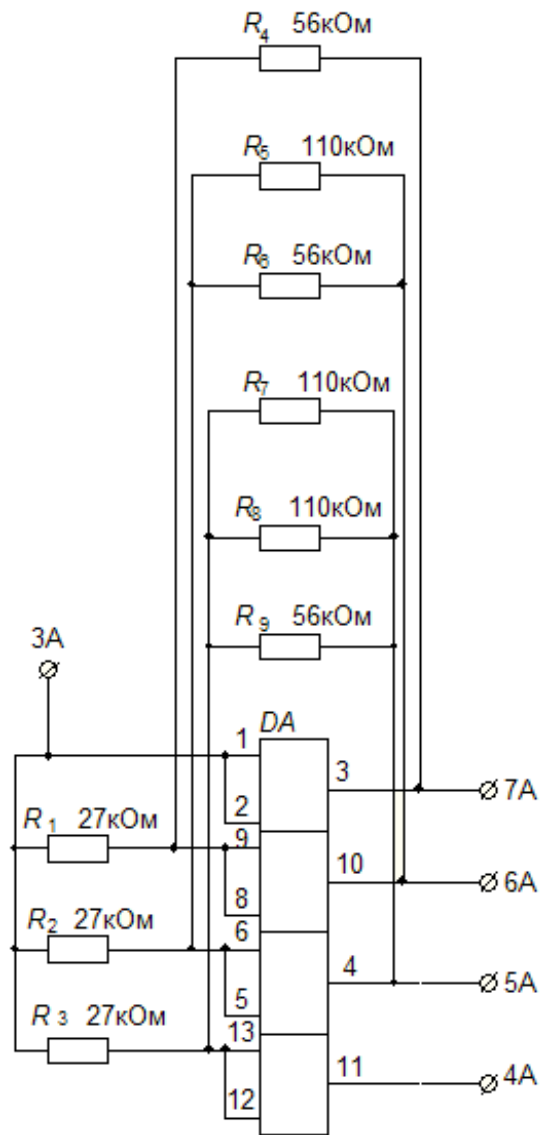


Рис. 8.2. Схема параллельного АЦП:
 1А, 1Б-8Б – общий; 2А – +9 В; 3А – 0...9 В

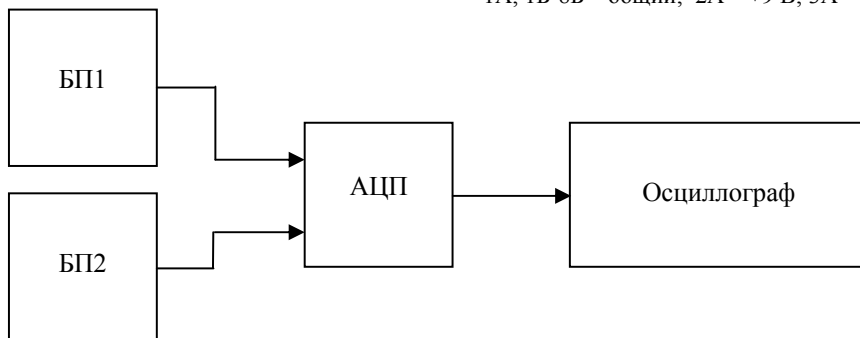


Рис. 8.3. Структурная схема измерений:
 БП 1, БП 2 – источники питания;
 АЦП – аналого-цифровой преобразователь; осциллограф

Таблица 8.1

| $U_{\text{вх}}, \text{В}$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2^0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 2^1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 2^2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2^3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Содержание отчета

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

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 чем заключается недостаток АЦП параллельного действия?

Лабораторная работа 9

ИЗУЧЕНИЕ ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

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 [6].

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 рис. 9.1 показаны две наиболее распространенные схемы суммирования токов: параллельная (рис. 9.1, а) и последовательная (рис. 9.1, б). В схеме (рис. 9.1, а) ключи $S_1 \dots S_n$ открываются, если соответствующий разряд кода равен логической 1, при этом опорное напряжение $U_{\text{оп}}$ подается на соответствующий резистор. Сопротивления резисторов от старших разрядов к младшим прогрессивно увеличиваются в два раза [6].

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

В схеме (рис. 9.1, б) ключи $S_1 \dots S_n$ имеют более сложную структуру. При логической 1 на входе какого-либо разряда соответствующий резистор подключен к напряжению $U_{\text{оп}}$, 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 [6].

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

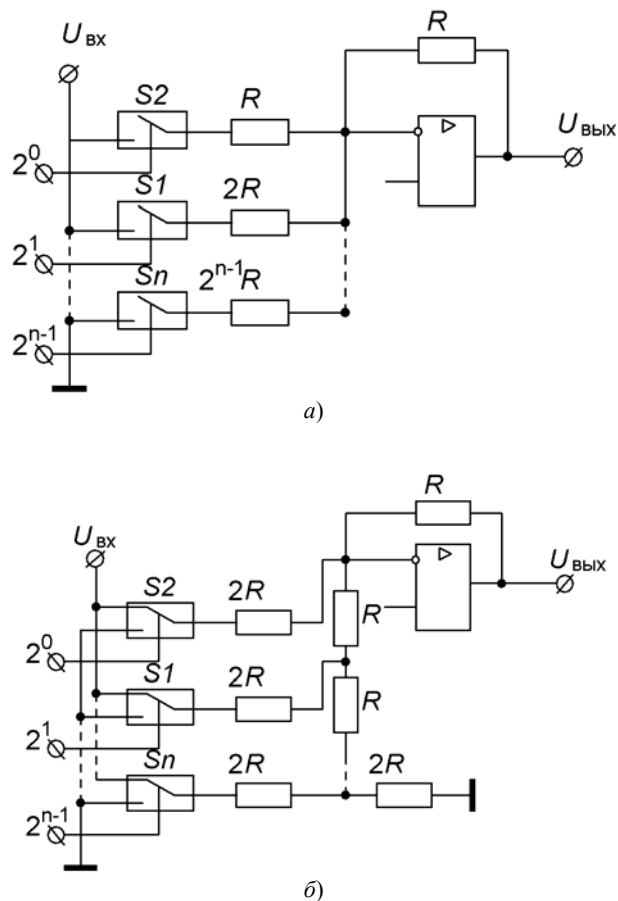


Рис. 9.1. Схемы суммирования токов:
a – параллельная; *б* – последовательная

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 (приведенной на рис. 9.2 или лабораторном стенде).
2. Подключить питание к выводам 1А, 2А и 3А (2А – +12В, 3А – –12В, 1А – 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 – S_4 , поочередно задать двоичные коды от 0 до 16, и фиксируя при этом показание вольтметра.

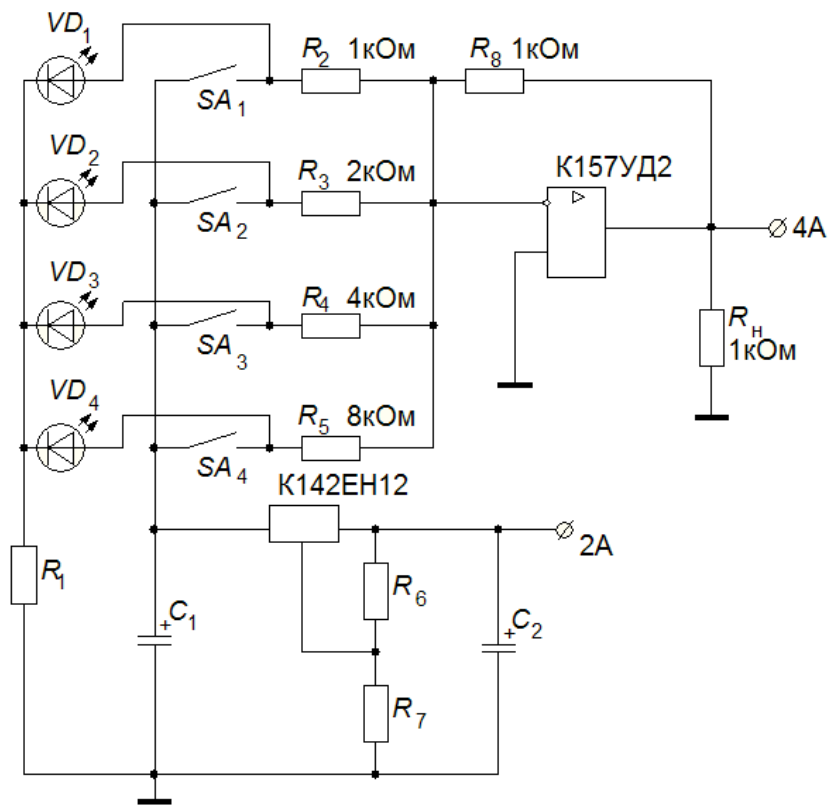


Рис. 9.2. Принципиальная схема ЦАП:
 1А, 1Б-8Б – общий; 2А – $+U_{пит}$ (+12 В); 3А – $-U_{пит}$ (-12 В); 4А – выход

Таблица 9.1

| Десятичное число | Двоичный код | Экспериментальные данные $U_{вых}$, В (пример заполнения) |
|------------------|--------------|--|
| 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 |

5. Полученные данные занести в табл. 9.1 экспериментальных данных и построить зависимость выходного напряжения от цифрового кода.

6. Сделать вывод.

Пример построения графика зависимости выходного напряжения от набираемого цифрового кода показан на рис. 9.3.

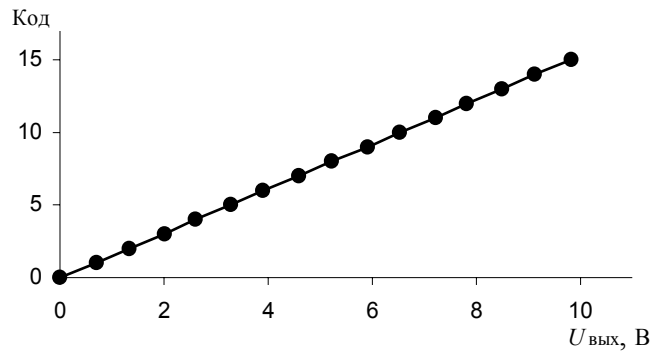


Рис. 9.3. Зависимость $U_{\text{вых}}$ от цифрового кода
Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Таблица экспериментальных данных.
3. График зависимости выходного напряжения от цифрового кода.
4. Выводы.

Контрольные вопросы

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение лабораторного практикума и выполнение лабораторных работ по исследованию аналоговых, импульсных и цифровых устройств позволит студентам приобрести теоретические и практические знания и навыки и применить их при проектировании радиоэлектронных средств.

Практическая реализация полученных знаний при освоении дисциплины "Схемотехника электронных средств" в лабораторных работах при определении передаточных характеристик усилителя мощности, устройств на операционных усилителях, при исследовании амплитудно-частотных характеристик активного RC -фильтра и усилительных каскадов на ОУ, а также изучение принципов действия цифрового генератора, функционального преобразователя и аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователей способствуют применению приобретенных знаний при анализе и синтезе радиоэлектронных средств, развитию творческого потенциала на пути усовершенствования и создания новых электронных приборов и устройств.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| Лабораторная работа 1. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ ELECTRONICS WORKBENCH В ИССЛЕДОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ | 4 |
| Лабораторная работа 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ | 20 |
| Лабораторная работа 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ | 26 |
| Лабораторная работа 4. ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОГО RC-ФИЛЬТРА НА АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ | 37 |
| Лабораторная работа 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ | 44 |
| Лабораторная работа 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ГЕНЕРАТОРА ПЕРИОДИЧЕСКОГО СИГНАЛА | 55 |
| Лабораторная работа 7. ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ДЕШИФРАТОРЕ | 59 |
| Лабораторная работа 8. ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ | 65 |
| Лабораторная работа 9. ИЗУЧЕНИЕ ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ | 72 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 76 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 77 |