

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# СХЕМОТЕХНИКА

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов специальности 6-05-0612-03 «Системы управления  
информацией» очной и заочной форм обучения*



Могилев 2024

УДК 621.3  
ББК 31.2:32.85  
С45

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «7» марта 2024 г.,  
протокол № 8

Составитель канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

Рецензент канд. техн. наук Н. В. Герасименко

Методические рекомендации предназначены для использования студентами специальности 6-05-0612-03 «Системы управления информацией» дневной и заочной форм обучения при выполнении лабораторных работ.

Учебное издание

СХЕМОТЕХНИКА

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2024

## Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Исследование схем усилителей на основе биполярных и полевых транзисторов .....	4
2 Лабораторная работа № 2. Исследование схем на основе операционных усилителей.....	11
3 Лабораторная работа № 3. Исследование схем генератора гармонических колебаний и мультивибратора .....	15
4 Лабораторная работа № 4. Исследование схем неуправляемых и управляемых выпрямителей .....	20
5 Лабораторная работа № 5. Исследование работы логических элементов и триггеров .....	28
6 Лабораторная работа № 6. Исследование работы регистров, счетчиков, дешифраторов и полупроводниковых индикаторов .....	34
7 Лабораторная работа № 7. Исследование цифроаналоговых и аналого-цифровых преобразователей .....	39
8 Лабораторная работа № 8. Исследование работы цифрового устройства на микроконтроллере .....	43
Список литературы.....	46
Приложение А. Числовой ряд сопротивлений резисторов и конденсаторов.....	47
Приложение Б.....	47
Приложение В.....	47
Приложение Г.....	48
Приложение Д.....	48

# 1 Лабораторная работа № 1. Исследование схем усилителей на основе биполярных и полевых транзисторов

**Цель работы:** изучение принципа работы, методик расчёта, параметров и характеристик усилителей на основе биполярных и полевых транзисторов.

## 1.1 Общие теоретические сведения

Одним из наиболее часто используемых усилителей на биполярных транзисторах является усилитель с *общим эмиттером* (ОЭ). В этом усилителе эмиттер – общий электрод для входной и выходной цепей (рисунок 1.1). Входное напряжение  $u_{вх}$  от источника сигнала  $E_c$  с внутренним сопротивлением  $R_c$  подаётся на усиливаемый каскад на биполярном транзисторе  $VT$  через разделяющий конденсатор  $C_{p1}$ , предотвращающий прохождение постоянной составляющей от источника сигнала. Усиленное выходное напряжение  $u_{вых}$  подаётся на нагрузку  $R_n$  через разделительный конденсатор  $C_{p2}$ . Таким образом, рассматриваемый усилитель предназначен для усиления только переменного напряжения. Резистор  $R_э$  представляет собой цепь отрицательной обратной связи для термостабилизации рабочей точки. Чтобы обратная связь действовала только по постоянному току, резистор  $R_э$  шунтируют конденсатором  $C_э$  большой ёмкости (десятки микрофард), что исключает ослабление усиливаемого переменного сигнала цепью обратной связи.

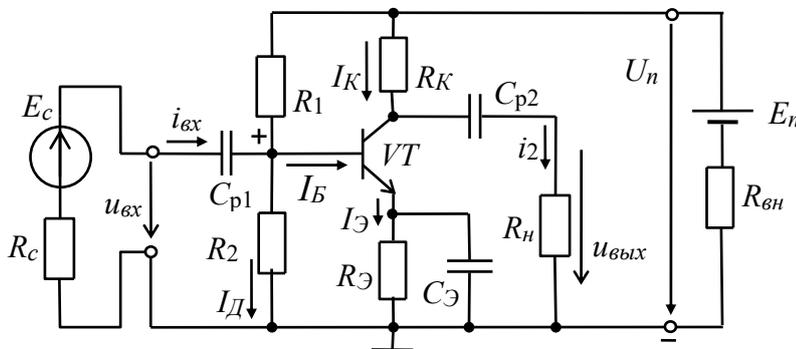


Рисунок 1.1 – Схема усилителя с общим эмиттером

Для питания усилителя используется источник постоянного напряжения с ЭДС  $E_n$  (обычно напряжение  $U_n = 5 \dots 50$  В) с внутренним сопротивлением  $R_{вн}$  (которым часто пренебрегают).

Рассматриваемый усилитель работает в классе А, т. е. обе полуволны входного напряжения усиливаются одним транзистором, для чего транзистор нужно сместить по напряжению или току. Смещение транзистора задается делителем  $R_1, R_2$  так, чтобы рабочая точка А (или точка покоя) располагалась на середине линейного участка входной характеристики. Входной переменный сигнал накладывается на напряжение смещения.

**Методика расчёта усилительного каскада на биполярном транзисторе.** Требуется рассчитать и промоделировать работу усилительного каскада на

биполярном транзисторе BC847B с максимальным током коллектора  $I_{k\max} = 100$  мА, напряжением питания  $E_n = 14$  В, рабочим диапазоном частот  $\Delta f = 20 \dots 2000$  Гц,  $h_{21э} = 200$ .

Приблизительно токи покоя коллектора и эмиттера в рабочей точке А рассчитывают по формуле

$$I_{K0} \approx 0,5 I_{K\max} = 0,5 \cdot 100 = 50 \text{ мА}.$$

Откуда найдем  $R_K$ :

$$R_K = E_n / I_{K\max} = 14 / 0,1 = 140 \text{ Ом}.$$

Выбираем ближайшее значение из ряда E24:  $R_K = 150$  Ом.

Далее

$$I_{Э0} = I_{K0} + I_{B0} \approx I_{B0}(1 + h_{21э}).$$

Поскольку  $I_{K0} \gg I_{B0}$ ,

$$I_{Э0} \approx I_{K0} = 50 \text{ мА};$$

$$I_{B0} \approx I_{K0} / h_{21э} = 0,25 \text{ мА}.$$

Сопротивления  $R_э$  выбирают так, чтобы напряжение покоя эмиттера составляло 10 %...20 % от напряжения питания, т. е.

$$U_{Э0} \approx U_n / 2 - U_{KЭ0} \approx (0,1 \dots 0,2) E_n = 0,1 \cdot 14 = 1,4 \text{ В}.$$

Найдем отсюда  $R_э$ :

$$R_э = U_{Э0} / I_{Э0} = 0,1 \cdot 14 / 50 \cdot 10^{-3} \approx 28 \text{ Ом}.$$

Выбираем  $R_э = 27$  Ом.

Ёмкость  $C_э$  выбирают из условия  $X_{C_э} \ll R_э$ . Будем считать  $X_{C_э} = 0,1 R_э$ . Тогда  $C_э = 10 / (2\pi f_n R_э)$ , где  $f_n$  – минимальная частота входного напряжения  $u_{вх}$ . По условию  $f_n = 20$  Гц, тогда  $C_э = 3000$  мкФ.

Сопротивление резистора рассчитывают по формуле

$$R_2 \approx \frac{U_{Э0} + U_{БЭ0}}{I_D}.$$

Как следует из входной характеристики,  $U_{БЭ0} \approx 0,65$  В – для кремниевых транзисторов;  $U_{БЭ0} \approx 0,3$  В – для германиевых.  $I_D$  – ток делителя напряжения.  $I_D = (3 \dots 10) I_{B0}$ . Полагая, что  $I_D = 5 I_{B0}$ , получим  $R_2 = 1,6$  кОм.

Сопротивление резистора  $R_1$  рассчитывают по формуле

$$R_1 \approx \frac{E_n - U_{Э0} - U_{БЭ0}}{I_D + I_{B0}} = 8 \text{ кОм}.$$

Выбираем  $R_1 = 8,2$  кОм.

В режиме работы усилителя по *переменному току* принимают

$$u_3 = (1/\omega_c C) i_3 \approx 0 \quad (X_C \leq 0,1R_3).$$

Пренебрегают также внутренним сопротивлением  $R_{вн}$  и ёмкостью  $C_n$  источника питания.

При подаче на вход усилителя *переменного напряжения*  $u_{вх}$  происходит изменение тока базы  $i_B$ , тока коллектора  $i_K$  и напряжения на коллекторе  $u_K = U_n - R_K i_K$ . Амплитуда переменного коллекторного тока  $I_{mK}$  примерно в  $h_{21}$  раз больше амплитуды тока базы  $I_{mB}$ , а амплитуда коллекторного напряжения  $U_{mK}$  во много раз больше амплитуды входного напряжения. Таким образом, в схеме усилителя с ОЭ усиливается ток и напряжение входного сигнала.

Входное сопротивление и коэффициенты усиления каскада:

$$R_{вх} = \frac{U_{mB}}{I_{mB}}; \quad K_i = \frac{I_{mK}}{I_{mB}}; \quad K_u = \frac{U_{mK}}{U_{mB}}; \quad K_p = K_i K_u.$$

При этом положительному полупериоду входного напряжения  $u_{вх}$  соответствует отрицательный полупериод выходного напряжения  $u_K \approx u_{вых}$ . Иначе говоря, между входным и выходным напряжениями существует сдвиг фаз, равный  $180^\circ$ , т. е. схема усилителя с ОЭ является инвертирующим устройством, усиливающим и изменяющим фазу входного напряжения на  $180^\circ$ .

Разделительные конденсаторы рассчитывают по формуле

$$C_p \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot R},$$

где  $R$  – входное и выходное сопротивления усилительного каскада для  $C_{p1}$  и  $C_{p2}$  соответственно.

Входное сопротивление усилительного каскада на биполярном транзисторе с ОЭ обычно имеет значение порядка нескольких сотен ом. Выходное сопротивление обычно в несколько раз меньше входного. Полагая  $R_{вх} = 1000$  Ом, а  $R_{вых} = 100$  Ом, получим  $C_{p1} = 8,2$  мкФ,  $C_{p2} = 82$  мкФ (с учетом ряда Е24).

Реальный коэффициент усиления по напряжению  $K_u$  всегда меньше коэффициента усиления ненагруженного усилителя ( $R_n \gg R_K$ ). Это различие тем заметнее, чем больше выходное сопротивление усилителя и меньше сопротивление нагрузки  $R_n$ . На практике реальный коэффициент усиления каскада  $K_u$  может достигать нескольких сотен, а коэффициент усиления по мощности  $K_p = K_u K_i$  в схеме с ОЭ – нескольких тысяч.

Рассчитанные значения вносим в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты расчета усилителя на биполярном транзисторе

$R_K$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_1$ , кОм	$R_2$ , кОм	$C_3$ , мкФ	$C_{p1}$ , мкФ	$C_{p2}$ , мкФ
150	27	8,2	1,6	3000	8,2	82

**Методика расчёта усилительного каскада на полевом транзисторе.**

Транзистор 2N3972 имеет канал  $n$ -типа и работает при  $U_C > 0$  и  $U_{ЗИ} \leq 0$ . Такой режим может быть обеспечен одним источником питания с применением так называемого «автоматического смещения». Схема имеет вид, показанный на рисунке 1.2.

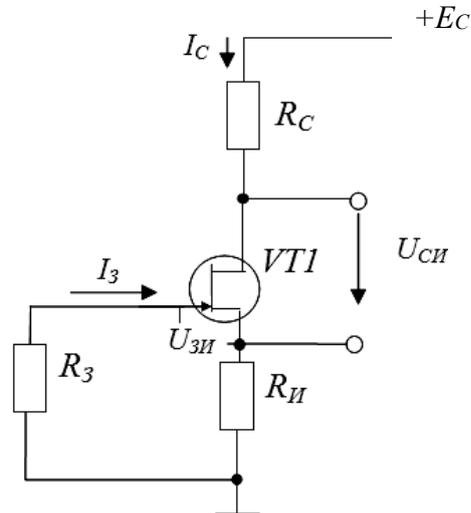


Рисунок 1.2 – Схема включения полевого транзистора с ОИ

Параметры транзистора 2N3972:

- максимальное напряжение сток-исток  $U_{СИ\max} = -40$  В;
- напряжение отсечки  $U_{отс} = -0,5$  В;
- максимальный ток стока  $I_{C\max} = 30$  мА.

Аналитическая зависимость  $I_C = f(U_{ЗИ})$  при  $U_{СИ} = \text{const}$  имеет вид:

$$I_C = I_{C\max} (1 - |U_{ЗИ}| / |U_{отс}|)^2.$$

Откуда

$$U_{ЗИ} = U_{отс} (1 - \sqrt{I_C / I_{C\max}}).$$

Пусть ток стока в рабочей точке вдвое меньше максимального тока  $I_{C\max}$ , т. е.  $I_C = 30/2 = 15$  мА. Тогда

$$U_{ЗИ} = -0,5 \left[ 1 - \sqrt{15 \cdot 10^{-3} / (30 \cdot 10^{-3})} \right] = -0,15 \text{ В.}$$

Найдем сопротивление автоматического смещения. Так как  $I_3 \ll I_C$ , напряжение затвор-исток равно падению напряжения на  $R_{И}$ , поэтому

$$R_{И} = |U_{ЗИ}| / I_C = 0,15 / (15 \cdot 10^{-3}) = 10 \text{ Ом.}$$

Ближайший номинал из стандартного ряда E24 (приложение А) равен 10 Ом. Сопротивление резистора  $R_3$  выбираем из условия

$$I_3 R_3 = 0,01 U_{ЗИ}, \text{ приняв } I_3 = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ А.}$$

Отсюда получаем

$$R_3 = 0,01 U_{3И} / I_3 = 0,01 \cdot 0,15 / 1,5 \cdot 10^{-8} = 100 \text{ кОм.}$$

Выбираем из ряда номиналов резистор с сопротивлением 100 кОм.

Сопротивление резистора  $R_C$  находим из уравнения токов и напряжений в схеме:

$$E_c = I_c (R_{И} + R_c) + U_{сИ}.$$

Считаем, что усилитель работает в режиме класса А, и принимаем

$$U_{сИ} \approx E_c / 2 = 10 \text{ В.}$$

Решаем уравнение относительно  $R_C$ :

$$R_c = \frac{E_c - U_{сИ} - I_c R_{И}}{I_c} = \frac{20 - 10 - 75 \cdot 10^{-3} \cdot 10}{15 \cdot 10^{-3}} = 657 \text{ кОм.}$$

Выбираем ближайший из ряда E24 номинал  $R_C = 680 \text{ кОм.}$

## 1.2 Порядок выполнения работы

1.2.1 Рассчитать усилитель на основе биполярного транзистора с исходными данными, заданными преподавателем: тип транзистора,  $E_n$ ,  $f_n$ ,  $f_v$ . Параметры транзисторов взять из таблицы Б.1. Заполнить таблицу 1.1.

1.2.2 Выполнить моделирование усилителя по постоянному току с рассчитанными параметрами согласно рисунку 1.3. По результатам моделирования заполнить таблицу 1.2.

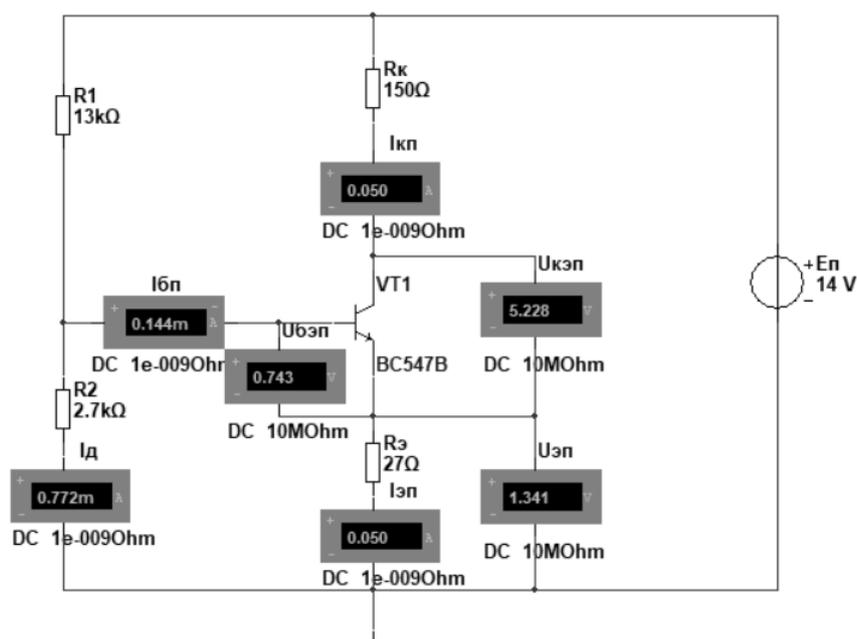


Рисунок 1.3 – Модель усилителя по постоянному току

Таблица 1.2 – Параметры усилителя по постоянному току

$E_n$ , В	$U_{кн}$ , В	$U_{БЭ}$ , В	$I_{кн}$ , мА	$I_{эн}$ , мА	$I_{ón}$ , мА
14	5,228	0,743	50	50	0,144

1.2.3 Выполнить моделирование усилителя по переменному току с рассчитанными параметрами согласно рисунку 1.4. По результатам моделирования заполнить таблицу 1.3.

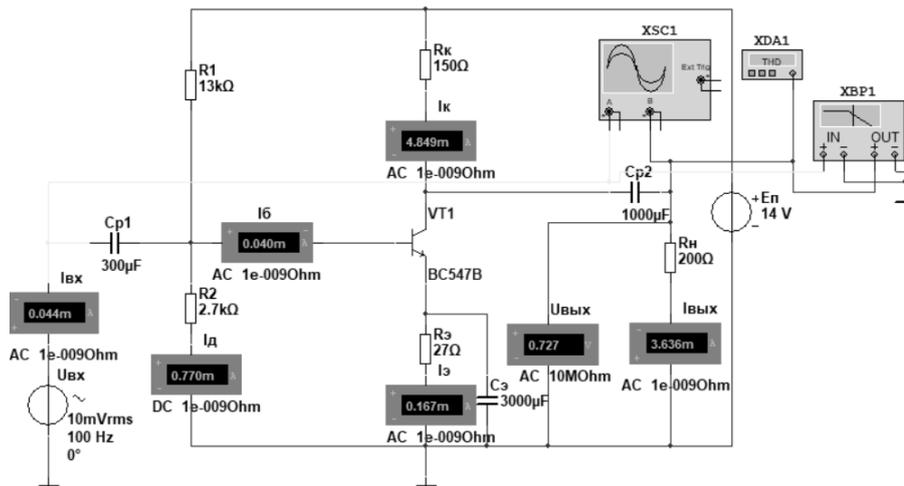


Рисунок 1.4 – Модель усилителя по переменному току

Таблица 1.3 – Параметры усилителя по переменному току

$U_{вх}$ , мВ	$U_{вых}$ , мВ	$K_U$	$I_{вх}$ , мА	$I_{вых}$ , мА	$K_I$	$R_{вх}$ , Ом	$THD$	$M_H$
Моделирование								
5	549	110	0,02	3,7	185	250		
Эксперимент								

1.2.4 Вычислить коэффициент нелинейных искажений  $THD$  и коэффициенты частотных искажений, определяемых по показаниям плоттера.  $M_H = K_U(f_n) / K_U(f_{cp})$ , где  $K_U(f_n)$  – коэффициент усиления на нижней граничной частоте;  $K_U(f_{cp})$  – коэффициент усиления на средних частотах. Заполнить таблицу 1.3.

1.2.5 Собрать на макетной плате усилитель на выбранных в результате расчётов элементах (см. рисунок 1.4). Для питания усилителя подключить источник постоянного напряжения  $E_n$ , входной сигнал  $U_{вх}$  подать от генератора гармонических колебаний. Измерить значения входных и выходных напряжений и токов. Данные занести в таблицу 1.3 с пометкой «эксперимент».

1.2.6 Выполнить расчёт и выбор элементов схемы включения заданного полевого транзистора с управляющим  $p-n$ -переходом с общим истоком (ОИ) по постоянному току при работе в режиме класса А при напряжении источника питания  $E_c$  и  $I_c = 0,5I_{cmax}$ . Исходные данные (тип транзистора,  $E_c$ ) определяет преподаватель. Параметры транзистора приведены в таблице В.1. По аналити-

ческим зависимостям определить сопротивление автоматического смещения  $R_{II}$ , сопротивление в цепи стока  $R_C$  и цепи затвора  $R_3$ .

1.2.7 Осуществить моделирование работы схемы включения полевого транзистора по постоянному току в среде Multisim (рисунок 1.5). Сравнить результаты моделирования:  $I_3$ ,  $U_{3u}$ ,  $I_c$ ,  $U_{cu}$  с результатами расчётов.

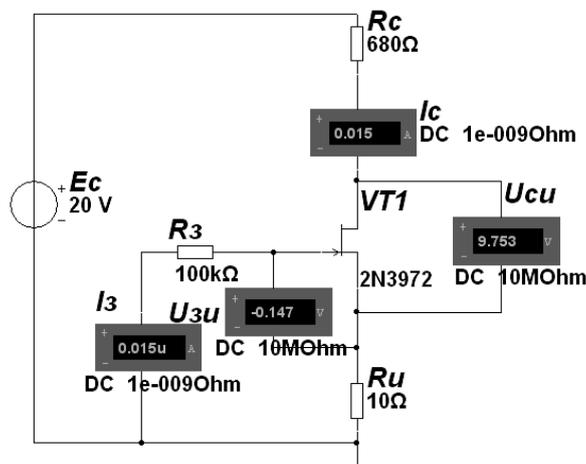


Рисунок 1.5 – Модель схемы включения полевого транзистора для обеспечения заданного выходного напряжения

1.2.8 Произвести расчёт разделительных конденсаторов  $C_{p1}$  и  $C_{p2}$ . Входное напряжение принять  $U_{вх} = 0,01E_c$ , сопротивление нагрузки  $R_n = 10$  кОм, минимальная частота входного напряжения  $f_{\min} = 100$  Гц. Входное сопротивление усилительного каскада на полевом транзисторе с управляющим  $p-n$ -переходом обычно имеет значение порядка нескольких сотен килоом. Полагая  $R_{вх} = 100$  кОм, а  $R_{вых} = 10$  кОм, получим  $C_{p1} = 0,016$  мкФ,  $C_{p2} = 0,16$  мкФ (с учетом ряда E24).

1.2.9 Осуществить моделирование работы усилителя в среде Multisim (рисунок 1.6).

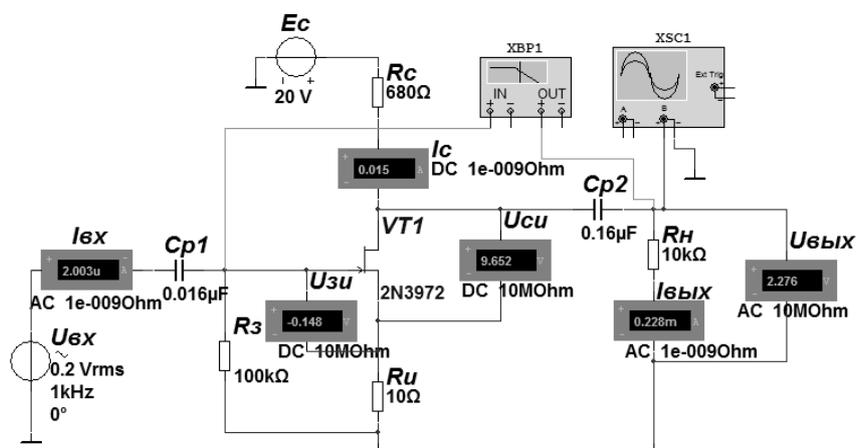


Рисунок 1.6 – Модель усилителя переменного напряжения на полевом транзисторе

1.2.10 Определить коэффициенты усиления по напряжению  $K_U$ , по току  $K_I$ , входное сопротивление  $R_{вх}$ . Заполнить таблицу 1.3.

1.2.11 Собрать на макетной плате усилитель на выбранных в результате расчётов элементах (см. рисунок 1.6). Для питания усилителя подключить источник постоянного напряжения  $E_C$ , входной сигнал  $U_{вх}$  подать от генератора гармонических колебаний. Измерить значения входных и выходных напряжений и токов. Данные занести в таблицу 1.3 с пометкой «эксперимент».

### **1.3 Содержание отчёта**

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, исходные данные, схему усилителя на биполярном и полевом транзисторах, расчёты, результаты моделирования работы схем в среде Multisim, осциллограммы входного и выходного сигналов, таблицы с результатами расчётов, моделирования и эксперимента, выводы по работе.

#### **Контрольные вопросы**

- 1 Приведите схему и опишите назначение элементов усилителя на биполярном транзисторе с общим эмиттером.
- 2 Опишите методику расчёта усилительного каскада на биполярном транзисторе.
- 3 Приведите схему и опишите назначение элементов усилителя с общим истоком.
- 4 Опишите методику расчёта усилительного каскада на полевом транзисторе.

## **2 Лабораторная работа № 2. Исследование схем на основе операционных усилителей**

**Цель работы:** изучение принципа работы, методик расчёта, характеристик устройств на базе операционных усилителей.

### **2.1 Общие теоретические сведения**

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель постоянного тока с дифференциальным входом, предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми и импульсными величинами.

На основе ОУ строят усилительные схемы, а также устройства для выполнения различных математических операций: *инвертирующий усилитель*; *неинвертирующий усилитель*; *операционный повторитель*, выходной сигнал которого практически равен входному; *интегратор*, выходной сигнал которого пропорционален интегралу по времени от его входного сигнала; *дифференциатор*, выходной сигнал которого пропорционален производной от его входного сигнала.

ла; сумматор, выходное напряжение которого равно инвертированной сумме входных напряжений, и др.

**Пример расчёта схемы инвертирующего усилителя на основе операционного усилителя.**

Исходные данные: операционный усилитель КР140УД11; коэффициент усиления  $K_U = 20$ ; минимальное входное сопротивление  $U_{ex \min} = 10$  мВ.

Необходимо осуществить расчёт и выбор из стандартного ряда сопротивлений усилителя. Определить максимальное входное напряжение синусоидального сигнала  $U_{ex \max}$ , при котором не будет значительных искажений выходного сигнала.

Схема инвертирующего усилителя низкой частоты приведена на рисунке 2.1.

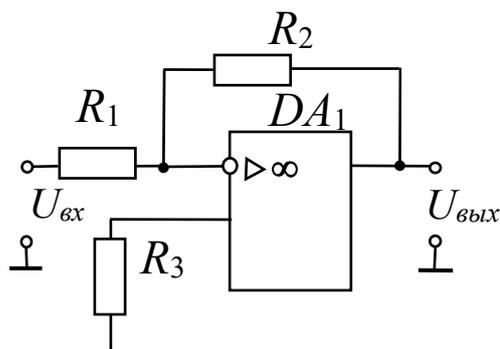


Рисунок 2.1 – Схема инвертирующего усилителя на операционном усилителе

Входной усиливаемый сигнал подаётся на инвертирующий вход операционного усилителя  $DA_1$  через токоограничивающее сопротивление  $R_1$ . Сопротивление  $R_2$  образует отрицательную обратную связь усилителя, стабилизируя работу усилителя, одновременно снижая его коэффициент усиления

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{ex}} = -\frac{R_2}{R_1}.$$

Сопротивление  $R_3$  соединяет неинвертирующий вход операционного усилителя со средней точкой источника питания (землёй) и служит для выравнивания входных токов.

Параметры операционного усилителя КР140УД11:

- номинальное напряжение питания  $U_{пит \ ном} = \pm 15$  В;
- коэффициент усиления  $K_{u \ ОУ} = 30000$ ;
- максимально допустимое выходное напряжение  $U_{вых \ max} = 12$  В;
- разность входных токов  $\Delta I_{ex} = 0,2$  мкА;
- входное сопротивление  $R_{ex} = 0,4$  МОм;
- минимальное сопротивление нагрузки  $R_{H \ min} = 2$  кОм.

Сопротивление  $R_1$  должно удовлетворять условию

$$R_1 \ll \frac{U_{ex \ min}}{\Delta I_{ex}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-6}} = 50 \text{ кОм.}$$

Принимаем из стандартного ряда E24 (см. приложение А)  $R_1 = 5,1 \ll 50$  кОм.  
Сопrotивление обратной связи

$$R_2 = K_U \cdot R_1 = 20 \cdot 5,1 \cdot 10^3 = 102 \text{ кОм.}$$

Принимаем  $R_2 = 100$  кОм.

Находим сопротивление  $R_3$ :

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{5,1 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^3}{5,1 \cdot 10^3 + 100 \cdot 10^3} = 4,85 \text{ кОм.}$$

Принимаем  $R_3 = 4,7$  кОм.

Амплитуда выходного сигнала не может быть больше максимального выходного напряжения (для данного типа ОУ  $U_{\text{вых max}} = 12$  В). Поэтому действующее значение максимального входного синусоидального сигнала составит:

$$U_{\text{ex max}} = \frac{U_{\text{вых max}}}{\sqrt{2} \cdot K_U} = \frac{12}{\sqrt{2} \cdot 20} = 0,42 \text{ В.}$$

## 2.2 Порядок выполнения работы

2.2.1 Произвести расчёт и выбор элементов схемы инвертирующего усилителя на основе операционного усилителя КР140УД11. Исходные данные (коэффициент усиления  $K_U$ , минимальное входное сопротивление  $U_{\text{ex min}}$ ) задаются преподавателем.

2.2.2 Определить максимальное входное напряжение синусоидального сигнала  $U_{\text{ex max}}$ , при котором не будет значительных искажений выходного сигнала.

2.2.3 Осуществить моделирование работы усилителя в среде Multisim (рисунки 2.2) при входном напряжении, не превышающем  $U_{\text{ex max}}$ , но больше  $U_{\text{ex min}}$ . Наблюдать осциллограммы входного и выходного напряжения усилителя, фазовый сдвиг  $180^\circ$  между  $U_{\text{вых}}$  и  $U_{\text{ex}}$ , что соответствует схеме инвертирующего усилителя.

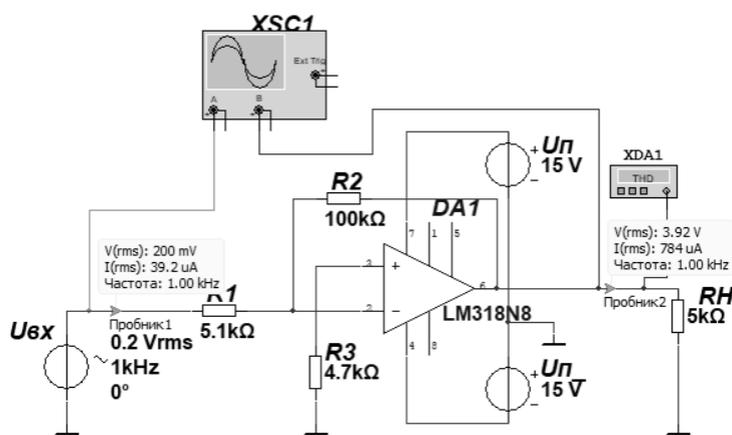


Рисунок 2.2 – Модель инвертирующего усилителя на ОУ

2.2.4 Определить значение коэффициента усиления по напряжению  $K_U$ , сравнить с заданным значением в таблице 2.1. Заполнить таблицу 2.1 (моделирование).

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$$

Таблица 2.1 – Параметры усилителя

$K_U$ заданный	$U_{вх}$ , В	$U_{вых}$ , мВ	$K_U$	$I_{вх}$ , мА	$I_{вых}$ , мА	$K_I$	$R_{вх}$ , Ом	$THD$
Моделирование								
20	0,2	3,92	19,6	0,0392	0,784	20	5102	0,00
Эксперимент								

2.2.5 Осуществить моделирование работы усилителя в среде Multisim при входном напряжении, превышающем  $U_{вх\ max}$ . Наблюдать на экране осциллографа ограничение уровня выходного напряжения.

2.2.6 Собрать на макетной плате схему инвертирующего усилителя на выбранных в результате расчётов элементах (см. рисунок 2.2). Для питания усилителя подключить двухполярный источник постоянного напряжения  $\pm U_n$ , входной сигнал  $U_{вх}$  подать от генератора гармонических колебаний. Получить на осциллографе осциллограммы и измерить значения входных и выходных напряжений. Определить коэффициент усиления по напряжению  $K_U$ , сравнить со значением, полученным в результате моделирования. Заполнить таблицу 2.1 (эксперимент).

2.2.7 По заданию преподавателя произвести расчёт и выбор элементов схемы неинвертирующего усилителя, операционного повторителя, интегратора, дифференциатора, сумматора. Осуществить моделирование работы схем в среде Multisim.

### 2.3 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, исходные данные, схему инвертирующего усилителя и других схем на основе операционного усилителя, расчёты, результаты моделирования и экспериментальных исследований работы схем в среде Multisim, осциллограммы входного и выходного сигналов, выводы по работе.

#### Контрольные вопросы

1 Приведите схему и опишите работу инвертирующего усилителя на операционном усилителе.

2 Порядок расчёта и исследования работы инвертирующего усилителя на операционном усилителе.

3 Приведите схему и опишите работу неинвертирующего усилителя и операционного повторителя.

4 Приведите схему и опишите работу интегратора, дифференциатора и сумматора.

### 3 Лабораторная работа № 3. Исследование схем генератора гармонических колебаний и мультивибратора

**Цель работы:** изучение принципа работы, методик расчёта, характеристик генератора гармонических колебаний и мультивибратора.

#### 3.1 Общие теоретические сведения

Схема генератора гармонического сигнала на операционном усилителе с мостом Вина в цепи обратной связи приведена на рисунке 3.1.

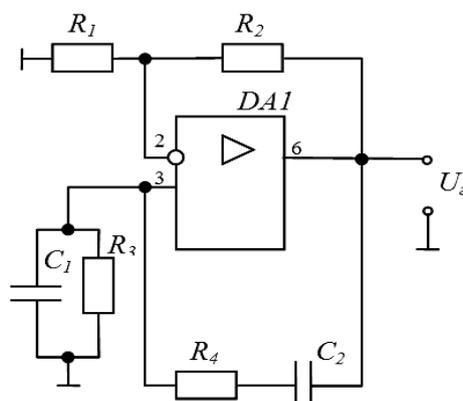


Рисунок 3.1 – Генератор гармонических колебаний на операционном усилителе с мостом Вина и цепи обратной связи

Частоту генерации определяют по формуле

$$f_2 = 1/(2\pi\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_3 \cdot R_4}).$$

При  $C = C_1 = C_2$ ,  $R = R_3 = R_4$  частота выходного напряжения

$$f_2 = 1/(2\pi \cdot R \cdot C).$$

На неинвертирующий вход ОУ поступает сигнал положительной обратной связи, а несколько меньший по амплитуде сигнал отрицательной обратной связи – на инвертирующий вход ОУ, состоящей из резисторов  $R_1$  и  $R_2$ .

Для обеспечения нормальной работы автогенератора коэффициент усиления по напряжению усилителя должен иметь значение

$$K_u = (1 + R_2/R_1) = 1/\beta \geq 3.$$

В реальном  $RC$ -генераторе обычно частота плавно перестраивается в пределах заданного диапазона, для чего используются двойные переменные ре-

зисторы  $R_3$  и  $R_4$  или сдвоенный блок конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  с изменяемыми ёмкостями.

**Пример расчёта схемы генератора гармонического сигнала на операционном усилителе с мостом Вина в цепи обратной связи.**

Разработать схему генератора гармонических колебаний на операционном усилителе КР140УД11 (LM318N8), обеспечив действующее значение напряжения  $U_2 = 1$  В и частоту  $f_2 = 10$  кГц.

Принимаем  $R_2 = R_3 = R_4 = R = 10$  кОм.

Тогда  $R_1 = R_2/(3 - 1) = 10 \cdot 10^3/2 = 5$  кОм.

$$C_1 = C_2 = C = 1/(2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot R) = 1/2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 10 \cdot 10^3 = 15,9 \text{ нФ.}$$

Принимаем из стандартного ряда (см. приложение А)  $C = 16$  нФ.

*Мультивибратором* называется автогенератор, предназначенный для получения периодически повторяющихся импульсов прямоугольной формы.

На рисунке 3.2 приведена схема мультивибратора, вырабатывающего периодически повторяющиеся прямоугольные импульсы положительной и отрицательной полярности одинаковой длительности. Такой мультивибратор называется симметричным.

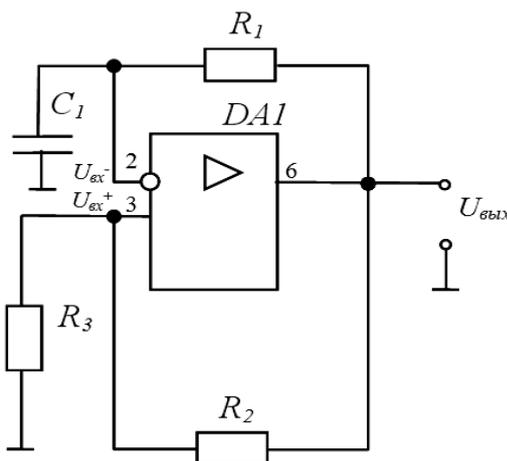


Рисунок 3.2 – Симметричный мультивибратор на операционном усилителе

При выборе конкретного типа операционного усилителя для построения симметричного мультивибратора исходят из того, что он должен обеспечивать необходимую скорость нарастания выходного напряжения

$$\frac{d \cdot U_{\text{ВЫХ}}}{d \cdot t} = \frac{U_m}{t_\Phi} = \frac{10}{2} = 5 \text{ В/мкс}$$

и амплитуду импульса  $U_m < U_{\text{П}}$ .

**Пример расчёта схемы мультивибратора на операционном усилителе.**

Разработать схему симметричного мультивибратора на операционном усилителе К140УД11. Исходные данные: максимальное значение напряжения  $U_m^\pm = 10$  В; длительность импульса  $t_{\text{И}} = 500$  мкс; время фронта импульса  $t_\Phi = 2$  мкс.

Операционный усилитель К140УД11 имеет следующие параметры:

- номинальное напряжение питания  $U_{пит\ ном} = \pm 15\text{ В}$ ;
- коэффициент усиления  $K_{u\ ОУ} = 30000$ ;
- максимально допустимое выходное напряжение  $U_{вых\ max} = 12\text{ В}$ ;
- скорость нарастания выходного напряжения  $V_u = 50\text{ В/мкс}$ ;
- входное сопротивление  $R_{вх} = 0,4\text{ МОм}$ ;
- минимальное сопротивление нагрузки  $R_{H\ min} = 2\text{ кОм}$ .

Для обеспечения максимального значения напряжения импульса  $U_m^{\pm} = 10\text{ В}$  необходимо снизить напряжение питания до  $U_{II} = \pm 12\text{ В}$ , т. к. операционный усилитель обеспечивает  $U_{вых\ max} = 12\text{ В}$  при номинальном напряжении питания  $U_{пит\ ном} = \pm 15\text{ В}$ .

Скорость изменения выходного напряжения, которую обеспечивает такой усилитель, выше требуемой  $\frac{d \cdot U_{ВЫХ}}{d \cdot t} = 5\text{ В/мкс}$ .

Из условий:

- 1)  $10 \cdot R_{H\ min} < R_1 \leq R_{вх}$ ;
- 2)  $R_2 + R_3 > 10 \cdot R_{H\ min}$ ;
- 3)  $R_2 = 10 \cdot R_3$ .

Выбираем  $R_1 = 50\text{ кОм}$ ,  $R_2 = 20\text{ кОм}$ ,  $R_3 = 2\text{ кОм}$ . Ёмкость конденсатора  $C_1$  рассчитывается из соотношения

$$C_1 = \frac{t_{II}}{R_1 \cdot \ln \left[ \frac{(R_2 + 2R_3)}{R_2} \right]} = \frac{500 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^3 \cdot \ln \left[ \frac{(20 \cdot 10^3 + 2 \cdot 2 \cdot 10^3)}{20 \cdot 10^3} \right]} = 54,8\text{ нФ}.$$

Принимаем из стандартного ряда (см. приложение А)  $C_1 = 56\text{ нФ}$ .

### 3.2 Порядок выполнения работы

3.2.1 Произвести расчёт схемы генератора гармонических колебаний на операционном усилителе КР140УД11 (LM318N8), обеспечив действующее значение напряжения  $U_2$  и частоту  $f_2$ , заданные преподавателем.

3.2.2 Осуществить моделирование работы генератора в среде Multisim (рисунки 3.3). Получить осциллограмму выходного сигнала. Измерить амплитуду и частоту выходного напряжения.

3.2.3 Для обеспечения требуемого напряжения на выходе можно установить делитель напряжения:

$$U_2 = \frac{U_{вых} \cdot R_{d2}}{R_{d1} + R_{d2}}.$$

3.2.4 Результаты моделирования работы генератора занести в таблицу 3.1 (моделирование) и сравнить с исходными данными.

Таблица 3.1 – Результаты исследования работы генератора синусоидальных колебаний

Параметр	$U_z, В$	$f_z, кГц$	$THD, \%$
Исходные данные			
Моделирование			
Эксперимент			

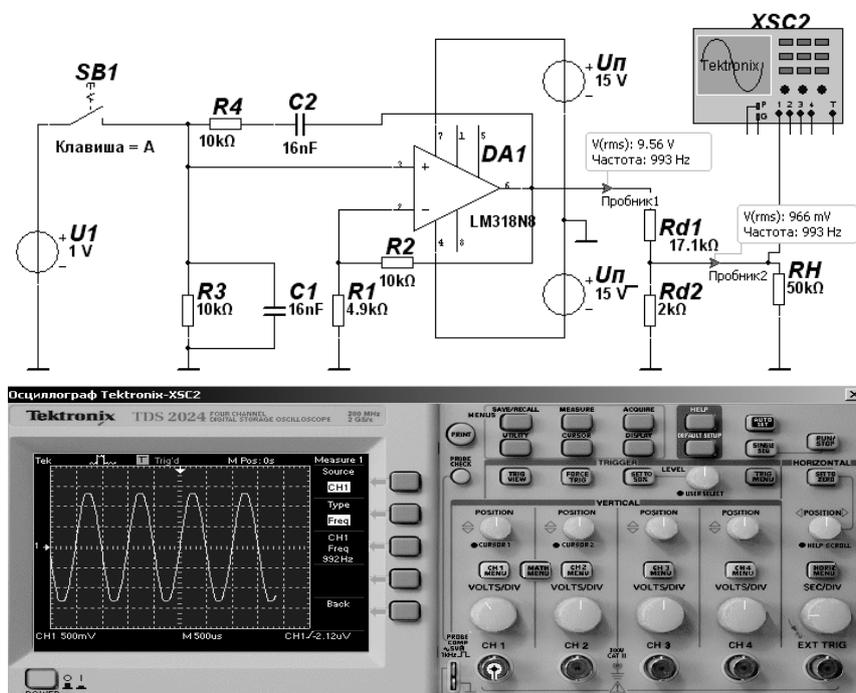


Рисунок 3.3 – Модель генератора гармонических колебаний на ОУ с осциллограммой выходного напряжения

3.2.5 Собрать на макетной плате схему генератора гармонических колебаний на выбранных в результате расчётов элементах (см. рисунок 3.3). Для питания усилителя подключить двухполярный источник постоянного напряжения  $\pm U_n$ . Получить на осциллографе осциллограмму выходного напряжения генератора и измерить параметры сигнала. Заполнить таблицу 3.1 (эксперимент).

3.2.6 Произвести расчёт схемы симметричного мультивибратора на операционном усилителе КР140УД11 (LM318N8), обеспечив максимальное значение напряжения  $U_m^\pm$ , длительность импульса  $t_{II}$ , время фронта  $t_\phi = 2$  мкс, заданные преподавателем.

3.2.7 Осуществить моделирование работы генератора в среде Multisim (рисунок 3.4).

3.2.8 Результаты моделирования работы генератора занести в таблицу 3.2 (моделирование) и сравнить с исходными данными.

Таблица 3.2 – Результаты исследования работы мультивибратора

Параметр	$U_m^\pm, В$	$t_{II}, мкс$	$t_\phi, мкс$
Исходные данные			
Моделирование			
Эксперимент			

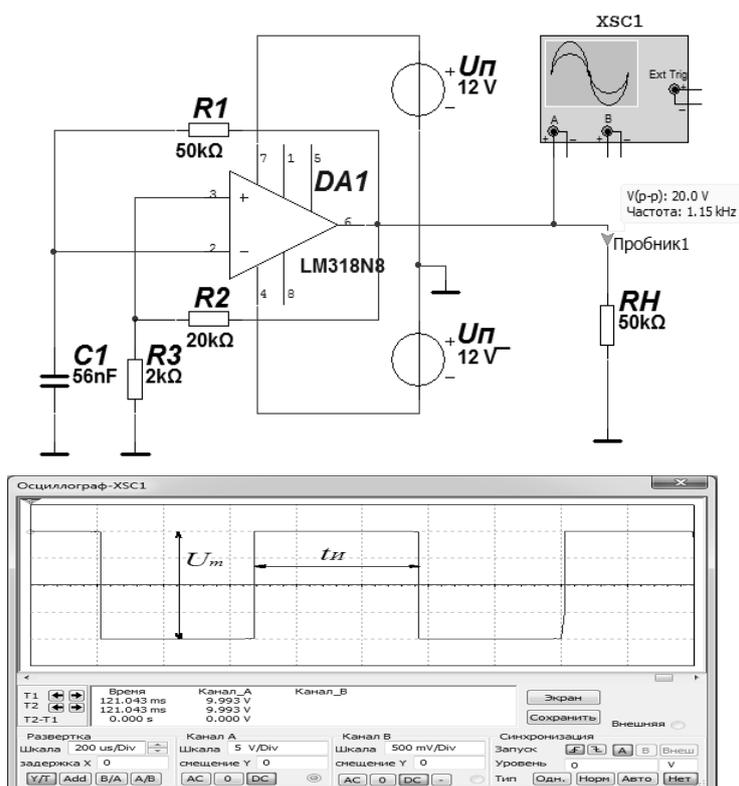


Рисунок 3.4 – Модель симметричного мультивибратора на ОУ и осциллограмма выходного напряжения

3.2.9 Собрать на макетной плате схему мультивибратора на выбранных в результате расчётов элементах (см. рисунок 3.4). Для питания усилителя подключить двухполярный источник постоянного напряжения  $\pm U_n$ . Получить на осциллографе осциллограмму выходного напряжения генератора и измерить параметры сигнала. Заполнить таблицу 3.2 (эксперимент).

### 3.3 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, исходные данные, схему генератора гармонических колебаний и мультивибратора на основе операционного усилителя, расчёты, результаты моделирования работы генераторов в среде Multisim в виде таблиц, осциллограммы выходных напряжений, выводы по работе.

#### Контрольные вопросы

- 1 Приведите схему и опишите работу генератора гармонического сигнала на операционном усилителе с мостом Вина в цепи обратной связи.
- 2 Опишите порядок расчёта и исследования работы генератора гармонического сигнала на операционном усилителе с мостом Вина в цепи обратной связи.
- 3 Приведите схему и опишите работу мультивибратора на операционном усилителе.
- 4 Опишите порядок расчёта и исследования работы мультивибратора на операционном усилителе.

## 4 Лабораторная работа № 4. Исследование схем неуправляемых и управляемых выпрямителей

**Цель работы:** изучение принципа работы, методик расчёта, характеристик неуправляемых и управляемых однофазных выпрямителей

### 4.1 Общие теоретические сведения

Выпрямителем называется устройство преобразования переменного напряжения в постоянное. Выпрямительное устройство, помимо выпрямителя, в который входят один или несколько включенных по определенной схеме вентилях (диодов, тиристоров), содержит в себе силовой трансформатор, сглаживающий фильтр и стабилизатор.

#### **Пример расчёта мостового неуправляемого выпрямителя.**

Разработать схему мостового выпрямителя на полупроводниковых диодах с индуктивно-емкостным  $LC$ -фильтром для выпрямления однофазного синусоидального напряжения.

Исходные данные к заданию:

- напряжение сети  $U_1 = 220$  В;
- номинальное напряжение нагрузки  $U_d = 50$  В;
- номинальный ток нагрузки  $I_d = 0,6$  А;
- частота питающего напряжения  $f = 50$  Гц.

Необходимо выбрать тип вентилях, трансформатора, рассчитать параметры фильтра. Осуществить моделирование работы выпрямителя в среде Multisim.

Схема однофазного мостового выпрямителя с  $LC$ -фильтром приведена на рисунке 4.1.

Переменное синусоидальное напряжение сети с действующим значением  $U_1$  подается на первичную обмотку однофазного трансформатора  $TV_1$ , где понижается вторичной обмоткой до уровня  $U_2$ . Мостовой выпрямитель, собранный на диодах  $VD1...VD4$ , осуществляет преобразование переменного напряжения в постоянное пульсирующее. Положительную полуволну напряжения пропускают диоды  $VD1, VD4$ , а отрицательную –  $VD2, VD3$ . Направление тока  $I_d$  остаётся постоянным.  $LC$ -фильтр, собранный на элементах  $L_\phi$  и  $C_\phi$ , осуществляет сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения.

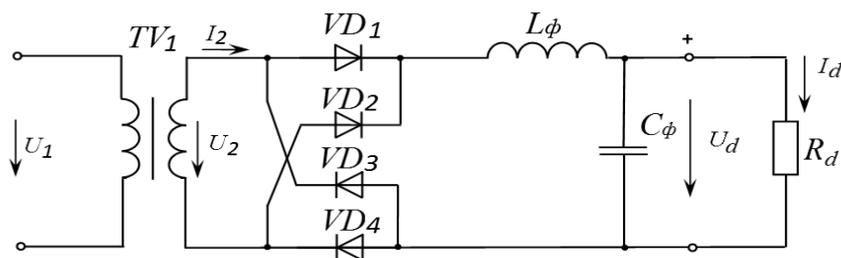


Рисунок 4.1 – Схема однофазного мостового выпрямителя с индуктивно-емкостным  $LC$ -фильтром

Для однофазного мостового выпрямителя среднее значение прямого тока через вентиль (выпрямительный диод) определяется как

$$I_a = \frac{I_d}{2} = \frac{0,6}{2} = 0,3 \text{ А.}$$

Обратное максимальное напряжение на вентиле равно:

$$U_{a \text{ обр. max}} = 1,57 \cdot U_d = 1,57 \cdot 50 = 78,5 \text{ В.}$$

Выбираем вентили (выпрямительные диоды) 1N4934 (таблица Г.1) с параметрами:

- максимальный прямой ток  $I_{np \text{ max}} = 1 \text{ А} > I_a = 0,3 \text{ А}$ ;
- максимально допустимое обратное напряжение

$$U_{обр \text{ max}} = 100 \text{ В} > U_{a \text{ обр. max}} = 78,5 \text{ В};$$

- максимальное напряжение в открытом состоянии  $U_{np \text{ max}} = 1,1 \text{ В}$ .

Для однофазного мостового выпрямителя действующее значение вторичного напряжения

$$U_2 = 1,11 \cdot U_d + 2 \cdot U_{np \text{ max}} = 1,11 \cdot 50 + 2 \cdot 1,1 = 57,5 \text{ В.}$$

Расчётная мощность трансформатора для мостового выпрямителя определяется как

$$S_{расч} = 1,23 \cdot P_d = 1,23 \cdot 30 = 36,9 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

где  $P_d$  – номинальная мощность нагрузки,  $P_d = I_d \cdot U_d = 0,6 \cdot 50 = 30 \text{ Вт}$ .

Выбираем трансформатор (таблица Д.1) ТПП 271-127/220-50:

$$S_{ном} = 57,0 \text{ В} \cdot \text{А} > S_{расч} = 36,9 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

При последовательном соединении вторичных обмоток А, Б, В, Г получаем напряжение  $U_2 = 9,95 + 10 + 20 + 20 = 59,95 \text{ В}$ .

Тогда коэффициент трансформации

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{59,95} = 3,67.$$

Коэффициент пульсации на выходе однофазного мостового выпрямителя  $K_n = 0,67$ . Требуемый коэффициент пульсации  $K_n = 0,007$ .

Тогда коэффициент сглаживания фильтра

$$S_{LC} = \frac{K_n}{K_n} = \frac{0,67}{0,007} = 95,71.$$

Для  $LC$ -фильтра

$$L_{\phi} C_{\phi} = \frac{S_{LC} + 1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot m)^2} = \frac{96,71}{(2\pi \cdot 50 \cdot 2)^2} = 2,45 \cdot 10^{-4} \text{ Гн} \cdot \text{Ф},$$

где  $m$  – число пульс выпрямленного напряжения за период,  $m = 2$  для однофазной двухполупериодной схемы выпрямления.

Зададимся  $C_{\phi} = 200$  мкФ из стандартного ряда E24 (см. приложение А).

Тогда

$$L_{\phi} = \frac{L_{\phi} C_{\phi}}{C_{\phi}} = \frac{2,45 \cdot 10^{-4}}{200 \cdot 10^{-6}} \approx 1,23 \text{ Гн}.$$

Параметры фильтра  $C_{\phi} = 200$  мкФ,  $L_{\phi} = 1,23$  Гн удовлетворяют условиям эффективной работы:

$$\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot m \cdot C_{\phi}} \ll R_d; \quad 2\pi \cdot f \cdot m \cdot L_{\phi} \gg R_d.$$

$$7,96 \ll 83,3; \quad 770,02 \gg 83,3.$$

**Пример расчёта однофазного управляемого выпрямителя с нулевым выводом трансформатора.**

Исходные данные:  $U_1 = 220$  В;  $U_{d \min} = 10$  В;  $U_{d \max} = 40$  В;  $R_d = 30$  Ом. Необходимо выбрать тип вентилей, трансформатора, построить регулировочную характеристику управляемого выпрямителя и по ней определить требуемые углы регулирования, осуществить моделирование её работы в среде Multisim, привести временные диаграммы для режима максимального тока нагрузки.

Схема управляемого выпрямителя приведена на рисунке 4.2.

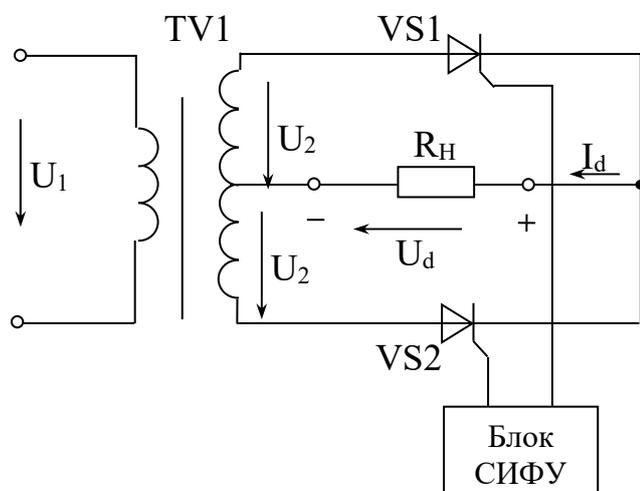


Рисунок 4.2 – Схема управляемого выпрямителя со средней точкой трансформатора (СИФУ – система импульсно-фазового управления)

Произведем выбор тиристоров.

Ток нагрузки максимальный:

$$I_{d \max} = \frac{U_{d \max}}{R_d} = \frac{40}{30} = 1,33 \text{ А.}$$

Для однофазного мостового выпрямителя среднее значение прямого тока через вентиль определяется как

$$I_a = \frac{I_d}{2} = \frac{1,33}{2} = 0,67 \text{ А.}$$

Обратное максимальное напряжение на вентиле

$$U_{обр \max} = 3,14 \cdot U_{d \max} = 1,57 \cdot 40 = 125,6 \text{ В.}$$

Выбираем вентили 2N5064, для которых

$$I_{откр \max} = 0,8 \text{ А} > I_a = 0,67 \text{ А};$$

$$U_{зкр \max} = 200 \text{ В} > U_{обр \max} = 125,6 \text{ В.}$$

$$U_{откр \max} = 1,7 \text{ В.}$$

Определим параметры трансформатора.

Для однофазного выпрямителя с нулевым выводом трансформатора действующее значение вторичного напряжения

$$U_2 = 1,11 \cdot U_{d \max} + U_{откр \max} = 1,11 \cdot 40 + 1,7 = 46,1 \text{ В.}$$

Расчётная мощность определяется как

$$S_{расч} = 1,48 \cdot P_{H \max} = 1,23 \cdot \frac{U_{d \max}^2}{R_d} = 1,48 \cdot \frac{40^2}{10} = 78,9 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

Выбираем трансформатор: ТПП 289-127/220-50 (см. таблицу Д.1):

$$S_{ном} = 90 \text{ В} \cdot \text{А} > S_{расч} = 78,9 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

При последовательном соединении вторичных обмоток Б, В, Г получаем  $U_2 = 10 + 20 + 20 = 50 \text{ В.}$

Тогда коэффициент трансформации

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{50} = 4,4.$$

Регулировочную характеристику управляемого выпрямителя рассчитываем по формуле

$$U_d(\alpha) = U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2},$$

где  $U_{d0}$  – максимальное значение выпрямленного напряжения при угле регулирования  $\alpha = 0$ .

В нашем случае для выбранного трансформатора

$$U_{d0} = \frac{U_2 - U_{откр \max}}{1,11} = \frac{50 - 1,7}{1,11} = 43,5 \text{ В.}$$

Тогда

$$U_d(\alpha) = 43,5 \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2}.$$

Регулировочная характеристика представлена на рисунке 4.3.

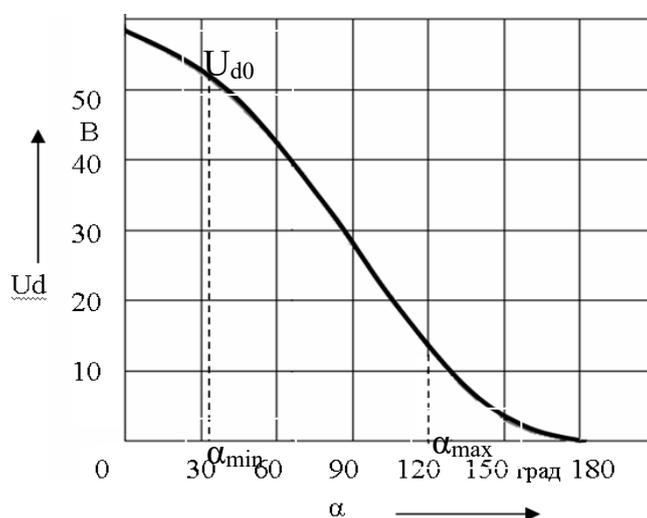


Рисунок 4.3 – Регулировочная характеристика выпрямителя

По характеристике находим, что для  $U_{d \min} = 10 \text{ В}$   $\alpha_{\min} = 120^\circ$ , а для  $U_{d \max} = 40 \text{ В}$   $\alpha_{\min} = 33^\circ$ .

## 4.2 Порядок выполнения работы

4.2.1 Произвести расчёт мостового выпрямителя на полупроводниковых диодах с индуктивно-емкостным  $LC$ -фильтром для выпрямления однофазного синусоидального напряжения. Исходные данные (напряжение сети  $U_1$ , номинальное напряжение нагрузки  $U_d$ , номинальная мощность нагрузки  $P_d$ , допустимый коэффициент пульсаций  $K_n$ ) задаются преподавателем. Частота питающего напряжения  $f = 50 \text{ Гц}$ .

4.2.2 Выбрать тип выпрямительных диодов, трансформатора, рассчитать параметры фильтра.

4.2.3 Осуществить моделирование работы неуправляемого выпрямителя без фильтра в среде Multisim (рисунок 4.4). Сопротивление нагрузки опреде-

лить по формуле

$$R_d = \frac{U_d}{I_d} = \frac{50}{0,6} = 83,3 \text{ Ом.}$$

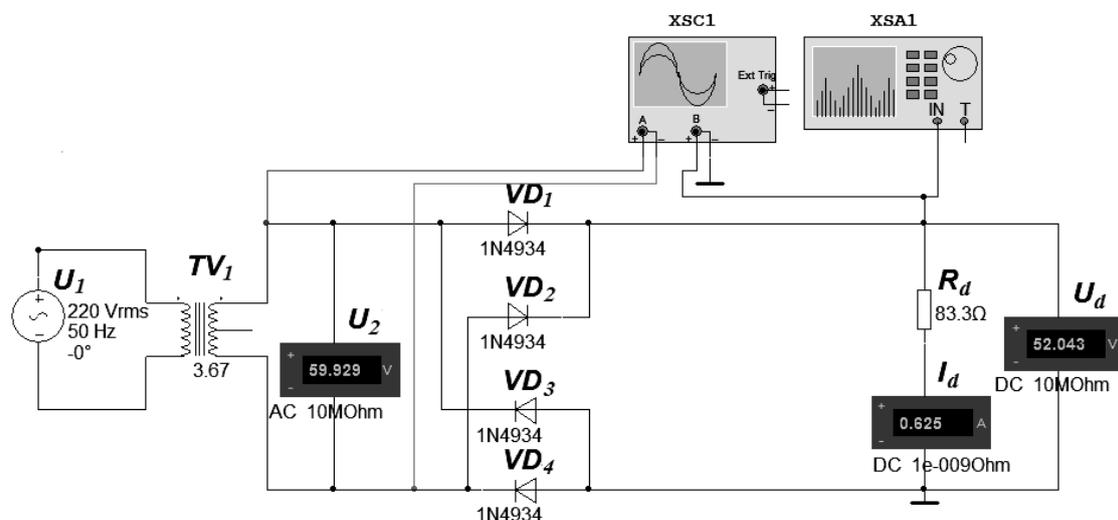


Рисунок 4.4 – Модель мостового выпрямителя без фильтра

4.2.4 Получить осциллограмму входного и выходного сигнала. Измерить действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $U_2$ , средневыврямленное значение тока  $I_d$  и напряжения  $U_d$ . Сравнить с заданными и рассчитанными значениями. Заполнить таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты исследования работы неуправляемого мостового однофазного выпрямителя

Параметр	$U_2$ , В	$U_d$ , В	$I_d$ , А	$K_n$	$K_H$
Исходные данные (расчёт)				0,67	
Моделирование (без фильтра)					–
Моделирование (с фильтром)				–	

4.2.5 Определить и занести в таблицу 4.1 коэффициент пульсаций на выходе выпрямителя:

$$K_n = \frac{U_{1m}}{U_d} = \frac{36,865}{52,043} = 0,71,$$

где  $U_{1m}$  – амплитуда первой гармоники выпрямленного напряжения. Находим по показаниям анализатора спектра XSA1 на частоте 100 Гц.

Сравнить полученный коэффициент пульсаций на выходе выпрямителя с теоретическим  $K_n = 0,67$ .

4.2.6 Осуществить моделирование однофазного неуправляемого мостового выпрямителя с фильтром (рисунок 4.5).

4.2.7 Получить осциллограмму входного и выходного сигнала. Измерить действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $U_2$ ,

средневыпрямленное значение тока  $I_d$  и напряжения  $U_d$ . Сравнить с заданными и рассчитанными значениями. Заполнить таблицу 4.1.

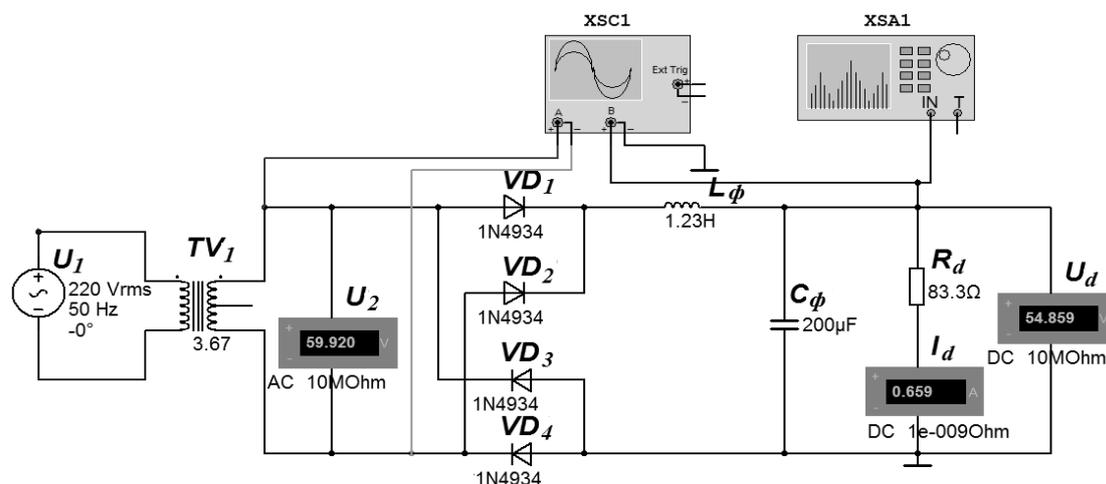


Рисунок 4.5 – Модель мостового выпрямителя с индуктивно-емкостным фильтром

4.2.8 Определить и занести в таблицу 4.1 коэффициент пульсаций на нагрузке

$$K_H = \frac{U_{1m}}{U_d} = \frac{0,373}{54,859} = 0,007,$$

где  $U_{1m}$  – амплитуда первой гармоники выпрямленного напряжения. Находим по показаниям анализатора спектра XSA1 на частоте 100 Гц.

Сравнить полученный коэффициент пульсаций на нагрузке с заданным.

4.2.9 Произвести расчёт однофазного управляемого выпрямителя со средней точкой трансформатора при работе на активную нагрузку. Исходные данные (напряжение сети  $U_1$ , минимальное напряжение нагрузки  $U_{d \min}$ , максимальное напряжение нагрузки  $U_{d \max}$ , сопротивление нагрузки  $R_d$ ) задаются преподавателем.

4.2.10 Выбрать тип вентилялей, трансформатора, построить регулировочную характеристику управляемого выпрямителя (см. рисунок 4.3) и по ней определить требуемые углы регулирования.

4.2.11 Произвести моделирование работы управляемого выпрямителя в среде Multisim (рисунок 4.6). Импульсы управления тиристорами формируются источником пульсирующего напряжения  $E_2$  путём задания угла отпирания параметром «задержка»:

$$t_s = \frac{\alpha}{360^\circ \cdot f},$$

где  $f$  – частота питающего напряжения,  $f = 50$  Гц.

4.2.12 Получить осциллограммы выходного напряжения для режима минимального и максимального выпрямленного напряжения на нагрузке. Определить средневыпрямленные значения напряжения и тока. Заполнить таблицу 4.2. Сравнить полученные значения с заданными (рассчитанными).

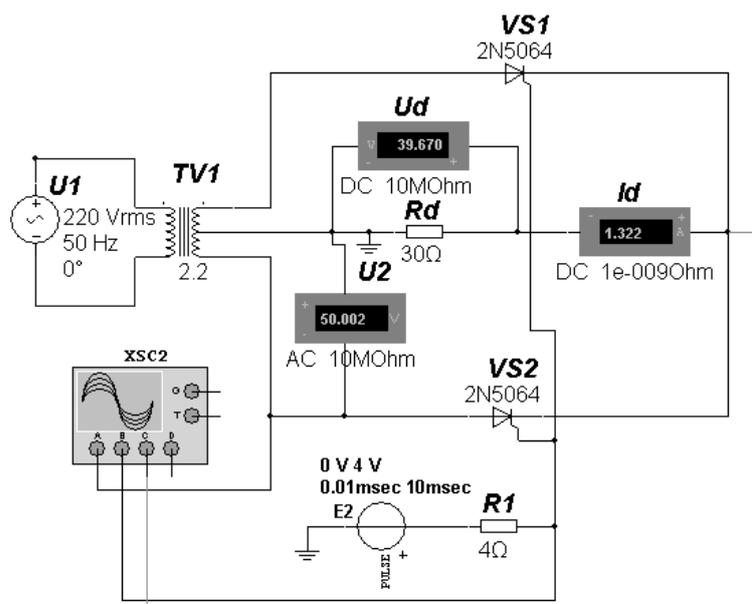


Рисунок 4.6 – Модель управляемого выпрямителя со средней точкой трансформатора

Таблица 4.2 – Результаты исследования работы управляемого выпрямителя

Параметр	$U_2$ , В	$U_{d \min}$ , В	$U_{d \max}$ , В	$I_{d \min}$ , А	$I_{d \max}$ , А
Исходные данные (расчёт)					
Моделирование					

### 4.3 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, исходные данные, схемы выпрямителей, расчёты, результаты моделирования в среде Multisim, осциллограммы напряжений, таблицы с результатами исследований, выводы по работе.

#### Контрольные вопросы

- 1 Приведите схему и опишите работу двухполупериодного неуправляемого выпрямителя.
- 2 Опишите порядок расчёта и моделирования двухполупериодного неуправляемого выпрямителя.
- 3 Приведите схему и опишите работу однофазного управляемого выпрямителя со средней точкой трансформатора.
- 4 Опишите порядок расчёта и моделирования работы однофазного управляемого выпрямителя со средней точкой трансформатора.

## 5 Лабораторная работа № 5. Исследование работы логических элементов и триггеров

**Цель работы:** изучение принципа функционирования и характеристик логических элементов и триггеров.

### 5.1 Общие сведения

В ЭВМ, импульсных и других цифровых устройствах широко применяются *логические элементы*. Каждый логический элемент выполняет вполне определенную логическую операцию. Основными логическими операциями являются: логическое отрицание НЕ (инверсия), логическое сложение ИЛИ (дизъюнкция), логическое умножение И (конъюнкция). К базовым логическим элементам относятся элементы Пирса и Шеффера. На основе этих простых операций могут строиться и более сложные. Для описания логических операций используется алгебра логики. Алгебра логики широко применяется в теории цифровой техники, в которой используются устройства, имеющие два устойчивых состояния равновесия. При этом одно из состояний, соответствующие, например, высокому уровню напряжения, обозначается *единицей*, а соответствующее низкому уровню напряжения – *нулем*. Уровень выходного напряжения логического элемента зависит от уровня входного (или нескольких входных) напряжений. Эта связь отображается таблицей состояний (таблицей истинности).

*Триггер* – это устройство последовательностного типа с двумя устойчивыми состояниями равновесия, предназначенное для записи и хранения информации. Под действием входных сигналов триггер может переключаться из одного устойчивого состояния в другое. При этом напряжение на его выходе скачкообразно изменяется с низкого уровня на высокий или наоборот.

По способу записи информации триггеры делят на *асинхронные*, которые переключаются в момент подачи входного сигнала, и *синхронные* (тактируемые), которые переключаются только при подаче синхронизирующих импульсов, а момент переключения связан с определённым уровнем синхросигнала (*статические* триггеры) или с моментом перепада напряжения на тактируемом входе (*динамические* триггеры).

Как правило, триггер имеет два выхода: прямой  $Q$  и инверсный  $\bar{Q}$ . Число входов зависит от структуры и функций, выполняемых триггером. Например, асинхронные  $RS$ -триггеры имеют два входа: вход  $S$  установки в *единичное* состояние прямого выхода  $Q$  и вход  $R$  установки в *нулевое* состояние выхода  $Q$ . Синхронные триггеры для занесения в них информации, помимо информационных входов  $S$  ( $J$ ) и  $R$  ( $K$ ), имеют синхронизирующий  $C$  или счётный  $T$  вход, а триггеры задержки – информационный вход  $D$ .

Наибольшее распространение в цифровых устройствах получили триггеры  $RS$ ,  $D$ ,  $JK$  и  $T$ .

## 5.2 Порядок выполнения работы

5.2.1 В программе Multisim собрать схему для испытания основных и базовых логических элементов (рисунок 5.1) OR (ИЛИ), AND (И), NOT (НЕ), NAND (И-НЕ) и XOR (ИЛИ-НЕ), расположенных в библиотеке Misc Digital/TIL с уровнем высокого напряжения 5 В. В схему включены ключи SB1 и SB2, пробники X1, X2 и Y1...Y5 с пороговыми напряжениями 5 В. Если входной или выходной сигнал элемента равен логической единице, то включенный на выходе этого элемента пробник светится.

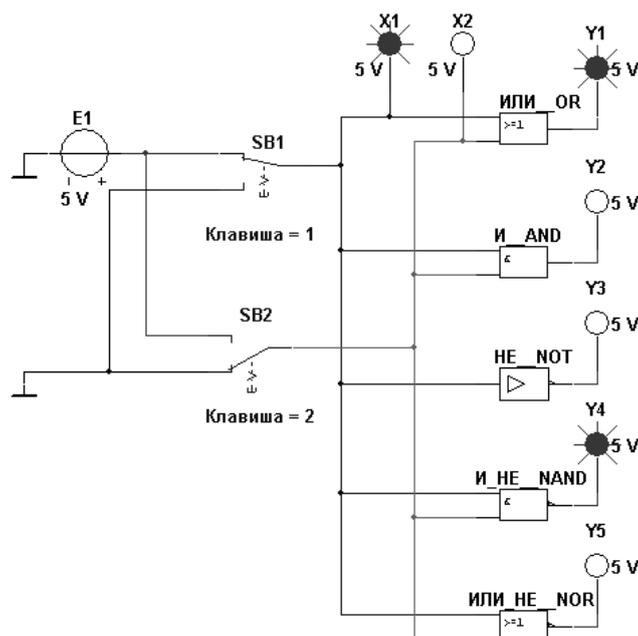


Рисунок 5.1 – Схема для исследования основных и базовых логических элементов

Результаты моделирования занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты моделирования работы базовых логических элементов

Дизъюнктор [ИЛИ (OR)]			Конъюнктор [И (AND)]			Инвертор [НЕ (NOT)]		Штрих Шеффера [И-НЕ (NAND)]			Стрелка Пирса [ИЛИ-НЕ (NOR)]		
$x_1$	$x_2$	$y$	$x_1$	$x_2$	$y$	$x$	$y$	$x_1$	$x_2$	$y$	$x_1$	$x_2$	$y$
0	0		0	0		0		0	0		0	0	
0	1		0	1		1		0	1		0	1	
1	0		1	0				1	0		1	0	
1	1		1	1				1	1		1	1	

5.2.2 По заданию преподавателя исследовать работу трех логических элементов одной из серий интегральных микросхем (рисунок 5.2), предварительно выписав из справочника их параметры и условное обозначение. Составить таблицу истинности для данных элементов (таблица 5.2).

5.2.3 Для экспериментального исследования работы логического элемента, заданного преподавателем на макетной плате, собрать схему, например, приведенную на рисунке 5.3.

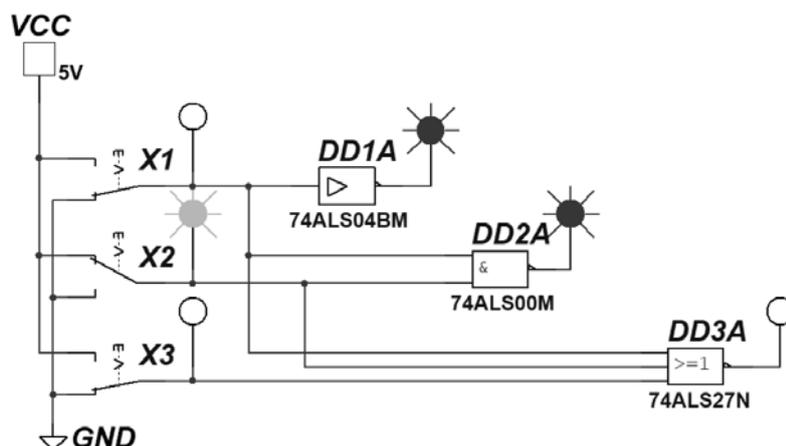


Рисунок 5.2 – Схема для исследования микросхем логических элементов

Таблица 5.2 – Результаты исследования работы микросхем логических элементов

Микросхема № 1 Тип элемента _____		Микросхема № 2 Тип элемента _____				Микросхема № 3 Тип элемента _____			
$x$	$y$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y$
0		0	0	0		0	0	0	
		0	0	1		0	0	1	
		0	1	0		0	1	0	
		0	1	1		0	1	1	
1		1	0	0		1	0	0	
		1	0	1		1	0	1	
1		1	1	0		1	1	0	
		1	1	1		1	1	1	

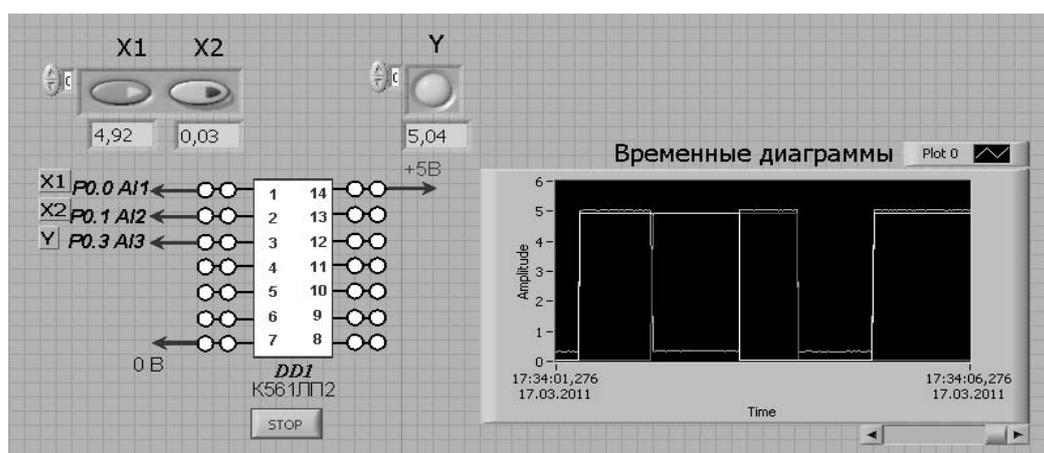


Рисунок 5.3 – Виртуальный прибор для экспериментального исследования логических элементов в среде LabVIEW

Питание микросхемы осуществляется от источника НУ3002-D2 или выхода +5 В устройства сбора данных NI USB-6009. Сигналы входных переменных  $X$  формируются цифровыми выходами P0.0...P0.2 устройства NI USB-6009, приём сигнала логической функции  $Y$  осуществляется цифровым входом P1.0, что реализовано блоками DAQ Assistant блок-диаграммы виртуального прибора

(рисунок 5.4). Входы и выход логического элемента подключаются к каналам аналогового ввода AI1...AI3 устройства сбора данных NI USB-6009 для возможности отображения уровня сигналов.

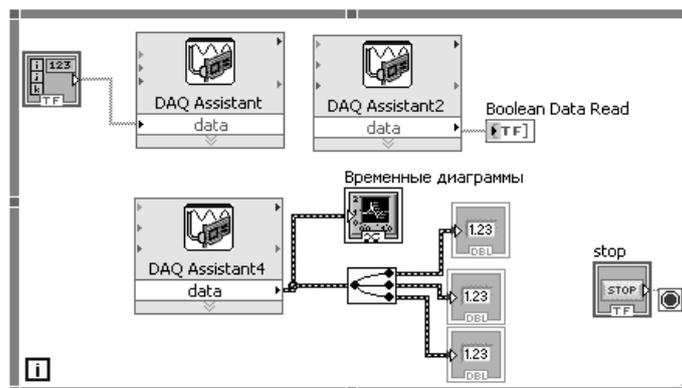


Рисунок 5.4 – Блок-диаграмма виртуального прибора в LabVIEW для исследования логических элементов

Заполнить таблицу истинности для исследуемого элемента, сравнив с результатами моделирования. Определить уровни входного и выходного напряжений, соответствующие логической единице и нулю  $U_{вх}^1$ ,  $U_{вх}^0$ ,  $U_{вых}^1$ ,  $U_{вых}^0$ .

5.2.4 В программе Multisim собрать схему исследования *RS*-триггера на логических элементах И-НЕ, заданной преподавателем серии (рисунок 5.5).

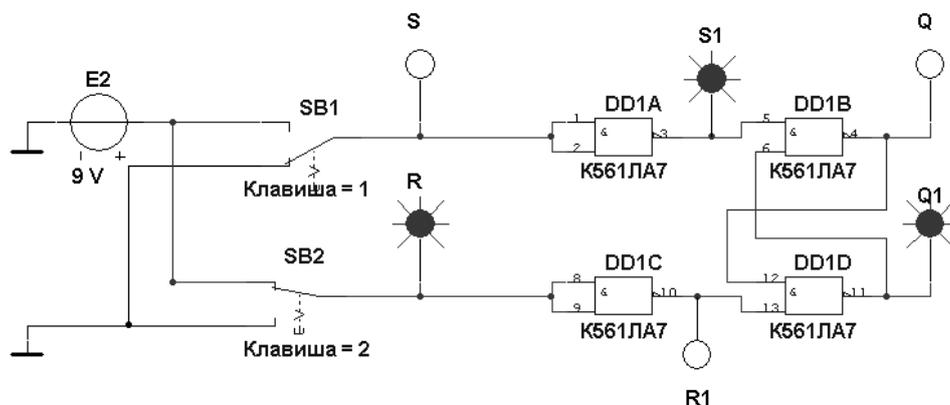


Рисунок 5.5 – Схема *RS*-триггера на логических элементах серии K561

Воспользовавшись порядком засвечивания пробников и задавая коды (00, 01, 10) состояния ключей SB1 и SB2 (входных сигналов), составить таблицу истинности *RS*-триггера.

5.2.5 В программе Multisim собрать схему испытания триггеров *JK* и *D* (рисунок 5.6) по заданию преподавателя. В схему включены: генератор XWG1 (частота  $f_z = 500$  кГц); логический анализатор XLA1.

На *1CLR* - и *1PR* -входы триггеров подаётся постоянное напряжение 5 В (имитирующее сигнал 1) источника VCC, а на *1CLK*-входы триггеров и на вход 1 анализатора XLA1 поступают тактовые импульсы с амплитудой 5 В и частотой 500 кГц, сформированные генератором E1.

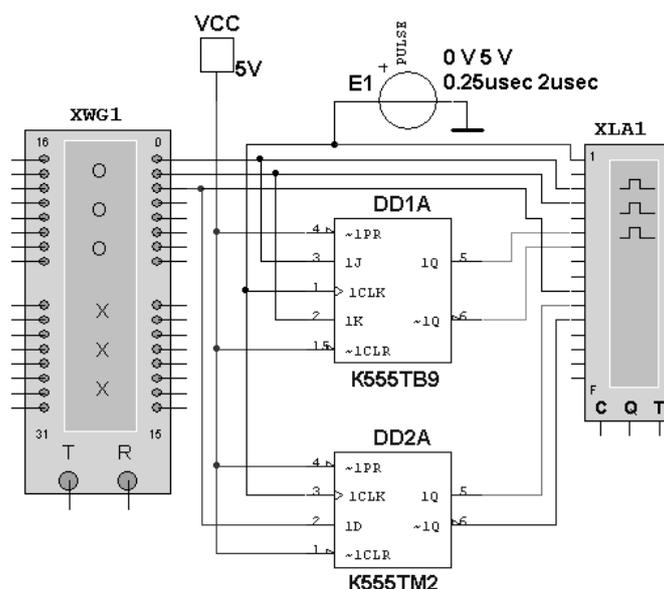


Рисунок 5.6 – Схема для исследования  $JK$ - и  $D$ -триггеров

С выходов 1 и 2 генератора XWG1 сигналы подаются на управляющие входы 1J и 1K  $JK$ -триггера, с выхода 3 – на вход 1D  $D$ -триггера.

В качестве примера введём в первые шесть ячеек памяти генератора трёх-разрядные кодовые комбинации (рисунок 5.7): 010, 100, 111, 001, 100, 010.

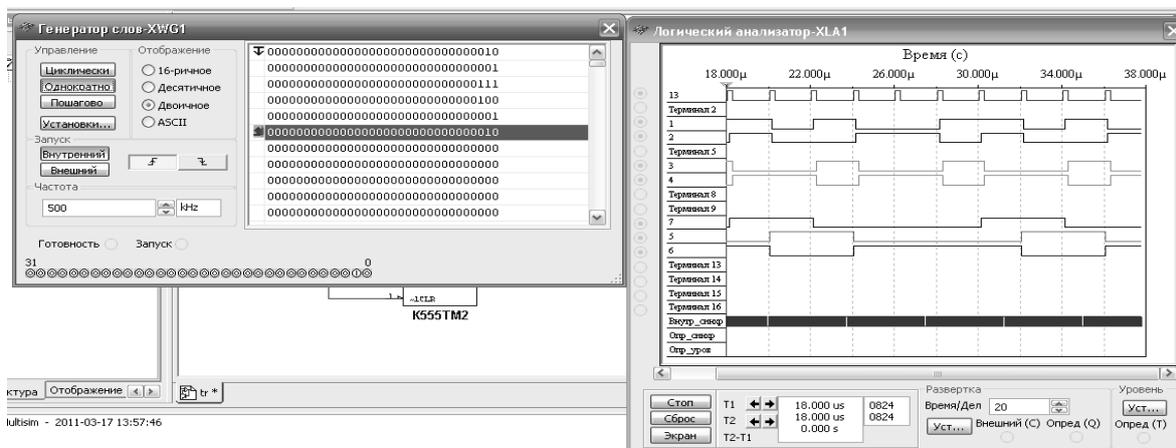


Рисунок 5.7 – Цифровые комбинации и временные диаграммы триггеров

Провести моделирование работы триггеров, по временным диаграммам составить и заполнить для них таблицы истинности.

5.2.6 Для экспериментального исследования заданного преподавателем  $D$ -триггера собрать схему, приведенную на рисунке 5.8.

Питание микросхемы осуществляется от источника NY3002-D2 или выхода +5 В устройства сбора данных NI USB-6009. Сигналы входов триггера  $S$ ,  $R$ ,  $D$  формируются цифровыми выходами P0.1...P0.3 устройства NI USB-6009, приём выходных сигналов  $Q$ ,  $\bar{Q}$  осуществляется цифровыми входами P1.0, P1.1, что реализовано блоками DAQ Assistant блок-диаграммы виртуального прибора (рисунок 5.9). Импульсы синхронизации  $C$  формируются блоком

Simulate Signal блок-диаграммы и передаются на выход P0.5 устройства сбора данных. Входы и выходы триггера подключаются к каналам аналогового ввода AI1...AI4 устройства NI USB-6009 для возможности отображения временных диаграмм.

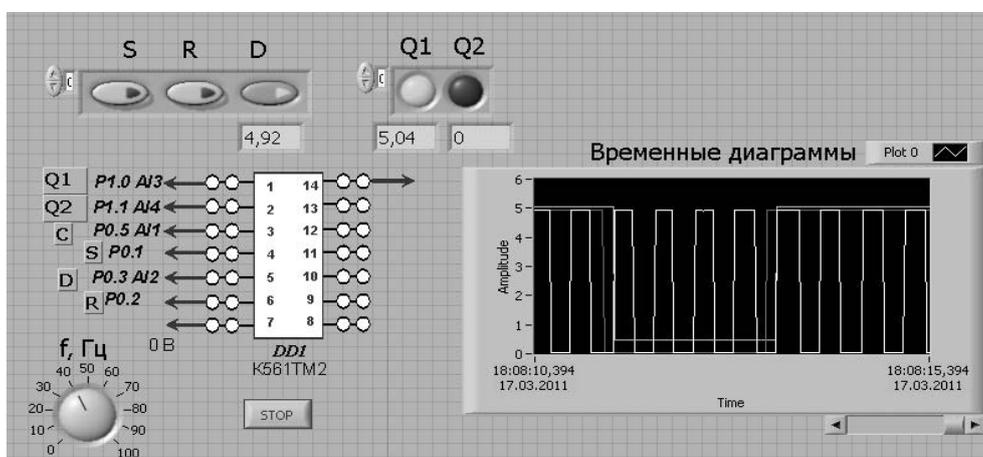


Рисунок 5.8 – Виртуальный прибор для экспериментального исследования  $D$ -триггера в среде LabVIEW

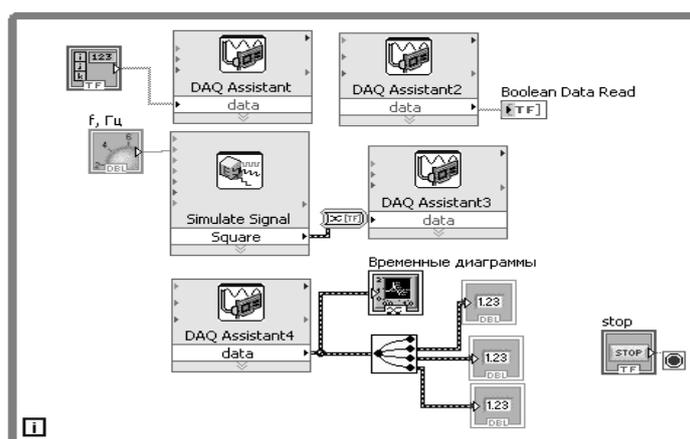


Рисунок 5.9 – Блок-диаграмма виртуального прибора в LabVIEW для исследования триггера

По полученным временным диаграммам составить таблицу истинности триггера, сравнить с результатами моделирования.

5.2.7 Сделать выводы по результатам работы.

### 5.3 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, схемы для моделирования работы логических элементов и триггеров в среде Multisim, блок-диаграммы виртуального прибора для экспериментального снятия характеристик и диалоговое окно, временные диаграммы и таблицы истинности работы логических элементов и триггеров, выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Логические элементы и их таблицы истинности.
- 2 Приведите структуру и опишите работу асинхронного и синхронного *RS*-триггера.
- 3 Приведите структуру и опишите работу *D*-триггера и *T*- триггера.
- 4 Опишите порядок исследования работы логических элементов и триггеров.

## **6 Лабораторная работа № 6. Исследование работы регистров, счетчиков, дешифраторов и полупроводниковых индикаторов**

**Цель работы:** изучение принципа функционирования, характеристик регистров, счётчиков, дешифраторов и полупроводниковых индикаторов.

### **6.1 Общие теоретические сведения**

*Регистр* – это последовательное устройство, предназначенное для записи, хранения и (или) сдвига информации, которая поступает и хранится в регистре в виде  $n$ -разрядных двоичных чисел. В общем случае регистр может выдавать информацию в последовательной или параллельной форме, преобразовывать прямой код числа в обратный (когда единицы заменяются нулями, а нули – единицами), и наоборот, а также выполнять логическое сложение и логическое умножение двоичных чисел.

В зависимости от способа ввода и вывода разрядов числа различают регистры параллельные, последовательные и параллельно-последовательные. В *параллельном* регистре ввод и вывод всех разрядов кодового числа осуществляется одновременно, в *последовательном* – разряды числа вводятся и выводятся последовательно, а в *параллельно-последовательном* регистре ввод числа производится в параллельной форме, а вывод – в последовательной, и наоборот.

*Дешифратор* (DC) или *декодер* – комбинационная схема с  $n$  входами и  $m = 2^n$  выходами ( $m > n$ ), преобразующая двоичный входной  $n$ -код (кодовое слово) в унитарный. На одном из  $m$  выходов дешифратора появляется логическая 1, а именно на том, номер которого соответствует поданному на вход двоичному коду.

На остальных выходах дешифратора выходные сигналы будут равны нулю. Дешифратор используют в том случае, когда нужно обращаться к различным цифровым устройствам по адресу, который представлен в двоичном коде.

*Счётчик* предназначен для счёта поступающих на его вход импульсов, в интервале между которыми он должен хранить информацию об их количестве. Поэтому счётчик состоит из запоминающих ячеек – триггеров обычно *D*- или *JK*-типа. Между собой ячейки счётчика соединяют таким образом, чтобы каждому числу импульсов соответствовали состояния 1 или 0 определенных ячеек. При этом совокупность единиц и нулей на выходах  $n$  ячеек, называемых *разрядами* счетчика, представляет собой  $n$ -разрядное двоичное число, которое

однозначно определяет количество прошедших через входы импульсов.

Каждый разряд счётчика может находиться в двух состояниях. Число устойчивых состояний, которое может принимать данный счётчик, называют *коэффициентом пересчёта*  $K_{сч}$ .

Если с каждым входным импульсом «записанное» в счётчике число увеличивается, то такой счётчик является *суммирующим*, если же оно уменьшается, то – *вычитающим*. Счётчик, работающий как на сложение, так и на вычитание, называют *реверсивным*.

## 6.2 Порядок выполнения работы

6.2.1 В программе Multisim собрать схему для испытания заданного преподавателем универсального регистра сдвига (рисунок 6.1) и установить в диалоговых окнах компонентов их параметры или режимы работы.

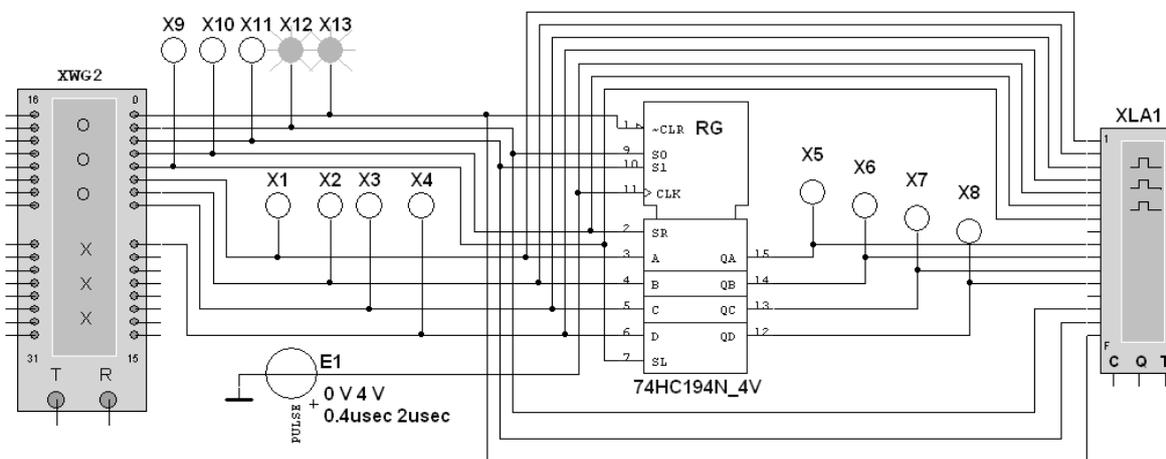


Рисунок 6.1 – Схема для моделирования работы универсального регистра сдвига

Универсальный 4-разрядный регистр сдвига 74HC194N\_4V (отечественные аналоги-микросхемы К155ИР1, К176ИР3) способен сдвигать информацию и вправо, и влево, возможна как параллельная, так и последовательная запись данных. Регистр имеет параллельные входы (A, B, C, D), параллельные выходы (QA, QB, QC, QD), последовательные входы (SR, SL), цепь прямой очистки регистра по входу  $\overline{CLR}$  и управляющие входы (S0 и S1) – входы задания режима:

S0 = 1, S1 = 1 – запись данных в регистр по входам A, B, C, D;

S0 = 1, S1 = 0 – сдвиг данных влево в направлении от QA к QD;

S0 = 0, S1 = 1 – сдвиг данных вправо в направлении от QD к QA;

S0 = 0, S1 = 0 – входы регистра недоступны (блокировка).

6.2.2 Записать в регистр заданное преподавателем двоичное число в параллельном и последовательном коде, заполнив ячейки памяти генератора слова XWG1 (рисунок 6.2) на основе правил функционирования регистра 74HC194\_4V, отражённых в таблице 6.1.

6.2.3 Снять временные диаграммы работы универсального регистра сдвига (рисунок 6.3), определить режимы его работы.

Таблица 6.1 - Правила функционирования регистра 74НС194\_4V

Сброс	Старт	Вход								Выход			
		Режим		Последовательный вход		Параллельный вход							
CLR	CLX	S0	S1	SR	SL	A	B	C	D	QA	QB	QC	QD
0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	0	0	0
1	0	x	x	x	x	x	x	x	x	QA <sub>0</sub>	QB <sub>0</sub>	QC <sub>0</sub>	QD <sub>0</sub>
1	↑	1	1	x	x	A	B	C	D	A	B	C	D
1	↑	1	0	1	x	x	x	x	x	1	QA <sub>n</sub>	QB <sub>n</sub>	QC <sub>n</sub>
1	↑	1	0	0	x	x	x	x	x	0	QA <sub>n</sub>	QB <sub>n</sub>	QC <sub>n</sub>
1	↑	0	1	x	1	x	x	x	x	QB <sub>n</sub>	QC <sub>n</sub>	QD <sub>n</sub>	1
1	↑	0	1	x	0	x	x	x	x	QB <sub>n</sub>	QC <sub>n</sub>	QD <sub>n</sub>	0
1	x	0	0	x	x	x	x	x	x	QA <sub>0</sub>	QB <sub>0</sub>	QC <sub>0</sub>	QD <sub>0</sub>

*Примечание* – 0 – низкий уровень; 1 – высокий уровень; x – любое состояние; ↑ – положительный перепад (с низкого уровня на высокий); QA<sub>0</sub>, QB<sub>0</sub>, QC<sub>0</sub>, QD<sub>0</sub> – стационарные уровни A, B, C, D до установки указанных состояний на входах; QA<sub>n</sub>, QB<sub>n</sub>, QC<sub>n</sub>, QD<sub>n</sub> – соответственно уровни A, B, C, D перед началом прохождения фронта самого последнего тактового импульса

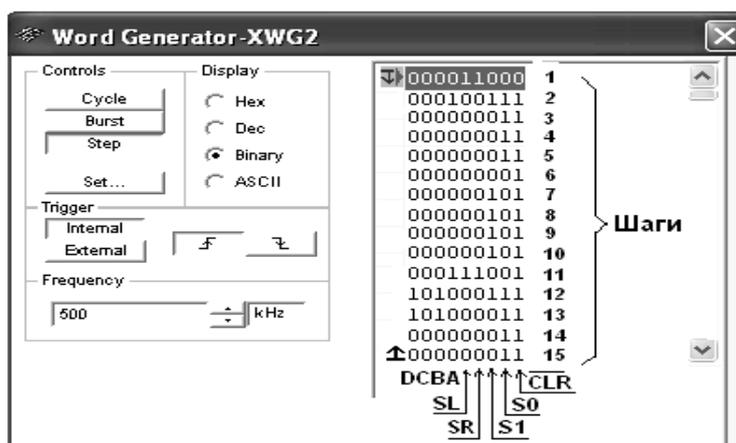


Рисунок 6.2 – Программа функционирования генератора слова XWG1

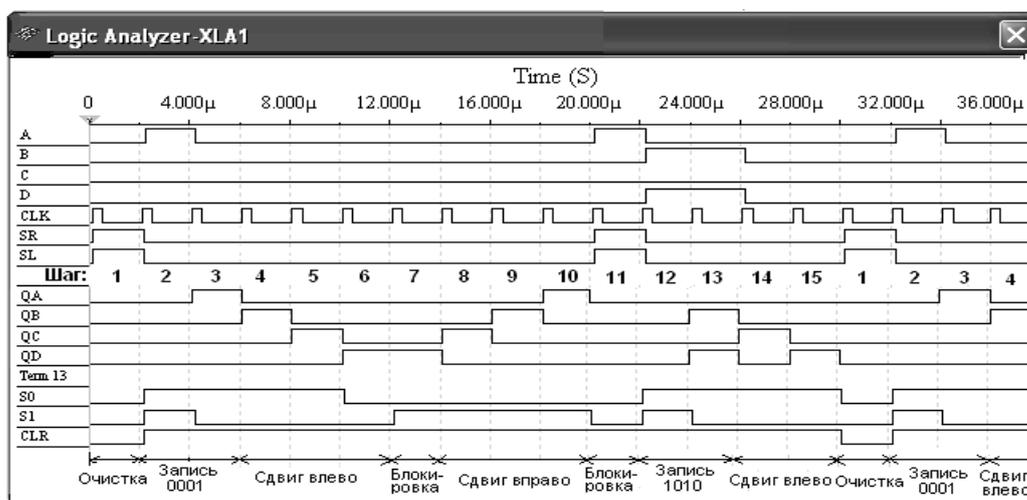


Рисунок 6.3 – Временные диаграммы работы универсального регистра сдвига

6.2.4 В программе Multisim собрать схему для испытания заданного преподавателем двоичного (двоично-десятичного) счётчика (рисунок 6.4) и установить в диалоговых окнах компонентов их параметры или режимы работы.

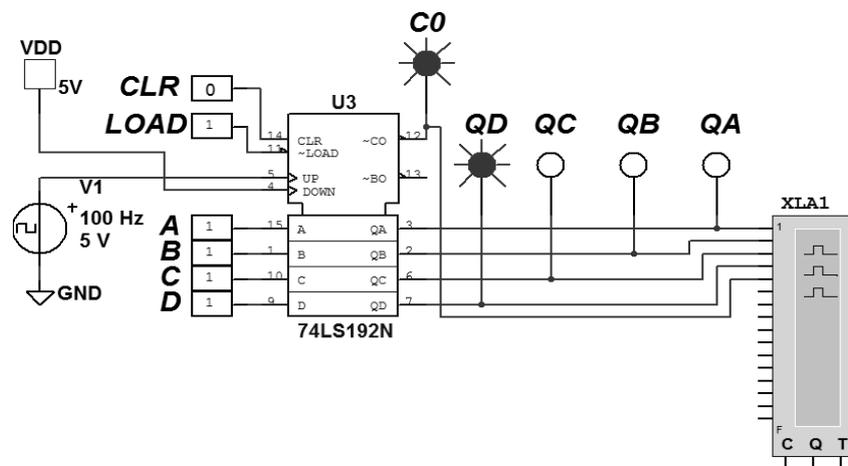


Рисунок 6.4 – Схема для моделирования работы счётчика

В схему включен синхронный двоичный 4-разрядный двоично-десятичный счётчик 74LS192N, к входу  $\overline{UP}$  которого подключен источник тактовых импульсов V1, а к выходам QA, QB, QC и QD – логические пробники. Выходы счётчика и дешифратора соединены с входами логического анализатора XLA1. При подаче тактовых импульсов на вход  $\overline{UP}$  обеспечивается прямой счёт. На вход  $\overline{DOWN}$  при этом следует подать логическую 1 (напряжение +5 В).

К входам A, B, C и D счётчика подключены цифровые константы для задания начального кода счётчика. Установка осуществляется подачей логического 0 на вход  $\overline{LOAD}$ . Сброс счётчика осуществляется при подаче логической 1 на вход CLR.

6.2.5 Промоделировать работу счётчика, сняв временные диаграммы их работы (рисунок 6.5).

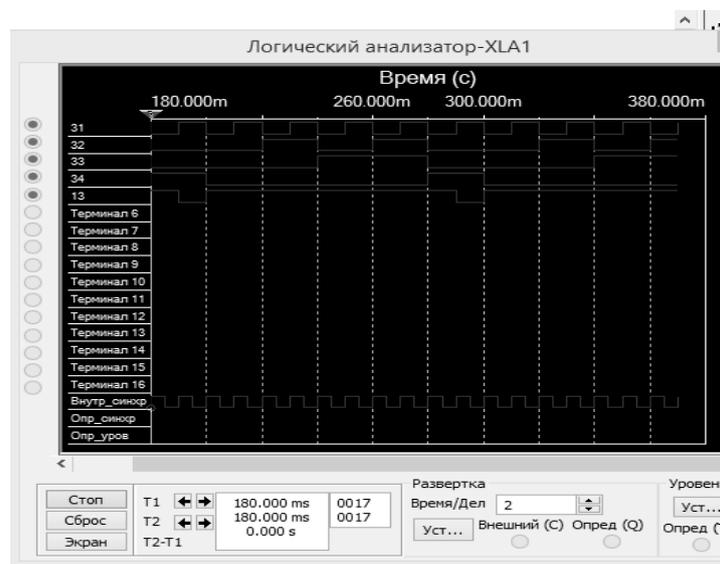


Рисунок 6.5 – Временные диаграммы работы счётчика

6.2.6 В программе Multisim собрать схему счётчика с заданным преподавателем коэффициентом счёта (рисунок 6.6).

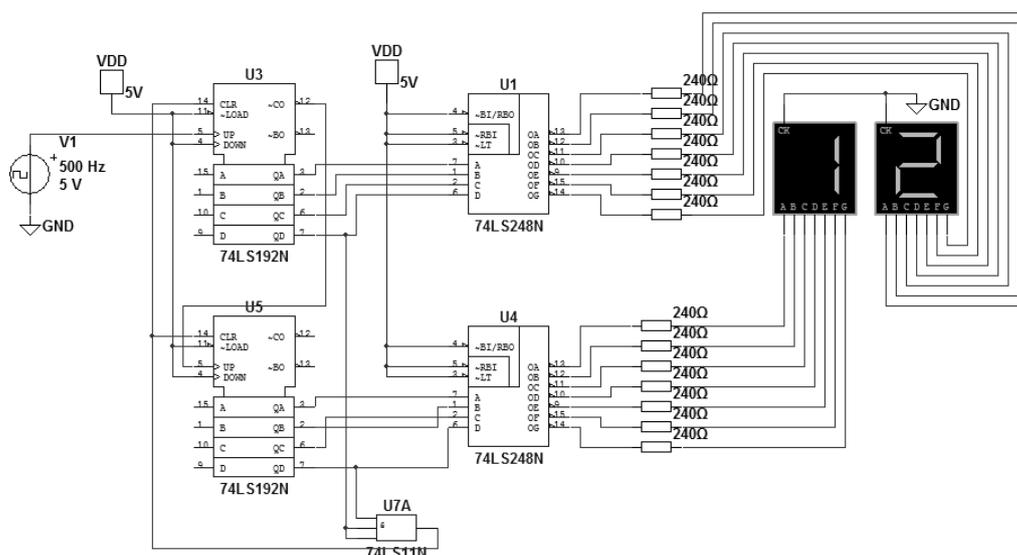


Рисунок 6.6 – Схема счётчика с дешифраторами и семисегментными индикаторами

Подключить к выходам счётчика семисегментный индикатор с дешифратором. Для ограничения входного тока дешифратора используются сопротивления 240 Ом. Для корректной работы дешифратора на его входы  $\overline{BI/RB0}$ ,  $\overline{RBI}$ ,  $\overline{LT}$  нужно подать сигналы логической 1 (+5 В). Семисегментный индикатор с общим коллектором, вывод СК подключается к GND. Обнуление счётчика производится при подаче логической единицы на входы CLR с выхода логического элемента 3И при формировании единичных сигналов на выходах счётчика, соответствующих заданному коэффициенту счёта ( $0100_2 = 4$  – десятки, нижний счётчик,  $1000_2 = 8$  – единицы, верхний счётчик, итого 48 – коэффициент счёта).

6.2.7 Проверить обеспечение счётчиком заданного коэффициента счёта и отображение его на семисегментных индикаторах.

6.2.8 На макетной плате собрать схему счётчика с заданным преподавателем коэффициентом счёта (см. рисунок 6.6). Подключить на выход счётчиков дешифраторы с семисегментными индикаторами через ограничивающие сопротивления 240 Ом. Подать на вход счётчиков прямоугольные импульсы от генератора, наблюдать обеспечение заданного коэффициента счёта.

6.2.9 Сделать выводы по результатам работы.

### 6.3 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, схемы для моделирования работы регистра, счётчика, дешифратора и семисегментного индикатора в среде Multisim, временные диаграммы работы регистра, счётчика, выводы по работе.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Приведите схему и опишите работу регистра.
- 2 Приведите схему и опишите работу счётчика.
- 3 Приведите схему и опишите работу дешифратора и семисегментного индикатора.
- 4 Опишите порядок исследования работы регистра, счётчика, дешифратора и семисегментного индикатора.

## **7 Лабораторная работа № 7. Исследование цифроаналоговых и аналого-цифровых преобразователей**

***Цель работы:*** исследование принципа работы цифроаналоговых и аналого-цифровых преобразователей.

### ***7.1 Общие теоретические сведения***

***Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП).*** ЦАП предназначены для преобразования цифровых сигналов в аналоговые. Такое преобразование необходимо, например, при восстановлении аналогового сигнала, предварительно преобразованного в цифровой для передачи на большое расстояние, или хранения (таким сигналом, в частности, может быть звук). Другой пример использования такого преобразования – получение управляющего сигнала при цифровом управлении устройствами, режим работы которых определяется непосредственно аналоговым сигналом (что, в частности, имеет место при управлении двигателями).

К основным параметрам ЦАП относят разрешающую способность, время установления, погрешность нелинейности и др.

***Аналого-цифровые преобразователи (АЦП).*** АЦП – это устройства, предназначенные для преобразования аналоговых сигналов в цифровые. Для такого преобразования необходимо осуществить квантование аналогового сигнала, т. е. мгновенные значения аналогового сигнала ограничить определенными уровнями, называемыми уровнями квантования.

Квантование представляет собой округление аналоговой величины до ближайшего уровня квантования, т. е. максимальная погрешность квантования равна  $+0,5h$  ( $h$  – шаг квантования).

К основным характеристикам АЦП относят число разрядов, время преобразования, нелинейность и др. Число разрядов – количество разрядов кода, связанного с аналоговой величиной, которое может вырабатывать АЦП. Часто говорят о разрешающей способности АЦП, которую определяют величиной, обратной максимальному числу кодовых комбинаций на выходе АЦП. Так, 10-разрядный АЦП имеет разрешающую способность  $(2^{10} = 1024)^{-1}$ , т. е. при шкале АЦП, соответствующей 10 В, абсолютное значение шага квантования

не превышает 10 мВ. Время преобразования – интервал времени от момента заданного изменения сигнала на входе АЦП до появления на его выходе соответствующего устойчивого кода.

Характерными методами преобразования являются следующие: параллельного преобразования аналоговой величины и последовательного преобразования.

## 7.2 Порядок выполнения работы

7.2.1 В программе Multisim на основании заданной преподавателем разрядности построить схему ЦАП (рисунок 7.1). Произвести измерение выходного напряжения ЦАП  $U_{вых}$  для разных значений цифрового сигнала на входе. Заполнить таблицу 7.1.

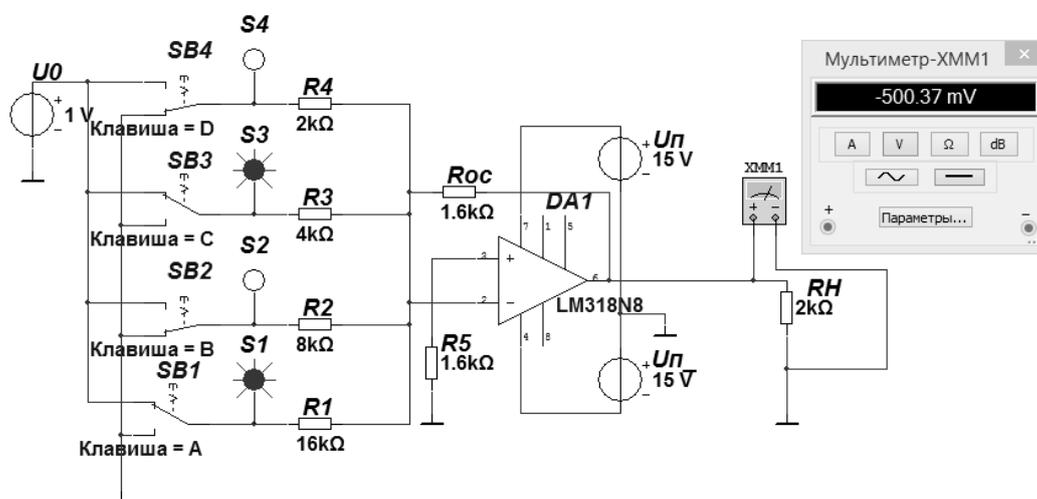


Рисунок 7.1 – Схема для моделирования работы ЦАП

Таблица 7.1 – Результаты моделирования работы ЦАП

Числовое значение на входе	S4	S3	S2	S1	$U_{вых}$ , В
0	0	0	0	0	
1	0	0	0	1	
2	0	0	1	0	
3	0	0	1	1	
...	...	...	...	...	
15	1	1	1	1	

7.2.2 В программе Multisim на основании заданной преподавателем разрядности и опорного напряжения  $U$  построить схему АЦП (рисунок 7.2). Изменяя входное напряжение с помощью резистора  $R6$  определить пороговые значения, при которых происходит переключение операционных усилителей  $X1...X4$ . Заполнить таблицу 7.2. Сравнить полученные значения напряжений с рассчитанными пороговыми значениями  $1/2U$ ,  $3/2U$ ,  $5/2U$ ,  $7/2U$ .

7.2.3 В программе Multisim собрать схему для исследования работы микросхемы АЦП  $ADC$  (рисунок 7.3). Источник постоянного напряжения  $V0$  задает

смещение так, чтобы изменения входного переменного напряжения, задаваемые источником V1, находились в области положительных значений.

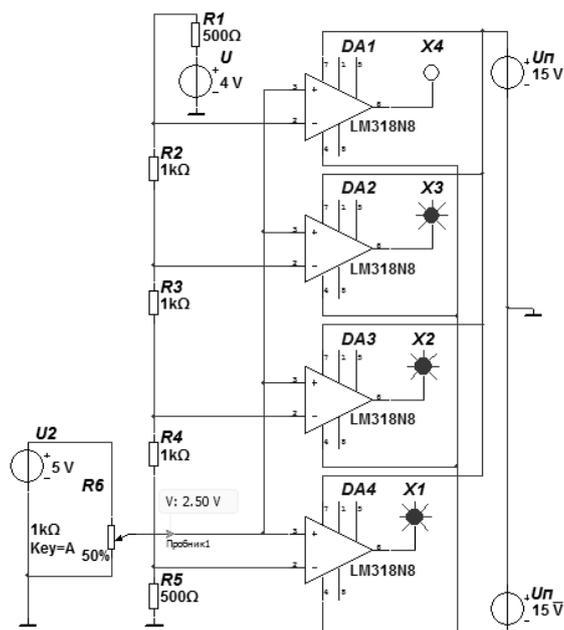


Рисунок 7.2 – Схема для моделирования работы АЦП параллельного преобразования

Таблица 7.2 – Результаты моделирования работы АЦП

Опорное напряжение $U$ , В	Напряжение на входе $U_{вх}$ , В	X4	X3	X2	X1
1		0	0	0	0
		0	0	0	1
		0	0	1	1
		0	1	1	1
		1	1	1	1

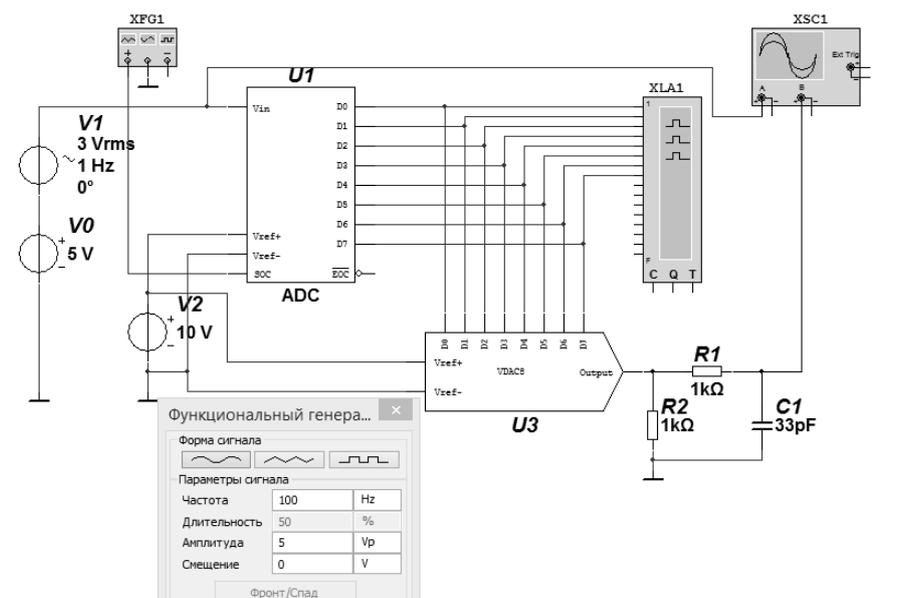


Рисунок 7.3 – Схема для моделирования работы микросхемы АЦП

Генератор XPG1 задает частоту, с которой отсчеты аналогового сигнала будут поступать на вход АЦП. Источник V2 задает опорное напряжение VREF+. Входной аналоговый сигнал подается на осциллограф XSG1 и отображается в виде синусоиды. Генерируемые двоичные коды отображаются на экране логического анализатора. Преобразуем полученные двоичные коды в сигнал на выходе ЦАП. Для этого в схему введена микросхема цифроаналогового преобразователя. Теперь можно оценить качество оцифровки аналогового сигнала и обратного преобразования. Восстановленный после оцифровки аналоговый сигнал подадим на второй канал осциллографа для сравнения (ступенчатая кривая) (рисунок 7.4).

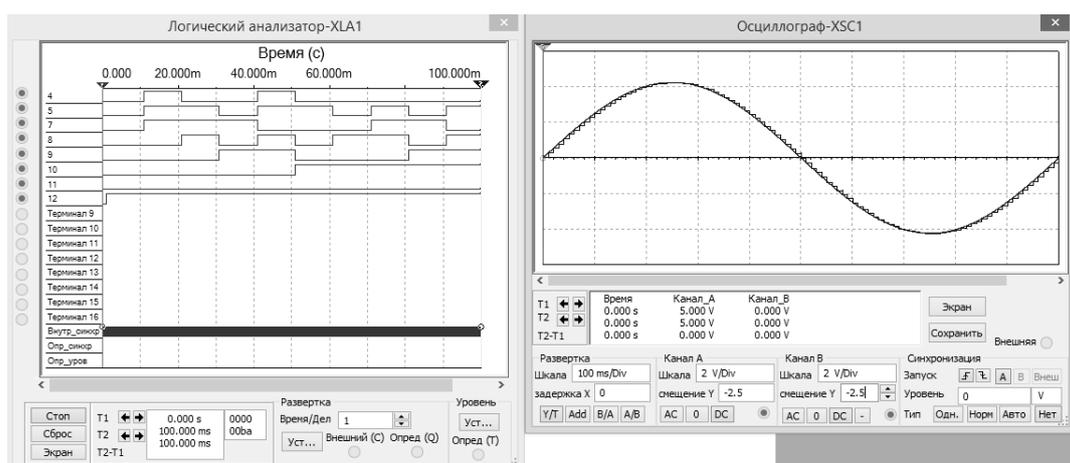


Рисунок 7.4 – Результаты моделирования работы микросхемы АЦП

На осциллограммах видны выбросы в выходном сигнале, возникающие в моменты коммутации ключей ЦАП, которые устраняются после НЧ-фильтрации с помощью простейшего ФНЧ, собранного на элементах R1, C1 (см. рисунок 7.3).

7.2.4 Сделать выводы по результатам работы.

### 7.3 Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, схемы для моделирования работы ЦАП и АЦП в среде Multisim, таблицы с результатами моделирования, временные диаграммы работы АЦП, выводы по работе.

### Контрольные вопросы

- 1 Приведите схему и опишите работу ЦАП с суммированием весовых токов.
- 2 Приведите схему и опишите работу АЦП параллельного преобразования.
- 3 Приведите схему и опишите работу АЦП последовательного приближения.
- 4 Микросхемы АЦП и порядок исследования их работы.

## 8 Лабораторная работа № 8. Исследование работы цифрового устройства на микроконтроллере

**Цель работы:** изучить устройство и принцип работы платы на основе микроконтроллера ESP32.

### 8.1 Общие теоретические сведения

Внешний вид платы на основе микроконтроллера ESP32 показан на рисунке 8.1.

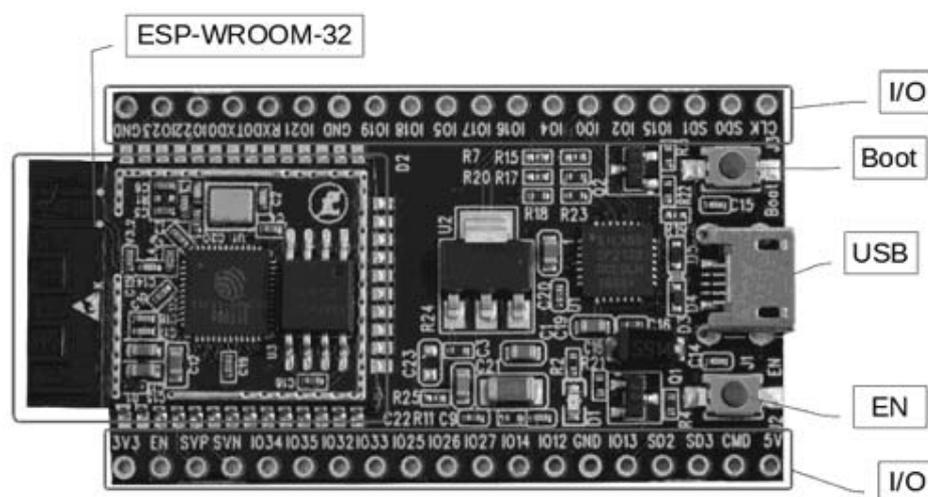


Рисунок 8.1 – Внешний вид платы

Основой модуля является 32-битный микроконтроллер ESP32-D0WDQ6. Рассмотрим назначение основных элементов платы.

**Micro-USB jack:** данный разъем используется для подключения модуля ESP32 к компьютеру с помощью USB-кабеля. С его помощью можно программировать модуль с компьютера, а также осуществлять последовательную связь.

**Кнопка EN:** это кнопка сброса модуля ESP32. Нажатие этой кнопки прерывает выполнение кода программы, которая запущена в модуле.

**Кнопка загрузки (Boot Button):** эта кнопка используется для загрузки программы в модуль ESP32. Ее необходимо нажимать после нажатия кнопки загрузки программы в Arduino IDE. Когда эта кнопка нажата вместе с кнопкой EN, модуль переходит в режим загрузки прошивки (firmware).

**Светодиод красного цвета (Red LED):** данный светодиод сигнализирует о том, что на модуль подано питание.

**Светодиод синего цвета (Blue LED):** данный светодиод подключен к контакту 2 GPIO-модуля. Его можно включать/выключать в программе. На некоторых модулях ESP32 этот светодиод может отсутствовать.

**Контакты ввода/вывода (I/O pins):** данные контакты могут выполнять функции цифрового ввода/вывода, аналогового ввода/вывода, ШИМ (PWM),

ПС, SPI, ЦАП (DAC) и многое другое. Более подробно про назначение данных контактов можно прочитать в даташите на модуль ESP32.

ESP-WROOM-32 – 32-битный микропроцессор, разработанный компанией Espressif systems.

## 8.2 Порядок выполнения работы

8.2.1 Изучите устройство и характеристики платы на основе микроконтроллера ESP32.

8.2.2 Скачайте дистрибутив Arduino IDE по адресу <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>, после чего установите его. Если у вас Arduino IDE уже установлена, то убедитесь что у вас свежая ее версия.

8.2.3 Откройте Arduino IDE и в ней выберите пункт меню Files -> Preferences, в открывшемся окне найдите поле Additional Boards Manager URLs, добавьте в него строку: [https://dl.espressif.com/dl/package\\_esp32\\_index.json](https://dl.espressif.com/dl/package_esp32_index.json).

8.2.4 Выберите пункт меню Tools -> Boards -> Board Managers, чтобы открыть окно менеджера плат (Board manager), в открывшемся окне выполните поиск ESP32.

8.2.5 Подключите ваш модуль ESP32 к компьютеру с помощью кабеля micro-USB. Убедитесь в том, что на модуле загорится светодиод красного цвета – это будет свидетельствовать об успешной подаче питания на модуль.

8.2.6 Откройте Arduino IDE, в ней выберите пункт меню Tools -> Boards и в нем выберите плату ESP32Dev.

8.2.7 Откройте диспетчер устройств в Windows и в нем посмотрите COM-порт, к которому подключен модуль ESP32.

8.2.8 Вернитесь снова в Arduino IDE и в ней в пункте меню Tools -> Port выберите COM-порт, к которому подключен модуль ESP32. После этого вы должны увидеть как в правом нижнем углу появится информация о том, с каким COM-портом вы работаете.

8.2.9 Загрузите в модуль программу для мигания светодиодом (Blink Program):

```
int LED_BUILTIN = 2;
void setup() {
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
  delay(1000);
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
  delay(1000);
}
```

После загрузки данной программы встроенный светодиод модуля должен начать мигать с интервалом 1 с.

8.2.10 Для загрузки кода программы в модуль нажмите на кнопку upload

в Arduino IDE, после этого вы в ее консоли должны увидеть процесс загрузки программы в модуль.

8.2.11 С помощью макетной платы через добавочное сопротивление подключите светодиод к выходу GPIO, указанному преподавателем.

8.2.12 Загрузите код программы для изменения яркости светодиода с помощью ШИМ-сигнала:

```
// номера портов для светодиодов
const int ledPin1 = 2;
// задаём свойства ШИМ-сигнала
const int freq = 5000;
const int ledChannel = 0;
const int resolution = 8;
void setup(){
  ledcSetup(ledChannel, freq, resolution);
  // привязываем канал к портам светодиодов
  ledcAttachPin(ledPin1, ledChannel);
}
void loop(){
  // увеличиваем яркость светодиода
  for(int dutyCycle = 0; dutyCycle <= 255; dutyCycle++){
    // меняем яркость светодиода
    ledcWrite(ledChannel, dutyCycle);
    delay(15);
  }
  delay(1000);
  // уменьшаем яркость светодиода
  for(int dutyCycle = 255; dutyCycle >= 0; dutyCycle--){
    // меняем яркость светодиода при помощи ШИМ:
    ledcWrite(ledChannel, dutyCycle);
    delay(15);
  }
  delay(1000);
}
```

8.2.13 Разработайте программу работы с платой по заданию преподавателя.

8.2.14 Сделайте выводы по результатам работы.

### ***8.3 Содержание отчёта***

Отчёт по работе должен содержать: цель работы, схемы подключения платы, коды программ, выводы по работе.

#### ***Контрольные вопросы***

- 1 Опишите назначение выводов платы на основе микроконтроллера ESP32.
- 2 Приведите основные технические характеристики модуля ESP32.
- 3 Опишите порядок работы с Arduino IDE.
- 4 Опишите команды для работы со светодиодом.

## Список литературы

- 1 **Марченко, А. Л.** Электротехника и электроника: учебник: в 2 т. Т. 1: Электротехника / А. Л. Марченко. – Москва: ИНФРА-М, 2023. – 574 с.
- 2 **Марченко, А. Л.** Электротехника и электроника: учебник: в 2 т. Т. 2: Электроника / А. Л. Марченко. – Москва: ИНФРА-М, 2023. – 391 с.
- 3 **Гальперин, М. В.** Электротехника и электроника : учебник / М. В. Гальперин. – 2-е изд. – Москва: ФОРУМ ; ИНФРА-М, 2020. – 480 с.
- 4 **Рыбков, И. С.** Электротехника : учебное пособие / И. С. Рыбков. – Москва: РИОР ; ИНФРА-М, 2020. – 160 с.
- 5 **Кузовкин, В. А.** Схемотехническое моделирование электрических устройств в Multisim : учебное пособие / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 336 с.

## Приложение А (справочное)

### Числовой ряд сопротивлений резисторов и конденсаторов

Числовой ряд E24, применяемый для присвоения номинальных значений сопротивлений резисторов и конденсаторов:

(1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1;

5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1) · 10<sup>n</sup>,

где  $n = -2; -1; 0; 1; 2; 3$  и т. д.

## Приложение Б (справочное)

Таблица Б.1 – Параметры биполярных транзисторов

Тип транзистора	$I_{K\max}$ , А	$U_{KЭ\max}$ , В	$h_{21Э}$	$I_{K0}$ , мкА	$R_{\delta}$ , Ом	$U_{Б0}$ , В
BC547A (КТ3102Б)	0,1	45	220	0,05	7	0,6
2N2218 (КТ928А)	0,8	30	25	5	3	1,0
BD135 (КТ815Б)	1,5	45	40	50	5	0,6
BD237 (КТ817Г)	4	60	25	100	2	0,6
2N3879 (КТ908А)	7	75	12	1,5	1,5	0,6

## Приложение В (справочное)

Таблица В.1 – Параметры полевых транзисторов

Тип транзистора	$U_{СИ\max}$ , В	$I_{C\max}$ , А	$U_{отс}$ , В
2N3970	-40	0,150	-4,0
2N3972	-40	0,03	-0,5
2N4860	-30	0,1	-2,0
2N5432	-25	0,150	-4,0
2N5434	-25	0,03	-1,0

## Приложение Г (справочное)

Таблица Г.1 – Параметры выпрямительных диодов

Тип диода	$I_{np \max}$ , А	$U_{обр \max}$ , В	$U_{np \max}$ , В
1N4148	0,15	75	1
1N3600	0,2	50	1
1N4001	1	50	1,1
1N4002	1	100	1,1
1N4934	1	100	1,1
1N5400	3	50	1,1
1N5401	3	100	1,1

## Приложение Д (справочное)

Таблица Д.1 – Технические данные однофазных трансформаторов

Тип трансформатора	$S_{ном}$ , В·А	Напряжение вторичной обмотки					
		Выводы вторичных обмоток					
		А	Б	В	Г	Д	Е
ТПП 258	31	5	5	10	10	2,6	2,6
ТПП 271	57	9,95	10	20	20	4,97	4,95
ТПП 281	72	72	10	10	20	20	2,62
ТПП 289	90	90	10	10	20	20	5