

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА

*Методические рекомендации к практическим занятиям  
для студентов направления подготовки  
12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»  
дневной формы обучения*



Могилев 2024

УДК 621.38+004.31  
ББК 32.844.1  
Э45

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «12» декабря 2023 г.,  
протокол № 4

Составитель канд. техн. наук, доц. А. А. Афанасьев

Рецензент канд. техн. наук Н. В. Герасименко

В методических рекомендациях рассмотрены вопросы проектирования аналоговых и цифровых электронных устройств на современной элементной базе, принципы их работы, приведены примеры решения типовых задач, задачи для самостоятельной работы. Составлены в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Электроника и микропроцессорная техника» для студентов направления подготовки 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» дневной формы обучения.

Учебное издание

## ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	И. В. Голубцова
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 Расчет схем с резисторами, конденсаторами, катушками индуктивности, трансформаторами. Моделирование их работы в Multisim.....	4
2 Частотный и временной анализ линейных электрических цепей. Моделирование их работы в Multisim.....	7
3 Проектирование схем с диодами, стабилитронами, стабилиторами, светодиодами. Моделирование их работы в Multisim.....	8
4 Методика расчета однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе с ОК, ОЭ. Моделирование его работы в Multisim.....	17
5 Методика расчета двухтактного усилителя мощности на транзисторах. Моделирование его работы в Multisim.....	21
6 Методика расчета инвертирующего и неинвертирующего усилителя; повторителя напряжения на ОУ. Моделирование их работы в Multisim.....	23
7 Методика расчета измерительного (инструментального) усилителя на основе ОУ. Моделирование его работы в Multisim.....	25
8 Методика расчета генератора сигналов и активных фильтров на ОУ. Моделирование их работы в Multisim.....	26
9 Методика расчета измерительных схем на операционных усилителях. Моделирование их работы в Multisim.....	28
10 Методика расчета аналоговых компараторов. Моделирование их работы в Multisim.....	32
11 Проектирование и моделирование работы в Multisim выпрямителей и сглаживающих фильтров.....	34
12 Проектирование нерегулируемых и регулируемых стабилизированных источников питания на основе микросхем стабилизаторов напряжения.....	35
13 Моделирование работы в среде Multisim логических элементов.....	37
14 Проектирование и моделирование в среде Multisim работы RS- и D-триггеров.....	41
15 Проектирование и моделирование в среде Multisim работы JK-триггеров.....	44
16 Проектирование и моделирование в среде Multisim работы двоичных счетчиков импульсов.....	46
17 Проектирование и моделирование в среде Multisim работы двоично-десятичных счетчиков импульсов.....	47
Список литературы.....	47

# 1 Расчет схем с резисторами, конденсаторами, катушками индуктивности, трансформаторами. Моделирование их работы в Multisim

## Краткие теоретические сведения

При последовательном соединении резисторов (рисунок 1.1) их общее сопротивление

$$R = R_1 + R_2 + R_3. \quad (1.1)$$

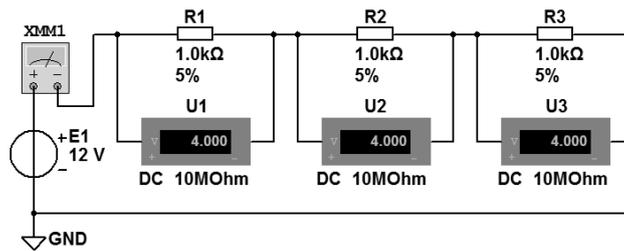


Рисунок 1.1 – Схема последовательного соединения резисторов в Multisim

Падение напряжения на каждом из них

$$U_{R_1} = I \cdot R_1; U_{R_2} = I \cdot R_2; U_{R_3} = I \cdot R_3. \quad (1.2)$$

Ток, протекающий через эти резисторы,

$$I = E_1 / R. \quad (1.3)$$

При параллельном соединении резисторов (рисунок 1.2) их общее сопротивление определяется из выражения

$$1 / R = 1 / R_1 + 1 / R_2 + 1 / R_3. \quad (1.4)$$

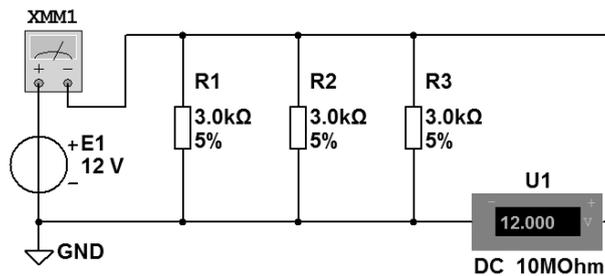


Рисунок 1.2 – Схема параллельного соединения резисторов в Multisim

Токи, протекающие через эти резисторы,

$$I_{R_1} = E_1 / R_1; I_{R_2} = E_1 / R_2; I_{R_3} = E_1 / R_3. \quad (1.5)$$

Общий ток в цепи

$$I = I_{R1} + I_{R2} + I_{R3}. \quad (1.6)$$

Токи в ветвях и падения напряжений на элементах при их смешанном соединении (рисунок 1.3) рассчитываются с использованием формул, аналогичных (1.1)–(1.6).

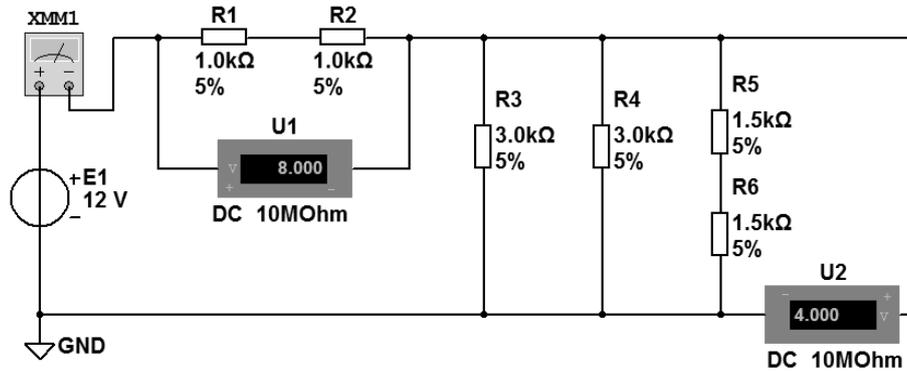


Рисунок 1.3 – Схема смешанного соединения резисторов в Multisim

На рисунке 1.4 показана схема с использованием резистора с регулируемым сопротивлением.

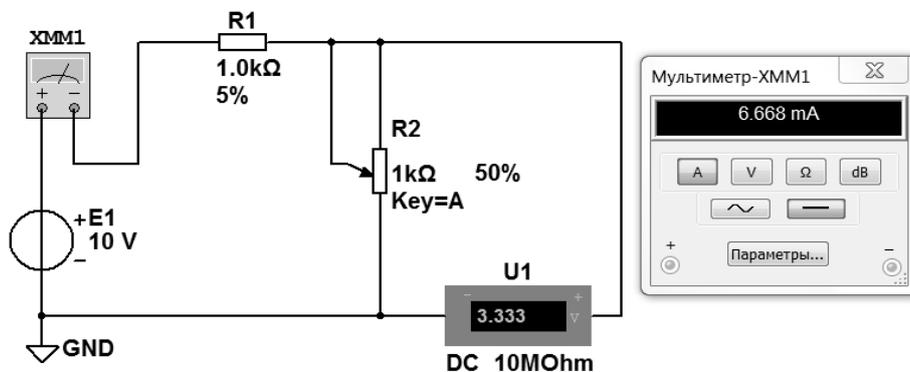


Рисунок 1.4 – Схема в Multisim для исследования электрической цепи с регулируемым сопротивлением

При последовательном соединении конденсаторов их общую емкость можно найти из выражений (рисунок 1.5)

$$1 / C_{12} = 1 / C1 + 1 / C2; \quad (1.7)$$

$$1 / C_{56} = 1 / C5 + 1 / C6. \quad (1.8)$$

Общая емкость параллельно соединенных конденсаторов (рисунок 1.5)

$$C_{3456} = C3 + C4 + C_{56}. \quad (1.9)$$

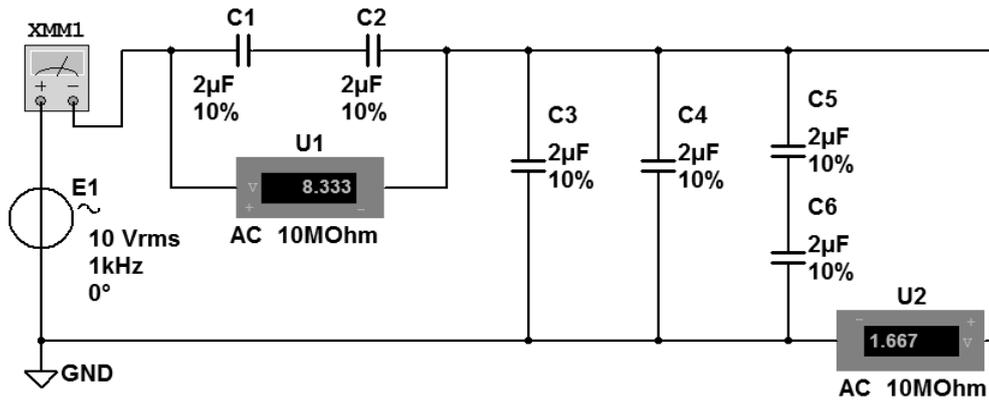


Рисунок 1.5 – Схема смешанного соединения конденсаторов в Multisim

Сопротивление конденсатора переменному току

$$X_C = 1 / 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C, \quad (1.10)$$

где  $f$  – частота переменного тока, Гц.

При последовательном соединении катушек индуктивности их общую индуктивность можно найти из выражений (рисунок 1.6)

$$L_{12} = L1 + L2; \quad (1.11)$$

$$L_{56} = L5 + L6. \quad (1.12)$$

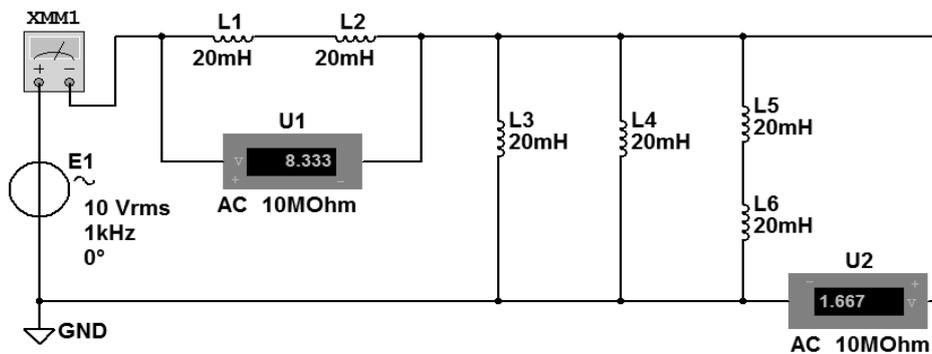


Рисунок 1.6 – Схема смешанного соединения катушек индуктивности в Multisim

При параллельном соединении катушек индуктивности их общую индуктивность можно найти из выражения (см. рисунок 1.6)

$$1 / L_{3456} = 1 / L3 + 1 / L4 + 1 / L_{56} . \quad (1.13)$$

Сопротивление катушки индуктивности переменному току

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L, \quad (1.14)$$

где  $f$  – частота переменного тока, Гц.

### ***Задачи для самостоятельного решения***

**Задача 1.** В соответствии с параметрами элементов  $E1, R1...R3$  и показаниями приборов  $U1...U3$  (см. рисунок 1.1) рассчитайте, что покажет прибор ХММ1. Выполните моделирование работы этой схемы в Multisim. Сравните результаты моделирования с расчетными.

**Задача 2.** В соответствии с параметрами элементов  $E1, R1...R3$  и показаниями прибора  $U1$  (см. рисунок 1.2) рассчитайте, что покажет прибор ХММ1. Выполните моделирование работы этой схемы в Multisim. Сравните результаты моделирования с расчетными.

**Задача 3.** В соответствии с параметрами элементов  $E1, R1...R6$  и показаниями приборов  $U1$  и  $U2$  (см. рисунок 1.3) рассчитайте, что покажет прибор ХММ1. Выполните моделирование работы этой схемы в Multisim. Сравните результаты моделирования с расчетными.

**Задача 4.** В соответствии с параметрами элементов  $E1, R1$  и  $R2$  и показаниями прибора  $U1$  (см. рисунок 1.4) рассчитайте, что покажет прибор ХММ1. Рассчитайте, в каком диапазоне будут изменяться показания прибора ХММ1 при изменении сопротивления  $R2$  от 0 % до 100 %. Выполните моделирование работы этой схемы в Multisim. Сравните результаты моделирования с расчетными.

**Задача 5.** В соответствии с параметрами элементов  $E1, C1...C6$  и показаниями приборов  $U1$  и  $U2$  (см. рисунок 1.5) рассчитайте, что покажет прибор ХММ1. Выполните моделирование работы этой схемы в Multisim. Сравните результаты моделирования с расчетными.

**Задача 6.** Что изменится в схеме (см. рисунок 1.5), если частоту  $f$  переменного тока увеличить в 10 раз?

**Задача 7.** В соответствии с параметрами элементов  $E1, L1...L6$  и показаниями приборов  $U1$  и  $U2$  (см. рисунок 1.6) рассчитайте, что покажет прибор ХММ1. Выполните моделирование работы этой схемы в Multisim. Сравните результаты моделирования с расчетными.

**Задача 8.** Что изменится в схеме (см. рисунок 1.6), если частоту  $f$  переменного тока увеличить в 10 раз?

## **2 Частотный и временной анализ линейных электрических цепей. Моделирование их работы в Multisim**

### ***Краткие теоретические сведения***

Частотный и временной анализ линейных электрических цепей может быть выполнен как теоретически, так и практически. На рисунке 2.1 приведена схема линейной электрической цепи с подключенными к ней приборами. С помощью частотомера ХФС1 измеряется частота переменного электрического сигнала в точке  $a$  схемы, а с помощью двухканального осциллографа ХСС1 могут быть определены частота и период переменного электрического сигнала

в точках *a* и *b* схемы, а также получены формы сигналов в этих точках.

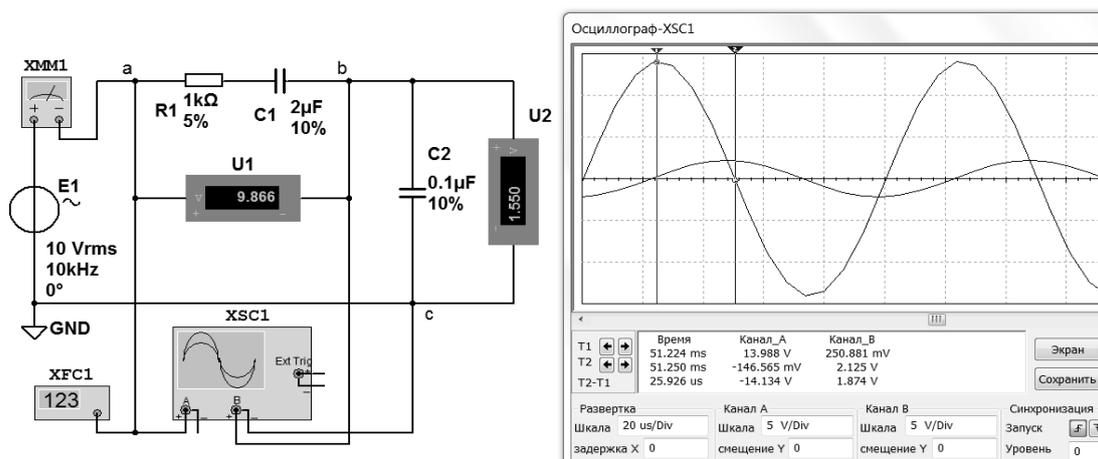


Рисунок 2.1 – Схема для частотного и временного анализа линейной электрической цепи

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 1.** Составьте схему, приведенную на рисунке 2.1, в Multisim и исследуйте её работу, подключив к ней показанные на схеме приборы.

**Задача 2.** По временным диаграммам сигналов, полученных с помощью осциллографа XSC1 (см. рисунок 2.1), определите амплитуду, частоту и период переменного электрического сигнала в точках *a* и *b* схемы.

**Задача 3.** Рассчитайте полное сопротивление цепи (см. рисунок 2.1) и определите величину тока, втекающего в узел *a*. Сравните полученное значение с показаниями амперметра XMM1.

## 3 Проектирование схем с диодами, стабилитронами, стабилиторами, светодиодами. Моделирование их работы в Multisim

### Краткие теоретические сведения

Полупроводниковый прибор, который имеет два электрода и один (или несколько) *p-n*-переход, называется диодом.

На рисунке 3.1, *a* приведено условное графическое обозначение полупроводникового диода на электрических схемах, его структура – на рисунке 3.1, *б*. Электрод диода, подключенный к области *p*, называют анодом, а электрод, подключенный к области *n*, – катодом.

*Выпрямительные диоды* предназначены для преобразования переменного тока в постоянный. Они являются одним из наиболее распространённых типов полупроводниковых диодов. Главное свойство выпрямительных диодов – односторонняя проводимость, наличие которой определяет эффект выпрямления.

Структура выпрямительных диодов базируется на несимметричном  $p$ - $n$ -переходе, в котором различие в концентрации основных носителей в каждой из областей значительно.

В сильнолегированную эмиттерную область (например, в область  $p$  на рисунке 3.1, б) вводится больше примеси, она имеет большую концентрацию основных носителей, чем высокоомная, слаболегированная база (область  $n$ ).

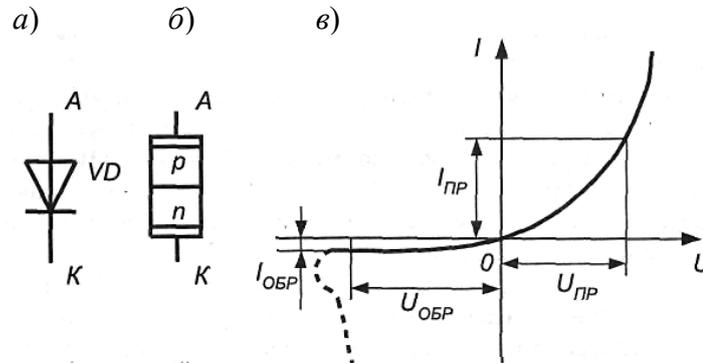


Рисунок 3.1 – Условное обозначение (а), структура (б) и статическая вольт-амперная характеристика (в) полупроводникового диода

При подаче прямого напряжения на диод  $p$ - $n$ -переход смещается в прямом направлении и происходит преимущественная инжекция дырок из эмиттера в базу, образуя диффузионный ток. При обратном напряжении в  $p$ - $n$ -переходе наблюдается экстракция неосновных носителей, которая определяет дрейфовый ток через переход. Поскольку концентрация основных в  $p$ - и  $n$ -областях носителей значительно превышает концентрацию неосновных носителей, то и величина прямого и обратного токов в выпрямительных диодах отличается на несколько порядков.

Выпрямительные полупроводниковые диоды изготавливаются, как правило, из кремния, германия или арсенида галлия. Классифицировать выпрямительные полупроводниковые диоды можно по конструкции и технологии изготовления.

Плоскостные диоды имеют большую площадь  $p$ - $n$ -перехода и используются для выпрямления больших токов (до 30 А). Точечные диоды имеют малую площадь  $p$ - $n$ -перехода и, соответственно, предназначены для выпрямления малых токов (до 30 мА).

Обычно выпрямительный полупроводниковый диод нормально работает при напряжениях, лежащих в диапазоне до 1000 В.

Статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода показана на рисунке 3.1, в.

Возможности полупроводникового диода как выпрямителя характеризуют следующие электрические параметры:

–  $U_{ПР}$  – постоянное прямое напряжение на диоде при заданном значении прямого тока. Обычно не превышает 1 В – для германиевых и 2 В – для кремниевых диодов. Эта величина связана с величиной контактной разности потенциалов, которая у кремния выше, чем у германия;

–  $I_{ПР}$  – постоянный выпрямленный ток через диод при заданном прямом напряжении. По величине выпрямленного тока диоды делятся на диоды малой ( $I_{ПР} < 0,3$  А), средней ( $0,3 < I_{ПР} < 10$  А) и большой ( $I_{ПР} > 10$  А) мощностей;

–  $I_{ОБР}$  – обратный ток, протекающий через диод при заданном обратном напряжении. Обычно указывается для вполне определённой температуры, т. к. сильно зависит от неё. У германиевого и кремниевого диодов  $I_{ОБР}$  различаются очень сильно, что объясняется различной шириной запрещённой зоны германия и кремния;

–  $R_{диф}$  – дифференциальное сопротивление диода, определяется как отношение приращения напряжения на диоде к вызвавшему его малому приращению тока.

Как любой электронный прибор, выпрямительный диод, наряду с электрическими параметрами, характеризуется предельно допустимыми значениями:

–  $I_{ПР.макс}$  – максимальный допустимый прямой ток, значение которого ограничивается разогревом  $p-n$ -перехода;

–  $U_{ОБР.макс}$  – максимально допустимое обратное напряжение, которое может выдержать диод в течение длительного времени без нарушения его работоспособности (до наступления пробоя  $p-n$ -перехода). Кремниевые диоды позволяют получать более высокие значения  $U_{ОБР.макс}$ , т. к. удельное сопротивление собственного кремния много больше сопротивления собственного германия;

–  $P_{макс}$  – максимально допустимая мощность, рассеиваемая диодом. Зависит от габаритов, массы диода и его конструкции. У наиболее мощных диодов площадь перехода достигает до  $1 \text{ см}^2$ , а масса – до  $15//20$  г; у маломощных диодов площадь переходов в  $100$  раз, а масса в  $10$  раз меньше;

–  $f_{макс}$  – предельная частота, на которой может работать диод, сохраняя свою работоспособность. Предельная рабочая частота выпрямительного диода напрямую связана с ещё одним важным параметром – ёмкостью диода;

–  $C_{д}$  – ёмкость диода, как правило, указывается для высокочастотных выпрямительных диодов и измеряется между выводами диода при заданных напряжении и частоте.

### **Примеры решения типовых задач**

**Задача 1.** Разработайте схему однополупериодного выпрямителя на полупроводниковом диоде для выделения мощности на активной нагрузке с сопротивлением  $R_H = 10$  Ом,  $P_H = 10$  Вт. Напряжение на первичной обмотке трансформатора  $U_{1д} = 220$  В,  $F = 50$  Гц. Определите действующие средние и максимальные токи и напряжения на нагрузке, действующее и максимальное напряжения на вторичной обмотке трансформатора, действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора, коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке. Выберите диод для выпрямителя, обоснуйте выбор. Выполните моделирование работы разработанной схемы в Multisim.

### Решение

Схема однополупериодного выпрямителя на полупроводниковом диоде имеет следующий вид (рисунок 3.2).

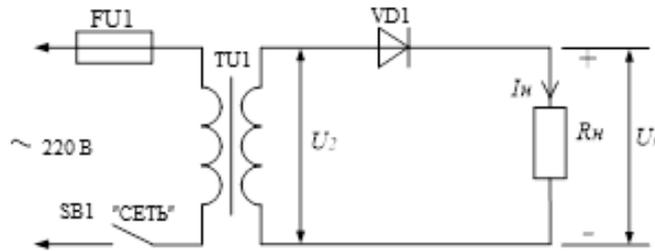


Рисунок 3.2 – Схема однополупериодного выпрямителя

Действующее значение напряжения на нагрузке  $R_H$

$$U_{H.д} = \sqrt{P_H \cdot R_H} = \sqrt{10 \cdot 10} = 10 \text{ В.}$$

Действующее значение тока через нагрузку

$$I_{H.д} = \frac{P_H}{U_{H.д}} = \frac{10}{10} = 1 \text{ А.}$$

Максимальное напряжение на нагрузке

$$U_{H.маx} = U_{H.д} \cdot \sqrt{2} = 10 \cdot 1,414 = 14,14 \text{ В.}$$

Максимальный ток через нагрузку

$$I_{H.маx} = I_{H.д} \cdot \sqrt{2} = 1 \cdot 1,414 = 1,414 \text{ А.}$$

Средние значения напряжения и тока

$$U_{H.ср} = U_{H.маx} / \pi = 14,14 / 3,14 = 4,5 \text{ В;}$$

$$I_{H.ср} = I_{H.маx} / \pi = 1,414 / 3,14 = 0,45 \text{ А.}$$

Так как токи через выпрямительный диод и нагрузку одинаковые, выбираем диод КД243Б, у которого  $I_{ПР.ср} = 1 \text{ А}$ ,  $U_{ПР} = 1,1 \text{ В}$ .

Действующее напряжение на вторичной обмотке трансформатора

$$U_{2д} = U_{H.д} + U_{ПР.VD1} = 10 + 1 = 11 \text{ В.}$$

Действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора

$$I_{1д} = I_{2д} U_{2д} / U_{1д} = 1 \cdot 11 / 220 = 50 \text{ мА.}$$

Коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке

$$K_{П} = U_{H.маx} / U_{H.ср} = 14,14 / 4,5 = 3,14.$$

Обратное напряжение, действующее на выпрямительный диод, равно амплитудному значению напряжения на вторичной обмотке трансформатора:

$$U_{2\max} = U_{H.\max} + U_{\text{пр.}VD1} = 14,14 + 1 = 15,14 \text{ В.}$$

Допустимое обратное напряжение у выбранного диода  $U_{\text{ОБР.}\max} = 100 \text{ В}$ .

Выбор диода для выпрямителя по прямому току и обратному напряжению сделан правильно.

Схема однополупериодного выпрямителя и результаты моделирования его работы в Multisim представлены на рисунке 3.3.

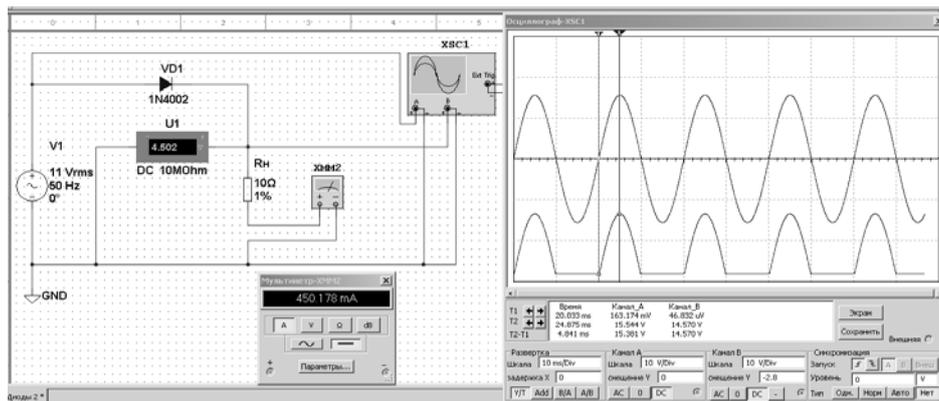


Рисунок 3.3 – Результаты моделирования работы однополупериодного выпрямителя в Multisim

Диод VD1 1N4002 является аналогом КД243Б. Мультиметр XMM2, работающий в режиме амперметра, и вольтметр U1 показывают средние значения тока и напряжения нагрузки  $R_H$ , совпадающие с расчетными. На экране двухканального осциллографа XSC1 изображены временные диаграммы выходного напряжения источника V1 (канал A) и напряжения на нагрузке  $R_H$  (канал B). Из временных диаграмм видно, что на нагрузке формируется напряжение только в те полупериоды, когда напряжения источника V1 положительное. В этом случае диод VD1 открыт и через него и нагрузку протекает прямой ток. При отрицательных напряжениях источника диод закрыт (имеет большое внутреннее сопротивление), ток через него и нагрузку близок к нулю.

**Задача 2.** Разработайте схему мостового выпрямителя на полупроводниковых диодах для питания активной нагрузки с сопротивлением  $R_H = 9 \text{ Ом}$  и потребляемой мощностью  $P_H = 16 \text{ Вт}$ . Напряжение на первичной обмотке трансформатора  $U_{1Д} = 220 \text{ В}$ ,  $F = 50 \text{ Гц}$ . Определите действующие, средние и максимальные токи и напряжения на нагрузке, действующее и максимальное напряжения на вторичной обмотке трансформатора, действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора, коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке. Выберите диоды для выпрямителя, обоснуйте выбор.

### Решение

Схема мостового выпрямителя на полупроводниковых диодах приведена на рисунке 3.4. Действующее значение напряжения на нагрузке  $R_H$

$$U_{H.д} = \sqrt{P_H \cdot R_H} = \sqrt{16 \cdot 9} = 12 \text{ В.}$$

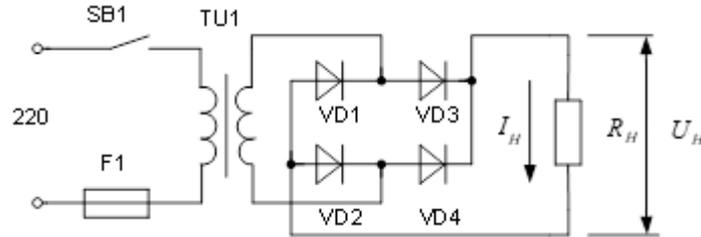


Рисунок 3.4 – Схема мостового выпрямителя

Действующее значение тока через нагрузку

$$I_{H.д} = \frac{P_H}{U_{H.д}} = \frac{16}{12} = 1,33 \text{ А.}$$

Максимальные значения напряжения и тока нагрузки

$$U_{H.маx} = U_{H.д} \sqrt{2} = 12 \cdot 1,414 = 16,97 \text{ В;}$$

$$I_{H.маx} = I_{H.д} \sqrt{2} = 1,33 \cdot 1,414 = 1,88 \text{ А.}$$

Средние значения напряжения и тока нагрузки

$$U_{H.ср} = \frac{2U_{H.маx}}{\pi} = \frac{2 \cdot 16,97}{3,14} = 10,8 \text{ В;}$$

$$I_{H.ср} = \frac{2I_{H.маx}}{\pi} = \frac{2 \cdot 1,88}{3,14} = 1,2 \text{ А.}$$

Так как токи через выпрямительные диоды и нагрузку одинаковые, выбираем в качестве мостового выпрямителя диодную сборку MDA970a2, у которой  $I_{ПР.маx} = 4 \text{ А}$ ,  $U_{ПР} = 1,65 \text{ В}$  при токе  $1,5 \text{ А}$ .

Действующее значение тока на вторичной обмотке трансформатора

$$U_{2д} = U_{H.д} + U_{ПР} = 12 + 1,65 = 13,65 \text{ В.}$$

Действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора

$$I_{1д} = \frac{I_{2д} U_{2д}}{U_{1д}} = \frac{1,33 \cdot 13,65}{220} = 82,5 \text{ мА.}$$

Коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке

$$K_{II} = \frac{U_{H.\max}}{U_{H.CP}} = \frac{16,97}{10,8} = 1,57.$$

Обратное напряжение, действующее на выпрямитель (два последовательно включенных диода), равно амплитудному значению напряжения на вторичной обмотке трансформатора:

$$U_{2\max} = U_{2Д} \cdot \sqrt{2} = 12 \cdot 1,41 = 16,94 \text{ В.}$$

Допустимое обратное напряжение у выбранного выпрямителя  $U_{OБP.\max} = 100 \text{ В.}$

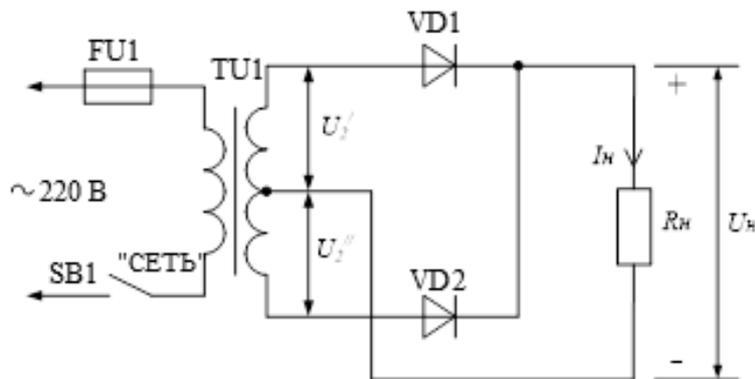


Рисунок 3.5 – Схема двухполупериодного выпрямителя со средней точкой трансформатора

**Задача 3.** На рисунке 3.6 приведена схема параметрического стабилизатора напряжения на стабилитроне КС168А. Его нагрузкой является светодиод HL1 АЛ307Б. ЭДС  $E$  источника питания изменяется от 10 до 14 В. Через светодиод должен протекать ток  $I_H = 10 \text{ мА}$  при изменении ЭДС  $E$  источника питания в заданном диапазоне.

Рассчитайте сопротивление резистора  $R1$ , обеспечивающего токовый режим работы стабилитрона  $VD1$  и светодиода  $HL1$ . Выполните моделирование работы заданной схемы стабилизатора в Multisim и по полученным результатам определите коэффициент стабилизации  $K_U$  выходного напряжения (напряжения на нагрузке) и нестабильность выходного напряжения  $\delta_i$  при изменении тока  $I_H$  от 5 до 15 мА при постоянной ЭДС  $E = 12 \text{ В.}$

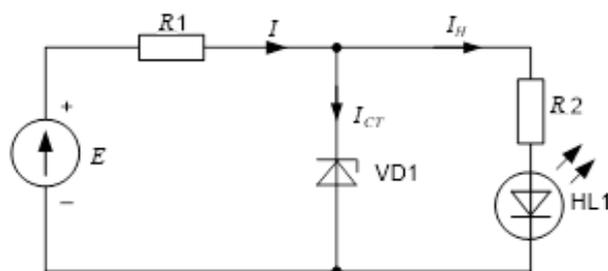


Рисунок 3.6 – Параметрический стабилизатор напряжения

### Решение

Стабилитрон КС168А имеет следующие параметры:

$U_{CT.HOM} = 6,8 \text{ В}$ ;  $I_{CT.HOM} = 10 \text{ мА}$ ;  $I_{CT.min} = 3 \text{ мА}$ ;  $I_{CT.max} = 45 \text{ мА}$ ;  $U_{CT.min} = 6,12 \text{ В}$ ;  
 $U_{CT.max} = 7,48 \text{ В}$ .

Параметры светодиода АЛ307Б:

- цвет свечения – красный;
- длина волны – 665 нм;
- постоянный прямой ток  $I_{ПР.HЛ1} = 10 \text{ мА}$ ;
- постоянное прямое напряжение  $U_{ПР.HЛ1} = 2 \text{ В}$ ;
- постоянный максимальный прямой ток – 22 мА.

Сопротивление резистора  $R1$  рассчитаем по формуле

$$R1 = \frac{E_{min} - U_{CT.HOM}}{I_{CT.HOM} + I_H} = \frac{10 - 6,8}{10 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-3}} = 160 \text{ Ом.}$$

Выбираем резистор  $R1 = 160 \text{ Ом}$  из ряда E24. Мощность, рассеиваемую на резисторе  $R1$ , определим для случая, когда  $E = 14 \text{ В}$ :

$$P_{R1} = (E_{max} - U_{CT.HOM})^2 / R1 = 7,2^2 / 160 = 0,324 \text{ Вт.}$$

Выбираем резистор  $R1$  с рассеиваемой мощностью 0,5 Вт.

Сопротивление резистора  $R2$  рассчитаем по формуле

$$R2 = \frac{U_{CT.HOM} - U_{ПР.HЛ1}}{I_{ПР.HЛ1}} = \frac{6,8 - 2}{10 \cdot 10^{-3}} = 480 \text{ Ом.}$$

Выбираем резистор  $R2 = 470 \text{ Ом}$  из ряда E24. Мощность, рассеиваемая на резисторе  $R2$ ,

$$P_{R2} = (U_{CT.HOM} - U_{ПР.HЛ1}) \cdot I_H = 4,8 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 0,048 \text{ Вт.}$$

Выбираем резистор  $R2$  с рассеиваемой мощностью 0,125 Вт.

Схема параметрического стабилизатора напряжения для моделирования его работы в Multisim представлена на рисунке 3.7.

Определим коэффициент стабилизации выходного напряжения как отношение нестабильности выходного напряжения к нестабильности входного напряжения:

$$K_U = \frac{\Delta U_{BX} / U_{BX}}{\Delta U_{ВЫХ} / U_{ВЫХ}} = \frac{4 \cdot 6,8}{10 \cdot 0,245} = 11,1,$$

где  $\Delta U_{BX} = E2 - E1 = 14 - 10 = 4 \text{ В}$ ;

$U_{BX} = 10 \text{ В}$ ;

$\Delta U_{ВЫХ} = U_{CT.HOM} = 6,8 \text{ В}$ .

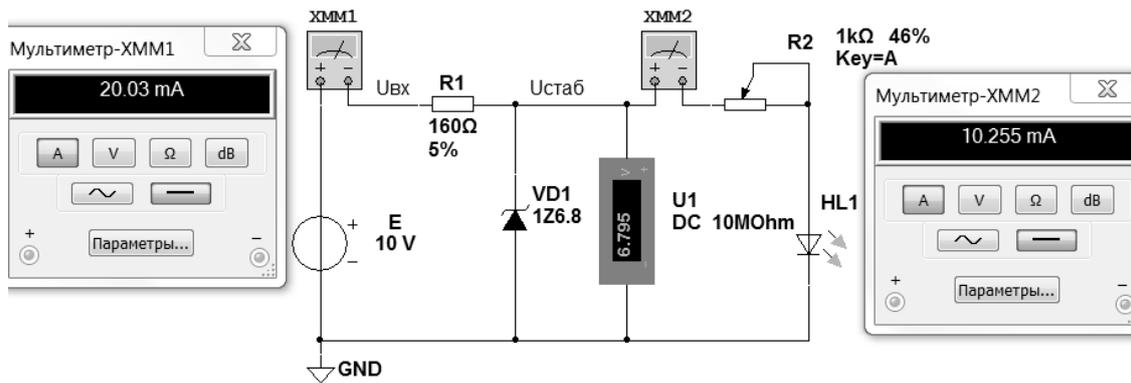


Рисунок 3.7 – Схема параметрического стабилизатора напряжения в Multisim

$\Delta U_{ВЫХ}$  определяем по результатам моделирования, изменяя ЭДС  $E$  и регистрируя показания мультиметром  $U1$  (см. рисунок 3.7):

$$\Delta U_{ВЫХ} = U_{СТ2} - U_{СТ1} = 0,245 \text{ В},$$

где  $U_{СТ2} = 7,036 \text{ В}$  при  $E2 = 14 \text{ В}$ ;

$U_{СТ1} = 6,86 \text{ В}$  при  $E1 = 10 \text{ В}$ .

Определим нестабильность выходного напряжения  $\delta_i$ , изменяя ток нагрузки от 5 до 15 мА с помощью резистора  $R2$  при неизменной ЭДС  $E = 12 \text{ В}$  и снимая показания с мультиметра  $U1$  (см. рисунок 3.7):

$$\delta_i = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ}} = \frac{U_{СТ1} - U_{СТ2}}{U_{ВЫХ}} = \frac{0,1}{6,85} = 0,015,$$

где  $U_{СТ1} = 6,994 \text{ В}$  при  $I_{ПР.НЛ1} = 5 \text{ мА}$ ;

$U_{СТ2} = 6,894 \text{ В}$  при  $I_{ПР.НЛ2} = 15 \text{ мА}$ .

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 4.** Разработайте схему однополупериодного выпрямителя на полупроводниковом диоде для выделения мощности на активной нагрузке с сопротивлением  $R_H = 12 \text{ Ом}$ ,  $P_H = 15 \text{ Вт}$ . Напряжение на первичной обмотке трансформатора  $U_{1Д} = 220 \text{ В}$ ,  $F = 50 \text{ Гц}$ . Определите действующие средние и максимальные токи и напряжения на нагрузке, действующее и максимальное напряжения на вторичной обмотке трансформатора, действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора, коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке. Выберите диод для выпрямителя, обоснуйте выбор.

**Задача 5.** Разработайте схему мостового выпрямителя на полупроводниковых диодах для питания активной нагрузки с потребляемой мощностью  $P_H = 10 \text{ Вт}$ . Напряжение на первичной обмотке трансформатора  $U_{1Д} = 220 \text{ В}$ ,  $F = 50 \text{ Гц}$ , ток через вторичную обмотку трансформатора  $I_{2Д} = 0,62 \text{ А}$ . Определите действующие, средние и максимальные токи и напряжения на нагрузке, действующее и максимальное напряжения на вторичной обмотке трансфор-

матора, действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора, коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке. Выполните моделирование работы разработанной схемы в Multisim.

**Задача 6.** Определите действующие, средние и максимальные токи и напряжения на нагрузке, действующее и максимальное напряжения на вторичной обмотке трансформатора, действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора, коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке для двухполупериодного выпрямителя на полупроводниковых диодах со средней точкой трансформатора, схема которого приведена на рисунке 3.5. Выберите диоды для выпрямителя, обоснуйте выбор. Сопротивление нагрузки  $R_H = 14$  Ом. Мощность, потребляемая нагрузкой,  $P_H = 18$  Вт. Напряжение на первичной обмотке трансформатора  $U_{1Д} = 220$  В,  $F = 50$  Гц.

**Задача 7.** Рассчитайте и выполните моделирование в Multisim работы параметрического стабилизатора напряжения на стабилитроне КС156А, схема которого изображена на рисунке 3.6. Его нагрузкой является светодиод HL1 АЛ307В. ЭДС  $E$  источника питания изменяется от 7 до 11 В. Через светодиод должен протекать ток  $I_H = 10$  мА при изменении ЭДС  $E$  источника питания в заданном диапазоне. Рассчитайте сопротивление резистора  $R_1$ , обеспечивающего токовый режим работы стабилитрона VD1 и светодиода HL1. По полученным результатам моделирования определите коэффициент стабилизации  $K_U$  выходного напряжения (напряжения на нагрузке) и нестабильность выходного напряжения  $\delta_i$  при изменении тока  $I_H$  от 5 до 15 мА при постоянной ЭДС  $E = 9$  В.

## 4 Методика расчета однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе с ОК, ОЭ. Моделирование его работы в Multisim

### *Пример решения типовой задачи*

**Задача 1.** Разработайте схему, выполните расчет и выбор элементов однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе КТ315Г с коэффициентом усиления  $K_U = 15$ , если ЭДС источника питания  $E = 12$  В, максимальный коллекторный ток  $I_{К.маx} = 1,6$  мА, частота среза  $f_C = 100$  Гц на уровне минус 3 дБ, коэффициент передачи тока базы  $\beta$  ( $h_{21Э}$ ) равен 50. Выполните моделирование его работы в Multisim.

### *Решение*

Схема усилителя имеет следующий вид (рисунок 4.1). В режиме покоя (при  $U_{ВХ} = 0$ ) напряжение на коллекторе должно быть равно половине ЭДС источника питания:

$$U_{КО} = \frac{E}{2} = \frac{12}{2} = 6 \text{ В.}$$

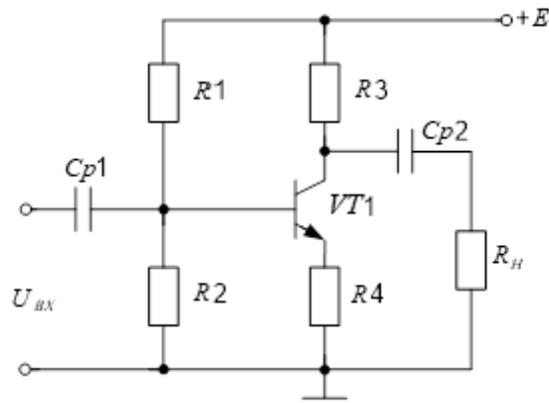


Рисунок 4.1 – Схема однокаскадного усилителя на транзисторе  $n-p-n$ -типа

Ток, протекающий через коллектор транзистора в режиме покоя, должен быть в 2 раза меньше заданного максимального:

$$I_{КО} = \frac{I_{K.\max}}{2} = \frac{1,6}{2} = 0,8 \text{ мА.}$$

Тогда

$$R3 = \frac{E - U_{КО}}{I_{КО}} = \frac{12 - 6}{0,8 \cdot 10^{-3}} = 7500 \text{ Ом.}$$

Выбираем стандартное значение  $R3 = 7,5 \text{ кОм}$ .

Так как коэффициент усиления

$$K_v = \frac{R3}{R4},$$

определим

$$R4 = \frac{R3}{K_v} = \frac{7500}{15} = 500 \text{ Ом.}$$

Выбираем стандартное значение  $R4 = 510 \text{ Ом}$ .

Так как коллекторный и эмиттерный токи практически равны,  $I_{ЭО} \cong I_{КО} = 0,8 \text{ мА}$ .

Тогда напряжение на эмиттере в режиме покоя  $U_{ЭО} = I_{КО} \cdot R4 = 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 510 = 4,1 \text{ В}$ .

Определим потенциал базы в режиме покоя:

$$U_{БО} = U_{ЭО} + U_{БЭ} = 4,1 + 0,6 = 4,7 \text{ В.}$$

Для нахождения сопротивлений резисторов  $R1$  и  $R2$  решим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{R1}{R2} = \frac{E - U_{BO}}{U_{BO}}; \\ \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} = 0,1 \cdot \beta \cdot R_4. \end{cases}$$

$$\frac{R1}{R2} = \frac{12 - 4,7}{4,7} = 1,55.$$

$$R1 = 1,55 \cdot R2.$$

$$\frac{1,55 \cdot R2}{2,55} = 0,1 \cdot 50 \cdot 510.$$

$$R2 = \frac{0,1 \cdot 50 \cdot 510 \cdot 2,55}{1,55} = 4195 \text{ Ом.}$$

Выбираем  $R2 = 4,3 \text{ кОм}$ ,  $R1 = 1,55 \cdot 4,3 = 6,7 \text{ кОм}$ . Выбираем  $R1 = 6,8 \text{ кОм}$ .

Расчет емкости разделительного конденсатора  $C_{P1}$  выполним исходя из того, что для входного сигнала усилитель представляет собой фильтр высоких частот (ФВЧ), эквивалентная схема которого имеет следующий вид (рисунок 4.2).

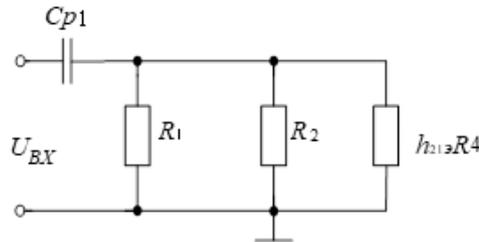


Рисунок 4.2 – Усилитель как ФВЧ для входного сигнала

На частоте среза для ФВЧ выполняется условие

$$2 \cdot \pi \cdot f_c = \frac{1}{R \cdot C_{P1}},$$

где  $R = R1 \parallel R2 \parallel h_{21э} \cdot R4$ .

Подставив в это выражение  $f_c = 100 \text{ Гц}$ , определим  $C_{P1}$ :

$$\begin{aligned} C_{P1} &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot R} = \frac{h_{21э} \cdot R4 \cdot R2 + h_{21э} \cdot R4 \cdot R1 + R1 \cdot R2}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot R1 \cdot R2 \cdot h_{21э} \cdot R4} = \\ &= \frac{50 \cdot 4300 \cdot 510 + 50 \cdot 6800 \cdot 510 + 6800 \cdot 4300}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 6800 \cdot 4300 \cdot 510 \cdot 50} = 0,66 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.} \end{aligned}$$

Выбираем  $C_{P1} = 0,68$  мкФ.

Элементы  $C_{P2}$  и  $R_H$  для выходного сигнала также представляют собой ФВЧ, для которого справедливо выражение

$$2 \cdot \pi \cdot f_C = \frac{1}{R_H \cdot C_{P2}}.$$

Приняв  $R_H = R_3 = 7,5$  кОм, найдем  $C_{P2}$ :

$$C_{P2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_C \cdot R_H} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 7500} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

Выбираем  $C_{P2} = 0,2$  мкФ.

Схема для моделирования работы усилителя в Multisim представлена на рисунке 4.3.

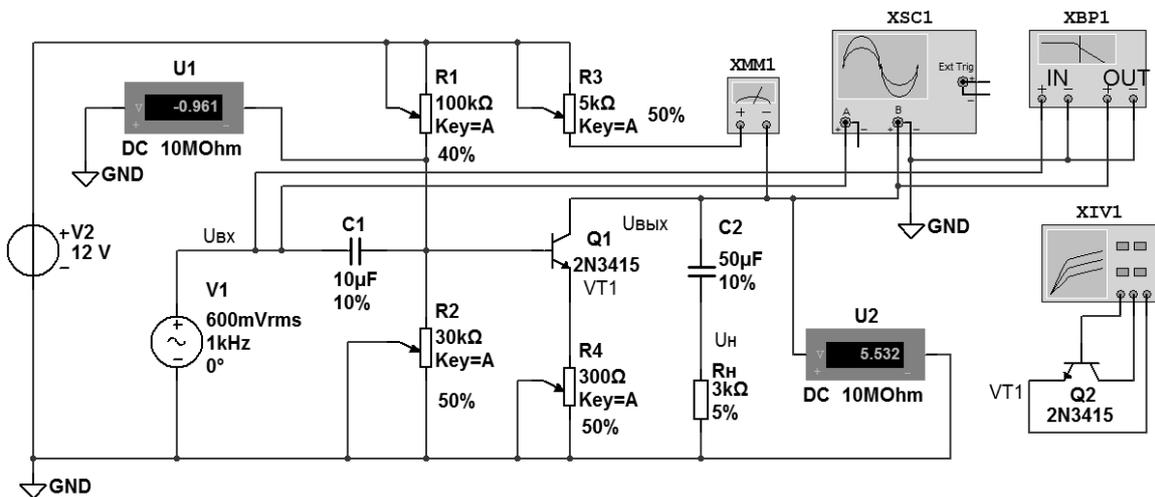


Рисунок 4.3 – Схема однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе  $n-p-n$ -типа в Multisim

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 3.** Разработайте схему, выполните расчет и выбор элементов однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе КТ302А с коэффициентом усиления  $K_V = 12$ , если ЭДС источника питания  $E = 6$  В, максимальный коллекторный ток  $I_{K,max} = 3$  мА, частота среза на уровне  $-3$  дБ составляет  $f_C = 200$  Гц,  $\beta = 100$ . Выполните моделирование работы усилителя в Multisim.

**Задача 4.** Рассчитайте ток коллектора  $I_K$  биполярного транзистора, если ток базы  $I_B = 120$  мкА, а коэффициент передачи тока базы  $h_{21Э} = 90$ .

**Задача 5.** Рассчитайте ток базы  $I_B$  биполярного транзистора, если ток коллектора  $I_K = 12$  мА, а коэффициент передачи тока базы  $h_{21Э} = 30$ .

**Задача 6.** Рассчитайте ток эмиттера  $I_Э$  биполярного транзистора, если ток коллектора  $I_K = 15$  мА, а коэффициент передачи тока базы  $h_{21Э} = 50$ .

## 5 Методика расчета двухтактного усилителя мощности на транзисторах. Моделирование его работы в Multisim

### Пример решения типовой задачи

**Задача 1.** Рассчитайте двухтактный усилитель мощности, схема которого представлена на рисунке 5.1, если  $E_K = \pm 20$  В,  $R_H = 8$  Ом,  $P_H = 10$  Вт.

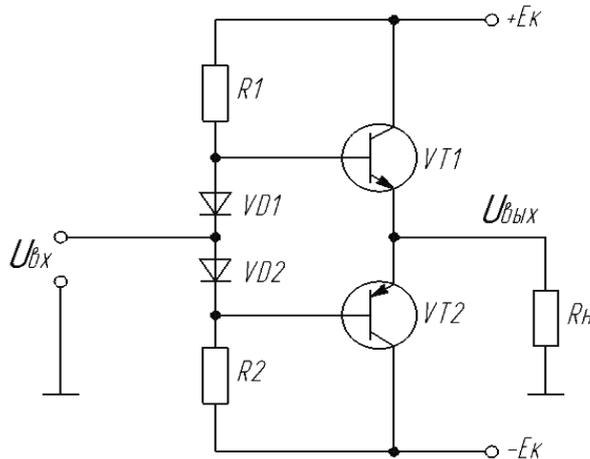


Рисунок 5.1 – Двухтактный усилитель мощности на биполярных транзисторах

### Решение

Определим действующее значение тока через нагрузку:

$$I_{H.д} = \sqrt{\frac{P_H}{R_H}} = \sqrt{\frac{10}{8}} = 1,18 \text{ А.}$$

Пиковое значение тока через нагрузку

$$I_{H.маx} = I_{H.д} \cdot \sqrt{2} = 1,18 \cdot 1,41 = 1,6 \text{ А.}$$

Напряжение на эмиттерах транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  при максимальном токе в нагрузке

$$U_{Э.маx} = R_H \cdot I_{H.маx} = 8 \cdot 1,66 = \pm 13,3 \text{ В.}$$

На  $VT1$   $U_{Э.маx} = +13,3$  В, на  $VT2$   $U_{Э.маx} = -13,3$  В.

Определим напряжение на базе транзистора  $VT1$ :

$$U_{Б.маx} = U_{Э.маx} + U_{БЭ} = 13,3 + 0,6 = 13,9 \text{ В.}$$

На резисторе  $R1$  падение напряжения составит

$$U_{R1} = +E_K - U_{B.\max} = 20 - 13,9 = 6,1 \text{ В.}$$

С учетом полученных максимальных значений токов через нагрузку, которые будут протекать и через транзисторы  $VT1$  и  $VT2$ , выбираем следующие транзисторы:  $VT1$  – КТ819Б,  $VT2$  – КТ818Б, у которых  $\beta = 20$ .

Определим базовые токи в транзисторах  $VT1$  и  $VT2$ :

$$I_{B.\max} = I_{H.\max} / \beta = 1,66/20 = 0,083 \text{ А.}$$

Для обеспечения полученных значений токов в базовых цепях транзисторов сопротивления резисторов  $R1$  и  $R2$  должны быть

$$R1 = R2 = U_{R1} / I_{B.\max} = 6,1/0,083 = 73,5 \text{ Ом.}$$

Выбираем стандартное значение сопротивления 75 Ом.

Определим ток, протекающий через резисторы  $R1$ ,  $R2$ , диоды  $VD1$ ,  $VD2$  в режиме покоя (при отсутствии входного сигнала  $U_{BX} = 0$ ):

$$I_{R1} = I_{R2} = \frac{2 \cdot E_K - 2 \cdot U_{ПР.VD}}{R1 + R2} = \frac{40 - 2}{150} = 0,25 \text{ А.}$$

По найденному значению тока через резисторы  $R1$  ( $R2$ ) в режиме покоя выбираем диоды типа КД226А, у которых  $I_{ПР.СР} = 1,7 \text{ А}$ ,  $U_{ОБР} = 100 \text{ В}$ . Рассчитаем мощность, рассеиваемую на резисторах  $R1$ ,  $R2$ :

$$P_{R1} = P_{R2} = I_{R1}^2 \cdot R1 = I_{R2}^2 \cdot R2 = (0,25)^2 \cdot 75 = 6,7 \text{ Вт.}$$

Резисторы  $R1$  и  $R2$  выбираем с рассеиваемой мощностью  $P = 10 \text{ Вт}$ .

### **Задачи для самостоятельного решения**

**Задача 2.** Выполните моделирование работы усилителя, рассчитанного в задаче 1, в Multisim. Сравните результаты моделирования с расчетными.

**Задача 3.** Рассчитайте двухтактный усилитель мощности, схема которого представлена на рисунке 5.1, если  $E_K = \pm 24 \text{ В}$ ,  $R_H = 4 \text{ Ом}$ ,  $P_H = 10 \text{ Вт}$ .

## 6 Методика расчета инвертирующего и неинвертирующего усилителя; повторителя напряжения на ОУ. Моделирование их работы в Multisim

### Примеры решения типовых задач

**Задача 1.** Разработайте электрическую схему в Multisim инвертирующего усилителя на ОУ с коэффициентом усиления  $K_y = 7$ . Выполните моделирование работы усилителя.

#### Решение

Схема усилителя имеет следующий вид (рисунок 6.1).

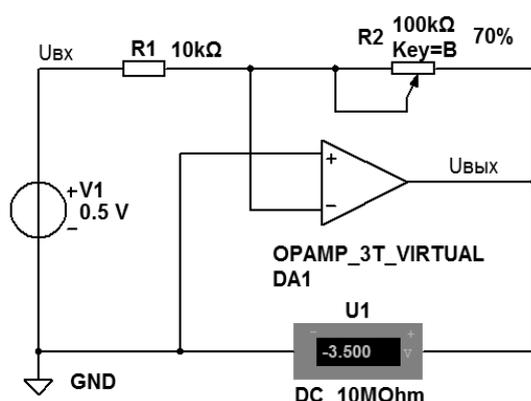


Рисунок 6.1 – Схема инвертирующего усилителя на ОУ в Multisim

Коэффициент усиления инвертирующего усилителя

$$K_y = \frac{R2}{R1} = 7.$$

Выбираем  $R1 = 10$  кОм. Тогда  $R2 = R1 \cdot K_y = 10 \cdot 7 = 70$  кОм.

**Задача 2.** Разработайте электрическую схему в Multisim неинвертирующего усилителя на ОУ с коэффициентом усиления  $K_y = 5$ . Выполните моделирование его работы.

#### Решение

Схема усилителя имеет следующий вид (рисунок 6.2). Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя

$$K_y = \frac{R2}{R1} + 1 = 5.$$

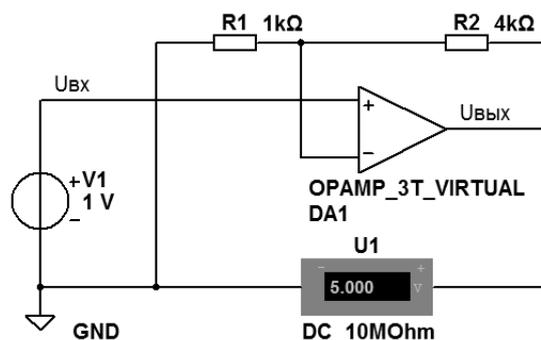


Рисунок 6.2 – Схема неинвертирующего усилителя на ОУ в Multisim

Выбираем  $R1 = 1$  кОм. Тогда  $R2 = R1 \cdot (K_V - 1) = 1 \cdot 4 = 4$  кОм.

Неинвертирующий усилитель на ОУ можно использовать в качестве повторителя напряжения, имеющего единичный коэффициент усиления ( $K_V = 1$ ) и очень высокое входное сопротивление. Работа такого устройства в Multisim показана на рисунке 6.3. Его выходное напряжение  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} = 4$  В, что и показывает вольтметр U1.

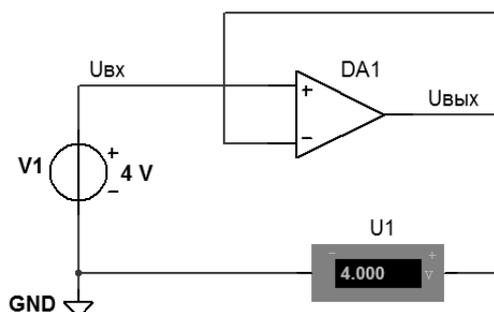


Рисунок 6.3 – Повторитель напряжения на ОУ в Multisim ( $K_V = 1$ )

### ***Задачи для самостоятельного решения***

**Задача 3.** Разработайте электрическую принципиальную схему инвертирующего усилителя на микросхеме К140УД8 с коэффициентом усиления  $K_V = 10$ . Выполните моделирование работы усилителя в Multisim.

**Задача 4.** Разработайте электрическую принципиальную схему инвертирующего усилителя на микросхеме К544УД2 с коэффициентом усиления  $K_V = 16$ . Выполните моделирование работы усилителя в Multisim.

**Задача 5.** Разработайте электрическую принципиальную схему неинвертирующего усилителя на микросхеме операционного усилителя К140УД17 с коэффициентом усиления  $K_V = 18$ . Выполните моделирование работы усилителя в Multisim.

**Задача 6.** На основе инвертирующего усилителя на ОУ разработайте электрическую схему в Multisim инвертора. Выполните моделирование его работы.

**Задача 7.** На основе неинвертирующего усилителя на ОУ разработайте электрическую схему в Multisim повторителя напряжения. Выполните моделирование его работы.

## 7 Методика расчета измерительного (инструментального) усилителя на основе ОУ. Моделирование его работы в Multisim

### Краткие теоретические сведения

Для усиления разностного сигнала используется схема на трёх операционных усилителях (рисунок 7.1). Выходной сигнал такого усилителя

$$U_{ВЫХ} = (U_{ВХ2} - U_{ВХ1}) \cdot \left( \frac{R2 + R3}{R1} + 1 \right).$$

Выражение во второй скобке определяет коэффициент усиления

$$K_{У} = \frac{R2 + R3}{R1} + 1.$$

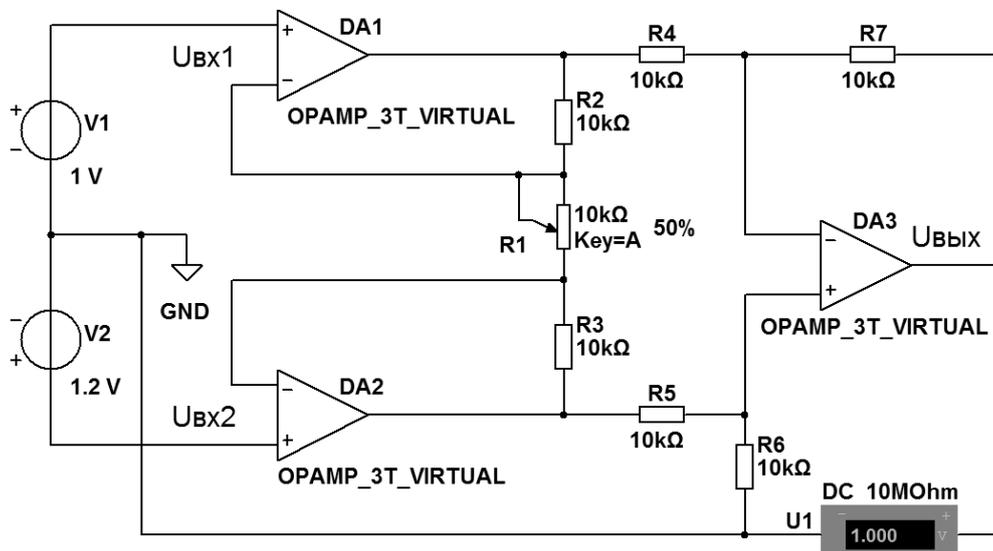


Рисунок 7.1 – Измерительный (инструментальный) усилитель на трех ОУ

### Пример решения типовой задачи

**Задача 1.** Разработайте электрическую схему в Multisim измерительного (инструментального) усилителя на трех ОУ с регулируемым коэффициентом усиления. Выполните моделирование его работы.

#### Решение

Схема инструментального усилителя на трех ОУ приведена на рисунке 7.1. Выбираем резисторы  $R2 = R3 = R4 = R5 = R6 = R7 = 10 \text{ кОм}$ . Тогда

$$U_{ВЫХ} = (U_{ВХ2} - U_{ВХ1}) \left( \frac{R2 + R3}{R1} + 1 \right).$$

Выражение во второй скобке определяет коэффициент усиления

$$K_y = \frac{R_2 + R_3}{R_1} + 1.$$

Выберем переменный резистор  $R_1 = 10$  кОм. С его помощью осуществляется регулировка коэффициента усиления.

### ***Задачи для самостоятельного решения***

**Задача 2.** Разработайте электрическую принципиальную схему измерительного (инструментального) усилителя на трех ОУ на микросхеме К140УД8 с регулируемым коэффициентом усиления в диапазоне от 3 до 12. Выполните моделирование работы разработанного усилителя в Multisim.

**Задача 3.** Разработайте электрическую принципиальную схему измерительного (инструментального) усилителя на трех ОУ на микросхеме К140УД6 с регулируемым коэффициентом усиления в диапазоне от 5 до 15. Выполните моделирование работы разработанного усилителя в Multisim.

## **8 Методика расчета генератора сигналов и активных фильтров на ОУ. Моделирование их работы в Multisim**

### ***Краткие теоретические сведения***

**Генераторы сигналов.** Генератором электрических колебаний называется устройство, преобразующее энергию источника постоянного тока в энергию переменного тока требуемой формы. В зависимости от формы выходного напряжения различают генераторы гармонических колебаний и генераторы негармонических колебаний (импульсные или релаксационные генераторы).

Независимо от формы выходного напряжения любой генератор может работать в одном из двух режимов: режиме автоколебаний или режиме запуска внешними импульсами. Генератор, работающий в режиме автоколебаний, обычно называют *автогенератором*. Выходное переменное напряжение формируется на его выходе сразу после подключения напряжения питания и не требует для начала работы подачи внешнего управляющего воздействия.

Генераторы, работающие в режиме запуска внешними импульсами, после подключения источника питания могут, сколь угодно долго, находиться в устойчивом состоянии, не формируя выходное переменное напряжение. При подаче управляющего сигнала на вход такого генератора, на его выходе формируется одиночный импульс, параметры которого полностью определяются собственными характеристиками устройства. Такой режим работы часто называют ждущим или заторможенным, а реализующие его устройства – *одновибраторами*.

В соответствии со сказанным, автогенераторный режим работы применяется в устройствах, используемых в основном в качестве задающих генераторов, а ждущий режим – в устройствах, преобразующих форму импульсов к требуемому виду.

Генераторы сигналов прямоугольной формы могут быть созданы с использованием специальных микросхем, например микросхемы LMS555CH (К1006ВИ1) (рисунок 8.1).

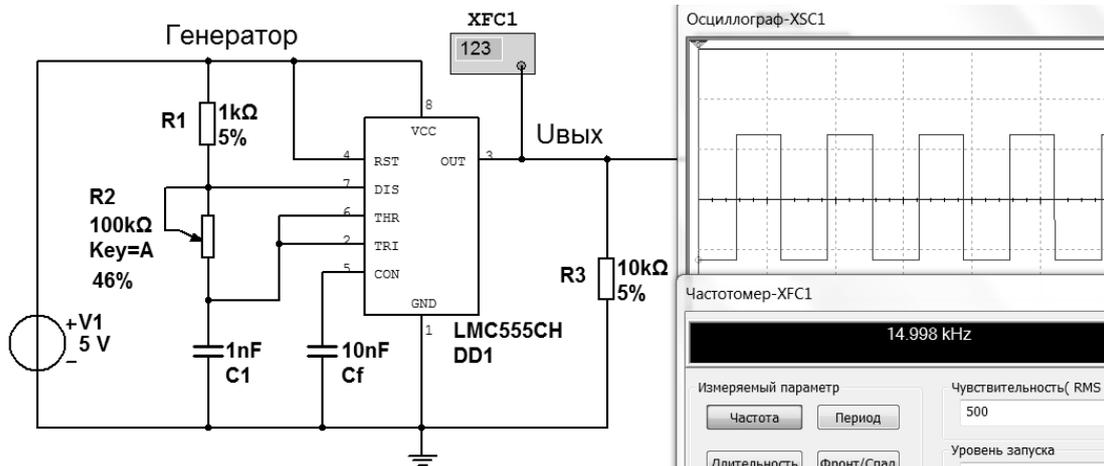


Рисунок 8.1 – Схема в Multisim генератора прямоугольных импульсов на микросхеме LMS555CH (К1006ВИ1)

Резисторы  $R_1$ ,  $R_2$  и конденсатор  $C_1$  задают период следования импульсов. Изменяя параметр одного из этих элементов, можно плавно или дискретно изменять частоту следования импульсов.

Работа генератора описывается выражением

$$F_{\Gamma} = \frac{0,7}{(2 \cdot R_1 + R_2) \cdot C_1} \quad (8.1)$$

**Активные фильтры на ОУ.** Для выделения полезного измерительного сигнала на фоне помех и ослабления амплитуд неинформативных сигналов используются электрические фильтры. Для их построения широко используются ОУ. На рисунке 8.2 приведена схема однозвенного полосового фильтра (ПФ). ПФ реализован на четырёх операционных усилителях DA1–DA4.

Расчет и выбор элементов для ПФ осуществляется в соответствии с частотой полезного измерительного сигнала  $f_{\Gamma}$  и заданной полосой пропускания ПФ  $\Delta f_{\text{ПФ}} = (f_{c2} - f_{c1})$  (рисунок 8.3).

На частоте  $f_{\Gamma}$  работа ПФ описывается следующим выражением:

$$R_{\phi} \cdot C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{\Gamma}}, \quad (8.2)$$

где  $R_{\phi} = R_6 = R_8$ .

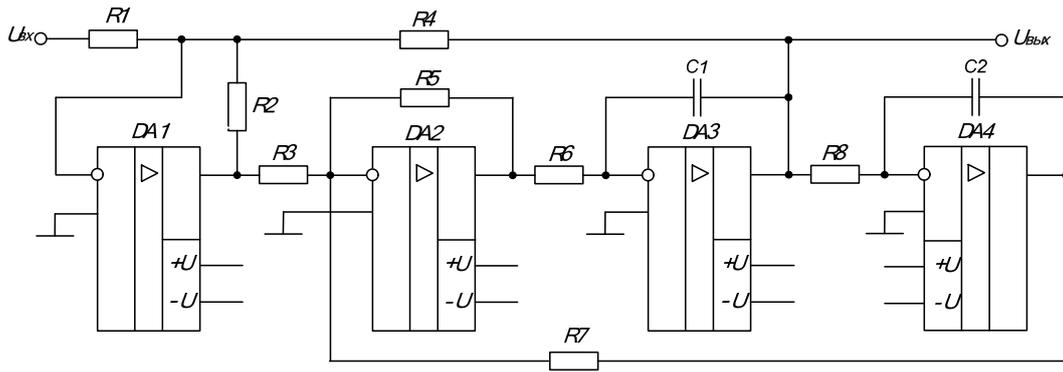


Рисунок 8.2 – Схема полосового фильтра на ОУ

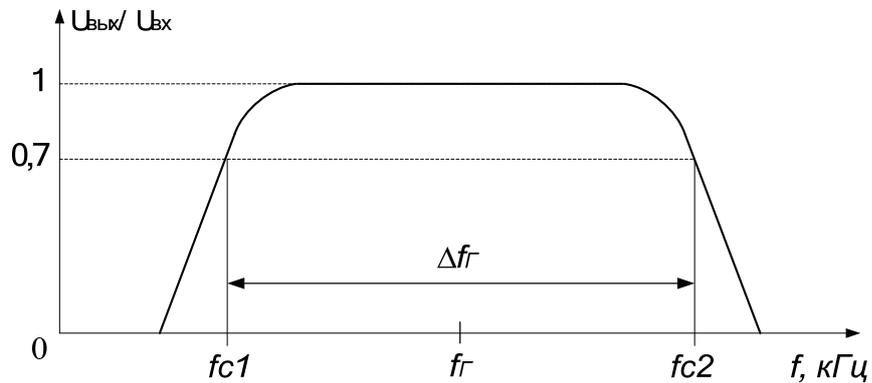


Рисунок 8.3 – Амплитудно-частотная характеристика ПФ

Емкости конденсаторов обычно берут равными:  $C2 = C3 = C$ . Тогда

$$R_{\phi} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{\Gamma} \cdot C}. \quad (8.3)$$

Значения сопротивлений резисторов  $R3 = R5 = R7 = R$  не критичны.

Добротность рассматриваемого полосового фильтра  $Q$  (определяется как отношение частоты  $f_{\Gamma}$  к полосе пропускания  $\Delta f_{\text{ПФ}}$ ), задаётся резисторами  $R4$  и  $R2$  и описывается выражением

$$Q = \frac{f_{\Gamma}}{\Delta f_{\text{ПФ}}} = \frac{R4}{R2}. \quad (8.4)$$

Коэффициент усиления рассматриваемого полосового фильтра  $K_{\text{У}} = R4 / R1$ .

Схема для моделирования работы фильтра приведена на рисунке 8.4.

### **Задачи для самостоятельного решения**

**Задача 1.** Составьте схему, приведенную на рисунке 8.1, в Multisim и исследуйте её работу, подключив к ней показанные на схеме приборы. Изменяя сопротивление резистора  $R2$ , определите диапазон изменения частоты выход-

ного сигнала.

**Задача 2.** По параметрам элементов  $R1$ ,  $R2$  и  $C1$ , указанных на рисунке 8.1, рассчитайте по формуле (8.1) частоту выходного сигнала. Сравните полученный результат с показаниями частотомера XFC1.

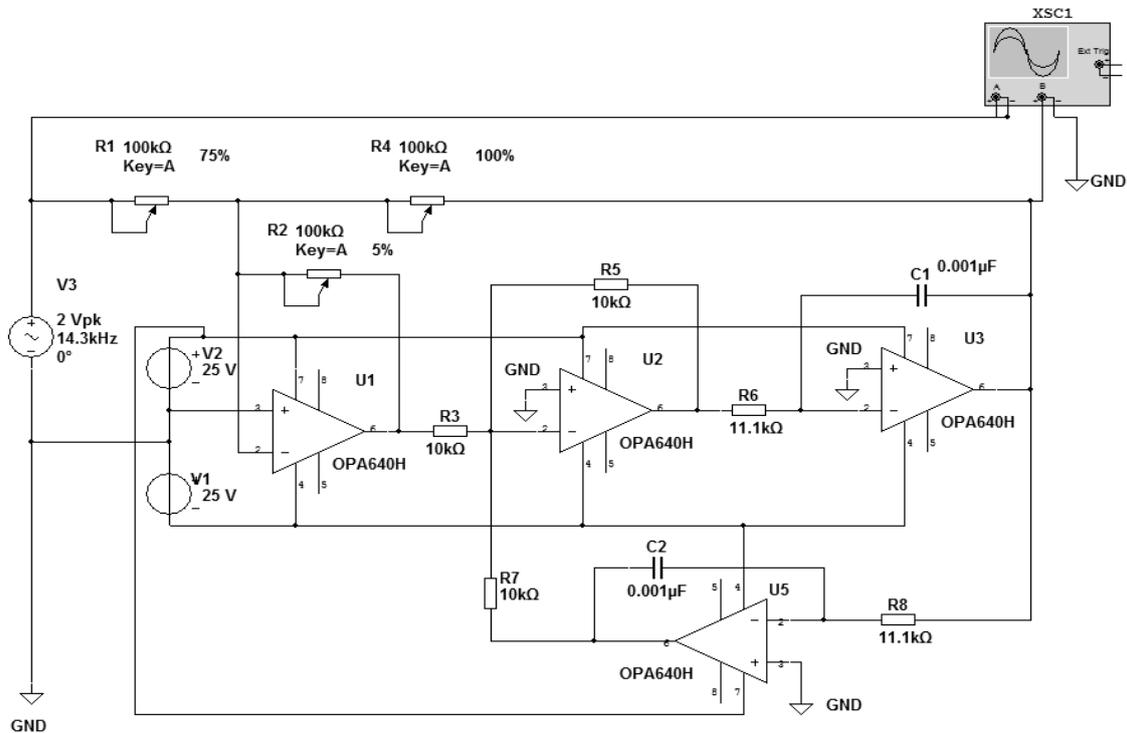


Рисунок 8.4 – Схема для моделирования работы ПФ в Multisim

**Задача 3.** Выполните расчет и выбор параметров элементов  $R1$ ,  $R2$  и  $C1$  генератора, приведенного на рисунке 8.1, чтобы частота генерируемого им сигнала была равна 80 кГц. Исследуйте работу генератора с такими параметрами в Multisim.

**Задача 4.** Выполните расчет и выбор элементов полосового фильтра, схема которого представлена на рисунке 8.4, если середина полосы пропускания  $f_T = 18$  кГц, а полоса пропускания  $\Delta f = 1,6$  кГц. Выполните моделирование работы разработанного ПФ в Multisim.

## 9 Методика расчета измерительных схем на операционных усилителях. Моделирование их работы в Multisim

### Примеры решения типовых задач

**Задача 1.** Разработайте схему, выполните расчет и выбор элементов неинвертирующего усилителя на основе операционного усилителя с регулируемым коэффициентом усиления ( $K_U = 4 \dots 14$ ). В каком диапазоне будет изменяться выходной сигнал, если на вход усилителя подать сигнал  $U_{ВХ} = 200$  мВ?

### Решение

Схема неинвертирующего усилителя на основе операционного усилителя для усиления измерительного сигнала  $U_{BX}$  приведена на рисунке 9.1.

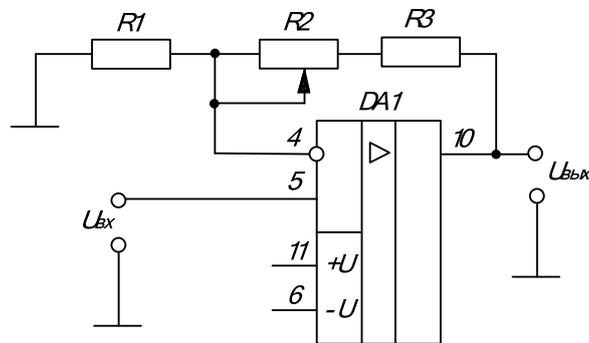


Рисунок 9.1 – Схема неинвертирующего усилителя на основе ОУ для усиления измерительного сигнала

$K_{УС.min} = 1 + R3 / R1 = 4$ . Выбираем  $R1 = 1$  кОм. Тогда  $R3 = 3$  кОм.

$K_{УС.max} = 1 + (R3 + R2) / R1 = 11$ . Находим  $R2 = 10$  кОм.

$U_{ВЫХ.min} = K_{УС.min} \cdot U_{BX} = 4 \cdot 0,2 = 0,8$  В.

$U_{ВЫХ.max} = K_{УС.max} \cdot U_{BX} = 14 \cdot 0,2 = 2,8$  В.

**Задача 2.** Разработайте схему, выполните расчет и выбор элементов усилителя на основе трёх операционных усилителей для усиления разностного сигнала  $\Delta U_{ab} = U_a - U_b$ , формирующегося в диагонали измерительного моста (рисунок 9.2) и изменяющегося в диапазоне от 0 до 300 мВ, до 6 В.

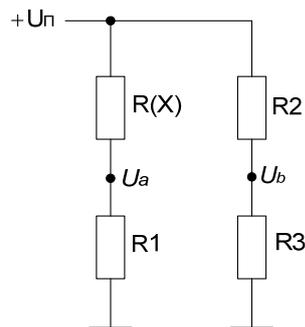


Рисунок 9.2 – Схема измерительного моста с резистивным датчиком  $R(X)$

### Решение

Схема измерительного усилителя на основе трёх операционных усилителей для усиления разностного сигнала  $\Delta U_{ab} = U_a - U_b$  приведена на рисунке 9.3.

Выбираем  $R2 = R3 = R4 = R5 = R6 = R7 = R = 10$  кОм и  $R1 = k \cdot R$ . Тогда напряжение на выходе усилителя будет описываться выражением

$$U_{ВЫХ} = (1 + 2 / k) \cdot \Delta U_{ab}.$$

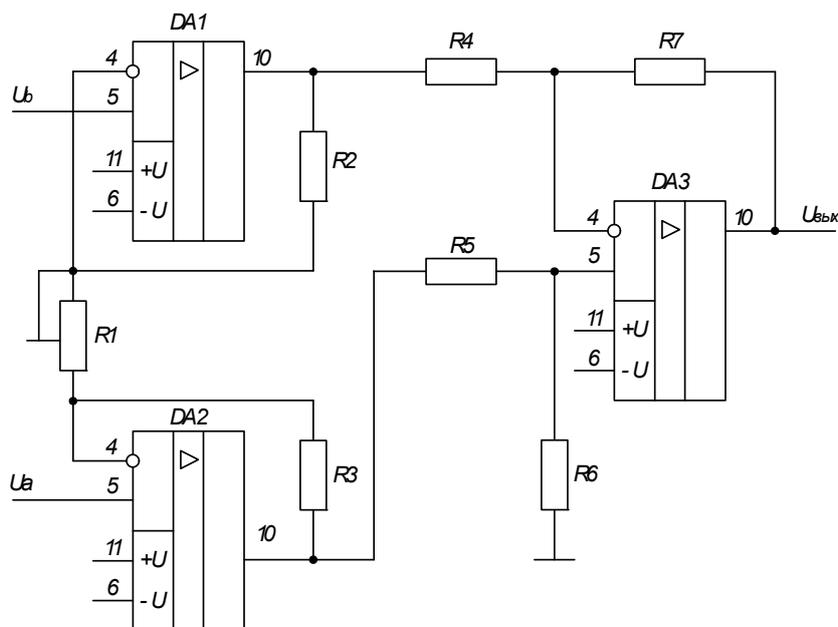


Рисунок 9.3 – Схема измерительного усилителя на трёх ОУ

Используя заданное значение напряжения на выходе усилителя  $U_{ВЫХ} = 6$  В и разностный сигнал  $\Delta U_{ab} = 0,3$  В, найдем из этого выражения коэффициент  $k = 2 \cdot \Delta U_{ab} / (U_{ВЫХ} - \Delta U_{ab}) = 2 \cdot 0,3 / (6 - 0,3) = 0,105$ . Тогда  $R_1 = k \cdot R = 0,105 \cdot 10 = 1,05$  кОм. Выбираем  $R_1 = 1,5$  кОм переменным с номинальным сопротивлением, соответствующим ряду Е6. Изменяя его сопротивление, можно точно получать заданное значение напряжения на выходе усилителя.

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 3.** Выполните моделирование в Multisim работы усилителя, разработанного в задаче 1.

**Задача 4.** Выполните моделирование в Multisim работы усилителя, разработанного в задаче 2.

**Задача 5.** Разработайте схему, выполните расчет и выбор элементов неинвертирующего усилителя на основе операционного усилителя с регулируемым коэффициентом усиления ( $K_U = 3 \dots 12$ ). В каком диапазоне будет изменяться выходной сигнал, если на вход усилителя подать сигнал  $U_{ВХ} = 170$  мВ? Выполните моделирование его работы в Multisim.

**Задача 6.** Разработайте схему, выполните расчет и выбор элементов измерительного усилителя на основе трёх операционных усилителей для усиления разностного сигнала  $\Delta U_{ab} = U_a - U_b$ , формирующегося в диагонали измерительного моста (см. рисунок 9.2) и изменяющегося в диапазоне от 0 до 420 мВ, до 9 В. Выполните моделирование его работы в Multisim.

## 10 Методика расчета аналоговых компараторов. Моделирование их работы в Multisim

### Пример решения типовой задачи

**Задача 1.** Разработайте электрическую принципиальную схему компаратора с гистерезисом на основе микросхемы операционного усилителя К574УД2 с напряжением срабатывания  $U_{CPAB} = 6,7$  В для преобразования входного синусоидального сигнала с амплитудой  $\pm U_{a.max} = 11,5$  В. Нарисуйте в масштабе временные диаграммы входных и выходного сигналов. Период синусоидального сигнала возьмите произвольно без указания его числового значения на временных диаграммах.

### Решение

Схема компаратора с гистерезисом показана на рисунке 10.1. Напряжение  $U_{BX}$ , подаваемое на вход компаратора, сравнивается с напряжением  $U_{CPAB}$ , которое рассчитывается по формуле

$$U_{CPAB} = U_{ВЫХ.max\ OY} \cdot R1 / (R1 + R2).$$

Оно поступает по цепи обратной связи с выхода операционного усилителя на его неинвертирующий вход.

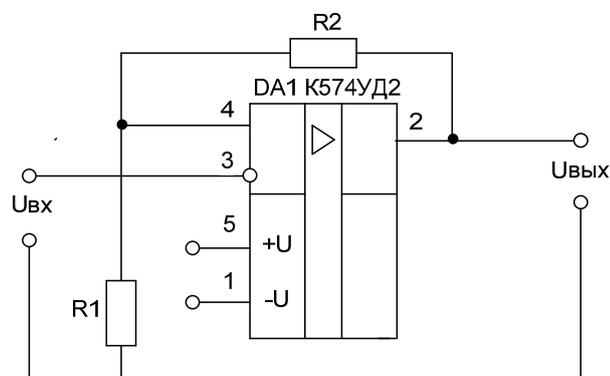


Рисунок 10.1 – Компаратор с гистерезисом на ОУ

Изменение напряжения  $U_{ВЫХ}$  на выходе компаратора описывается выражением

$$U_{ВЫХ} = K_{У.OY} (U_{CPAB} - U_{BX}),$$

где  $K_{У.OY}$  – коэффициент усиления операционного усилителя (определяется из паспортных данных указанной микросхемы ОУ. Для микросхемы К574УД2  $K_{У.OY} = 25000$ ).

Так как  $K_{У.OY} = 25000$ , то даже незначительная разность  $(U_{CPAB} - U_{BX})$ , равная единицам милливольт, приводит к скачкообразному установлению на выходе ОУ максимального выходного напряжения  $U_{ВЫХ.max.OY} = \pm 10$  В. Поэтому

$$U_{ВЫХ} = \pm U_{ВЫХ.макс.ОУ} = K_{У.ОУ} (U_{СРАБ} - U_{ВХ}).$$

Знак  $U_{ВЫХ}$  определяется разностью ( $U_{СРАБ} - U_{ВХ}$ ).

Зададимся сопротивлением одного из резисторов, например  $R1$ , и рассчитаем величину сопротивления резистора  $R2$ . Возьмем  $R1 = 8,2$  кОм.

$$R2 = (U_{ВЫХ.макс.ОУ} \cdot R1 - U_{СРАБ} \cdot R1) / U_{СРАБ} = (10 \cdot 8,2 - 6,7 \cdot 8,2) / 6,7 = 4,04 \text{ кОм.}$$

Выбираем стандартное сопротивление  $R2 = 3,9$  кОм.

Временные диаграммы входных и выходного сигналов компаратора приведены на рисунке 10.2. Моделирование работы разработанного компаратора в Multisim выполнить самостоятельно.

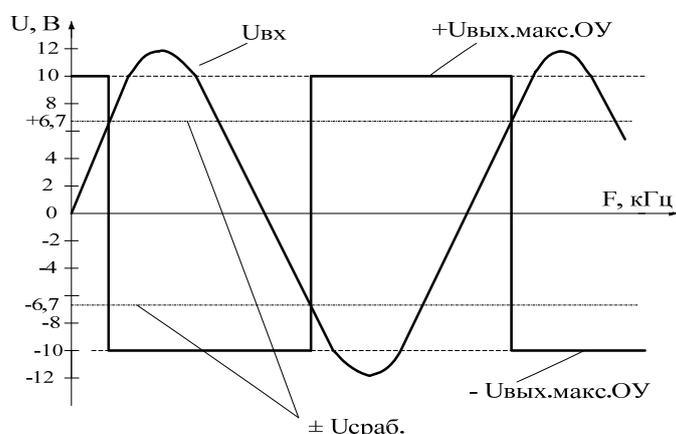


Рисунок 10.2 – Временные диаграммы входных и выходного сигналов компаратора

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 2.** Разработайте электрическую принципиальную схему компаратора с гистерезисом на основе микросхемы операционного усилителя К140УД6 с напряжением срабатывания  $U_{СРАБ} = 4,5$  В для преобразования входного синусоидального сигнала с амплитудой  $\pm U_{a,max} = 12$  В. Нарисуйте в масштабе временные диаграммы входных и выходного сигналов. Период синусоидального сигнала возьмите произвольно без указания его числового значения на временных диаграммах. Выполните моделирование его работы в Multisim.

**Задача 3.** Разработайте электрическую принципиальную схему компаратора с гистерезисом на основе микросхемы операционного усилителя К140УД8 с напряжением срабатывания  $U_{СРАБ} = 3$  В для преобразования входного синусоидального сигнала с амплитудой  $\pm U_{a,max} = 10$  В. Нарисуйте в масштабе временные диаграммы входных и выходного сигналов. Период синусоидального сигнала возьмите произвольно без указания его числового значения на временных диаграммах. Выполните моделирование его работы в Multisim.

## 11 Проектирование и моделирование работы в Multisim выпрямителей и сглаживающих фильтров

### Пример решения типовой задачи

**Задача 1.** Выполните моделирование работы двухполупериодного мостового выпрямителя с конденсатором  $C1$  для сглаживания пульсаций напряжения на нагрузке в Multisim, схема которого представлена на рисунке 11.1.

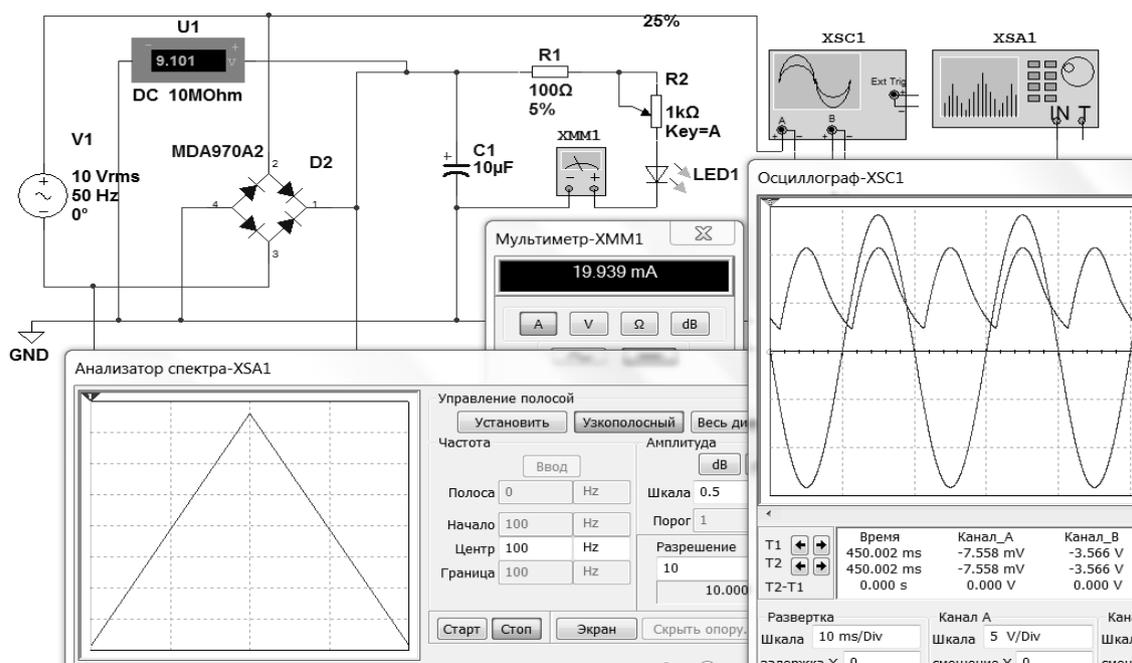


Рисунок 11.1 – Результаты моделирования работы двухполупериодного мостового выпрямителя в Multisim

### Решение

Мультиметр XMM1, работающий в режиме амперметра, и вольтметр U1 показывают средние значения тока и напряжения нагрузки ( $R1 + R2 + LED1$ ). На экране двухканального осциллографа XSC1 изображены временные диаграммы выходного напряжения источника V1 (канал A) и напряжения на нагрузке (канал B). Из временных диаграмм видно, что на нагрузке формируется только положительное напряжение, причем как при отрицательных, так и при положительных напряжениях источника V1. Анализатор спектра XSA1 используется для определения амплитуды первой гармоники.

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 2.** Исследуйте влияние емкости конденсатора  $C1$  (см. рисунок 11.1) на форму сигнала на нагрузке (канал B осциллографа XSC1), поочередно выставив её значение 100 мкФ, 1000 мкФ, 10000 мкФ, 20000 мкФ.

**Задача 3.** Исследуйте влияние резистора  $R2$  (см. рисунок 11.1) на форму сигнала на нагрузке (канал В осциллографа XSC1) при значении емкости конденсатора  $C1 = 100$  мкФ (1000 мкФ, 10000 мкФ).

## 12 Проектирование нерегулируемых и регулируемых стабилизированных источников питания на основе микросхем стабилизаторов напряжения

### Краткие теоретические сведения

Для формирования однополярного стабилизированного напряжения может быть использована одна из многочисленных микросхем стабилизаторов напряжения с типовой схемой включения. На рисунке 12.1 это микросхема  $DA1$  (например, К142ЕН5А, максимальный ток нагрузки которой равен 3 А, а выходное стабилизированное напряжение  $U_{ВЫХ.СТ} = (5 \pm 0,1)$  В).

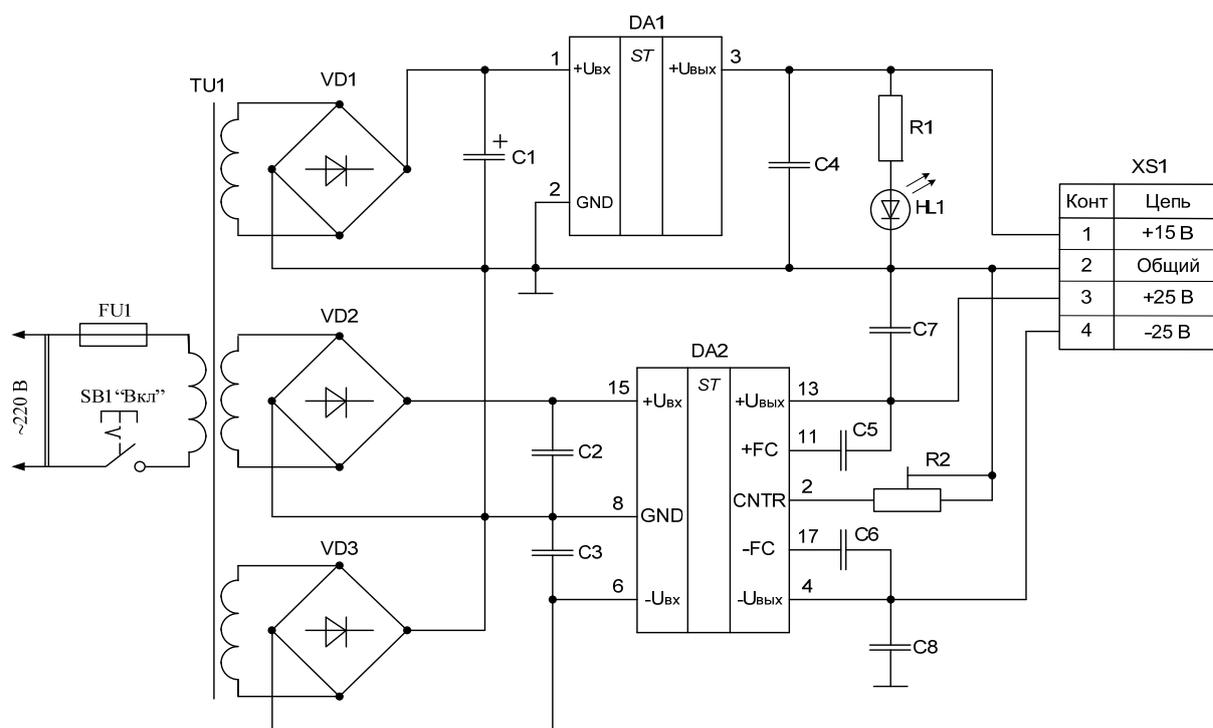


Рисунок 12.1 – Схема стабилизированного источника питания с однополярным и двухполярным выходными напряжениями

На этом же рисунке микросхема  $DA2$  выдаёт в нагрузку двухполярное стабилизированное напряжение. Если взять  $DA2$  КР142ЕН6 с регулируемым выходным напряжением, максимальный ток нагрузки которой равен 0,2 А, выходное стабилизированное напряжение  $U_{ВЫХ.СТ}$  может быть установлено с помощью подстроечного резистора  $R2$  в диапазоне от  $\pm 5$  до  $\pm 15$  В.

Понижение амплитуды сетевого напряжения до требуемых значений осуществляется с помощью трансформатора  $TU1$ .

Для выпрямления переменного напряжения используются мостовые диодные выпрямители  $VD1 \dots VD3$ .

Светодиод  $HL1$  выполняет функцию индикатора включенного состояния источника питания.

Сопротивление резистора  $R1$ , обеспечивающее токовый режим работы светодиода  $HL1$ ,

$$R1 = \frac{U_{\Pi} - U_{\text{ПР}}}{I_{\text{ПР.HL1}}}, \quad (12.1)$$

где  $I_{\text{ПР.HL1}}$  – прямой ток светодиода, А;

$U_{\Pi}$  – напряжение питания, В;

$U_{\text{ПР}}$  – падение напряжения на светодиоде в рабочем режиме, В.

Мощность, рассеиваемая на нем при протекании через него прямого тока,

$$P_{R1} = I_{\text{ПР.HL1}}^2 \cdot R1. \quad (12.2)$$

Ёмкость конденсатора  $C1$ , используемого для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения, подаваемого на микросхему  $DA1$ ,

$$C1 = \frac{I_H + I_{\text{ПР.HL1}} + I_{\text{ПОТР.DA1}}}{2 \cdot f \cdot U_{\Pi}}, \quad (12.3)$$

где  $I_H$  – ток нагрузки, А;

$I_{\text{ПОТР.DA1}}$  – ток, потребляемый  $DA1$ , А;

$U_{\Pi}$  – напряжение пульсаций выпрямленного напряжения, В;

$f$  – частота переменного напряжения в сети, Гц.

На рисунке 12.2 приведена схема стабилизатора напряжения на основе микросхемы LM338K. Необходимое значение выходного напряжения устанавливается с помощью регулируемых делителей  $R1$ ,  $R3$ . Резистором  $R2$  регулируется ток нагрузки, измеряемый мультиметром XMM2. Напряжение  $U_{\text{СТ}}$  на выходе стабилизатора измеряется вольтметром  $U1$ . Ток, потребляемый от источника  $E$ , измеряется мультиметром XMM1.

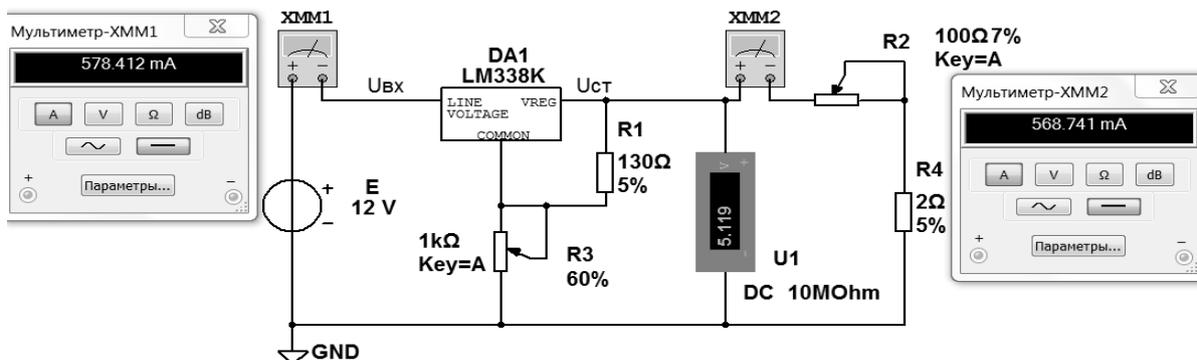


Рисунок 12.2 – Схема регулируемого стабилизатора напряжения на основе микросхемы LM338K

Основным параметром стабилизаторов напряжения является коэффициент стабилизации

$$K_{CT} = \frac{U_{ВХ.маx} - U_{ВХ.миn}}{U_{ВЫХ.СТ1} - U_{ВЫХ.СТ2}}. \quad (12.4)$$

### ***Задачи для самостоятельного решения***

**Задача 1.** К схеме, приведенной на рисунке 12.1, подберите из справочных источников микросхему DA1 с  $U_{ВЫХ.СТ} = +15$  В и  $I_H = 0,25$  А. Составьте схему, представленную на рисунке 12.1, в Multisim и исследуйте её работу, подключив к ней показанные на схеме приборы. Рассчитайте  $K_{CT}$ .

**Задача 2.** К схеме, приведенной на рисунке 12.1, подберите из справочных источников светодиод HL1 с красным цветом свечения. Задавшись величиной прямого тока через него  $I_{ПР.НЛ1} = 10$  мА, рассчитайте сопротивление резистора R1 и рассеиваемую на нем мощность.

**Задача 3.** Для схемы, приведенной на рисунке 12.1, рассчитайте емкость конденсатора C1, если  $I_H = 1,7$  А,  $I_{ПР.НЛ1} = 10$  мА,  $U_{П} = 0,5$  В,  $f = 50$  Гц.

**Задача 4.** Исследуйте работу схемы, приведенной на рисунке 12.2, в Multisim. По результатам исследований рассчитайте  $K_{CT}$ .

**Задача 5.** Составьте схему, приведенную на рисунке 12.1, в Multisim и исследуйте её работу, подключив к ней приборы, показанные на рисунке 12.2. Рассчитайте  $K_{CT}$ .

## **13 Моделирование работы в среде Multisim логических элементов**

### ***Краткие теоретические сведения***

Логические элементы (ЛЭ) предназначены для выполнения логических операций: логическое сложение ИЛИ (дизъюнкция), логическое умножение И (конъюнкция), логическое отрицание НЕ (инверсия) (рисунок 13.1). Приведенные на рисунке 13.1 ЛЭ являются базовыми, на рисунке 13.2 – комбинированными.

Для описания логических операций используется алгебра логики. Она широко применяется в теории цифровой техники, в которой используются устройства, имеющие два устойчивых состояния. При этом одно из состояний, соответствующее, например, высокому уровню напряжения, обозначается единицей (1), а соответствующее низкому уровню напряжения – нулем (0). Уровень выходного напряжения логического элемента зависит от уровня входных напряжений. Для наглядности выполнение логических операций описывают с помощью таблиц истинности для каждого логического элемента.

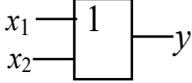
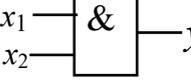
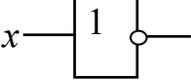
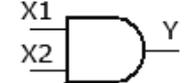
Функция	Дизъюнкция	Конъюнкция	Инверсия																																				
Текстовая	ИЛИ (OR)	И (AND)	НЕ (NOT)																																				
Условная графическая																																							
(на зарубежных схемах)																																							
Аналитическая	$y = x_1 + x_2$	$y = x_1 \cdot x_2$	$y = \bar{x}$																																				
Табличная (истинности)	<table border="1" data-bbox="454 604 710 795"> <tr><td><math>x_1</math></td><td><math>x_2</math></td><td><math>y</math></td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	$x_1$	$x_2$	$y$	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	<table border="1" data-bbox="790 604 1045 795"> <tr><td><math>x_1</math></td><td><math>x_2</math></td><td><math>y</math></td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	$x_1$	$x_2$	$y$	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	<table border="1" data-bbox="1141 604 1380 739"> <tr><td><math>x</math></td><td><math>y</math></td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	$x$	$y$	0	1	1	0
$x_1$	$x_2$	$y$																																					
0	0	0																																					
0	1	1																																					
1	0	1																																					
1	1	1																																					
$x_1$	$x_2$	$y$																																					
0	0	0																																					
0	1	0																																					
1	0	0																																					
1	1	1																																					
$x$	$y$																																						
0	1																																						
1	0																																						

Рисунок 13.1 – Формы описания базовых логических функций

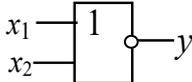
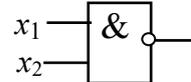
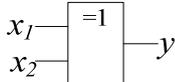
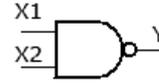
Функция	Функция Пирса	Функция Шеффера	Сложение по модулю 2																																													
Текстовая	ИЛИ-НЕ (NOR)	И-НЕ (NAND)	ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ (XOR)																																													
Условная графическая																																																
(на зарубежных схемах)																																																
Аналитическая	$y = \overline{x_1 + x_2}$	$y = \overline{x_1 \cdot x_2}$	$y = x_1 \oplus x_2$																																													
Табличная (истинности)	<table border="1" data-bbox="454 1444 710 1635"> <tr><td><math>x_1</math></td><td><math>x_2</math></td><td><math>y</math></td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	$x_1$	$x_2$	$y$	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	<table border="1" data-bbox="790 1444 1045 1635"> <tr><td><math>x_1</math></td><td><math>x_2</math></td><td><math>y</math></td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	$x_1$	$x_2$	$y$	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	<table border="1" data-bbox="1125 1444 1380 1635"> <tr><td><math>x_1</math></td><td><math>x_2</math></td><td><math>y</math></td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	$x_1$	$x_2$	$y$	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
$x_1$	$x_2$	$y$																																														
0	0	1																																														
0	1	0																																														
1	0	0																																														
1	1	0																																														
$x_1$	$x_2$	$y$																																														
0	0	1																																														
0	1	1																																														
1	0	1																																														
1	1	0																																														
$x_1$	$x_2$	$y$																																														
0	0	0																																														
0	1	1																																														
1	0	1																																														
1	1	0																																														

Рисунок 13.2 – Формы описания комбинированных логических функций

Следует отметить, что выполнение логических функций И, И-НЕ, ИЛИ, ИЛИ-НЕ подразумевают количество входных сигналов не менее двух, но их может быть и больше (например, 3, 4, 8).

На рисунках 13.3–13.8 представлены схемы в Multisim для исследования логических элементов 2ИЛИ, 2И, НЕ, 2ИЛИ-НЕ, И-НЕ, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.

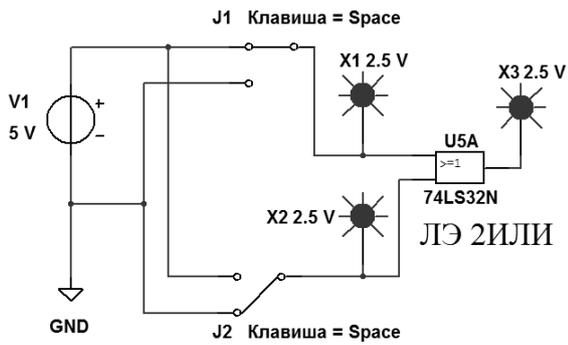


Рисунок 13.3 – Схема в Multisim для исследования логического элемента 2ИЛИ

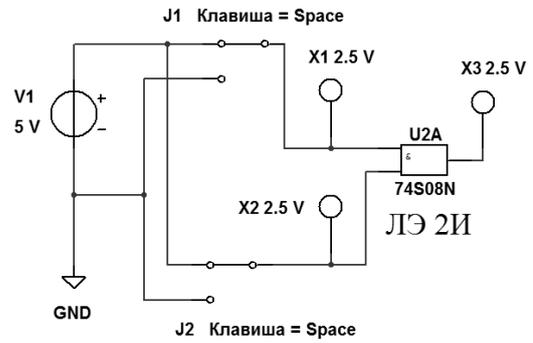


Рисунок 13.4 – Схема в Multisim для исследования логического элемента 2И

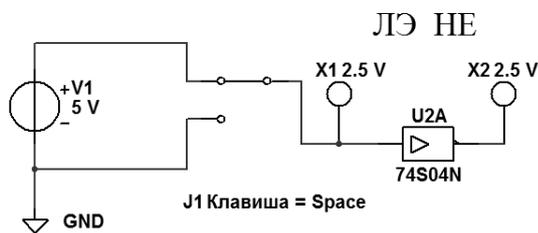


Рисунок 13.5 – Схема в Multisim для исследования логического элемента НЕ

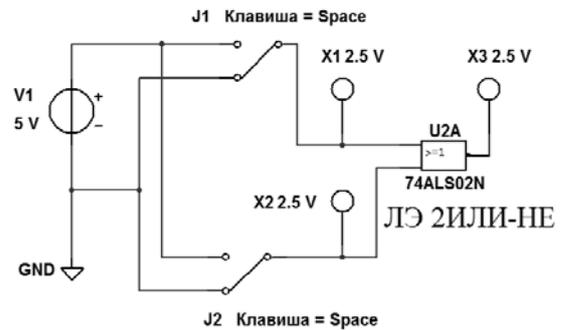


Рисунок 13.6 – Схема для исследования логического элемента 2ИЛИ-НЕ

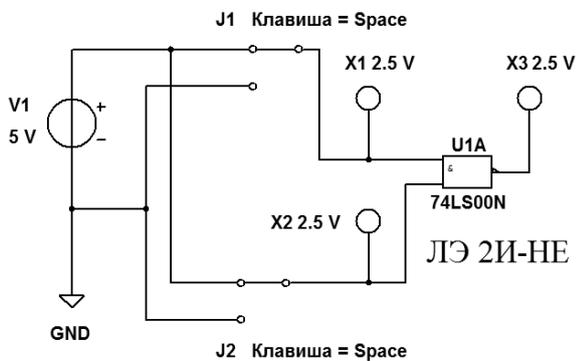


Рисунок 13.7 – Схема в Multisim для исследования логического элемента 2И-НЕ

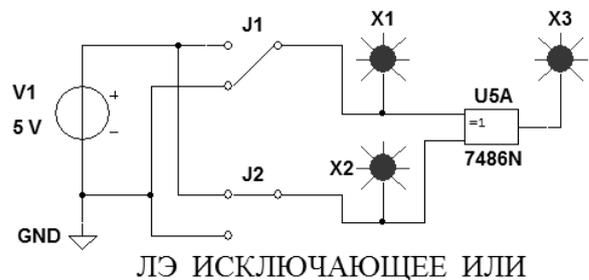


Рисунок 13.8 – Схема в Multisim для исследования ЛЭ ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 1.** Нарисуйте условное обозначение логического элемента НЕ.

**Задача 2.** Нарисуйте условное обозначение логического элемента 2И-НЕ.

**Задача 3.** Нарисуйте условное обозначение логического элемента 2ИЛИ.

**Задача 4.** Нарисуйте условное обозначение логического элемента 3И.

**Задача 5.** Нарисуйте условное обозначение логического элемента 4И-НЕ.

**Задача 6.** Нарисуйте условное обозначение логического элемента ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.

**Задача 7.** Составьте таблицу истинности для логического элемента 3И-НЕ.

## 14 Проектирование и моделирование в среде Multisim работы RS- и D-триггеров

### *Краткие теоретические сведения*

Триггером называется устройство, обладающее двумя состояниями устойчивого равновесия и способное под воздействием внешнего управляющего сигнала переходить скачком из одного состояния в другое.

Как правило, триггер имеет два выхода: прямой  $Q$  и инверсный  $\bar{Q}$ . Состояние триггера определяется по прямому выходу  $Q$ . Если  $Q = 1$ , то триггер находится в единичном состоянии, или говорят, что триггер установлен. Если  $Q = 0$ , то триггер находится в нулевом состоянии, или говорят, что триггер сброшен. Сигналы на выходах триггера всегда должны быть противоположными. Число входов и их обозначение зависят от типа триггера и выполняемой функции:

- $S, J$  – входы установки триггера в единичное состояние;
- $R, K$  – входы установки триггера в нулевое состояние;
- $T$  – счетный вход;
- $D$  – вход приема одного бита информации;
- $C$  – вход синхронизации;
- $V$  – вход разрешения/запрета работы триггера.

По способу записи информации триггеры делятся на асинхронные и синхронные. Синхронные триггеры делятся на одноступенчатые и двухступенчатые. В одноступенчатых триггерах запись информации происходит по фронту синхроимпульса, в двухступенчатых триггерах – по срезу синхроимпульса. Различают следующие типы триггеров: асинхронные и синхронные RS-триггеры, D-триггеры, JK-триггеры, T-триггеры. В основе всех типов триггеров лежит основной (базовый) асинхронный RS-триггер. Он может быть построен на двух логических элементах 2И-НЕ (рисунок 14.1) или 2ИЛИ-НЕ (рисунок 14.2). Работу триггеров описывают с помощью таблиц истинности. Для асинхронного RS-триггера на логических элементах 2И-НЕ таблица истинности имеет следующий вид (таблица 14.1).

В ячейках таблицы  $Q^t$  и  $\bar{Q}^t$  означает предыдущее состояние выходов триггера (до подачи входных сигналов),  $Q^{t+1}$  и  $\bar{Q}^{t+1}$  – после подачи входных сигналов.

На рисунке 14.3 приведена схема в Multisim для исследования асинхронного RS-триггера на ЛЭ 2И-НЕ.

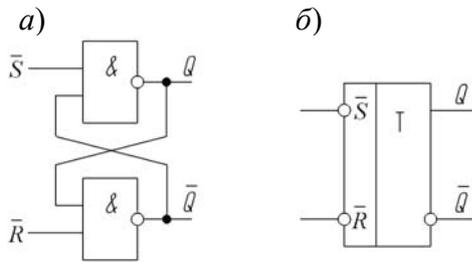


Рисунок 14.1 – Асинхронный RS-триггер на ЛЭ 2И-НЕ (а) и его условное обозначение (б)

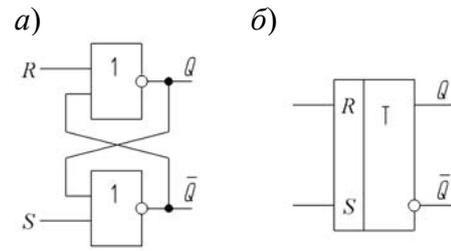


Рисунок 14.2 – Асинхронный RS-триггер на ЛЭ 2ИЛИ-НЕ (а) и его условное обозначение (б)

Таблица 14.1 – Таблица истинности асинхронного RS-триггера на ЛЭ 2И-НЕ

Вход		Выход		Выполняемая функция
$\bar{S}$	$\bar{R}$	$Q^{t+1}$	$\bar{Q}^{t+1}$	
1	1	$Q^t$	$\bar{Q}^t$	Хранение
0	1	1	0	Запись «1»
1	0	0	1	Запись «0»
0	0	1	1	Триггер не работает

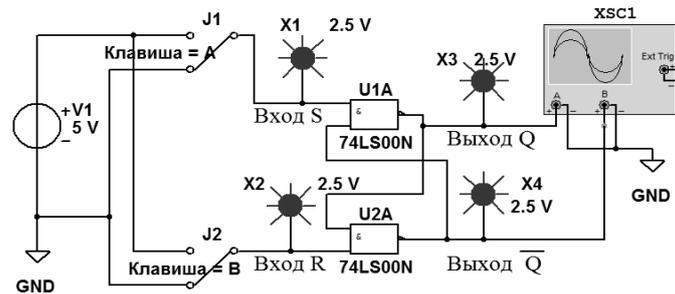


Рисунок 14.3 – Схема в Multisim для исследования асинхронного RS-триггера на ЛЭ 2И-НЕ

На рисунке 14.4 приведена схема в Multisim для исследования работы синхронного RS-триггера на логических элементах 2И-НЕ, в таблице 14.2 описаны функции, выполняемые этим триггером.

Таблица 14.2 – Таблица истинности синхронного RS-триггера на ЛЭ 2И-НЕ

Вход			Выход		Выполняемая функция
$C$	$S$	$R$	$Q^{t+1}$	$\bar{Q}^{t+1}$	
0	X	X	$Q^t$	$\bar{Q}^t$	Хранение
1	0	0	$Q^t$	$\bar{Q}^t$	Хранение
1	1	0	1	0	Запись «1»
1	0	1	0	1	Запись «0»
1	1	1	1	1	Триггер не работает

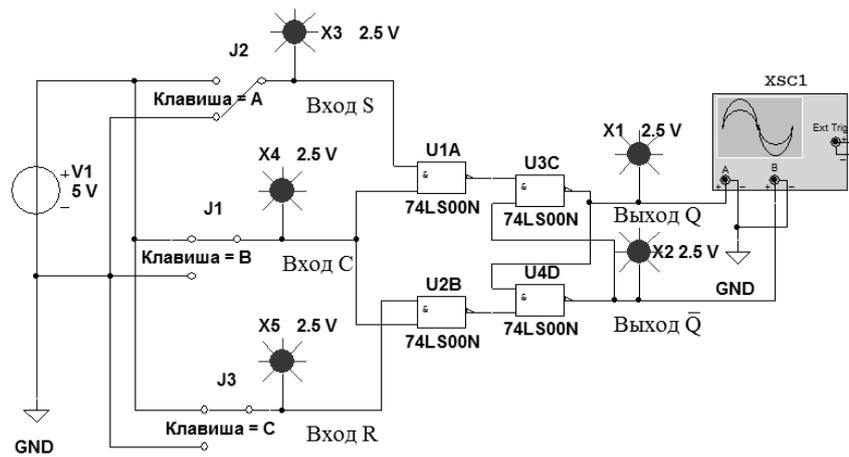


Рисунок 14.4 – Схема в Multisim для исследования синхронного RS-триггера на ЛЭ 2И-НЕ

На рисунке 14.5 приведена схема в Multisim для исследования работы D-триггера на логических элементах 2И-НЕ, в таблице 14.3 описаны функции, выполняемые этим триггером.

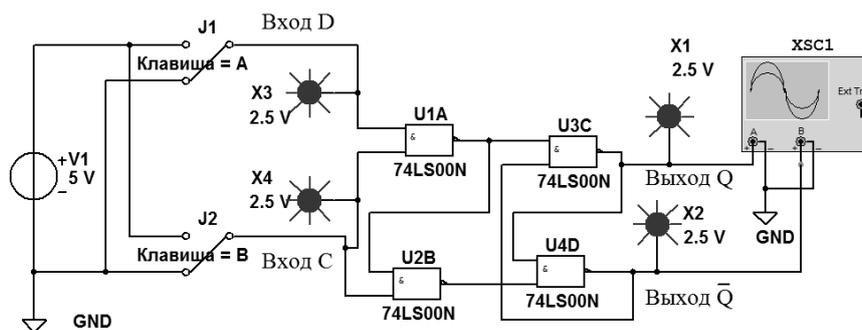


Рисунок 14.5 – Схема в Multisim для исследования D-триггера на логических элементах 2И-НЕ

Таблица 14.3 – Таблица истинности D-триггера на логических элементах 2И-НЕ

Вход		Выход		Выполняемая функция
$C$	$D$	$Q^{t+1}$	$\overline{Q}^{t+1}$	
0	X	$Q^t$	$\overline{Q}^t$	Хранение
1	1	1	0	Запись «1»
1	0	0	1	Запись «0»

На рисунке 14.6 приведена схема в Multisim для исследования работы двухступенчатого D-триггера на логических элементах И-НЕ с дополнительным входом  $R$  для асинхронного сброса триггера, в таблице 14.4 описаны функции, выполняемые этим триггером.

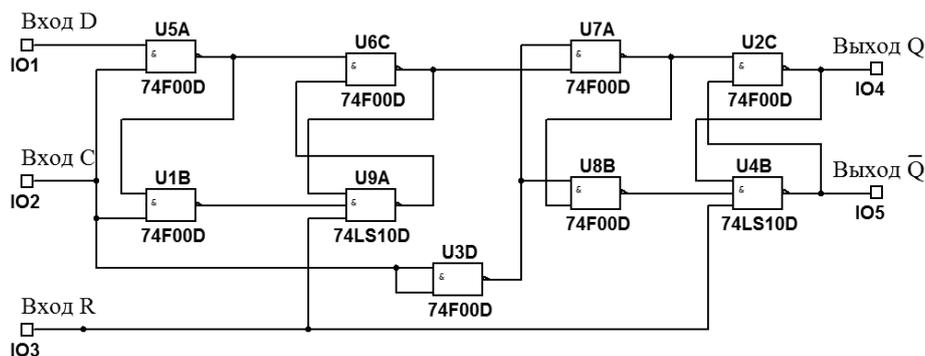


Рисунок 14.6 – Схема в Multisim двухступенчатого D-триггера на логических элементах И-НЕ с дополнительным входом R для асинхронного сброса триггера

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 1.** Нарисуйте схему асинхронного RS-триггера на логических элементах 2И-НЕ.

Таблица 14.4 – Таблица истинности двухступенчатого D-триггера

Вход			Выход		Выполняемая функция
$C$	$D$	$R$	$Q^{t+1}$	$\bar{Q}^{t+1}$	
0	X	1	$Q^t$	$\bar{Q}^t$	Хранение
1/0	1	1	1	0	Запись «1»
1/0	0	1	0	1	Запись «0»
X	X	0	0	1	Запись «0» («Сброс»)

**Задача 2.** Нарисуйте схему синхронного RS-триггера на логических элементах 2И-НЕ.

**Задача 3.** Нарисуйте схему D-триггера на логических элементах 2И-НЕ.

**Задача 4.** Нарисуйте схему двухступенчатого D-триггера на логических элементах И-НЕ.

## 15 Проектирование и моделирование в среде Multisim работы JK-триггеров

### Краткие теоретические сведения

На рисунке 15.1 приведена схема в Multisim для исследования работы двухступенчатого JK-триггера на логических элементах И-НЕ, в таблице 15.1 описаны функции, выполняемые этим триггером.

На рисунке 15.2 приведена схема в Multisim для исследования работы двухступенчатого JK-триггера, преобразованного в T-триггер.

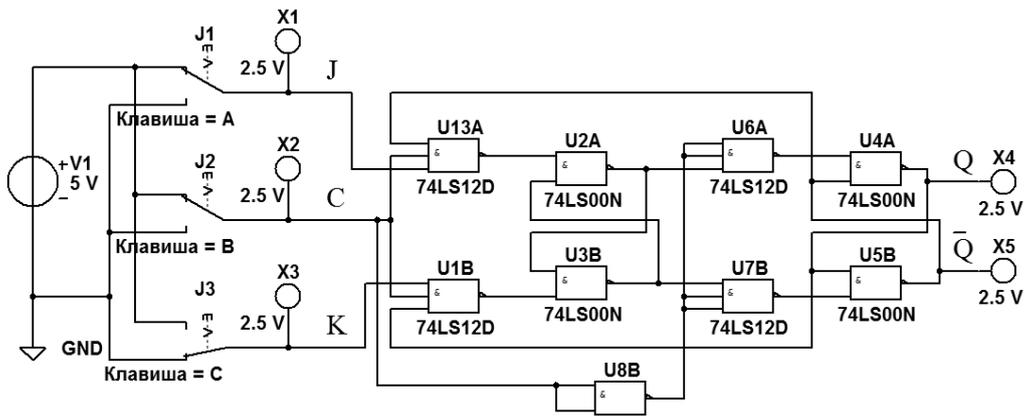


Рисунок 15.1 – Схема в Multisim двухступенчатого JK-триггера на логических элементах И-НЕ

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 1.** Нарисуйте схему двухступенчатого JK-триггера на логических элементах И-НЕ.

Таблица 15.1 – Таблица истинности двухступенчатого JK-триггера

Вход			Выход		Выполняемая функция
$C$	$J$	$K$	$Q^{t+1}$	$\bar{Q}^{t+1}$	
0	X	X	$Q^t$	$\bar{Q}^t$	Хранение
1/0	1	0	1	0	Запись «1»
1/0	0	1	0	1	Запись «0»
1/0	1	1	$\bar{Q}^t$	$Q^t$	Переключение

**Задача 2.** Нарисуйте схему двухступенчатого JK-триггера на логических элементах И-НЕ с дополнительным входом  $R$  для асинхронного сброса триггера.

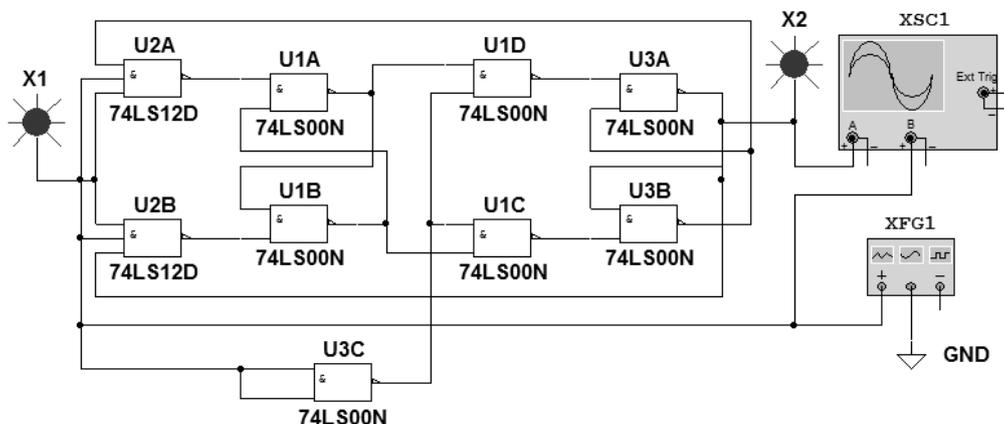


Рисунок 15.2 – Схема в Multisim двухступенчатого JK-триггера, работающего в качестве делителя частоты входных импульсов на два

## 16 Проектирование и моделирование в среде Multisim работы двоичных счетчиков импульсов

### Краткие теоретические сведения

Счетчиком называют цифровое устройство, обеспечивающее подсчет числа электрических импульсов. Коэффициент пересчета счетчика  $K_{сч}$  равен минимальному числу импульсов, поступивших на вход счетчика, после которых состояния на выходе счетчика начинают повторяться. Счетчик называют суммирующим, если после каждого очередного импульса цифровой код на выходе счетчика увеличивается на единицу. В вычитающем счетчике после каждого импульса на входе счетчика цифровой код на выходе уменьшается на единицу. Счетчики, в которых возможно переключение с режима суммирования на режим вычитания, называют реверсивными.

Любой счетчик с модулем  $K_{сч}$  может быть использован как делитель частоты входных импульсов с коэффициентом деления  $K_{сч}$ .

Счетчики могут быть с предварительной установкой. Счетчики создаются на основе Т-триггеров, получаемых из двухступенчатых D- или JK-триггеров.

Счетчик называется двоичным, если  $K_{сч} = 2^m$ , где  $m$  – целое число,  $m > 0$ .

На рисунке 16.1 приведена схема в Multisim восьмиразрядного реверсивного двоичного счетчика с предварительной установкой на основе двух микросхем 74LS193D (K155ИЕ7), работающих в режиме суммирования.

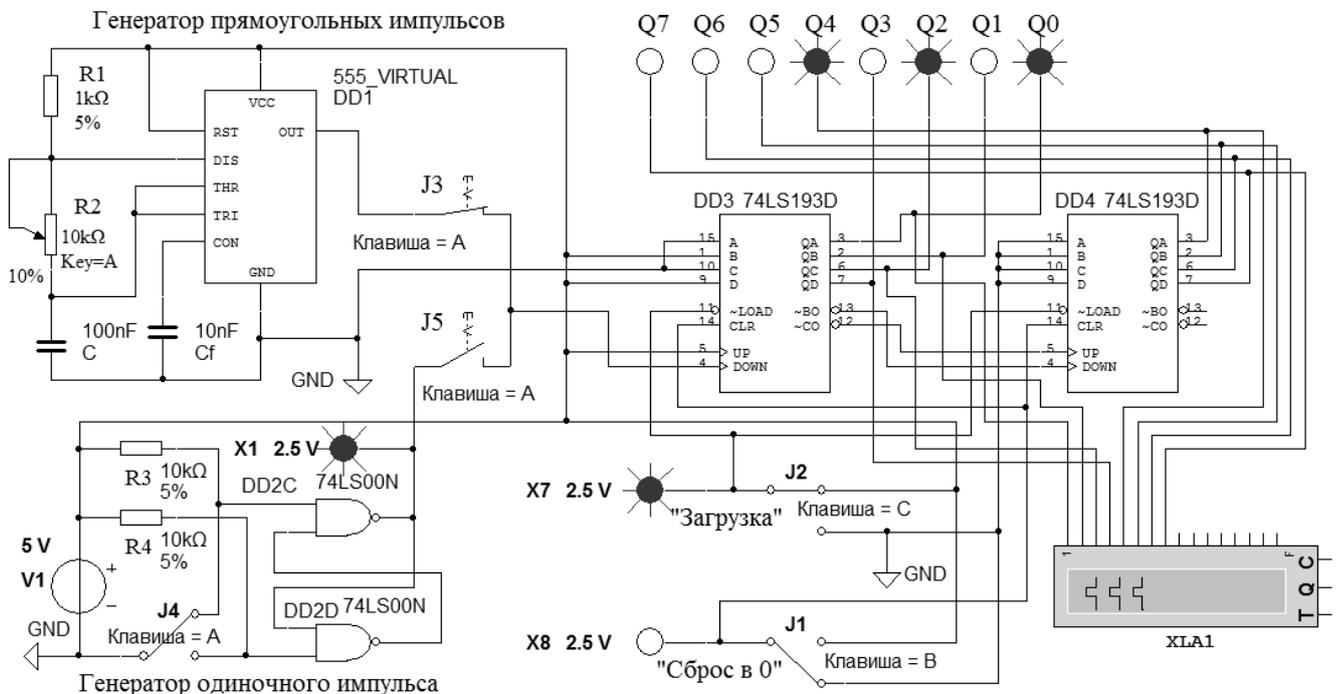


Рисунок 16.1 – Схема для исследования работы в Multisim восьмиразрядного реверсивного двоичного счетчика с предварительной загрузкой на основе двух микросхем 74LS193D (K155ИЕ7), работающих в режиме суммирования

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 1.** Рассчитайте  $K_{сч}$  счетчика, изображенного на рисунке 16.1.

**Задача 2.** Какие изменения необходимо сделать в схеме (см. рисунок 16.1), чтобы перевести счетчик в режим вычитания?

**Задача 3.** Какое устройство реализовано на логических элементах DD2С и DD2D (см. рисунок 16.1)?

## 17 Проектирование и моделирование в среде Multisim работы двоично-десятичных счетчиков импульсов

### Краткие теоретические сведения

Счетчики с коэффициентами пересчета, отличающимися от двоичных, могут быть построены путем введения дополнительных связей в двоичные счетчики.

Существуют общие методы построения счетчиков с любым заданным  $K_{сч}$ . Один из этих методов заключается в немедленном сбросе в 0 счетчика, установившегося в комбинацию, соответствующую числу  $K_{сч}$ . Другой метод построения счетчика с заданным  $K_{сч}$  основан на использовании начальной установки. Этот метод заключается в том, что счет каждый раз начинается не с нуля, как обычно, а с некоторого числа. Оно и определяет  $K_{сч}$ .

Счетчик называют двоично-десятичным (десятичным), если  $K_{сч} = 10^p$ , где  $p$  – целое число,  $p > 0$ .

На рисунке 17.1 приведена схема в Multisim четырехразрядного двоично-десятичного счетчика на основе микросхемы 7490N (K155ИЕ2). Логический элемент DD3А (4И) может быть использован для изменения коэффициента  $K_{сч}$ .

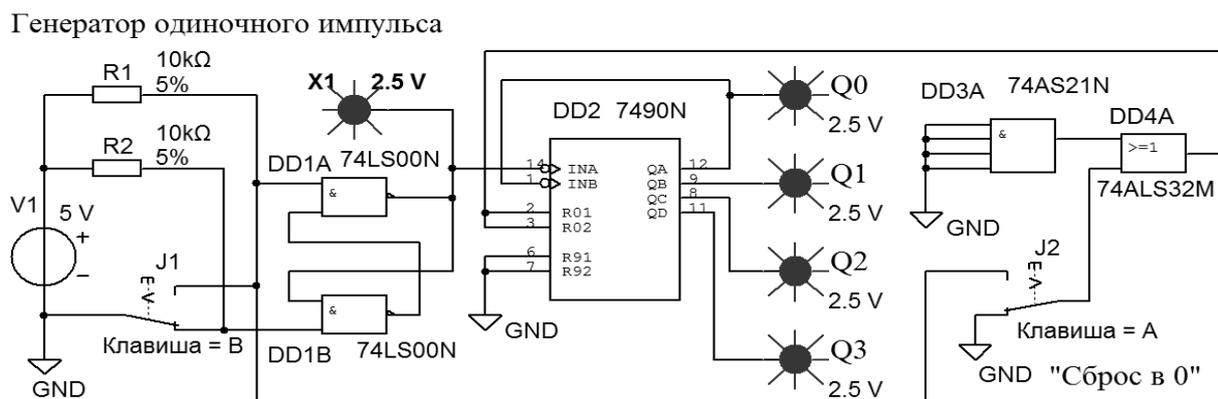


Рисунок 17.1 – Схема для исследования в Multisim работы четырехразрядного двоично-десятичного счетчика на основе микросхемы 7490N (K155ИЕ2)

На рисунке 17.2 приведена схема в Multisim четырехразрядного двоично-десятичного счетчика на основе микросхемы 7490N (K155ИЕ2), считающего до 8 ( $K_{сч} = 8$ ).

## Генератор одиночного импульса

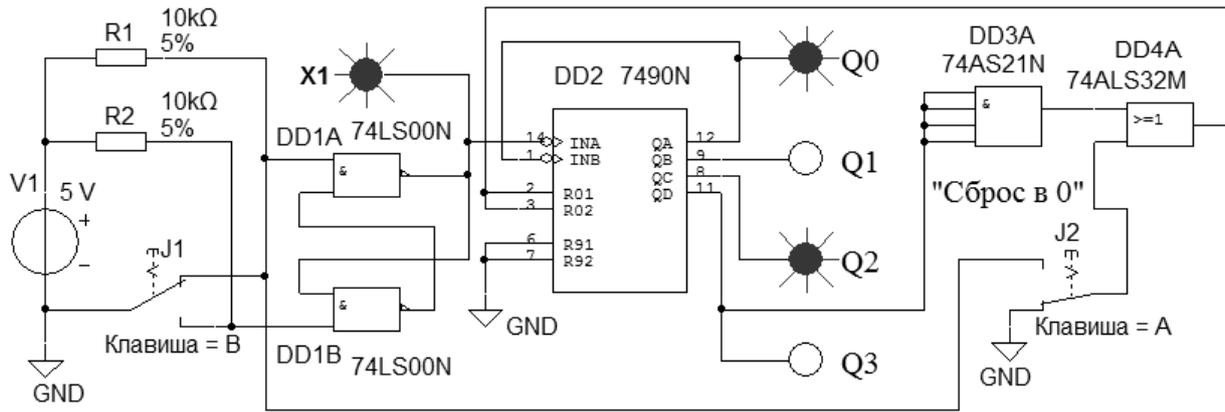


Рисунок 17.2 – Схема для исследования в Multisim работы четырехразрядного двоично-десятичного счетчика на основе микросхемы 7490N (K155IE2) с  $K_{сч} = 8$

### 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 **Валенко, В. С.** Электроника и микросхемотехника: учебное пособие для вузов / В. С. Валенко, М. С. Хандогин. – Минск : Бестпринт, 2003. – 320 с.
- 4 **Новиков, Ю. В.** Введение в цифровую схемотехнику: учебное пособие / Ю. В. Новиков. – Москва : Интернет-Университет Информационных Технологий; Бинوم. Лаборатория знаний, 2007. – 343 с.