

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# ЭЛЕКТРОНИКА

*Методические рекомендации к практическим занятиям  
для студентов специальности 1-54 01 02 «Методы и приборы  
контроля качества и диагностики состояния объектов»  
дневной и заочной форм обучения*



Могилев 2019

УДК 621.38  
ББК 32.85  
Э 45

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «5» октября 2018 г.,  
протокол № 3

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

Рецензент канд. техн. наук, доц. М. Н. Миронова

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 учебной программой по дисциплине «Электроника» для студентов специальности 1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» дневной и заочной форм обучения.

Учебно-методическое издание

## ЭЛЕКТРОНИКА

Ответственный за выпуск

С. С. Сергеев

Технический редактор

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 16 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 24.01.2014.

Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2019



## 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, стабисторами, светодиодами. Моделирование их работы в Multisim.....	8
4 Биполярные транзисторы: принцип и режимы работы; схемы включения; основные параметры. Полевые транзисторы: принцип работы; основные схемы включения.....	17
5 Методика расчета однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе с ОК, ОЭ. Моделирование его работы в Multisim.....	21
6 Методика расчета двухтактного усилителя мощности на транзисторах. Моделирование его работы в Multisim.....	24
7 Методика расчета инвертирующего и неинвертирующего усилителя; повторителя напряжения на ОУ. Моделирование их работы в Multisim.....	26
8 Методика расчета измерительного (инструментального) усилителя на основе ОУ. Моделирование его работы в Multisim.....	28
9 Методика расчета суммирующего и вычитающего усилителя на основе ОУ. Моделирование их работы в Multisim.....	29
10 Методика расчета генератора сигналов и активных фильтров на ОУ. Моделирование их работы в Multisim.....	30
11 Методика расчета измерительных схем на операционных усилителях. Моделирование их работы в Multisim.....	34
12 Методика расчета аналоговых компараторов. Моделирование их работы в Multisim.....	36
13 Проектирование импульсных усилителей мощности.....	38
14 Проектирование импульсных стабилизаторов напряжения.....	41
15 Проектирование и моделирование работы в Multisim выпрямителей и сглаживающих фильтров.....	43
16 Проектирование нерегулируемых и регулируемых стабилизированных источников питания на основе микросхем стабилизаторов напряжения.....	44
Список литературы.....	47



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

При последовательном соединении резисторов (рисунок 1.1) их общее сопротивление

$$R = R1 + R2 + R3. \quad (1.1)$$

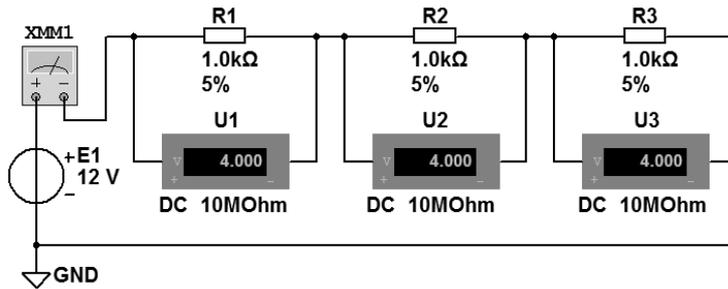


Рисунок 1.1 – Схема последовательного соединения резисторов в Multisim

Падение напряжения на каждом из них

$$U_{R1} = I \cdot R1; \quad U_{R2} = I \cdot R2; \quad U_{R3} = I \cdot R3. \quad (1.2)$$

Ток, протекающий через эти резисторы,

$$I = E1 / R. \quad (1.3)$$

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

$$1/R = 1/R1 + 1/R2 + 1/R3. \quad (1.4)$$

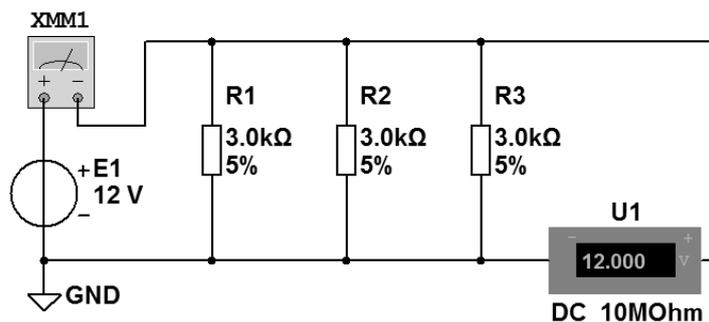


Рисунок 1.2 – Схема параллельного соединения резисторов в Multisim

Токи, протекающие через эти резисторы,

$$I_{R1} = E1 / R1; \quad I_{R2} = E1 / R2; \quad I_{R3} = E1 / R3. \quad (1.5)$$

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).

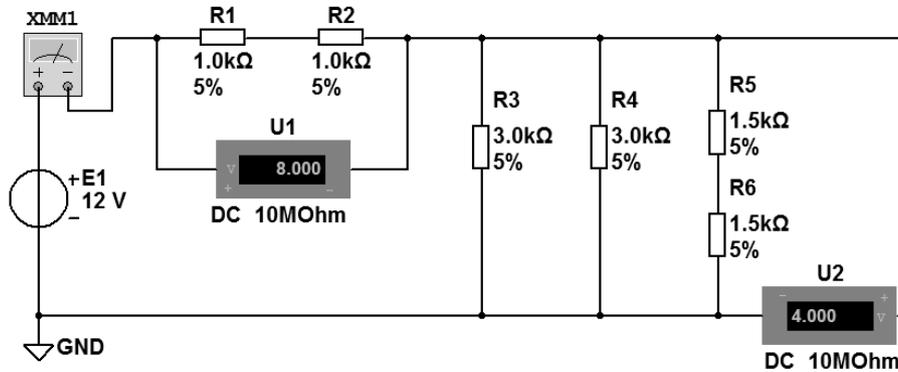


Рисунок 1.3 – Схема смешанного соединения резисторов в Multisim

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

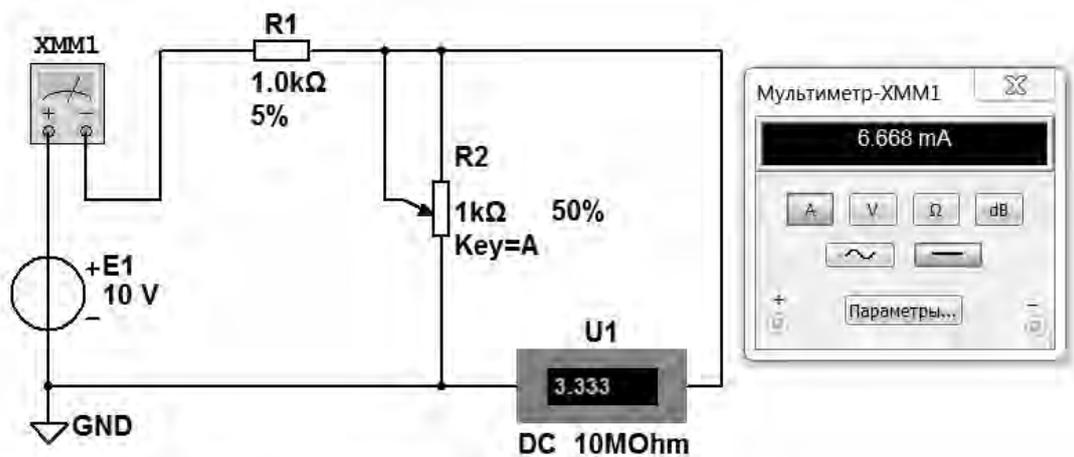


Рисунок 1.4 – Схема в Multisim для исследования электрической цепи с регулируемым сопротивлением

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

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

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

При параллельном соединении конденсаторов их общая емкость (см. рисунок 1.5)

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

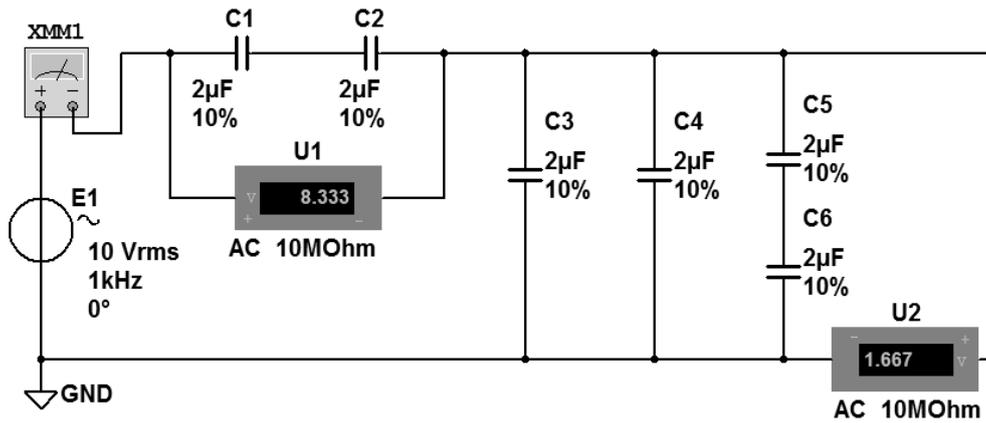


Рисунок 1.5 – Схема смешанного соединения конденсаторов в Multisim

Сопротивление конденсатора переменному току

$$X_C = 1 / 2\pi fC, \quad (1.10)$$

где  $f$  – частота переменного тока, Гц.

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

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

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

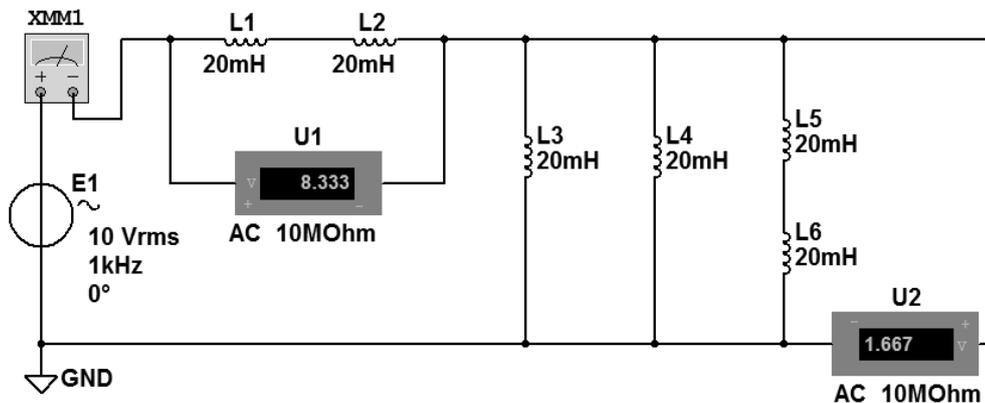


Рисунок 1.6 – Схема смешанного соединения катушек индуктивности в Multisim

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

$$1/L_{3456} = 1/L3 + 1/L4 + 1/L56. \quad (1.13)$$

Сопротивление катушки индуктивности переменному току

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

где  $f$  – частота переменного тока, Гц.



**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

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 XFC1 измеряется частота переменного электрического сигнала в точке «а» схемы, а с помощью двухканального осциллографа XSC1 может быть определена частота и период переменного электрического сигнала в точках «а» и «b» схемы, а также получены формы сигналов в этих точках.

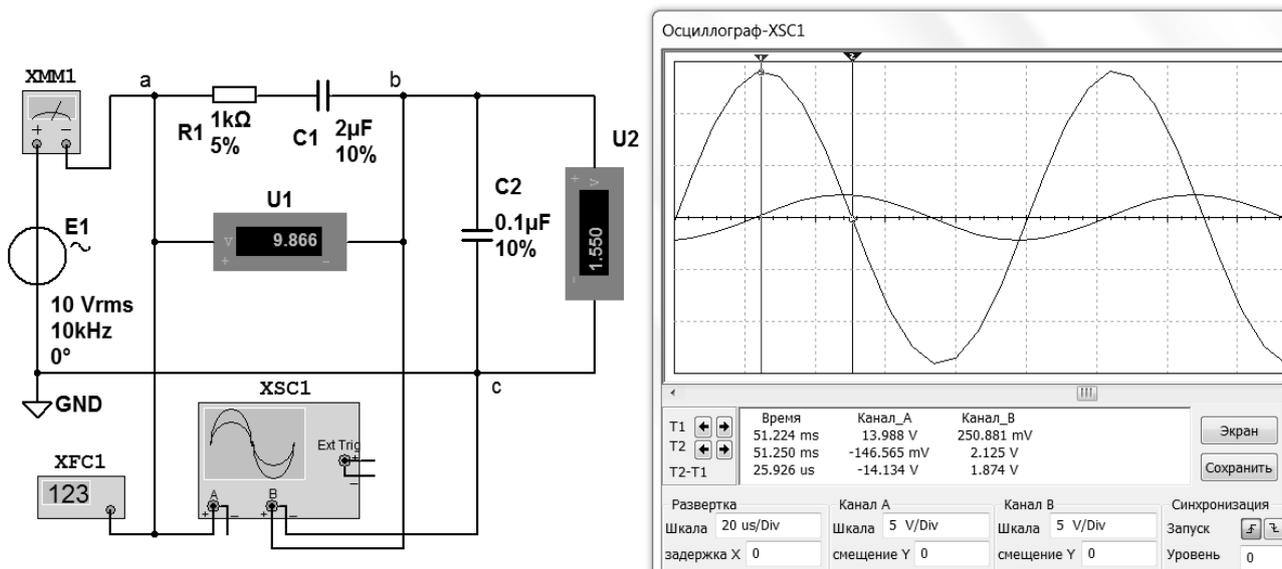


Рисунок 2.1 – Схема для частотного и временного анализа линейной электрической цепи

**Задача 1.** Составьте схему, приведенную на рисунок 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 «а» и «б» схемы.

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

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

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

На рисунке 3.1, а 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  $n$ ).

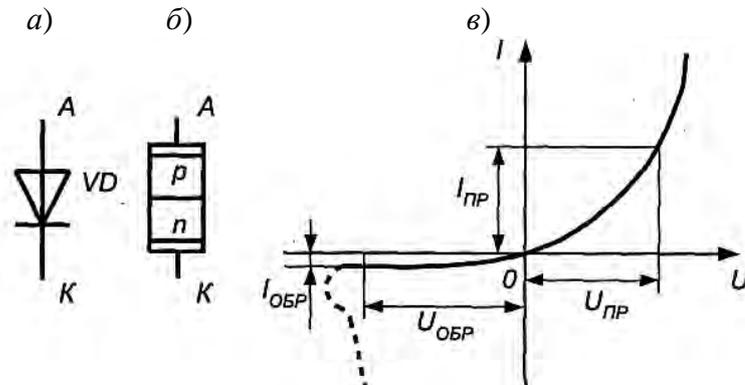


Рисунок 3.1 – Условное обозначение (а), структура (б) и статическая вольт-амперная характеристика (в) полупроводникового диода

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:

–  $U_{np}$  – 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;

–  $I_{np}$  – постоянный выпрямленный ток через диод при заданном прямом напряжении. По величине выпрямленного тока диоды делятся на диоды малой

( $I_{np} < 0,3$  А), средней ( $0,3 < I_{np} < 10$  А) и большой ( $I_{np} > 10$  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:

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

–  $U_{обр.max}$  – 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  $U_{обр.max}$ , т. к. удельное сопротивление собственного кремния много больше сопротивления собственного германия;

–  $P_{max}$  – максимально допустимая мощность, рассеиваемая диодом. Зависит от габаритов, массы диода и его конструкции. У наиболее мощных диодов площадь перехода доходит 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;

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

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

**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 напряжение 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 представлена на рисунке 3.2.

Действующее значение напряжения на нагрузке  $R_H$



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

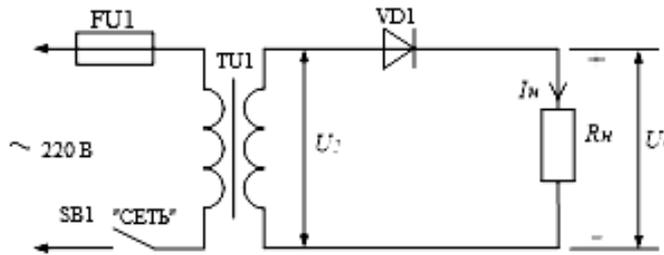


Рисунок 3.2 – Схема однополупериодного выпрямителя

Действующее значение тока через нагрузку

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

Максимальное напряжение на нагрузке

$$U_{HM} = U_{HD} \cdot \sqrt{2} = 10 \cdot 1,414 = 14,14 \text{ В.}$$

Максимальный ток через нагрузку

$$I_{HM} = I_{HD} \cdot \sqrt{2} = 1 \cdot 1,414 = 1,414 \text{ А.}$$

Средние значения напряжения и тока

$$U_{HCP} = U_{HM} / \pi = 14,14 / 3,14 = 4,5 \text{ В;}$$

$$I_{HCP} = I_{HM} / \pi = 1,414 / 3,14 = 0,45 \text{ А.}$$

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

Действующее напряжение на вторичной обмотке трансформатора

$$U_{2Д} = U_{HD} + U_{np.VD1} = 10 + 1 = 11 \text{ В.}$$

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

$$K_{II} = U_{HM} / U_{CPH} = 14,14 / 4,5 = 3,14.$$

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

$$U_{2M} = U_{HM} + U_{np.VD1} = 14,14 + 1 = 15,14 \text{ В.}$$

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

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.

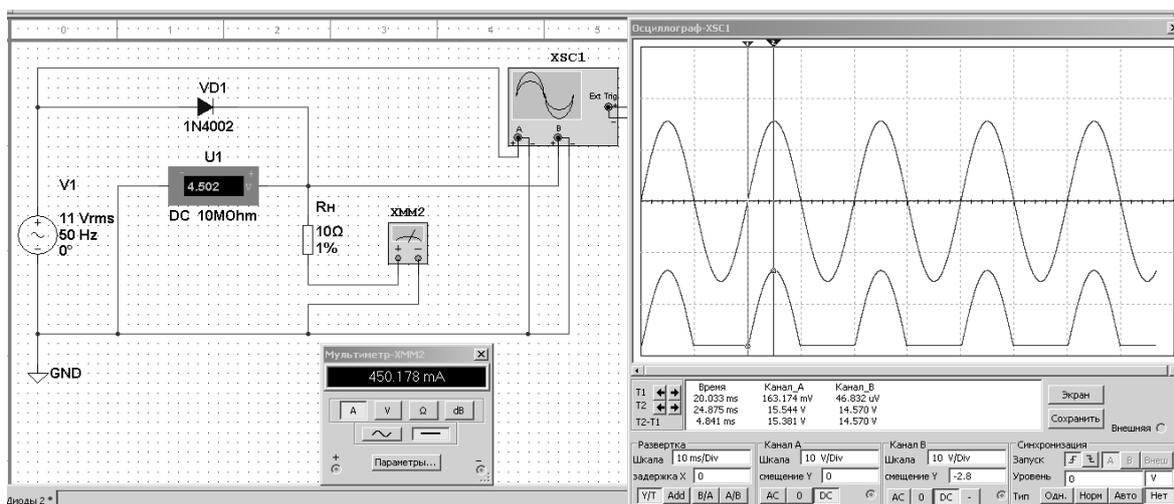


Рисунок 3.3 – Результаты моделирования работы однополупериодного выпрямителя в Multisim

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 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  $U_{10} = 220 \text{ В}$ ,  $F = 50 \text{ Гц}$ . Определите действующие средние и максимальные токи и напряжения на нагрузке, действующее и максимальное напряжение на вторичной обмотке трансформатора, действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора, коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке. Выберите диод для выпрямителя, обоснуйте выбор.

**Задача 3.** 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  $U_{10} = 220$  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 диоды для выпрямителя, обоснуйте выбор.

### Решение

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

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

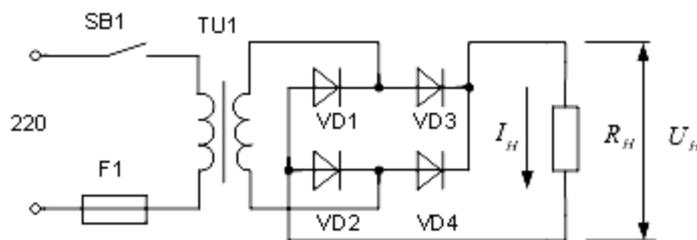


Рисунок 3.4 – Схема мостового выпрямителя

Действующее значение тока через нагрузку

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

Максимальные значения напряжения и тока нагрузки

$$U_{НМ} = U_{НД} \sqrt{2} = 12 \cdot 1,414 = 16,97 \text{ В;}$$

$$I_{НМ} = I_{НД} \sqrt{2} = 1,33 \cdot 1,414 = 1,88 \text{ А;}$$

Средние значения напряжения и тока нагрузки

$$U_{Нср} = \frac{2U_{НМ}}{\pi} = \frac{2 \cdot 16,97}{3,14} = 10,8 \text{ В;}$$

$$I_{Нср} = \frac{2I_{НМ}}{\pi} = \frac{2 \cdot 1,88}{3,14} = 1,2 \text{ А.}$$

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

Действующее значение тока на вторичной обмотке трансформатора

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

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

$$K_{П} = \frac{U_{НМ}}{U_{НСр}} = \frac{16,97}{10,8} = 1,57.$$

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

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

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

**Задача 4.** Разработайте схему мостового выпрямителя на полупроводниковых диодах для питания активной нагрузки с потребляемой мощностью  $P_H = 10 \text{ Вт}$ . Напряжение на первичной обмотке трансформатора  $U_{1\partial} = 220 \text{ В}$ ,  $F = 50 \text{ Гц}$ , ток через вторичную обмотку трансформатора  $I_{2\partial} = 0,62 \text{ А}$ . 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. Выполните моделирование работы разработанной схемы в Multisim.

**Задача 5.** 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  $R_H = 14 \text{ Ом}$ . Мощность, потребляемая нагрузкой,  $P_H = 18 \text{ Вт}$ . Напряжение на первичной обмотке трансформатора  $U_{1\partial} = 220 \text{ В}$ ,  $F = 50 \text{ Гц}$ .

**Задача 6.** 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  $R_1$ , 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  $E = 12$  В.

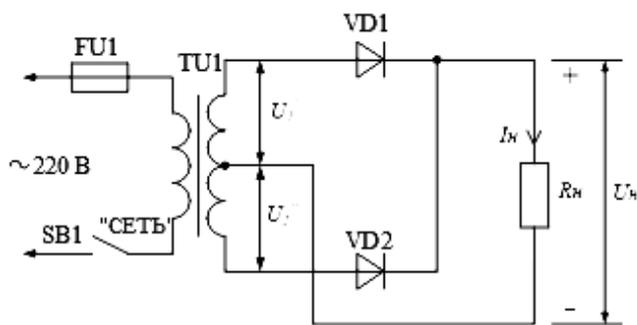


Рисунок 3.5 – Схема двухполупериодного выпрямителя со средней точкой трансформатора

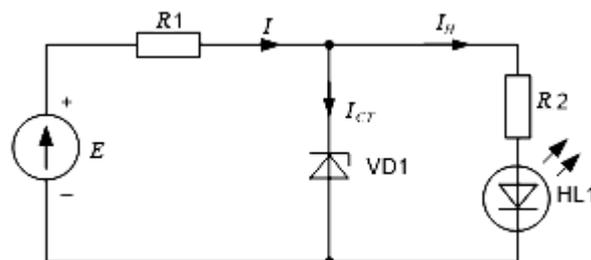


Рисунок 3.6 – Параметрический стабилизатор напряжения

### Решение

Стабилитрон КС168А имеет следующие параметры:

$U_{СТ.НОМ} = 6,8$  В;  $I_{СТ.НОМ} = 10$  мА;  $I_{СТ.мин} = 3$  мА;  $I_{СТ.макс} = 45$  мА;  
 $U_{СТ.мин} = 6,12$  В;  $U_{СТ.макс} = 7,48$  В.

Параметры светодиода АЛ307Б:

- цвет свечения – красный;
- длина волны – 665 нм;
- постоянный прямой ток  $I_{ПР.НЛ1} = 10$  мА;
- постоянное прямое напряжение  $U_{ПР.НЛ1} = 2$  В;
- постоянный максимальный прямой ток – 22 мА.

Сопротивление резистора  $R1$  рассчитаем по формуле

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

Выбираем резистор  $R2 = 160$  Ом из ряда Е24. Мощность, рассеиваемую на резисторе  $R1$ , определим для случая, когда  $E = 14$  В.

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

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

Сопротивление резистора  $R2$  рассчитаем по формуле

$$R2 = \frac{U_{СТ.НОМ} - U_{ПР.НЛ1}}{I_{ПР.НЛ1}} = \frac{6,8 - 2}{10 \cdot 10^{-3}} = 480 \text{ Ом.}$$

Выбираем резистор  $R2 = 470$  Ом из ряда Е24. Мощность, рассеиваемая на резисторе  $R2$ ,



$$P_{R1} = (U_{CT,НОМ} - U_{IP,HL1}) \cdot I_H = 4,8 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 0,048 \text{ Вт.}$$

Выбираем резистор  $R1$  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:

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

где  $\Delta U_{ВХ} = E_2 - E_1 = 14 - 10 = 4 \text{ В}$ ;

$U_{ВХ} = 10 \text{ В}$ ;

$\Delta U_{ВЫХ} = U_{СТ.НОМ} = 6,8 \text{ В}$ .

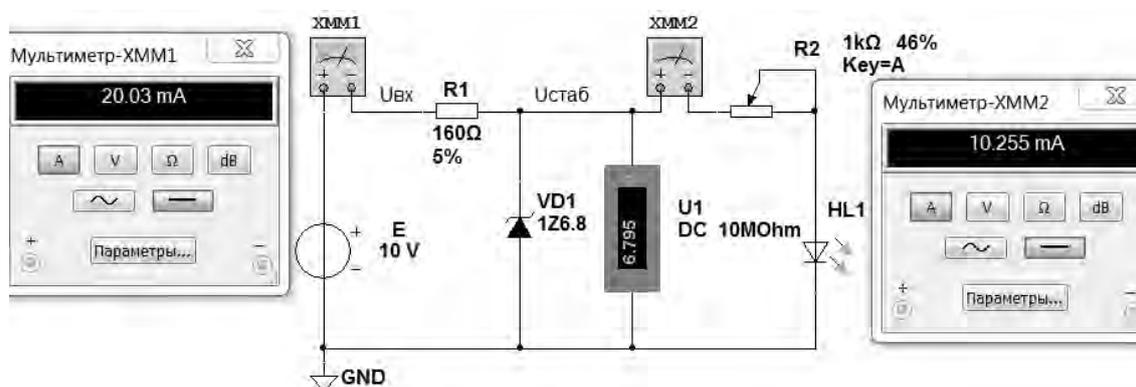


Рисунок 3.7 – Схема параметрического стабилизатора напряжения в Multisim

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

$$\Delta U_{ВЫХ} = U_{СТАБ.2} - U_{СТАБ.1} = 0,245 \text{ В,}$$

где  $U_{СТАБ.2} = 7,036 \text{ В}$  при  $E_2 = 14 \text{ В}$ ;

$U_{СТАБ.1} = 6,86 \text{ В}$  при  $E_1 = 10 \text{ В}$ .

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):

$$\delta_i = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ}} = \frac{U_{СТАБ.1} - U_{СТАБ.2}}{U_{ВЫХ}} = \frac{0,1}{6,85} = 0,015,$$

где  $U_{СТАБ.1} = 6,994 \text{ В}$  при  $I_{ПР.НЛ1} = 5 \text{ мА}$ ;

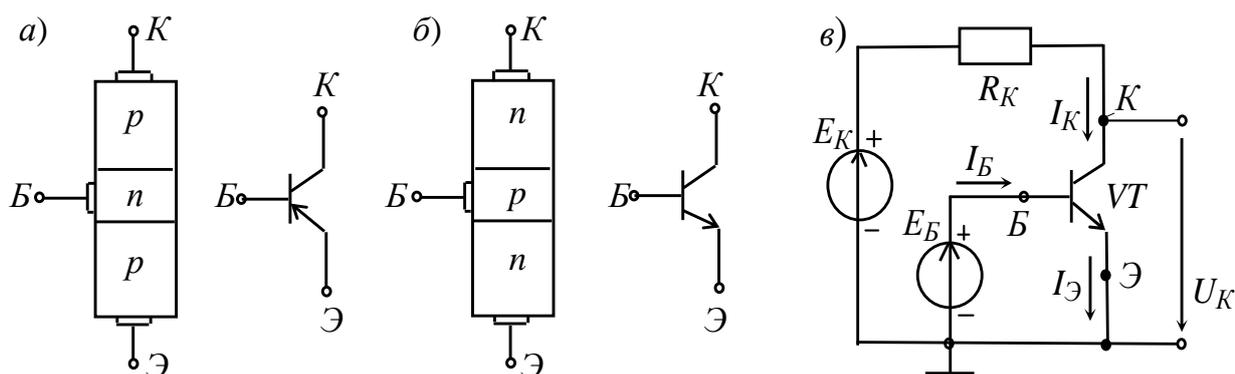
$U_{СТАБ.2} = 6,894 \text{ В}$  при  $I_{ПР.НЛ2} = 15 \text{ мА}$ .

**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 свето-

диод HL1 AL307B. 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 Биполярные транзисторы: принцип и режимы работы; схемы включения; основные параметры. Полевые транзисторы: принцип работы; основные схемы включения

**Биполярный транзистор** представляет собой кристалл полупроводника, состоящий из трех слоев с чередующейся проводимостью и снабженный тремя выводами для подключения к внешней цепи (рисунок 4.1, а, б).



Э – эмиттер,  $K$  – коллектор,  $B$  – база

Рисунок 4.1 – Структура, обозначение биполярных транзисторов разных типов, схема включения с общим эмиттером

Как видно из рисунка, в каждой из этих структур существуют два  $p$ - $n$ -перехода – эмиттерный и коллекторный.

Схема включения транзистора с ОЭ (см. рисунок 4.1, в) является наиболее распространенной вследствие малого тока базы во входной цепи и усиления входного сигнала как по напряжению, так и по току.

Полярность внешних источников  $E_B$  и  $E_K$  выбирается так, чтобы на эмиттерном переходе было прямое напряжение, а на коллекторном – обратное. Напряжения между коллектором и базой, коллектором и эмиттером, базой и эмиттером обозначаются  $U_{KB}$ ,  $U_{KЭ}$ ,  $U_{БЭ}$  соответственно.

Важнейшими характеристиками биполярного транзистора являются его входные и выходные вольт-амперные характеристики (ВАХ). Входные характеристики транзистора с ОЭ (рисунок 4.2, а) отражают зависимость тока базы

от напряжения, приложенного между базой и эмиттером, при  $U_{КЭ} = \text{const}$ . Они мало зависят от  $U_{КЭ}$ , поэтому обычно приводят одну характеристику  $I_B(U_{БЭ})$ , которая, как видно, подобна ВАХ диода. Выходные характеристики отражают зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером при  $I_B = \text{const}$  (рисунок 4.2, б). Биполярный транзистор в процессе работы может находиться в одном из трех состояний: *отсечки*, *активном* и *насыщения* (см. рисунок 4.2, б).

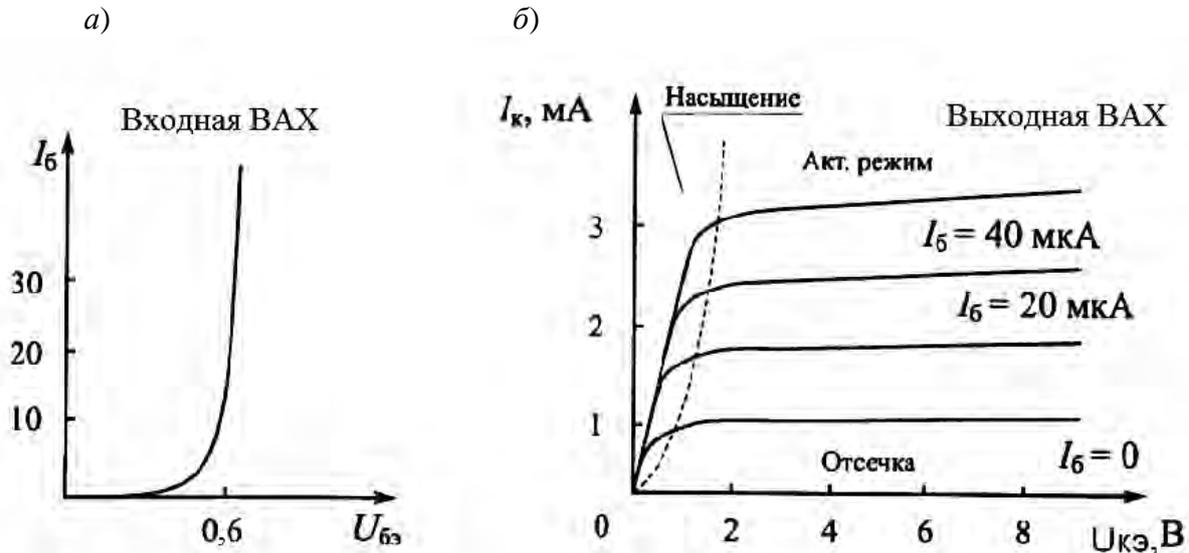


Рисунок 4.2 – Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора при включении в режиме с «общим эмиттером»

В состоянии отсечки биполярный транзистор закрыт, он имеет большое внутреннее сопротивление, прямые токи через него не протекают. В состоянии насыщения биполярный транзистор полностью открыт, имеет минимальное внутреннее сопротивление и максимальный ток, протекающий через него, ограничиваемый внешними резисторами (резистором). Состояние насыщения наступает тогда, когда входной сигнал (ток, протекающий через базу транзистора) перестает влиять на ток коллектора.

Активное состояние транзистора характеризуется тем, что он открыт и ток, протекающий через него, зависит и изменяется под воздействием входного сигнала (тока базы):

$$I_K = h_{21Э} \cdot I_B,$$

где  $I_K$  – ток коллектора;

$I_B$  – ток базы;

$h_{21Э}$  – коэффициент передачи тока базы.

**Полевой транзистор** – это полупроводниковый прибор, в котором ток стока  $S$  через полупроводниковый канал  $n$ - или  $p$ -типа управляется электрическим полем, возникающим при приложении напряжения между затвором  $Z$  и истоком  $I$ . Полевые транзисторы изготавливают:

– с управляющим затвором типа  $p$ - $n$ -перехода для использования в высо-

кочастотных (до 12...18 ГГц) преобразовательных устройствах (их условное обозначение на схемах приведено на рисунке 4.3, а и б);

– с *изолированным затвором* для использования в устройствах, работающих с частотой до 1...2 ГГц. Их изготавливают или со *встроенным каналом* в виде МДП-структуры (их условное обозначение на схемах приведено на рисунке 4.3, в и г), или с *индуцированным каналом* в виде МОП-структуры (их условное обозначение на схемах приведено на рисунке 4.3, д и е).

Схема включения полевого транзистора с затвором типа  $p$ - $n$ -перехода и каналом  $n$ -типа, его семейство выходных характеристик  $I_C = f(U_C)$ ,  $U_3 = \text{const}$  и стоко-затворная характеристика  $I_C = f(U_3)$ ,  $I_C = \text{const}$  изображены на рисунке 4.4.

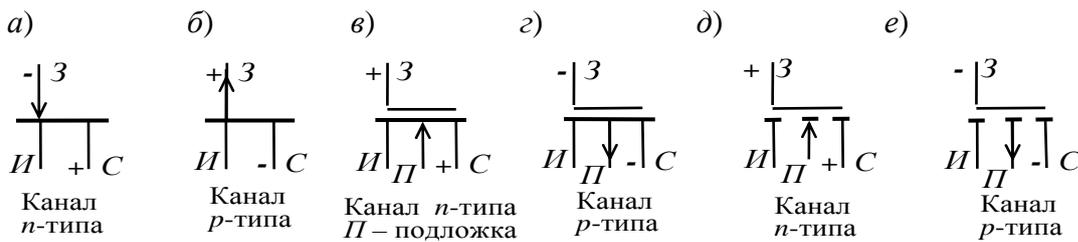


Рисунок 4.3 – Условное обозначение полевых транзисторов

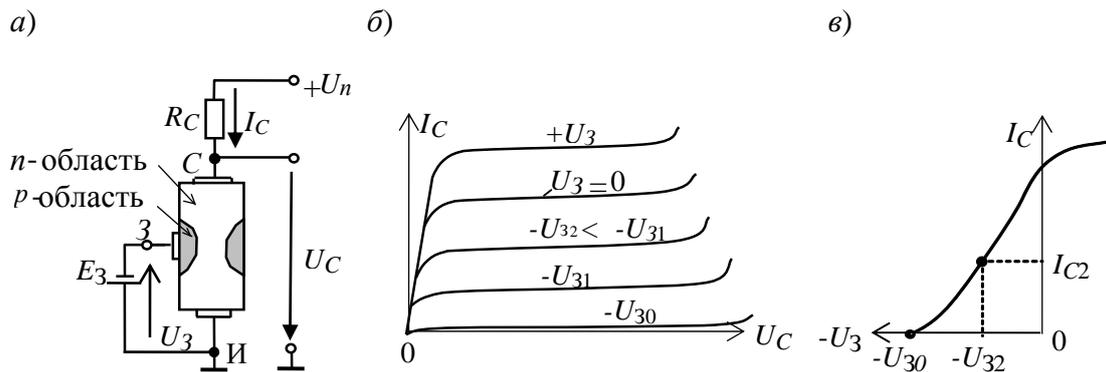


Рисунок 4.4 – Схема включения и характеристики полевого транзистора

При подключении выходов стока  $C$  и истока  $I$  к источнику  $U_n$  по каналу  $n$ -типа протекает начальный ток  $I_C$ , т. к.  $p$ - $n$ -переход не перекрывает сечение канала (см. рисунок 4.4, а). При этом электрод, из которого в канал входят носители заряда, называют *истоком*, а электрод, через который из канала уходят основные носители заряда, – *стоком*. Электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала, называют *затвором*.

При напряжении  $-U_3 = -U_{30}$ , называемым *напряжением отсечки*, сечение канала полностью перекрывается обеднёнными носителями заряда барьерным слоем, и ток стока  $I_{C0}$  (ток отсечки) определяется неосновными носителями заряда  $p$ - $n$ -перехода (см. рисунок 4.4, б).

Важнейшая особенность полевых транзисторов – высокое входное сопротивление (десятки-сотни мегаом) и малый входной ток. Одним из основных параметров полевых транзисторов является *крутизна*  $S = \Delta I_C / \Delta U_3$  стоко-зат-

ворной характеристики (см. рисунок 4.4, в). С увеличением обратного напряжения  $U_3$  уменьшается сечение канала, его сопротивление возрастает и снижается ток стока  $I_C$ . Управление током стока  $I_C$  происходит при подаче обратного напряжения на  $p$ - $n$ -переход затвора 3. В связи с малостью обратных токов в цепи затвор–исток мощность, необходимая для управления током стока, оказывается ничтожно малой.

Схематичная структура полевого транзистора с индуцированным  $n$ -каналом представлена на рисунке 4.5. Электрод затвора изолирован от полупроводникового канала с помощью слоя диэлектрика из двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$ . Поэтому полевой транзистор с такой структурой называют МОП-транзистором (металл–оксид–полупроводник). Электроды стока и истока располагаются по обе стороны затвора и имеют контакт с полупроводниковым каналом. При напряжении на затворе относительно истока равным нулю и при наличии напряжения на стоке, ток стока  $I_C$  оказывается ничтожно малым. Заметный ток стока появляется только при подаче на затвор напряжения положительной полярности относительно истока, больше так называемого *порогового напряжения*  $U_{3,пор}$ .

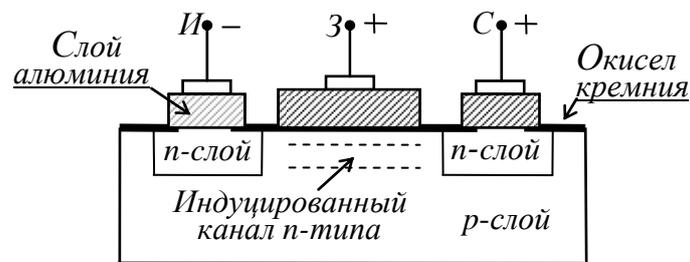


Рисунок 4.5 – Структура полевого транзистора с индуцированным каналом  $n$ -типа

При этом в результате проникновения электрического поля через диэлектрический слой в полупроводник при напряжениях на затворе, больших  $U_{3,пор}$ , у поверхности полупроводника под затвором возникает инверсионный слой, который и является каналом, соединяющим исток со стоком. Толщина и поперечное сечение канала изменяются с изменением напряжения на затворе, соответственно будет изменяться ток стока.

В полевом транзисторе со встроенным каналом при нулевом напряжении на затворе ток стока имеет начальное значение  $I_{C0}$ . Такой транзистор может работать как в режиме обогащения, так и в режиме обеднения: при увеличении напряжения на затворе канал обогащается носителями зарядов и ток стока растёт, а при уменьшении напряжения на затворе канал обедняется и ток стока снижается.

**Задача 1.** Рассчитайте ток коллектора  $I_K$  биполярного транзистора, если ток базы  $I_б = 120$  мкА, а коэффициент передачи тока базы  $h_{21Э} = 90$ .

**Задача 2.** Рассчитайте ток базы  $I_B$  биполярного транзистора, если ток коллектора  $I_K = 12$  мА, а коэффициент передачи тока базы  $h_{21Э} = 30$ .

**Задача 3.** Рассчитайте ток эмиттера  $I_Э$  биполярного транзистора, если ток коллектора  $I_K = 15$  мА, а коэффициент передачи тока базы  $h_{21Э} = 50$ .

**Задача 4.** Опишите принцип работы полевого транзистора с индуцированным каналом  $n$ -типа.

**Задача 5.** Нарисуйте структуру и опишите принцип работы полевого транзистора с индуцированным каналом  $p$ -типа.

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

**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  $I_{K_{\max}} = 1,6$  мА, частота среза  $f_C = 100$  Гц на уровне  $-3$  дБ, коэффициент передачи тока базы  $\beta$  ( $h_{21Э}$ ) взят равным 50. Выполнить моделирование его работы в Multisim.

*Решение*

Схема усилителя представлена на рисунке 5.1.

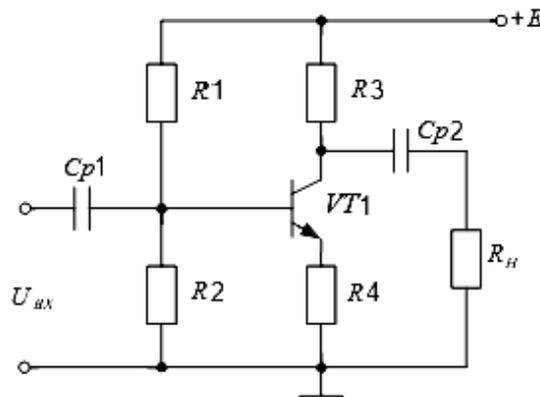


Рисунок 5.1 – Схема однокаскадного усилителя на транзисторе  $n-p-n$ -типа

В режиме покоя (при  $U_{BX} = 0$ ) напряжение на коллекторе должно быть равно половине ЭДС источника питания:

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

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

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

Тогда

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

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,

$$I_{Э0} \cong I_{K0} = 0,8 \text{ мА.}$$

Тогда напряжение на эмиттере в режиме покоя

$$U_{Э0} = I_{K0} \cdot R4 = 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 510 = 4,1 \text{ В.}$$

Определим потенциал базы в режиме покоя:

$$U_{BO} = U_{Э0} + U_{БЭ} = 4,1 + 0,6 = 4,7 \text{ В.}$$

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

$$\begin{cases} \frac{R1}{R2} = \frac{E - U_{BO}}{U_{BO}}; \\ \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} = 0,1\beta \cdot R4. \end{cases}$$

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

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

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

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

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 5.2).

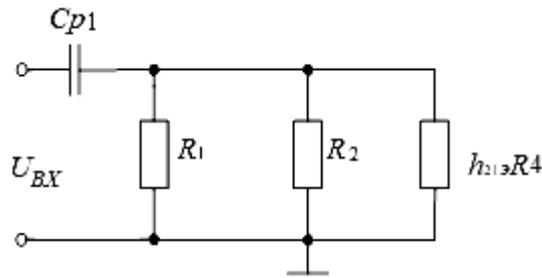


Рисунок 5.2 – Усилитель как ФВЧ для входного сигнала

На частоте среза для ФВЧ выполняется условие:

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

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

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

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

Выбираем  $C_{P1} = 0,68$  мкФ.

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

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

Приняв  $R_H = R3 = 7,5$  кОм, найдем  $C_{P2}$ :

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

Выбираем  $C_{P2} = 0,2$  мкФ.

Схема для моделирования работы усилителя в Multisim представлена на рисунке 5.3.

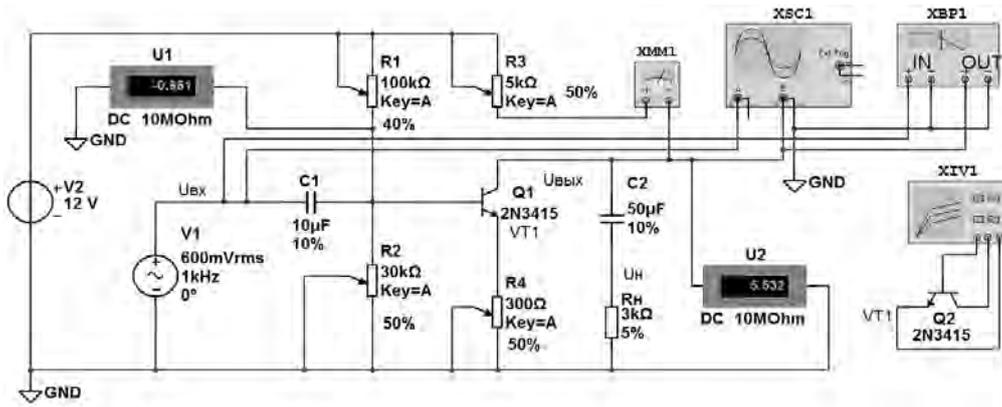


Рисунок 5.3 – Схема однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе  $n-p-n$ -типа в Multisim

**Задача 2.** 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  $I_{кmax} = 3$  мА, частота среза на уровне  $-3$  дБ  $f_c = 200$  Гц,  $\beta = 100$ . Выполнить моделирование работы усилителя в Multisim.

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

**Задача 1.** Рассчитайте двухтактный усилитель мощности, схема которого представлена на рисунке 6.1, если  $E_K = \pm 20$  В,  $R_H = 8$  Ом,  $P_H = 10$  Вт.

*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

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

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

Определим напряжение на базе транзистора VT1.

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

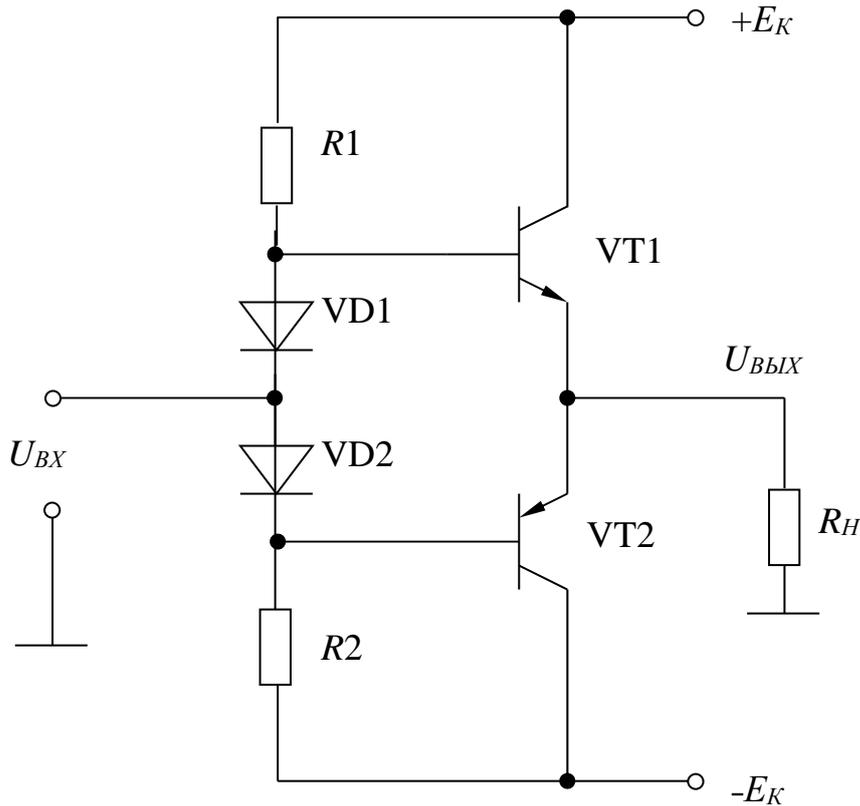


Рисунок 6.1 – Двухтактный усилитель мощности на биполярных транзисторах

На резисторе  $R_1$  падение напряжения составит

$$U_{R_1} = +E_K - U_{B.\max} = 20 - 13,9 = 6,1 \text{ В.}$$

С учетом полученных максимальных значений токов через нагрузку, которые будут протекать и через транзисторы  $VT_1$  и  $VT_2$ , выбираем следующие транзисторы:  $VT_1$  – КТ819Б,  $VT_2$  – КТ818Б, у которых  $\beta = 20$ .

Определим базовые токи в транзисторах  $VT_1$  и  $VT_2$ :

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

Для обеспечения полученных значений токов в базовых цепях транзисторов сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$  должны быть

$$R_1 = R_2 = U_{R_1} / I_{B.\max} = 6,1 / 0,083 = 73,5 \text{ Ом.}$$

Выбираем стандартное значение сопротивления 75 Ом.

Определим ток, протекающий через резисторы  $R_1$ ,  $R_2$ , диоды  $VD_1$ ,  $VD_2$  в режиме покоя (при отсутствии входного сигнала  $U_{BX} = 0$ ):

$$I_{R_1} = I_{R_2} = \frac{2E_K - 2U_{\text{пр. VD}}}{R_1 + R_2} = \frac{40 - 2}{150} = 0,25 \text{ А.}$$

По найденному значению тока через резисторы  $R_1$  ( $R_2$ ) в режиме покоя выбираем диоды типа КД226А, у которых  $I_{ПР.СР} = 1,7$  А,  $U_{ОБР.} = 100$  В. Рассчитаем мощность, рассеиваемую на резисторах  $R_1$ ,  $R_2$ .

$$P_{R1} = P_{R2} = I_{R10}^2 \cdot R1 = I_{R20}^2 \cdot R2 = (0,25)^2 \cdot 75 = 6,7 \text{ Вт.}$$

Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  выбираем с рассеиваемой мощностью  $P = 10$  Вт.

**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 6.1, если  $E_K = \pm 24$  В,  $R_H = 4$  Ом,  $P_H = 10$  Вт.

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

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

*Решение*

Схема усилителя имеет следующий вид (см. рисунок 7.1).

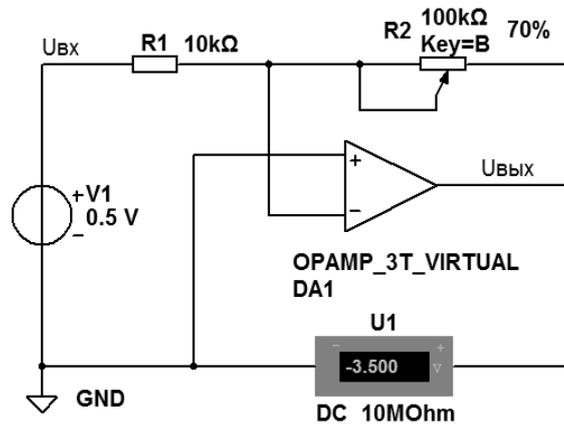


Рисунок 7.1 – Схема инвертирующего усилителя на ОУ в Multisim

Коэффициент усиления инвертирующего усилителя

$$K_V = \frac{R3}{R1} = 7.$$

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



**Задача 2.** Разработайте электрическую принципиальную схему инвертирующего усилителя на микросхеме К140УД8 с коэффициентом усиления  $K_V = 10$ . Выполните моделирование работы усилителя в Multisim.

**Задача 3.** Разработайте электрическую принципиальную схему инвертирующего усилителя на микросхеме К544УД2 с коэффициентом усиления  $K_V = 16$ . Выполните моделирование работы усилителя в Multisim.

**Задача 4.** Разработайте электрическую схему в Multisim неинвертирующего усилителя на ОУ с коэффициентом усиления  $K_V = 5$ . Выполните моделирование работы усилителя.

### Решение

Схема усилителя представлена на рисунке 7.2. Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя равен

$$K_V = \frac{R_2}{R_1} + 1 = 5.$$

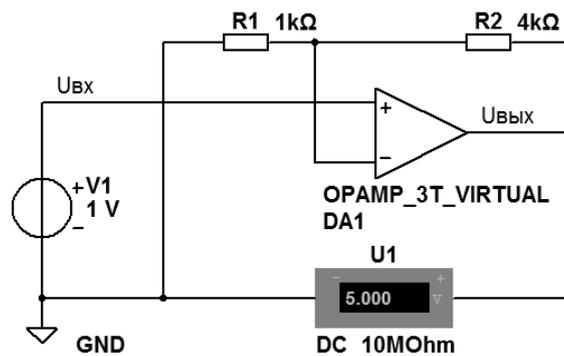


Рисунок 7.2 – Схема неинвертирующего усилителя на ОУ в Multisim

Выбираем  $R_1 = 1$  кОм. Тогда  $R_2 = R_1 \cdot (K_V - 1) = 1 \cdot 4 = 4$  кОм.

**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 инвертора в Multisim. Выполните моделирование его работы.

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

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

Для усиления разностного сигнала используется схема на трёх операционных усилителях (рисунок 8.1).

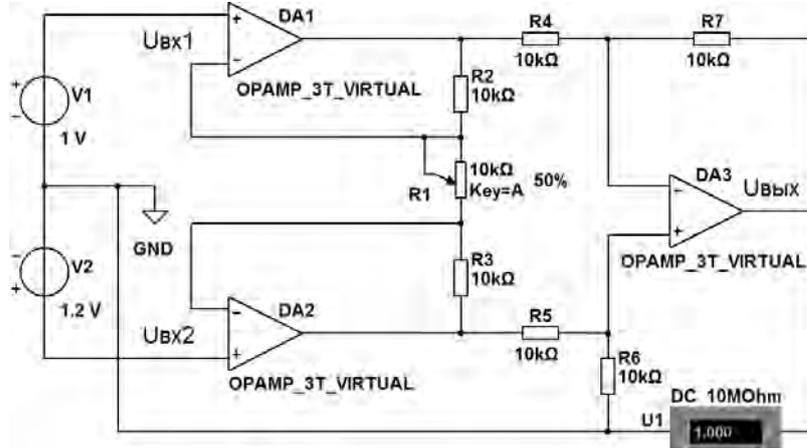


Рисунок 8.1 – Инструментальный усилитель на трех ОУ

Выходной сигнал такого усилителя

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

Выражение во второй скобке определяет коэффициент усиления

$$K_v = \frac{R2 + R3}{R1} + 1.$$

**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 8.1. Выбираем резисторы  $R2 = R3 = R4 = R5 = R6 = R7 = 10 \text{ кОм}$ . Тогда

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

Выражение во второй скобке определяет коэффициент усиления

$$K_v = \frac{R2 + R3}{R1} + 1.$$

Выберем переменный резистор  $R1 = 10 \text{ кОм}$ . С его помощью осуществляется регулировка коэффициента усиления.

**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.

## 9 Методика расчета суммирующего и вычитающего усилителя на основе ОУ. Моделирование их работы в Multisim

**Задача 1.** Разработайте электрическую схему в Multisim двухвходового сумматора на ОУ с коэффициентом усиления: по первому входу  $K_{V1} = 3$ , по второму –  $K_{V2} = 5$ . Выполните моделирование его работы в Multisim.

*Решение*

Схема сумматора приведена на рисунке 9.1.

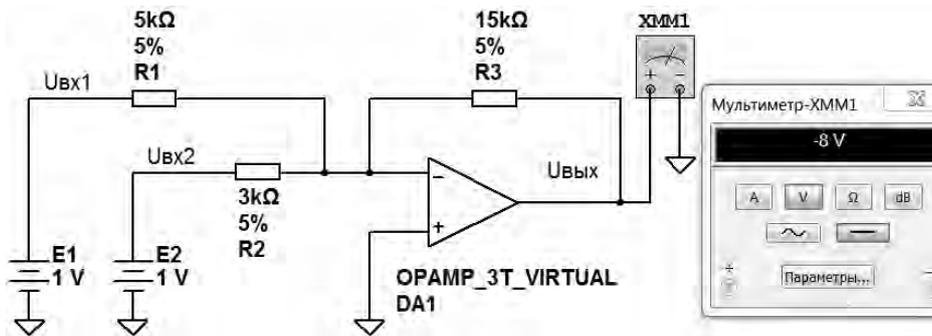


Рисунок 9.1 – Схема двухвходового сумматора на ОУ в Multisim

Работа двухвходового сумматора описывается следующим выражением:

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

где  $R3 / R1 = K_{V1}$ ;

$R3 / R2 = K_{V2}$ .

Выбираем  $R3 = 15$  кОм. Тогда

$$R1 = \frac{R3}{K_{V1}} = \frac{15}{3} = 5 \text{ кОм}; \quad R2 = \frac{R3}{K_{V2}} = \frac{15}{5} = 3 \text{ кОм}.$$

**Задача 2.** Разработайте электрическую принципиальную схему вычитающего устройства на одном ОУ с коэффициентом усиления  $K_V = 2$ . Определите  $U_{ВЫХ}$ , если  $U_{ВХ1} = 1$  В, а  $U_{ВХ2} = 3$  В. Выполните моделирование его работы в Multisim.

### Решение

Схема вычитающего устройства на одном ОУ приведена на рисунке 9.2.

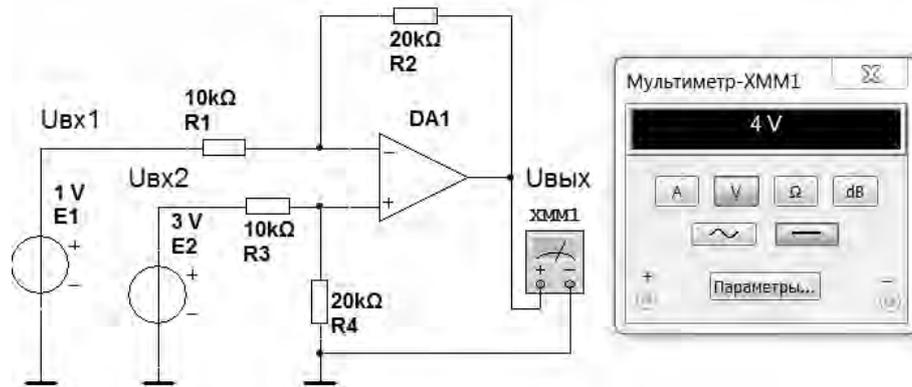


Рисунок 9.2 – Схема вычитающего устройства на одном ОУ в Multisim

Его работа описывается следующим выражением:

$$U_{ВЫХ} = -(U_{ВХ2} - U_{ВХ1}) \cdot \frac{R2}{R1},$$

где  $R2 / R1 = K_V$  при  $R1 = R3$  и  $R2 = R4$ .

Выбираем  $R1 = R3 = 10$  кОм,  $R2 = R4 = 20$  кОм. Тогда  $K_V = R2/R1 = 20/10 = 2$ .

$$U_{ВЫХ} = -(U_{ВХ2} - U_{ВХ1}) \cdot \frac{R2}{R1} = (3 - 1) \cdot \frac{20}{10} = 4 \text{ В.}$$

**Задача 3.** Разработайте электрическую принципиальную схему трехвходового сумматора на микросхеме операционного усилителя К140УД8 с коэффициентами усиления: по первому входу  $K_{V1} = 4$ , по второму –  $K_{V2} = 2$ , по третьему –  $K_{V1} = 3$ . Выполните моделирование работы сумматора в Multisim.

**Задача 4.** Разработайте электрическую принципиальную схему вычитающего устройства на одном ОУ с коэффициентом усиления  $K_V = 3$ . Определите  $U_{ВЫХ}$ , если  $U_{ВХ1} = 0,7$  В, а  $U_{ВХ2} = 1,9$  В. Выполните моделирование его работы в Multisim.

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

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 10.1).

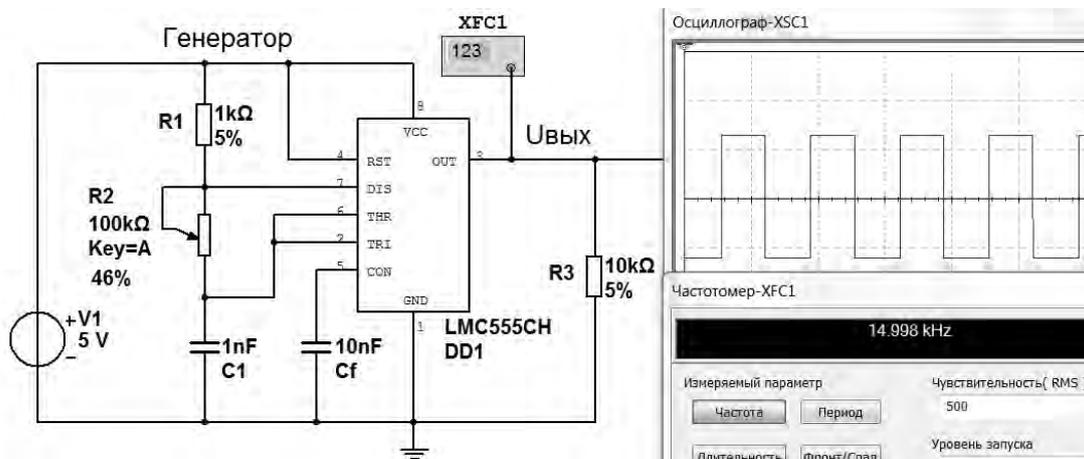


Рисунок 10.1 – Схема в Multisim генератора прямоугольных импульсов на микросхеме LMS555CH (К1006ВИ1)

Резисторы  $R1$ ,  $R2$  и конденсатор  $C1$  задают период следования импульсов. Изменяя параметр одного из этих элементов, можно плавно или дискретно изменять частоту следования импульсов.

Работа генератора описывается выражением

$$F_r = \frac{0,7}{(2 \cdot R1 + R2) \cdot C1} \quad (10.1)$$

**Задача 1.** Составьте схему, приведенную на рисунке 10.1, в Multisim и исследуйте её работу, подключив к ней показанные на схеме приборы. Изменяя

сопротивление резистора  $R2$ , определите диапазон изменения частоты выходного сигнала.

**Задача 2.** По параметрам элементов  $R1$ ,  $R2$  и  $C1$ , указанных на рисунке 10.1, рассчитайте по формуле (10.1) частоту выходного сигнала. Сравните полученный результат с показаниями частотомера XFC1.

**Задача 3.** Выполните расчет и выбор параметров элементов  $R1$ ,  $R2$  и  $C1$  генератора, приведенного на рисунке 10.1, чтобы частота генерируемого им сигнала была равна 80 кГц. Исследуйте работу генератора с такими параметрами в Multisim.

Для выделения полезного измерительного сигнала на фоне помех и ослабления амплитуд неинформативных сигналов используются электрические фильтры. Для их построения широко используются ОУ. На рисунке 10.2 приведена схема однозвенного полосового фильтра (ПФ). ПФ реализован на четырёх операционных усилителях DA1...DA4.

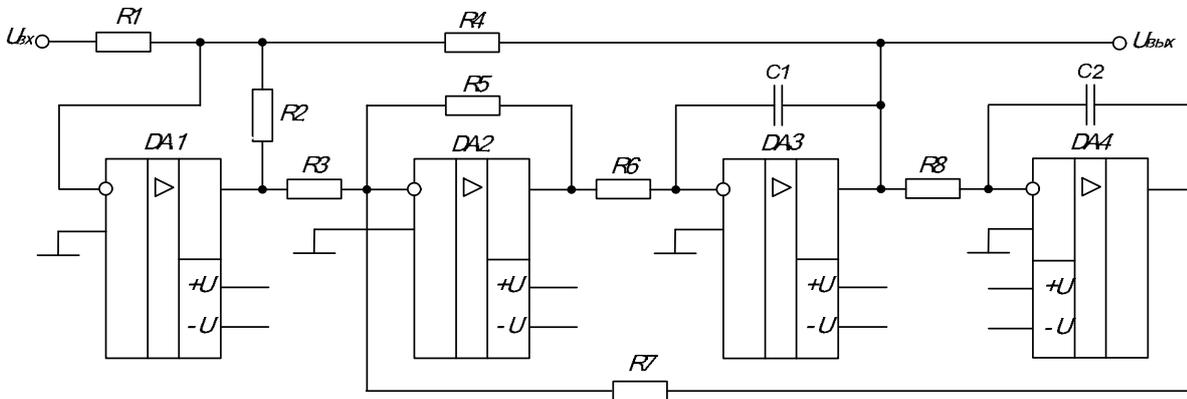


Рисунок 10.2 – Схема полосового фильтра на ОУ

Расчет и выбор элементов для ПФ осуществляется в соответствии с частотой полезного измерительного сигнала  $f_r$  и заданной полосой пропускания ПФ  $\Delta f_{ПФ} = (f_{c2} - f_{c1})$  (рисунок 10.3).

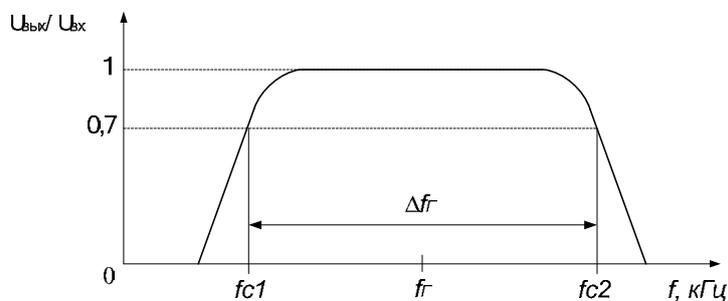


Рисунок 10.3 – Амплитудно-частотная характеристика ПФ

На частоте  $f_r$  работа ПФ описывается следующим выражением:

$$R_{\phi} \cdot C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{\Gamma}}, \quad (10.2)$$

где  $R_{\phi} = R6 = R8$ . Емкости конденсаторов обычно берут равными:  $C2 = C3 = C$ .  
Тогда

$$R_{\phi} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{\Gamma} \cdot C}. \quad (10.3)$$

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

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

$$Q = \frac{f_{\Gamma}}{\Delta f_{ПФ}} = \frac{R4}{R2}. \quad (10.4)$$

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

Схема для моделирования работы фильтра приведена на рисунке 10.4.

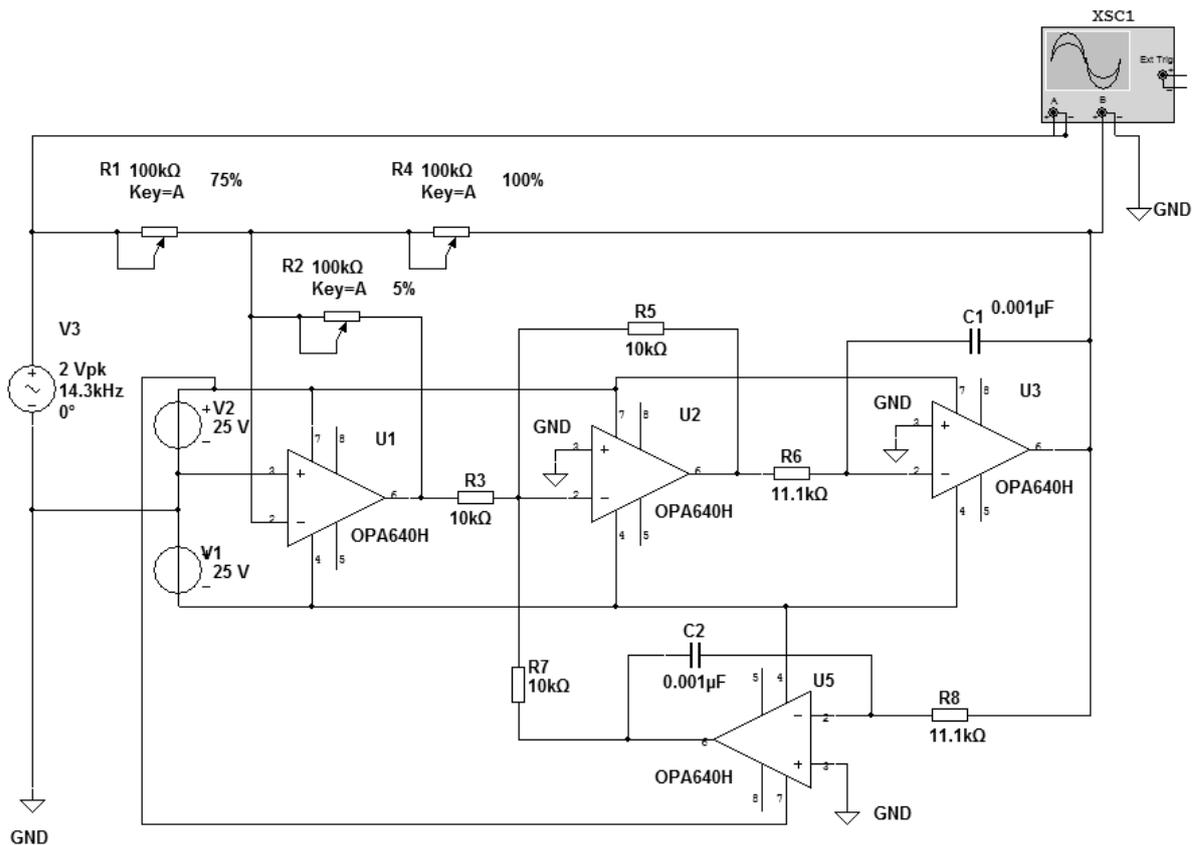


Рисунок 10.4 – Схема для моделирования работы ПФ в Multisim

**Задача 4.** Выполнить расчет и выбор элементов полосового фильтра, схема которого представлена на рисунке 10.2, если середина полосы пропускания  $f_{\Gamma} = 18$  кГц, а полоса пропускания  $\Delta f = 1,6$  кГц. Выполнить моделирование работы разработанного ПФ в Multisim.

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

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

*Решение*

Схема неинвертирующего усилителя на основе операционного усилителя для усиления измерительного сигнала  $U_{BX}$  приведена на рисунке 11.1.

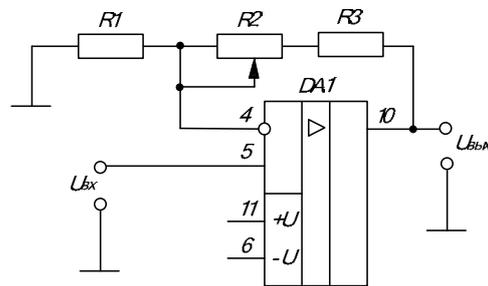


Рисунок 11.1 – Схема неинвертирующего усилителя на основе ОУ для усиления измерительного сигнала

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

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

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

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

**Задача 2.** Разработать схему, выполнить 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 (рисунок 11.2) и изменяющегося в диапазоне от 0 до 300 мВ, до 6 В.

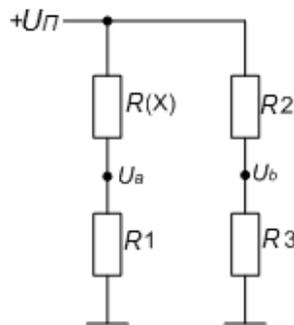


Рисунок 11.2 – Схема измерительного моста с резистивным датчиком  $R(X)$

### Решение

Схема измерительного усилителя на основе трёх операционных усилителей для усиления разностного сигнала  $\Delta U_{ab} = U_a - U_b$  приведена на рисунке 11.3.

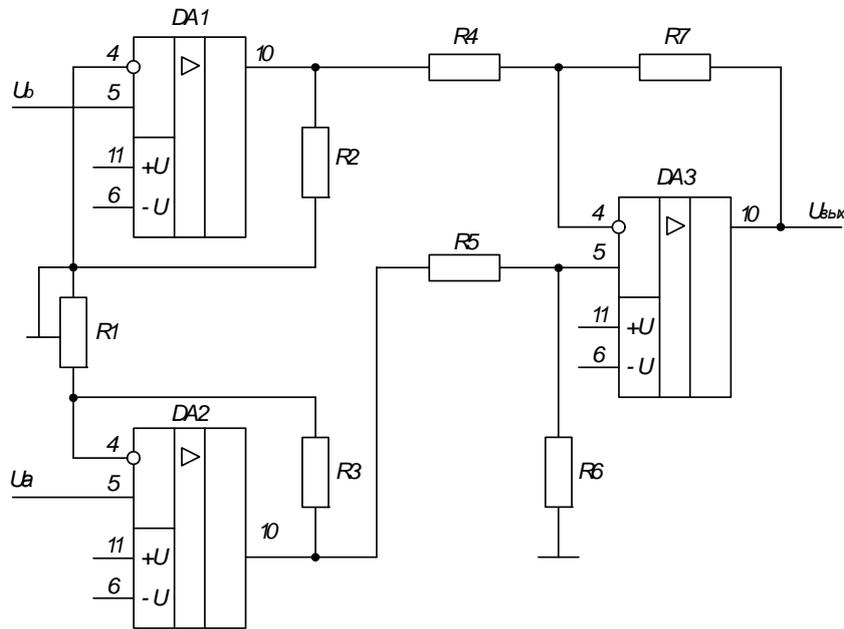


Рисунок 11.3 – Схема измерительного усилителя на трёх ОУ

Выбираем  $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = R = 10$  кОм и  $R_1 = k \cdot R$ . Тогда напряжение на выходе усилителя будет описываться выражением

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

Используя заданное значение напряжения на выходе усилителя  $U_{\text{ВЫХ}} = 6$  В и разностный сигнал  $\Delta U_{ab} = 0,3$  В, найдем из этого выражения коэффициент

$$k = 2\Delta U_{ab} / (U_{\text{ВЫХ}} - \Delta U_{ab}) = 2 \cdot 0,3 / (6 - 0,3) = 0,105.$$

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, мы сможем точно получать заданное значение напряжения на выходе усилителя.

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

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

**Задача 5.** Разработать схему, выполнить 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  $U_{\text{ВХ}} = 170$  мВ. Выполнить моделирование его работы в Multisim.

**Задача 6.** Разработать схему, выполнить 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 11.2) и изменяющегося в диапазоне от 0 до 420 мВ, до 9 В. Выполнить моделирования его работы в Multisim.

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

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

*Решение*

Схема компаратора с гистерезисом показана на рисунке 12.1.

Напряжение  $U_{ВХ}$ , подаваемое на вход компаратора, сравнивается с напряжением  $U_{сраб}$ , которое рассчитывается по формуле

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

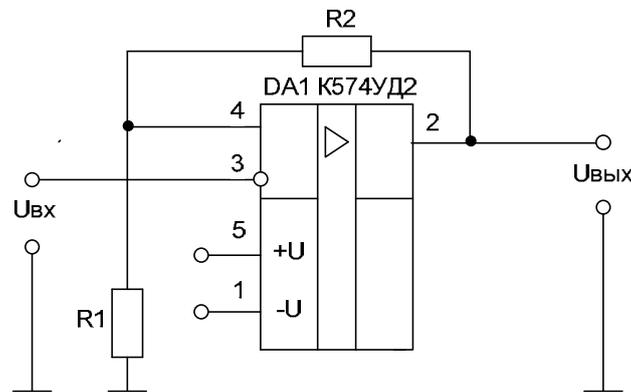


Рисунок 12.1 – Компаратор с гистерезисом на ОУ

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

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

$$U_{ВЫХ} = K_{У ОУ} \cdot (U_{сраб} - U_{ВХ}),$$



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

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

$$U_{ВЫХ} = \pm U_{ВЫХ.макс. ОУ} = K_{у. ОУ} \cdot (U_{сраб} - U_{ВХ}).$$

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 12.2. Моделирования работы разработанного компаратора в Multisim выполнить самостоятельно.

**Задача 2.** Разработать электрическую принципиальную схему компаратора с гистерезисом на основе микросхемы операционного усилителя К140УДб с напряжением срабатывания  $U_{сраб} = 4,5$  В для преобразования входного синусоидального сигнала с амплитудой  $\pm U_{a.макс} = 12$  В. Нарисовать в масштабе временные диаграммы входных и выходного сигналов. Период синусоидального сигнала взять произвольно без указания его числового значения на временных диаграммах. Выполнить моделирование его работы в Multisim.

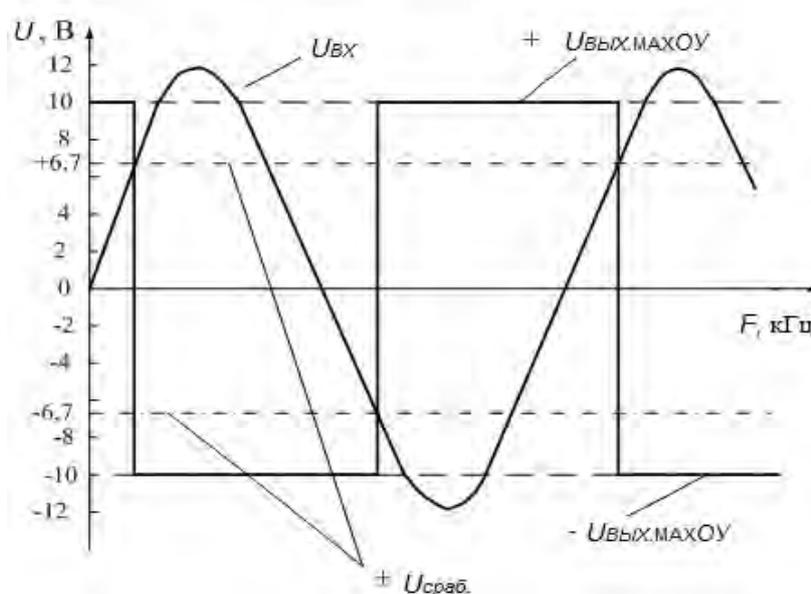


Рисунок 12.2 – Временные диаграммы входных и выходного сигналов компаратора

### 13 Проектирование импульсных усилителей мощности

В настоящее время наблюдается стремительный рост приборов, работающих с импульсными сигналами. Преобладающее применение импульсных устройств обусловлено их высоким КПД, более высокой точностью, меньшей критичностью к изменению температуры, большей помехоустойчивостью, более полным восприятием поступающей в импульсной форме информации.

*Импульсный усилитель* – это устройство, предназначенное для усиления импульсов напряжения или тока. Принципиально импульсный усилитель отличается от аналогичного электронного усилителя тем, что в его схему вводят элементы, уменьшающие переходные процессы и улучшающие качество воспроизведения вершины импульса.

Качество импульсного усилителя оценивается по искажениям формы входного прямоугольного импульса на его выходе. Допустимые искажения формы импульса характеризуются максимально возможными длительностями переднего фронта  $t_f$  и среза  $t_c$ , измеренными на уровнях 0,1 и 0,9 амплитуды сигнала, а также допустимым спадом плоской вершины выходного импульса (рисунок 13.1).

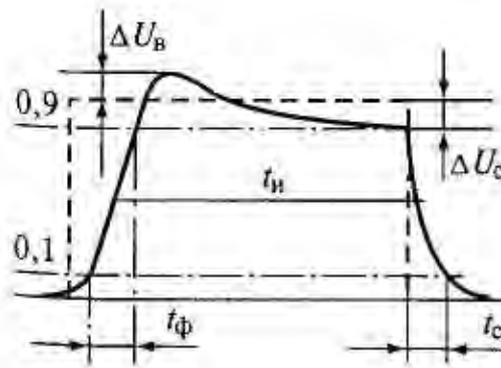


Рисунок 13.1 – Параметры импульса

При реализации импульсных режимов усиления мощности находит применение последовательно-параллельная схема преобразователя, т. е. схема, содержащая два регулирующих элемента. Объясняется это тем, что нагрузка импульсного усилителя, как правило, носит активно-индуктивный характер. Поэтому обязательным условием его работы является обеспечение цепей протекания тока нагрузки в течение всего периода коммутации. Рассмотрим некоторые типовые схемы усилителей мощности. При этом будем полагать, что в качестве управляющего ключа используется, например, биполярный транзистор.

**Схема с замыкающим диодом** – это схема с одним управляемым и одним не управляемым ключами (рисунок 13.2). На интервале импульса транзисторный ключ VT включен и к нагрузке  $R_H L_H$  прикладывается напряжение питания  $U_{II}$ . Ток нагрузки  $I_H = I_{VT}$  возрастает.

При выключении транзистора VT попытка уменьшить ток индуктивности нагрузки  $L_H$  приводит к появлению противоЭДС, открывающей неуправляемый ключ (диод VD) и ток нагрузки  $I_H = I_{VD}$  начинает уменьшаться.

Согласно приведенному описанию, на нагрузке может быть сформирована последовательность однополярных импульсов различной длины, т. е. в схеме реализуем только первый импульсный режим регулирования мощности.

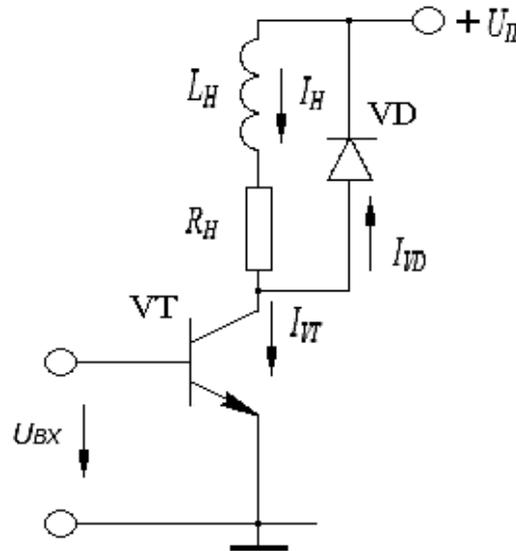


Рисунок 13.2 – Схема импульсного усилителя с замыкающим диодом

**Схема с замыкающим транзистором.** Если в схеме (см. рисунок 13.2) неуправляемый ключ (диод VD) заметить на управляемый (например, транзистор VT) и использовать два источника питания, получим схему, позволяющую реализовать все режимы импульсного регулирования мощности (рисунок 13.3). В данной схеме, если один из транзисторов (VT<sub>1</sub> или VT<sub>2</sub>) постоянно заперт, то реализуется первый импульсный режим: при положительном напряжении на нагрузке заперт VT<sub>2</sub>, при отрицательном – заперт VT<sub>1</sub>. Если транзисторы управляются в противофазе, реализуется второй импульсный режим. Если транзисторы управляются в противофазе и существует интервал, когда они оба заперты, реализуется третий импульсный режим. В этом случае, на интервале пауза, ток нагрузки замыкается через соответствующие диоды (VD<sub>1</sub> или VD<sub>2</sub>).

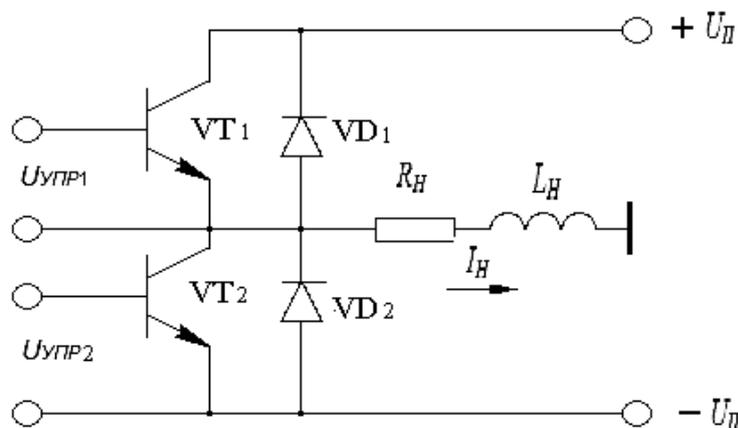


Рисунок 13.3 – Схема импульсного усилителя с замыкающим транзистором

Недостатком этой схемы является необходимость двух источников питания различной полярности. От этого недостатка свободна мостовая схема усилителя мощности.

**Мостовая схема.** В данной схеме каждый вывод нагрузки подключен к выходу своей схемы усилителя с замыкающим транзистором (рисунок 13.4). При этом транзисторы  $VT_1$  и  $VT_4$ , а также  $VT_2$  и  $VT_3$ , работают синхронно. В схеме реализуются все три режима усиления мощности. Например, если переключать транзисторы  $VT_1$  и  $VT_4$ , в схеме реализуется первый импульсный режим при положительном токе нагрузки. Если коммутировать транзисторы  $VT_2$  и  $VT_3$  – реализуется первый импульсный режим при отрицательном токе нагрузки. Противофазное управление парами транзисторов  $VT_1$  и  $VT_4$ , и  $VT_2$  и  $VT_3$  – реализует или второй (пауза между импульсами отсутствует) или третий (управление с паузой) импульсный режимы.

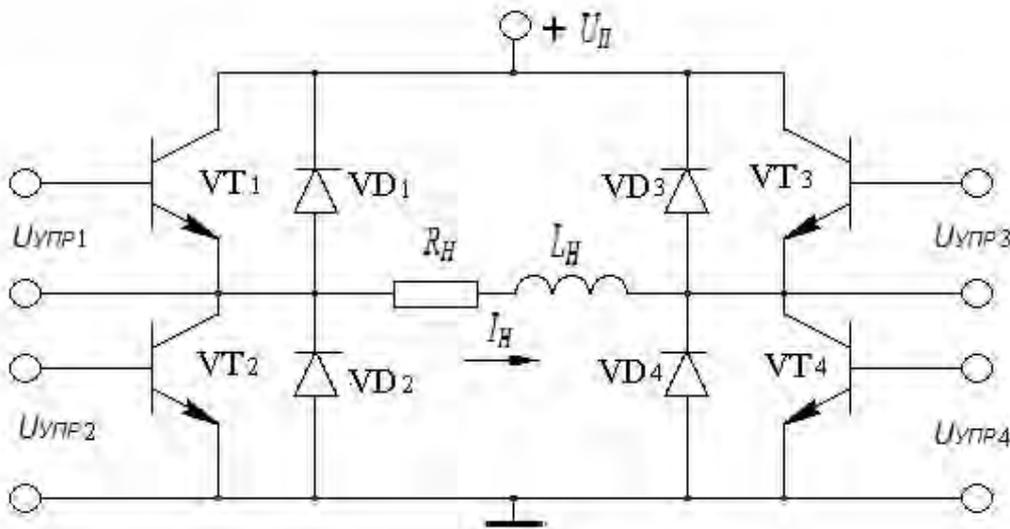


Рисунок 13.4 – Мостовая схема импульсного усилителя

**Задача 1.** Выполните моделирование работы импульсного усилителя мощности в Multisim, схема которого представлена на рисунке 13.2, подавая на его вход последовательность прямоугольных импульсов с частотами 1 кГц, 1 и 100 МГц, амплитудой 1 В.

**Задача 2.** Выполните моделирование работы импульсного усилителя мощности в Multisim, схема которого представлена на рисунке 13.3, подавая на его вход последовательность прямоугольных импульсов с частотами 1 кГц, 1 и 100 МГц, амплитудой 1 В.

**Задача 3.** Выполните моделирование работы импульсного усилителя мощности в Multisim, схема которого представлена на рисунке 13.4, подавая на его вход последовательность прямоугольных импульсов с частотами 1 кГц, 1 и 100 МГц, амплитудой 1 В.

## 14 Проектирование импульсных стабилизаторов напряжения

Импульсный блок питания (ИБП) – это вторичный источник питания, который использует двойное преобразование входного переменного напряжения. ИБП иначе называют инвертором.

В основе работы инвертора лежит выпрямление первичного напряжения и дальнейшее его преобразование в последовательность импульсов высокой частоты. Этим он отличается от обычного трансформатора. Выходное напряжение блока служит для формирования сигнала отрицательной обратной связи, что позволяет регулировать параметры импульсов. Управляя шириной импульсов, легко организовать стабилизацию и регулировку выходных параметров, напряжения или тока. То есть это может быть как стабилизатор напряжения, так и стабилизатор тока.

Количество и полярность выходных значений может быть самым различным в зависимости от того, как работает импульсный блок питания.

Применение нашли несколько типов инверторов, которые отличаются схемой построения: бестрансформаторные, трансформаторные.

Первые отличаются тем, что импульсная последовательность поступает непосредственно на выходной выпрямитель и сглаживающий фильтр устройства. Такая схема имеет минимум комплектующих. Простой инвертор включает в себя специализированную интегральную микросхему – широтно-импульсный генератор.

Из недостатков бестрансформаторных ИБП главным является то, что они не имеют гальванической развязки с питающей сетью и могут представлять опасность удара электрическим током. Также они обычно имеют небольшую мощность и выдают только одно значение выходного напряжения.

Более распространены трансформаторные ИБП, в которых высокочастотная последовательность импульсов поступает на первичную обмотку трансформатора. Вторичных обмоток может быть несколько, что позволяет формировать нужное количество выходных напряжений. Каждая вторичная обмотка нагружается на собственный выпрямитель и сглаживающий фильтр. Использование трансформаторов для преобразования напряжения высокой частоты (десятки килогерц вместо 50 Гц) позволило многократно снизить их габариты и массу и использовать в качестве материала сердечника (магнитопровода) не электротехническое железо, а ферромагнитные материалы с высокой коэрцитивной силой.

Структурная схема ИБП приведена на рисунке 14.1. Входящее переменное напряжение сети сначала выпрямляется полупроводниковыми диодами 1 (сборками, мостами), затем емкостной фильтр 2 сглаживает пульсирующее напряжение. Электронный ключ 3 является элементом генератора, вырабатывающего прямоугольные импульсы высокой частоты, которые поступают на импульсный трансформатор 4, который служит одновременно гальванической развязкой. Таким образом, в ИБП снова создаётся переменный ток. На выходе снова стоят выпрямитель 1 и фильтр 2. Для того, чтобы стабилизировать  $U_{ВЫХ}$ , в ИБП используется обратная связь 5. Это позволяет удерживать  $U_{ВЫХ}$

на относительно постоянном уровне. Управление электронным ключом 3 происходит через ШИМ-контроллер 6. Благодаря такому способу управления  $U_{ВЫХ}$  не зависит от возможных колебаний входного (сетевое) напряжения, а также от величины нагрузки.

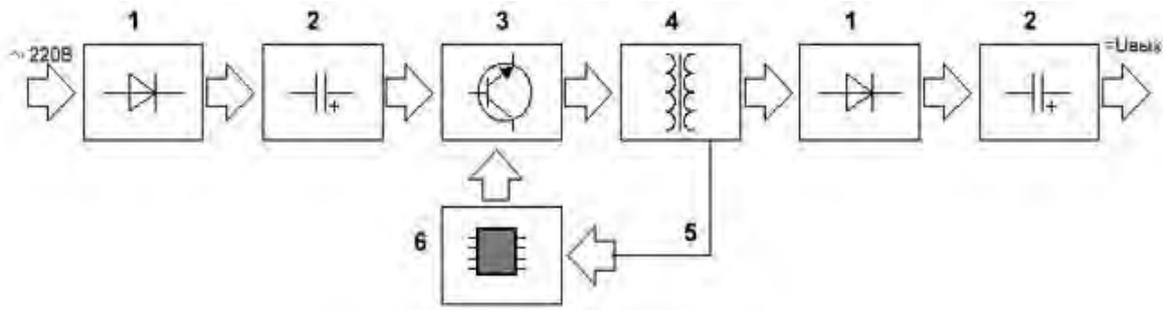


Рисунок 14.1 – Структурная схема ИБП

Функциональная схема ИБП с внешним управлением приведена на рисунке 14.2.

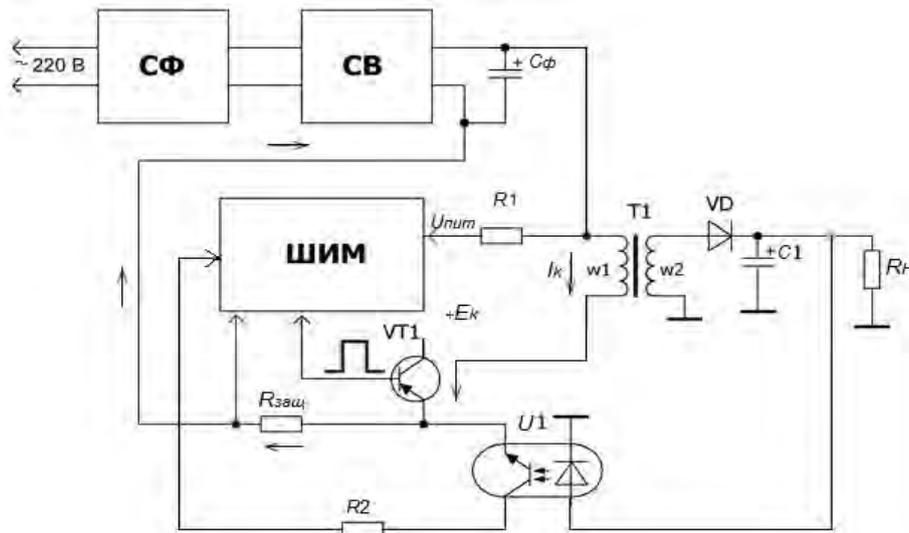


Рисунок 14.2 – Функциональная схема ИБП

Преобразователь выполнен на транзисторе VT1 и трансформаторе T1. Сетевое напряжение через сетевой фильтр (СФ) подается на сетевой выпрямитель (СВ), где оно выпрямляется, фильтруется конденсатором фильтра  $C_\phi$  и через обмотку W1 импульсного трансформатора T1 подается на коллектор транзистора VT1. При подаче в цепь базы транзистора прямоугольного импульса транзистор открывается и через него протекает нарастающий ток  $I_k$ . Этот же ток будет протекать и через обмотку W1 трансформатора T1, что приведет к увеличению магнитного потока в сердечнике трансформатора и возникновению во вторичной обмотке W2 ЭДС индукции. В итоге на выходе диода VD появится положительное напряжение. При этом, если увеличивать длительность импульса, приложенного к базе транзистора VT1, во вторичной цепи будет увеличиваться напряжение, т. к. энергии будет отдаваться больше,

а если уменьшать длительность, соответственно напряжение будет уменьшаться. Таким образом, изменяя длительность импульса в цепи базы транзистора, можно изменять выходные напряжения вторичной обмотки Т1 и осуществлять, таким образом, **стабилизацию** выходных напряжений. Единственное, что для этого необходимо – схема, которая будет формировать импульсы запуска и управлять их длительность (широтой). В качестве такой схемы используется ШИМ-контроллер – специальная микросхема, в состав которой входят: задающий генератор импульсов (определяющий частоту работы преобразователя), схемы защиты, контроля и логическая схема, которая управляет длительностью импульса.

Для стабилизации выходных напряжений ИБП используется цепь обратной связи (или цепь слежения), выполненная на оптопаре  $U1$  и резисторе  $R2$ . Увеличение напряжения во вторичной цепи трансформатора Т1 приводит к увеличению интенсивности излучения светодиода, а, следовательно, уменьшению сопротивления перехода фототранзистора (они входят в состав оптопары  $U1$ ). Это, в свою очередь, приведёт к увеличению падения напряжения на резисторе  $R2$  и уменьшению напряжения на входе ШИМ-контроллера. Уменьшение напряжения заставляет логическую схему, входящую в состав ШИМ-контроллера, увеличивать длительность импульса до тех пор, пока напряжение на нагрузке  $R_n$  не будет соответствовать заданным параметрам. При уменьшении напряжения – процесс будет обратный.

**Задача 1.** Опишите назначение структурных элементов ИБП, приведенных на рисунке 14.1.

**Задача 2.** Опишите, как в ИБП осуществляется стабилизация напряжения ?

**Задача 3.** Какие схемы выпрямителей можно использовать в ИБП?

**Задача 4.** Опишите как работает ИБП.

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

**Задача 1.** Выполните моделирование работы двухполупериодного мостового выпрямителя с конденсатором  $C1$  для сглаживания пульсаций напряжения на нагрузке в Multisim, схема которого представлена на рисунке 15.1.

*Решение*

Мультиметр ХММ1, работающий в режиме амперметра, и вольтметр  $U1$  показывают средние значения тока и напряжения нагрузки ( $R_1 + R_2 + LED1$ ). На экране двухканального осциллографа ХСC1 изображены временные диаграммы выходного напряжения источника  $V1$  (канал А) и напряжения на нагрузке (канал В). Из временных диаграмм видно, что на нагрузке формируется только положительное напряжение, причем как при отрицательных, так и при поло-



жительных напряжениях источника V1. Анализатор спектра XSA1 используется для определения амплитуды первой гармоники.

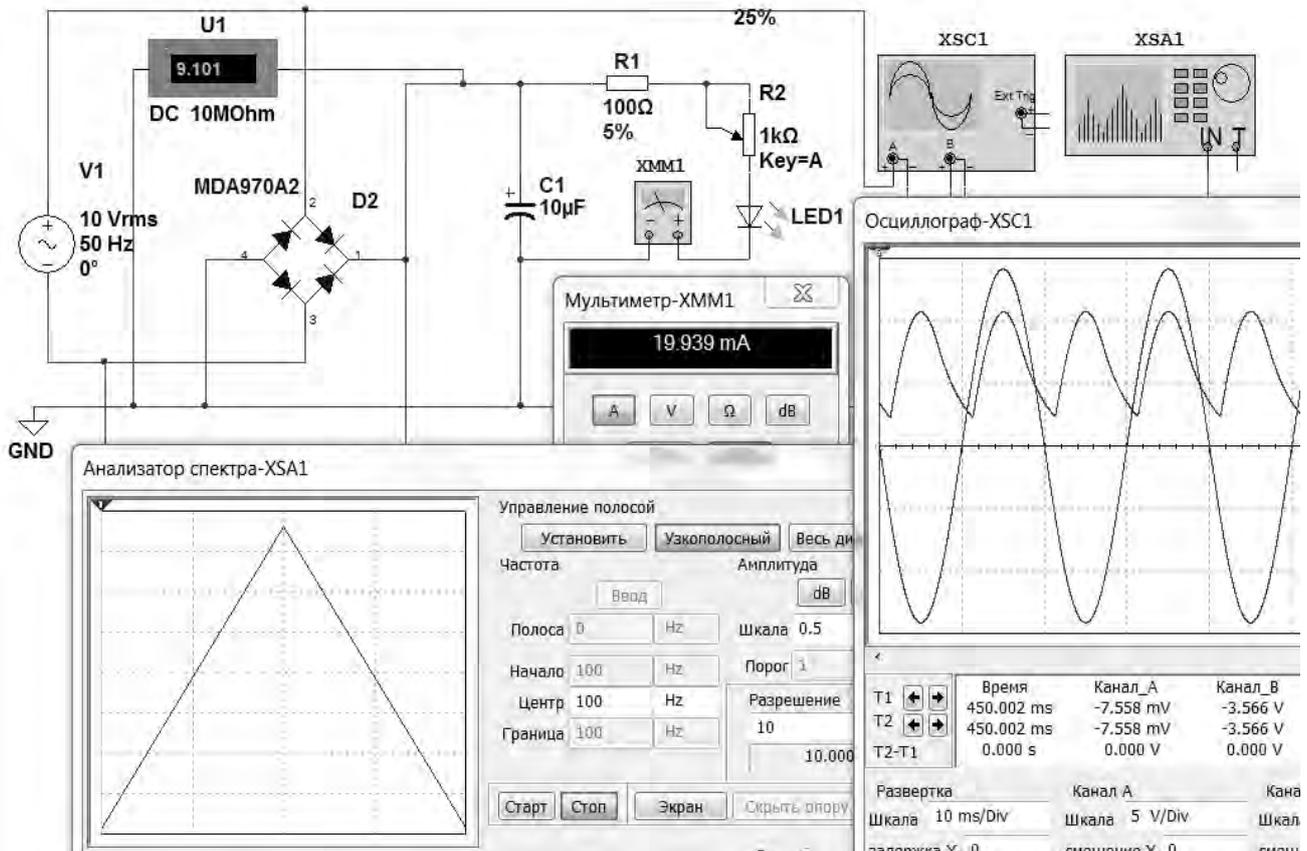


Рисунок 15.1 – Результаты моделирования работы двухполупериодного мостового выпрямителя в Multisim

**Задача 2.** Исследуйте влияние емкости конденсатора C1 (см. рисунок 15.1) на форму сигнала на нагрузке (канал B осциллографа XSC1), поочередно выставив её значение 100, 1000, 10000 и 20000 мкФ.

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

Для формирования однополярного стабилизированного напряжения может быть использована одна из многочисленных микросхем стабилизаторов напряжения с типовой схемой включения. На рисунке 16.1 это микросхема DA1 (например, К142ЕН5А, максимальный ток нагрузки которой равен 3 А, а выходное стабилизированное напряжение  $U_{ВЫХ.стаб} = (5 \pm 0,1) \text{ В}$ ).

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  $U_{ВЫХ.стаб}$  может быть установлено с

помощью подстроечного резистора  $R2$  в диапазоне от  $\pm 5$  до  $\pm 15$  В.

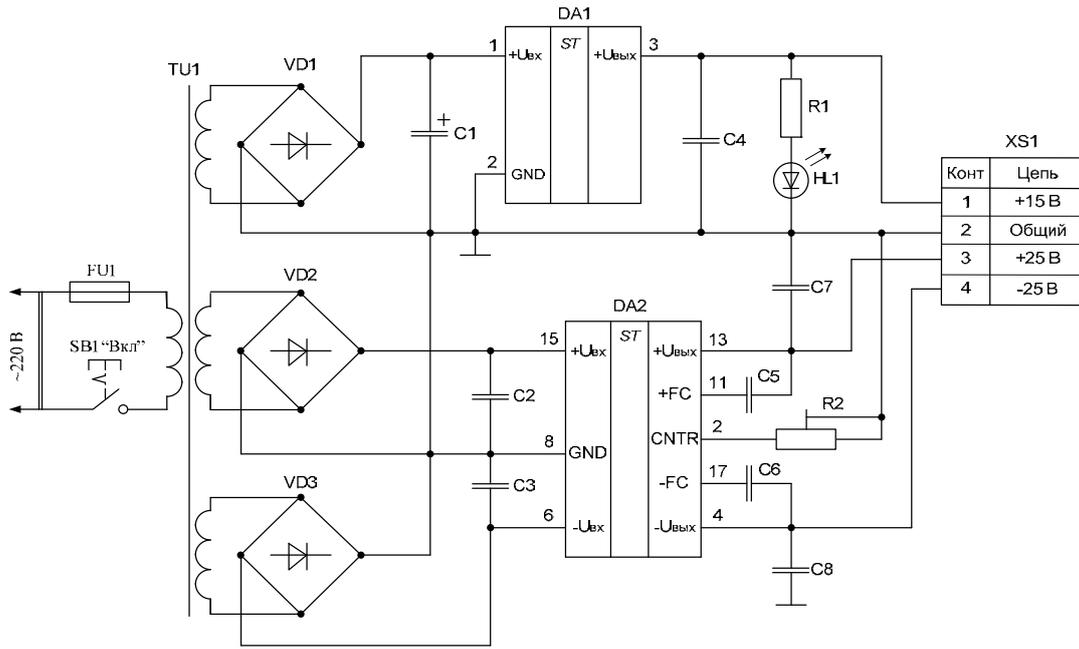


Рисунок 16.1 – Схема стабилизированного источника питания с однополярным и двухполярным выходными напряжениями

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

Для выпрямления переменного напряжения используются мостовые диодные выпрямители VD1...VD3.

Светодиод HL1 выполняет функцию индикатора включенного состояния источника питания.

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

$$R1 = \frac{U_{\Pi} - U_{\text{ПР}}}{I_{\text{ПР.HL1}}}, \quad (16.1)$$

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

$$P_{R1} = I_{\text{ПР.HL1}}^2 \cdot R1. \quad (16.2)$$

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

$$C1 = \frac{I_H + I_{\text{ПР.HL1}} + I_{\text{ПОТР.DA1}}}{2f \cdot U_{\Pi}}, \quad (16.3)$$

где  $I_H$  – ток нагрузки, А;

$I_{ПOTP.DA1}$  – ток, потребляемый DA1, А;

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

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

На рисунке 16.2 приведена схема стабилизатора напряжения на основе микросхемы LM338K.

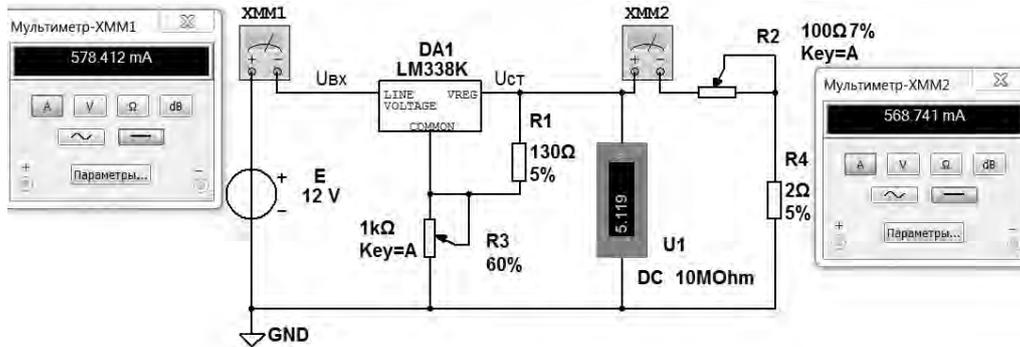


Рисунок 16.2 – Схема регулируемого стабилизатора напряжения на основе микросхемы LM338K

Необходимое значение выходного напряжения устанавливается с помощью регулируемых делителей  $R1$ ,  $R3$ . Резистором  $R2$  регулируется ток нагрузки, измеряемый мультиметром XMM2. Напряжение  $U_{cm}$  на выходе стабилизатора измеряется вольтметром U1. Ток, потребляемый от источника  $E$ , измеряется мультиметром XMM1.

Основным параметром стабилизаторов напряжения является коэффициент стабилизации

$$K_{cm} = \frac{U_{BX \max} - U_{BX \min}}{U_{ВЫХ \text{ см}1} - U_{ВЫХ \text{ см}2}}. \quad (16.4)$$

**Задача 1.** К схеме, приведенной на рисунке 5.1, подберите из справочных источников микросхему DA1 с  $U_{ВЫХ.маб} = +15$  В и  $I_H = 0,25$  А. Составьте схему, представленную на рисунке 16.1, в Multisim и исследуйте её работу, подключив к ней показанные на схеме приборы. Рассчитайте  $K_{cm}$ .

**Задача 2.** К схеме, приведенной на рисунке 16.1, подберите из справочных источников светодиод HL1 с красным цветом свечения. Задавшись величиной прямого тока через него  $I_{ПР.HL1} = 10$  мА, рассчитайте сопротивление резистора  $R1$  и рассеиваемую на нем мощность.

**Задача 3.** Для схемы, приведенной на рисунке 16.1, рассчитайте емкость конденсатора  $C1$ , если  $I_H = 1,7$  А,  $I_{ПР.HL1} = 10$  мА,  $U_{П} = 0,5$  В,  $f = 50$  Гц.

**Задача 4.** Исследуйте работу схемы, приведенной на рисунке 16.2, в Multisim. По результатам исследований рассчитайте  $K_{cm}$ .

**Задача 5.** Составьте схему, приведенную на рисунке 16.1, в Multisim и исследуйте её работу, подключив к ней приборы, показанные на рисунке 16.2. Рассчитайте  $K_{см}$ .

## Список литературы

- 1 **Иванов, В. Н.** Электроника и микропроцессорная техника : учебник / В. Н. Иванов, И. О. Мартынова. – Москва : Академия, 2016. – 288 с.
- 2 **Титов, В. С.** Проектирование аналоговых и цифровых устройств : учебное пособие / В. С. Титов, В. И. Иванов, М. В. Бобырь. – Москва : ИНФРА-М, 2016. – 143 с.
- 3 **Horowitz, P.** The art of electronics. Third Edition / P. Horowitz, W. Hill. – New York : Cambridge University Press, 2015. – 1192 с.

