

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальностей
6-05-0714-02 «Технология машиностроения,
металлорежущие станки и инструменты»
и 6-05-0714-03 «Инженерно-техническое проектирование
и производство материалов и изделий из них»
дневной и заочной форм обучения*



Могилев 2025

УДК 621.3
ББК 31.2:32.85
Э 45

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «1» сентября 2025 г.,
протокол № 1

Составитель ст. преподаватель И. А. Черкасова

Рецензент канд. техн. наук, доц. Н. В. Герасименко

Методические рекомендации к практическим занятиям предназначены для студентов специальностей 6-05-0714-02 «Технология машиностроения, металло-режущие станки и инструменты» и 6-05-0714-03 «Инженерно-техническое проектирование и производство материалов и изделий из них» дневной и заочной форм обучения.

Учебное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Ответственный за выпуск А. В. Хомченко

Корректор И. В. Голубцова

Компьютерная верстка М. М. Дударева

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, 2025

Содержание

1 Практическое занятие № 1. Анализ электрического состояния электрической цепи постоянного тока с одним и несколькими источниками питания...	4
2 Практическое занятие № 2. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи переменного тока.....	9
3 Практическое занятие № 3. Расчет параметров трансформаторов.....	14
4 Практическое занятие № 4. Расчет параметров электрических машин по паспортным данным	16
5 Практическое занятие № 5. Расчет электронных устройств на основе полупроводниковых диодов.....	21
6 Практическое занятие № 6. Расчет электронных устройств на биполярных и полевых транзисторах	26
7 Практическое занятие № 7. Расчет электронных устройств на основе операционных усилителей.....	31
8 Практическое занятие № 8. Разработка цифровых комбинационных и последовательностных устройств.....	36
Список литературы.....	38

1 Практическое занятие № 1. Анализ электрического состояния электрической цепи постоянного тока с одним и несколькими источниками питания

Цель занятия: изучить основные законы электротехники, методы преобразования электрических цепей при различных способах соединения резисторов, основные методы расчета электрических цепей постоянного тока с одним и несколькими источниками питания.

Пример решения задач

Задача 1. Расчет цепи постоянного тока с одним источником питания.

Определить токи и напряжения на отдельных участках схемы (рисунок 1.1), если напряжение на входе схемы $U = 240$ В, а сопротивления резисторов $R_1 = R_2 = 0,5$ Ом, $R_3 = R_5 = 10$ Ом, $R_4 = R_6 = R_7 = 5$ Ом. Определить мощность P , потребляемую электрической цепью.

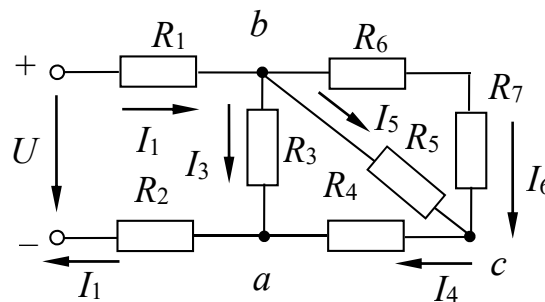


Рисунок 1.1 – Электрическая цепь постоянного тока

Решение

Определим эквивалентное сопротивление схемы:

$$R_{bc} = \frac{(R_6 + R_7) \cdot R_5}{R_5 + R_6 + R_7} = \frac{(5 + 5) \cdot 10}{5 + 5 + 10} = 5 \text{ Ом},$$

т. к. резисторы R_6 и R_7 соединены последовательно друг с другом и параллельно с резистором R_5 .

$$R_{ba} = \frac{(R_{bc} + R_4) \cdot R_3}{R_{bc} + R_4 + R_3} = \frac{(5 + 5) \cdot 10}{5 + 5 + 10} = 5 \text{ Ом},$$

т. к. резисторы R_{bc} и R_4 соединены последовательно друг с другом и параллельно с резистором R_3 .

$$R_3 = R_{ba} + R_1 + R_2 = 5 + 0,5 + 0,5 = 6 \text{ Ом.}$$

Ток I_1 определяем по закону Ома:

$$I_1 = U / R_3 = 240 / 6 = 40 \text{ А.}$$

Напряжение между точками a и b определяем:

– по закону Ома как

$$U_{ba} = R_{ba} \cdot I_1 = 40 \cdot 5 = 200 \text{ В;}$$

– по второму закону Кирхгофа как

$$U_{ba} = U - (R_1 + R_2) \cdot I_1 = 200 \text{ В.}$$

Токи

$$I_3 = U_{ba} / R_3 = 200 / 10 = 20 \text{ А;}$$

$$I_4 = I_1 - I_3 = 40 - 20 = 20 \text{ А;}$$

$$I_6 = I_5 = I_4 / 2 = 20 / 2 = 10 \text{ А, т. к. } R_6 + R_7 = R_5.$$

Напряжения

$$U_{bc} = R_5 \cdot I_5 = 10 \cdot 10 = 100 \text{ В;}$$

$$U_{ca} = R_4 \cdot I_4 = 20 \cdot 5 = 100 \text{ В.}$$

Мощность, потребляемая электрической цепью,

$$P = U \cdot I_1 = 240 \cdot 40 = 9600 \text{ Вт.}$$

Проверим правильность решения задачи, осуществив моделирование работы схемы в среде Multisim.

После запуска программы на экране появляется рабочее поле, предназначенное для виртуального построения принципиальной схемы электрической цепи с подключением к ней необходимых источников воздействий и измерительно-регистрирующих приборов.

Показания измерительных приборов (рисунок 1.2) соответствуют расчетным значениям.

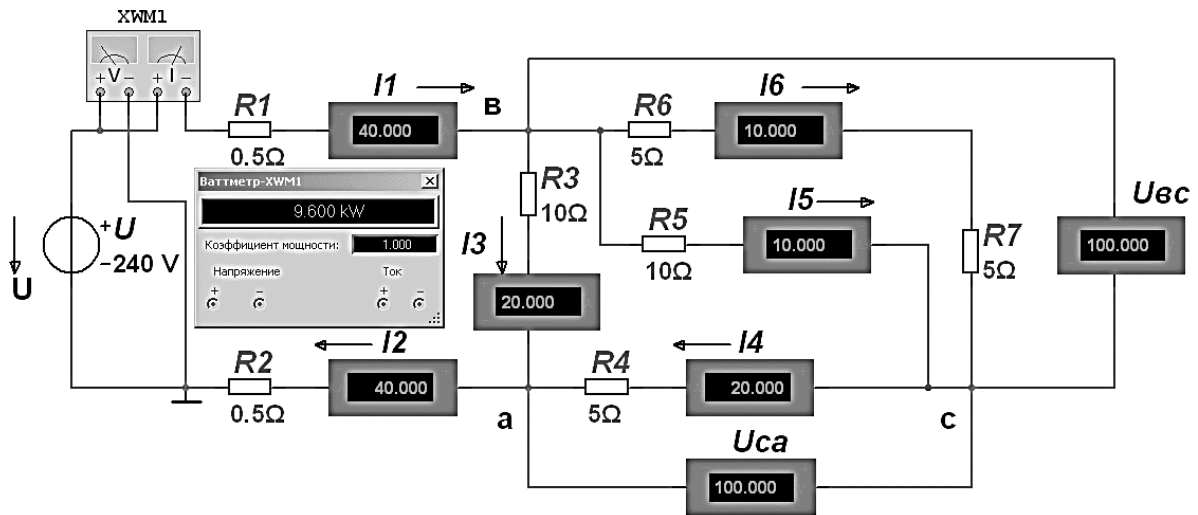


Рисунок 1.2 – Модель электрической цепи постоянного тока

Задача 2. Расчет цепи постоянного тока с несколькими источниками питания.

Определить токи в ветвях схемы (рисунок 1.3), если ЭДС источников $E_1 = 12$ В, $E_2 = 6$ В, внутренние сопротивления источников $R_1 = 2$ Ом, $R_2 = 1$ Ом, а сопротивление нагрузки $R_3 = 10$ Ом. Проверить правильность расчета по балансу мощностей.

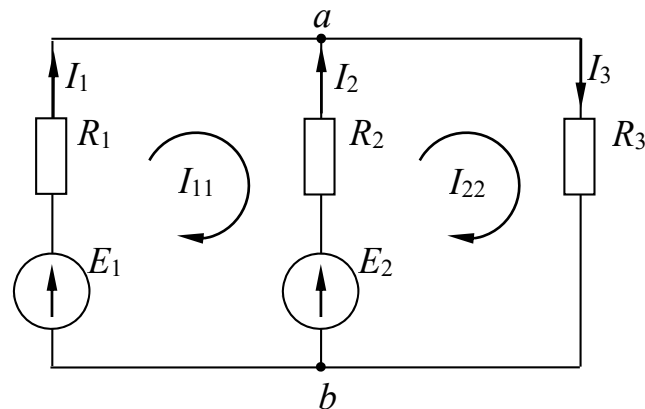


Рисунок 1.3 – Электрическая цепь постоянного тока с несколькими источниками

Решение

Рассмотрим пример расчета электрической цепи методом непосредственного применения законов Кирхгофа.

Число узлов $\kappa = 2$. Число ветвей $n = 3$.

Число уравнений по первому закону Кирхгофа

$$\kappa - 1 = 2 - 1 = 1.$$

Число уравнений по второму закону Кирхгофа

$$n - (\kappa - 1) = 3 - (2 - 1) = 2.$$

Число всех уравнений $n = 3$.

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad - \text{узел } a;$$

$$I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2 = E_1 - E_2 \quad - \text{контур } E_1, R_1, E_2, R_2;$$

$$I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 = E_2 \quad - \text{контур } E_2, R_2, R_3.$$

Подставляем числовые значения:

$$1 \cdot I_1 + 1 \cdot I_2 + (-1) \cdot I_3 = 0;$$

$$2 \cdot I_1 + (-1) \cdot I_2 + 0 \cdot I_3 = 6;$$

$$0 \cdot I_1 + 1 \cdot I_2 + 10 \cdot I_3 = 6.$$

Решить систему уравнений можно, используя численные методы, например, с помощью программы «Калькулятор» (рисунок 1.4): $I_1 = 2,25 \text{ A}$, $I_2 = -1,5 \text{ A}$, $I_3 = 0,75 \text{ A}$.



Рисунок 1.4 – Решение системы уравнения

Отрицательное значение тока I_2 указывает на то, что в действительности он имеет противоположное направление и источник E_2 работает в режиме потребителя.

Метод контурных токов.

Количество уравнений

$$n - (\kappa - 1) = 3 - (2 - 1) = 2.$$

Обозначение контурных токов: I_{11}, I_{22} (см. рисунок 1.3).

Система уравнений

$$\begin{cases} I_{11} \cdot (R_1 + R_2) - I_{22} \cdot R_2 = E_1 - E_2; \\ -I_{11} \cdot R_2 + I_{22} \cdot (R_2 + R_3) = E_2. \end{cases}$$

Подставляем числовые значения. Тогда

$$\begin{cases} 3 \cdot I_{11} - 1 \cdot I_{22} = 6; \\ -1 \cdot I_{11} + 11 \cdot I_{22} = 6. \end{cases}$$

Решая данную систему уравнений, определяем значения контурных токов:
 $I_{11} = 2,25 \text{ A}$, $I_{22} = 0,75 \text{ A}$.

Находим значения токов в ветвях:

$$I_1 = I_{11} = 2,25 \text{ A}, I_2 = I_{22} - I_{11} = 0,75 - 2,25 = -1,5 \text{ A}, I_3 = I_{22} = 0,75 \text{ A}.$$

Проверяем правильность расчета по балансу мощности:

$$E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3;$$

$$12 \cdot 2,25 + 6 \cdot (-1,5) = 2,25^2 \cdot 2 + (-1,5)^2 \cdot 1 + 0,75^2 \cdot 10;$$

$$18 \text{ Вт} = 18 \text{ Вт}.$$

Баланс мощностей выполняется.

Проверим правильность решения задачи, осуществив моделирование работы схемы в среде Multisim (рисунок 1.5).

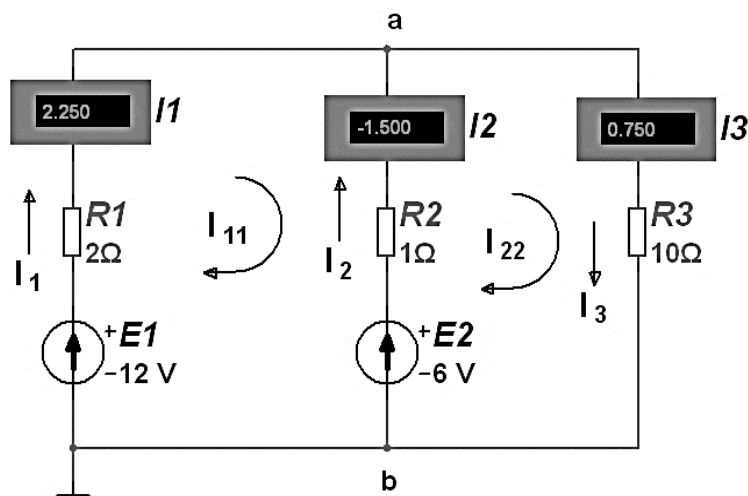


Рисунок 1.5 – Модель электрической цепи постоянного тока

Показания измерительных приборов соответствуют расчетным значениям.

2 Практическое занятие № 2. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи переменного тока

Цель занятия: изучить основные методы расчета однофазных и трехфазных электрических цепей переменного тока с применением комплексных чисел.

Пример решения задач

Задача 1. Расчет однофазной цепи синусоидального тока.

Активное сопротивление $R = 10$ Ом, индуктивность $L = 63,7$ мГн и емкость $C = 318,32$ мкФ соединены последовательно. Определить ток, напряжения на элементах и мощность всей цепи. Построить векторную диаграмму напряжений, если напряжение на входе схемы (рисунок 2.1, а) $U = 14,14$ В и частота $f = 50$ Гц.

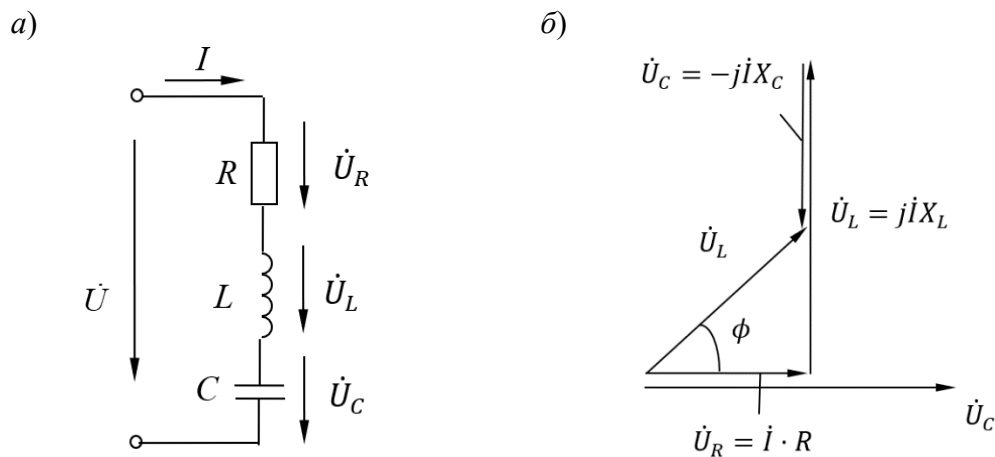


Рисунок 2.1 – Однофазная электрическая цепь переменного тока

Решение

Реактивные сопротивления элементов цепи

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 63,7 \cdot 10^{-3} = 20 \text{ Ом};$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 318,32 \cdot 10^{-6}} = 10 \text{ Ом}.$$

Комплекс полного сопротивления цепи

$$\underline{Z} = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C) = 10 + j10 = 14,14 e^{j45^\circ} \text{ Ом}.$$

Комплексы напряжения и тока

$$\dot{U} = 14,14 \text{ В};$$

$$\underline{\dot{I}} = \frac{\underline{\dot{U}}}{\underline{Z}} = \frac{14,14}{14,14 \cdot e^{j45^\circ}} = 1 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ A.}$$

Следовательно, действующее значение тока $I = 1 \text{ A}$.

Комплексные действующие значения напряжений:

– на резисторе

$$\underline{\dot{U}}_R = R \cdot \underline{\dot{I}} = 10 \cdot 1 \cdot e^{-j45^\circ} = 10 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ В;}$$

– на конденсаторе

$$\underline{\dot{U}}_C = -j \cdot X_C \cdot \underline{\dot{I}} = -j10 \cdot 1 \cdot e^{-j45^\circ} = 10 \cdot e^{-j135^\circ} \text{ В;}$$

– на индуктивности

$$\underline{\dot{U}}_L = j \cdot X_L \cdot \underline{\dot{I}} = j20 \cdot 1 \cdot e^{-j45^\circ} = 20 \cdot e^{j45^\circ} \text{ В.}$$

Следовательно, действующие значения напряжений $U_R = 10 \text{ В}$, $U_L = 10 \text{ В}$, $U_C = 20 \text{ В}$.

Комплекс полной мощности

$$\tilde{S} = \underline{\dot{U}} \cdot \underline{\dot{I}}^* = 14,14 \cdot 1 \cdot e^{j45^\circ} = 14,14 \cdot e^{j45^\circ} = 10 + j10 \text{ В} \cdot \text{А},$$

где $\underline{\dot{I}}^*$ – сопряженный комплекс тока.

Следовательно, активная мощность цепи $P = 10 \text{ Вт}$, реактивная $Q = 10 \text{ вар}$.

Векторная диаграмма приведена на рисунке 2.1, б.

Проверим правильность решения задачи, осуществив моделирование работы схемы в среде Multisim (рисунок 2.2).

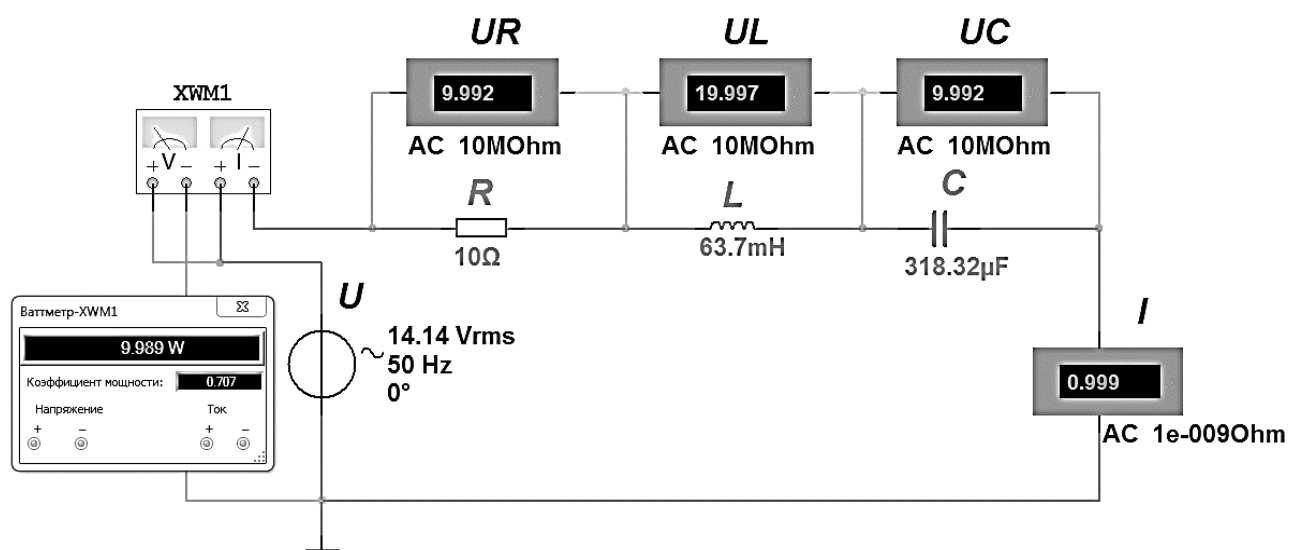
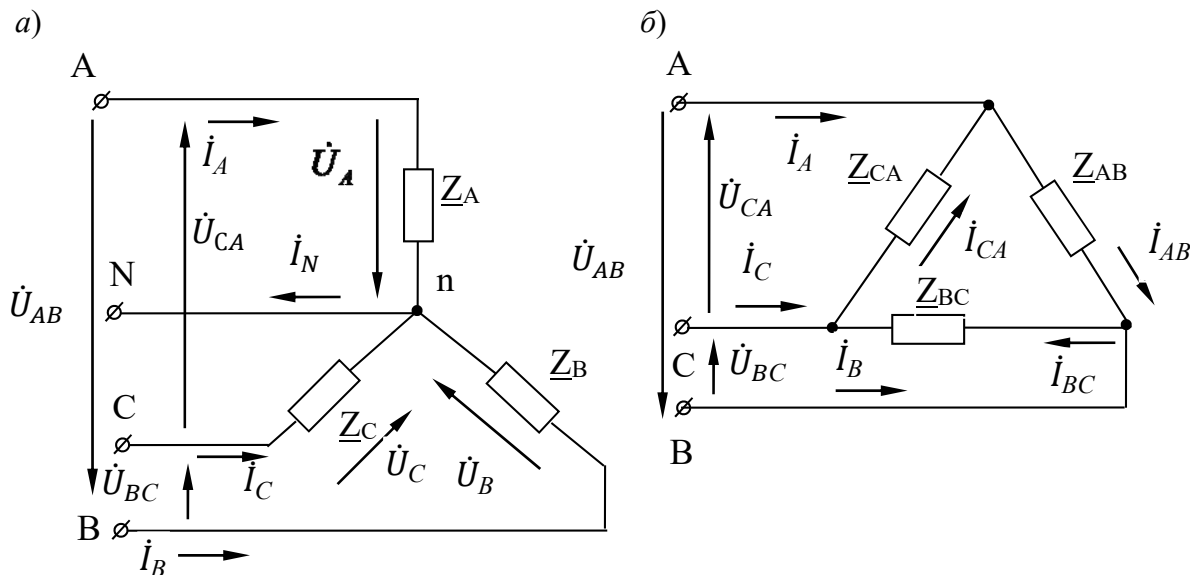


Рисунок 2.2 – Модель однофазной электрической цепи переменного тока к задаче 1

Задача 2. Расчет трехфазной цепи синусоидального тока.

К трехфазной линии электропередачи с линейным напряжением $U_L = 380$ В присоединены три симметричных приемника энергии $\underline{Z} = 10 + j10$ по схемам «звезда» (рисунок 2.3, а) и «треугольник» (рисунок 2.3, б). Определить линейные и фазные токи в цепи.



а – соединение «звезда»; б – соединение «треугольник»

Рисунок 2.3 – Трехфазные электрические цепи

Решение

Для соединения звездой (см. рисунок 2.3, а) фазные напряжения

$$\dot{U}_A = U_A = 220 \text{ В};$$

$$\dot{U}_B = U_B \cdot e^{-j120^\circ} = 220 \cdot e^{-j120^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_C = U_C \cdot e^{-j240^\circ} = 220 \cdot e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Так как нагрузка симметричная, то

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z} = (10 + j10) \text{ Ом}.$$

Здесь $R = 10$ Ом, $X_L = 10$ Ом, $L = X_L / \omega = 10 / 314 = 31,85$ мГн.

Токи в нагрузке (линейные равны фазным)

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}} = \frac{220}{10 + j10} = \frac{220 \cdot e^{j0^\circ}}{14,14 \cdot e^{j45^\circ}} = 15,56 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}} = \frac{220 \cdot e^{-j120^\circ}}{10 + j10} = \frac{220 \cdot e^{-j120^\circ}}{14,14 \cdot e^{j45^\circ}} = 15,56 \cdot e^{-j165^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}} = \frac{220 \cdot e^{j120^\circ}}{10 + j10} = \frac{220 \cdot e^{j120^\circ}}{14,14 \cdot e^{j45^\circ}} = 15,56 \cdot e^{j75^\circ} \text{ A}.$$

Ток в нейтральном проводе

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 15,56 \cdot e^{-j45^\circ} + 15,56 \cdot e^{-j165^\circ} + 15,56 \cdot e^{j75^\circ} = 0 \text{ A}.$$

Следовательно, при симметричной нагрузке, соединенной звездой, ток в нейтральном проводе отсутствует.

Для соединения треугольником (см. рисунок 2.3, б) линейные напряжения

$$\dot{U}_{AB} = U_{AB} = 380 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{BC} = U_{BC} \cdot e^{-j120^\circ} = 380 \cdot e^{-j120^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{CA} = U_{CA} \cdot e^{-j240^\circ} = 380 \cdot e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Так как нагрузка симметричная, то

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA} = \underline{Z} = (10 + j10) \text{ Ом}.$$

Здесь $R = 10 \text{ Ом}$, $X_L = 10 \text{ Ом}$, $L = X_L/\omega = 10/314 = 31,85 \text{ мГн}$.

Фазные токи (токи в нагрузке)

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}} = \frac{380}{10 + j10} = \frac{380 \cdot e^{j0^\circ}}{14,14 \cdot e^{j45^\circ}} = 26,87 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}} = \frac{380 \cdot e^{-j120^\circ}}{10 + j10} = \frac{380 \cdot e^{-j120^\circ}}{14,14 \cdot e^{j45^\circ}} = 26,87 \cdot e^{-j165^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}} = \frac{380 \cdot e^{j120^\circ}}{10 + j10} = \frac{380 \cdot e^{j120^\circ}}{14,14 \cdot e^{j45^\circ}} = 26,87 \cdot e^{j75^\circ} \text{ A}.$$

Линейные токи (токи в соединительных проводах)

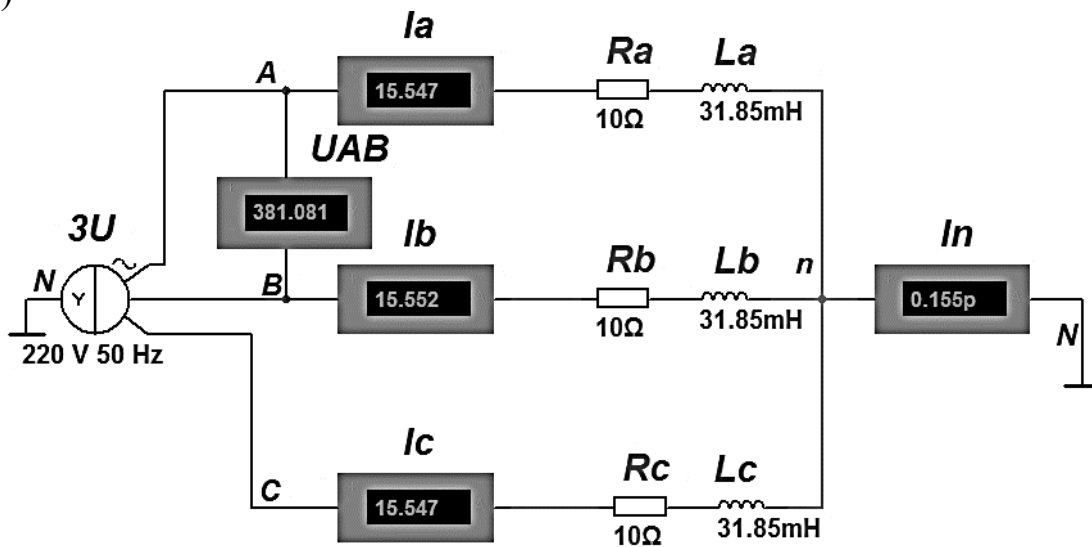
$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = 26,87 \cdot e^{-j45^\circ} - 26,87 \cdot e^{j75^\circ} = 46,54 \cdot e^{-j75^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = 26,87 \cdot e^{-j165^\circ} - 26,87 \cdot e^{-j45^\circ} = 46,54 \cdot e^{j165^\circ} \text{ A};$$

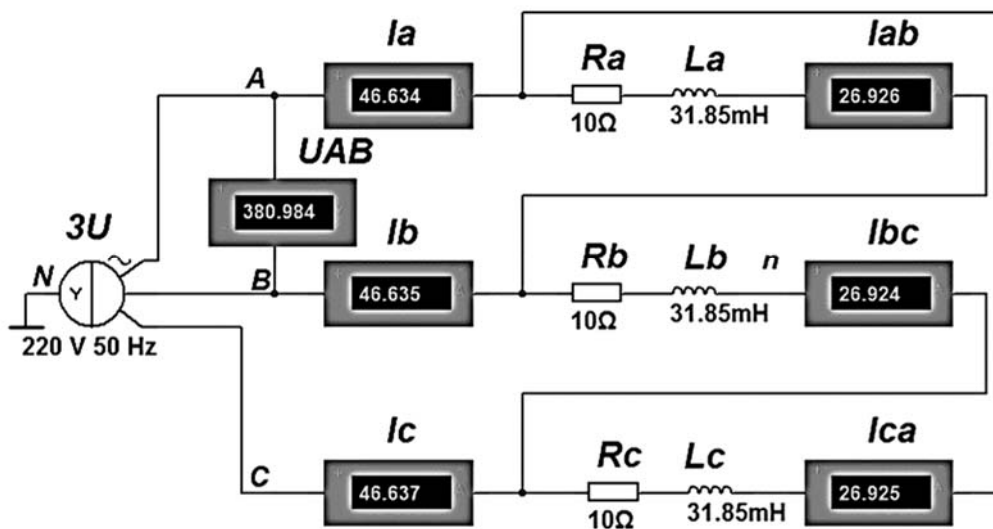
$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = 26,87 \cdot e^{j75^\circ} - 26,87 \cdot e^{-j165^\circ} = 46,54 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ A}.$$

Нетрудно заметить, что фазный ток при соединении потребителей треугольником $I_\phi = 26,87 \text{ A}$ в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного $I_L = 46,54 \text{ A}$, а линейный (фазный) ток при соединении звездой $I_L = 15,56 \text{ A}$ в 3 раза меньше, чем линейный ток при соединении нагрузки треугольником $I_L = 46,54 \text{ A}$.

a)



b)



a – соединение «звезда»; б – соединение «треугольник»

Рисунок 2.4 – Модель трехфазной электрической цепи переменного тока

3 Практическое занятие № 3. Расчет параметров трансформаторов

Цель занятия: изучить основные методы расчета однофазных трансформаторов с построением внешней характеристики.

Пример решения задач

Задача 1. Расчет трехфазного трансформатора.

Построить внешнюю характеристику $U_2 = f(\beta)$ трансформатора ТМ-100/6. Исходные данные к задаче: номинальная мощность $S_H = 100$ кВ·А, номинальное напряжение на зажимах первичной обмотки $U_{1H} = 6$ кВ, напряжение холостого хода на зажимах вторичной обмотки $U_{2H} = 0,36$ кВ, напряжение короткого замыкания $U_K\% = 6\%$ от U_{1H} , мощность короткого замыкания трансформатора $P_K = 0,9$ кВт, коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi = 0,75$. Соединение обмоток трансформатора Y/Y («звезда/звезда») (рисунок 3.1).

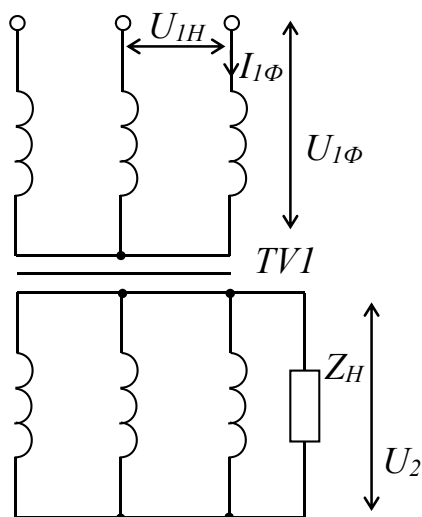


Рисунок 3.1 – Схема трехфазного трансформатора

Решение

Для построения зависимости напряжения на вторичной обмотке трансформатора от коэффициента его загрузки $U_2 = f(\beta)$ – *внешней характеристики* – находим потери напряжения во вторичной обмотке трансформатора $\Delta U_2\%$ для β , равного 0 и 1:

$$\Delta U_2\% = \beta \cdot (U_{K.A}\% \cdot \cos\varphi_2 + U_{K.P}\% \cdot \sin\varphi_2),$$

где $U_{K.A}\%$, $U_{K.P}\%$ – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания соответственно.

Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора определяем по формуле

$$U_2 = U_{2H} (100 - \Delta U_2 \%) / 100.$$

Номинальный ток первичной обмотки трансформатора

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 9,623 \text{ А.}$$

Активное сопротивление короткого замыкания

$$R_K = \frac{P_K}{3 \cdot I_{1\phi}^2} = \frac{900}{3 \cdot 9,623^2} = 3,24 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_K = \frac{U_{K1\phi}}{I_{1\phi}} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3} \cdot I_{1\phi}} \cdot \frac{U_K \%}{100} = \frac{6000 \cdot 6}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 9,623} = 21,6 \text{ Ом.}$$

Для соединения «звезда/звезда»

$$I_{1H} = I_{1\phi};$$

$$U_{1H} = \sqrt{3} \cdot U_{1\phi};$$

$$\cos \varphi_K = \frac{R_K}{Z_K} = \frac{3,24}{21,6} = 0,15;$$

$$U_{K.A} \% = U_K \% \cdot \cos \varphi_K = 6 \cdot 0,15 = 0,9 \%;$$

$$U_{K.P} \% = \sqrt{(U_K \%)^2 - (U_{K.A} \%)^2} = \sqrt{6^2 - 0,9^2} = 5,932 \%.$$

Для $\beta = 0$ (точка 1 на рисунке 3.2)

$$U_2 = U_{2H} (100 - \Delta U_2 \%) / 100 = 360 \cdot (100 - 0) / 100 = U_{2H} = 360 \text{ В.}$$

Для $\beta = 1$ (точка 2 на рисунке 3.2)

$$\begin{aligned} \Delta U_2 \% &= \beta \cdot (U_{K.A} \% \cdot \cos \varphi + U_{K.P} \% \cdot \sin \varphi) = \\ &= 1 \cdot (0,9 \cdot 0,75 + 5,932 \cdot \sqrt{1 - 0,75^2}) = 4,599 \%; \end{aligned}$$

$$U_2 = U_{2H} (100 - \Delta U_2 \%) / 100 = 360 \cdot (100 - 4,599) / 100 = 344,4 \text{ В.}$$

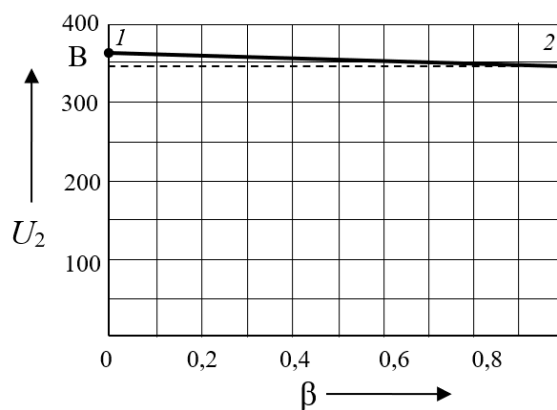


Рисунок 3.2 – Внешняя характеристика трансформатора

4 Практическое занятие № 4. Расчет параметров электрических машин по паспортным данным

Цель занятия: изучить основные методы расчета трехфазных асинхронных электродвигателей и двигателей постоянного тока с построением их характеристик.

Пример решения задач

Задача 1. Расчет трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Построить механическую характеристику асинхронного двигателя по характерным точкам. Исходные данные к задаче: номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя $P_H = 10$ кВт, номинальное напряжение $U_H = 380$ В, номинальное число оборотов ротора $n_H = 1420$ мин⁻¹, номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_H = 0,85$, номинальный КПД двигателя $\eta_H = 84$ %, кратность пускового тока $I_{II}/I_H = 6,5$, перегрузочная способность $m_K = 1,8$, число пар полюсов $p = 2$.

Решение

Асинхронный двигатель M малой мощности с короткозамкнутой обмоткой ротора подключается к сети с помощью магнитного пускателя, который состоит из контактора синусоидального тока KM и встроенных в него тепловых реле KK (рисунок 4.1).

При включенном автоматическом выключателе QF пуск двигателя осуществляется нажатием кнопки $SB2$. При этом срабатывает контактор KM . Его главные контакты, замыкаясь, присоединяют обмотки фаз статора к сети. Одновременно в цепи управления замыкаются вспомогательные контакты KM , блокирующие кнопку $SB2$ так, что при возврате ее в исходное положение рабочее состояние контактора не изменяется. Нажатием кнопки $SB1$ двигатель отключается от сети. При этом цепь тока управления контактором размыкается. Автоматический выключатель QF защищает двигатель от токов короткого замыкания ($I >$), а тепловые реле KK – от длительных перегрузок.

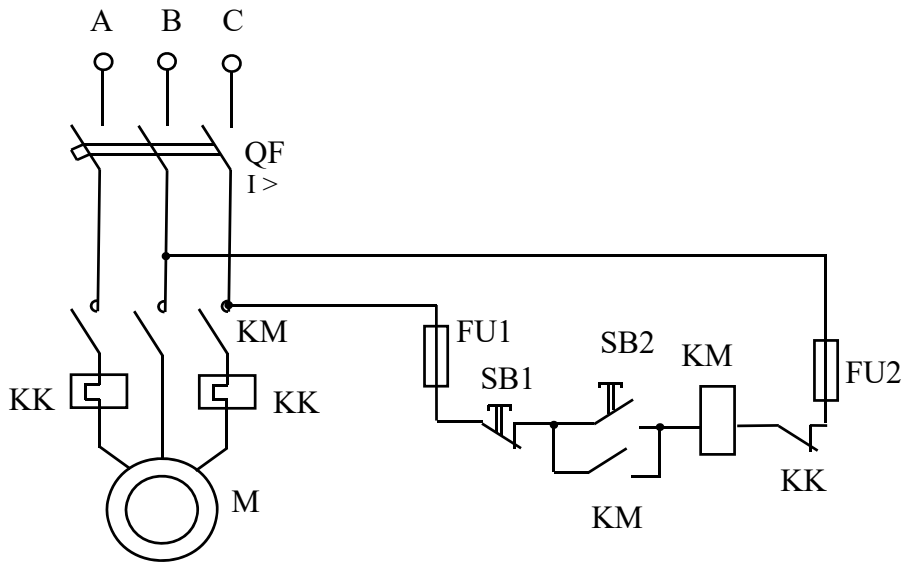


Рисунок 4.1 – Схема пуска асинхронного двигателя

Потребляемая двигателем мощность

$$P_{1H} = P_H / \eta_H = 10000 / 0,84 = 11900 \text{ кВт.}$$

Номинальный и максимальный моменты

$$M_H = 9,55 \cdot P_H / n_H = 9,55 \cdot 10000 / 1420 = 67,25 \text{ Н·м;}$$

$$M_K = m_K \cdot M_H = 1,8 \cdot 67,25 = 121 \text{ Н·м.}$$

Номинальный и пусковой токи

$$I_H = \frac{P_{1H}}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi_H} = \frac{11,9 \cdot 1000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,84} = 21,28 \text{ А;}$$

$$I_{\Pi} = 6,5 \cdot I_H = 6,5 \cdot 21,28 = 138,32 \text{ А.}$$

Синхронная частота вращения поля ротора

$$n_0 = 60 f / p = 60 \cdot 50 / 2 = 1500 \text{ мин}^{-1}.$$

Номинальное скольжение

$$S_H = (n_0 - n_H) / n_0 = (1500 - 1420) / 1500 = 0,053.$$

Формула для определения критического скольжения может быть получена в результате подстановки в уравнение номинального скольжения:

$$S_K = S_H \cdot \left(m_K + \sqrt{m_K^2 - 1} \right) = 0,053 \cdot \left(1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1} \right) = 0,175.$$

Зависимость электромагнитного момента асинхронного двигателя от скольжения $M = f(S)$ – *механическая характеристика* – строится по уравнению

$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S}} = \frac{2 \cdot 121}{\frac{S}{0,175} + \frac{0,175}{S}}.$$

Расчетные данные сводим в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты расчета механической характеристики

S	M , Н·м
0	0
0,053 (S_H)	67,25 (M_H)
0,175 (S_K)	121 (M_K)
1,0	41,2

По данным таблицы строим механическую характеристику (рисунок 4.2).

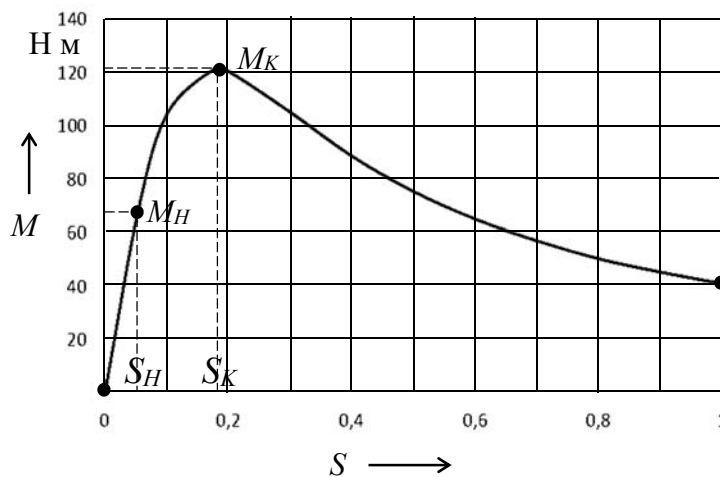


Рисунок 4.2 – Механическая характеристика асинхронного двигателя

Задача 2. Расчет двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

Для двигателя M постоянного тока параллельного возбуждения (рисунок 4.3) построить естественную механическую характеристику $n = f(M)$ и механическую характеристику при пуске с пусковым реостатом R_{Π} с током, превышающим номинальный ток двигателя I_H в 2 раза.

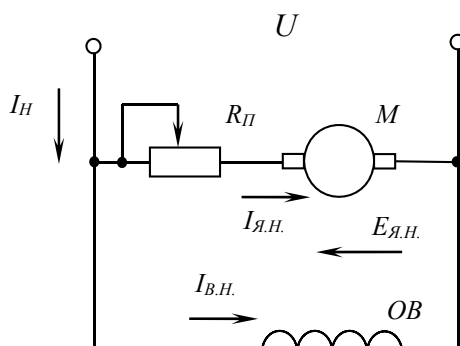


Рисунок 4.3 – Схема включения двигателя параллельного возбуждения

Исходные данные к задаче: номинальная мощность $P_H = 130$ кВт, номинальное напряжение $U_H = 220$ В, номинальная частота вращения якоря $n_H = 600$ мин⁻¹, номинальный КПД $\eta = 92$ %, сопротивление обмотки якоря и дополнительных полюсов в нагретом состоянии $R_Я = 0,00725$ Ом, сопротивление обмотки возбуждения $R_B = 43,2$ Ом.

Решение

Номинальная мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P_{1H} = P_H / \eta = 130000 / 0,92 = 141304,3 \text{ Вт.}$$

Номинальный ток, потребляемый двигателем из сети,

$$I_H = P_{1H} / U_H = 141304,3 / 220 = 642,3 \text{ А.}$$

Ток в обмотке якоря в номинальном режиме работы (по первому закону Кирхгофа) (см. рисунок 4.3)

$$I_{Я.Н} = I_H - I_{В.Н} = I_H - U_H / R_B = 642,3 - 220 / 43,2 = 637,2 \text{ А.}$$

ПротивоЭДС, индуцируемая в обмотке якоря при номинальной частоте его вращения,

$$E_{Я.Н} = U_H - R_Я \cdot I_{Я.Н} = 220 - 637,2 \cdot 0,00725 = 215,4 \text{ В.}$$

Номинальная электромагнитная мощность

$$P_{ЭМ.Н} = E_{Я.Н} \cdot I_{Я.Н} = 215,4 \cdot 637,2 = 137240,3 \text{ Вт.}$$

Номинальный вращающий электромагнитный момент

$$M_H = 9,55 \cdot P_{ЭМ.Н} / n_H = 9,55 \cdot 137240,3 / 600 = 2184,4 \text{ Н·м.}$$

Частота вращения якоря в режиме идеального холостого хода

$$n_0 = n_H \cdot U_H / E_{Я.Н} = 600 \cdot 220 / 215,4 = 612,9 \text{ мин}^{-1}.$$

Пусковой ток якоря при введении в цепь якоря пускового реостата

$$I_{Я.П} = 2 \cdot I_H - I_{В.Н} = 2 \cdot 642,3 - 5,09 = 1279,5 \text{ А}.$$

Сопротивление пускового реостата

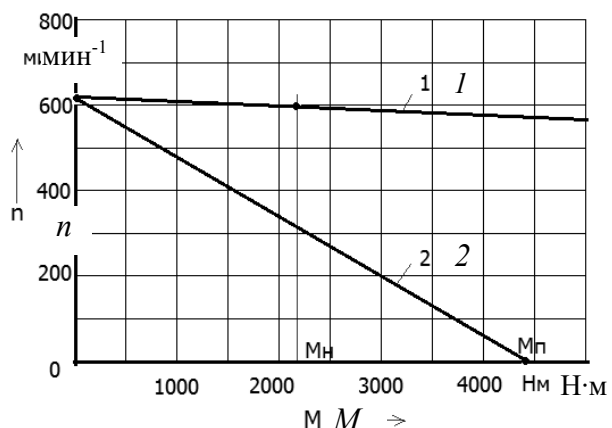
$$R_{П} = \frac{U_H}{I_{Я.П}} - R_{Я} = \frac{220}{1279,5} - 0,00725 = 0,165 \text{ Ом}.$$

При $U = \text{const}$ будут постоянными ток возбуждения I_B и магнитный поток Φ , из чего следует

$$\frac{M_{П}}{M_H} = \frac{C_M \cdot I_{Я.П} \cdot \Phi}{C_M \cdot I_{Я.Н} \cdot \Phi} = \frac{I_{Я.П}}{I_{Я.Н}};$$

$$M_{П} = I_{Я.П} \cdot M_H / I_{Я.Н} = 1279,5 \cdot 2184,4 / 637,2 = 4386,3 \text{ Н·м}.$$

Механическая характеристика двигателя представляет собой зависимость частоты вращения вала от момента $n = f(M)$ и может быть построена по двум точкам. Первая точка соответствует режиму холостого хода $n = n_0$ ($M = 0$), вторая – для естественной характеристики $n = n_H$ ($M = M_H$), для искусственной характеристики при пуске $n = 0$ ($M = M_{П}$). Механические характеристики двигателя представлены на рисунке 4.4.



1 – естественная; 2 – искусственная при пуске

Рисунок 4.4 – Механические характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

5 Практическое занятие № 5. Расчет электронных устройств на основе полупроводниковых диодов

Цель занятия: изучить основные методы расчета мостового выпрямителя и стабилизатора напряжения с выбором компонентов.

Пример решения задач

Задача 1. Расчет схемы выпрямителя.

Разработать схему мостового выпрямителя на полупроводниковых диодах с индуктивно-емкостным LC-фильтром для выпрямления однофазного синусоидального напряжения. Напряжение сети $U_1 = 220$ В, частота питающего напряжения $f = 50$ Гц, номинальное напряжение нагрузки $U_d = 50$ В, номинальная мощность нагрузки $P_d = 30$ Вт, допустимый коэффициент пульсаций $K_H = 0,007$. Необходимо выбрать тип вентиля, рассчитать параметры фильтра.

Схема однофазного мостового выпрямителя с LC-фильтром приведена на рисунке 5.1.

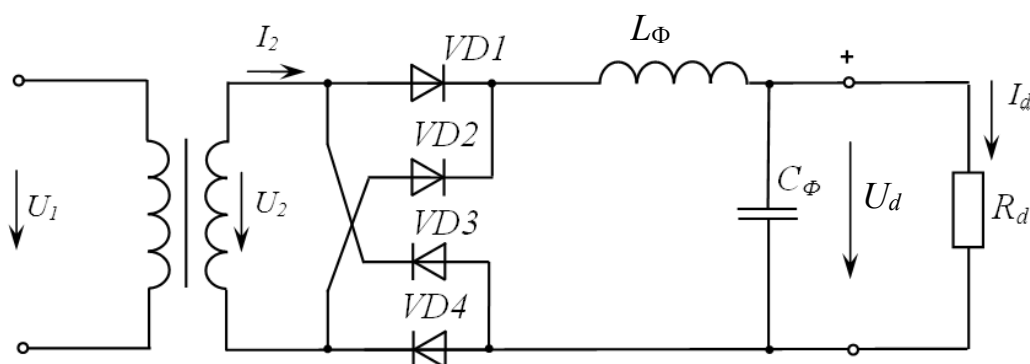


Рисунок 5.1 – Схема однофазного мостового выпрямителя с индуктивно-емкостным LC-фильтром

Ток нагрузки

$$I_d = \frac{P_d}{U_d} = \frac{30}{50} = 0,6 \text{ А.}$$

Сопротивление нагрузки

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

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

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

Обратное максимальное напряжение на вентиле

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

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

- максимальный прямой ток $I_{np \text{ max}} = 1 \text{ А} > I_a = 0,3 \text{ А}$;
- максимальное обратное напряжение $U_{обр \text{ max}} = 100 \text{ В} > U_{a \text{ обр max}} = 78,5 \text{ В}$;
- максимальное напряжение в открытом состоянии $U_{np \text{ max}} = 1,1 \text{ В}$.

Для однофазного мостового выпрямителя действующее значение вторичного напряжения определяется следующим образом:

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

Тогда коэффициент трансформации

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{57,5} = 3,67.$$

Коэффициент пульсации на выходе схемы однофазного мостового выпрямителя $K_{\Pi} = 0,67$.

Требуемый коэффициент пульсации $K_H = 0,007$.

Коэффициент сглаживания фильтра

$$S_{LC} = \frac{K_{\Pi}}{K_H} = \frac{0,67}{0,007} = 95,71.$$

Для LC-фильтра

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

где m – число пульс выпрямленного напряжения за период.

Зададимся $C_{\phi} = 200 \text{ мкФ}$. Тогда

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

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

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

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

Модель однофазного неуправляемого мостового выпрямителя с фильтром приведена на рисунке 5.2.

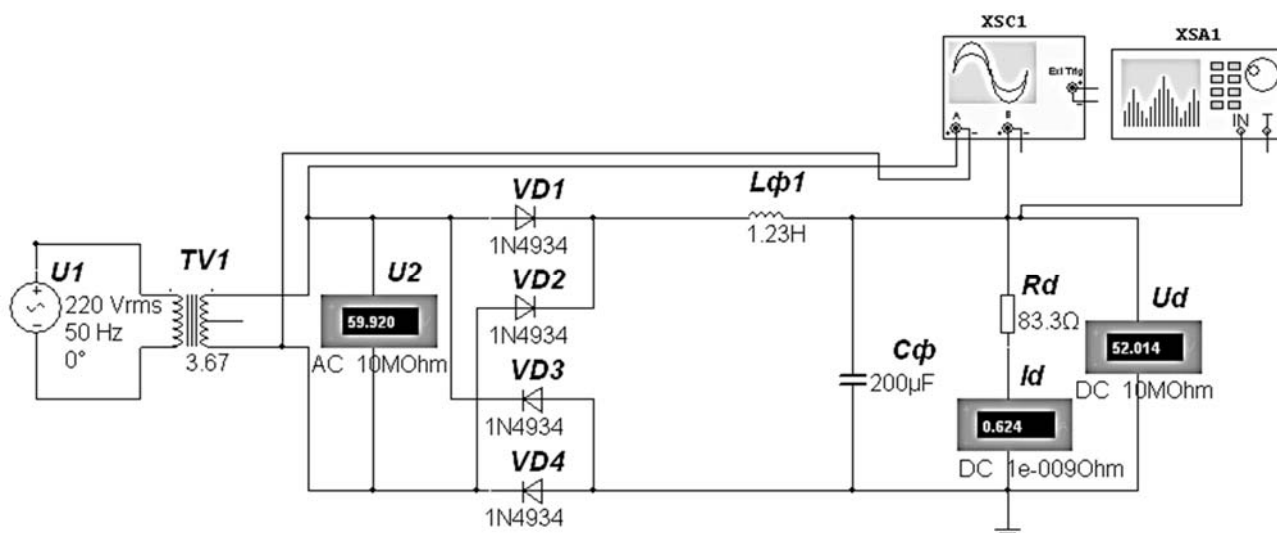


Рисунок 5.2 – Модель мостового выпрямителя с индуктивно-емкостным фильтром

Результаты моделирования: $U_2 = 59,921$ В, $I_d = 0,606$ А, $U_d = 52,04$ В (задано $U_d = 50$ В), что соответствует заданию. Осциллограммы напряжений в контрольных точках приведены на рисунке 5.3.

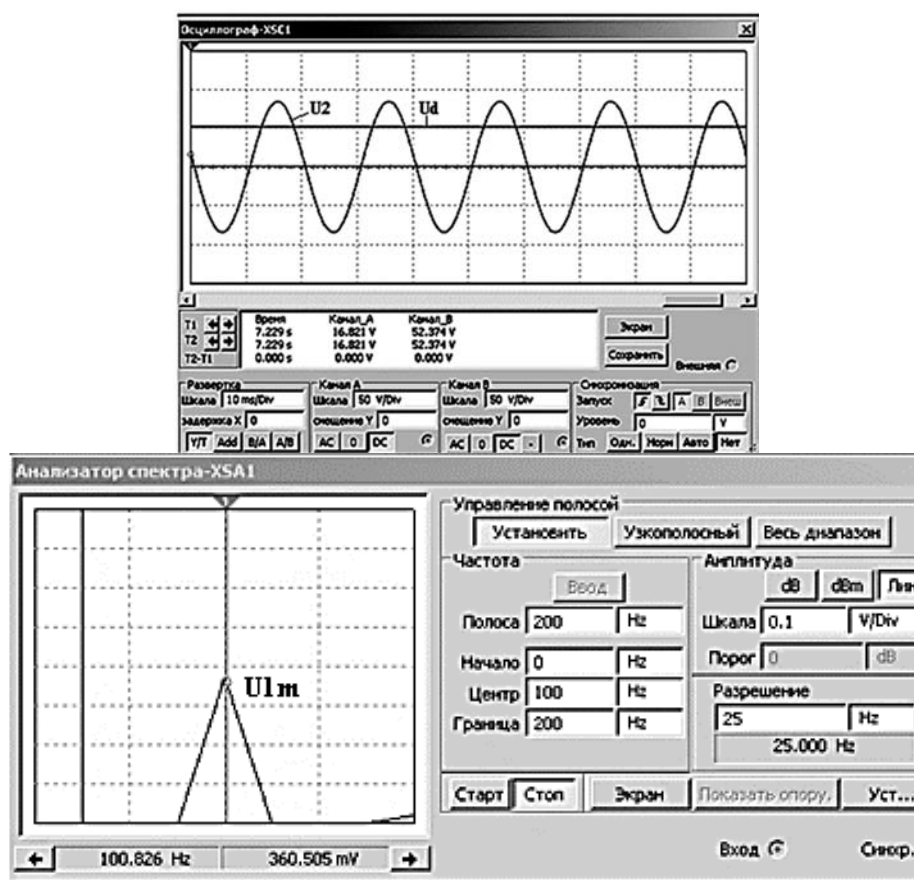


Рисунок 5.3 – Осциллограммы напряжения вторичной обмотки трансформатора U_2 , выпрямленного напряжения U_d и значение первой гармоники U_{1m} выпрямленного напряжения

Коэффициент пульсаций в нагрузке

$$K_H = \frac{U_{1m}}{U_d} = \frac{0,36}{52,014} = 0,0069,$$

что удовлетворяет заданию $K_H = 0,7 \% \geq 0,0069 \cdot 100 \%$.

Амплитуда первой гармоники выпрямленного напряжения U_{1m} находится с помощью анализатора спектра XSA1 на удвоенной частоте питающего напряжения $f_1 = 2 \cdot f = 2 \cdot 50 = 100$ Гц (см. рисунок 5.3).

Задача 2. Расчет параметрического стабилизатора напряжения.

Разработать схему, выполнить расчет и выбор элементов параметрического стабилизатора напряжения для обеспечения заданного напряжения на нагрузке U_H . Необходимо определить величину балластного сопротивления R_6 , осуществить моделирование ее работы в среде Multisim, проверить работоспособность схемы во всем диапазоне изменения входного напряжения, определить коэффициент стабилизации.

Решение

Схема параметрического стабилизатора напряжения приведена на рисунке 5.4.

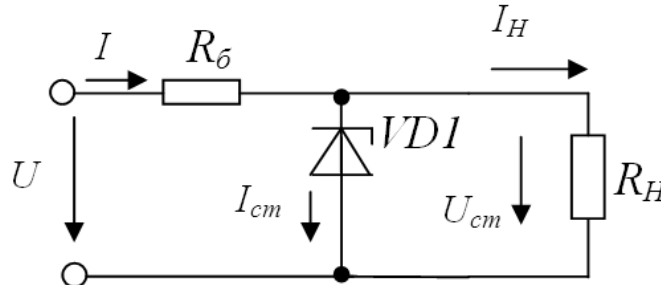


Рисунок 5.4 – Схема параметрического стабилизатора напряжения

Выбираем стабилитрон 1N4736A по заданному напряжению на нагрузке U_H с параметрами:

- напряжение стабилизации $U_{cm} = 6,8$ В;
- минимальный ток стабилизации $I_{cm \min} = 21$ мА (в справочнике I_{cm});
- максимальный ток стабилизации $I_{cm \max} = 660$ мА.

Найдем среднее значение напряжения источника U_{cp} и тока стабилитрона $I_{cp.cm}$:

$$U_{cp} = \frac{U_{\min} + U_{\max}}{2} = \frac{12 + 14}{2} = 13 \text{ В};$$

$$I_{cp.cm} = \frac{I_{cm \min} + I_{cm \max}}{2} = \frac{21 \cdot 10^{-3} + 660 \cdot 10^{-3}}{2} = 340,5 \text{ мА}.$$

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа:

$$U_{cp} = IR_{\delta} + U_{cm} = (I_{cp.cm} + I_H)R_{\delta} + U_{cm}.$$

Из чего определим балластное сопротивление:

$$R_{\delta} = \frac{U_{cp} - U_{cm}}{I_{cp.cm} + I_H} = \frac{13 - 6,8}{340,5 \cdot 10^{-3} + 620 \cdot 10^{-3}} = 6,45 \text{ Ом},$$

где I_H – номинальный ток нагрузки,

$$I_H = \frac{U_{cm}}{R_H} = \frac{6,8}{11} = 0,62 \text{ А} = 620 \text{ мА}.$$

Принимаем из стандартного ряда E24 $R_{\delta} = 6,2$ Ом. Рассмотрим, будет ли обеспечена стабилизация во всем диапазоне изменения входного напряжения:

$$U_{BX \min} = U_{cm} + R_{\delta} (I_{cm \min} + I_H) = 6,8 + 6,2 \cdot (21 + 620) \cdot 10^{-3} = 10,77 \text{ В};$$

$$U_{BX \max} = U_{cm} + R_{\delta} (I_{cm \max} + I_H) = 6,8 + 6,2 \cdot (660 + 620) \cdot 10^{-3} = 14,74 \text{ В}.$$

Таким образом, стабилизация обеспечивается во всем диапазоне изменения входного напряжения (12...14 В).

Модель параметрического стабилизатора напряжения в среде Multisim приведена на рисунке 5.5. Необходимо привести результаты моделирования при минимальном входном напряжении $U_{\min}$, максимальном входном напряжении $U_{\max}$.

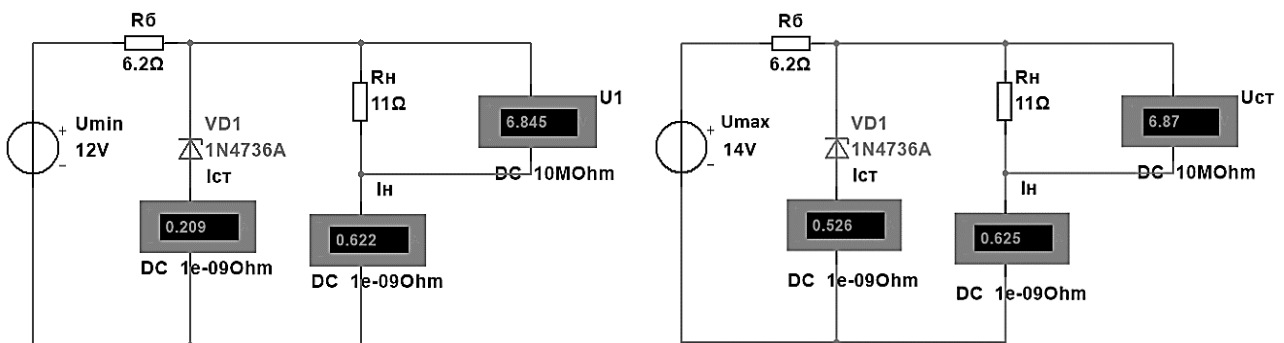


Рисунок 5.5 – Модель параметрического стабилизатора напряжения

Стабилизация обеспечивается во всем диапазоне входных напряжений:

$$U_{cm \min} = 6,845 \text{ В при } U_{\min} = 12 \text{ В}; U_{cm \max} = 6,870 \text{ В при } U_{\max} = 14 \text{ В}.$$

Коэффициент стабилизации

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_{ex}/U_{cp}}{\Delta U_{cm}/U_{cm}} = \frac{2/13}{0,025/6,8} = 41,85,$$

где

$$\Delta U_{ex} = U_{\max} - U_{\min} = 14 - 12 = 2 \text{ В};$$

$$\Delta U_{cm} = U_{cm \max} - U_{cm \min} = 6,870 - 6,845 = 0,025 \text{ В}.$$

6 Практическое занятие № 6. Расчет электронных устройств на биполярных и полевых транзисторах

Цель занятия: изучить основные методы расчета электронных устройств на биполярных и полевых транзисторах.

Пример решения задач

Задача 1. Расчет электронного ключа на биполярном транзисторе.

Разработать схему электронного ключа на биполярном транзисторе. Исходные данные к задаче: напряжение питания $U_{\Pi} = 16 \text{ В}$, сопротивление нагрузки $R_H = 5 \text{ Ом}$, входные (управляющие) напряжения U_y равны $+0,4$ и $+5 \text{ В}$, соответствующие включенному и отключенному состоянию нагрузки. Необходимо графоаналитически определить сопротивление управления в цепи базы R_y , описать принцип работы схемы, осуществить моделирование ее работы в среде Multisim, определить длительность фронта t_f и среза импульса t_c выходного напряжения.

Схема электронного ключа приведена на рисунке 6.1.

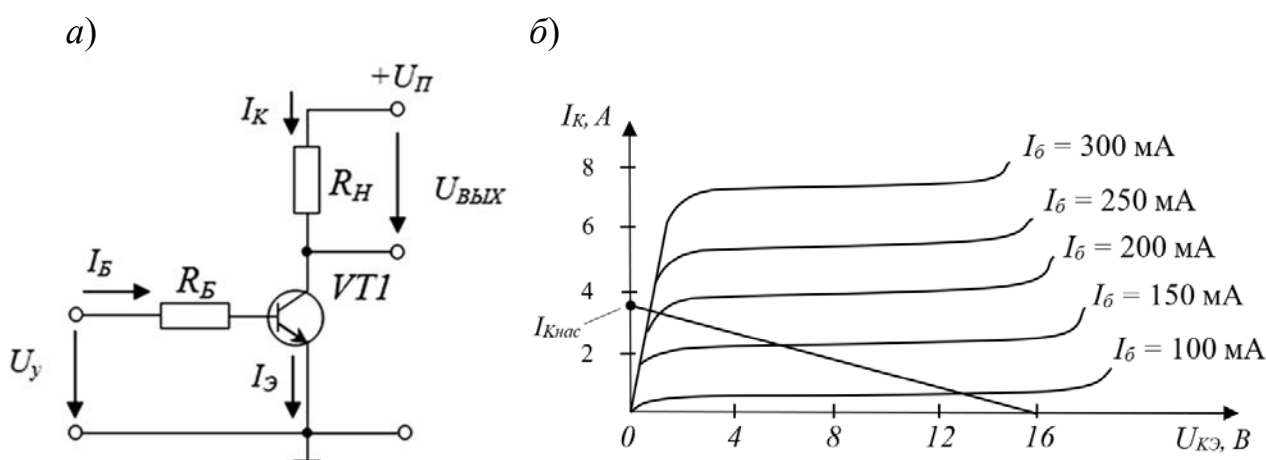


Рисунок 6.1 – Схема электронного ключа (а) и выходные характеристики биполярного транзистора (б)

Максимальный ток нагрузки в режиме короткого замыкания транзистора VT1 составляет

$$I_{K3} = \frac{U_{II}}{R_H} = \frac{16}{5} = 3,2 \text{ А.}$$

Максимальное напряжение между коллектором и эмиттером не превысит напряжение питания:

$$U_{KЭ \max} < U_{II} = 16 \text{ В.}$$

Выбираем транзистор 2N3879 (аналог КТ908А) со следующими параметрами:

- максимальный ток коллектора $I_{k \max} = 7 \text{ А}$;
- максимальное напряжение коллектора-эмиттера $U_{KЭ \max} = 75 \text{ В}$;
- статический коэффициент передачи тока биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером $h_{21э} = 12$;
- постоянное напряжение между выводами эмиттера и базы при заданном обратном токе коллектора, равном нулю, $U_{Б0} = 0,6 \text{ В}$;
- постоянный обратный ток коллектора $I_{K0} = 1,5 \text{ мА}$;
- сопротивление цепи базы $r_b = 1,5 \text{ Ом}$.

На выходных характеристиках транзистора (см. рисунок 6.1, б) проведем нагрузочную прямую. Она пройдет через точки $U_{KЭ} = U_{II} = 16 \text{ В}$ и $I_{K3} = 3,2 \text{ А}$.

Определим параметры входной цепи транзистора (сопротивление R_y), обеспечивающие его включенное состояние в режиме насыщения, по уравнению

$$-U_{y \text{ нас}} + I_{Б \text{ нас}} R_y + U_{БЭ} = 0.$$

Откуда

$$R_y = \frac{U_{y \text{ нас}} - U_{БЭ}}{I_{Б \text{ нас}}} = \frac{U_{y \text{ нас}} - (U_{Б0} + I_{Б \text{ нас}} \cdot r_b)}{I_{Б \text{ нас}}},$$

где $I_{Б \text{ нас}}$ – ток базы насыщения, $I_{Б \text{ нас}} = (I_{K \text{ нас}} / h_{21э}) \cdot q_{\text{нас}}$;

$q_{\text{нас}}$ – коэффициент насыщения, определяющий превышение базового тока насыщения транзистора над его граничным значением $I_{Бгр}$, принимают в диапазоне 1,5...2,0;

$I_{K \text{ нас}}$ – ток коллектора насыщения (см. рисунок 6.1, б), $I_{K \text{ нас}} = 3 \text{ А}$.

Тогда $I_{Б \text{ нас}} = \frac{3}{15} \cdot 1,5 = 0,3 \text{ А}$.

В результате

$$R_y = \frac{5 - (0,6 + 0,3 \cdot 1,5)}{0,3} = 13,2 \text{ Ом.}$$

Выбираем $R_y = 13 \text{ Ом}$ из стандартного ряда E24 .

Определяем параметры входной цепи, обеспечивающие режим записания транзистора (режим отсечки).

Для обеспечения режима глубокой отсечки сопротивление R_y должно удовлетворять неравенству

$$R_y < \frac{U_{y \text{ зан}}}{I_{K0}} = \frac{0,4}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 267 \text{ Ом.}$$

Окончательно выбираем $R_y = 13 \text{ Ом}$.

Модель электронного ключа в среде приведена на рисунках 6.2 (режим насыщения – нагрузка включена) и 6.3 (режим отсечки – нагрузка отключена). Питание осуществляется от источника U_{y1} .

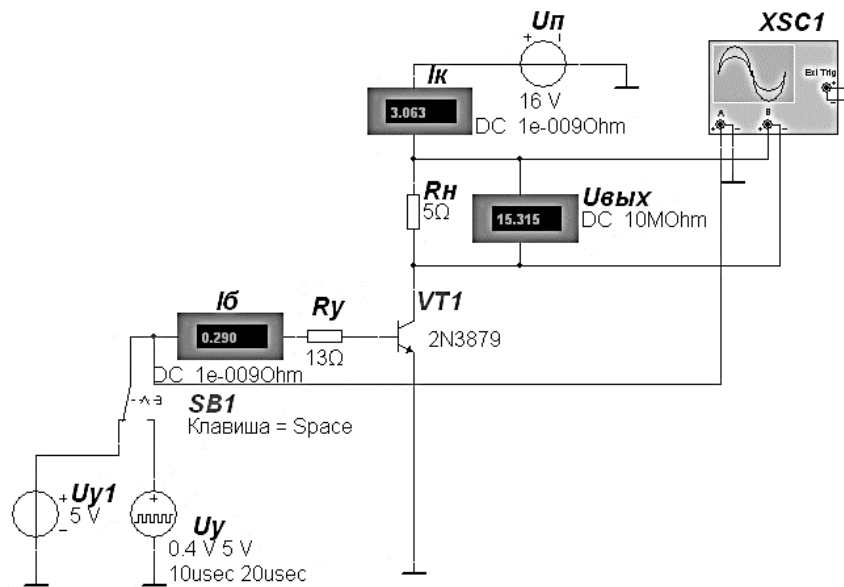


Рисунок 6.2 – Модель электронного ключа на биполярном транзисторе в режиме насыщения

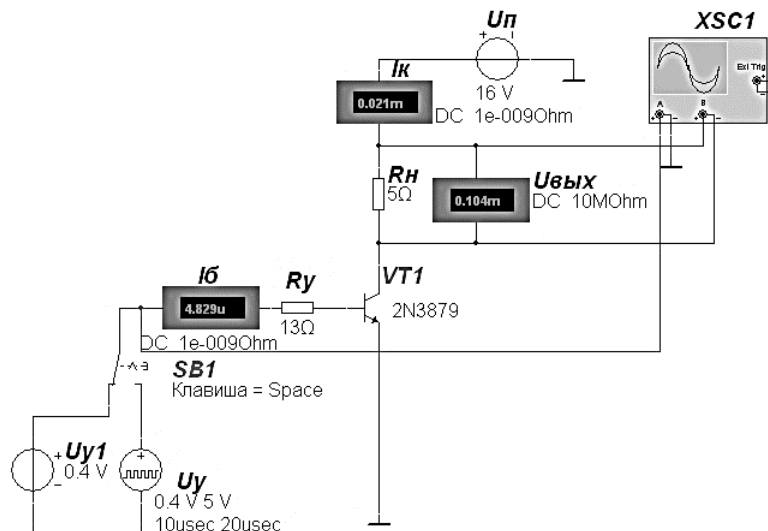


Рисунок 6.3 – Модель электронного ключа на биполярном транзисторе в режиме отсечки

Результаты моделирования: $I_{B\text{ нас}} = 0,29\text{ А}$, $I_{K\text{ нас}} = 3,063\text{ А}$, $U_{\text{вых}} = 15,315\text{ В}$ (режим насыщения), $I_{B\text{отс}} = 4,829\text{ мкА}$, $I_{K\text{отс}} = 0,021\text{ мА}$, $U_{\text{вых}} = 0,104\text{ мВ}$ (режим отсечки). Они хорошо согласуются с расчетными значениями.

Подав на вход схемы прямоугольные импульсы от источника U_y , получаем временные диаграммы работы электронного ключа (рисунок 6.4). В результате определяем время фронта $t_f = 1\text{ мкс}$ и время среза $t_c = 1,5\text{ мкс}$.

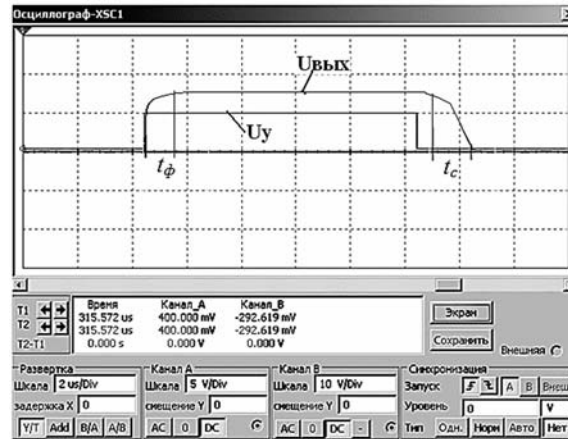


Рисунок 6.4 – Временные диаграммы работы электронного ключа

Задача 2. Расчет режима работы схемы включения полевого транзистора с общим истоком (ОИ) по постоянному току.

Выполнить расчет и выбор элементов схемы включения полевого транзистора 2N3972 с управляющим $p-n$ -переходом с общим истоком (ОИ) по постоянному току при работе в режиме класса А при напряжении источника питания $E_C = 20\text{ В}$. Необходимо по аналитическим зависимостям определить сопротивление автоматического смещения R_H , сопротивление в цепи стока R_C и цепи затвора R_Z , осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

Решение

Транзистор 2N3972 имеет канал n -типа и работает при $U_C > 0$ и $U_{3И} \leq 0$. Такой режим может быть обеспечен одним источником питания с применением так называемого автоматического смещения. Схема имеет вид, показанный на рисунке 6.5.

Параметры транзистора 2N3972 (таблица Д.1):

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

Аналитическая зависимость $I_C = f(U_{3И})$ при $U_{СИ} = \text{const}$ имеет вид

$$I_C = I_{C\text{ max}} (1 - |U_{3И}| / U_{отс})^2.$$

Откуда

$$U_{3И} = U_{отс} (1 - \sqrt{I_C / I_{C\text{ max}}}).$$

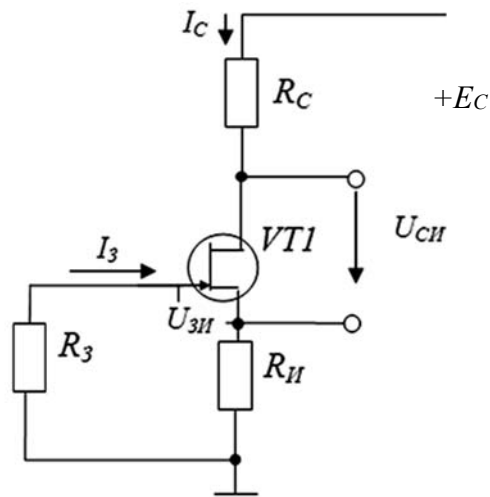


Рисунок 6.5 – Схема включения полевого транзистора с ОИ

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

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

Найдем сопротивление автоматического смещения. Так как $I_3 \gg I_C$, напряжение «затвор – исток» равно падению напряжения на R_H , поэтому

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

Ближайший номинал из стандартного ряда сопротивлений Е24 равен 10 Ом. Сопротивление резистора R_3 выбираем из условия

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

Отсюда получаем

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

Выбираем из ряда номиналов резистор с сопротивлением 100 кОм.

Сопротивление резистора R_C находим из уравнения токов и напряжений в схеме (см. рисунок 6.5):

$$E_C = I_C (R_H + R_C) + U_{СИ}.$$

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

$$U_{СИ} \approx E_C / 2 = 10 \text{ В.}$$

Решаем уравнение относительно R_C :

$$R_C = \frac{E_C - U_{CH} - I_C R_H}{I_C} = \frac{20 - 10 - 75 \cdot 10^{-3} \cdot 10}{15 \cdot 10^{-3}} = 657 \text{ кОм.}$$

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

Модель схемы включения полевого транзистора в среде приведена на рисунке 6.6. Результаты моделирования: $I_3 = 0,015 \text{ мкА}$, $U_{3u} = -0,147 \text{ В}$, $I_C = 15 \text{ мА}$ (задано $I_C = 15 \text{ мА}$), $U_{cu} = 9,753 \text{ В}$. Они хорошо согласуются с расчетами.

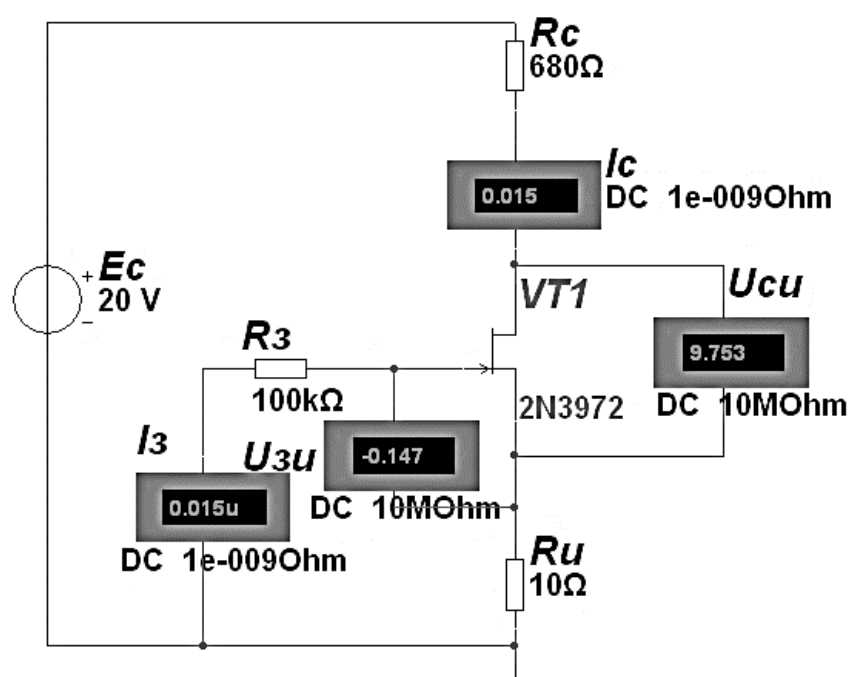


Рисунок 6.6 – Модель схемы включения полевого транзистора для обеспечения заданного выходного напряжения

7 Практическое занятие № 7. Расчет электронных устройств на основе операционных усилителей

Цель занятия: изучить основные методы расчета электронных устройств на основе операционных усилителей.

Пример решения задач

Задача 1. Построение схемы усилителя.

На основе операционного усилителя КР140УД11 (аналог LM318N8) разработать схему инвертирующего усилителя низкой частоты с коэффициентом усиления $K_u = 20$ и минимальным входным напряжением $U_{вх \min} = 5 \text{ мВ}$. Определить максимальное входное напряжение синусоидального сигнала $U_{вх \max}$, при котором не будет значительных искажений выходного сигнала.

Решение

Параметры операционного усилителя КР140УД11 (аналог LM318N8):

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

Разработанная схема инвертирующего усилителя низкой частоты приведена на рисунке 7.1 (цепи балансировки нуля – NC и частотной коррекции – FC не используются).

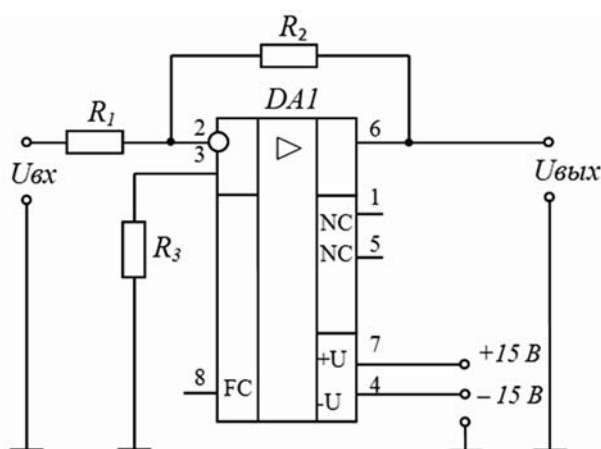


Рисунок 7.1 – Схема инвертирующего усилителя на ОУ КР140УД11

Для инвертирующего усилителя на ОУ входное сопротивление $R_{ex} = R_1$. Чтобы не загружать источники сигнала, величину R_1 желательно иметь большой. Но падение напряжения на R_1 от разностного тока ΔI_{ex} воспринимается усилителем как сигнал. Чтобы отстроить эту помеху от полезного сигнала, надо иметь $\Delta I_{ex} \cdot R_1$ значительно меньше, чем $U_{ex\ min}$.

$$\frac{U_{ex\ min}}{\Delta I_{ex}} = \frac{10}{0,2} = 50\text{ кОм} \gg R_1.$$

Принимаем из стандартного ряда Е24 $R_1 = 5,1\text{ кОм}$. Тогда

$$\Delta I_{ex} \cdot R_1 = 0,2 \cdot 5,1 = 1\text{ мВ} \ll U_{ex\ min} = 10\text{ мВ}.$$

Сопротивление обратной связи

$$R_2 = K_u \cdot R_1 = 20 \cdot 5,1 = 102\text{ кОм}.$$

Принимаем $R_2 = 100\text{ кОм}$.

Для уравнивания входных токов ОУ по обоим входам в цепь неинвертирующего входа включают резистор R_3 :

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

Принимаем $R_3 = 4,7 \text{ кОм.}$

Амплитуда выходного сигнала не может быть больше максимального выходного напряжения (для данного типа ОУ – 12 В). Поэтому действующее значение максимального входного синусоидального сигнала составит

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

Модель инвертирующего усилителя на ОУ в среде Multisim приведена на рисунке 7.2. Результаты моделирования при напряжении, не превышающем $U_{\text{вх max}}$: $U_{\text{вх}} = 0,2 \text{ В}$, $U_{\text{вых}} = 3,92 \text{ В}$.

Коэффициент усиления

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{3,92}{0,2} = 19,6 \approx 20,$$

что соответствует заданию.

Временные диаграммы работы усилителя при различных уровнях входного сигнала представлены на рисунке 7.3. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ смещено относительно входного $U_{\text{вх}}$ на 180° (инвертирующий усилитель). При входном напряжении, не превышающем $U_{\text{вх max}}$, искажение выходного сигнала не происходит (см. рисунок 7.2, а). При входном напряжении $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$, превышающем $U_{\text{вх max}}$, наблюдается ограничение выходного напряжения на уровне $U_{\text{вых max}} = 12 \text{ В}$ (рисунок 7.3, б).

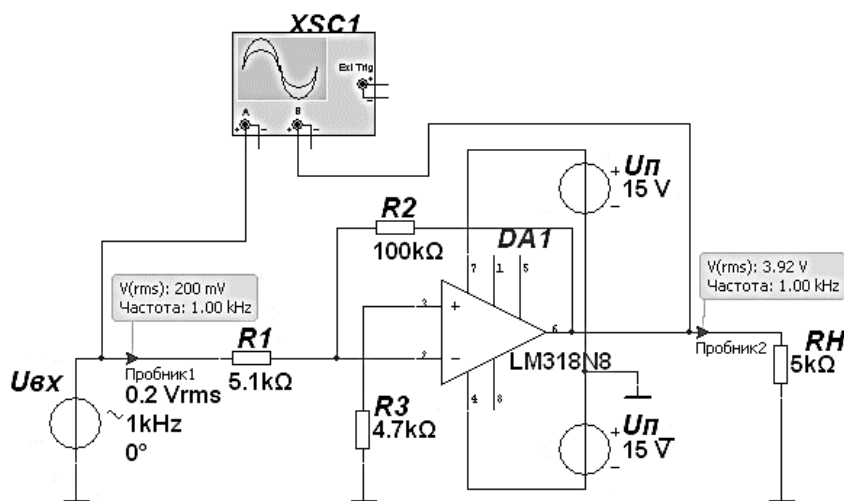


Рисунок 7.2 – Модель инвертирующего усилителя на ОУ

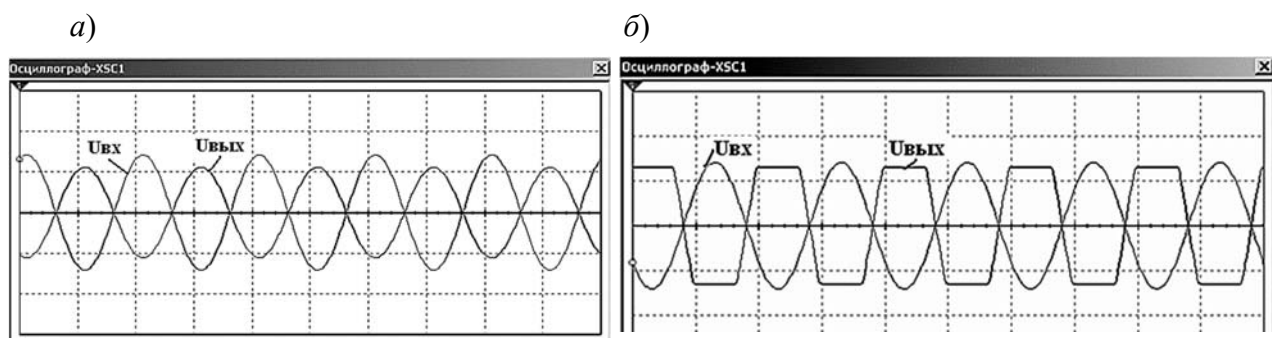


Рисунок 7.3 – Временные диаграммы работы инвертирующего усилителя на ОУ при входном напряжении $U_{вх\max} = 0,2\text{ В}$ (а) и $U_{вх\max} = 1\text{ В}$ (б)

Задача 2. Расчет сумматора на основе операционного усилителя.

На основе заданного операционного усилителя разработать схему сумматора для выполнения заданной операции при сопротивлении обратной связи $R_{ос}$. Осуществить моделирование ее работы при $U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = 100\text{ мВ}$. Исходные данные к задаче: операция $6U_1 + U_2 - 2U_3 - 3U_4$, $R_{ос} = 51\text{ кОм}$, тип операционного усилителя – КР140УД11 (LM318N8).

Решение

Схема параллельного сумматора для реализации заданной функции приведена на рисунке 7.4. Количество неинвертирующих входов соответствует числу положительных, а число инвертирующих – числу отрицательных членов функции.

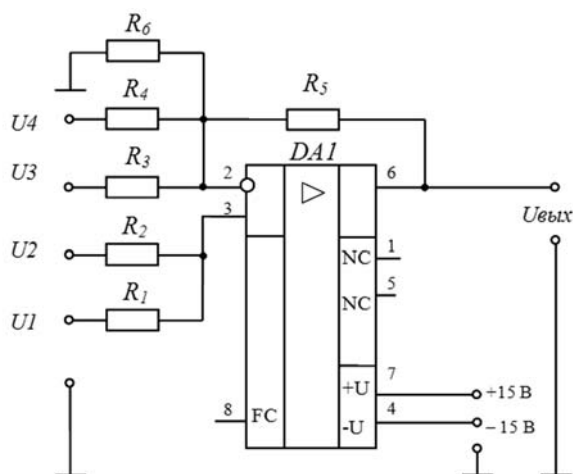


Рисунок 7.4 – Схема параллельного сумматора на ОУ КР140УД11

Выходное напряжение параллельного сумматора

$$U_{вых} = \sum K_{ин} \cdot U_{ин} - K_{iu} \cdot U_{iu},$$

где $K_{ин}$, $U_{ин}$, K_{iu} , U_{iu} – коэффициенты усиления и входные напряжения по каждому из неинвертирующих и инвертирующих входов.

$$K_i = \frac{R_{oc}}{R_i},$$

где R_{oc} – сопротивление обратной связи (резистор R_5);

R_i – сопротивление в цепи данного входа.

По заданному значению R_5 и весовым коэффициентам входов ($K_1 = 6$, $K_2 = 1$, $K_3 = 2$, $K_4 = 3$) определяем следующее:

$$R_1 = \frac{R_5}{K_1} = \frac{51}{6} = 8,5 \text{ кОм}; \quad R_2 = \frac{R_5}{K_2} = \frac{51}{1} = 51 \text{ кОм};$$

$$R_3 = \frac{R_5}{K_3} = \frac{51}{2} = 25,5 \text{ кОм}; \quad R_4 = \frac{R_5}{K_4} = \frac{51}{3} = 17 \text{ кОм}.$$

Принимаем сопротивления из стандартного ряда: $R_1 = 8,2 \text{ кОм}$, $R_2 = 51 \text{ кОм}$, $R_3 = 24 \text{ кОм}$, $R_4 = 16 \text{ кОм}$.

Для нормальной работы сумматора надо уравнивать сопротивления по обоим входам. В противном случае входные токи ОУ вызовут на них неодинаковое падение напряжений и на входе ОУ появится разностный сигнал, который будет им усилен. На выходе будет $U_{вых}$ при отсутствии $U_{вх}$.

Входное сопротивление:

– по инвертирующему входу

$$\frac{1}{R_H} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = \frac{1}{24} + \frac{1}{17} + \frac{1}{51} = 0,124 \text{ мОм}^{-1} \quad (R_H = 8 \text{ кОм});$$

– по неинвертирующему входу

$$R_H = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{8,2 \cdot 51}{8,2 + 51} = 7 \text{ кОм}.$$

Для уравнивания входных сопротивлений параллельно инвертирующему входу надо включить резистор R_6 так, чтобы

$$R_H = \frac{R_6 \cdot R_H}{R_6 + R_H};$$

$$R_6 = \frac{R_H \cdot R_H}{R_H - R_H} = \frac{8 \cdot 7}{8 - 7} = 56 \text{ кОм}.$$

Выходное напряжение для данной операции $U_{вых} = 6U + U - 2U - 3U = 2U$.

При единичном входном напряжении 100 мВ выходное напряжение сумматора

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вых1}} + U_{\text{вых2}} + U_{\text{вых3}} + U_{\text{вых4}} = 600 + 100 - 200 - 300 = 200 \text{ мВ.}$$

Модель параллельного сумматора на ОУ в среде Multisim приведена на рисунке 7.5. Результаты моделирования схемы при заданных входных напряжениях: $U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = 100 \text{ мВ}$, $U_{\text{вых}} = 191 \text{ мВ} \approx 200 \text{ мВ}$, что соответствует расчету.

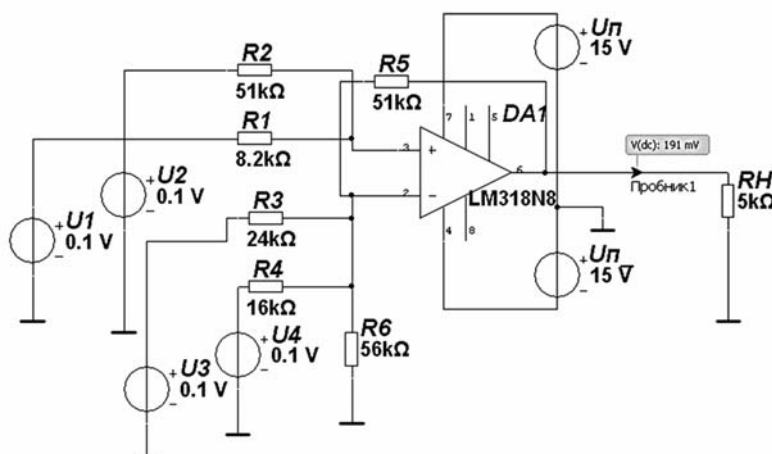


Рисунок 7.5 – Модель параллельного сумматора на ОУ

8 Практическое занятие № 8. Разработка цифровых комбинационных и последовательностных устройств

Цель занятия: изучить основные методы расчета цифровых комбинационных и последовательностных устройств.

Пример решения задач

Задача 1. Разработка устройства на логических элементах.

Разработать устройство управления механизмом на логических элементах серии К1533, работа которого контролируется по трем параметрам: X_1 , X_2 , X_3 , принимающих значения логического 0 и 1, и описывается функцией $Y = \overline{(X_1 + \overline{X_2})} \cdot X_3$. Определить состояние функции при всех возможных значениях входных сигналов.

Решение

Для реализации функции $Y = \overline{(X_1 + \overline{X_2})} \cdot X_3$ (рисунок 8.1) требуются четыре логических элемента: два элемента НЕ – DD1 микросхема К1533ЛН1 (рисунок Е.1) содержит шесть элементов НЕ в одном корпусе; один элемент 2ИЛИ-НЕ – DD2 микросхема К1533ЛЕ1 содержит четыре элемента 2ИЛИ-НЕ в одном

корпусе; один элемент 2И-НЕ – DD3 микросхема К1533ЛА3 содержит четыре элемента 2И-НЕ в одном корпусе. Так как в данной серии отсутствует необходимый элемент 2ИЛИ, он был заменен на элемент 2ИЛИ-НЕ, выходной сигнал от которого был дополнительно инвертирован с помощью второго элемента НЕ.

Для определения состояния функции Y (таблица 8.1) для различных комбинаций входных переменных $X1$, $X2$, $X3$ следует воспользоваться таблицами истинности логических элементов.

Таблица 8.1 – Таблица истинности логической функции Y

$X1$	$X2$	$X3$	Y
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

На рисунке 8.1 представлены состояния входов/выходов всех логических элементов для одного из вариантов состояния входных переменных в таблице 8.1.

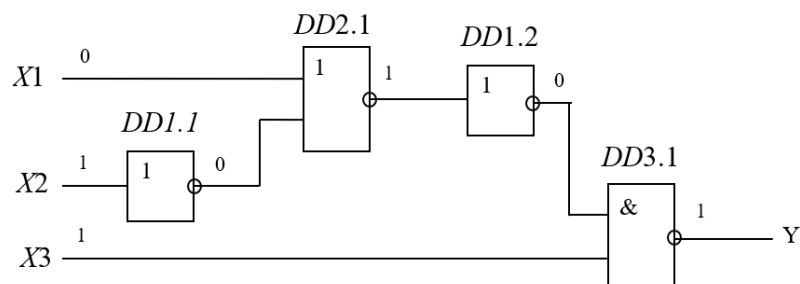


Рисунок 8.1 – Реализация логической функции

На рисунке 8.2 представлена модель в среде Multisim реализованного устройства управления механизмом, подтверждающая состояние функции $Y = 1$ и промежуточных значений при состояниях входных переменных $X1 = 0$, $X2 = 1$, $X3 = 1$.

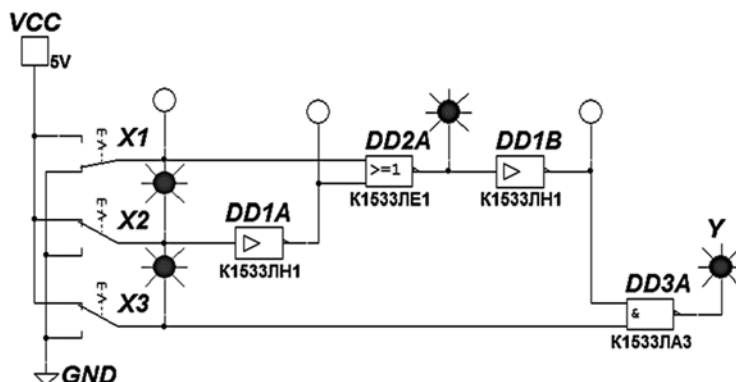


Рисунок 8.2 – Модель устройства управления механизмом на основе логических элементов

Список литературы

- 1 Сборник задач по электротехнике и основам электроники / под ред. В. Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1987. – 288 с.
- 2 **Касаткин, А. С.** Курс электротехники: учебник / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – 8-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2005. – 541 с.
- 3 **Иванов, И. И.** Электротехника: учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. С. Равдоник. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Лань, 2003. – 496 с.
- 4 **Панфилов, Д. И.** Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях. Лаборатория на компьютере / Д. И. Панфилов, В. С. Иванов, И. Н. Чепурин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МЭИ, 2004. – 304 с.
- 5 **Лачин, В. И.** Электроника: учеб. пособие / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Ростов н/Д: Феникс, 2009. – 703 с.
- 6 **Марченко, А. Л.** Основы электроники: учеб. пособие / А. Л. Марченко. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 296 с.
- 7 **Москатов, Е. А.** Справочник по полупроводниковым приборам / Е. А. Москатов. – М.: Радио, 2005. – 208 с.