

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальности 6-05-0715-03 «Автомобили,
тракторы, мобильные и технологические комплексы»
дневной и заочной форм обучения*



Могилев 2025

УДК 621.3
ББК 31.2:32.85
Э45

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 специальности 6-05-0715-03 «Автомобили, тракторы, мобильные и тех-
нологические комплексы» дневной и заочной форм обучения.

Учебное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевнича

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 неразветвленной и разветвленной электрической цепи постоянного тока с одним источником питания.....	4
2 Практическое занятие № 2. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи постоянного тока с несколькими источниками питания.....	8
3 Практическое занятие № 3. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи переменного тока с одним источником питания с применением комплексных чисел.....	13
4 Практическое занятие № 4. Анализ простейших трехфазных цепей с помощью комплексных чисел и векторных диаграмм.....	18
5 Практическое занятие № 5. Расчет параметров трансформатора.....	22
6 Практическое занятие № 6. Расчет параметров электрических машин по паспортным данным.....	32
7 Практическое занятие № 7. Расчет электронных устройств на основе полупроводниковых приборов.....	36
8 Практическое занятие № 8. Расчет электронных устройств на основе операционных усилителей.....	41
Список литературы.....	46

1 Практическое занятие № 1. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи постоянного тока с одним источником питания

Основные теоретические положения

1 Закон Ома для пассивного участка цепи

$$I = \frac{U}{R}.$$

2 Закон Ома для активного участка цепи

$$I = \frac{\pm \sum E \pm \sum U}{\sum R}.$$

Знак плюс пишется, если направления ЭДС и напряжения совпадают с направлением тока.

3 Первый закон Кирхгофа для электрического узла

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0,$$

где I_k – ток k -й ветви, присоединенной к данному узлу, причем втекающие токи в узел берутся со знаком плюс, вытекающие – со знаком минус либо наоборот.

4 Второй закон Кирхгофа для замкнутого контура

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{i=1}^m I_i R_i,$$

где E_k – ЭДС k -го источника контура;

I_i – ток, протекающий через резистор R_i .

I_i и E_k берутся со знаком плюс, если их направления совпадают с направлением обхода контура.

5 Мощность, потребляемая активным сопротивлением,

$$P = I^2 \cdot R.$$

Баланс мощности для электрической цепи постоянного тока

$$\sum_{i=1}^n E_i \cdot I_i = \sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot R_i,$$

где $(E_i \cdot I_i)$ берется со знаком плюс, если направления ЭДС и тока совпадают,

и со знаком минус, если не совпадают.

6 Эквивалентное преобразование электрических цепей постоянного тока.

Расчет сложных электрических цепей во многих случаях можно упростить и сделать более наглядным путем эквивалентного преобразования схемы одного вида в схему другого вида. Целесообразное преобразование схемы приводит к уменьшению числа ее ветвей или узлов, а значит, и числа уравнений, необходимых для расчета.

Примеры преобразования схем:

- замена нескольких последовательно или параллельно соединенных резисторов одним (рисунок 1.1);
- преобразование треугольника резисторов в эквивалентную звезду и наоборот (рисунок 1.2).

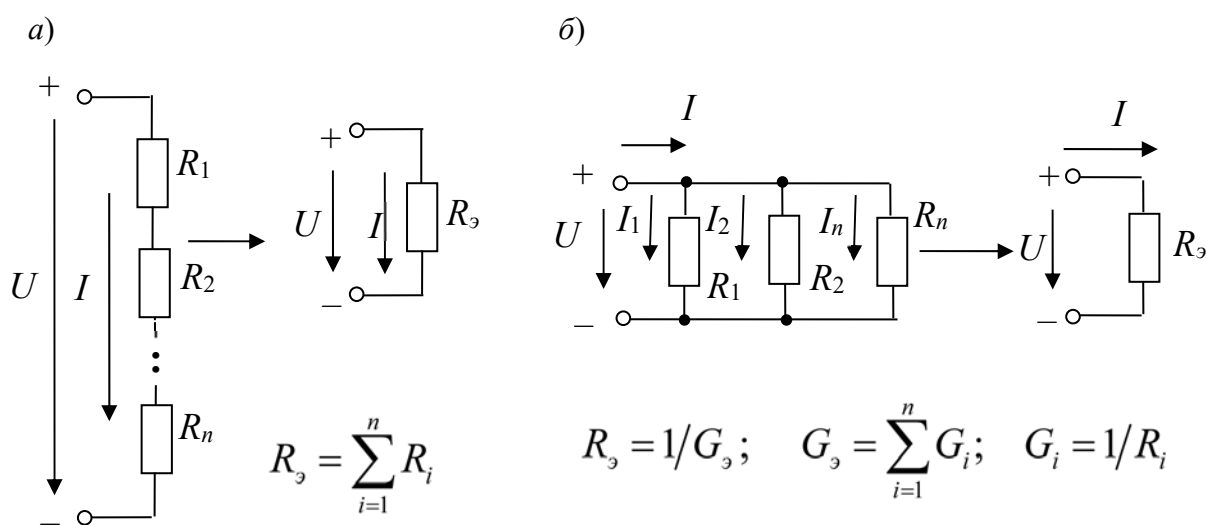


Рисунок 1.1 – Последовательное и параллельное соединение резисторов

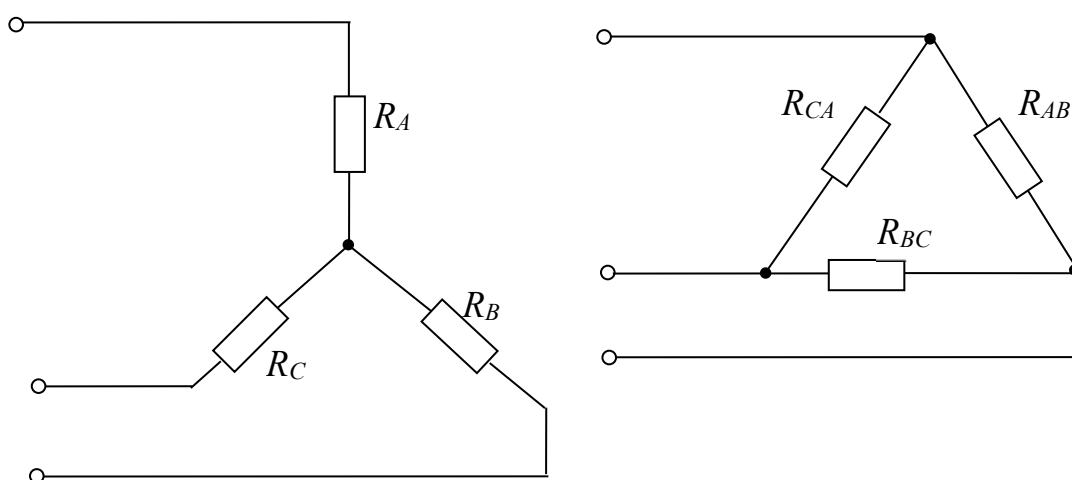


Рисунок 1.2 – Соединение резисторов звездой и треугольником

Формулы для расчета R_A, R_B, R_C (преобразование треугольника в звезду)

$$R_A = \frac{R_{AB} \cdot R_{CA}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}};$$

$$R_B = \frac{R_{AB} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}};$$

$$R_C = \frac{R_{CA} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}.$$

Формулы для расчета R_{AB}, R_{BC}, R_{CA} (преобразование звезды в треугольник)

$$R_{AB} = R_A + R_B + \frac{R_A \cdot R_B}{R_C};$$

$$R_{BC} = R_B + R_C + \frac{R_B \cdot R_C}{R_A};$$

$$R_{CA} = R_C + R_A + \frac{R_C \cdot R_A}{R_B}.$$

Примеры решения задач

Задача. Определить токи и напряжения на отдельных участках схемы (рисунок 1.3), если напряжение на входе $U = 240$ 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.

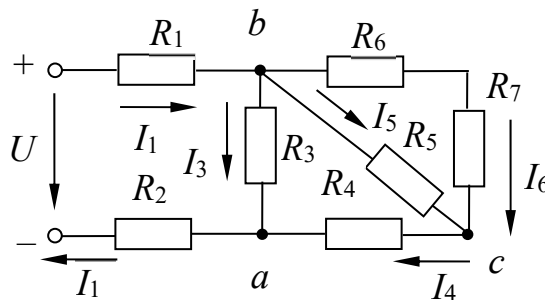


Рисунок 1.3 – Электрическая цепь постоянного тока

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 .

$$R_9 = R_{ba} + R_1 + R_2 = 5 + 0,5 + 0,5 = 6 \text{ Ом}.$$

Ток I_1 определяем по закону Ома:

$$I_1 = U / R_9 = 240 / 6 = 40 \text{ А}.$$

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 (рисунок 1.4).

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 соответствуют расчетным значениям.

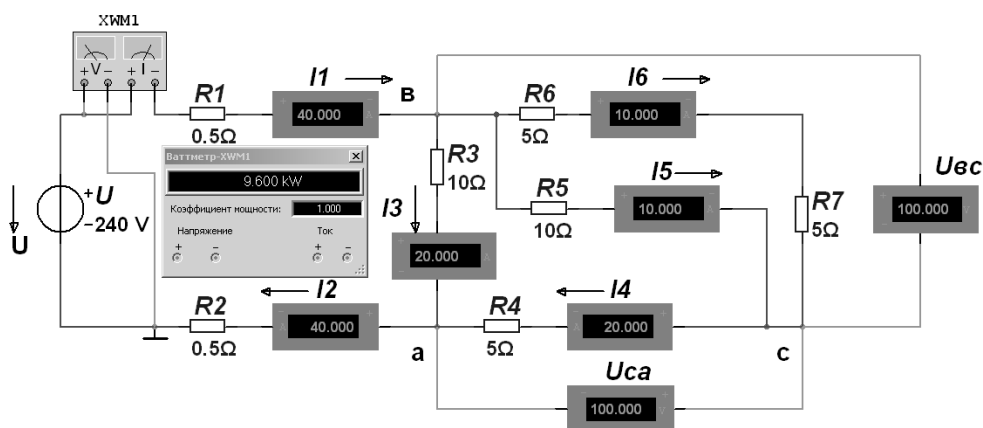


Рисунок 1.4 – Модель электрической цепи постоянного тока

Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачи, предложенные преподавателем.

2 Практическое занятие № 2. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи постоянного тока с несколькими источниками питания

Основные теоретические положения

1 Расчет сложных электрических цепей методом непосредственного применения законов Кирхгофа.

Метод непосредственного применения законов Кирхгофа является универсальным при расчетах и анализах сложных электрических цепей.

Порядок расчета по этому методу состоит в следующем:

- указываем произвольно положительные направления токов в ветвях, а также направления обхода в выбранных независимых контурах;
- записываем уравнения по первому закону Кирхгофа. Количество уравнений по первому закону Кирхгофа равно $\kappa - 1$ где κ – число узлов электрической цепи;
- записываем уравнения по второму закону Кирхгофа применительно к контуру.

Число уравнений, составляемых по второму закону Кирхгофа, равно $n - (\kappa - 1)$, где n – число ветвей электрической цепи.

Решая систему полученных уравнений, определяем токи ветвей.

Для проверки правильности расчета электрической цепи используют уравнение баланса мощностей.

2 Расчет сложных электрических цепей методом контурных токов.

Уравнения по методу контурных токов составляют по второму закону Кирхгофа – введением так называемых контурных токов. Количество уравнений,

составленных по методу контурных токов, равно $n - (\kappa - 1)$.

Направления контурных токов выбираются произвольно. При составлении уравнений положительными принимаются ЭДС, совпадающие с направлениями контурных токов. Решая систему уравнений, определим значение контурных токов. Во внешних ветвях контурные токи будут являться истинными токами. Токи в смежных ветвях определяют по первому закону Кирхгофа.

Задача 1. Рассмотреть пример расчета электрической цепи (рисунок 2.1) методом непосредственного применения законов Кирхгофа и методом контурных токов.

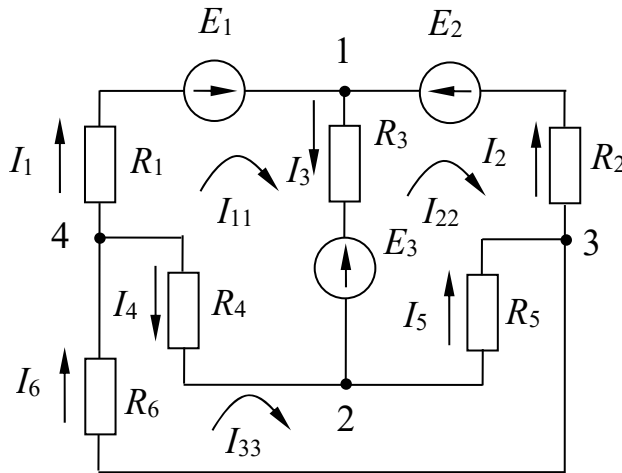


Рисунок 2.1 – Электрическая цепь к примеру расчета методом непосредственного применения законов Кирхгофа и методом контурных токов

Метод непосредственного применения законов Кирхгофа.

Число узлов $\kappa = 4$. Число ветвей $n = 6$.

Число уравнений по первому закону Кирхгофа $\kappa - 1 = 4 - 1 = 3$.

Число уравнений по второму закону Кирхгофа $n - (\kappa - 1) = 6 - (4 - 1) = 3$.

Число всех уравнений $n = 6$.

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 - \text{узел 1};$$

$$I_3 + I_4 - I_5 = 0 - \text{узел 2};$$

$$I_5 - I_6 - I_2 = 0 - \text{узел 3};$$

$$E_1 - E_3 = I_1 \cdot R_1 + I_3 \cdot R_3 - I_4 \cdot R_4 - \text{контур 1-2-4-1};$$

$$E_3 - E_2 = -I_2 \cdot R_2 - I_5 \cdot R_5 - I_3 \cdot R_3 - \text{контур 1-3-2-1};$$

$$0 = I_5 \cdot R_5 + I_6 \cdot R_6 + I_4 \cdot R_4 - \text{контур 2-3-4-2}.$$

Метод контурных токов.

Количество уравнений $n - (\kappa - 1) = 6 - (4 - 1) = 3$.

Обозначение контурных токов: I_{11}, I_{22}, I_{33} .

Система уравнений

$$\begin{cases} E_1 - E_3 = I_{11} \cdot (R_1 + R_3 + R_4) - I_{22} \cdot R_3 - I_{33} \cdot R_4 & \text{— контур } 1-2-4-1; \\ E_3 - E_2 = -I_{11} \cdot R_3 + I_{22} \cdot (R_2 + R_5 + R_3) - I_{33} \cdot R_5 & \text{— контур } 1-3-2-1; \\ 0 = -I_{11} \cdot R_4 - I_{22} \cdot R_5 + I_{33} \cdot (R_4 + R_5 + R_6) & \text{— контур } 2-3-4-2. \end{cases}$$

Решая данную систему уравнений, определяем значения контурных токов I_{11}, I_{22}, I_{33} .

Находим значения токов в ветвях:

$$I_1 = I_{11}; I_2 = -I_{22}; I_3 = I_{11} - I_{22}; I_4 = I_{33} - I_{11}; I_5 = I_{33} - I_{22}; I_6 = I_{33}.$$

Проверяем правильность расчета, составив уравнение баланса мощности:

$$E_1 \cdot I_1 - E_3 \cdot I_3 + E_2 \cdot I_2 = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5 + I_6^2 \cdot R_6.$$

3 Расчет сложных электрических цепей методом двух узлов.

Метод двух узлов применяется в тех случаях, если схема имеет два узла и ряд параллельных ветвей между ними. Для нахождения неизвестных токов составляют уравнения по закону Ома:

$$I_i = \frac{\pm E_i \pm U_{AB}}{R_i} = (\pm E_i \pm U_{AB}) \cdot G_i,$$

где I_i — ток i -й ветви;

E_i — ЭДС i -й ветви;

U_{AB} — узловое напряжение;

R_i — сопротивление i -й ветви;

G_i — проводимость i -й ветви, $G_i = 1 / R_i$.

ЭДС E_i и напряжение U_{AB} берутся со знаком плюс, если их направления совпадают с направлением тока рассматриваемой ветви.

Величина U_{AB} находится по формуле

$$U_{AB} = \frac{\sum_{i=1}^n (\pm E_i \cdot G_i)}{\sum_{i=1}^n G_i}.$$

В этой формуле E_i берется со знаком плюс, если ее направление противоположно направлению U_{AB} , и со знаком минус, если их направления совпадают.

Задача 2. Составить необходимые уравнения для определения значений токов в ветвях схемы (рисунки 2.2), используя метод двух узлов.

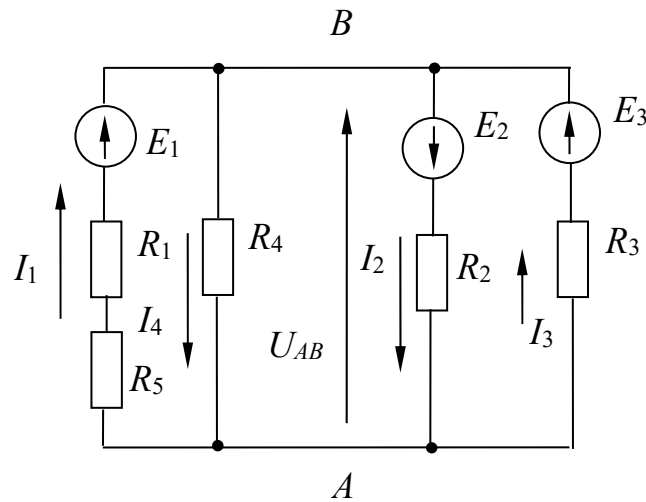


Рисунок 2.2 – Электрическая цепь к примеру расчета методом двух узлов

По закону Ома токи в ветвях

$$I_1 = (E_1 + U_{AB}) \cdot G_1; \quad I_2 = (E_2 - U_{AB}) \cdot G_2; \quad I_3 = (E_3 + U_{AB}) \cdot G_3; \quad I_4 = -U_{AB} \cdot G_4,$$

где $G_1 = 1 / (R_1 + R_5)$; $G_2 = 1 / R_2$; $G_3 = 1 / R_3$; $G_4 = 1 / R_4$.

Напряжение между двумя узлами

$$U_{AB} = \frac{\sum_{i=1}^n (\pm E_i \cdot G_i)}{\sum_{i=1}^n G_i} = \frac{-E_1 \cdot G_1 + E_2 \cdot G_2 - E_3 \cdot G_3}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4}.$$

4 Расчет сложных электрических цепей методом эквивалентного генератора напряжений.

Данным методом целесообразно пользоваться, если необходимо рассчитать только ток одной ветви. Сущность метода состоит в том, что любая сложная активная цепь представляется активным двухполюсником, внутренняя ЭДС которого равна напряжению холостого хода U_{xx} на участке, где определяется ток при отключении резистора, а внутреннее сопротивление – сопротивлению всей остальной цепи при отключенной ветви и закороченных источниках ЭДС ($R_{кз}$).

Ток в i -й ветви определяется по формуле

$$I_i = \frac{U_{xx}}{R_{кз} + R_i},$$

где U_{xx} – напряжение холостого хода относительно точек разрыва в ветви, по которой определяется ток;

$R_{кз}$ – внутреннее сопротивление цепи при отключенной нагрузке и закороченных источниках ЭДС;

R_1 – сопротивление резистора, где определяется ток.

Напряжение U_{xx} эквивалентного генератора напряжения определяется путем расчета цепи при отключенной нагрузке любым из методов расчета.

Сопротивление $R_{кз}$ определяется как $R_{экв}$ электрической цепи относительно точек разрыва и закороченных источников ЭДС.

Задача 3. Определить значение тока I_5 в схеме на рисунке 2.3, а.

Определяем напряжение холостого хода U_{xx} (рисунок 2.3, б), используя второй закон Кирхгофа:

$$U_{xx} = I_2 \cdot R_2 - I_1 \cdot R_1.$$

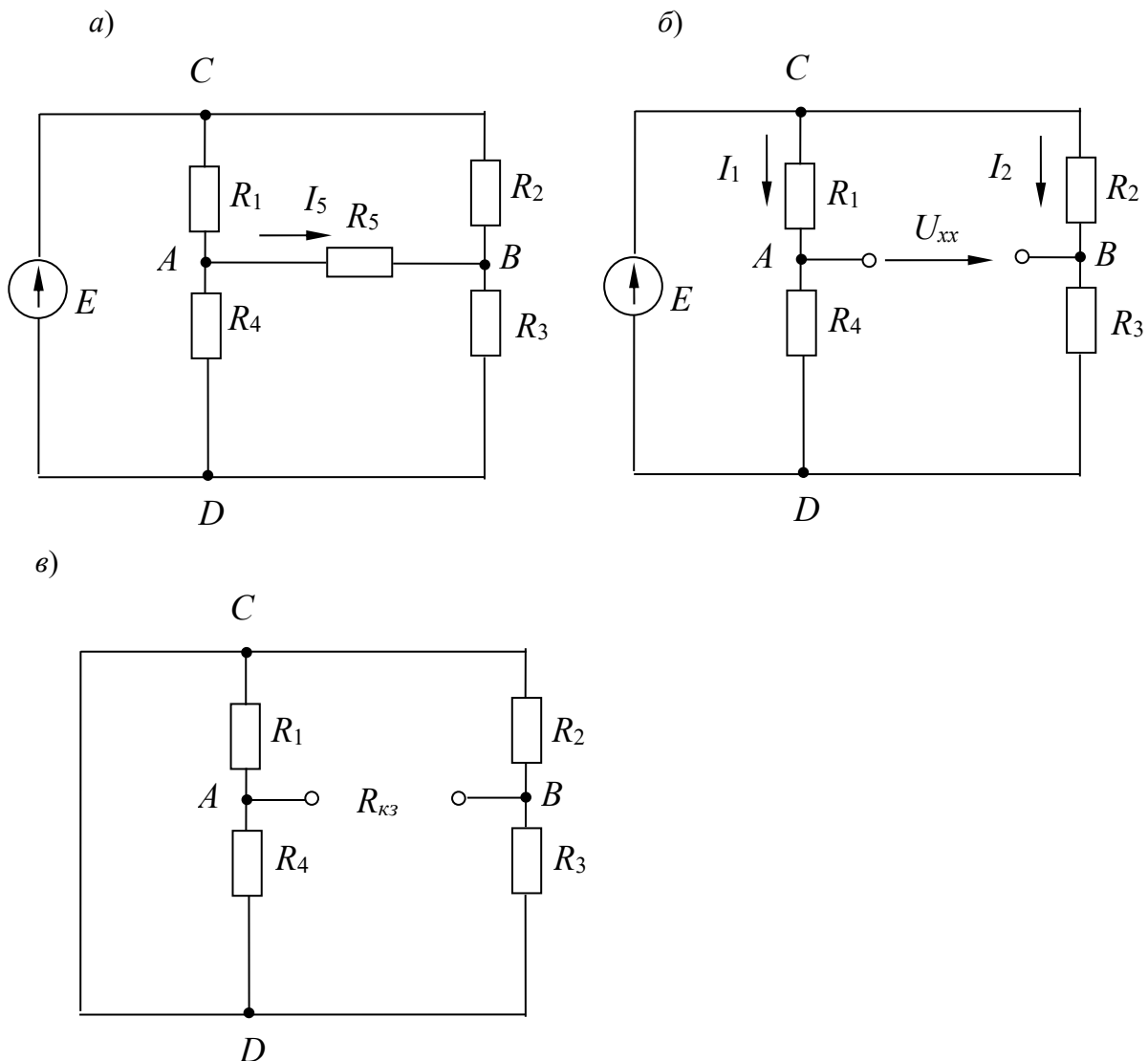


Рисунок 2.3 – Электрические схемы к примеру расчета методом эквивалентного генератора

Токи в ветвях (см. рисунок 2.3, б)

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_4}; \quad I_2 = \frac{E}{R_2 + R_3}.$$

Определяем значение сопротивления $R_{\kappa 3}$ (рисунок 2.3, в):

$$R_{\kappa 3} = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_4} + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}.$$

Определяем значение тока I_5 :

$$I_5 = \frac{U_{xx}}{R_{\kappa 3} + R_5}.$$

Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачи, предложенные преподавателем.

3 Практическое занятие № 3. Анализ электрического состояния неразветвленной и разветвленной электрической цепи переменного тока с одним источником питания с применением комплексных чисел

Основные теоретические положения

1 Символический метод расчета цепей переменного тока.

Сущность символического метода состоит в том, что гармонической функции тока (напряжения, ЭДС) ставится в соответствие комплексная гармоническая функция:

$$i = I_m \sin(\omega t \pm \varphi); \quad \dot{I}_m = I_m \cdot e^{j(\omega t \pm \varphi)}.$$

Для $t = 0$ комплексное амплитудное значение тока $\dot{I}_m = I_m \cdot e^{j(\pm \varphi)}$, а комплекс действующего значения тока $\dot{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j(\pm \varphi)}$. Аналогично

$$\dot{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j(\pm \varphi)}.$$

Закон Ома в символической форме имеет вид

$$\underline{I} = \frac{\underline{\dot{U}}}{\underline{Z}},$$

где \underline{Z} – комплекс полного сопротивления цепи.

При последовательном соединении элементов R, L, C

$$\underline{Z} = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C) = z \cdot e^{j\varphi},$$

где $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$; $\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$.

При параллельном соединении элементов

$$\frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3} + \dots + \frac{1}{\underline{Z}_i}.$$

Примеры решения задач

Задача 1. Пусть задана расчетная схема с последовательным соединением элементов R, L и C с параметрами $R_1 \dots R_n, X_{L1} \dots X_{Ln}, X_{C1} \dots X_{Cn}$ и напряжением U на входе (рисунок 3.1). Определить ток I , угол сдвига по фазе φ и мощность на входе цепи.

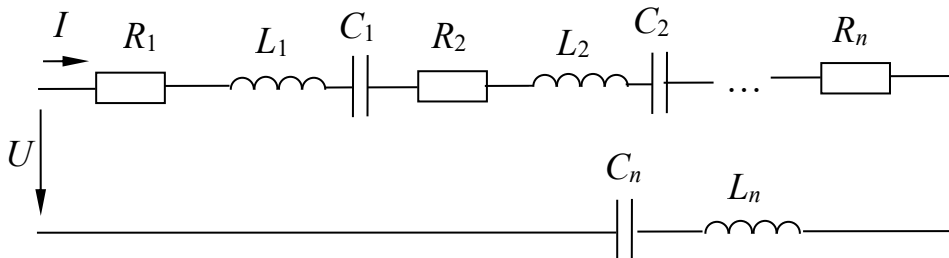


Рисунок 3.1 – Электрическая цепь с последовательным соединением элементов R, L и C

Решение

Комплекс действующего значения тока в цепи

$$\underline{I} = \frac{\underline{\dot{U}}}{\underline{Z}},$$

где $\underline{\dot{U}} = U$, т. к. $\varphi = 0^\circ$;

$$\underline{Z} = (R_1 + R_2 + \dots R_n) + j(X_{L1} - X_{C1} + X_{L2} - X_{C2} + \dots + X_{Ln} - X_{Cn}).$$

$$\tilde{S} = \underline{\dot{U}} \cdot \underline{I}^* = P \pm jQ,$$

где I^* – сопряженный комплекс тока.

Задача 2. Катушка с активным сопротивлением $R = 6$ Ом и индуктивностью $L = 25,5$ мГн соединена последовательно с конденсатором, емкость которого $C = 1590$ мкФ. Определить ток, напряжения на катушке и конденсаторе, мощности катушки, конденсатора и всей цепи. Построить векторную диаграмму напряжений, если напряжение на входе схемы (рисунок 3.2, а) $U = 127$ В и частота $f = 50$ Гц. Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

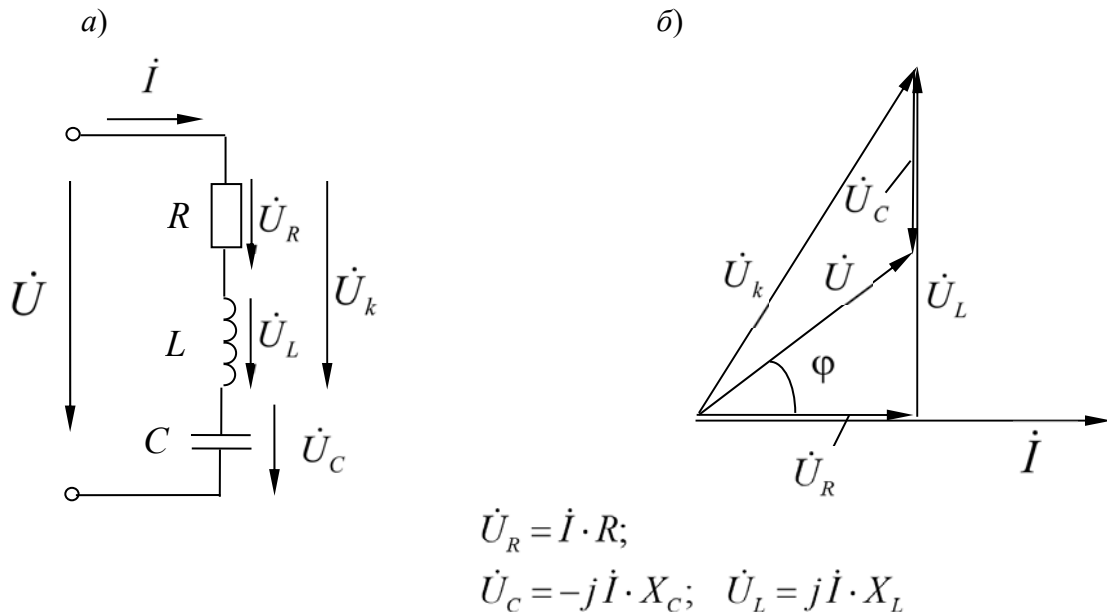


Рисунок 3.2 – Электрическая цепь переменного тока

Решение

Реактивные сопротивления элементов цепи

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 25,5 \cdot 10^{-3} = 8 \text{ Ом};$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1590 \cdot 10^{-6}} = 2 \text{ Ом}.$$

Комплекс полного сопротивления цепи

$$\begin{aligned} \underline{Z} &= R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C) = R + jX = 6 + j6 = \\ &= \sqrt{6^2 + 6^2} e^{j\left(\arctg \frac{6}{6}\right)} = 8,5 e^{j45^\circ} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Комплекс полного сопротивления катушки

$$\underline{Z}_k = R + jX_L = 6 + j8 = \sqrt{6^2 + 8^2} e^{j\left(\arctg \frac{8}{6}\right)} = 10 e^{j53^\circ} \text{ Ом}.$$

Комплексы напряжения и тока

$$\dot{U} = 127 \text{ В};$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \frac{127}{8,5 \cdot e^{j45^\circ}} = 14,9 \cdot e^{-j45^\circ} = 14,9 \cdot \cos(-45^\circ) + j \cdot \sin(-45^\circ) = 10,5 - j10,5 \text{ А.}$$

Комплексные действующие значения напряжений:

– на конденсаторе

$$\dot{U}_C = \underline{Z}_C \cdot \dot{I} = -j \cdot X_C \cdot \dot{I} = -j2 \cdot 14,9 \cdot e^{-j45^\circ} = 29,8 \cdot e^{-j135^\circ} = -21,1 - j21,1 \text{ В};$$

– на катушке

$$\dot{U}_k = \underline{Z}_k \cdot \dot{I} = 10 \cdot e^{j53^\circ} \cdot 14,9 \cdot e^{-j45^\circ} = 149 \cdot e^{j8^\circ} = 147,5 + j20,7 \text{ В.}$$

Комплекс полной мощности

$$\tilde{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = 127 \cdot 14,9 \cdot e^{j45^\circ} = 1892 \cdot e^{j45^\circ} = 1338 + j1338 \text{ В} \cdot \text{А},$$

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

Следовательно, активная мощность цепи $P = 1338$ Вт, а реактивная $Q = 1338$ вар.

Реактивная мощность конденсатора

$$Q_C = I^2 \cdot X_C = 14,9^2 \cdot 2 = 444 \text{ вар.}$$

Комплекс полной мощности катушки

$$\tilde{S} = \dot{U}_k \cdot \dot{I}^* = 149 \cdot 14,9 \cdot e^{j8^\circ} \cdot e^{j45^\circ} = 2220 \cdot e^{j53^\circ} = 1336 + j1773 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Векторная диаграмма приведена на рисунке 3.2, б.

Проверим правильность решения задачи, осуществив моделирование ее работы в среде Multisim (рисунок 3.3).

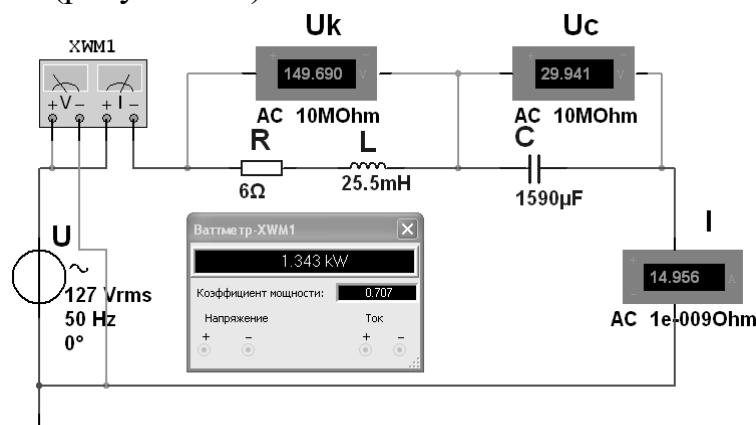


Рисунок 3.3 – Модель электрической цепи переменного тока в среде Multisim

В соответствии с показаниями ваттметра можно записать следующее: $P = 1343$ Вт; $\cos \varphi = 0,707$, $\varphi = 45^\circ$ (напряжение опережает ток по фазе); $S = P / \cos \varphi = 1900$ В·А; $Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 1343$ вар, что с небольшой погрешностью соответствует расчетным значениям.

Задача 3. Определить токи в электрической цепи (рисунок 3.4), если напряжение на входе $U_{ab} = 120$ В, а значения сопротивлений $X_{L0} = 4$ Ом, $R_1 = 6$ Ом, $X_{L1} = 8$ Ом, $X_C = 5$ Ом, $R_2 = 5$ Ом. Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

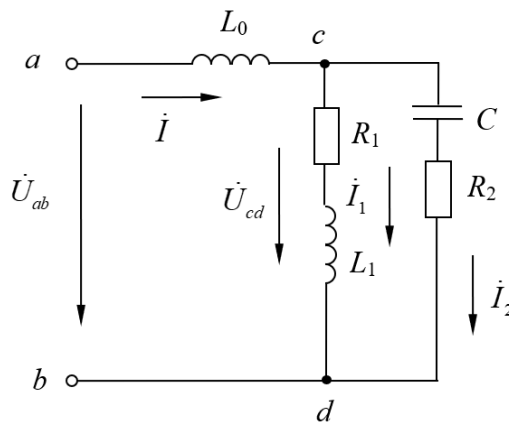


Рисунок 3.4 – Электрическая цепь переменного тока со смешанным соединением элементов

Решение

Входное комплексное сопротивление цепи

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{ab} &= \underline{Z}_0 + \underline{Z}_{cd} = \underline{Z}_0 + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = jX_{L0} + \frac{(R_1 + jX_{L1}) \cdot (R_2 - jX_C)}{R_1 + jX_{L1} + R_2 - jX_C} = \\ &= j4 + \frac{(6 + j8) \cdot (5 - j5)}{6 + j8 + 5 - j5} = 6,15 + j3,23 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Общий ток цепи

$$\dot{I} = \frac{U_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{120}{6,15 + j3,23} = 15,39 - j8,08 = 17,4 \cdot e^{-j27,7^\circ} \text{ А.}$$

Комплексное напряжение на зажимах cd по второму закону Кирхгофа

$$\dot{U}_{cd} = \dot{U}_{ab} - \dot{U}_{ac} = 120 - j4 \cdot (15,39 - j8,08) = 87,78 - j61,5 = 107,2 \cdot e^{-j35^\circ} \text{ В.}$$

Токи в ветвях

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{cd}}{\underline{Z}_1} = \frac{87,8 - j61,5}{6 + j8} = 0,34 - j10,7 = 10,71 \cdot e^{-j88,2^\circ} \text{ А;}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{cd}}{\underline{Z}_2} = \frac{87,8 - j61,5}{5 - j5} = 14,92 + j2,64 = 15,2 \cdot e^{j10^\circ} \text{ A.}$$

Комплексная полная мощность всей цепи

$$\tilde{S} = \dot{U}_{ab} \cdot \dot{I}^* = 120 \cdot (15,39 + j8,08) = 1846 + j970 = 2085 \cdot e^{j27,7^\circ} \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$S = \sqrt{1846^2 + 970^2} = 2085 \text{ В} \cdot \text{А},$$

откуда $P = 1846 \text{ Вт}$; $Q = 970 \text{ вар}$.

Модель электрической цепи в среде Multisim приведена на рисунке 3.5. Действующие значения токов I_1, I_2, I_3 , напряжения U_{cd} и активной мощности цепи P с небольшой погрешностью соответствуют расчетным.

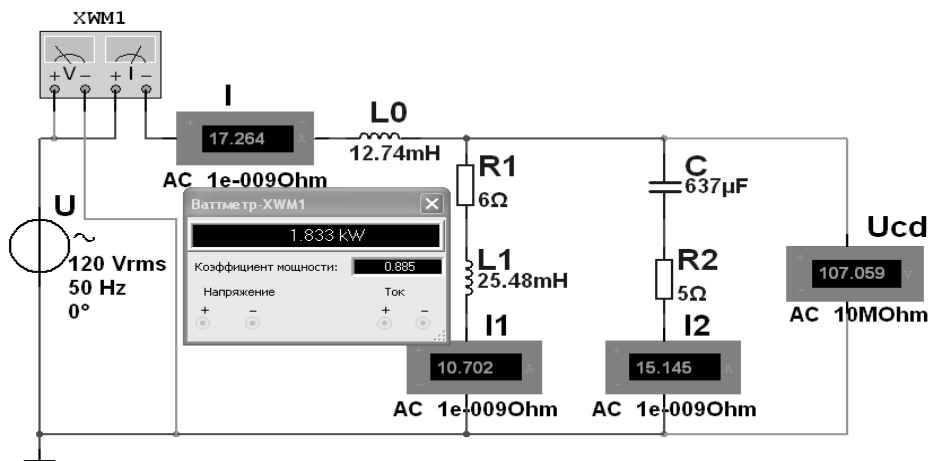


Рисунок 3.5 – Модель электрической цепи переменного тока с параллельным соединением элементов

Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачу, предложенную преподавателем.

4 Практическое занятие № 4. Анализ простейших трехфазных цепей с помощью комплексных чисел и векторных диаграмм

Основные теоретические положения

Фазные напряжения для схемы (рисунок 4.1, а) в комплексной форме определяются по заданному линейному напряжению:

$$\dot{U}_A = U_A; \quad \dot{U}_B = U_B \cdot e^{-j120^\circ}; \quad \dot{U}_C = U_C \cdot e^{-j240^\circ},$$

где $U_A = U_B = U_C = U_\phi = U_\Delta / \sqrt{3}$.

Для схемы (рисунок 4.1, б) фазные и линейные напряжения

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}.$$

В комплексной форме

$$\dot{U}_{AB} = U_{AB}; \quad \dot{U}_{BC} = U_{BC} \cdot e^{-j120^\circ}; \quad \dot{U}_{CA} = U_{CA} \cdot e^{-j240^\circ}.$$

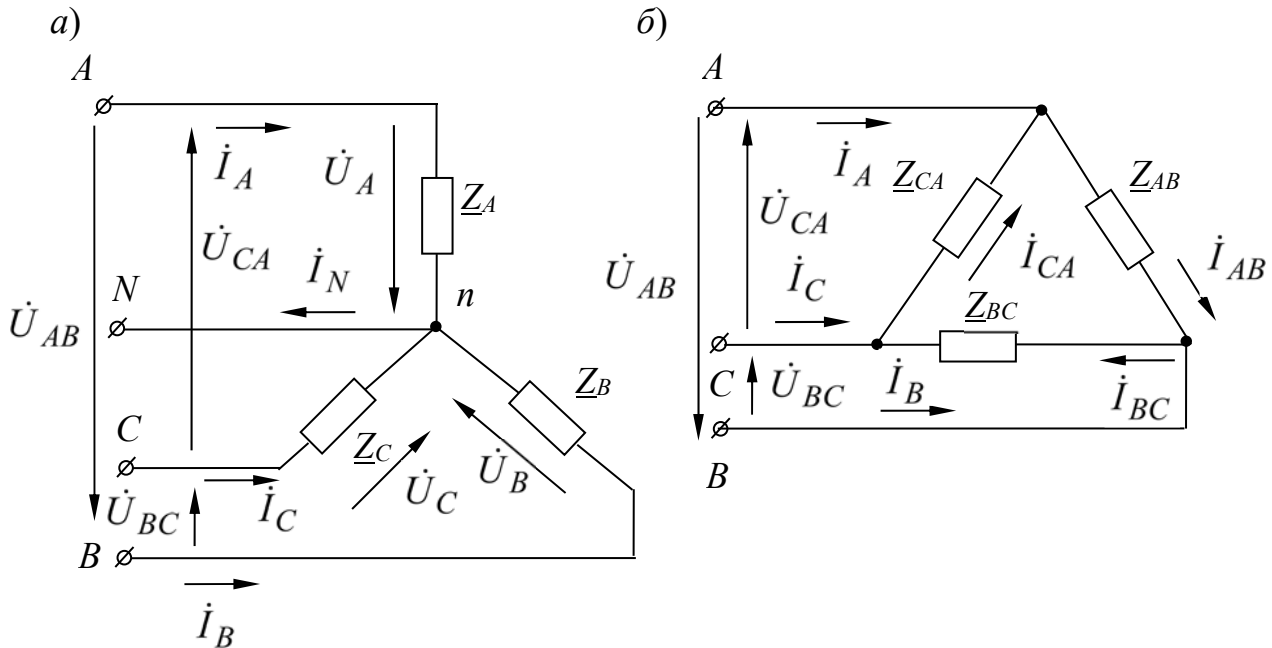


Рисунок 4.1 – Трёхфазные электрические цепи

Примеры решения задач

Задача 1. К трехфазной линии электропередачи (рисунок 4.2), линейные напряжения которой симметричны: $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 220$ В, присоединены три приемника энергии по схеме треугольник. Комплексные сопротивления этих приемников $Z_{AB} = 22$ Ом, $Z_{BC} = 19 - j11$ Ом, $Z_{CA} = 19 + j11$ Ом. Определить линейные и фазные токи в цепи и построить векторную диаграмму.

Решение

Запишем значения линейных напряжений в комплексной форме:

$$\dot{U}_{AB} = U_{AB} = 220 \text{ В.}$$

Тогда

$$\dot{U}_{BC} = U_{BC} \cdot e^{-j120^\circ} = 220 \cdot e^{-j120^\circ} = -110 - j190 \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{CA} = U_{CA} \cdot e^{-j240^\circ} = 220 \cdot e^{-j240^\circ} = -110 + j190 \text{ В.}$$

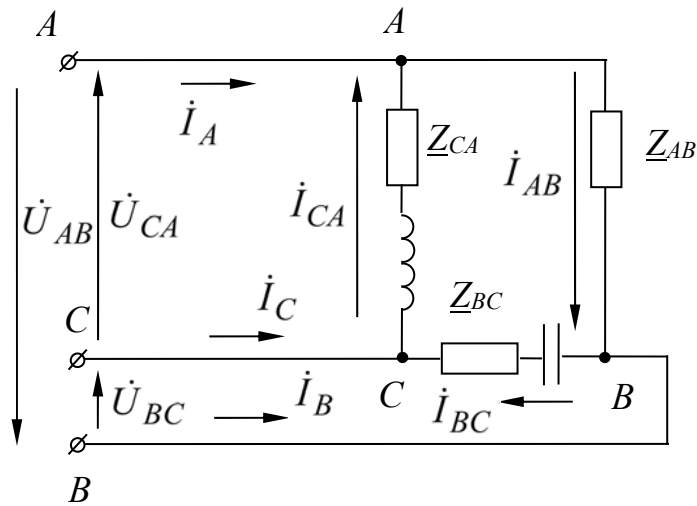


Рисунок 4.2 – Трехфазная электрическая цепь

На основании закона Ома определим фазные токи:

$$\dot{I}_{AB} = \dot{U}_{AB} / \underline{Z}_{AB} = 220 / 22 = 10 \text{ A};$$

$$\dot{I}_{BC} = \dot{U}_{BC} / \underline{Z}_{BC} = (-110 - j190) / (19 - j11) = -j10 = 10 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_{CA} = \dot{U}_{CA} / \underline{Z}_{CA} = (-110 + j190) / (19 + j11) = j10 = 10 \cdot e^{j90^\circ} \text{ A}.$$

Применив первый закон Кирхгофа к точкам A, B, C, найдем линейные токи:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = 10 - j10 = 14,1 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = j10 - 10 = 14,1 \cdot e^{-j135^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = j20 = 20 \cdot e^{j90^\circ} \text{ A}.$$

Проверка:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0;$$

$$10 - j10 - j10 - 10 + j20 = 0.$$

Задача 2. Определить токи в трехфазной цепи (рисунок 4.3), если линейные напряжения на входе в цепь симметричны: $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 380 \text{ В}$ и нагрузка также симметрична: $\underline{Z} = 10 + j10 \text{ Ом}$.

Решение

Для соединения звездой фазное напряжение

$$U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}.$$

Тогда комплексные значения фазных напряжений

$$\dot{U}_A = U_A = 220 \text{ В}; \quad \dot{U}_B = U_B \cdot e^{-j120^\circ} = 220 \cdot e^{-j120^\circ} \text{ В}; \quad \dot{U}_C = U_C \cdot e^{-j240^\circ} = 220 \cdot e^{-j120^\circ} \text{ В}.$$

Так как нагрузка симметричная,

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

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

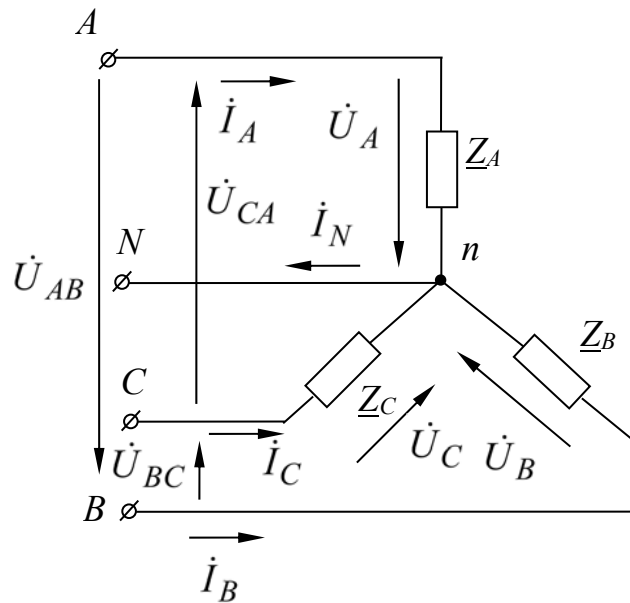


Рисунок 4.3 – Трехфазная электрическая цепь

Токи в нагрузке (линейные токи равны фазным)

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

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

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

Ток в нейтральном проводе

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

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

Проверим правильность решения задачи, осуществив моделирование работы схемы в среде Multisim (рисунок 4.4).

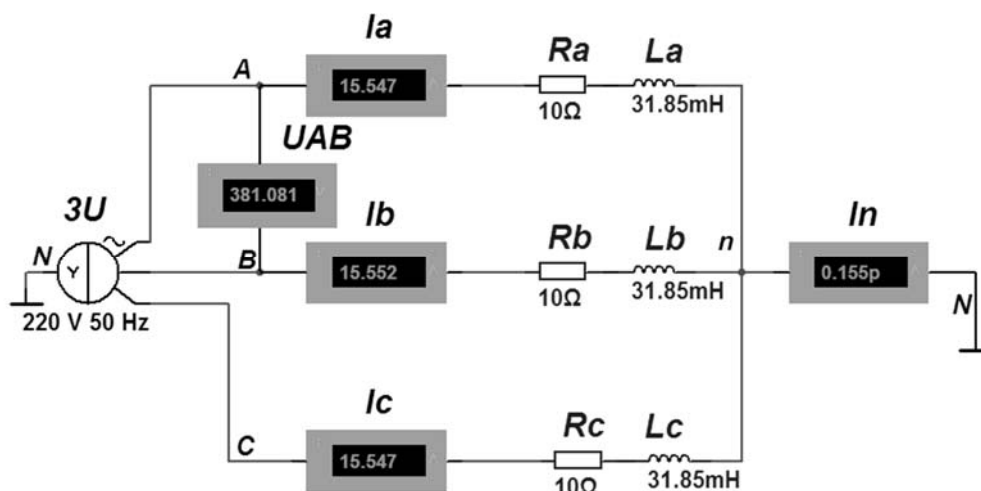


Рисунок 4.4 – Модель трехфазной электрической цепи переменного тока

Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачи, предложенные преподавателем, при аварийных режимах работы сети: обрыв фазы; обрыв линейного провода.

5 Практическое занятие № 5. Расчет параметров трансформатора

Основные теоретические положения

Однофазные трансформаторы.

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного по величине напряжения в переменный ток другого по величине напряжения с сохранением частоты преобразуемого напряжения.

К основным параметрам трансформатора относятся:

- номинальная мощность S_n ;
- номинальное напряжение на первичной обмотке U_{1n} ;
- номинальное вторичное напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе трансформатора и номинальном первичном напряжении U_{2n} ;
- номинальный первичный и вторичный токи, протекающие по обмоткам в номинальном режиме работы трансформатора, I_{1n}, I_{2n} .

Отношение $n = E_1 / E_2 = W_1 / W_2 = U_1 / U_2 = I_2 / I_1$ называется коэффициентом трансформации трансформатора.

Номинальные токи обмоток трансформатора

$$I_{1n} = S_n / U_{1n}; I_{2n} = S_n / U_{2n}.$$

Коэффициент загрузки трансформатора

$$\beta = I_1 / I_{1н} = I_2 / I_{2н}.$$

КПД трансформатора

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_\kappa},$$

где $\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности нагрузки;

P_0 – потери мощности в трансформаторе в режиме холостого хода;

P_κ – потери мощности в трансформаторе в режиме короткого замыкания, Вт.

$$S_n = U_{1н} \cdot I_{1н} = U_{2н} \cdot I_{2н}.$$

Максимальный КПД соответствует следующему значению коэффициента загрузки трансформатора:

$$\beta_{\max} = \sqrt{\frac{P_0}{P_\kappa}}.$$

Ток холостого хода трансформатора

$$I_0 = \frac{P_0}{U_{1н} \cdot \cos \varphi_0},$$

где $\cos \varphi_0$ – коэффициент мощности трансформатора в режиме холостого хода.

Схемы замещения трансформатора представлены на рисунке 5.1.

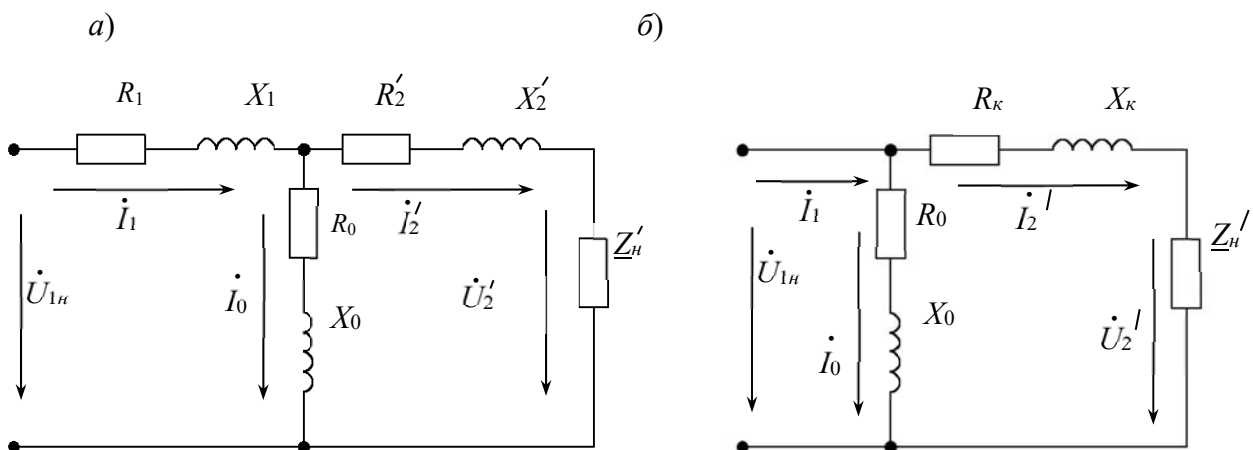


Рисунок 5.1 – Т-образная (а) и Г-образная (б) схемы замещения трансформатора

Сопротивления намагничивающей цепи

$$Z_0 = U_{1н} / I_0; \quad R_0 = P_0 / (I_0)^2; \quad X_0 = \sqrt{(Z_0)^2 - (R_0)^2}$$

либо

$$R_0 = Z_0 \cdot \cos \varphi_0; \quad X_0 = Z_0 \cdot \sin \varphi_0.$$

Сопротивления короткого замыкания

$$Z_k = U_{1к} / I_{1н}; \quad R_k = P_k / (I_{1н})^2; \quad X_k = \sqrt{(Z_k)^2 - (R_k)^2}$$

либо

$$R_k = Z_k \cdot \cos \varphi_k; \quad X_k = Z_k \cdot \sin \varphi_k,$$

где $\cos \varphi_k$ – коэффициент мощности трансформатора в режиме короткого замыкания.

Сопротивления первичной и вторичной обмоток

$$R_1 = R'_2 = R_k / 2; \quad X_1 = X'_2 = X_k / 2;$$

$$R_2 = R'_2 / n^2; \quad X_2 = X'_2 / n^2.$$

Процентное изменение напряжения на вторичной обмотке

$$\Delta U_2 \% = \beta \cdot (U_{ка} \% \cdot \cos \varphi_2 \pm U_{кр} \% \cdot \cos \varphi_2),$$

где $U_{ка} \%$ – активная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора, $U_{ка} \% = (R_k \cdot I_{1н} / U_{1н}) \cdot 100 \%$;

$U_{кр} \%$ – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора, $U_{кр} \% = (X_k \cdot I_{1н} / U_{1н}) \cdot 100 \%$ либо

$$U_{кр} \% = \sqrt{(U_k \%)^2 - (U_{ка} \%)^2},$$

где $U_k \%$ – напряжение короткого замыкания трансформатора.

Знак плюс соответствует индуктивной нагрузке, а знак минус – емкостной. Напряжение на вторичной обмотке трансформатора

$$U_2 = U_{2н} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_2 \%}{100} \right).$$

Приведенное значение тока во вторичной обмотке трансформатора

$$I'_2 = \frac{U_{1н}}{\sqrt{(R_k + R'_н)^2 + (X_k + X'_н)^2}},$$

где R'_n, X'_n – приведенные значения сопротивлений нагрузки, $R'_n = Z'_n \cdot \cos \varphi_2$, $X'_n = Z'_n \cdot \sin \varphi_2$ ($Z'_n = Z_n \cdot n^2$).

Ток во вторичной обмотке $I_2 = I'_2 \cdot n$.

Напряжение на вторичной обмотке трансформатора

$$U_2 = I'_2 \cdot Z'_n; \quad U_2 = U'_2 / n.$$

Трехфазные трансформаторы.

Соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами:

– при соединении обмоток звездой

$$U_{1n} = U_{1l} = \sqrt{3} \cdot U_{1\phi}; \quad I_{1n} = I_{1l} = I_{1\phi};$$

$$U_{2n} = U_{2l} = \sqrt{3} \cdot U_{2\phi}; \quad I_{2n} = I_{2l} = I_{2\phi};$$

– при соединении обмоток треугольником

$$U_{1n} = U_{1l} = U_{1\phi}; \quad I_{1n} = I_{1l} = \sqrt{3} \cdot I_{1\phi};$$

$$U_{2n} = U_{2l} = U_{2\phi}; \quad I_{2n} = I_{2l} = \sqrt{3} \cdot I_{2\phi}.$$

Полная мощность

$$S = 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{1l} \cdot I_{1l};$$

$$S = 3 \cdot U_{2\phi} \cdot I_{2\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{2l} \cdot I_{2l}.$$

Номинальные токи в обмотках

$$I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}}; \quad I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{2n}}.$$

Сопротивления короткого замыкания

$$Z_\kappa = \frac{U_{\kappa\phi}}{I_{1\kappa\phi}}; \quad R_\kappa = \frac{P_{\kappa\phi}}{3 \cdot I_{1\kappa\phi}^2}; \quad X_\kappa = \sqrt{Z_\kappa^2 - R_\kappa^2}.$$

Сопротивления намагничивающей цепи

$$Z_0 = \frac{U_{н\phi}}{I_{0\phi}}; \quad R_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_{0\phi}^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}.$$

Сопротивления первичной обмотки

$$R_1 = R'_2 = R_\kappa / 2; \quad X_1 = X'_2 = X_\kappa / 2.$$

Сопротивления вторичной обмотки

$$R_2 = R'_2 / n_\phi^2; \quad X_2 = X'_2 / n_\phi^2,$$

где n_ϕ – фазный коэффициент трансформации трехфазного трансформатора.

При соединении обмоток трансформатора «звезда/звезда» и «треугольник/треугольник»

$$n_\phi = n_\phi = U_{1н} / U_{2н} = U_{1\phi} / U_{2\phi}.$$

При соединении обмоток трансформатора «звезда/треугольник»

$$n_\phi = U_{1н} / U_{2н}; \quad n_\phi = U_{1\phi} / U_{2\phi} = U_{1н} / \sqrt{3} \cdot U_{2н}.$$

При соединении обмоток трансформатора «треугольник/звезда»

$$n_\phi = U_{1н} / U_{2н}; \quad n_\phi = U_{1\phi} / U_{2\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{1н} / U_{2н}.$$

Расчет параметров и характеристик трансформаторов

Задача 1. Однофазный двухобмоточный трансформатор испытали в режиме холостого хода и короткого замыкания. При опытах были получены следующие данные: номинальное напряжение первичной обмотки $U_{1н} = 10000$ В; ток холостого хода $I_0 = 0,25$ А; потери мощности холостого хода $P_0 = 125$ Вт; напряжение на вторичной обмотке $U_{2н} = 400$ В; номинальное напряжение короткого замыкания $U_{1к} = 500$ В; номинальный ток первичной обмотки $I_{1н} = 2,5$ А; номинальный ток вторичной обмотки $I_{2н} = 62,5$ А; потери мощности короткого замыкания $P_\kappa = 600$ Вт.

Определить: полную мощность трансформатора; коэффициент трансформации; коэффициент мощности при холостом ходе и опыте короткого замыкания; полное, активное и реактивное сопротивления первичной и вторичной обмоток; номинальный КПД; напряжение на вторичной обмотке при подключении нагрузки $Z_n = 8$ Ом; $\cos\varphi_2 = 0,8$ (индуктивный характер).

Решение

Полная мощность трансформатора

$$S_n = U_{1н} \cdot I_{1н} = 10000 \cdot 2,5 = 25000 \text{ В}\cdot\text{А}.$$

Коэффициент трансформации

$$n = U_{1н} / U_{2н} = 10000 / 400 = 25.$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (U_{1н} \cdot I_0) = 125 / (10000 \cdot 0,25) = 0,05.$$

Полное сопротивление намагничивающей цепи

$$Z_0 = U_{1н} / I_0 = 10000 / 0,25 = 40000 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление намагничивающей цепи

$$R_0 = P_0 / I_0^2 = 125 / 0,25^2 = 2000 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление намагничивающей ветви

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{40000^2 - 2000^2} = 39950 \text{ Ом.}$$

Индуктивность намагничивающей цепи

$$L_0 = X_0 / \omega = X_0 / 2 \cdot \pi \cdot f = 39950 / 314 = 127,2 \text{ Гн.}$$

Коэффициент мощности при коротком замыкании

$$\cos \varphi_k = P_k / (U_{1к} \cdot I_{1н}) = 600 / (500 \cdot 2,5) = 0,48.$$

Полное сопротивление обмоток трансформатора при коротком замыкании

$$Z_k = U_{1к} / I_{1н} = 500 / 2,5 = 200 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление обмоток трансформатора при коротком замыкании

$$R_k = P_k / I_{1н}^2 = 600 / 2,5^2 = 96 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление обмоток трансформатора при коротком замыкании

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{200^2 - 96^2} = 175 \text{ Ом.}$$

Индуктивность обмоток трансформатора при коротком замыкании

$$L_k = X_k / \omega = 175 / 314 = 0,56 \text{ Гн.}$$

Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора

$$R_1 = R_2' = R_k / 2 = 96 / 2 = 48 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление первичной обмотки трансформатора

$$X_1 = X_2' = X_k / 2 = 175 / 2 = 87,5 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора

$$R_2 = R_2' / n^2 = 48 / 25^2 = 0,0768 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление вторичной обмотки трансформатора

$$X_2 = X'_2 / n^2 = 87,5 / 25^2 = 0,14 \text{ Ом.}$$

Приведенное значение тока трансформатора при заданной нагрузке

$$I'_2 = \frac{U_{1н}}{\sqrt{(R_k + R'_н)^2 + (X_k + X'_н)^2}} = \frac{10000}{\sqrt{(96 + 4000)^2 + (175 + 3000)^2}} = 1,93 \text{ А,}$$

где

$$R'_н = Z_н \cdot \cos \varphi_2 = 8 \cdot 0,8 = 6,4 \text{ Ом;}$$

$$X'_н = Z_н \cdot \sin \varphi_2 = 8 \cdot 0,6 = 4,8 \text{ Ом;}$$

$$\sin \varphi_2 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6;$$

$$R'_н = n^2 \cdot R_н = 25^2 \cdot 6,4 = 4000 \text{ Ом;}$$

$$X'_н = n^2 \cdot X_н = 25^2 \cdot 4,8 = 3000 \text{ Ом;}$$

$$L'_н = X'_н / \omega = 3000 / 314 = 9,55 \text{ Гн.}$$

Приведенное напряжение на вторичной обмотке трансформатора

$$U'_2 = I'_2 \cdot \sqrt{(R'_н)^2 + (X'_н)^2} = 1,93 \cdot \sqrt{4000^2 + 3000^2} = 9650 \text{ В.}$$

Ток во вторичной обмотке трансформатора при заданной нагрузке определяется следующим образом:

$$I_2 = I'_2 \cdot n = 1,93 \cdot 25 = 48,25 \text{ А.}$$

Напряжение на вторичной обмотке трансформатора при заданной нагрузке определяется по формуле

$$U_2 = I_2 \cdot Z_н = 48,25 \cdot 8 = 386 \text{ В.}$$

Для подтверждения правильности расчетов проведем моделирование работы трансформатора в среде Multisim, воспользовавшись его Г-образной схемой замещения (см. рисунок 5.1, б).

В режиме холостого хода (рисунок 5.2) получаем $I_0 = 0,25 \text{ А}$ и $P_0 = 129,694 \text{ Вт}$, что соответствует заданию.

В режиме короткого замыкания (рисунок 5.3) при $U_k = 500 \text{ В}$ получаем $I_k = I_{1н} = 2,506 \text{ А}$ и $P_k = 597,695 \text{ Вт}$, что соответствует заданию.

При работе трансформатора под нагрузкой (рисунок 5.4) $Z_н = 8 \text{ Ом}$, $\cos \varphi_2 = 0,8$ ($R'_н = 4000 \text{ Ом}$, $L'_н = 9,55 \text{ Гн}$) получаем $I'_2 = 1,929 \text{ А}$ и $U'_2 = 9647 \text{ В}$, что соответствует расчетным значениям.

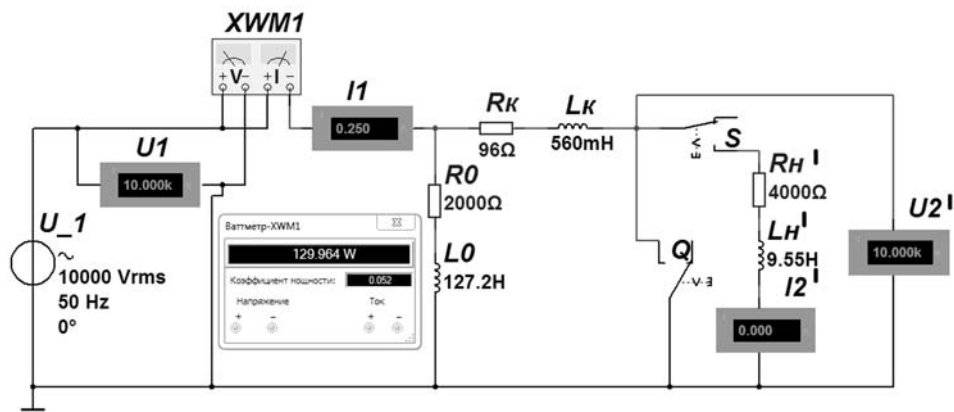


Рисунок 5.2 – Модель трансформатора в режиме холостого хода

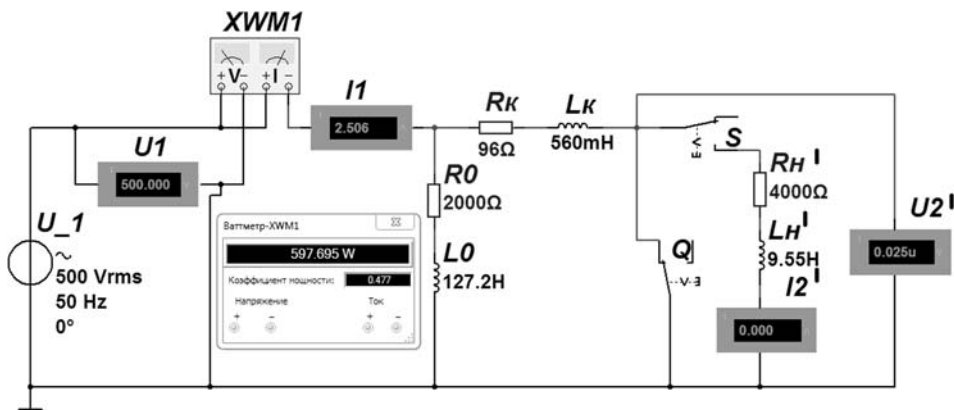


Рисунок 5.3 – Модель трансформатора в режиме короткого замыкания

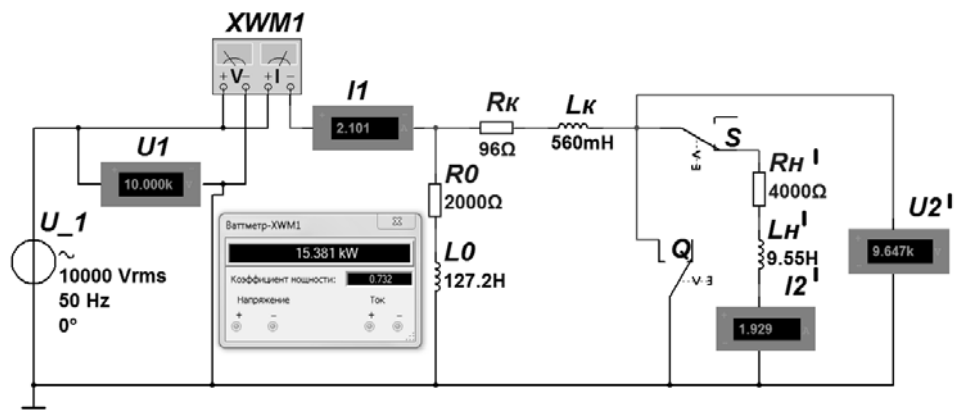


Рисунок 5.4 – Модель трансформатора при работе под нагрузкой

Задача 2. Построить внешнюю характеристику $U_2 = f(\beta)$ трехфазного трансформатора ТМ-100/6.

Исходные данные к задаче:

– номинальная мощность $S_n = 100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$;

– номинальное напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора $U_{1n} = 6 \text{ кВ}$;

- напряжение холостого хода на зажимах вторичной обмотки трансформатора $U_{2н} = 0,36$ кВ;
- напряжение короткого замыкания $U_{к\%} = 6\%$ от $U_{1н}$;
- мощность короткого замыкания $P_{к} = 0,9$ кВт;
- коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi = 0,75$.

Соединение обмоток трансформатора Y/Y («звезда/звезда») представлено на рисунке 5.5.

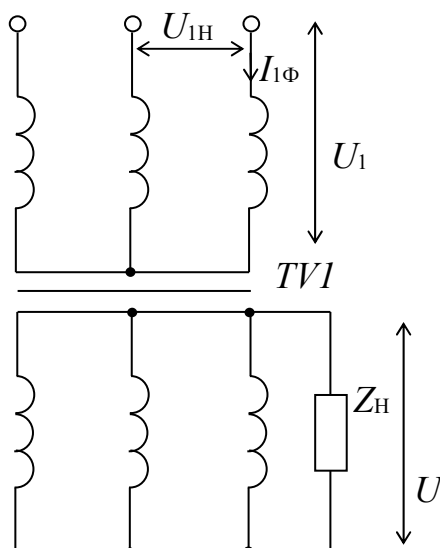


Рисунок 5.5 – Схема трехфазного трансформатора

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:

$$\Delta U_2\% = \beta \cdot (U_{к.а}\% \cdot \cos\varphi_2 + U_{к.р}\% \cdot \sin\varphi_2),$$

где $U_{к.а}\%$, $U_{к.р}\%$ – соответственно активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания.

Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора определяем по формуле

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

Номинальный ток первичной обмотки трансформатора

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

Активное сопротивление короткого замыкания

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

Полное сопротивление короткого замыкания

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

Для соединения «звезда/звезда»

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

$$\cos \varphi_{\kappa} = \frac{R_{\kappa}}{Z_{\kappa}} = \frac{3,24}{21,6} = 0,15;$$

$$U_{\kappa.a} \% = U_{\kappa} \% \cdot \cos \varphi_{\kappa} = 6 \cdot 0,15 = 0,9 \%;$$

$$U_{\kappa.p} \% = \sqrt{(U_{\kappa} \%)^2 - (U_{\kappa.a} \%)^2} = \sqrt{6^2 - 0,9^2} = 5,932 \%.$$

Для $\beta = 0$ (рисунок 5.6, точка 1)

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

Для $\beta = 1$ (рисунок 5.6, точка 2)

$$\Delta U_2 \% = \beta \cdot (U_{\kappa.a} \% \cdot \cos \varphi_2 + U_{\kappa.p} \% \cdot \sin \varphi_2) =$$

$$= 1 \cdot (0,9 \cdot 0,75 + 5,932 \cdot \sqrt{1 - 0,15^2}) = 4,599 \%;$$

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

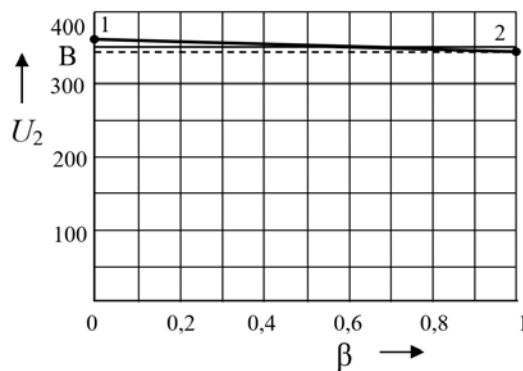


Рисунок 5.6 – Внешняя характеристика трансформатора

Самостоятельная работа

1 По результатам опыта короткого замыкания ($P_k = 800$ Вт, $U_{1k} = 20$ В, $I_{1k} = 100$ А) определить параметры R_k и X_k схемы замещения трансформатора. Нарисовать Г-образную схему замещения трансформатора для данного режима.

2 Определить параметры Г-образной схемы замещения однофазного трансформатора номинальной мощностью 25 кВ·А по данным опытов холостого хода и короткого замыкания: $U_{1h} = 220$ В, $U_{2h} = 127$ В, $I_{1x} = 1,4$ А, $P_0 = 39$ Вт, $U_{1k} = 8,8$ В при $I_{1k} = I_{1h}$; $P_k = 80$ Вт.

6 Практическое занятие № 6. Расчет параметров электрических машин по паспортным данным

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 $I_{п}/I_H = 6,5$; 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 6.1).

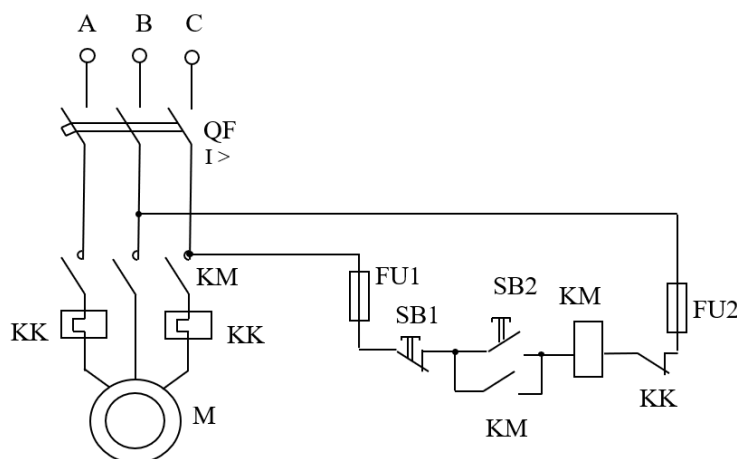


Рисунок 6.1 – Схема пуска асинхронного двигателя

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.

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

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

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

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 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты расчета механической характеристики

S	$M, \text{Н} \cdot \text{м}$
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 6.2).

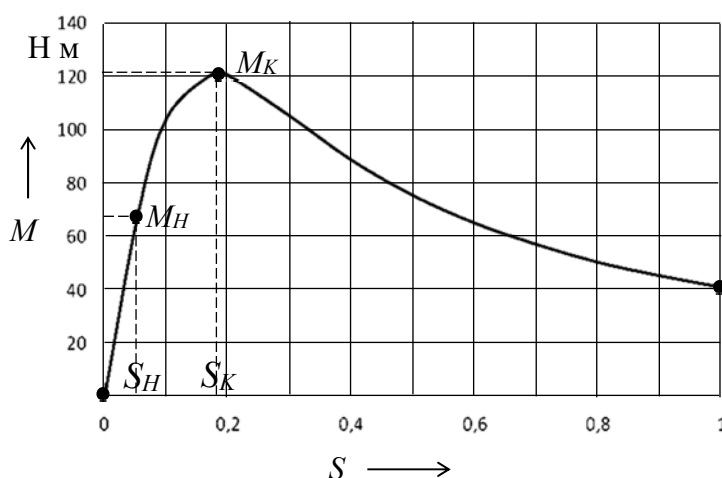


Рисунок 6.2 – Механическая характеристика асинхронного двигателя

Задача 2. Расчет двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

Для двигателя M постоянного тока параллельного возбуждения (рисунок 6.3) построить естественную механическую характеристику $n = f(M)$ и механическую характеристику при пуске с пусковым реостатом $R_{\text{п}}$ с током, превышающим номинальный ток двигателя I_H в 2 раза.

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

Решение

Номинальная мощность, потребляемая двигателем из сети,

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

Номинальный ток, потребляемый двигателем из сети,

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

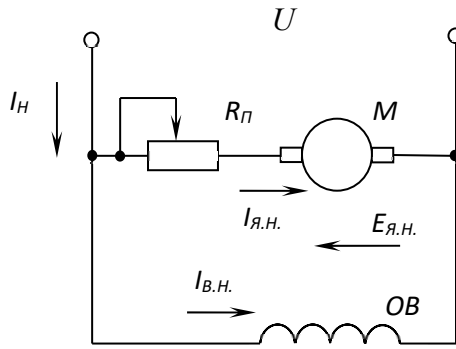


Рисунок 6.3 – Схема включения двигателя параллельного возбуждения

Ток в обмотке якоря в номинальном режиме работы (по первому закону Кирхгофа) (см. рисунок 6.3)

$$I_{я.н} = I_H - I_{в.н} = I_H - U_H / R_B = 642,3 - 220 / 43,2 = 637,2 \text{ А.}$$

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

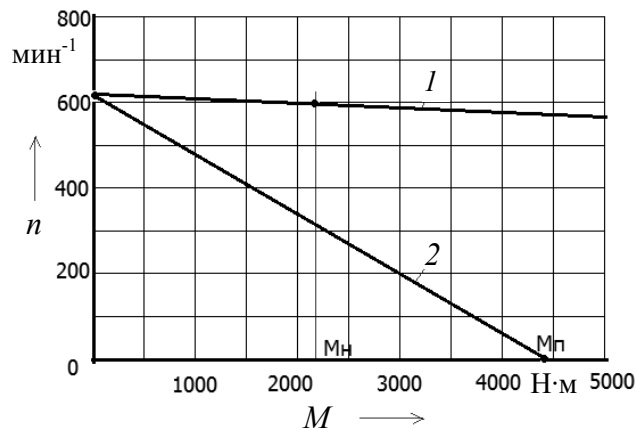
$$R_{\pi} = \frac{U_H}{I_{я.п}} - R_{я} = \frac{220}{1279,5} - 0,00725 = 0,165 \text{ Ом.}$$

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

$$\frac{M_{\pi}}{M_H} = \frac{C_M \cdot I_{я.п} \cdot \Phi}{C_M \cdot I_{я.н} \cdot \Phi} = \frac{I_{я.п}}{I_{я.н}};$$

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

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 $n = 0$ ($M = M_{\Pi}$). Механические характеристики двигателя представлены на рисунке 6.4.



1 – естественная; 2 – искусственная при пуске

Рисунок 6.4 – Механические характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

7 Практическое занятие № 7. Расчет электронных устройств на основе полупроводниковых приборов

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 7.1.

Ток нагрузки

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

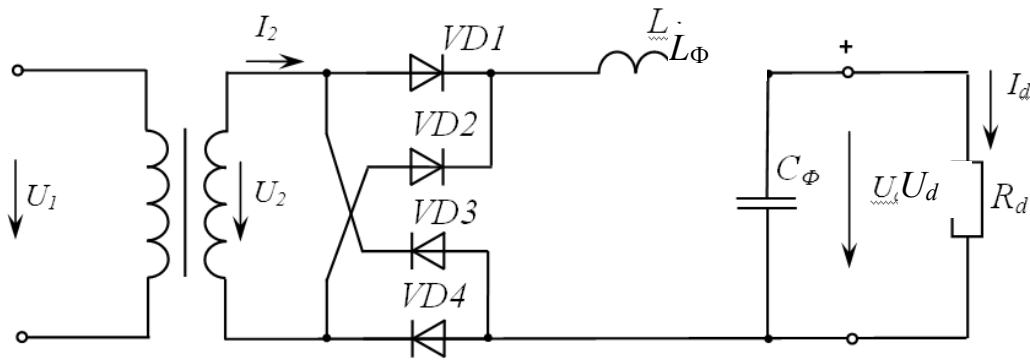


Рисунок 7.1 – Схема однофазного мостового выпрямителя с индуктивно-емкостным LC-фильтром

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

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

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

Модель однофазного неуправляемого мостового выпрямителя с фильтром приведена на рисунке 7.2.

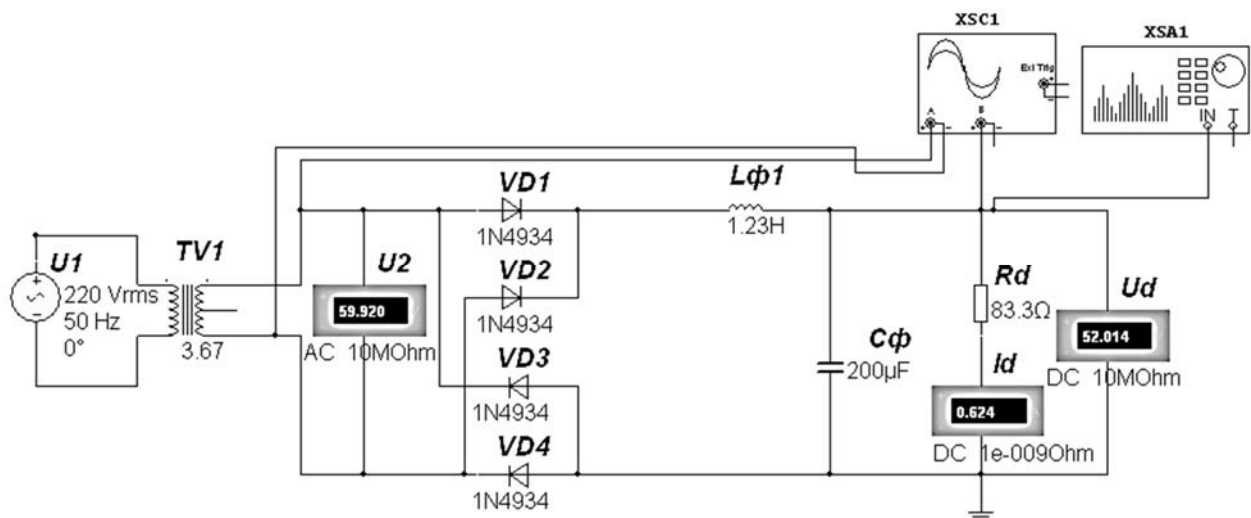


Рисунок 7.2 – Модель мостового выпрямителя с индуктивно-емкостным фильтром

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 7.3.

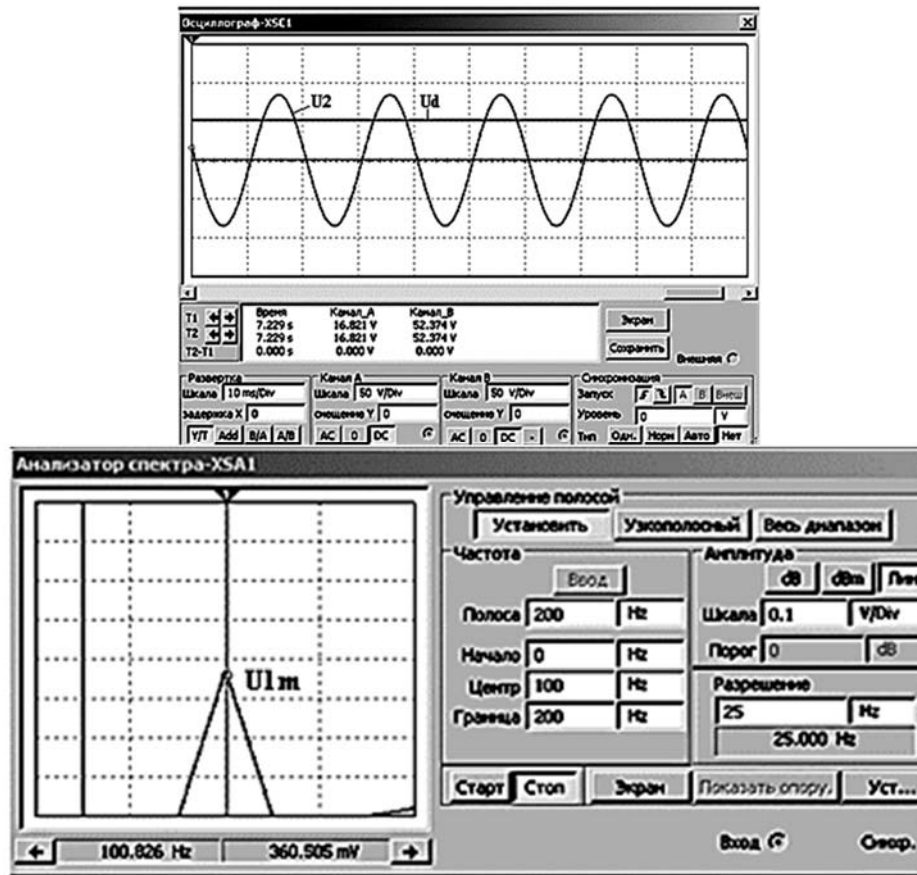


Рисунок 7.3 – Осциллограммы напряжения вторичной обмотки трансформатора U_2 , выпрямленного напряжения U_d и значение первой гармоники U_{1m} выпрямленного напряжения

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 7.3).

Задача 2. Расчет параметрического стабилизатора напряжения. Разработать схему, выполнить расчет и выбор элементов параметрического стабилизатора напряжения для обеспечения заданного напряжения на нагрузке U_n . Необходимо определить величину балластного сопротивления R_b , 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 7.4.

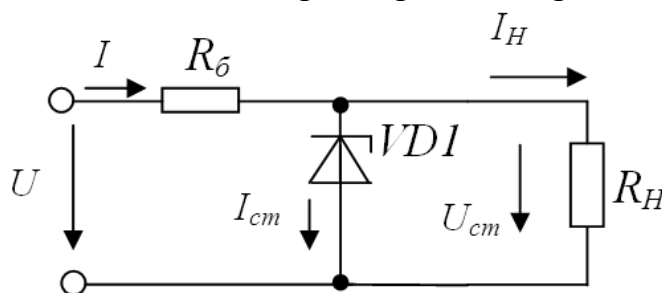


Рисунок 7.4 – Схема параметрического стабилизатора напряжения

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:

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

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

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

Модель параметрического стабилизатора напряжения в среде Multisim приведена на рисунке 7.5. Необходимо привести результаты моделирования при минимальном входном напряжении U_{\min} , максимальном входном напряжении U_{\max} .

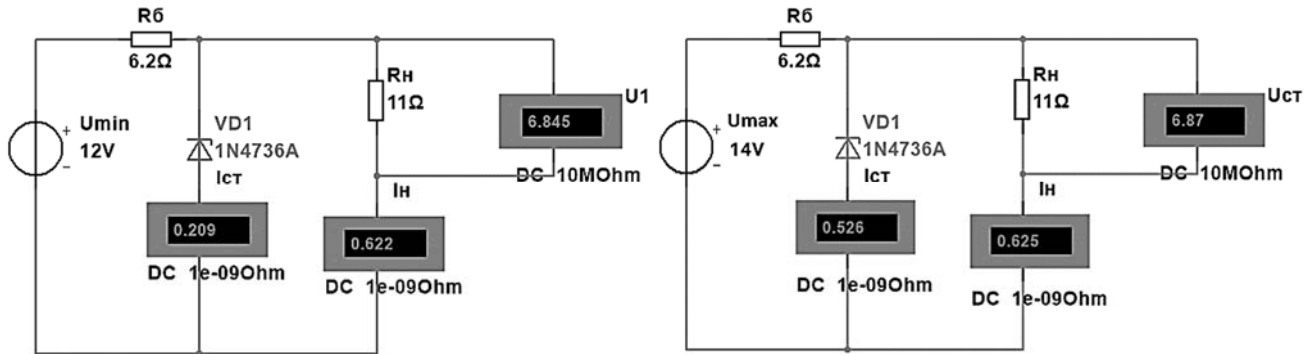


Рисунок 7.5 – Модель параметрического стабилизатора напряжения

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

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

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

8 Практическое занятие № 8. Расчет 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 $U_{ex. \min} = 5 \text{ мВ}$. Определить максимальное входное напряжение синусоидального сигнала $U_{ex. \max}$, 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 8.1 (цепи балансировки нуля – NC и частотной коррекции – FC не используются).

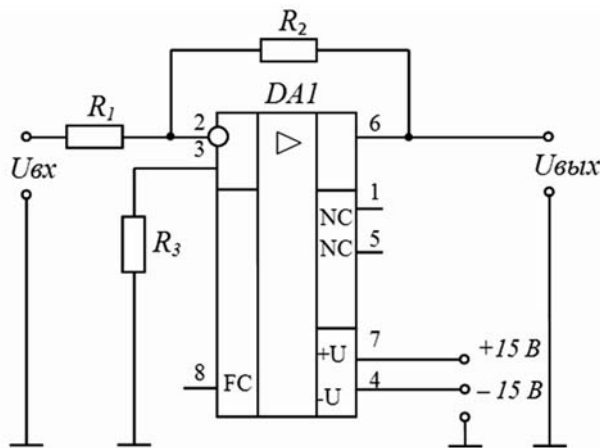


Рисунок 8.1 – Схема инвертирующего усилителя на ОУ КР140УД11

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 E24 $R_1 = 5,1 \text{ кОм}$. 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 8.2. Результаты моделирования при напряжении, не превышающем $U_{\text{вх max}}$, $U_{\text{вх}} = 0,2 \text{ В}$ и $U_{\text{вых}} = 3,92 \text{ В}$.

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 8.3. 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 8.2, а). При входном напряжении $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$, превышающем $U_{\text{вх max}}$, наблюдается ограничение выходного напряжения на уровне $U_{\text{вых max}} = 12 \text{ В}$ (см. рисунок 8.3, б).

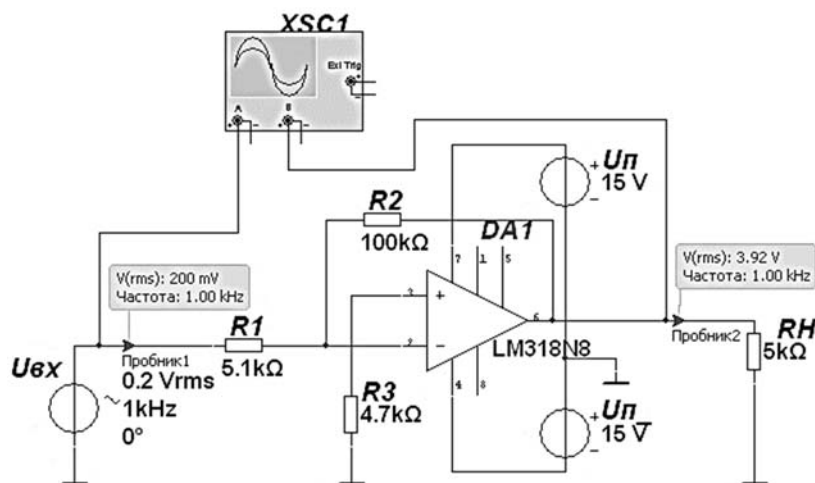


Рисунок 8.2 – Модель инвертирующего усилителя на ОУ

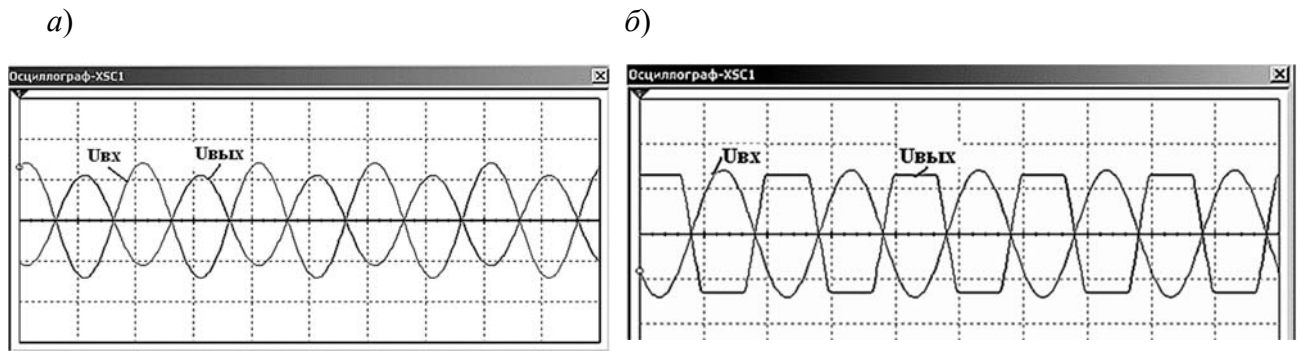


Рисунок 8.3 – Временные диаграммы работы инвертирующего усилителя на ОУ при входном напряжении $U_{вх. \max} = 0,2 \text{ В}$ (а) и $U_{вх. \max} = 1 \text{ В}$ (б)

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_{oc} . Осуществить моделирование ее работы при $U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = 100 \text{ мВ}$. Исходные данные к задаче: операция $6U_1 + U_2 - 2U_3 - 3U_4$; $R_{oc} = 51 \text{ кОм}$; тип операционного усилителя – КР140УД11 (LM318N8).

Решение

Схема параллельного сумматора для реализации заданной функции приведена на рисунке 8.4. Количество неинвертирующих входов соответствует числу положительных, а число инвертирующих – числу отрицательных членов функции.

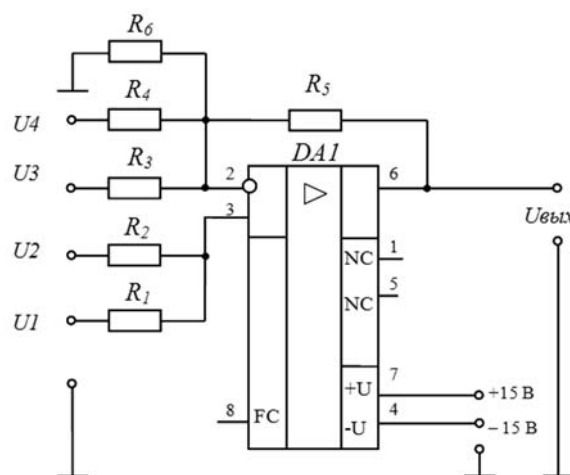


Рисунок 8.4 – Схема параллельного сумматора на ОУ КР140УД11

Выходное напряжение параллельного сумматора

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

где K_{in} , U_{in} , 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 Е24: $R_1 = 8,2 \text{ кОм}$, $R_2 = 51 \text{ кОм}$, $R_3 = 24 \text{ кОм}$, $R_4 = 16 \text{ кОм}$.

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 $U_{блх}$ при отсутствии U_{ex} .

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 $U_{блх} = 6U + U - 2U - 3U = 2U$.

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 8.5. Результаты моделирования схемы при заданных входных напряжениях $U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = 100 \text{ мВ}$ и $U_{\text{вых}} = 191 \text{ мВ} \approx 200 \text{ мВ}$, что соответствует расчету.

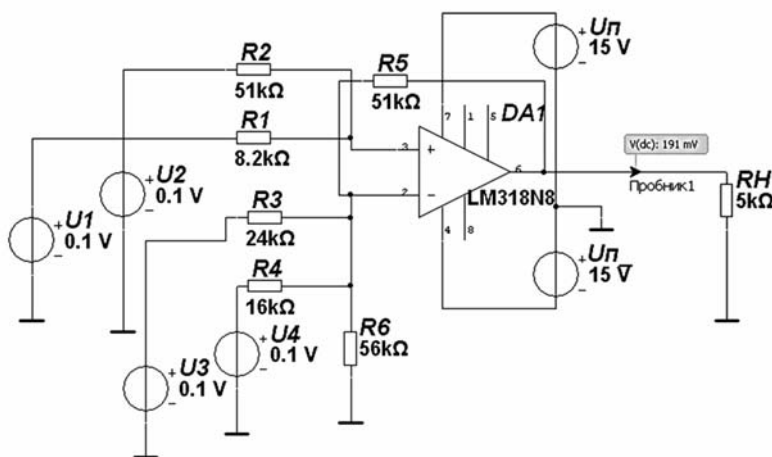


Рисунок 8.5 – Модель параллельного сумматора на ОУ

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.