

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов всех направлений подготовки
очной формы обучения*



Могилев 2024

УДК 537.8
ББК 31.21
Э45

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

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

Составители: канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов;
канд. техн. наук, доц. А. Г. Старовойтов;
ст. преподаватель И. А. Черкасова;
канд. техн. наук, доц. В. Ф. Гоголинский;
канд. техн. наук. Н. В. Герасименко

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доц. С. О. Парашков

Методические рекомендации предназначены к практическим занятиям для
студентов всех направлений подготовки очной формы обучения.

Учебное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	М. М. Дударева

Подписано в печать 28.05.2024. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 2,25. Тираж 36 экз. Заказ № 438.

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

© Белорусско-Российский
университет, 2024

Содержание

Введение.....	4
Практическое занятие № 1. Эквивалентные преобразования схем электрических цепей.....	5
Практическое занятие № 2. Расчет электрических цепей постоянного тока.....	10
Практическое занятие № 3. Расчет электрических цепей переменного синусоидального тока.....	16
Практическое занятие № 4. Расчет трехфазных электрических цепей.....	22
Практическое занятие № 5. Анализ переходных процессов классическим методом.....	27
Практическое занятие № 6. Полупроводниковые диоды и расчет электронных устройств на их основе.....	32
Практическое занятие № 7. Расчет усилителя на биполярном транзисторе...	34
Список литературы.....	36

Введение

Курс «Электротехника и электроника» предполагает подготовку студентов в области электротехники и электроники. В данных методических рекомендациях приводятся задачи с решениями по расчету и анализу электрических и электронных схем.

В течение семестра студенты делают определенное число практических занятий и выполняют аудиторные контрольные работы. Решение задач и выполнение контрольных работ способствует более глубокому усвоению теоретических закономерностей и получению практических навыков по решению инженерных задач в области электротехники и электроники.

Перед решением задач необходимо изучить соответствующие разделы рекомендуемой литературы и настоящих методических рекомендаций по курсу.

Практическое занятие № 1. Эквивалентные преобразования схем электрических цепей

Основные теоретические сведения

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 вытекающие 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 их направления не совпадают.

б 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);
- преобразование треугольника резисторов в эквивалентную звезду и наоборот (рисунок 2).

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):

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

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

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

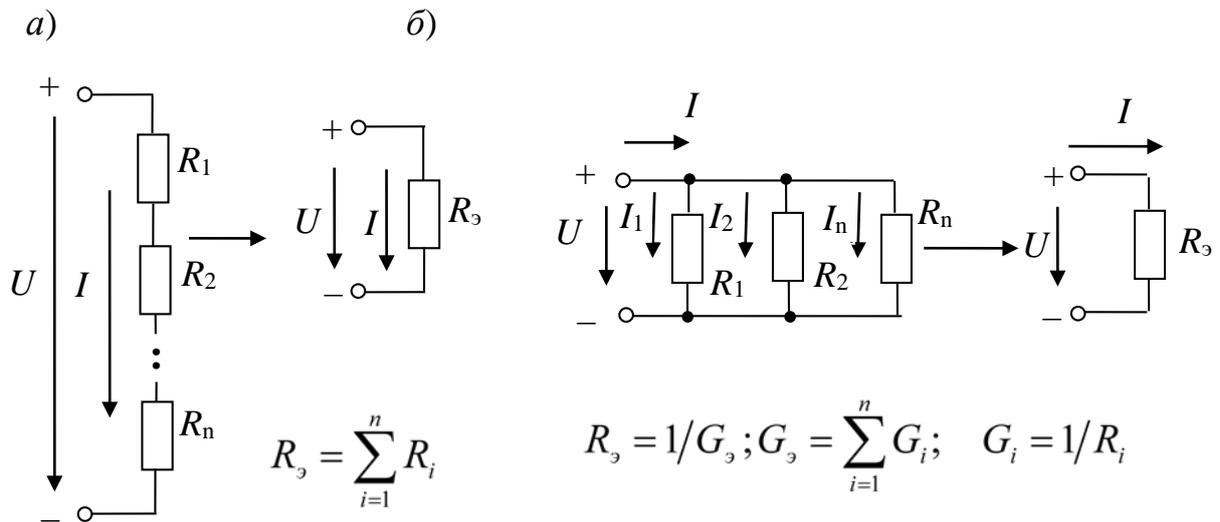


Рисунок 1 – Последовательное и параллельное соединение резисторов

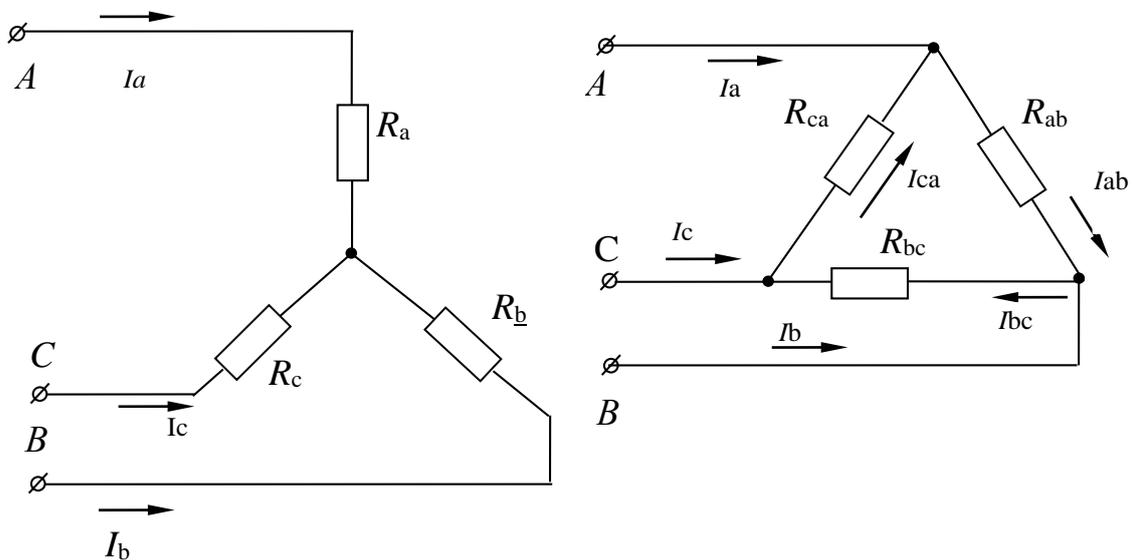


Рисунок 2 – Соединение резисторов звездой и треугольником

Примеры решения задач

Задача. Определить токи и напряжения на отдельных участках схемы (рисунок 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.

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 .

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

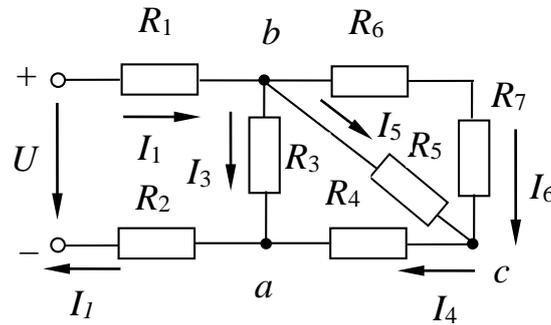


Рисунок 3 – Электрическая цепь постоянного тока

Ток I_1 рассчитаем по закону Ома:

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

Напряжение между точками a и b определим
– по закону Ома

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

– по второму закону Кирхгофа

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

Токи

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

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

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

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 4) соответствуют расчётным значениям.

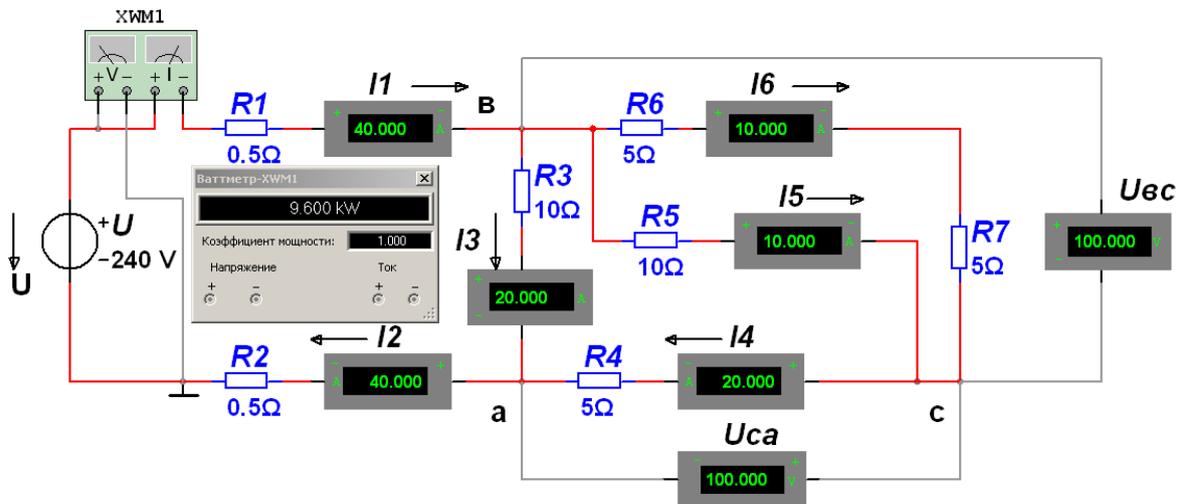


Рисунок 4 – Модель электрической цепи постоянного тока

Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачи, предложенные преподавателем, а также следующую задачу.

Задача. Для цепи (рисунок 5) известны значения R_0 (внутреннее сопротивление источника), $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ и ток I_2 . Определить ЭДС источника, а также значения токов в ветвях.

$R_0 = 0,1 \text{ Ом}$, $R_1 = 0,7 \text{ Ом}$, $R_2 = 40 \text{ Ом}$, $R_3 = 8 \text{ Ом}$, $R_4 = 4 \text{ Ом}$, $R_5 = 2,4 \text{ Ом}$,
 $R_6 = 4 \text{ Ом}$, $I_2 = 0,25 \text{ А}$.

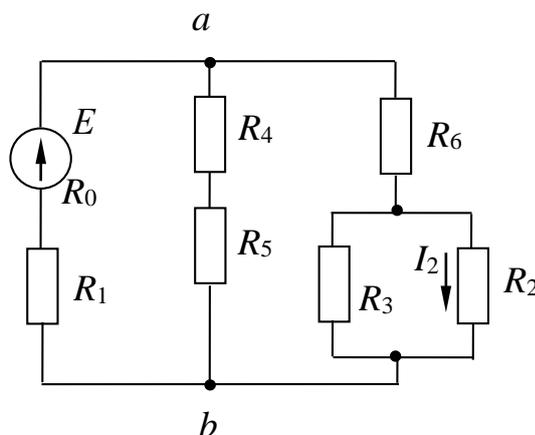


Рисунок 5 – Электрическая цепь

Контрольные вопросы

- 1 Дать информацию о способах определения эквивалентного сопротивления электрической цепи.
- 2 Записать закон Ома для пассивного и активного участков электрической цепи.
- 3 Сформулировать законы Кирхгофа.

Практическое занятие № 2. Расчет электрических цепей постоянного тока

Основные теоретические сведения

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:

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

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

Решая систему полученных уравнений, определяют 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, определяют 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 6) методом непосредственного применения законов Кирхгофа и методом контурных токов.

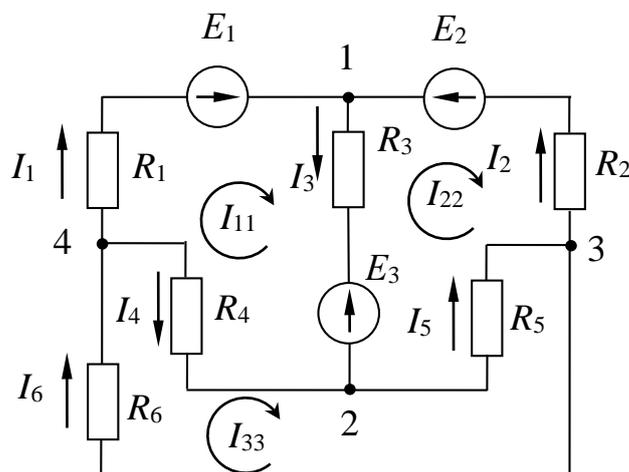


Рисунок 6 – Электрическая цепь к примеру расчета методом непосредственного применения законов Кирхгофа и методом контурных токов

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

В сумме получаем шесть уравнений в системе:

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

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

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

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

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

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

Метод контурных токов.

$$\text{Количество уравнений } n - (k - 1) = 6 - (4 - 1) = 3.$$

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

Система уравнений

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

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

Найдем значения токов в ветвях:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{11}; & I_4 &= I_{33} - I_{11}; \\ I_2 &= -I_{22}; & I_5 &= I_{33} - I_{22}; \\ I_3 &= I_{11} - I_{22}; & I_6 &= I_{33}. \end{aligned}$$

Проверим 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 составим 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.

Величину U_{AB} найдем 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 (рисунок 7), используя метод двух узлов.

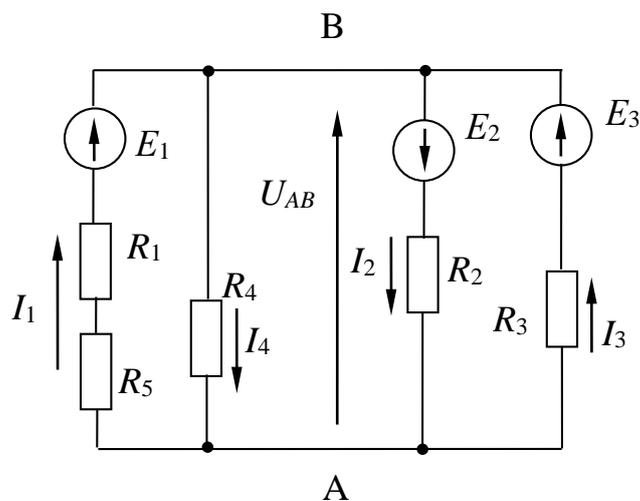


Рисунок 7 – Электрическая цепь к примеру расчёта методом двух узлов

По закону Ома токи в ветвях

$$I_1 = (E_1 + U_{AB}) \cdot G_1; \quad I_3 = (E_3 + U_{AB}) \cdot G_3;$$

$$I_2 = (E_2 - U_{AB}) \cdot G_2; \quad I_4 = -U_{AB} \cdot G_4,$$

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.

Данный метод целесообразно использовать, 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.

Ток в i -й ветви рассчитаем по формуле

$$I_1 = \frac{U_{xx}}{R_{кз} + R_1},$$

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 найдем путем расчета цепи при отключенной нагрузке любым из методов расчета.

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

Задача 3. Определить значение тока I_5 в схеме на рисунке 8, а.

Рассчитаем напряжение холостого хода U_{xx} (рисунок 8, б), используя второй закон Кирхгофа:

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

Токи в ветвях (см. рисунок 8, б):

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

Определяем значение сопротивления $R_{кз}$ (рисунок 8, в):

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

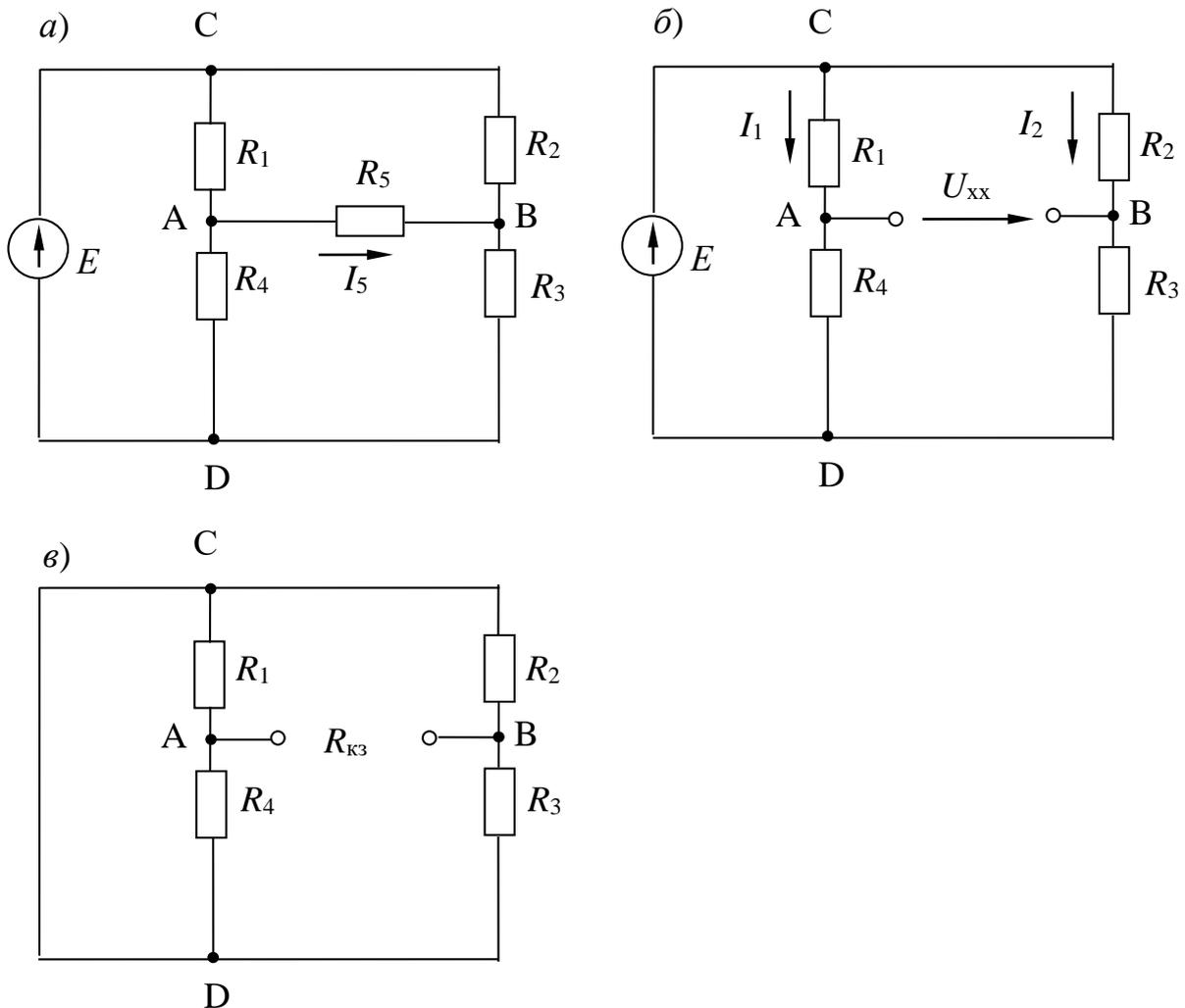


Рисунок 8 – Электрические схемы к примеру расчета методом эквивалентного генератора

Найдем значение тока I_5 :

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

Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачи, предложенные преподавателем, а также следующую задачу.

Задача. Для разветвленной электрической цепи (см. рисунок 8, а), используя законы Кирхгофа, методом контурных токов и методом эквивалентного генератора, определить токи во всех ветвях.

$E_1 = 24$ В; $E_2 = 48$ В; $E_3 = 96$ В; $R_1 = 16$ Ом; $R_2 = 8$ Ом; $R_3 = 16$ Ом; $R_4 = 8$ Ом.

Контрольные вопросы

- 1 Составить план расчета сложных электрических цепей методом контурных токов.
- 2 Составить план расчета сложных электрических цепей методом непосредственного применения законов Кирхгофа.
- 3 Составить план расчета сложных электрических цепей методом двух узлов.
- 4 Составить план расчета сложных электрических цепей методом эквивалентного генератора напряжений.

Практическое занятие № 3. Расчет электрических цепей переменного синусоидального тока

Основные теоретические сведения

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 $\dot{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j(\pm\varphi)}$,

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

Закон Ома в символической форме имеет вид:

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

где \underline{Z} – комплексное значение полного сопротивления цепи (импеданс).

При последовательном соединении элементов

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

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 9). Определить ток I , угол сдвига по фазе φ и мощность на входе цепи.

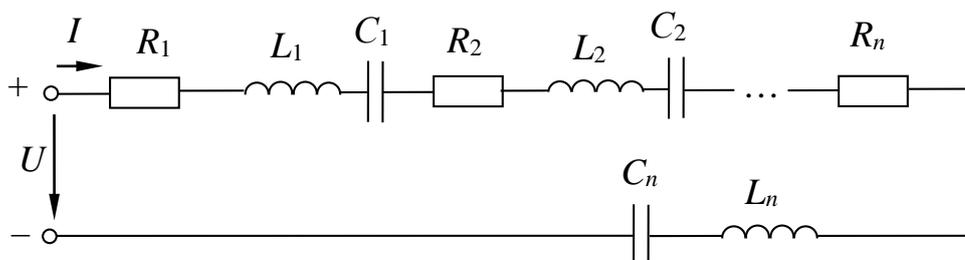


Рисунок 9 – Электрическая цепь с последовательным соединением элементов R, L и C

Решение

Комплекс действующего значения тока в цепи

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

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

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

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

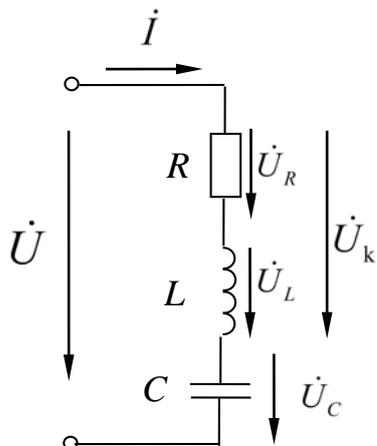
где \dot{I}^* – сопряженный комплекс тока.

Задача 2. Катушка с активным сопротивлением $R = 6$ Ом и индуктивностью $L = 25,5$ мГн соединена последовательно с конденсатором, емкость которого $C = 1590$ мкФ.

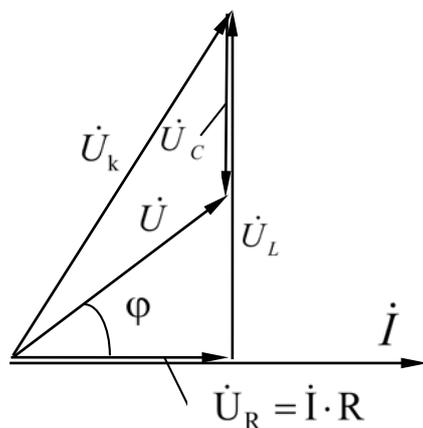
Определить ток, напряжения на катушке и конденсаторе, мощности катушки, конденсатора и всей цепи. Построить векторную диаграмму напряжений, если

напряжение на входе схемы (рисунок 10, а) $U = 127$ В и частота $f = 50$ Гц. Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

а)



б)



$$\dot{U}_C = -j\dot{I}X_C \quad \dot{U}_L = j\dot{I}X_L$$

Рисунок 10 – 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}^* – сопряженное комплексное значение тока.

Следовательно, активная мощность цепи составляет $P = 1338$ 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 10, б.

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

В качестве источника питания для цепи на рисунке 11 можно использовать источник *AC Power* из группы *Sources*, установив действующее значение напряжения *RMS* и частоту *F*. Измерительные приборы перевести в режим *AC*. При этом они осуществляют индикацию действующих значений токов и напряжений. Результаты моделирования соответствуют расчётным значениям с небольшой погрешностью.

Измерение мощностей P , S и Q можно провести с помощью ваттметра, который в Multisim, кроме активной мощности, измеряет коэффициент

$$\text{мощности } \cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

В соответствии с показаниями ваттметра можно записать:

$$P = 1343 \text{ Вт}; \cos \varphi = 0,707, \varphi = 45^\circ \text{ (напряжение опережает ток по фазе);}$$

$S = P/\cos \varphi \text{ В}\cdot\text{А}, Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 1343 \text{ вар}$, что с небольшой погрешностью соответствует расчётным значениям.

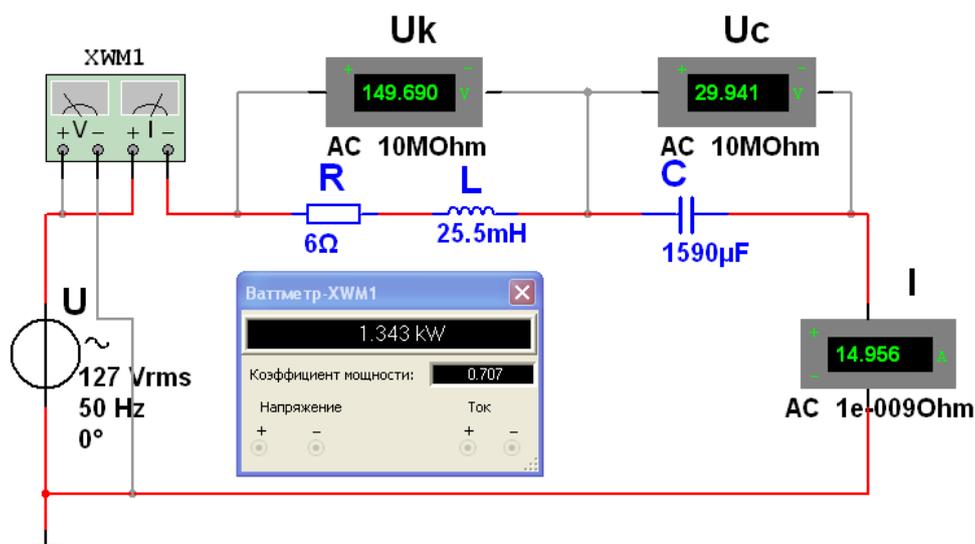


Рисунок 11 – Модель электрической цепи переменного тока в среде Multisim

Задача 3. Определить токи в электрической цепи (рисунок 12), если напряжение на входе $U_{ab} = 120$ В, а значение 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.

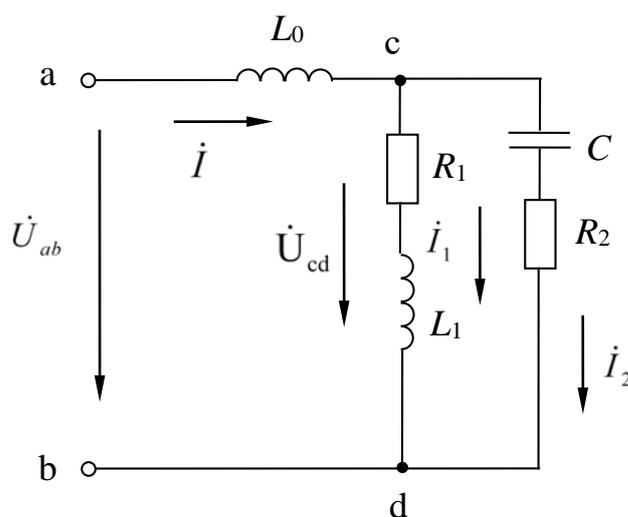


Рисунок 12 – Электрическая цепь переменного тока со смешанным соединением элементов

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

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

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:

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

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

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 $P = 1846$ Вт; $Q = 970$ вар.

Модель электрической цепи в среде Multisim приведена на рисунке 13. Действующие значения токов I_1 , I_2 , I_3 , напряжения U_{cd} и активной мощности цепи P с небольшой погрешностью соответствуют расчётным.

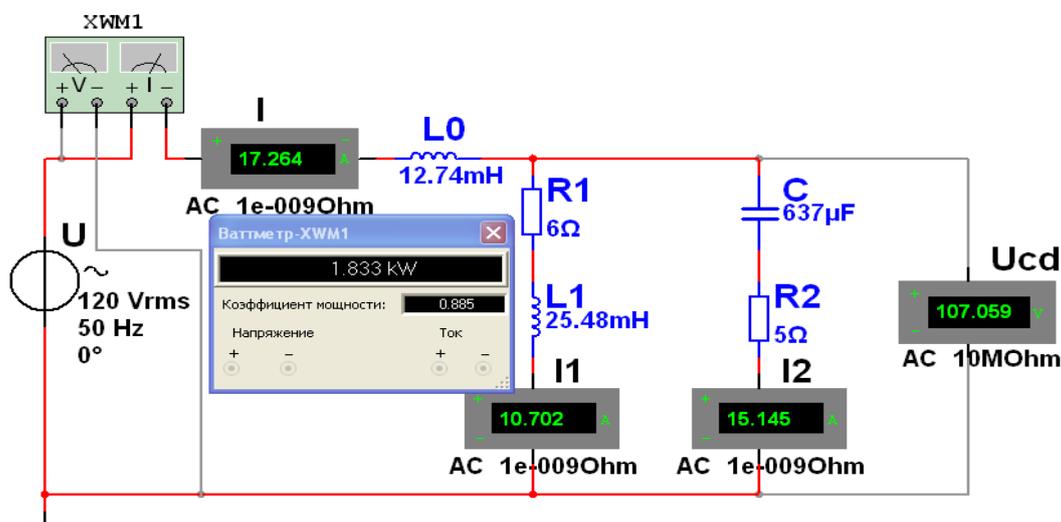


Рисунок 13 – Модель электрической цепи переменного тока с параллельным соединением элементов

Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачи, предложенные преподавателем, а также следующую задачу.

Задача. В цепь переменного тока частотой 50 Гц (рисунок 14) включена катушка, обладающая активным сопротивлением R и индуктивным сопротивлением X_L . К цепи приложено напряжение $u = U_m \sin \omega t$. Определить показания измерительных приборов, а также активную, реактивную и полную мощности цепи. Построить треугольник сопротивлений и векторную диаграмму. $R = 3$ Ом; $X_L = 4$ Ом; $U_m = 282$ В. Осуществить моделирование работы схемы в среде Multisim.

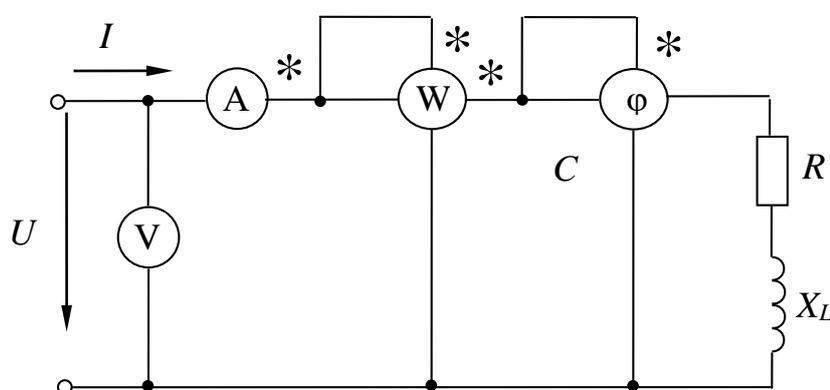


Рисунок 14 – Электрическая цепь с катушкой переменного тока

Контрольные вопросы

- 1 Записать формулы комплексного сопротивления участка цепи при последовательном соединении элементов R, L, C .
- 2 Дать формулировку и записать закон Ома в комплексной форме для участка цепи с последовательным соединением элементов R, L, C .
- 3 Записать комплексное сопротивление двух параллельно соединенных ветвей.
- 4 Записать формулы для расчета комплексной мощности.

Практическое занятие № 4. Расчет трехфазных электрических цепей

Основные теоретические сведения

Фазные напряжения для схемы (рисунок 15, 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 $U_A = U_B = U_C = U_\phi = U_n / \sqrt{3}$.

Для схемы (рисунок 15, б) фазные и линейные напряжения равны:

$$U_n = U_\phi.$$

В комплексной форме

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

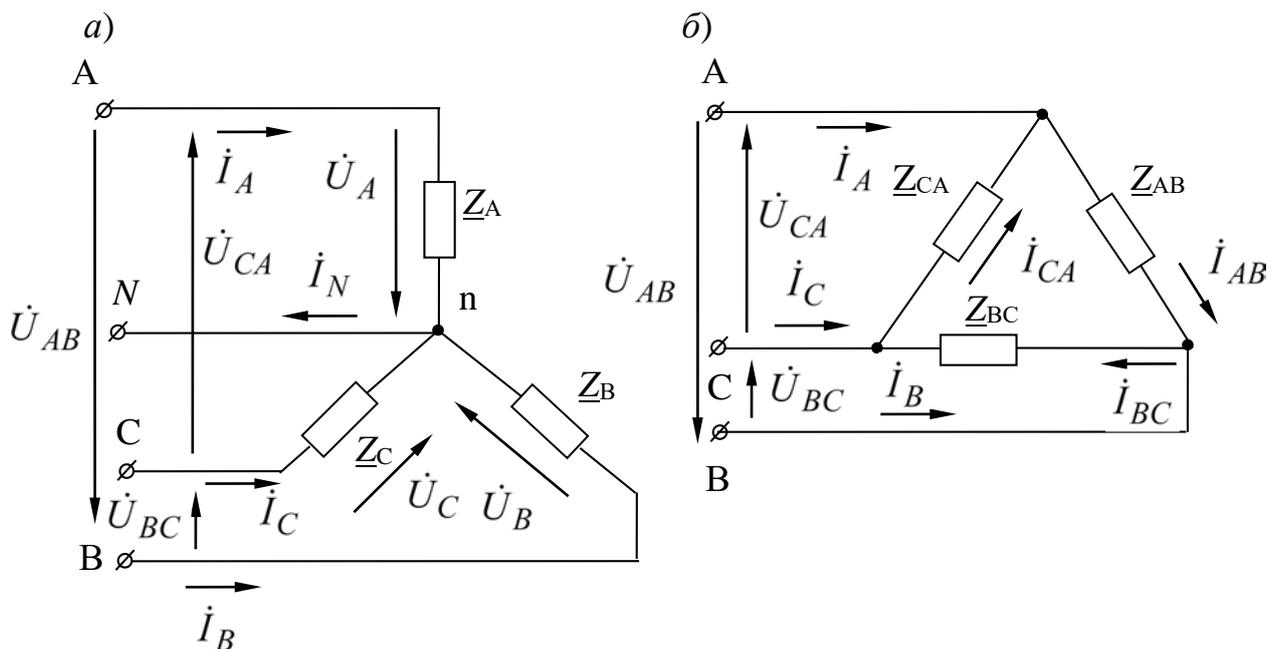


Рисунок 15 – Трёхфазные электрические цепи

Примеры решения задач

Задача 1. К трехфазной линии электропередачи, линейные напряжения которой симметричны: $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 220$ В, присоединены три приемника энергии по схеме треугольник (рисунок 16). 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

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

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

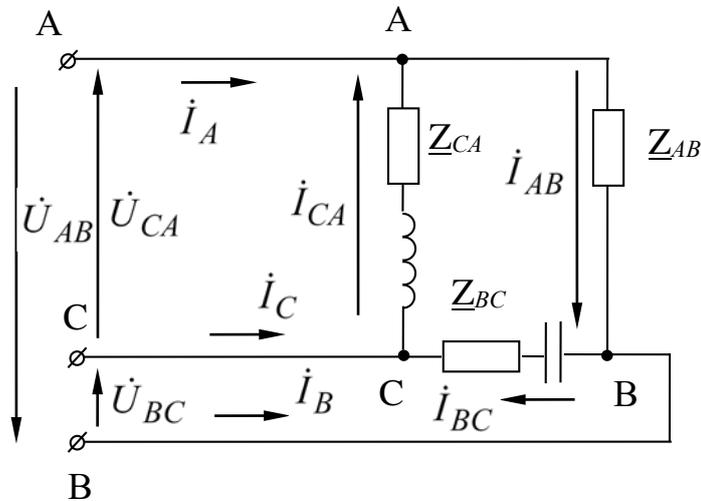


Рисунок 16 – Трехфазная электрическая цепь

На основании закона Ома определим фазные токи:

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

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

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

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

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

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

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

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 17), если линейные напряжения на входе в цепь симметричны: $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 380 \text{ В}$, а нагрузка симметрична: $\underline{Z} = 10 + j10 \text{ Ом}$.

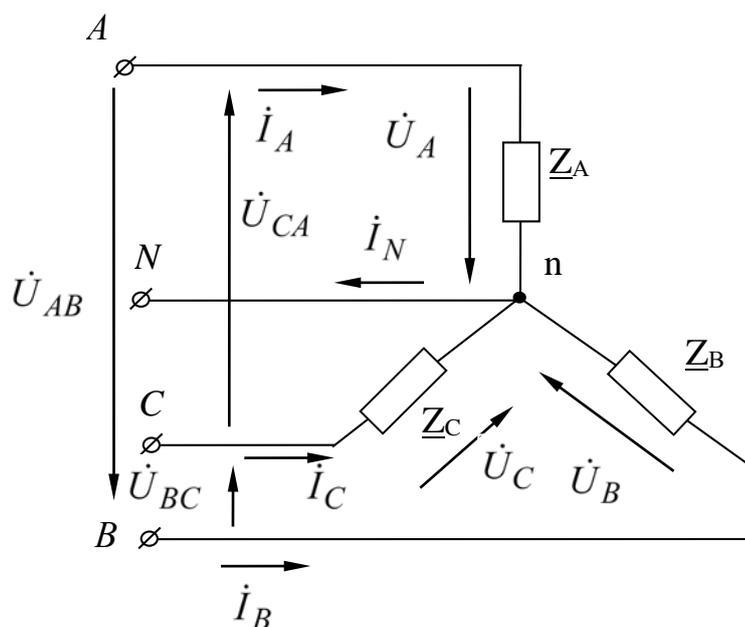


Рисунок 17 – Трехфазная электрическая цепь

Решение

Для соединения звездой фазное напряжение

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В,}$$

тогда комплексные значения фазных напряжений:

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

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

Так как нагрузка симметричная,

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

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

Токи в нагрузке (линейные токи равны фазным):

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

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

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

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.

Проверим правильность решения задачи, осуществив моделирование работы схемы в среде Multisim (рисунок 18).

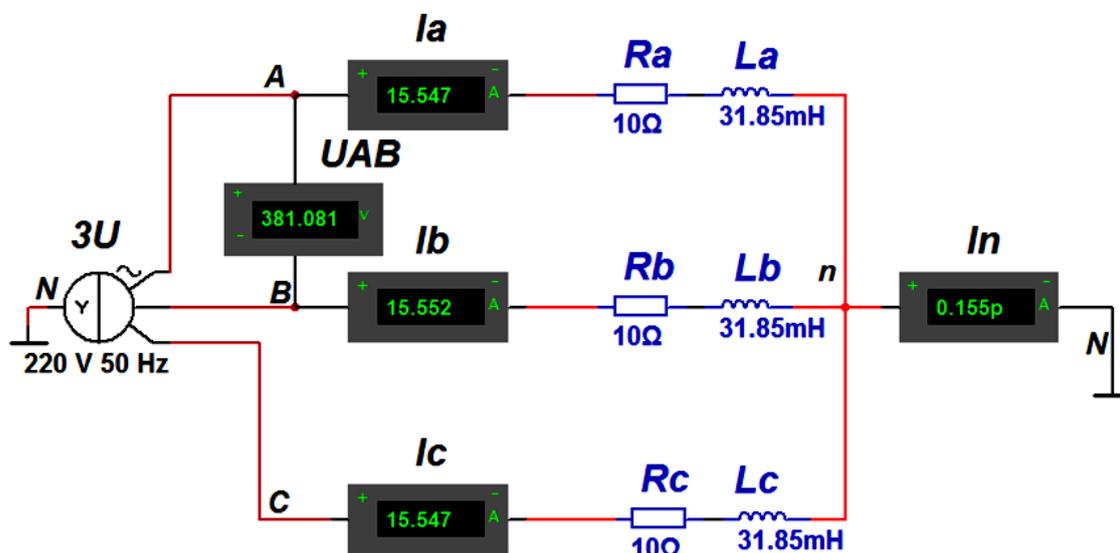


Рисунок 18 – Модель трехфазной электрической цепи переменного тока

Самостоятельная работа

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

Контрольные вопросы

- 1 Записать комплексные выражения для фазных и линейных напряжений при соединении нагрузок звездой и треугольником.
- 2 Объяснить назначение нейтрального провода.
- 3 Записать формулу, определяющую смещение нейтрали и фазные напряжения приемника, фазы которого соединены звездой без нейтрального провода.

Практическое занятие № 5. Анализ переходных процессов классическим методом

Основные теоретические сведения

Любое изменение состояния электрической цепи (включение, отключение, изменение параметров цепи и т. д.) называется коммутацией. Считается, что процесс коммутации осуществляется мгновенно. Энергетическое же состояние цепи не может измениться мгновенно. Возникновение переходных процессов объясняется наличием в цепях индуктивностей и емкостей. При коммутациях энергия электрического и магнитного полей не могут изменяться мгновенно. Отсюда вытекают два следствия.

Первый закон коммутации: ток в индуктивности в момент коммутации не может изменяться мгновенно.

$$i_L(0_-) = i_L(0_+).$$

Второй закон коммутации: напряжение на емкости в момент коммутации не может изменяться мгновенно.

$$u_C(0_-) = u_C(0_+).$$

Классический метод расчета переходных процессов основан на непосредственном интегрировании дифференциальных уравнений, составленных для цепи образовавшейся после коммутации.

Рассмотрим методику расчета переходных процессов на конкретных примерах.

Примеры решения задач

Задача 1. Найти закон изменения тока i и напряжения u_C в цепи, изображенной на рисунке 19 после замыкания ключа, если $U = 220$ В, $R = 10$ Ом, $C = 100$ мкФ. Определить постоянную времени τ и время зарядки конденсатора до напряжения 50 В.

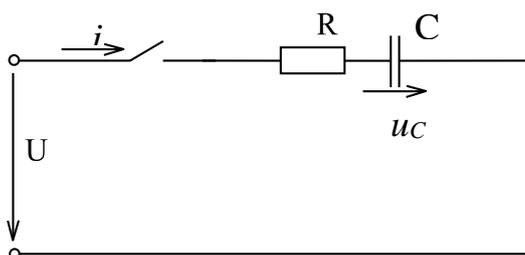


Рисунок 19 – Схема включения конденсатора в цепь постоянного тока

Решение

После коммутации уравнение электрического состояния цепи

$$U = Ri + RC \frac{du_C}{dt} + u_C.$$

Решением его является сумма принужденной $u_{Cпр}$ и свободной $u_{Cсв}$ составляющих:

$$u_C = u_{Cпр} + u_{Cсв}.$$

Принужденную составляющую находим из расчета цепи в установившемся режиме, т. е. при $t = \infty$:

$$u_{Cпр} = U = 220 \text{ В},$$

свободную составляющую – из общего решения однородного уравнения

$$0 = RC \frac{du_{Cсв}}{dt} + u_{Cсв}; u_{Cсв} = Ae^{pt},$$

где $p = -1/(RC)$ – показатель затухания (корень характеристического уравнения).

Напряжение конденсатора в переходном режиме

$$u_C = U + Ae^{-t/(RC)}.$$

Постоянную интегрирования A находим из начальных условий с помощью второго закона коммутации при $t = 0$:

$$u_C(0) = 0 = U + A,$$

откуда $A = -U$. Тогда напряжение на конденсаторе

$$u_C = U \left(1 - e^{-t/(RC)}\right) = 220 \left(1 - e^{-t/(0,001)}\right) \text{ В}.$$

Ток в цепи

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{U}{R} e^{-t/(RC)} = 22 e^{-t/(0,001)} \text{ А}.$$

Постоянная времени

$$\tau = -\frac{1}{p} = RC = 10^{-3} \text{ с}.$$

Диаграммы $u_C(t)$ и $i(t)$ приведены на рисунке 20.

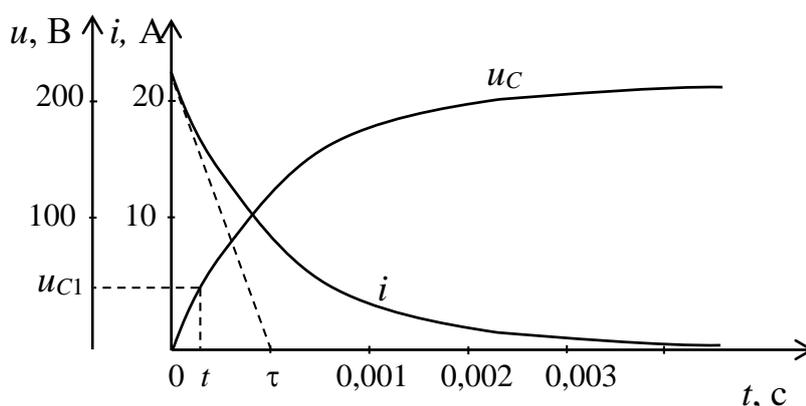


Рисунок 20 – Кривые изменения тока и напряжения

Для определения времени, за которое конденсатор зарядится до напряжения 50 В, воспользуемся общим выражением для u_C :

$$50 = 220(1 - e^{-t/(0,001)}) \text{ В,}$$

откуда

$$e^{-1000t_1} = 0,772; 1000t_1 = \ln 0,772;$$

$$t_1 = \frac{\ln 0,772}{-1000} = \frac{-0,258}{-1000} = 258 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Проверим правильность решения задачи, осуществив моделирование работы схемы в среде Multisim (рисунок 21).

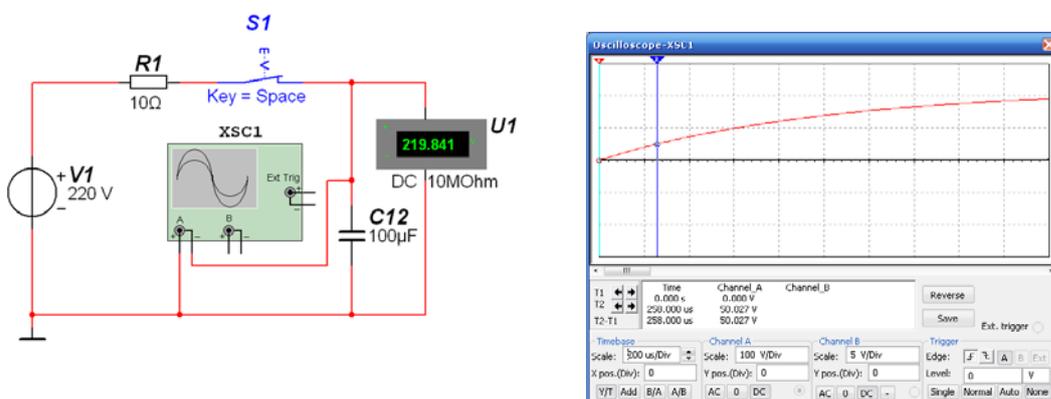


Рисунок 21 – Модель процесса зарядки конденсатора и осциллограмма в среде Multisim

Задача 2. Найти закон изменения тока i в цепи, схема которой изображена на рисунке 22 после замыкания ключа. Цепь содержит источник ЭДС $e(t)$. До коммутации в цепи действует установившийся режим. $R_1 = R_2 = 2$ Ом, $X_L = 3$ Ом, $e(t) = 127\sin(\omega t - 50^\circ)$ В, $\omega = 314$ рад/с.

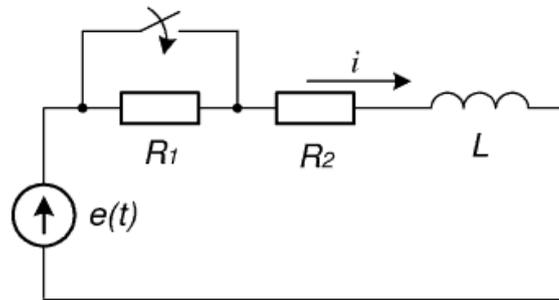


Рисунок 22 – Схема включения R и L в цепь переменного тока

Решение

Перейдем от мгновенного значения ЭДС к его комплексному амплитудному значению.

Найдем комплексное амплитудное значение ЭДС.

$$\dot{E}_m = 127e^{-j50^\circ} \text{ В.}$$

Комплексная амплитуда тока в цепи до коммутации:

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{E}_m}{R_1 + R_2 + jX_L} = \frac{127e^{-j50^\circ}}{2 + 2 + j3} = \frac{127e^{-j50^\circ}}{5e^{j36,87^\circ}} = 25,4e^{-j86,87^\circ} \text{ А.}$$

Мгновенное значение тока до коммутации

$$i(t) = 25,4\sin(\omega t - 86,87^\circ) \text{ А.}$$

В момент до коммутации ($t = 0_-$)

$$i(0_-) = 25,4\sin(-86,87^\circ) = -25,36 \text{ А.}$$

Принужденный ток после коммутации

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{E}_m}{R_2 + jX_L} = \frac{127e^{-j50^\circ}}{2 + j3} = \frac{127e^{-j50^\circ}}{3,606e^{j56,31^\circ}} = 35,22e^{-j106,31^\circ} \text{ А.}$$

Мгновенное значение принужденного тока

$$i_{np}(t) = 35,22\sin(\omega t - 106,31^\circ) \text{ А.}$$

В момент после коммутации ($t = 0_+$)

$$i_{np}(0_+) = 35,22 \sin(-106,31^\circ) = -33,8 \text{ А.}$$

По первому закону коммутации

$$i(0_-) = i(0_+) = -25,36 \text{ А.}$$

НО Т. К. $i(0_+) = i_{np}(0_+) + i_{ce}(0_+)$,

$$i_{ce}(0_+) = i(0_+) - i_{np}(0_+) = -25,36 - (-33,8) = 8,44 \text{ А.}$$

Составим характеристическое уравнение и найдем его корни.

$$Z(p) = R_2 + pL = 0;$$

$$p = -\frac{R_2}{L} = -\frac{R_2}{\omega L / \omega} = -\frac{\omega R_2}{X_L} = -\frac{314 \cdot 2}{3} = -209,3 \text{ с}^{-1}.$$

Используя значения тока в цепи до коммутации $i(t)$ и мгновенное значение тока принужденного после коммутации $i_{np}(t)$, $i_{ce}(0_+)$ получим

$$i(t) = i_{np}(t) + i_{ce}(t) = 35,22 \sin(\omega t - 106,31^\circ) + 8,44 e^{-209,3t} \text{ А.}$$

Строим график изменения искомой величины тока в цепи от функции времени (рисунок 23).

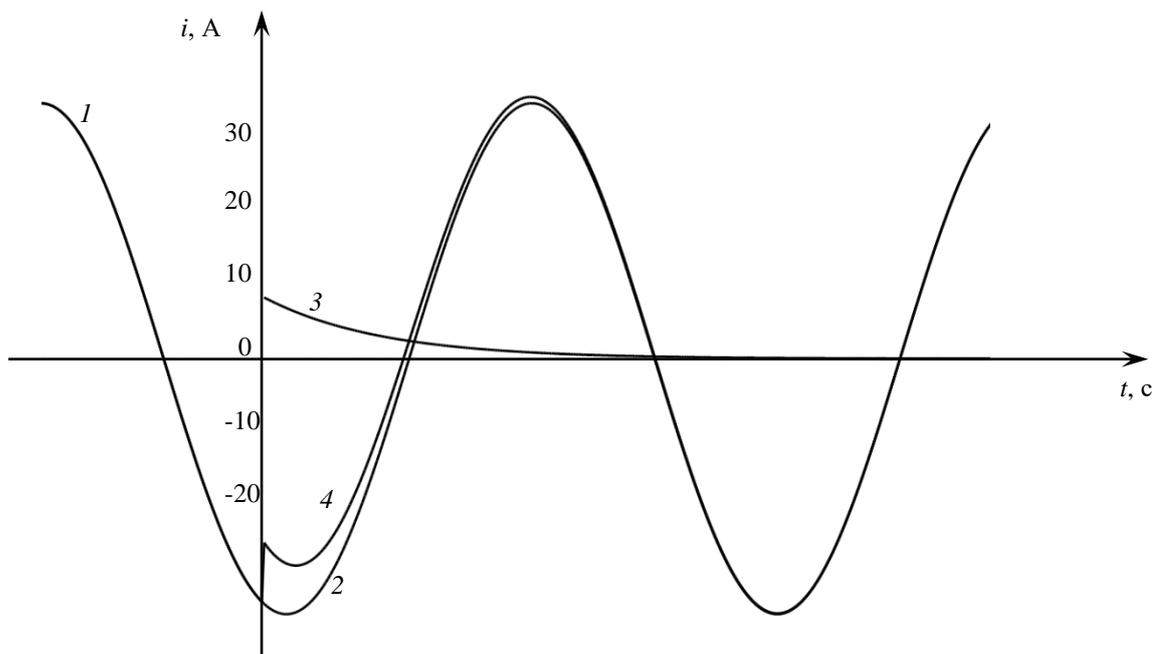


Рисунок 23 – Кривые изменения тока

На графике кривые: 1 – ток в цепи до коммутации; 2 – принужденный ток после коммутации; 3 – свободная составляющая тока; 4 – полный ток, как результат суперпозиции кривых 2 и 3.

Самостоятельная работа

Решить самостоятельно задачи, предложенные преподавателем.

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение установившегося и переходного процессов в электрической цепи.
- 2 Дайте определение постоянной времени электрической цепи.
- 3 Поясните, в течение какого промежутка времени практически заканчивается переходной процесс в электрической цепи.
- 4 Укажите, от каких параметров зависит постоянная времени неразветвленных RL - и RC -цепей.
- 5 Назовите устройства, в которых используются явления, возникающие при переходных процессах в электрических цепях.
- 6 Дайте определения законов коммутации.

Практическое занятие № 6. Полупроводниковые диоды и расчет электронных устройств на их основе

Примеры решения задач

Применение графического метода к расчету нелинейных электрических цепей рассмотрим на следующих задачах.

Задача 1. Для схемы (рисунок 24, а) дано: $R = 20$ Ом, характеристика нелинейного элемента представлена на рисунке 24, б. Определить напряжение U , при котором $U_R = U_{НЭ}$.

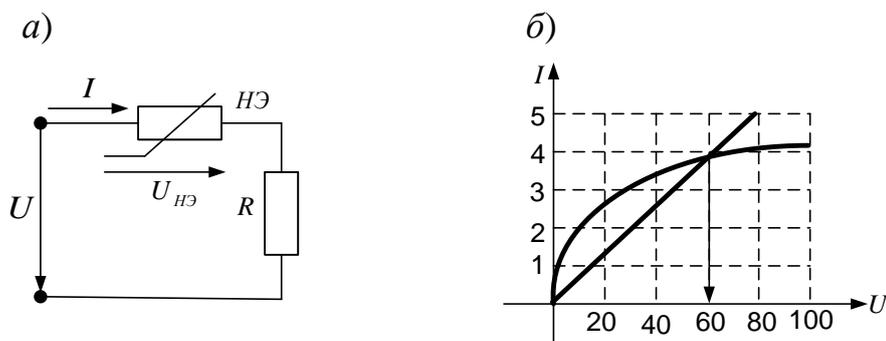


Рисунок 24 – Исходные данные к задаче 1

Решение

1 Построим характеристику $U_R(I) = I \cdot R$.

2 В точке пересечения вольт-амперных характеристик линейного и нелинейного элементов напряжения на этих элементах равны (элементы соединены последовательно, и ток один и тот же):

$$U_R = U_{HЭ} = 60 \text{ В.}$$

3 В соответствии с законом Кирхгофа для схемы получим

$$U = U_R + U_{HЭ} = 120 \text{ В.}$$

Задача 2. Для схемы (рисунок 25, а) дано: $E_2 = -20 \text{ В}$; $U = 50 \text{ В}$, вольт-амперные характеристики (ВАХ) нелинейных элементов представлены на рисунке 25, б. Определить все токи.

Решение

1 Так как напряжение U является и напряжением на первом нелинейном элементе, то по ВАХ этого элемента определяем ток в нем $I_1 = 0,6 \text{ А}$.

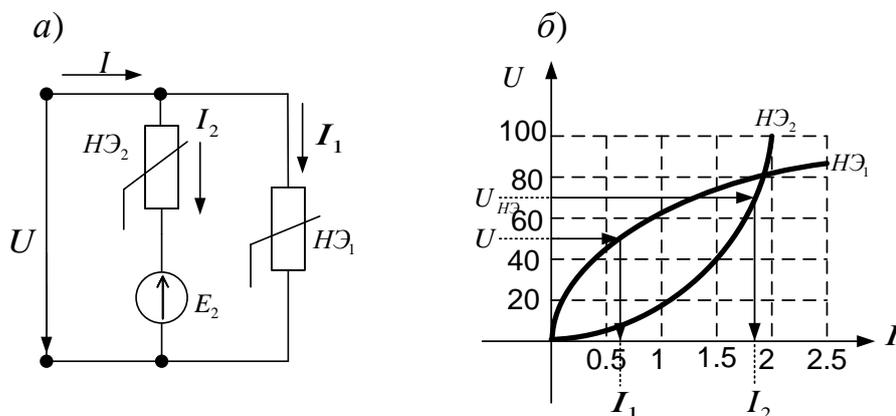


Рисунок 25 – Исходные данные к задаче 2

2 Для определения тока во второй ветви необходимо найти напряжение на втором нелинейном элементе. В соответствии с уравнением $-E_2 = U_{HЭ_2} - U$ получим $U_{HЭ_2} = U - E_2 = 70 \text{ В}$. Следовательно, $I_2 = 1,8 \text{ А}$.

3 Ток в неразветвленной части схемы равен $I = I_1 + I_2 = 2,4 \text{ А}$.

Задачи для самостоятельного решения

Решить задачи, предложенные преподавателем.

Практическое занятие № 7. Расчет усилителя на биполярном транзисторе

Биполярный транзистор представляет собой кристалл полупроводника, состоящий из трех слоев с чередующейся проводимостью и снабженный тремя выводами для подключения к внешней цепи (рисунок 26).

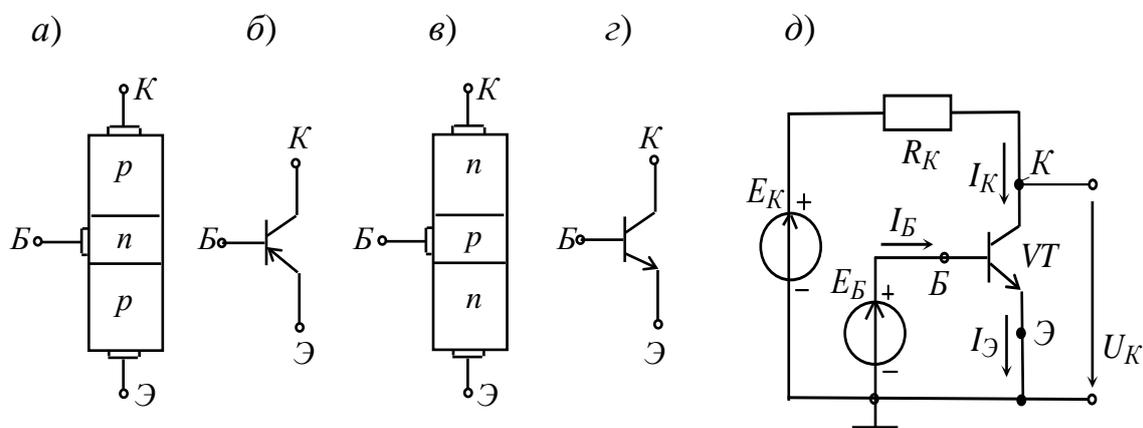


Рисунок 26 – Структура (а, е), обозначение биполярных транзисторов разных типов (б, з), схема включения с общим эмиттером (д)

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

Схема включения транзистора с ОЭ (см. рисунок 26, д) является наиболее распространенной вследствие малого тока базы во входной цепи и усиления входного сигнала как по напряжению, так и по току.

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

Важнейшими характеристиками биполярного транзистора являются его входные и выходные вольтамперные характеристики. Входные характеристики транзистора с ОЭ (см. рисунок 26, б) отражают зависимость тока базы от напряжения, приложенного между базой и эмиттером, при $U_{KЭ} = \text{const}$. Они мало зависят от $U_{KЭ}$, поэтому обычно приводят одну характеристику $I_B(U_{БЭ})$, которая, как видно, подобна ВАХ диода. Выходные характеристики отражают зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером при $I_B = \text{const}$ (см. рисунок 26, в).

Основные свойства транзистора определяются соотношениями токов и напряжений в различных его цепях и взаимным их влиянием друг на друга. На рисунке 26 представлены семейства входных (а) $I_B = f(U_{БЭ})|_{U_{KЭ} = \text{const}}$ и выходных (б) $I_K = f(U_{KЭ})|_{U_{БЭ} = \text{const}}$ статических вольтамперных характеристик транзистора в схеме с ОЭ. Они могут быть получены в результате эксперимента или расчёта.

Параметры схемы замещения транзистора с ОЭ в h -форме определяют по его входным и выходным характеристикам (рисунок 27).



Рисунок 27 – Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора при включении в режиме с общим эмиттером.

В режиме усиления *малых сигналов* транзистор в схеме с ОЭ часто представляют в виде линейного четырехполюсника, входные и выходные параметры которого связаны следующими уравнениями:

$$\Delta U_B = h_{11Э} \Delta I_B + h_{12Э} \Delta U_K;$$

$$\Delta I_K = h_{21Э} \Delta I_B + h_{22Э} \Delta U_K,$$

где $h_{11Э}$ – входное динамическое сопротивление транзистора, $h_{11Э}$ лежит в диапазоне от 100 до 1000 Ом,

$$h_{11Э} = \left. \frac{\Delta U_B}{\Delta I_B} \right|_{U_K = \text{const}} \quad (\Delta U_K = 0);$$

$h_{12Э}$ – безразмерный коэффициент внутренней обратной связи по напряжению, значение которого лежит в пределах 0,002...0,0002 (при расчётах им часто пренебрегают, т. е. полагают равным нулю),

$$h_{12Э} = \left. \frac{\Delta U_B}{\Delta U_K} \right|_{I_B = \text{const}} \quad (\Delta I_B = 0);$$

$h_{21Э}$ – коэффициент передачи (усиления) тока при постоянном напряжении на коллекторе; его также обозначают K_i или $\beta = 10...200$;

$$h_{21Э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_K = \text{const}} \quad (\Delta U_K = 0);$$

$h_{22Э}$ – выходная проводимость транзистора при постоянном токе базы
 $h_{22Э} = 10^{-4} \dots 10^{-6} \text{ См}$,

$$h_{22Э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_K} \right|_{I_B = \text{const}} \quad (\Delta I_B = 0).$$

Зная входную и выходные характеристики транзистора можно рассчитать параметры электронных устройств, собранных на его базе – усилителей, ключей и т. д.

Задачи для самостоятельного решения

Решить задачи, предложенные преподавателем.

Контрольные вопросы

- 1 Что представляет собой биполярный транзистор?
- 2 Какие схемы включения биполярного транзистора применяются?

Список литературы

- 1 **Марченко, А. Л.** Электротехника и электроника: учебник: в 2 т. / А. Л. Марченко. – Москва: ИНФРА-М, 2015. – 574 с.
- 2 **Гальперин, М. В.** Электротехника и электроника: учебник / М. В. Гальперин. – 2-е изд. – Москва: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2017. – 480 с.
- 3 Сборник задач по электротехнике и электронике: учебное пособие / Ю. В. Бладыко [и др.]; под общ. ред. Ю. В. Бладыко. – Минск: Вышэйшая школа, 2012. – 480 с.
- 4 **Жаворонков, М. А.** Электротехника и электроника: учебное пособие / М. А. Жаворонков, А. В. Кузин. – Москва: Академия, 2013. – 400 с.