

УДК 621.313

Попова Т.В. Теоретические основы электротехники: типовые задания и примеры решения: учеб. пособие / Т.В. Попова, Ж.А. Ген, А.М. Щербаков. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. 114 с.

Учебное пособие предназначено для оказания помощи студентам при изучении дисциплины «Теоретические основы электротехники» и самостоятельного выполнения расчетно-графических работ по всем разделам, включает в себя 5 заданий для самостоятельной работы, методические указания к их выполнению с краткими теоретическими сведениями и конкретными примерами расчетов.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарт высшего образования по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (направленности «Электропривод и автоматика», «Электромеханика», «Электроснабжение»).

Ил. 46. Табл. 13. Библиогр.: 8 назв.

Рецензенты: кафедра энергетики АНОО ВО Международного института компьютерных технологий (зав. кафедрой докт. техн. наук, проф. А.Н. Анненков); канд. техн. наук, доц. Ю.В. Писаревский

© Попова Т.В., Ген Ж.А.,
Щербаков А.М., 2016
© Оформление. ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный
технический университет», 2016

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Теоретические основы электротехники» является одной из основных общетехнических дисциплин, необходимых для изучения профилирующих дисциплин студентами направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», направленностей «Электропривод и автоматика», «Электромеханика», «Электроснабжение», очной и заочной форм обучения.

При изучении дисциплины «Теоретические основы электротехники» наряду с изучением теоретических разделов предусмотрено выполнение студентами расчетно-графических работ, так как получение твердых знаний невозможно без освоения принципов и методов расчета электрических линейных и нелинейных цепей. Особенно это относится к области практической подготовки студентов очной формы обучения, которая основывается на самостоятельном решении задач по всем разделам дисциплины.

В учебном пособии приводятся задания, достаточно подробные теоретические сведения и примеры решения типовых задач по рассмотренным разделам дисциплины «Теоретические основы электротехники»: «Линейные электрические цепи постоянного и однофазного синусоидального токов», «Трехфазные цепи», «Переходные процессы в линейных электрических цепях», «Нелинейные электрические цепи переменного тока», «Магнитные цепи», «Цепи с распределенными параметрами». Тем не менее при выполнении расчетно-графических работ и при подготовке к экзаменам необходимо изучение соответствующих разделов дисциплины по учебной литературе и материалам конспектов лекций.

Учебное пособие с рисунками в цветном исполнении находится на сайте университета в «Электронной информационно-образовательной среде ВГТУ» согласно направлению подготовки.

ЦЕЛЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ

1. Освоение методов расчёта электрических и магнитных цепей.
2. Приобретение навыков разработки и составления схем замещения электрических и магнитных цепей.
3. Оценка результатов расчёта и их соответствия теоретическим положениям.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ

1. Расчетно-графические работы выполняют на отдельных листах формата А4. Размеры полей: сверху 15 мм; снизу 20 мм; слева 20 мм; справа 10 мм (без рамок). Лист заполняют с одной стороны.

Все исправления и дополнения студенты вносят только на полях или обратной стороне листа.

Работа должна быть сброшюрована, страницы пронумерованы внизу посередине.

2. На титульном листе приводят следующие данные:
название университета и кафедры;
номер и наименование работы, название дисциплины.

Справа столбиком указывают: номер варианта; шифр и номер группы; фамилия и инициалы студента; фамилия и инициалы преподавателя; дата сдачи работы и подпись студента.

Внизу посередине указываются название города и год выполнения работы. Пример оформления титульного лист приведен в приложении 1.

3. На первом листе работы записываются: работа, данные для расчета, исходную и преобразованную схемы. Исходные и преобразованные схемы выполняются согласно действующему Государственному стандарту.

5. Выполнение расчетов по заданию начинается со второго листа. Все вычисления и преобразования сопровождать пояснениями. Формулы и уравнения записывать в общем виде и затем производить подстановку числовых значений, указывается результат вычисления и единица измерения, которая представляется без скобок. При многократном вычислении по одной формуле приводится только пример единичного расчёта. Результаты всех расчётов сводятся в таблицу.

Таблицы, рисунки, диаграммы и графики выполняются карандашом с помощью чертежных инструментов по Госстандарту, нумеруются и приводятся по тексту в порядке ссылки на них. Иллюстрации следует номеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией или по разделам, например, "Рис. 1. Название рисунка" или "Рис. 1.1. Название рисунка".

Номер таблицы и её название следует располагать над таблицей.

Таблица (номер)
Название таблицы

При построении диаграмм вычисляют масштабы, например, напряжений, токов и т.д. Полученные результаты округляют до значений $1 \cdot 10^n$, $2 \cdot 10^n$ или $5 \cdot 10^n$, где n – любое целое положительное или отрицательное число или ноль.

По осям графиков следует наносить деления с числовыми обозначениями физических величин. В конце оси через запятую указывается размерность.

Примечание: схемы могут быть вынесены на отдельный лист, прикрепленный в конце письменной работы.

7. В конце работы необходима подпись студента и дата выполнения задания.

Расчетно-графическая работа № 1

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Номер варианта выбирается согласно порядковому номеру студента в журнале группы. Номер схемы электрической цепи и параметры ее элементов согласно варианту указаны в табл. 1.1. Ток источника тока $J=2$ А. Схемы электрических цепей постоянного тока представлены на рис. 1.1.

Задание

1. Произвести топологический анализ цепи (определить число ветвей, узлов, линейно-независимых контуров).
2. Записать в развёрнутой и матричной формах систему уравнений, необходимую для определения токов в ветвях схемы по законам Кирхгофа. Рассчитать токи ветвей.
3. Рассчитать токи в ветвях схемы методом контурных токов.
4. Рассчитать токи в ветвях схемы методом узловых потенциалов.
5. Сравнить результаты расчетов по п.п. 2, 3, 4 сведя их в таблицу и сделать вывод о целесообразности использования того или иного метода при анализе предложенной цепи.
6. Рассчитать мощности источников и приемников электрической энергии и проверить выполнение условия баланса мощностей.
7. Определить методом эквивалентного генератора ток в резисторе, отмеченном на схеме стрелочкой. Построить графики зависимости тока и мощности, выделенной в нем, при изменении его сопротивления от нуля до $3R_{\text{Э}}$. Определить значение сопротивления отмеченного резистора, при котором в нем выделяется максимальная мощность.

Таблица 1.1

№ ва-ри-анта	№ схе-мы	E ₁ , В	E ₂ , В	E ₃ , В	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	R ₅ , Ом	R ₆ , Ом
Исходные данные для первой группы (ЭП)										
1	1	50	120	90	50	60	45	60	100	-
2	2	100	180	90	75	60	40	90	50	-
3	3	120	180	90	75	60	40	90	50	100
4	4	120	90	180	75	40	60	90	50	100
5	5	120	120	80	60	40	60	80	50	-
6	6	120	180	90	60	60	40	90	90	-
7	7	120	180	90	60	60	40	90	50	10
8	8	120	180	90	60	60	40	90	50	10
9	9	120	180	80	60	60	50	90	50	40
10	10	180	120	90	60	60	40	90	50	-
11	11	120	180	90	60	60	40	60	50	-
12	12	180	50	30	80	60	20	60	50	30
13	13	100	120	90	60	60	40	90	50	100
14	14	120	180	90	60	40	90	50	80	50
15	15	120	180	90	60	60	40	40	50	100
16	16	120	180	90	60	60	40	90	50	100
17	17	120	180	90	60	80	40	90	100	100
18	18	180	90	120	60	60	40	90	50	-
19	19	60	120	90	120	60	40	90	60	10
20	20	120	180	90	60	60	40	90	50	100
21	21	120	180	90	60	60	40	90	50	-
22	22	15	20	10	20	30	15	10	20	-
23	23	25	20	10	20	30	15	10	20	-
24	24	15	20	10	20	30	15	10	20	30
25	25	60	50	20	60	100	100	120	40	40

Продолжение табл. 1.1

№ ва-ри-анта	№ схе-мы	E ₁ , В	E ₂ , В	E ₃ , В	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	R ₅ , Ом	R ₆ , Ом
Исходные данные для второй группы (ЭМ)										
1	26	15	20	10	20	30	15	10	20	-
2	27	15	20	10	20	30	10	10	20	-
3	28	20	20	10	20	40	15	100	20	10
4	29	15	20	10	20	30	20	20	10	30
5	30	40	60	120	50	80	60	40	80	120
6	1	150	220	190	150	160	145	160	100	-
7	2	200	280	190	175	160	140	190	150	-
8	3	220	280	190	175	160	140	190	150	100
9	4	220	190	280	175	140	160	190	150	100
10	5	220	220	280	160	140	160	180	150	-
11	6	220	280	290	160	160	140	190	190	-
12	7	220	280	290	160	160	140	190	150	110
13	8	220	280	290	160	160	140	190	150	110
14	9	220	280	280	160	160	150	190	150	140
15	10	280	220	290	160	160	140	190	150	-
16	11	220	280	290	160	160	140	160	150	-
17	12	280	150	230	180	160	120	160	150	130
18	13	200	220	290	160	160	140	190	150	100
19	14	220	280	290	160	140	190	150	180	150
20	15	220	280	290	160	160	140	140	150	100
21	16	220	280	290	160	160	140	190	150	100
22	17	220	280	290	160	180	140	190	100	100
23	18	280	190	220	160	160	140	190	150	-
24	19	160	220	290	120	160	140	190	160	110
25	20	220	280	290	160	160	140	190	150	100

Продолжение табл. 1.1

№ ва-ри-анта	№ схе-мы	E ₁ , В	E ₂ , В	E ₃ , В	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	R ₅ , Ом	R ₆ , Ом
Исходные данные для третьей группы (ЭС)										
1	6	60	90	45	60	60	140	90	90	-
2	7	60	90	45	60	60	140	90	50	110
3	8	60	90	45	60	60	140	90	50	110
4	9	60	90	40	60	60	50	90	50	140
5	10	90	60	45	60	60	140	90	50	-
6	11	50	50	75	60	150	50	120	50	-
7	12	40	60	50	80	60	145	60	100	60
8	13	75	70	50	60	60	140	80	150	50
9	14	50	75	50	100	120	80	100	50	80
10	15	60	75	50	120	120	80	140	100	150
11	16	150	90	90	60	100	140	90	100	150
12	17	60	48	50	160	160	80	100	150	100
13	18	150	150	120	60	100	80	50	50	-
14	19	120	60	90	100	120	140	90	50	100
15	20	120	90	180	60	140	60	90	50	100
16	21	50	100	45	60	60	50	90	100	-
17	22	45	60	40	120	60	30	30	40	-
18	23	45	20	20	120	30	115	110	20	-
19	24	50	20	80	40	60	115	120	45	60
20	25	60	50	40	60	100	100	50	80	90
21	26	45	40	25	120	30	25	110	20	-
22	27	50	25	40	120	30	25	110	20	-
23	28	20	20	25	120	125	40	50	20	10
24	29	10	20	25	120	45	20	40	10	30
25	30	80	120	50	50	80	120	40	100	100

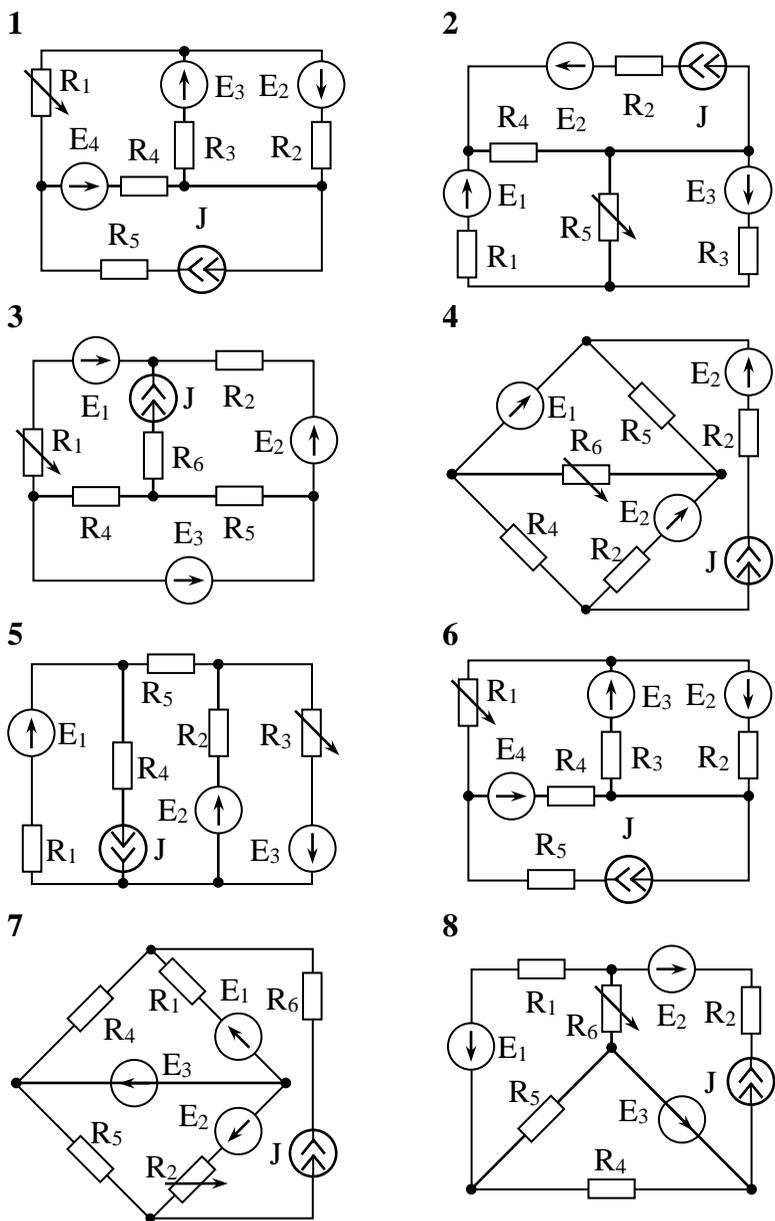
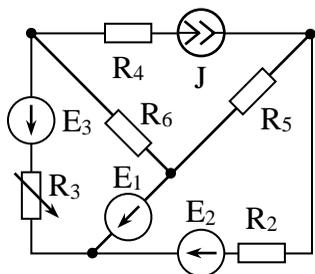
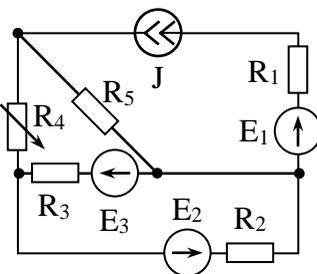


Рис. 1.1

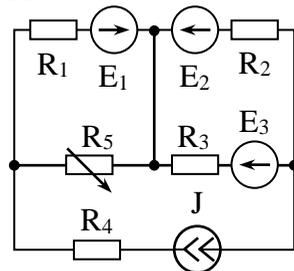
9



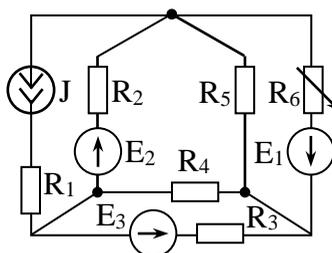
10



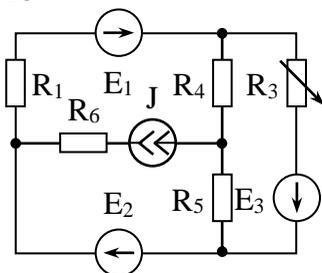
11



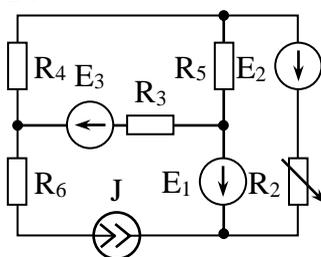
12



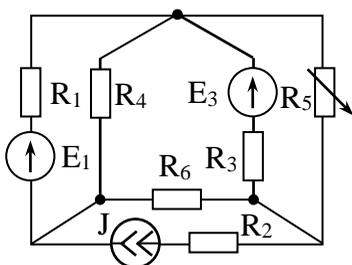
13



14



15



16

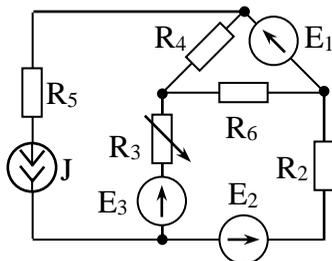
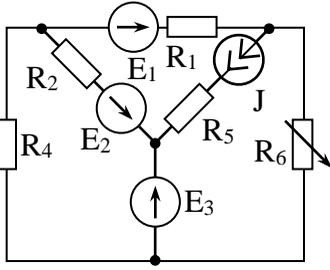
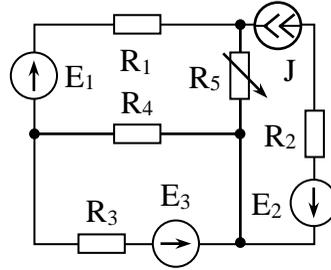


Рис. 1.1. Продолжение

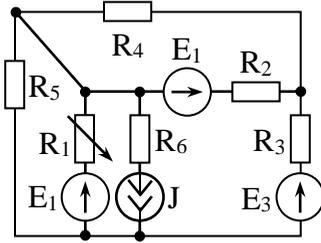
17



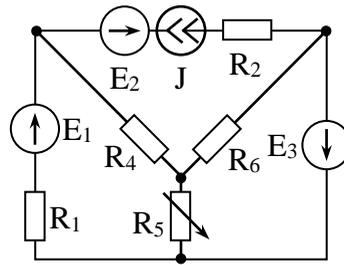
18



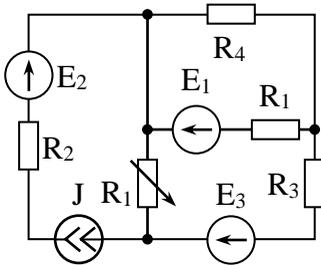
19



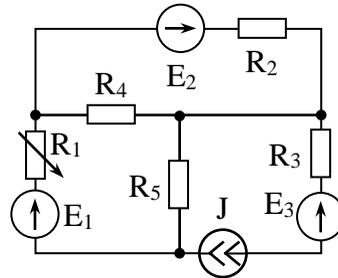
20



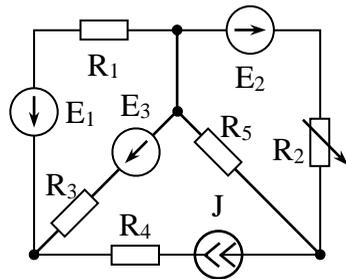
21



22



23



24

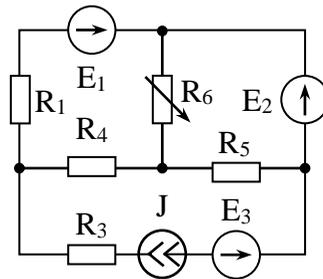


Рис. 1.1. Продолжение

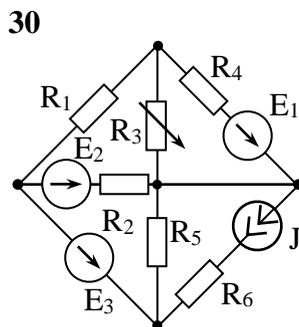
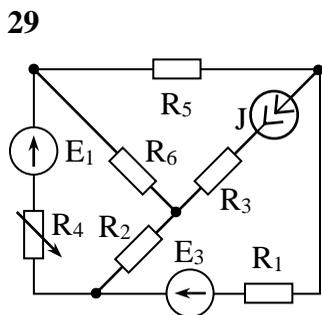
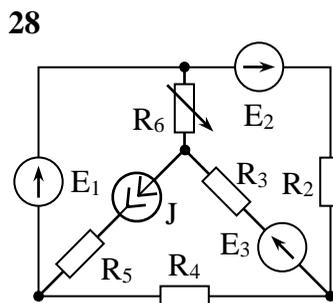
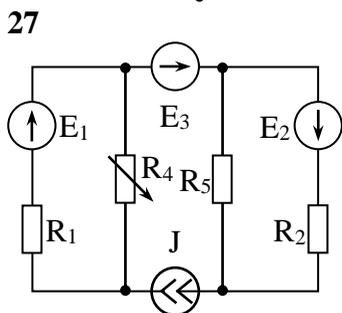
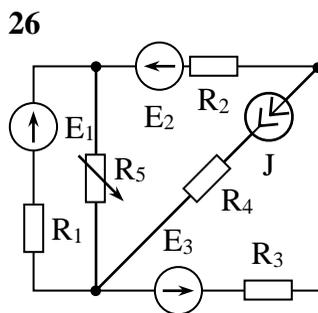
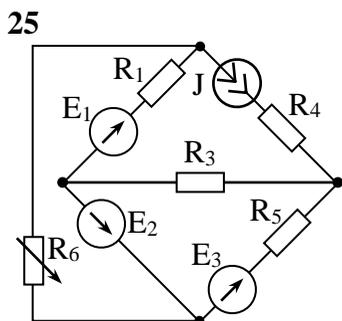


Рис.1.1. Окончание

Методические указания к выполнению работы

1. Топологический анализ схемы электрической цепи.

Прежде чем приступать к расчетам, необходимо определить количество узлов, число ветвей и показать условно-положительные направления токов в ветвях и напряжений на всех элементах расчетной схемы электрической цепи.

Положительные направления токов в ветвях изображают стрелками произвольного направления, однако предпочтительнее выбирать направления токов в соответствии с направлением ЭДС, действующими в данных ветвях. Тогда при составлении уравнения энергетического баланса формально можно считать, что все источники ЭДС работают в генераторном режиме.

Рассмотрим на примере схемы рис. 1.2.

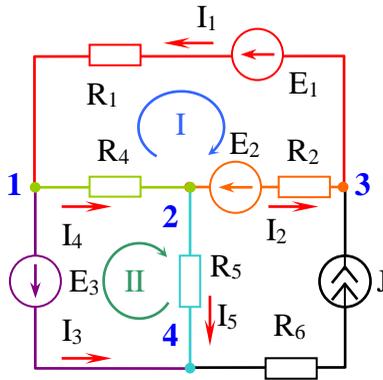


Рис. 1.2

Решение. Схема имеет четыре узла (они пронумерованы синим цветом на рис. 1.2), шесть ветвей. Произвольно выберем положительное направление токов во всех ветвях схемы, как показано на схеме рис. 1.2 красными стрелками. В пяти ветвях токи неизвестны ($v=5$), а ток шестой ветви (с источником тока J) известен и равен току источника J .

2. Анализ схемы электрической цепи методом законов Кирхгофа. Общее число уравнений, записанных на основании законов Кирхгофа равно числу неизвестных токов, т.е. числу ветвей с неизвестными токами.

Решение. Для схемы рис. 1.2 для определения пяти неизвестных токов составляем по законам Кирхгофа систему из пяти уравнений, необходимую для определения токов в ветвях схемы.

Первый закон Кирхгофа вытекает из принципа непрерывности электрического тока, согласно которому ни в одной точке электрической цепи заряды не исчезают и не возникают: сколько зарядов к этой точке прибывает, сколько от нее и уходит. Второй закон Кирхгофа применяется к контурам электрической цепи.

Первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum I = 0.$$

При записи все токи, подходящие к узлу, можно считать отрицательными, а уходящие от узла – положительными.

Второй закон Кирхгофа: в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме напряжений на пассивных элементах, входящих в этот контур:

$$\sum E = \sum R I.$$

В этом уравнении положительные знаки принимаются для токов и ЭДС, положительные направления которых совпадают с произвольно выбранным направлением обхода рассматриваемого контура.

Решение. Для схемы рис. 1.2 по первому закону Кирхгофа составляем три уравнения, то есть на одно уравнение меньше, чем количество узлов в схеме:

$$\text{для узла 1: } -I_1 + I_4 + I_3 = 0;$$

$$\text{для узла 2: } -I_4 + I_2 + I_5 = 0;$$

$$\text{для узла 3: } I_1 - I_2 = J.$$

Недостающие два уравнения составляем по второму закону Кирхгофа. Выбираем два независимых контура: на схеме рис. 1.2 первый контур показан синим цветом, второй - зеленым. Ветвь с источником тока ни в один из контуров включать не надо, токи источников тока учитываются только при записи первого закона Кирхгофа:

$$\text{для контура I: } -R_1 I_1 - R_2 I_2 - R_4 I_4 = -E_1 + E_2;$$

$$\text{для контура II: } R_4 I_4 + R_5 I_5 = -E_3.$$

Система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} -I_1 + I_3 + I_4 = 0; \\ I_2 - I_4 + I_5 = 0; \\ I_1 - I_2 = J; \\ -R_1 I_1 - R_2 I_2 - R_4 I_4 = -E_1 + E_2; \\ R_4 I_4 + R_5 I_5 = -E_3. \end{cases}$$

Запишем систему уравнений в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -R_1 & -R_2 & 0 & -R_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & R_5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ J \\ -E_1 + E_2 \\ -E_3 \end{pmatrix}$$

Решив составленную систему уравнений, находим значения токов в ветвях схемы.

3. Определение токов в ветвях электрической цепи методом контурных токов. Схема представлена на рис. 1.3.

Исходные данные: $E_1=30$ В, $E_2=50$ В, $E_3=20$ В, $J=0,2$ А, $R_1=120$ Ом, $R_2=150$ Ом, $R_4=100$ Ом, $R_5=200$ Ом, $R_6=100$ Ом.

Решение. Одна из ветвей схемы содержит идеальный источник тока J . Выберем контурные токи таким образом, чтобы по ветви с источником тока протекал только один контурный ток, который в этом случае будет равен току источника $I_{33} = J$ (он показан фиолетовым цветом на схеме рис. 1.3). Неизвестные токи первого и второго контуров схемы рис. 1.3 изображены соответственно синим и зеленым цветами.

Система уравнений для определения двух неизвестных контурных токов будет иметь вид:

$$\begin{cases} R_{11} I_{11} + R_{12} I_{22} + R_{13} I_{33} = E_{11}; \\ R_{21} I_{11} + R_{22} I_{22} + R_{23} I_{33} = E_{22}; \end{cases}$$

или с учетом того, что $I_{33} = J$

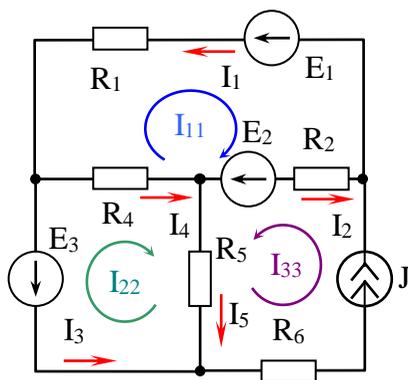


Рис. 1.3

$$\begin{cases} R_{11}I_{11} + R_{12}I_{22} = E_{11} - R_{13}J; \\ R_{21}I_{11} + R_{22}I_{22} = E_{22} - R_{23}J; \end{cases}$$

где собственные сопротивления контуров:

$$R_{11} = R_1 + R_2 + R_4 = 120 + 150 + 100 = 370 \text{ Ом};$$

$$R_{22} = R_4 + R_5 = 100 + 200 = 300 \text{ Ом};$$

сопротивления смежных ветвей между контурами:

$$R_{12} = R_{21} = -R_4 = -100 \text{ Ом};$$

$$R_{13} = R_{31} = R_2 = 150 \text{ Ом};$$

$$R_{23} = R_{32} = R_5 = 200 \text{ Ом};$$

контурные ЭДС:

$$E_{11} = -E_1 + E_2 = -30 + 50 = 20 \text{ В};$$

$$E_{22} = -E_3 = -20 \text{ В}.$$

Примечание: при записи результатов вычислений токов необходимо оставлять три знака после запятой, для проводимостей – шесть знаков после запятой, для остальных величин – достаточно оставить два знака после запятой.

Записываем систему уравнений в матричной форме

$$\begin{bmatrix} R_1 + R_2 + R_4 & -R_4 \\ -R_4 & R_4 + R_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -E_1 + E_2 - R_2 J \\ -E_3 - R_5 J \end{bmatrix}.$$

Подставим числовые значения.

$$\begin{bmatrix} 370 & -100 \\ -100 & 300 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10 \\ -60 \end{bmatrix}.$$

Вычисляем главный и дополнительные определители системы уравнений:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 370 & -100 \\ -100 & 300 \end{bmatrix} = 101000,$$

$$\Delta_1 = \begin{bmatrix} -10 & -100 \\ -60 & 300 \end{bmatrix} = -9000,$$

$$\Delta_2 = \begin{bmatrix} 370 & -10 \\ -100 & -60 \end{bmatrix} = -23200.$$

Контурные токи будут равны:

$$I_{11} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{-9000}{101000} = -0,0891 \approx -0,089 \text{ А},$$

$$I_{22} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{-23200}{101000} = -0,2297 \approx -0,230 \text{ А}.$$

Значения токов ветвей находим, как алгебраическую сумму контурных токов.

Контурные токи, направление которых совпадает по направлению с искомым током, берем со знаком «плюс», а которых не совпадает – со знаком «минус» (рис. 1.3):

$$I_1 = -I_{11} = 0,089 \text{ А};$$

$$I_2 = -I_{11} - I_{33} = 0,089 - 0,2 = -0,111 \text{ А}$$

$$I_3 = -I_{22} = 0,230 \text{ А};$$

$$I_4 = I_{22} - I_{11} = -0,230 + 0,089 = -0,141 \text{ А};$$

$$I_5 = I_{22} + I_{33} = -0,230 + 0,2 = -0,030 \text{ А}.$$

Если значение тока получилось отрицательным, это означает, что на исходной схеме условно-положительное направление тока выбрано неверно.

4. Определение токов ветвей схемы методом узловых потенциалов. В методе узловых потенциалов в качестве неиз-

вестных выступают потенциалы узлов. Их величины определяют относительно опорного узла, потенциал которого принимают равным нулю.

Решение. В рассматриваемой схеме (рис. 1.4) ветвь, включенная между первым и четвертым узлами, содержит только идеальный источник ЭДС. Разность потенциалов на зажимах этой ветви равна E_3 . Рассмотрим в качестве опорного узла первый узел и примем его потенциал равным нулю ($\varphi_1=0$). Тогда потенциал четвертого узла $\varphi_4=E_3$ и в качестве неизвестных остаются потенциалы φ_2 и φ_3 .

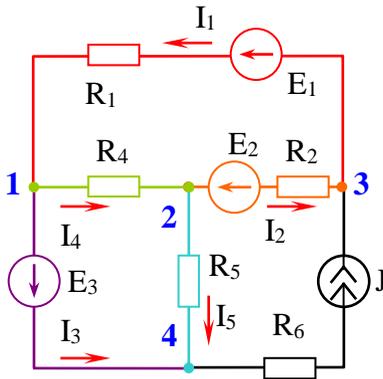


Рис. 1.4

Записываем в общем виде систему уравнений для вычисления потенциалов второго и третьего узлов:

$$\begin{cases} G_{22}\varphi_2 + G_{23}\varphi_3 + G_{24}\varphi_4 = J_{22}, \\ G_{32}\varphi_2 + G_{33}\varphi_3 + G_{34}\varphi_4 = J_{33}. \end{cases}$$

Учитывая, что $\varphi_4=E_3$ система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} G_{22}\varphi_2 + G_{23}\varphi_3 = J_{22} - G_{24}E_3, \\ G_{32}\varphi_2 + G_{33}\varphi_3 = J_{33} - G_{34}E_3, \end{cases}$$

где сумма проводимостей ветвей, сходящихся во втором и третьем узлах:

$$G_{22} = \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} = 0,01 + \frac{1}{150} + 0,005 = 0,021667 \text{ См};$$

$$G_{33} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{120} + \frac{1}{150} = 0,015 \text{ См};$$

сумма проводимостей ветвей, непосредственно соединяющих два соседних узла:

$$G_{23} = G_{32} = -g_{23} = -g_{32} = -\frac{1}{R_2} = -\frac{1}{150} = -0,006667 \text{ См};$$

$$G_{24} = -g_{24} = -\frac{1}{R_5} = -0,005 \text{ См};$$

$$G_{34} = -g_{34} = -\frac{1}{R_{\text{вн}}}} = \frac{1}{\infty} = 0.$$

Узловые токи:

$$J_{22} = \frac{E_2}{R_2} = \frac{50}{150} = 0,333 \text{ А};$$

$$J_{33} = -\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2} + J = -\frac{30}{120} - \frac{50}{150} + 0,2 = -0,383 \text{ А}.$$

Записываем систему уравнений в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} & -\frac{1}{R_2} \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_2 + E_3}{R_2 R_5} \\ -\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2} + J \end{bmatrix}$$

Подставляем числовые значения в полученную систему уравнений:

$$\begin{bmatrix} 0,021667 & -0,006667 \\ -0,006667 & 0,015 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,433 \\ -0,383 \end{bmatrix}.$$

Вычисляем главный и дополнительные определители системы уравнений:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0,021667 & -0,006667 \\ -0,006667 & 0,015 \end{bmatrix} = 0,000281,$$

$$\Delta_2 = \begin{bmatrix} 0,433 & -0,006667 \\ -0,383 & 0,015 \end{bmatrix} = 0,003942,$$

$$\Delta_3 = \begin{bmatrix} 0,021667 & 0,433 \\ -0,006667 & -0,383 \end{bmatrix} = -0,005412.$$

Потенциалы узлов будут равны:

$$\varphi_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{0,003942}{0,000281} = 14,028 \text{ В},$$

$$\varphi_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{-0,005412}{0,000281} = -19,26 \text{ В}.$$

По закону Ома рассчитаем токи ветвей (рис. 1.4):

$$I_1 = \frac{\varphi_3 - \varphi_1 + E_1}{R_1} = \frac{-19,26 + 30}{120} = 0,0895 \approx 0,09 \text{ А};$$

$$I_2 = \frac{\varphi_2 - \varphi_3 - E_2}{R_2} = \frac{14,028 + 19,26 - 50}{150} = -0,111 \text{ А};$$

$$I_4 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_4} = \frac{-14,028}{100} = -0,14028 \approx -0,140 \text{ А};$$

$$I_5 = \frac{\varphi_2 - \varphi_4}{R_5} = \frac{14,028 - 20}{200} = -0,02986 \approx -0,030 \text{ А}.$$

Ток третьей ветви определим, составив уравнение по первому закону Кирхгофа для первого узла:

$$I_3 = I_1 - I_4 = 0,09 + 0,140 = 0,23 \text{ А}.$$

5. Сравним результаты расчетов методами контурных токов и узловых потенциалов, для этого значения токов, рассчитанных двумя методами сведем в табл.1.2.

Таблица 1.2

Метод расчета	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$I_4,$ А	$I_5,$ А
<i>Метод контурных токов</i>	0,089	-0,111	0,230	-0,141	-0,03
<i>Метод узловых потенциалов</i>	0,09	-0,111	0,230	-0,140	-0,03

Как видно из табл. 1.2, значения токов с допустимой погрешностью получились одинаковыми.

б. Расчет мощности источников и приемников электрической энергии в схеме. Проверка выполнения баланса мощностей.

Уравнение энергетического баланса: суммарные мощности источников и приемников равны.

$$\sum P_{\text{и}} = \sum P_{\text{п}}.$$

Примечание: при записи баланса необходимо учитывать режимы работы источников энергии.

Допускаемая погрешность энергетического баланса:

$$\delta = \frac{\sum P_{\text{и}} - \sum P_{\text{п}}}{\sum P_{\text{и}}} \cdot 100 \leq 3\%$$

Если погрешность превышает 3%, то в расчетах допущена ошибка, которую необходимо отыскать и устранить, повторив расчет.

Уравнение баланса мощностей имеет вид

$$\sum_{k=1}^n P_{\text{ист}k} = \sum_{k=1}^n P_{\text{пр}k},$$

где мощность источника ЭДС: $P_E = U_E I = EI$;

мощность источника тока: $P_J = U_J I_J = (\varphi_a - \varphi_b) J$;

мощность, рассеиваемая в резисторе: $P_{R_k} = R_k I_k^2$.

Решение. Для рассматриваемой схемы цепи (рис. 1.2) определяем суммарную мощность источников:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n P_{\text{ист}k} &= P_{E1} + P_{E2} + P_{E3} + P_J = E_1 I_1 - E_2 I_2 + E_3 I_3 + U_J J = \\ &= 30 \cdot (0,0891) - 50 \cdot (-0,1109) + 20 \cdot 0,2297 + (-19,194) \cdot 0,2 = \\ &= 8,97 \text{ Вт}, \end{aligned}$$

где мощность источника ЭДС E_2 берем со знаком «-», так как выбранное направление тока ветви I_2 и направление ЭДС E_2 не совпадают, то есть источник работает в режиме приемника;

напряжение источника тока определяем как:

$$U_J = U_{34} + U_{R_6} = \varphi_3 - \varphi_4 + R_6 J = -19,194 - 20 + 20 = -19,194 \text{ В.}$$

Сумма мощностей приемников:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n P_{\text{прк}} &= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + J^2 R_6 = \\ &= 0,0891^2 \cdot 120 + (-0,1109)^2 \cdot 150 + (-0,1406)^2 \cdot 100 + \\ &+ (-0,0297)^2 \cdot 200 + 0,2^2 \cdot 100 = 8,95 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Баланс мощностей выполняется с большой степенью точности

$$\sum_{k=1}^n P_{\text{истк}} = \sum_{k=1}^n P_{\text{прк}} ; \quad 8,97 \text{ Вт} \approx 8,95 \text{ Вт.}$$

7. Определение тока в одной из ветвей схемы цепи методом эквивалентного генератора.

Решение. Для расчета тока в первой ветви схемы цепи рис. 1.2 приводим рассматриваемую схему к виду рис. 1.5.

Определяем параметры активного двухполюсника.

а) ЭДС эквивалентного двухполюсника определяем, как напряжение холостого хода на разомкнутых зажимах первого резистора $U_{\text{абхх}}$ (стрелка зеленого цвета на рис. 1.5).

Для этого рассчитываем токи холостого хода в ветвях полученной схемы методом контурных токов. Контурный ток I_{22x} равен току источника J (стрелка фиолетового цвета на рис. 1.5). Поэтому для расчета контурного тока I_{11x} (стрелка зеленого цвета на рис. 1.5) составляем одно уравнение по МКТ, которое имеет вид

$$R_{11} I_{11x} + R_{12} I_{22x} = E_{11}$$

или при условии $I_{22x} = J$ уравнение примет вид

$$R_{11} I_{11x} = E_{11} - R_{12} J,$$

где $R_{11} = R_4 + R_5 = 100 + 200 = 300, \text{ Ом};$

$$R_{12} = -R_5 = -200, \text{ Ом};$$

$$E_{11} = E_3 = 20, \text{ В.}$$

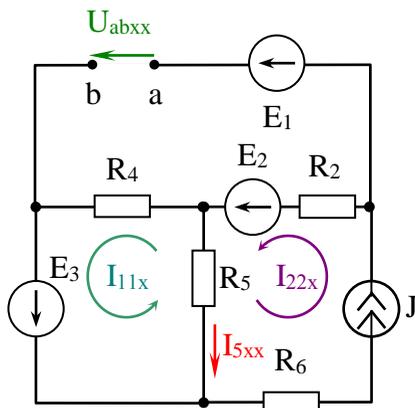


Рис. 1.5

Подставив числовые значения, находим ток первого контура:

$$I_{11x} = \frac{E_{11} - R_{12}J}{R_{11}} = \frac{20 + 200 \cdot 0,2}{300} = 0,2 \text{ А} .$$

Напряжение между зажимами ab рассчитываем, составив уравнение по второму закону Кирхгофа

$$U_{abxx} - R_4 I_{11x} - R_2 I_{22x} = E_1 - E_2 ,$$

тогда $U_{abxx} = E_1 - E_2 + R_4 I_{11x} + R_2 I_{22x} .$

Подставляем числовые значения

$$U_{abxx} = 30 - 50 + 100 \cdot 0,2 + 150 \cdot 0,2 = 30 \text{ В} .$$

ЭДС эквивалентного генератора

$$E_{\text{э}} = U_{abxx} = 30 \text{ В} .$$

б) Внутреннее сопротивление эквивалентного генератора определяем, как входное сопротивление пассивной части схемы относительно разомкнутых зажимов ab (рис. 1.6).

Пассивный двухполюсник получаем, исключив из рассматриваемой схемы цепи (рис. 1.5) все источники электрической энергии, но оставив их внутренние сопротивления. При этом необходимо помнить, что внутреннее сопротивление идеального источника ЭДС равно нулю (короткозамкнутый уча-

сток синего цвета на рис. 1.6), а идеального источника тока – бесконечности (разомкнутый участок на рис. 1.6). Полученная схема пассивного двухполюсника представлена на рис. 1.6.

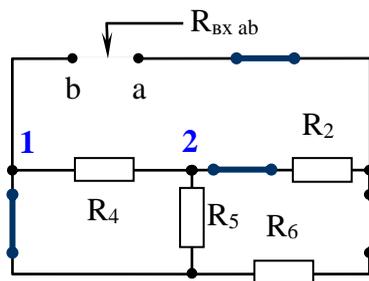


Рис. 1.6

Входное сопротивление

$$R_{\text{вх}ab} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} + R_2 = \frac{100 \cdot 200}{300} + 150 = 216,67 \text{ Ом.}$$

$$R_3 = R_{\text{вх}ab} = 216,67 \text{ Ом}$$

Искомый ток первой ветви

$$I_1 = \frac{U_{\text{abxx}}}{R_3 + R_1} = \frac{30}{216,67 + 120} = 0,0891 \text{ А.}$$

Как видно из табл. 1.2, значения тока I_1 с допустимой погрешностью получились одинаковыми.

Расчетно-графическая работа № 2

АНАЛИЗ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Номер варианта выбирается согласно порядковому номеру студента в журнале группы. Дана схема электрической цепи однофазного синусоидального тока (рис. 2.1), содержащая источники синусоидальных ЭДС, резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы.

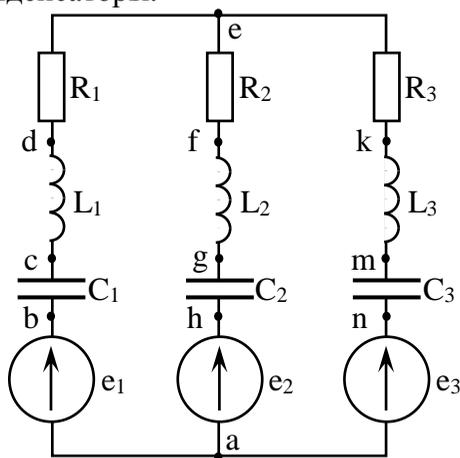


Рис. 2.1

Мгновенные значения ЭДС источников:

$$e_a(t) = E_{a\ m} \sin(314t + \Psi_a),$$

$$e_b(t) = E_{b\ m} \sin(314t + \Psi_b);$$

$$e_c(t) = E_{c\ m} \sin(314t + \Psi_c),$$

где амплитудные значения и начальные фазы ЭДС источников:

для нечетных вариантов:

$$E_{a\ m} = 141\text{ В}; \quad \Psi_a = -45^\circ;$$

$$E_{b\ m} = 70,7\text{ В}; \quad \Psi_b = 60^\circ;$$

$$E_{c\ m} = 282\text{ В}; \quad \Psi_c = 45^\circ.$$

для четных вариантов:

$$E_{a\ m} = 84,9\text{ В}; \quad \Psi_a = 90^\circ;$$

$$E_{b\ m} = 141\text{ В}; \quad \Psi_b = -60^\circ;$$

$$E_{c\ m} = 70,7\text{ В}; \quad \Psi_c = 30^\circ.$$

Параметры элементов цепи заданы согласно варианту в табл. 2.1. Если в графе табл. 2.1 стоит прочерк, то такой элемент в цепи отсутствует.

Таблица 2.1

№ вар.	$e_1,$ В	$e_2,$ В	$e_3,$ В	$R_1,$ Ом	$L_1,$ Гн	$C_1,$ мкФ	$R_2,$ Ом	$L_2,$ Гн	$C_2,$ мкФ	$R_3,$ Ом	$L_3,$ Гн	$C_3,$ мкФ
Исходные данные для первой группы (ЭП)												
1	e_a	-	e_b	100	0,5	10	150	0,3	-	-	0,6	20
2	-	e_b	e_c	200	-	10	150	0,6	50	120	0,5	-
3	e_a	e_b	-	100	0,3	-	-	0,5	10	100	0,6	30
4	e_c	e_a	-	-	0,4	20	100	-	30	120	0,5	40
5	-	e_c	e_b	150	0,5	-	100	0,5	30	-	0,2	10
6	-	e_a	e_b	50	0,2	10	60	0,5	-	200	-	30
7	e_b	-	e_c	100	0,3	40	150	-	20	50	0,6	-
8	-	e_c	e_a	200	0,25	10	-	0,8	40	100	-	20
9	e_a	e_c	-	-	0,3	10	200	0,5	-	100	0,6	20
10	-	e_b	e_a	50	-	10	100	0,2	20	-	0,5	40
11	e_b	e_a	-	-	0,5	50	80	0,2	20	100	-	30
12	e_c	e_b	-	120	0,2	-	60	0,3	10	150	-	20
13	-	e_c	e_a	140	-	20	-	0,6	40	100	0,5	50
14	e_c	e_a	-	80	0,5	30	-	0,4	10	120	0,2	-
15	-	e_b	e_c	60	0,3	-	100	0,5	10	140	0,4	-
16	e_c	-	e_b	25	-	20	100	0,6	-	30	0,5	30
17	e_a	-	e_c	125	0,5	-	30	-	20	80	0,5	10
18	e_b	e_c	-	130	-	-	20	-	30	150	0,8	10
19	-	e_c	e_b	40	0,8	-	60	-	-	80	0,5	10
20	e_a	-	e_c	35	0,5	-	100	0,2	10	20	-	-
21	e_a	e_c	-	-	-	20	150	0,5	-	30	0,2	20
22	e_b	e_c	-	100	0,4	-	-	-	20	150	0,5	20
23	-	e_a	e_c	120	0,3	20	-	0,8	40	-	-	20
24	e_c	-	e_a	-	0,8	40	50	-	20	100	0,5	20
25	-	e_a	e_c	50	0,5	10	-	0,1	20	100	-	30

Продолжение табл. 2.1

№ вар.	e ₁ , В	e ₂ , В	e ₃ , В	R ₁ , Ом	L ₁ , Гн	C ₁ , мкФ	R ₂ , Ом	L ₂ , Гн	C ₂ , мкФ	R ₃ , Ом	L ₃ , Гн	C ₃ , мкФ
Исходные данные для второй группы (ЭМ)												
1	e _a	e _b	-	80	0,5	-	150	0,2	-	30	0,2	20
2	e _b	e _c	-	30	0,2	-	-	0,5	-	60	0,5	50
3	-	e _a	e _b	45	-	30	100	0,1	10	10	0,6	-
4	e _b	-	e _a	60	0,6	-	50	0,8	50	-	0,3	10
5	e _a	e _b	-	-	0,25	10	20	0,4	-	35	0,25	40
6	e _a	e _c	-	120	0,5	10	150	0,3	-	-	0,6	20
7	e _b	e _c	-	180	-	10	150	0,6	50	120	0,5	-
8	-	e _a	e _c	120	0,3	-	-	0,5	10	100	0,6	30
9	e _c	-	e _a	-	0,4	20	80	-	30	120	0,5	40
10	-	e _a	e _c	130	0,5	-	100	0,5	30	-	0,2	10
11	e _c	-	e _b	50	0,2	10	80	0,5	-	200	-	30
12	e _a	-	e _c	110	0,3	40	150	-	20	50	0,6	-
13	e _b	e _c	-	210	0,25	10	-	0,8	40	100	-	20
14	-	e _c	e _b	-	0,3	10	190	0,5	-	100	0,6	20
15	e _a	-	e _c	50	-	10	120	0,2	20	-	0,5	40
16	-	e _a	e _b	-	0,5	50	80	0,2	20	130	-	30
17	e _b	-	e _c	120	0,2	-	60	0,3	10	120	-	20
18	-	e _c	e _a	130	-	20	-	0,6	40	110	0,5	50
19	e _a	e _c	-	90	0,5	30	-	0,4	10	110	0,2	-
20	-	e _b	e _a	60	0,3	-	110	0,5	10	140	0,4	-
21	e _b	e _a	-	25	-	20	120	0,6	-	30	0,5	30
22	e _c	e _b	-	125	0,5	-	30	-	20	90	0,5	10
23	-	e _c	e _a	130	-	-	20	-	30	140	0,8	10
24	e _c	e _a	-	40	0,8	-	80	-	-	60	0,5	10
25	-	e _b	e _c	35	0,5	-	90	0,2	10	30	-	-

Продолжение табл. 2.1

№ вар.	e ₁ , В	e ₂ , В	e ₃ , В	R ₁ , Ом	L ₁ , Гн	C ₁ , мкФ	R ₂ , Ом	L ₂ , Гн	C ₂ , мкФ	R ₃ , Ом	L ₃ , Гн	C ₃ , мкФ
Исходные данные для третьей группы (ЭС)												
1	e _b	e _a	-	80	0,5	-	150	0,2	-	30	0,2	20
2	e _c	e _b	-	30	0,2	-	-	0,5	-	60	0,5	50
3	-	e _c	e _a	45	-	30	100	0,1	10	10	0,6	-
4	e _c	e _a	-	60	0,6	-	50	0,8	50	-	0,3	10
5	-	e _b	e _c	-	0,25	10	20	0,4	-	35	0,25	40
6	e _c	-	e _b	120	0,5	10	150	0,3	-	-	0,6	20
7	e _a	-	e _c	180	-	10	150	0,6	50	120	0,5	-
8	e _b	e _c	-	120	0,3	-	-	0,5	10	100	0,6	30
9	-	e _c	e _b	-	0,4	20	80	-	30	120	0,5	40
10	e _a	-	e _c	130	0,5	-	100	0,5	30	-	0,2	10
11	e _a	e _c	-	50	0,2	10	80	0,5	-	200	-	30
12	e _b	e _c	-	110	0,3	40	150	-	20	50	0,6	-
13	-	e _a	e _c	210	0,25	10	-	0,8	40	100	-	20
14	e _c	-	e _a	-	0,3	10	190	0,5	-	100	0,6	20
15	-	e _a	e _c	50	-	10	120	0,2	20	-	0,5	40
16	-	e _a	e _b	25	-	20	100	0,6	-	30	0,5	30
17	e _b	-	e _c	125	0,5	-	30	-	20	80	0,5	10
18	-	e _c	e _a	130	-	-	20	-	30	150	0,8	10
19	e _a	e _c	-	40	0,8	-	60	-	-	80	0,5	10
20	-	e _b	e _a	35	0,5	-	100	0,2	10	20	-	-
21	e _b	e _a	-	-	-	20	150	0,5	-	30	0,2	20
22	e _c	e _b	-	100	0,4	-	-	-	20	150	0,5	20
23	-	e _c	e _a	120	0,3	20	-	0,8	40	-	-	20
24	e _c	e _a	-	-	0,8	40	50	-	20	100	0,5	20
25	-	e _b	e _c	50	0,5	10	-	0,1	20	100	-	30

Задание

1. Составить согласно варианту расчетную схему электрической цепи и провести ее топологический анализ.

2. На основании законов Кирхгофа записать систему уравнений для расчета токов во всех ветвях схемы в двух формах: а) дифференциальной; б) символической.

3. Рассчитать комплексные действующие значения токов во всех ветвях схемы методом узловых потенциалов.

4. Рассчитать потенциалы всех точек схемы, приняв потенциал узла «а» равным нулю. Построить топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов. Графически показать на векторной диаграмме выполнение законов Кирхгофа для исследуемой цепи.

5. По топографической диаграмме определить напряжения между точками «d» и «m».

6. Записать мгновенные значения тока в ветви, не содержащей источник ЭДС, и напряжения на зажимах этой ветви. Построить в одних осях координат их временные диаграммы. На диаграмме показать угол сдвига фаз между напряжением и током в этой ветви.

7. Рассчитать комплексные мощности приемников и источников электрической энергии. Проверить выполнение баланса комплексных мощностей.

Методические указания к выполнению работы

1. Топологический анализ схемы электрической цепи.

Решение. Рассматриваемая электрическая цепь, схема которой приведена на рис. 2.2, имеет два узла (они пронумерованы синим цветом) и три ветви с неизвестными токами.

Так как схема содержит несколько источников электрической энергии, положительные направления токов в ветвях выбираем произвольно, как показано красными стрелками на

схеме рис. 2.2. Также произвольно выбираем направления обхода двух независимых контуров, они указаны синим и зеленым цветом на рис. 2.2.

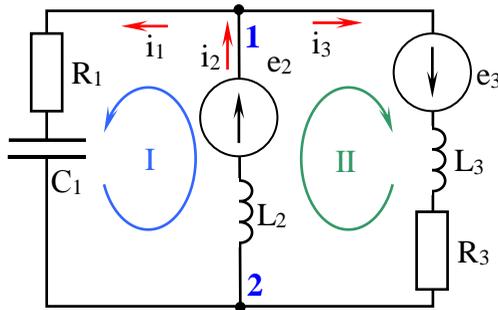


Рис. 2.2

2. Анализ схемы электрической цепи методом законов Кирхгофа. Число уравнений, составляемых по законам Кирхгофа, должно соответствовать количеству неизвестных токов. По первому закону Кирхгофа составляется на одно уравнение меньше, чем количество узлов в схеме. Остальные уравнения записываются по второму закону Кирхгофа.

Запись системы уравнений в дифференциальной форме выполняется для мгновенных значений ЭДС, токов и напряжений. Необходимо помнить, что зависимости между мгновенными значениями напряжений и токов реактивных элементов дифференциально-интегральные.

Для записи системы уравнений в символической форме переходят от синусоидальных функций времени к их изображению комплексными числами. Соответственно дифференциальные и интегральные зависимости между напряжениями и токами в цепях синусоидального тока, заменяются линейными зависимостями между комплексными действующими токами и напряжениями, которые приведены в виде табл. 2.2.

Решение. Система уравнений, составляемая по законам Кирхгофа для рассматриваемой схемы электрической цепи (рис. 2.2) должна состоять из трех уравнений. По первому за-

кону Кирхгофа составляем одно уравнение. Недостающие два уравнения составляем по второму закону Кирхгофа для контуров, направление обхода контуров показано на рис. 2.2.

Таблица 2.2

$e(\omega t) = E_m \sin(\omega t + \psi) \rightarrow \dot{E} = Ee^{j\psi}$	
$i(\omega t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i) \rightarrow \dot{I} = Ie^{j\psi_i}$	
$u_R = Ri$	$\rightarrow \dot{U}_R = R\dot{I}$
$u_L = L \frac{di}{dt}$	$\rightarrow \dot{U}_L = j\omega L\dot{I}$
$u_C = \frac{1}{C} \int idt$	$\rightarrow \dot{U}_C = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I}$

Записываем систему уравнений в дифференциальной форме:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 + i_3 = 0 & (\text{узел 1}), \\ R_1 i_1 + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + L_2 \frac{di_2}{dt} = e_2 & (\text{контур I}), \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + L_3 \frac{di_3}{dt} + R_3 i_3 = e_2 + e_3 & (\text{контур II}). \end{cases}$$

Система уравнений, записанная по законам Кирхгофа, в символической форме имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 - \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0, \\ R_1 \dot{I}_1 + (-j/\omega C) \dot{I}_1 + j\omega L_2 \dot{I}_2 = \dot{E}_2, \\ j\omega L_2 \dot{I}_2 + j\omega L_3 \dot{I}_3 + R_3 \dot{I}_3 = \dot{E}_2 + \dot{E}_3. \end{cases}$$

3. Расчет действующих комплексных значений токов в ветвях схемы электрической цепи. Схема рассматриваемой цепи представлена на рис. 2.3. ЭДС источников энергии:

$$e_2(t) = 141 \sin(1000 t + 90^\circ), \text{ В}; e_3(t) = 84,6 \sin(1000 t + 60^\circ), \text{ В}.$$

Параметры элементов схемы:

$$R_1 = 80 \text{ Ом}, R_3 = 60 \text{ Ом}, L_2 = 40 \text{ мГн}, L_3 = 30 \text{ мГн}, C_1 = 10 \text{ мкФ}.$$

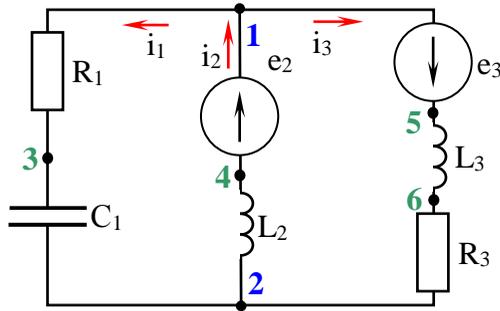


Рис. 2.3

Решение. Расчет цепи будем выполнять в комплексной форме, для чего перейдем от мгновенных значений ЭДС к их комплексным действующим значениям:

$$\dot{E}_2 = \frac{141}{\sqrt{2}} e^{j90^\circ} = 100 e^{j90^\circ} \text{ В}, \quad \dot{E}_3 = \frac{84,9}{\sqrt{2}} e^{j60^\circ} = 60 e^{j60^\circ} \text{ В}.$$

Рассчитываем комплексные сопротивления ветвей:

$$Z_1 = R_1 + (-j1/\omega C_1) = 80 - j100 = 128,06 e^{-j51^\circ} \text{ Ом},$$

$$Z_2 = j\omega L_2 = j40 = 40 e^{j90^\circ} \text{ Ом},$$

$$Z_3 = R_3 + j\omega L_3 = 60 + j30 = 67,08 e^{j27^\circ} \text{ Ом}.$$

Числовые значения углов округляем до целого числа.

Так как схема имеет всего два узла, то для расчета токов применим частный случай метода узловых потенциалов – метод двух узлов.

Примем потенциал второго узла $\phi_2=0$. Согласно методу двух узлов напряжение между узлами 1 и 2 определяем как:

$$\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2 = \dot{U}_{12} = \frac{\dot{E}_2 Y_2 - \dot{E}_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3},$$

где комплексные проводимости параллельных ветвей:

$$Y_1 = \frac{1}{Z_1} = \frac{1}{128,06 e^{-j51^\circ}} = 0,0078 e^{j51^\circ} = 0,00488 + j0,00609 \text{ См},$$

$$Y_2 = \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{40e^{j90^\circ}} = 0,025 e^{-j90^\circ} = -j0,025 \quad \text{См},$$

$$Y_3 = \frac{1}{Z_3} = \frac{1}{67,08e^{j27^\circ}} = 0,0149 e^{-j27^\circ} = 0,0133 - j0,00667 \quad \text{См}.$$

Подставляем значения комплексных ЭДС и проводимостей в формулу для определения напряжения:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{12} &= \frac{\dot{E}_2 Y_2 - \dot{E}_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} = \frac{100 e^{j90^\circ} \cdot 0,025 e^{-j90^\circ} - 60 e^{j60^\circ} \cdot 0,0146 e^{-j27^\circ}}{0,01818 - j0,02558} = \\ &= 58,09 e^{j39^\circ} = 45,21 + j36,48, \quad \text{В}. \end{aligned}$$

Пользуясь законом Ома рассчитываем токи в ветвях схемы, произвольно выбранные положительные направления которых показаны на рис. 2.3:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{12}}{Z_1} = \frac{58,09 e^{j39^\circ}}{80 - j100} = j0,4536 = 0,454 e^{j90^\circ} \text{ А},$$

$$\dot{I}_2 = \frac{-\dot{U}_{12} + \dot{E}_2}{Z_2} = \frac{-45,21 - j36,48 + j100}{j40} = 1,588 + j1,13 = 1,949 e^{j35^\circ} \text{ А},$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{12} + \dot{E}_3}{Z_3} = \frac{45,21 + j36,48 + 30 + j52}{60 + j30} = 1,593 + j0,676 = 1,731 e^{j23^\circ} \text{ А}.$$

4. Построение топографической диаграммы, совмещенную с векторной диаграммой токов.

Решение. Для построения топографической диаграммы рассчитываем потенциалы всех точек схемы (рис. 2.3), приняв потенциал второго узла $\varphi_2=0$:

$$\dot{\varphi}_3 = \dot{\varphi}_2 + (-j/\omega C_1)\dot{I}_1 = 0 + (-j100) \cdot j0,454 = 45,4 \quad \text{В},$$

$$\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_3 + R_1 \dot{I}_1 = 45,4 + 80 \cdot j0,454 = 45,4 + j36,32 \quad \text{В}.$$

Как видно из расчетов, значение потенциала первого узла с допустимой погрешностью получилось такое же, как и в методе двух узлов.

$$\dot{\varphi}_5 = \dot{\varphi}_1 + \dot{E}_3 = 45,4 + j36,32 + 30 + j52 = 75,4 + j88,32 \quad \text{В},$$

$$\dot{\phi}_6 = \dot{\phi}_5 - j\omega L_3 \dot{I}_3 = 75,4 + j88,32 - (j30) \cdot (1,593 + j0,676) =$$

$$= 95,68 + j40,53 \text{ В},$$

$$\dot{\phi}_2 = \dot{\phi}_6 - R_3 \dot{I}_3 = 95,68 + j40,53 - 60 \cdot (1,593 + j0,676) =$$

$$= 95,68 + j40,53 - 95,58 - j40,56 \approx 0 \text{ В},$$

$$\dot{\phi}_4 = \dot{\phi}_2 - j\omega L_2 \dot{I}_2 = 0 - j40 \cdot (1,588 + j1,13) = 45,2 - j63,52 \text{ В}.$$

На комплексной плоскости строим топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов (рис. 2.4).

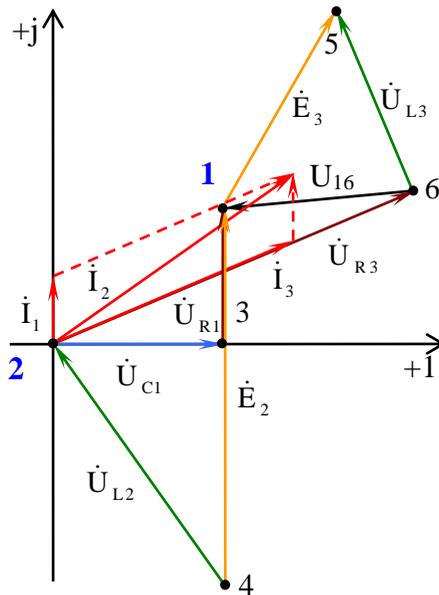


Рис. 2.4

Вектора напряжений на диаграмме показываем как разность соответствующих векторов комплексных потенциалов. Напряжения элементов на диаграмме откладываем в порядке следования этих элементов на схеме (рис.2.3).

Показываем на диаграмме выполнение законов Кирхгофа:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 - \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0, \\ \dot{U}_{R1} + \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{L2} = \dot{E}_2, \\ \dot{U}_{L2} + \dot{U}_{L3} + \dot{U}_{R3} = \dot{E}_2 + \dot{E}_3. \end{cases}$$

5. Определение напряжения между точками схемы по топографической диаграмме.

Решение. На примере схемы цепи рис. 2.3 получаем напряжение между точками 1 и 6 как разность потенциалов $\dot{U}_{16} = \dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_6$. Так как вектора комплексных потенциалов не изображают на плоскости, а показывают только точки, соответствующие концам этих векторов, вектор напряжения \dot{U}_{36} получаем с помощью правила вычитания векторов путем соединения точек 1 и 6 на плоскости. Стрелку вектора направляем \dot{U}_{16} в точку с большим потенциалом, т.е. в точку 1 (рис. 2.4).

6. Запись мгновенных значений тока ветви без ЭДС и напряжения на ее зажимах. Построение временных зависимостей этих функций в одних осях координат.

Запись мгновенных значений электрических величин может быть получена из их комплексной формы записи. При построении временных диаграмм необходимо помнить, что если синусоида имеет ненулевую начальную фазу, то она смешается относительно начала координат: влево – если начальная фаза больше нуля $\psi > 0$; вправо – если начальная фаза меньше нуля $\psi < 0$.

Решение. Для схемы цепи, представленной на рис. 2.3, были получены в комплексной форме значения тока и напряжения:

$$\dot{I}_1 = 0,4536e^{j90,2^\circ} \text{ А}; \quad \dot{U}_{12} = 58,09e^{j39,9^\circ} \text{ В.}$$

Записываем мгновенные значения тока и напряжения:

$$i_1(t) = \sqrt{2} \cdot 0,4536 \sin(1000 t + 90,2^\circ) \text{ А},$$

$$u_{12}(t) = \sqrt{2} \cdot 58,09 \sin(1000 t + 39,9^\circ) \text{ В.}$$

Временные диаграммы заданных синусоидальных функций построены на рис. 2.5.

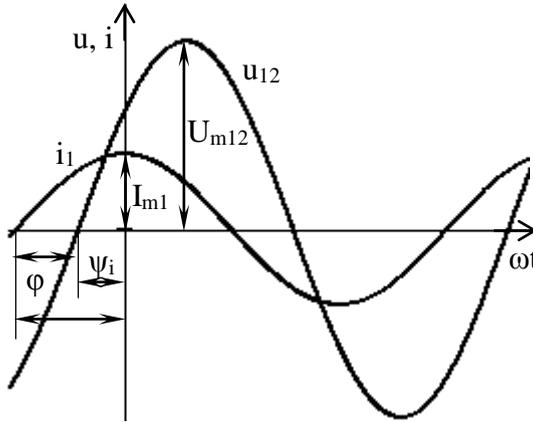


Рис. 2.5

7. Расчет комплексных мощностей приемников и источника цепи. Проверка баланса комплексных мощностей.

Решение. Для схемы цепи рис. 2.3 определяем комплексную мощность приемников:

$$\begin{aligned}\tilde{S}_{\text{пр}} &= Z_1 I_1^2 + Z_2 I_2^2 + Z_3 I_3^2 = (R_1 - jX_{C1}) I_1^2 + jX_{L2} I_2^2 + (R_3 + jX_{L3}) I_3^2 = \\ &= 80 \cdot 0,4536^2 - j100 \cdot 0,4536^2 + j40 \cdot 1,95^2 + 60 \cdot 1,731^2 + j30 \cdot 1,731^2 = \\ &= 196,24 + j221,4 = \sqrt{196,24^2 + 221,4^2} \cdot e^{j \arctg \frac{221,4}{196,24}} = 295,85 e^{j48} \text{ ВА}.\end{aligned}$$

Рассчитываем комплексную мощность источников рассматриваемой схемы цепи (рис. 2.3):

$$\begin{aligned}\tilde{S}_{\text{ист}} &= \dot{E}_2^* I_2 + \dot{E}_3^* I_3 = 100 \cdot e^{j90^\circ} \cdot 1,95 \cdot e^{-j35,4^\circ} + 60 \cdot e^{j60^\circ} \cdot 1,731 \cdot e^{-j23^\circ} = \\ &= 196,19 + j220,85 = \sqrt{196,19^2 + 220,85^2} e^{j \arctg \frac{220,85}{196,19}} = 295,4 e^{j48} \text{ ВА}\end{aligned}$$

$$\tilde{S}_{\text{пр}} = \tilde{S}_{\text{ист}}, \quad 295,85 e^{j48} \text{ ВА} = 295,4 e^{j48} \text{ ВА}.$$

В схеме (рис. 2.3) баланс мощностей выполняется.

Расчетно-графическая работа № 3

АНАЛИЗ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ

Номер варианта выбирается согласно порядковому номеру студента в журнале группы. К трехфазному генератору, создающему симметричную трехфазную систему синусоидальных ЭДС, фазы которого соединены по схеме «звезда», подключены:

а) нагрузка, фазы которой соединены по схеме «звезда» с нейтральным проводом;

б) нагрузка, фазы которой соединены по схеме «треугольник».

Набор элементов, включенных в фазы нагрузки и в нулевой провод, задан согласно варианту в табл. 3.1 – для «звезды» и в табл. 3.2 – для «треугольника».

ЭДС фазы генератора $E_{\Phi}=220$ В.

Параметры элементов цепи:

$R_1=100$ Ом, $R_2=150$ Ом, $X_{L1}=100$ Ом, $X_{L2}=200$ Ом,
 $X_{C1} = 100$ Ом, $X_{C2} = 200$ Ом.

Задание

1. По составу элементов каждой фазы начертить расчетные схемы замещения трехфазных электрических цепей, нагрузка которых соединена по схеме «звезда» и «треугольник».

2. Для каждой схемы рассчитать фазные и линейные токи и напряжения, построить топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов. На диаграмме показать линейные и фазные напряжения источника и приемников, напряжение смещения нейтрали.

3. Для каждой схемы определить активную и реактивную мощности приемников и трехфазного источника энергии. Составить уравнение баланса мощностей.

Таблица 3.1

№ вар.	Z _a	Z _b	Z _c	Z _n
Исходные данные для первой группы (ЭП)				
1	$X_{C2} X_{L2}$	$X_{L2} R_1$	$X_{L2} R_1$	X_{L1}, X_{C1}
2	$X_{C2} X_{L2}$	$X_{C1} R_1$	$X_{C1} R_1$	$X_{C2} X_{L2}$
3	$R_2, X_{L1} R_1$	X_{L2}, X_{C2}	$X_{L1} R_1$	$R_2, X_{L1} R_1$
4	$X_{L1} R_1$	X_{L2}, X_{C2}, R_2	$X_{L1} R_1$	X_{L2}, X_{C2}
5	$X_{C1} X_{L1}$	$X_{L2} R_2$	$X_{L2} R_2$	X_{L1}, R_2
6	$X_{L1} R_1$	X_{L2}, X_{C2}, R_2	$X_{L1} R_1$	$X_{C1} X_{L1}$
7	X_{L1}, X_{C2}, R_1	$X_{C1} X_{L1}$	X_{L1}, R_2	0
8	X_{L2}, X_{C2}	$X_{L1} R_1$	$X_{L1} R_1$	$X_{L1} R_1$
9	$X_{L1} R_1$	X_{L2}, X_{C2}, R_1	X_{L1}, X_{C1}, R_2	X_{L1}, X_{C1}
10	$X_{C1} R_1$	$X_{L2} R_2$	$X_{L2} R_2$	X_{C2}, R_2
11	$R_2, X_{L1} R_1$	X_{L2}, X_{C2}	$X_{L1} R_1$	$X_{C1} R_1, X_{L1}$
12	$R_2, X_{L1} R_1$	$X_{C1} R_1, X_{L1}$	$X_{L1} R_1$	0
13	X_{L1}, X_{C2}, R_1	X_{L1}, X_{C2}, R_1	X_{L1}, X_{C1}	$X_{C2} R_1$
14	X_{L1}, X_{C2}, R_1	X_{L1}, X_{C2}, R_1	$X_{C1} X_{L1}$	$X_{C2} X_{L2}$
15	$X_{C1} R_1$	X_{L1}, X_{C1}	$X_{L1} R_2$	X_{L1}, X_{C2}
16	$X_{L1} R_1$	$X_{C1} R_1$	X_{L1}, X_{C1}	X_{L1}, R_2
17	$X_{C2} X_{L2}$	$X_{C1} R_1$	$X_{C1} R_1$	X_{L2}, X_{C2}
18	X_{L2}, X_{C2}	X_{L1}, X_{C2}, R_1	$X_{C1} R_2$	$X_{C2} R_1$
19	X_{L1}, X_{C2}, R_2	X_{L2}, X_{C2}, R_2	X_{L1}, X_{C2}, R_2	0
20	$X_{L1} R_1$	$X_{L1} R_1$	$R_2, X_{L2} R_1$	X_{C2}, R_2
21	$X_{L1} R_2$	$X_{L1} R_2$	$X_{L1} R_1$	$X_{L1} R_1$
22	X_{L2}, X_{C2}, R_2	X_{L1}, X_{C1}	$X_{C1} R_2$	X_{C2}, R_2
23	X_{C2}	X_{L1}, X_{C2}	X_{L1}	$X_{C1} X_{L1}$
24	X_{L2}, X_{C2}, R_2	X_{L1}, X_{C2}, R_1	$X_{C1} R_2$	X_{L1}, X_{C1}
25	$R_1, X_{L1} R_1$	$R_1, X_{L1} R_1$	$R_2, X_{L2} R_1$	$X_{C1} R_2$

№ вар.	Z _a	Z _b	Z _c	Z _n
Исходные данные для второй группы (ЭМ)				
1	X _{L2} , X _{C2} , R ₁	X _{C1} X _{L1}	X _{L1} , R ₂	X _{C1} R ₂
2	X _{C2} R ₁	X _{C1} R ₂	X _{C1} R ₂	0
3	X _{C2} , R ₁	X _{C1} X _{L1}	X _{L1} , R ₂	R ₂ , X _{L2} R ₁
4	R ₁ , X _{L1} R ₁	R ₁ , X _{L1} R ₁	R ₂ , X _{L2} R ₁	X _{C2} X _{L2}
5	X _{L1} , X _{C2} , R ₁	X _{L1} , X _{C2} , R ₁	X _{C2} , R ₁	R ₂ , X _{L2} R ₁
6	X _{C2} X _{L2}	X _{L2} , X _{C2}	X _{L1} R ₁	X _{C1} X _{L1}
7	X _{C2} X _{L2}	X _{C1} R ₁ , X _{L1}	X _{C1} R ₂	0
8	R ₂ , X _{L1} R ₁	X _{L1} , X _{C2} , R ₁	X _{L1}	X _{L1} R ₁
9	X _{L1} R ₁	X _{L1} , X _{C2} , R ₁	X _{C1} R ₂	X _{L1} , X _{C1}
10	X _{C1} X _{L1}	X _{L1} , X _{C1}	R ₂ , X _{L2} R ₁	X _{C2} , R ₂
11	X _{L1} R ₁	X _{C1} R ₁	X _{L2} R ₁	X _{C1} R ₁ , X _{L1}
12	X _{L1} , X _{C2} , R ₁	X _{C1} R ₁	X _{C1} R ₁	0
13	X _{L2} , X _{C2}	X _{L1} , X _{C2} , R ₁	X _{L1} R ₁	X _{C2} R ₁
14	X _{L1} R ₁	X _{L2} , X _{C2} , R ₂	X _{L1} R ₁	X _{C2} X _{L2}
15	X _{C1} R ₁	X _{L1} R ₁	X _{L2} R ₂	X _{L1} , X _{C2}
16	R ₂ , X _{L1} R ₁	X _{L1} R ₂	X _{L1} R ₁	X _{L1} , R ₂
17	R ₂ , X _{L1} R ₁	X _{L1} , X _{C1}	X _{L1} , R ₂	X _{L2} , X _{C2}
18	X _{L1} , X _{C2} , R ₁	X _{L1} , X _{C2}	X _{L1} R ₁	X _{C2} R ₁
19	X _{L1} , X _{C2} , R ₁	X _{L1} , X _{C2} , R ₁	X _{L1} , X _{C1} , R ₂	0
20	X _{C1} R ₁	R ₁ , X _{L1} R ₁	X _{L2} R ₂	X _{C2} , R ₂
21	X _{L1} R ₁	X _{L2} R ₁	X _{L1} R ₁	X _{L1} R ₁
22	X _{C2} X _{L2}	X _{C1} R ₁	X _{L1} R ₁	X _{C2} , R ₂
23	X _{L2} , X _{C2}	X _{L2} , X _{C2}	X _{L1} , X _{C1}	X _{C1} X _{L1}
24	X _{L1} , X _{C2} , R ₂	X _{L2} , X _{C2} , R ₂	X _{C1} X _{L1}	X _{L1} , X _{C1}
25	X _{L1} R ₁	X _{L2} R ₂	X _{L1} R ₂	X _{C1} R ₂

Продолжение табл. 3.1

№ вар.	Z _a	Z _b	Z _c	Z _n
Исходные данные для третьей группы (ЭС)				
1	$X_{L1} R_2$	X_{L2}, X_{C2}, R_2	X_{L1}, X_{C1}	X_{L1}, X_{C1}
2	X_{L2}, X_{C2}, R_2	$X_{C1} X_{L1}$	$X_{C1} R_1$	$X_{C2} X_{L2}$
3	X_{C2}	$X_{L1} R_1$	$X_{C1} R_2$	$R_2, X_{L1} R_1$
4	X_{L2}, X_{C2}, R_2	X_{L2}, X_{C2}, R_1	X_{L1}, X_{C2}, R_2	X_{L2}, X_{C2}
5	$R_1, X_{L1} R_1$	$X_{L2} R_2$	$R_2, X_{L2} R_1$	X_{L1}, R_2
6	$X_{L2} R_1$	X_{L2}, X_{C2}, R_1	$X_{L1} R_1$	X_{L1}, R_2
7	$X_{C1} R_1$	$X_{C2} R_1$	X_{L1}, X_{C2}, R_1	X_{L2}, X_{C2}
8	$X_{L1} R_1$	X_{C2}, R_1	X_{L2}, X_{C2}	$X_{C2} R_1$
9	$X_{L1} R_1$	$R_1, X_{L1} R_1$	$X_{L1} R_1$	0
10	$X_{L2} R_2$	X_{L1}, X_{C2}, R_1	$X_{C1} R_1$	X_{C2}, R_2
11	$X_{L1} R_1$	$X_{C2} X_{L2}$	$R_2, X_{L1} R_1$	$X_{L1} R_1$
12	X_{L1}, R_2	$X_{C2} X_{L2}$	$R_2, X_{L1} R_1$	X_{C2}, R_2
13	$X_{L1} R_1$	$R_2, X_{L1} R_1$	X_{L1}, X_{C2}, R_1	$X_{C1} X_{L1}$
14	X_{L1}, X_{C1}, R_2	$X_{L1} R_1$	X_{L1}, X_{C2}, R_1	X_{L1}, X_{C1}
15	$X_{L2} R_2$	$X_{C1} X_{L1}$	$X_{C1} R_1$	$X_{C1} R_2$
16	$X_{L1} R_1$	$X_{L1} R_1$	$X_{L1} R_1$	$X_{C1} R_2$
17	$X_{L1} R_1$	X_{L1}, X_{C2}, R_1	$X_{C2} X_{L2}$	0
18	X_{L1}, X_{C1}	X_{L2}, X_{C2}	X_{L2}, X_{C2}	$R_2, X_{L2} R_1$
19	$X_{C1} X_{L1}$	$X_{L1} R_1$	X_{L1}, X_{C2}, R_2	$X_{C2} X_{L2}$
20	$X_{L1} R_2$	$X_{C1} R_1$	$X_{L1} R_1$	$R_2, X_{L2} R_1$
21	X_{L1}, X_{C1}	$R_2, X_{L1} R_1$	$X_{L1} R_2$	$X_{C1} X_{L1}$
22	$X_{C1} R_1$	$R_2, X_{L1} R_1$	X_{L2}, X_{C2}, R_2	0
23	$X_{C1} R_2$	X_{L1}, X_{C2}, R_1	X_{C2}	$X_{L1} R_1$
24	X_{L1}, X_{C2}, R_2	X_{L1}, X_{C2}, R_1	X_{L2}, X_{C2}, R_2	X_{L1}, X_{C1}
25	$R_2, X_{L2} R_1$	$X_{C1} R_1$	$R_1, X_{L1} R_1$	X_{C2}, R_2

Таблица 3.2

№ вар.	Z_{ab}	Z_{bc}	Z_{ca}
Исходные данные для первой группы (ЭП)			
1	X_{L1}, X_{C2}, R_1	$X_{C1} X_{L1}$	X_{L1}, R_2
2	$X_{L1} R_1$	$X_{C1} R_1$	$X_{L1} R_1$
3	$R_2, X_{L1} R_1$	$X_{C1} R_1, X_{L1}$	$X_{L1} R_1$
4	X_{L1}, X_{C2}	$X_{L1} R_1$	$X_{C1} X_{L1}$
5	X_{C2}	X_{L1}, X_{C2}	X_{L1}
6	R_2, R_1	R_2	$X_{L1} R_1$
7	X_{L1}, X_{C2}	$X_{C1} R_1$	R_2, R_1
8	X_{L1}, X_{C1}, R_1	$X_{L2} R_2$	$X_{C1} X_{L1}$
9	$X_{C2} X_{L2}$	$X_{L2} R_1$	$X_{L2} R_1$
10	$X_{L1} R_1$	X_{L2}, X_{C1}, R_1	$X_{C2} X_{L2}$
11	$X_{L1} R_2$	$X_{L1} R_2$	$X_{L1} R_1$
12	X_{L2}, X_{C1}, R_2	$X_{C1} X_{L1}$	X_{L1}, X_{C2}, R_2
13	$X_{L1} R_1$	X_{L2}, X_{C2}, R_2	$X_{L1} R_1$
14	X_{L1}, X_{C2}, R_2	X_{L2}, X_{C2}, R_2	X_{L1}, X_{C2}, R_2
15	X_{L1}, X_{C2}, R_1	$X_{C2} R_1$	X_{L1}, X_{C2}, R_2
16	$X_{L1} R_1$	X_{L2}, X_{C2}, R_1	X_{L1}, X_{C1}, R_2
17	$X_{L1} R_1$	X_{L2}, X_{C2}, R_1	$X_{L1} R_1$
18	X_{L1}, X_{C2}, R_1	X_{L1}, X_{C2}, R_1	$X_{C1} X_{L1}$
19	X_{L2}, X_{C2}, R_2	X_{L1}, X_{C2}, R_1	$X_{C1} R_2$
20	$X_{C2} R_1$	X_{L1}, X_{C1}, R_2	$X_{C2} R_1$
21	X_{L1}, X_{C1}, R_2	X_{L2}, X_{C2}, R_2	$R_2, X_{L1} R_1$
22	$R_1, X_{L1} R_1$	$R_1, X_{L1} R_1$	$R_2, X_{L2} R_1$
23	X_{L1}, X_{C2}, R_2	X_{L1}, X_{C2}, R_2	$R_2, X_{L1} R_1$
24	$X_{C1} X_{L1}$	X_{L1}, X_{C2}, R_2	X_{L2}, X_{C2}, R_1
25	$X_{C1} R_1$	$X_{L2} R_2$	$X_{L2} R_2$

№ вар.	Z_{ab}	Z_{bc}	Z_{ca}
Исходные данные для второй группы (ЭМ)			
1	X_{L2}, X_{C1}, R_2	X_{L2}, X_{C1}, R_2	X_{L2}, X_{C1}, R_2
2	X_{L2}, X_{C2}, R_2	$X_{C1} X_{L1}$	$X_{C2} R_2$
3	$X_{C2} R_1$	$X_{C1} R_2$	$X_{C1} R_2$
4	$R_2, X_{L1} R_1$	X_{L1}, X_{C2}, R_2	X_{L1}, X_{C2}, R_1
5	$X_{C2} X_{L2}$	$X_{C1} R_1$	$X_{C1} R_1$
6	X_{L1}, R_2	X_{L1}, X_{C1}, R_2	$X_{L1} R_2$
7	$X_{L1} R_1$	$R_1, X_{L1} R_1$	$X_{C1} X_{L1}$
8	$X_{L1} R_1$	X_{L1}, X_{C2}, R_2	X_{L2}, X_{C2}, R_2
9	$X_{C1} X_{L1}$	$X_{C1} X_{L1}$	X_{L2}, X_{C2}, R_2
10	X_{L1}	$X_{C1} R_1$	$X_{C2} R_1$
11	$X_{L1} R_1$	X_{L2}, X_{C1}, R_2	X_{L2}, X_{C2}, R_1
12	R_2, R_1	X_{L2}, X_{C2}, R_2	X_{L2}, X_{C2}, R_1
13	$X_{C1} X_{L1}$	$X_{C2} R_1$	X_{L1}, X_{C2}, R_1
14	$X_{L2} R_1$	X_{L1}, X_{C2}, R_2	X_{L1}, X_{C2}, R_1
15	$X_{C2} X_{L2}$	$X_{C1} R_1$	X_{L1}, X_{C1}, R_2
16	$X_{L1} R_1$	X_{L1}, X_{C2}, R_1	X_{L2}, X_{C2}, R_2
17	X_{L1}, X_{C2}, R_2	$X_{L1} R_1$	$R_1, X_{L1} R_1$
18	$X_{L1} R_1$	$R_2, X_{L1} R_1$	X_{L1}, X_{C2}, R_2
19	X_{L1}, X_{C2}, R_2	X_{L1}, X_{C2}	X_{L1}, X_{C2}, R_2
20	X_{L1}, X_{C2}, R_2	X_{C2}	$X_{L2} R_2$
21	X_{L1}, X_{C1}, R_2	R_2, R_1	X_{L2}, X_{C1}, R_2
22	$X_{L1} R_1$	X_{L1}, X_{C2}	$X_{C1} X_{L1}$
23	$X_{C1} X_{L1}$	X_{L1}, X_{C1}, R_1	$X_{C1} R_2$
24	$X_{C1} R_2$	$X_{C2} X_{L2}$	X_{L1}, X_{C2}, R_2
25	$X_{C2} R_1$	$X_{L1} R_1$	$X_{C1} R_1$

№ вар.	Z_{ab}	Z_{bc}	Z_{ca}
Исходные данные для третьей группы (ЭС)			
1	$R_2, X_{L1} \parallel R_1$	$X_{L1} \parallel R_2$	$X_{C1} \parallel X_{L1}$
2	$R_2, X_{L2} \parallel R_1$	X_{L2}, X_{C1}, R_2	$X_{C1} \parallel R_1$
3	$R_2, X_{L1} \parallel R_1$	$X_{L1} \parallel R_1$	$X_{C1} \parallel R_1, X_{L1}$
4	X_{L2}, X_{C2}, R_1	X_{L1}, X_{C2}, R_2	$X_{L1} \parallel R_1$
5	$X_{L2} \parallel R_2$	X_{L1}, X_{C2}, R_1	X_{L1}, X_{C2}
6	X_{L2}, X_{C1}, R_2	$X_{L1} \parallel R_1$	R_2
7	$X_{C2} \parallel R_2$	$X_{L1} \parallel R_1$	$X_{C1} \parallel R_1$
8	$X_{C1} \parallel R_2$	X_{L1}, X_{C2}, R_1	$X_{L2} \parallel R_2$
9	X_{L1}, X_{C2}, R_1	X_{L2}, X_{C2}, R_2	$X_{L2} \parallel R_1$
10	$X_{C1} \parallel R_1$	$X_{C2} \parallel R_1$	X_{L2}, X_{C1}, R_1
11	$X_{C1} \parallel X_{L1}$	$X_{L1} \parallel R_1$	$X_{L1} \parallel R_2$
12	$X_{C1} \parallel R_1$	R_2, R_1	X_{L2}, X_{C1}, R_2
13	$X_{C1} \parallel R_1, X_{L1}$	$X_{C1} \parallel X_{L1}$	$X_{L1} \parallel R_1$
14	$X_{L1} \parallel R_1$	$X_{L2} \parallel R_1$	X_{L1}, X_{C2}, R_2
15	X_{L1}, X_{C2}	$X_{C2} \parallel X_{L2}$	X_{L1}, X_{C2}, R_1
16	R_2	$X_{L1} \parallel R_1$	$X_{L1} \parallel R_1$
17	$X_{C1} \parallel R_1$	X_{L1}, X_{C2}, R_2	$X_{L1} \parallel R_1$
18	$X_{L2} \parallel R_2$	$X_{L1} \parallel R_1$	X_{L1}, X_{C2}, R_1
19	$X_{L2} \parallel R_1$	X_{L1}, X_{C2}, R_2	X_{L2}, X_{C2}, R_2
20	X_{L2}, X_{C1}, R_1	X_{L1}, X_{C2}, R_2	$X_{C2} \parallel R_1$
21	$X_{L1} \parallel R_2$	X_{L1}, X_{C1}, R_2	X_{L1}, X_{C1}, R_2
22	$X_{C1} \parallel X_{L1}$	$X_{L1} \parallel R_1$	$R_1, X_{L1} \parallel R_1$
23	X_{L2}, X_{C2}, R_2	$X_{C1} \parallel X_{L1}$	X_{L1}, X_{C2}, R_2
24	X_{L2}, X_{C2}, R_2	$X_{C1} \parallel R_2$	$X_{C1} \parallel X_{L1}$
25	$X_{C2} \parallel R_1$	$X_{C2} \parallel R_1$	$X_{C1} \parallel R_1$

Методические указания к выполнению работы

1. Составление схем замещения трехфазных электрических цепей, нагрузка которых соединена по схеме «звезда» и

«треугольник». В табл. 3.1 и табл. 3.2 указаны элементы, расположенные в фазах приемников согласно варианту. Через запятую перечислены элементы, соединенные последовательно, а через знак «||» - элементы, соединенные параллельно.

В трехфазных сетях принято с помощью цветов маркировать изоляцию жил фаз, нулевого провода и провода заземления. Так для маркировки фазы «а» используют желтый цвет, фазы «в» - зеленый цвет, фазы «с» - красный цвет, нулевого рабочего провода - голубой цвет. Для улучшения восприятия теоретического материала такое же цветовое обозначение применим в дальнейшем для маркировки фаз источника и нагрузки и на векторных диаграммах для изображения фазных напряжений, фазных и линейных токов, напряжения смещения нейтрали и тока нулевого провода.

При питании от источника электрической энергии, фазы которого соединены по схеме «звезда» линейные напряжения источника больше фазных напряжений в $\sqrt{3}$ раз: $U_{л} = \sqrt{3} U_{ф}$. Так как каждый линейный провод подключен к началу соответствующей фазы, то линейные и фазные токи равны: $I_{л} = I_{ф}$.

Если все фазы нагрузки содержат приемники, такой режим работы называют полнофазным. В случае обрыва провода в фазе или короткого замыкания в фазе нагрузка становится неполнофазной. При полнофазном режиме работы в случае отсутствия сопротивлений в линейных проводах линейные напряжения нагрузки равны линейным напряжениям источника.

2. Определение линейных и фазных токов и напряжений в трехфазной нагрузке, соединенной по схеме «звезда». Построение топографической диаграммы, совмещенной с векторной диаграммой токов. Определение активной и реактивной мощности нагрузки. При соединении фаз нагрузки по схеме «звезда» линейные токи схемы равны фазным токам нагрузки.

2.1. Пример полнофазной нагрузки, соединенной по схеме «**звезда с нулевым проводом**» показан на рис. 3.1, где каждая фаза обозначена соответствующим цветом, стрелки токов изображены красным цветом, а стрелки напряжений – зеленым цветом.

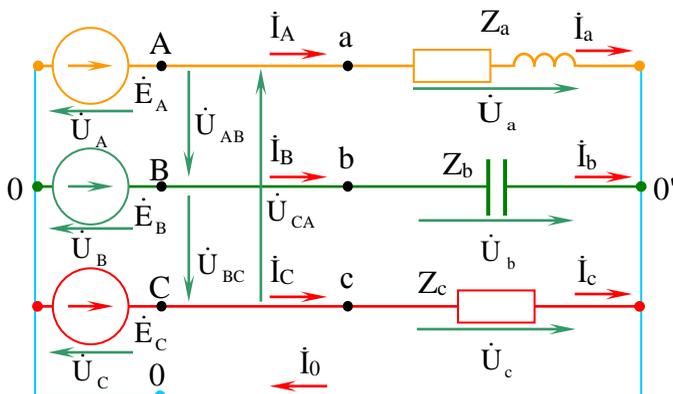


Рис. 3.1

Пример. Питание полнофазной схемы (рис. 3.1) осуществляется от источника электрической энергии, фазы которого соединены по схеме «звезда», напряжение фазы $U_{\phi} = 127$ В.

Параметры элементов цепи: $R = X_L = X_C = 100$ Ом.

Решение. Так как сопротивление нулевого провода равно нулю, то напряжение смещения нейтрали в схеме рис. 3.1 отсутствует и фазные напряжения приемника равны соответствующим фазным напряжениям источника.

2.1.1. Фазные напряжения нагрузки:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A = 127 e^{j0^\circ} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B = 127 e^{-j120^\circ} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C = 127 e^{j120^\circ} \text{ В.}$$

Линейное напряжение источника:

$$U_{Л} = \sqrt{3} U_{Ф} = \sqrt{3} 127 = 220 \text{ В.}$$

Линейные напряжения нагрузки:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB} = 220e^{j30^\circ} \text{ В,} \quad \dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC} = 220e^{-j90^\circ} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{CA} = 220e^{j150^\circ} \text{ В.}$$

Комплексные сопротивления фаз нагрузки:

$$Z_a = R + jX_L = 100 + j100 = 141e^{j45^\circ} \text{ Ом,}$$

$$Z_b = -jX_c = -j100 = 100e^{-j90^\circ} \text{ Ом,}$$

$$Z_c = R = 100 \text{ Ом.}$$

Фазные токи приемников равны линейным токам сети, комплексные величины которых определяем по закону Ома:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_A = \frac{\dot{U}_a}{Z_a} = \frac{127e^{j0^\circ}}{141e^{j45^\circ}} = 0,9e^{-j45^\circ} \text{ А,}$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_b}{Z_b} = \frac{127e^{-j120^\circ}}{100e^{-j90^\circ}} = 1,27e^{-j30^\circ} \text{ А,}$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_c}{Z_c} = \frac{127e^{j120^\circ}}{100} = 1,27e^{j120^\circ} \text{ А.}$$

Ток в нулевом проводе определяем с помощью первого закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{I}_0 &= \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0,9e^{-j45^\circ} + 1,27e^{-j30^\circ} + 1,27e^{j120^\circ} = \\ &= 0,636 - j0,636 + 1,1 - j0,635 - 0,635 + j1,1 = \\ &= 1,101 - j0,171 = 1,114e^{-j9^\circ} \text{ А.} \end{aligned}$$

2.1.2. На комплексной плоскости строим топографическую диаграмму схемы (рис. 3.1), совмещенную с векторной диаграммой токов (рис. 3.2).

2.1.3. Пример расчета активной, реактивной и полной мощности приемников:

Решение. Активная мощность:

$$P = RI_a^2 + RI_c^2 = 100 \cdot 0,9^2 + 100 \cdot 1,27^2 = 242,3 \text{ Вт;}$$

реактивная мощность:

$$Q = X_L I_a^2 - X_C I_b^2 = 100 \cdot 0,9^2 - 100 \cdot 1,27^2 = -80,3 \text{ ВАр};$$

полная мощность:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{242,3^2 + (-80,3)^2} = 255,3 \text{ ВА}.$$

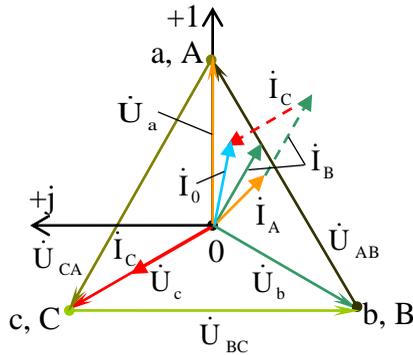


Рис. 3.2

2.2. Пример неполнофазного режима нагрузки, соединенной по схеме «звезда с нулевым проводом», обусловленного обрывом провода в фазе «В» показан на рис. 3.3.

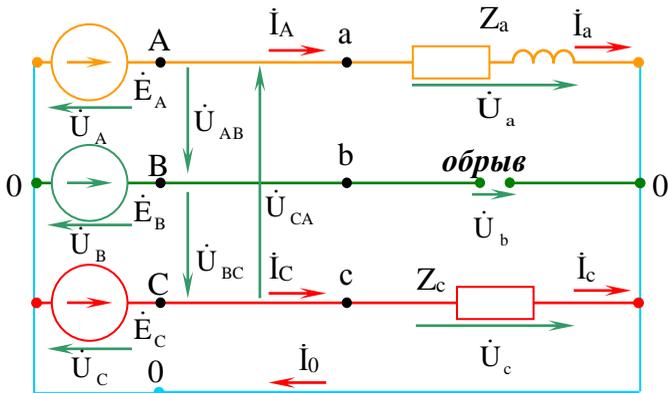


Рис. 3.3

Решение. В схеме с нулевым проводом потенциалы начал фаз приемников, равные потенциалам начал фаз источника, не изменятся.

2.2.1. Потенциал нулевой точки приемника при наличии нулевого провода останется равным потенциалу нулевой точки генератора, поэтому фазные напряжения приемника будут равны соответствующим фазным напряжениям источника.

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A = 127 e^{j0^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B = 127 e^{-j120^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C = 127 e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Фазные токи приемников и линейные токи сети определим по закону Ома:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_A = \frac{\dot{U}_a}{Z_a} = \frac{127 e^{j0^\circ}}{141 e^{j45^\circ}} = 0.9 e^{-j45^\circ} \text{ А},$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_c}{Z_c} = \frac{127 e^{j120^\circ}}{100} = 1.27 e^{j120^\circ} \text{ А}.$$

Ток в нулевом проводе

$$\begin{aligned} \dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_c &= 0.9 e^{-j45^\circ} + 0 + 1.27 e^{j120^\circ} = 0.636 - j0.636 - \\ &- 0.635 + j1.1 = 0.001 + j1.036 = 1.036 e^{-j89.9^\circ} \text{ А}. \end{aligned}$$

2.2.2. На комплексной плоскости строим топографическую диаграмму схемы (рис. 3.3), совмещенную с векторной диаграммой токов (рис. 3.4).

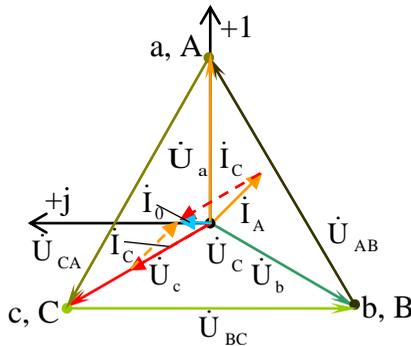


Рис. 3.4

2.3. Пример неполнофазного режима нагрузки, соединенной по схеме «звезда», обусловленного коротким замыканием в фазе «С» показан на рис. 3.5. Этот режим рассматривается только для *схемы без нулевого провода*, так как в схеме с нулевым проводом при коротком замыкании в одной из фаз приемника замыкается накоротко источник этой фазы, что является аварийным режимом.

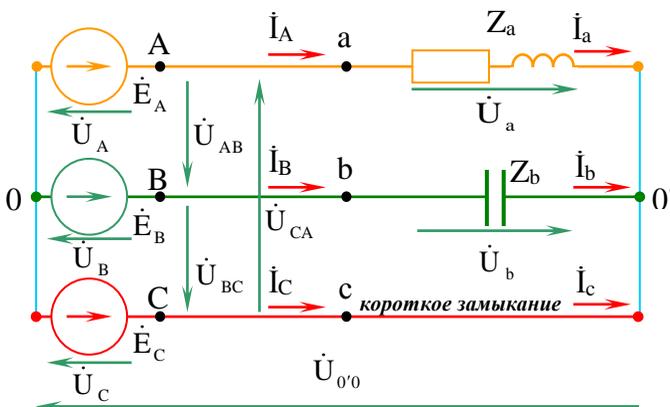


Рис. 3.5

Решение. При коротком замыкании в фазе «с» сопротивление $Z_c = 0$ и, как видно на схеме рис. 3.5, разность потенциалов между нулевой точкой приемника и нулевой точкой источника равна ЭДС фазы «С» источника.

2.3.1. Напряжение смещения нейтрали равно напряжению фазы С источника:

$$\dot{\phi}_{0'} = \dot{E}_C = \dot{U}_C = 127e^{j120^\circ} = (-63,5 + j110)\text{В}.$$

Фазные напряжения приемников:

$$\dot{U}_a = \dot{\phi}_a - \dot{\phi}_{0'} = \dot{U}_A - \dot{U}_C = -\dot{U}_{CA} = -220e^{j150^\circ} = 220e^{-j30^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_b = \dot{\phi}_b - \dot{\phi}_{0'} = \dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_{BC} = 220e^{-j90^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_c = 0.$$

Токи линейных проводов «Аа» и «Вв» и фаз «а» и «в» приемников определим по закону Ома:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a} = \frac{220e^{-j30^\circ}}{141e^{j45^\circ}} = 1,56e^{-j75^\circ} \text{ A},$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{Z_b} = \frac{220e^{-j90^\circ}}{100e^{-j90^\circ}} = 2,2e^{j0^\circ} \text{ A}.$$

Ток линейного провода «Сс» и фазы «с» приемника определяем с помощью первого закона Кирхгофа.

Для схемы без нулевого провода: $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, тогда

$$\dot{I}_C = -(\dot{I}_A + \dot{I}_B) = -(1,56e^{-j75^\circ} + 2,2e^{j0^\circ}) =$$

$$= -(0,404 - j1,507 + 2,2) = -2,604 + j1,507 = 3,09e^{j150^\circ} \text{ A}.$$

2.3.2. На комплексной плоскости строим топографическую диаграмму схемы (рис. 3.5), совмещенную с векторной диаграммой токов (рис. 3.6).

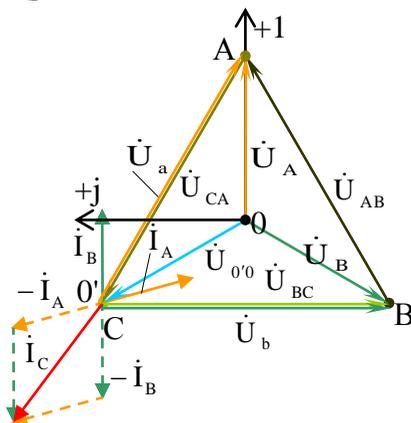


Рис. 3.6

3. Определение линейных и фазных токов и напряжений в трехфазной нагрузке, соединенной по схеме «треугольник». Построение топографической диаграммы, совмещенной с векторной диаграммой токов.

3.1. Пример полнофазной нагрузки, соединенной по схеме «треугольник» показан на рис. 3.7.

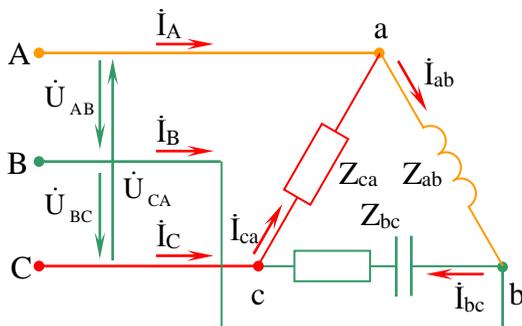


Рис. 3.7

Питание приемников осуществляется от трехфазного источника электрической энергии, фазы которого соединены по схеме «звезда», с фазным напряжением $U_{\Phi} = 127$ В.

Сопротивления фаз полнофазной нагрузки:

$Z_{ab} = jX_L = j100$ Ом, $Z_{bc} = R - jX_C = 100 - j100$ Ом, $Z_{ca} = R = 100$ Ом.

Решение. Так как фазы источника соединены по схеме «звезда» линейные напряжения источника:

$$U_{Л} = \sqrt{3} U_{\Phi} = \sqrt{3} 127 = 220 \text{ В.}$$

3.1.1. Фазные напряжения приемников, при соединении фаз нагрузки «треугольником», равны линейным напряжениям источника:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB} = 220e^{j30^\circ} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC} = 220e^{-j90^\circ} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{CA} = 220e^{j150^\circ} \text{ В.}$$

Фазные токи определяем с помощью закона Ома:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{220e^{j30^\circ}}{100e^{j90^\circ}} = 2,2e^{-j60^\circ} = 1,1 - j1,9 \text{ А,}$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}} = \frac{220e^{-j90^\circ}}{141e^{-j45^\circ}} = 1,41e^{-j45^\circ} = 1 - j1 \text{ A},$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{220e^{j150^\circ}}{100} = 2,2e^{j150^\circ} = -1,9 + j1,1 \text{ A}.$$

Линейные токи рассчитываем, воспользовавшись первым законом Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 2,2e^{-j60^\circ} - 2,2e^{j150^\circ} = \\ &= 1,1 - j1,9 + 1,9 - j1,1 = 3 - j3 = 4,24e^{-j45^\circ} \text{ A}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = 1,41e^{-j45^\circ} - 2,2e^{-j60^\circ} = \\ &= 1 - j1 - 1,1 + j1,9 = -0,1 + j0,9 = 0,906e^{j96^\circ} \text{ A}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = 2,2e^{j150^\circ} - 1,41e^{-j45^\circ} = \\ &= -1,9 + j1,1 - 1,1 + j1,1 = -3 + j2,2 = 3,72e^{j144^\circ} \text{ A}. \end{aligned}$$

3.1.2. Строим топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов (рис. 3.8).

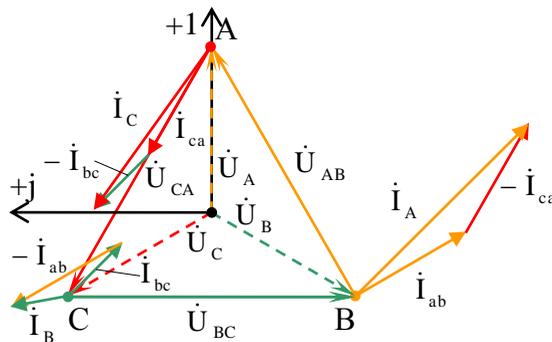


Рис. 3.8

3.2. Пример неполнофазного режима нагрузки, соединенной по схеме «**треугольник**», обусловленного обрывом нагрузки в фазе «bc» показан на рис. 3.9.

Сопротивления оставшихся фаз нагрузки:

$Z_{ab} = jX_L = j100 \text{ Ом}$, $Z_{ca} = R = 100 \text{ Ом}$; так как в фазе *bc* произошел обрыв нагрузки, то $Z_{bc} = \infty$.

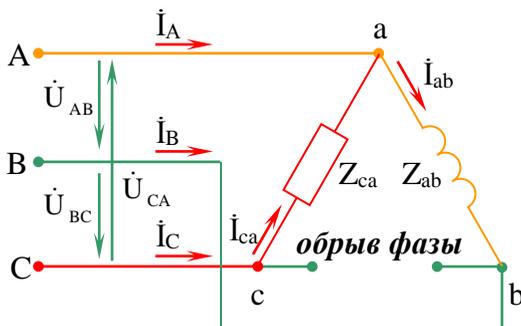


Рис. 3.9

Решение. Фазы источника соединены по схеме «звезда», поэтому линейные напряжения источника

$$U_{Л} = \sqrt{3} U_{\Phi} = \sqrt{3} 127 = 220 \text{ В.}$$

3.2.1. Фазные напряжения приемников, при соединении фаз нагрузки «треугольником», равны линейным напряжениям источника:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB} = 220e^{j30^\circ} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC} = 220e^{-j90^\circ} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{CA} = 220e^{j150^\circ} \text{ В.}$$

Фазные токи определяем с помощью закона Ома:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{220e^{j30^\circ}}{100e^{j90^\circ}} = 2,2e^{-j60^\circ} = 1,1 - j1,9 \text{ А,}$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}} = \frac{220e^{-j90^\circ}}{\infty} = 0,$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{220e^{j150^\circ}}{100} = 2,2e^{j150^\circ} = -1,9 + j1,1 \text{ А.}$$

Линейные токи рассчитываем, воспользовавшись первым законом Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 2,2e^{-j60^\circ} - 2,2e^{j150^\circ} = \\ &= 1,1 - j1,9 + 1,9 - j1,1 = 3 - j3 = 4,24e^{-j45^\circ} \text{ A,} \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = -\dot{I}_{ab} = -2,2e^{-j60^\circ} = 2,2e^{j120^\circ} \text{ A,} \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ca} = 2,2e^{j150^\circ} \text{ A.} \end{aligned}$$

3.2.2 Строим топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов (рис. 3.9).

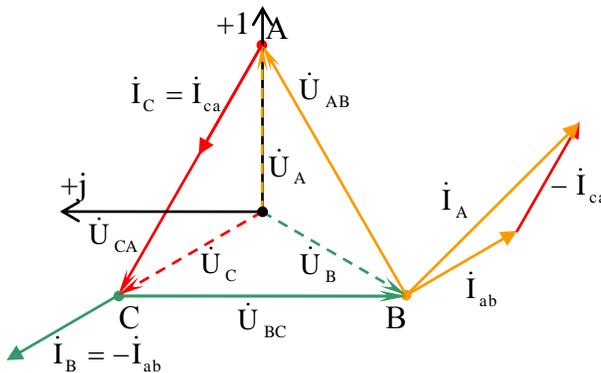


Рис. 3.10

3.3. Пример неполнофазного режима нагрузки, соединенной по схеме «**треугольник**», обусловленного обрывом линейного провода фазы «С» ($Z_{Cc}=\infty$) показан на рис. 3.11.

Питание осуществляется от трехфазного источника, создающего симметричную трехфазную систему синусоидальных ЭДС, фазы которого соединены по схеме «звезда» с фазным напряжением $U_\Phi=127 \text{ В}$. Сопротивления фаз нагрузки:

$$Z_{ab} = jX_L = j100 \text{ Ом, } Z_{bc} = R - jX_C = 100 - j100 \text{ Ом, } Z_{ca} = R = 100 \text{ Ом.}$$

Решение. При обрыве линейного провода фазы «С» потенциал точки с нагрузки будет отличаться от потенциала точ-

ки C источника. Рассматриваемая нагрузка будет подключена на одно линейное напряжение $\dot{U}_{AB} = 220e^{j30^\circ}$ В.

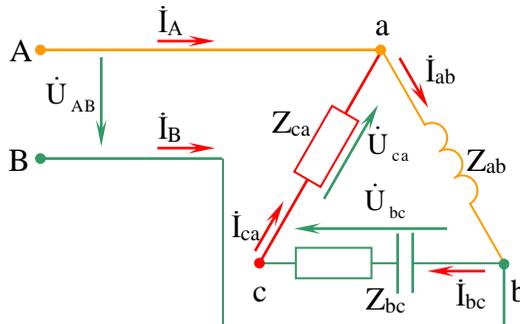


Рис. 3.11

Нагрузки фаз «bc» и «ca» соединены последовательно и $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab} = \dot{U}_{bc} + \dot{U}_{ca}$. Причем, условно-положительные направления токов и напряжений, принятые в трехфазных цепях, остаются неизменными.

3.3.1. Фазные токи определяем по закону Ома:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{220e^{j30^\circ}}{100e^{j90^\circ}} = 2,2e^{-j60^\circ} = 1,1 - j1,9 \text{ А},$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ca} &= \frac{-\dot{U}_{ab}}{Z_{bc} + Z_{ca}} = \frac{-220e^{j30^\circ}}{100 + 100 - j100} = \\ &= \frac{220e^{-j150^\circ}}{223,6e^{-j27^\circ}} = 0,98e^{-j123^\circ} = -0,53 - j0,82 \text{ А}. \end{aligned}$$

Линейные токи

$$\begin{aligned} \dot{I}_A = -\dot{I}_B = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} &= 2,2e^{-j60^\circ} - 0,98e^{-j123^\circ} = \\ &= 1,1 - j1,9 + 0,53 + j0,82 = 1,63 - j1,08 = 1,96e^{-j34^\circ} \text{ А}. \end{aligned}$$

Линейный ток в фазе «С» отсутствует.

Фазные напряжения приемников

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB} = 220e^{j30^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{bc} = Z_{bc} \dot{I}_{bc} = 141e^{-j45^\circ} \cdot 0,98e^{-j123^\circ} = 138e^{-j168^\circ} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{ca} = Z_{ca} \dot{I}_{ca} = 100 \cdot 0,98e^{-j123^\circ} = 98e^{-j123^\circ} \text{ В.}$$

3.3.2. Строим топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов (рис. 3.12).

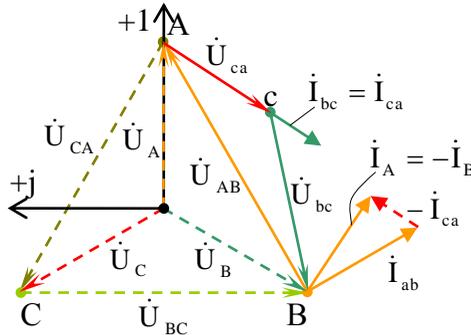


Рис. 3.12

Расчетно - графическая работа № 4

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Номер варианта выбирается согласно порядковому номеру студента в журнале группы. Дана линейная электрическая цепь, содержащая источник постоянной ЭДС E , активные и реактивные элементы. В цепи происходит коммутация, производимая идеальным ключом. Схемы электрических цепей показаны согласно варианту на рис. 4.1. Параметры активных и реактивных элементов схемы заданы в табл. 4.1.

Таблица 4.1

$E, \text{ В}$	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$C, \text{ мкФ}$	$L, \text{ мГн}$
100	20	100	80	20	0,6

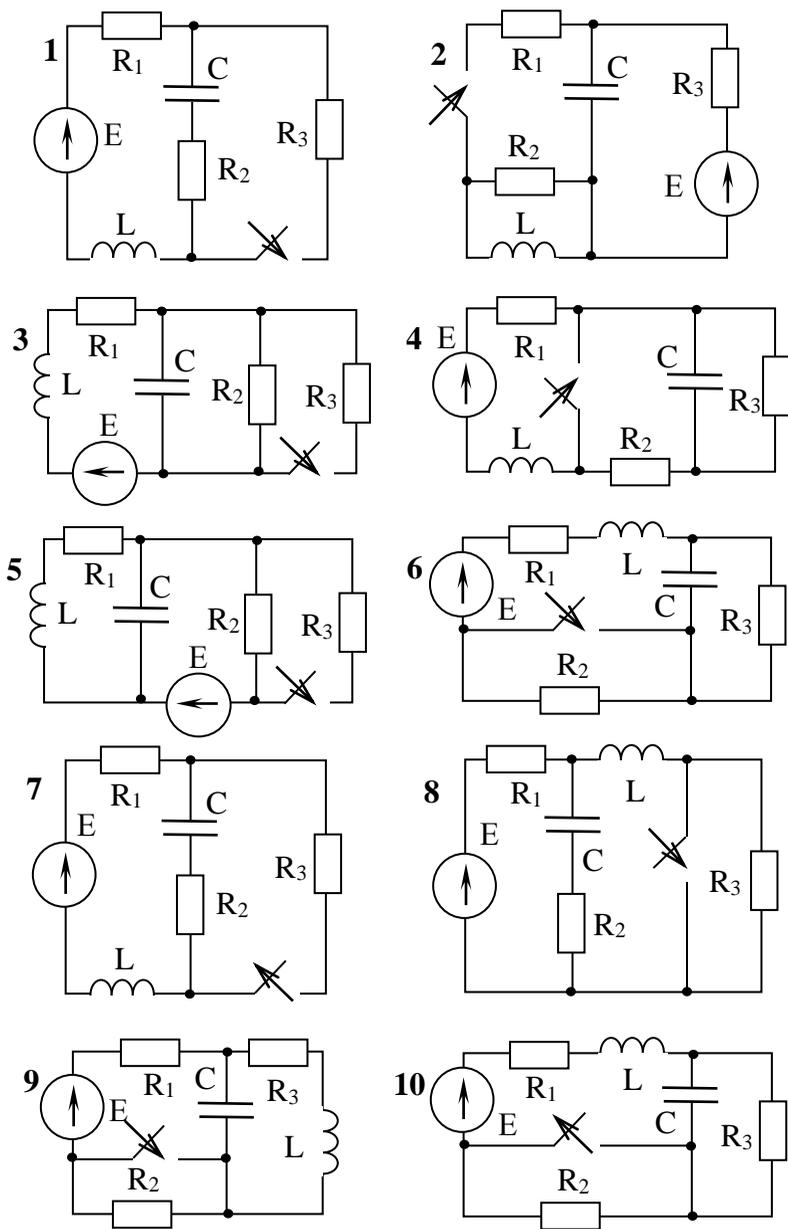


Рис. 4.1

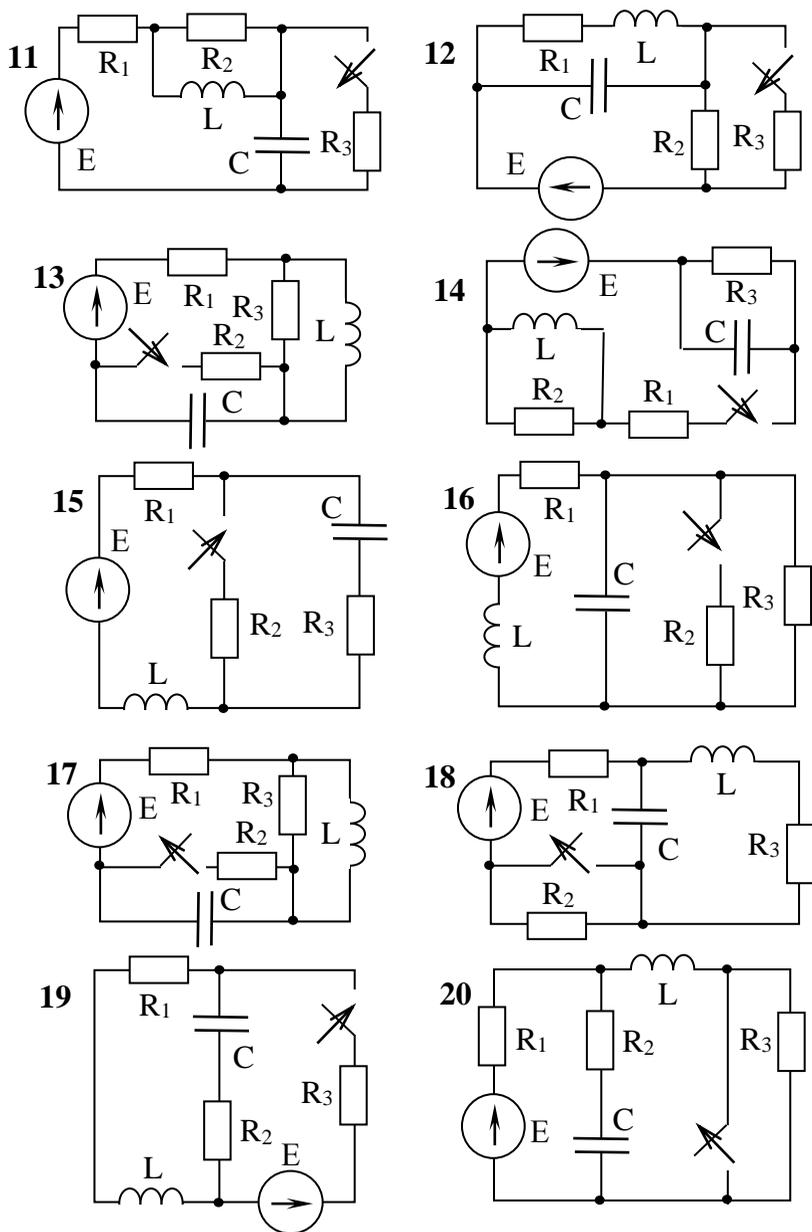


Рис. 4.1. Продолжение

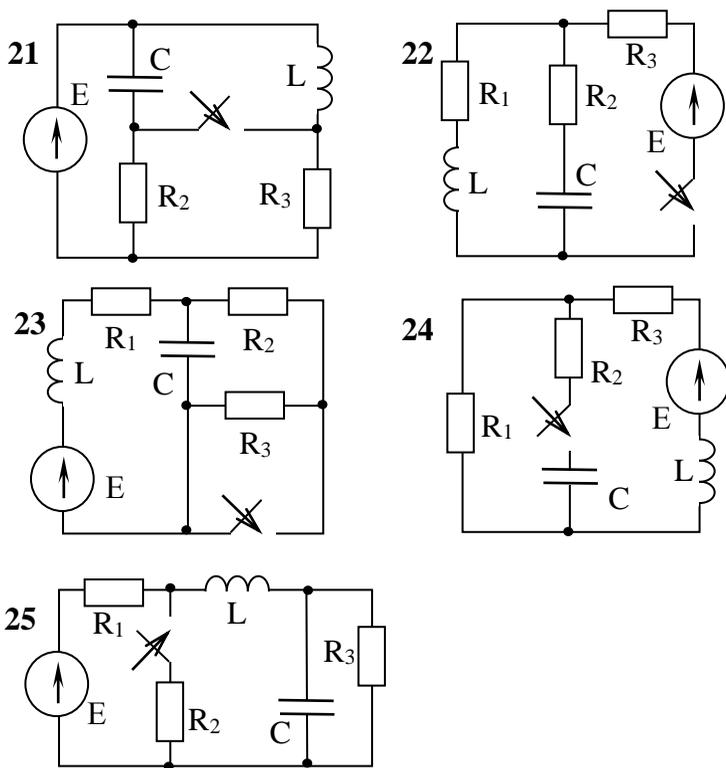


Рис. 4.1. Окончание

Задание

1. Классическим методом определить закон изменения во времени напряжения на зажимах конденсатора $u_c(t)$ и тока в индуктивной катушке $i_L(t)$
2. Операторным методом рассчитать переходные функции напряжения на зажимах конденсатора $u_c(t)$ и тока в индуктивной катушке $i_L(t)$.
3. Построить графики изменения во времени величин, рассчитанных в п.1 и 2, на интервале времени от $t=0$ до

$t=5/p_{\min}$, где p_{\min} – минимальный по модулю корень характеристического уравнения.

На временных диаграммах необходимо показать, свободные и принужденные составляющие, а также график зависимости искомых переходных функций.

Методические указания к выполнению работы

1. Классический метод расчета аperiodического переходного процесса рассмотрим на примере схемы рис. 4.2.

Определим ток $i(t)$ в цепи после замыкания ключа, если

$$R = 10 \text{ Ом}; L = 1 \text{ Гн}; C = 10^{-3} \text{ Ф}; U = 100 \text{ В}.$$

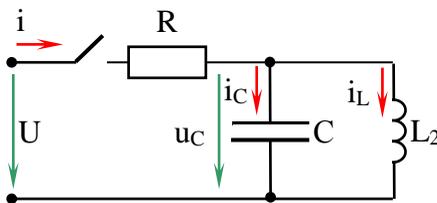


Рис. 4.2

Решение. 1.1. Рассматриваем докоммутационный режим ($t < 0$) (в нашем случае - при разомкнутом ключе), расчетная схема приведена на рис. 4.3.

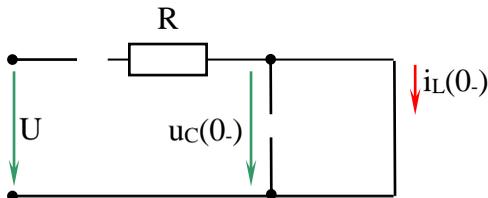


Рис. 4.3

В докоммутационном режиме всегда определяют ток в индуктивном элементе $i_L(0_-)$ и напряжение на емкостном элементе $u_C(0_-)$: $i_L(0_-) = 0$ и $u_C(0_-) = 0$.

1.2. В момент коммутации ($t=0$) согласно первому и второму законам коммутации в цепи

$$i_L(0_-) = i_L(0_+) = 0 \text{ и } u_C(0_-) = u_C(0_+) = 0.$$

Это и есть нулевые независимые начальные условия.

1.3. Схема цепи для послекоммутационного режима ($t > 0$) показана на рис. 4.4.

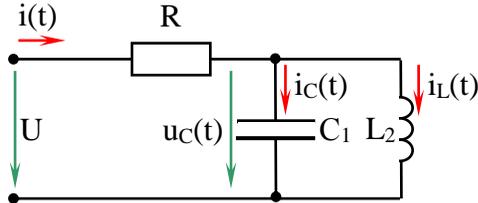


Рис. 4.4

Для нее составляем систему дифференциальных уравнений по законам Кирхгофа:

$$\begin{cases} i(t) = i_L(t) + i_C(t); \\ U = R i(t) + \frac{1}{C} \int i_C(t) dt; \\ L \frac{di_L(t)}{dt} = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt. \end{cases}$$

Решение системы уравнений для любой из величин в общем случае представляем в виде суммы установившейся (принужденной) и свободной составляющих.

Таким образом, интересующая нас величина тока

$$i(t) = i_{св}(t) + i_{пр}(t).$$

Здесь вид свободной составляющей определяется типом корней характеристического уравнения, а принужденная составляющая – законом изменения приложенного в цепи напряжения.

1.4. Расчетная схема для установившегося после коммутационного режима ($t \rightarrow \infty$) представлена на рис. 4.5. Определяем принужденную составляющую искомой величины.

Так как $U = \text{const}$, то $\omega = 0$, тогда $X_L = 0$, $X_C = \infty$, тогда

$$i_{np}(t) = \frac{U}{R} = \frac{100}{10} = 10, \text{ A.}$$

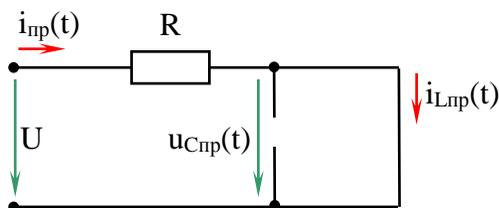


Рис. 4.5

1.5. Для определения корней характеристического уравнения составляем расчетную схему цепи для послекоммутационного режима ($t > 0$), заменив в ней источник напряжения его внутренним сопротивлением (для идеального источника $R_B = 0$) (рис. 4.6).

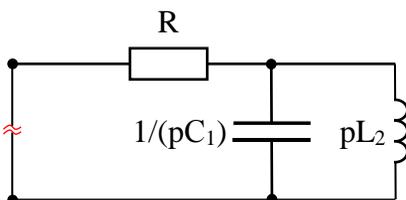


Рис. 4.6

Относительно любых точек разрыва записываем входное сопротивление схемы цепи и приравниваем его к нулю:

$$Z_{\text{вх}}(p) = R + \frac{pL \cdot \frac{1}{pC}}{pL + \frac{1}{pC}} = 0;$$

$$R + \frac{pL \cdot \frac{1}{pC}}{pL + \frac{1}{pC}} = 0;$$

$$p^2 RLC + pL + R = 0.$$

$$p^2 \cdot 10 \cdot 1 \cdot 10^{-3} + p \cdot 1 + 10 = 0;$$

$$p^2 + p \cdot 100 + 1000 = 0 .$$

Полученное квадратное уравнение имеет два корня:

$$p_{1,2} = -50 \pm \sqrt{2500 - 10000} = -50 \pm 38,37 , c^{-1} .$$

$$p_1 = -11,27 c^{-1}; p_2 = -88,73 c^{-1} .$$

Корни разные по величине и представляют собой отрицательные действительные числа, следовательно, в цепи протекает апериодический процесс и свободная составляющая тока имеет вид:

$$i_{CB}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} .$$

Искомое решение - с двумя постоянными интегрирования A_1 и A_2 :

$$i(t) = 10 + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} .$$

1.6. Для определения двух постоянных интегрирования записываем полученное решение и его производную для начального момента времени ($t=0$):

$$i(0_+) = A_1 + A_2 ;$$

$$\frac{di}{dt}(0_+) = p_1 A_1 + p_2 A_2 .$$

Зависимые начальные условия $i(0_+)$ и $\frac{di}{dt}(0_+)$ определяем из системы дифференциальных уравнений цепи, записанных для $t = 0$:

$$\begin{cases} i(0_+) = i_L(0_+) + i_C(0_+); \\ U = R i(0_+) + u_C(0_+); \\ L \frac{di_L}{dt}(0_+) = u_C(0_+), \end{cases}$$

откуда $i(0_+) = \frac{U - u_C(0_+)}{R} = \frac{100 - 0}{10} = 10 , A .$

$$i_C(0_+) = i(0_+) - i_L(0_+) = 10 - 0 = 10 , A .$$

Дифференцируем второе уравнение из системы уравнений, записанных по законам Кирхгофа (см. пункт 4.3)

$$\frac{dU}{dt} = R \frac{di(t)}{dt} + \frac{i_C(t)}{C}$$

и записываем полученное выражение для $t=0$:

$$0 = R \frac{di}{dt}(0_+) + \frac{i_C(0_+)}{C},$$

откуда

$$\frac{di}{dt}(0_+) = -\frac{i_C(0_+)}{CR} = -\frac{10}{10^{-3} \cdot 10} = -1000, \text{ А/с.}$$

Решаем совместно два уравнения относительно неизвестных A_1 и A_2 .

$$\begin{cases} A_1 + A_2 = 0; \\ p_1 A_1 + p_2 A_2 = -1000; \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_2 = -A_1; \\ p_1 A_1 - p_1 A_2 = -1000; \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_1 = -\frac{1000}{p_1 - p_2} = -\frac{1000}{-11,27 + 88,73} = -12,9, \text{ А}; \\ A_2 = 12,9, \text{ А}. \end{cases}$$

После определения постоянных A_1 и A_2 подставляем их в искомое решение, и расчет закончен:

$$i(t) = 10 - 12,9e^{-11,27t} + 12,9e^{-88,73t}, \text{ А.}$$

1.7. Строим график определяемой величины. На рис. 4.7 он изображен розовым цветом. Красным цветом указан график принужденной составляющей тока, синим цветом – график свободной составляющей с наименьшим p , зеленым цветом – график свободной составляющей с наибольшим p .

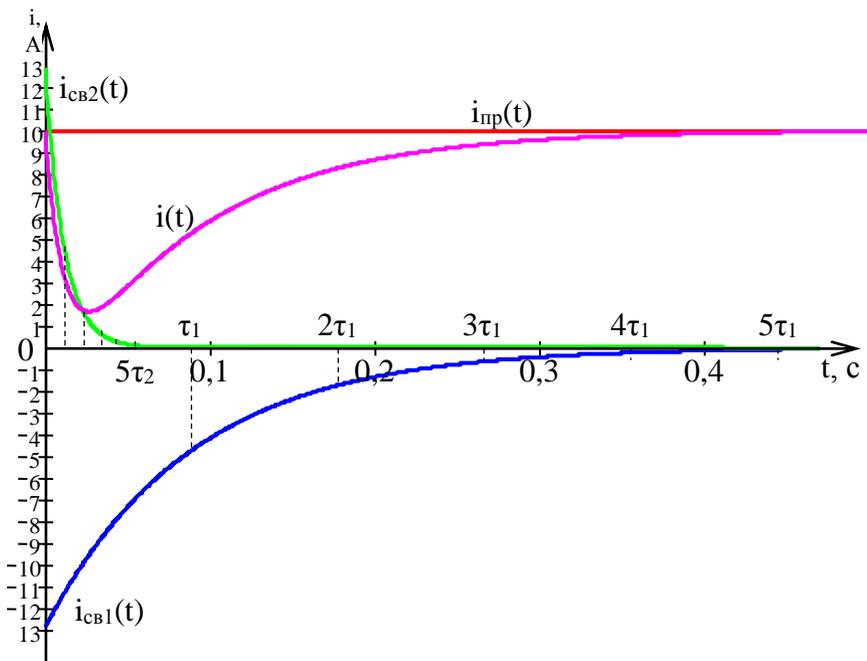


Рис. 4.7

2. Классический метод расчета колебательного переходного процесса рассмотрим на примере схемы рис. 4.8. Ключ в цепи замыкается. Определим ток $i_2(t)$ после коммутации, если $R_1 = R_2 = 10 \text{ Ом}$; $L = 5 \text{ мГн}$; $C = 10 \text{ мкФ}$; $E = 100 \text{ В}$.

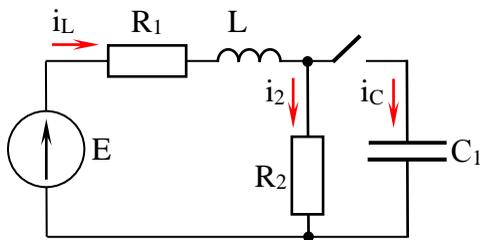


Рис. 4.8

Решение. 2.1. Рассмотрим схему электрической цепи в докоммутационном режиме ($t < 0$) (рис. 4.9).

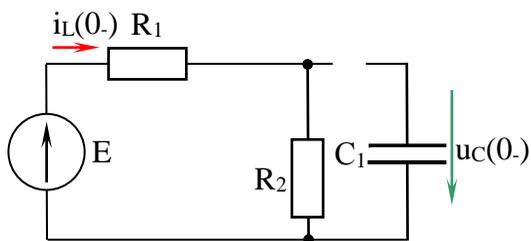


Рис. 4.9

$$i_L(0_-) = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{100}{200} = 5, \text{ A};$$

$$u_C(0_-) = 0 \text{ В.}$$

2.2. В момент коммутации ($t=0$) согласно первому и второму законам коммутации для схемы цепи рис. 4.8 записываем независимые начальные условия:

$$i_L(0_+) = i_L(0_-) = 5 \text{ A};$$

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0 \text{ В.}$$

2.3. Схема цепи для послекоммутационного режима ($t>0$) показана на рис. 4.10.

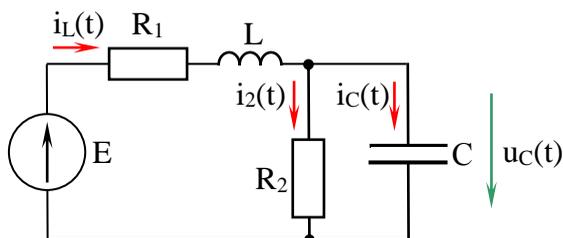


Рис. 4.10

Для нее система дифференциальных уравнений, описывающая переходный процесс:

$$\begin{cases} i_L(t) = i_C(t) + i_2(t); \\ E = R_1 i_L(t) + R_2 i_2(t); \\ R_2 i_2(t) = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt. \end{cases}$$

Таким образом, интересующая нас величина тока

$$i_2(t) = i_{2св}(t) + i_{2нр}(t).$$

2.4. Расчетная схема для установившегося послекоммутационного режима ($t \rightarrow \infty$) представлена на рис. 4.11, для которой вычисляем принужденную составляющую искомой величины.

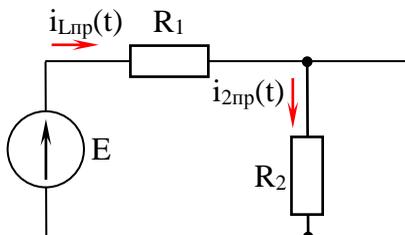


Рис. 4.11

Так как $U = \text{const}$, то $\omega = 0$, тогда $X_L = 0$, $X_C = \infty$ и

$$i_{2нр}(t) = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{100}{20} = 5, \text{ А.}$$

2.5. На рис. 4.12 представлена расчетная схема цепи для послекоммутационного режима ($t > 0$), для которой записываем входное сопротивление цепи и приравниваем его к нулю.

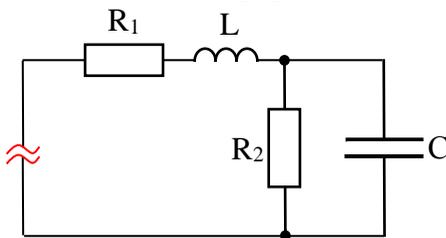


Рис. 4.12

$$Z_{вх}(p) = R_1 + pL + \frac{R_2 \cdot \frac{1}{pC}}{R_2 + \frac{1}{pC}} = R_1 + pL + \frac{R_2}{pR_2C + 1} = 0;$$

$$p^2 R_2 LC + pL + pR_1 R_2 C + R_1 + R_2 = 0 ;$$

$$p^2 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-6} + p(5 \cdot 10^{-3} + 100 \cdot 10 \cdot 10^{-6}) + 20 = 0 ;$$

$$p^2 \cdot 5 \cdot 10^{-7} + p \cdot 6 \cdot 10^{-3} + 20 = 0 ;$$

$$p^2 + p \cdot 1,2 \cdot 10^4 + 0,4 \cdot 10^8 = 0 .$$

Определяем корни характеристического уравнения:

$$p_{1,2} = -0,6 \cdot 10^4 \pm \sqrt{(0,6 \cdot 10^4)^2 - 0,4 \cdot 10^8} =$$

$$= -0,6 \cdot 10^4 \pm j \cdot 0,2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1};$$

$$p_{1,2} = -6000 \pm j2000 = -\delta \pm j\omega_{\text{св}}, \text{ с}^{-1}.$$

Корни представляют собой комплексно-сопряженные числа, следовательно, в цепи протекает колебательный процесс и свободная составляющая тока имеет вид:

$$i_{2\text{св}}(t) = Ae^{-\delta t} \sin(\omega_{\text{св}} t + \gamma);$$

$$i_{2\text{св}}(t) = Ae^{-6000t} \sin(2000 t + \gamma) .$$

Искомое решение

$$i_2(t) = i_{2\text{св}}(t) + i_{2\text{пр}}(t) = 5 + Ae^{-6000t} \sin(2000t + \gamma), A.$$

2.6. Для определения двух постоянных интегрирования A и γ записываем полученное решение и его производную для $t=0$:

$$i_2(0_+) = 5 + A \sin \gamma ;$$

$$\frac{di_2}{dt}(0_+) = -6000A \sin \gamma + 2000A \cos \gamma .$$

Значения левой части этих равенств называют зависимыми начальными условиями. Для их определения записываем систему уравнений из пункта 2.3 для момента коммутации ($t=0$):

$$i_L(0_+) = i_2(0_+) + i_C(0_+) ;$$

$$E = R_1 \cdot i_L(0_+) + L \frac{di_L}{dt}(0_+) + R_2 i_2(0_+) ;$$

$$R_2 i_2(0_+) = u_C(0_+);$$

$$i_2(0_+) = \frac{u_C(0_+)}{R_2} = 0;$$

$$R_2 \frac{di_2}{dt}(0_+) = \frac{i_C(0_+)}{C};$$

$$i_C(0_+) = i_L(0_+) - i_2(0_+) = 5, \text{ A.}$$

$$\frac{di_2}{dt}(0_+) = \frac{i_C(0_+)}{R_2 C} = \frac{5}{10 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 50000, \frac{\text{A}}{\text{с}}.$$

Тогда

$$0 = 5 + A \sin \gamma;$$

$$5000 = -6000 A \sin \gamma + 2000 A \cos \gamma;$$

$$A = \frac{-5}{\sin \gamma};$$

$$50 = 30 - \frac{10}{\text{tg} \gamma};$$

$$2 \text{tg} \gamma = -1; \text{tg} \gamma = -\frac{1}{2};$$

$$\gamma = -26,5^\circ; A = 11,2 \text{ A.}$$

После определения постоянных A и γ подставляем их в искомое решение:

$$i_{2\text{св}}(t) = 5 + 11,2 e^{-6000t} \sin(2000 t - 26,5^\circ), \text{ A.}$$

2.7. Строим график определяемой величины, на рис. 4.13 он изображен зеленым цветом. Красным цветом указан график принужденной составляющей тока, синим цветом – график свободной составляющей.

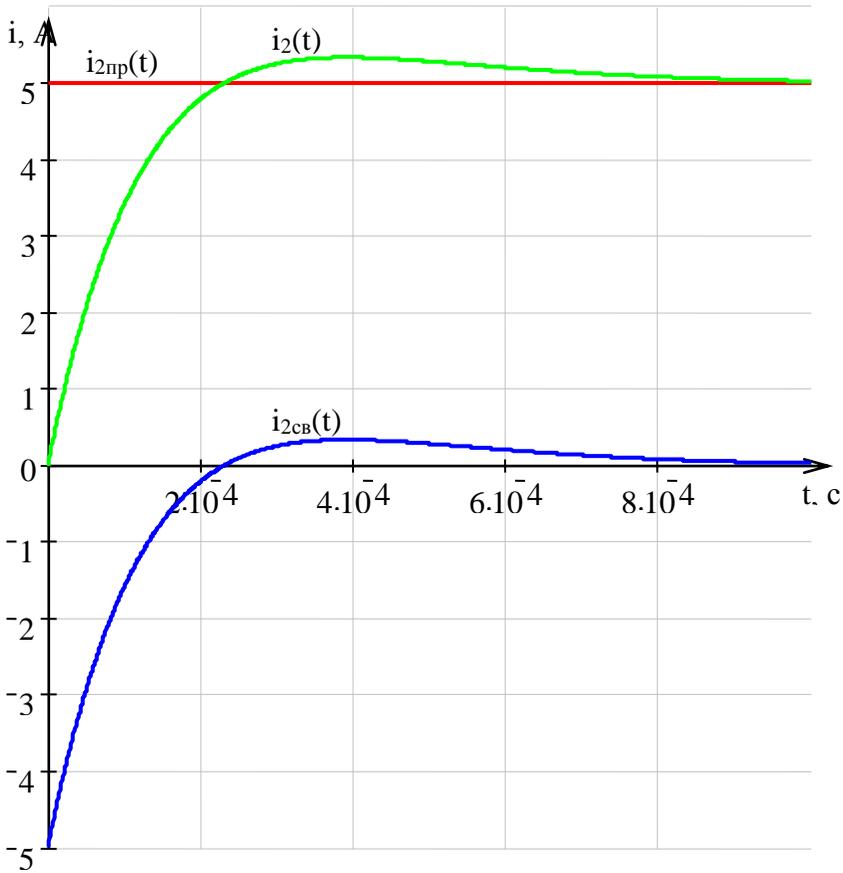


Рис. 4.13

3. Операторный метод расчета переходного процесса рассмотрим на примере схемы рис. 4.14. Определим закон изменения тока i_3 в зависимости от времени, если $R_1=10$ Ом; $C=100$ мкФ; $R_2=2$ Ом; $L=0,1$ Гн; $R_3=3$ Ом; $U=120$ В. До замыкания рубильника емкость была заряжена до напряжения $u_C=120$ В.

Решение. 3.1. Аналогично классическому методу для докоммутиционной схемы (рис.4.14) записываем независимые начальные условия. ($t < 0$).

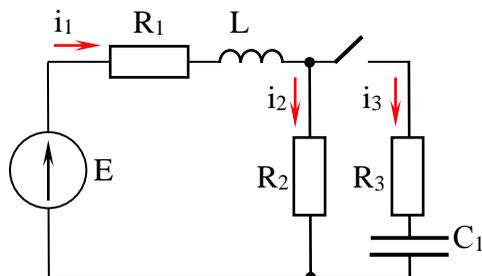


Рис. 4.14

$$i_1(0_-) = i_L(0_-) = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{120}{12} = 10 \text{ , А. } U_C(0_-) = 120 \text{ , В.}$$

3.2. Для послекоммутационного режима работы цепи ($t > 0$) составляем операторную схему замещения, имея ввиду, что начальные условия ненулевые.

Внутренняя ЭДС $Li_1(0_+)$ позволяет учесть запас энергии в магнитном поле индуктивной катушки вследствие протекания через нее тока $i_1(t)$ непосредственно до коммутации. Поэтому она направлена согласно с направлением тока $I_1(p)$.

Внутренняя ЭДС $u_C(0_+)/p$ позволяет учесть зарядку конденсатора до напряжения $u_C(0_+)$ током i_3 непосредственно до коммутации, поэтому она направлена навстречу току $I_3(p)$. На рис. 4.15 изображена операторная схема.

3. Определяем ток $I_3(p)$ методом контурных токов. Произвольно выбранные направления контурных токов показаны на рис. 4.15.

$$\begin{vmatrix} R_1 + R_2 + pL & -R_2 \\ -R_2 & R_2 + R_3 + \frac{1}{pc} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_{11}(p) \\ I_{22}(p) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{E}{p} + Li_1(0_+) \\ -\frac{U_C}{p} \end{vmatrix}$$

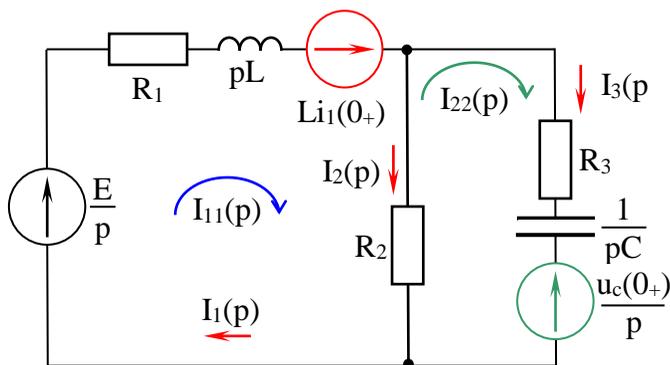


Рис. 4.15

$$\begin{vmatrix} 12 + 0,1p & -2 \\ -2 & 5 + \frac{10^4}{p} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_{11}(p) \\ I_{22}(p) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{120}{p} + 0,1 \cdot 10 \\ -\frac{120}{p} \end{vmatrix}.$$

$$I_3(p) = I_{22}(p) = \frac{\Delta_2}{\Delta}.$$

$$\begin{aligned} I_{22}(p) &= \frac{\begin{vmatrix} 12 + 0,1p & \frac{120 + p}{p} \\ -2 & -\frac{120}{p} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 12 + 0,1p & -2 \\ -2 & \frac{5p + 10^4}{p} \end{vmatrix}} = \frac{\frac{-1440 - 12p}{p} + \frac{240 + 2p}{p}}{\frac{60p + 0,5p^2 + 12 \cdot 10^4 + p \cdot 10^3}{p} - 4} = \\ &= \frac{-1200 - 10p}{0,5p^2 + 1056p + 12 \cdot 10^4} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}. \end{aligned}$$

4. С помощью теоремы о разложении определяем зависимость тока i_3 от времени.

$$i_3 = \frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{F_1(p_2)}{F_2'(p_2)} e^{p_2 t}.$$

Корни уравнения $F_2(p)=0$

$$p^2 + 2112p + 24 \cdot 10^4 = 0. \quad p_{1,2} = -1056 \pm 935,49;$$

$$p_{1,2} = -1056 \pm \sqrt{1056^2 - 24 \cdot 10^4}; \quad p_1 = -120,5;$$

$$p_{1,2} = -1056 \pm 935,49;$$

$$p_1 = -120,5;$$

$$p_2 = -1991,5.$$

$$F_1(p_1) = -1200 - 10(-120,5) = 5;$$

$$F_1(p_2) = -1200 - 10(-1991,5) = 18715.$$

$$F'_2(p) = p + 1056;$$

$$F'_2(p_1) = -120,5 + 1056 = 935,5;$$

$$F'_2(p_2) = -1991,5 + 1056 = -935,5.$$

Искомая величина

$$i_3 = \frac{5}{935,5} e^{-120,5t} - \frac{18115}{935} e^{-1991,5t} = 0,0053 e^{-120,5t} - 19,37 e^{-1991,5t}, \text{ A.}$$

Расчетно-графическая работа № 5

Расчетно-графическая работа посвящено трем темам дисциплины «Теоретические основы электротехники» и ориентировано на профиль подготовки студентов, поэтому каждая группа выполняет работа на заданную тему, близкую к их профилю подготовки. Задача 5.1 предназначена для выполнения студентами 1-й группы (ЭП), задача 5.2 – для 2-й группы (ЭМ), задача 5.3 – для 3-й группы (ЭС). Номер варианта выбирается согласно порядковому номеру студента в журнале группы.

Задача 5.1. РАСЧЕТ НЕЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ ПО МГНОВЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ МЕТОДОМ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ

На входе цепи, схема которой согласно варианту указана на рис. 5.1, действует ЭДС, изменяющаяся во времени по синусоидальному закону, $e(t)=100\sin 314t$ В. ЭДС источника постоянного напряжения $E = 25$ В. Параметры элементов приведены в табл. 5.1.

Частота управляющих импульсов соответствует частоте входной ЭДС. Все нелинейные элементы в схеме можно считать идеальными: в проводящем состоянии их сопротивление равно нулю, в непроводящем – бесконечности.

Задание

1. Качественно описать работу схемы.
2. Рассчитать мгновенные значения токов и напряжений всех элементов схемы методом кусочно-линейной аппроксимации.
3. Построить временные диаграммы рассчитанных функций. На графиках обязательно показать моменты сопряжения решений.

Таблица 5.1

№ варианта	Угол отпирания тиристоров		R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	L, мГн	C, мкФ
	α_1 , град	α_2 , град				
1	45		5	2	100	
2	45	30	5	2	100	
3	45		300	300		30
4	60	30	200	300		40
5	90		10		200	
6	90	90	60		120	
7	60		40	30		500
8	45	30	40	40		500
9	90		60	30	1000	
10	90		50	30	1000	
11	90		300	500		100
12	60		40	30		500
13	60		2		100	
14	30	45		5	100	
15	45		10		150	
16	30		50	50	1000	
17	90		300	50		50
18	45		3	3	100	
19	30	45	5	5	200	
20	60		50	50	1000	
21		30	20		500	
22	90	120	5	10	100	
23	30		10	200		50
24	90	0	20	300		50
25	30		50	50		50

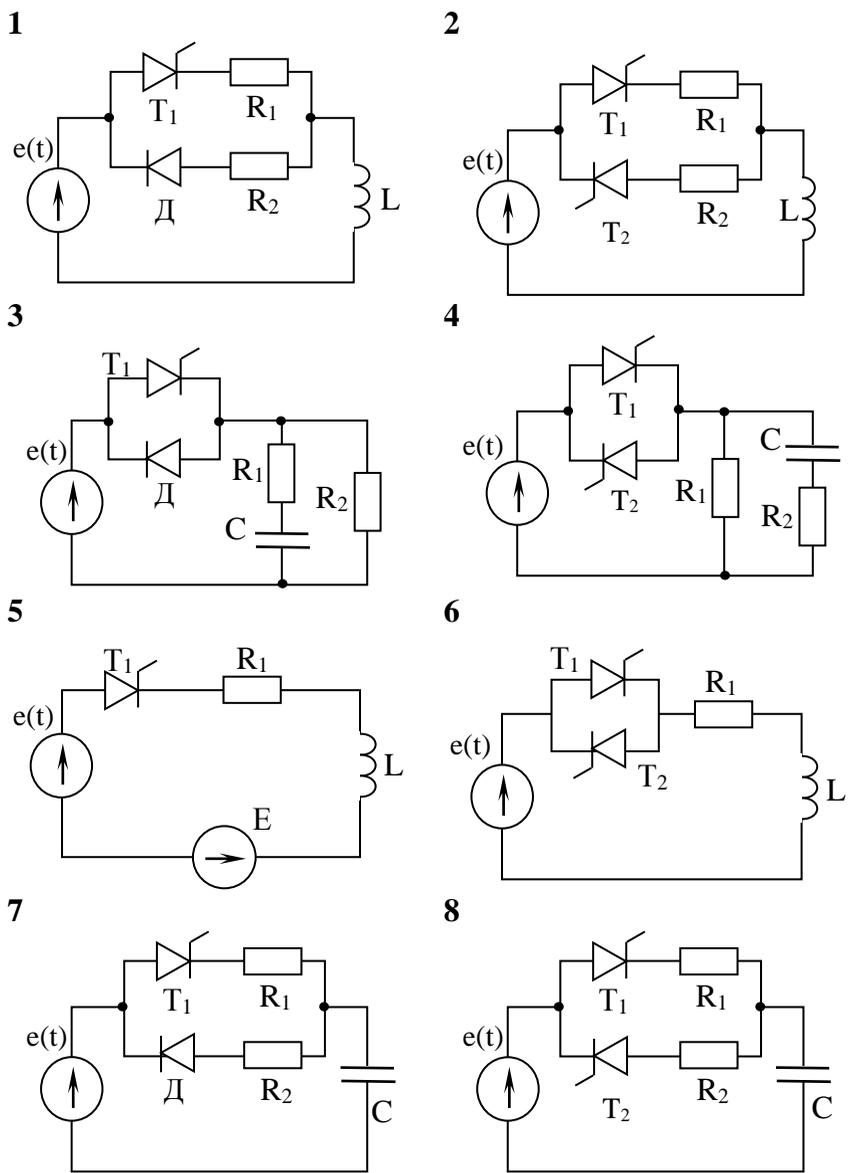


Рис. 5.1

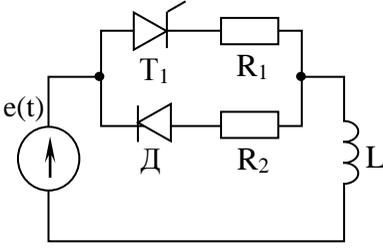
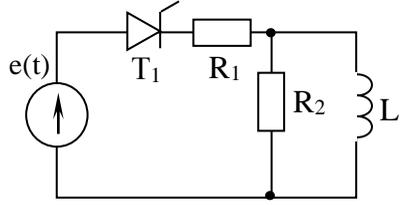
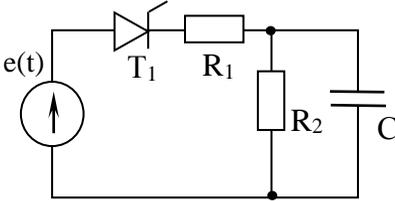
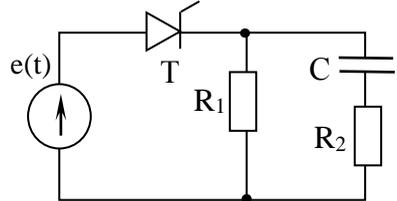
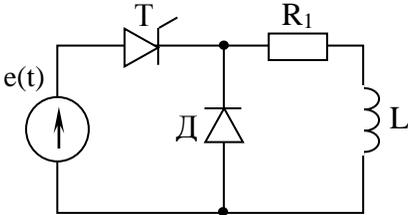
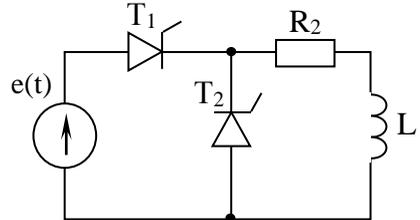
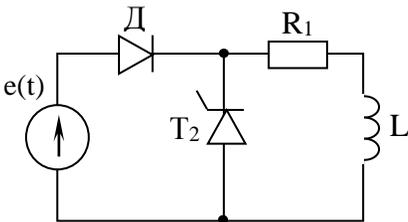
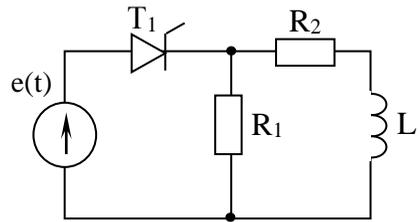
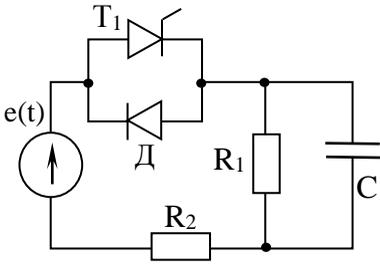
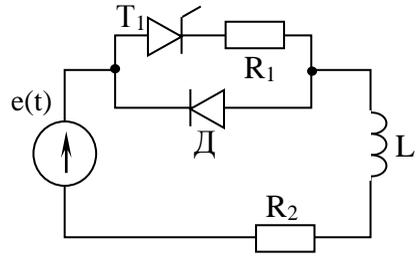
9**10****11****12****13****14****15****16**

Рис. 5.1. Продолжение

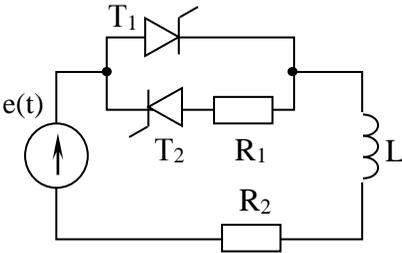
17



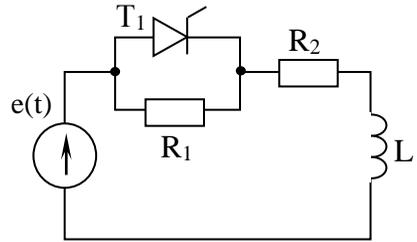
18



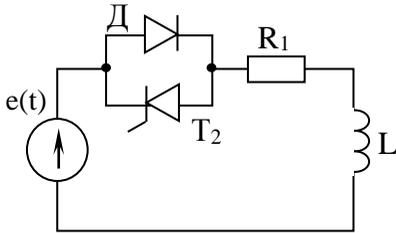
19



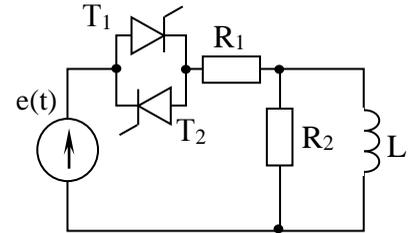
20



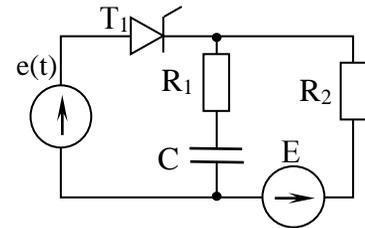
21



22



23



24

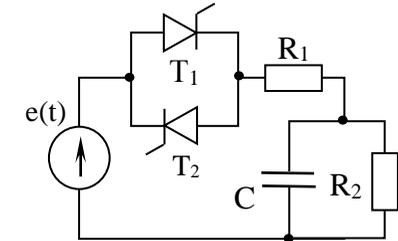


Рис. 5.1. Окончание

Методические указания к выполнению работы

Пример. Обмотка возбуждения двигателя постоянного тока с параметрами $X_L=10$ Ом, $R=5$ Ом питается от источника синусоидального напряжения $u=100 \sin 314t$, В через управляющий элемент - тиристор Т, угол отпираания которого 120° и отсчитывается от начала положительной полуволны напряжения. Схема включения двигателя изображена на рис. 5.2. Рассчитаем мгновенное значение тока в нагрузке $i(t)$ и напряжения на всех элементах схемы рис. 5.2 и построим их графики.

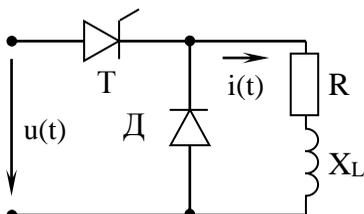


Рис. 5.2

Решение. 1. ВАХ диода аппроксимируется прямыми, т.е. по своим характеристикам диод повторяет ключ, включаемый напряжением $u_d > 0$, а выключаемый током $i_d \leq 0$. Тиристор в большинстве случаев по своим свойствам повторяет диод, он открывается, когда напряжение на нем положительно и когда управляющий электрод подает отрицательный импульс.

1.1. В интервале времени $0 \leq t \leq t_1$ тиристор заперт и ток в нагрузке равен нулю: $i(t_{1-}) = 0$.

1.2. В момент времени t_1 на управляющий электрод тиристора поступает импульс, он открывается и идет переходный процесс через обмотку возбуждения двигателя, тиристор и цепь самого источника $u(t)$.

Согласно первому закону коммутации для схемы цепи рис. 5.2 записываем независимое начальное условие: $i(t_{1+}) = i(t_{1-}) = 0$.

1.3. Для интервала времени $t_1 \leq t \leq t_2$ расчетная схема представлена на рис. 5.3. По ней находим

$$i(t) = i_{\text{св}}(t) + i_{\text{пр}}(t),$$

где $i_{\text{св}}(t) = A_1 e^{p(t-t_1)}$, здесь t_1 – момент отпирания тиристора,

соответствующий $\omega t_1 = 120^\circ = \frac{T}{3} = \frac{2\pi}{3}$ рад .

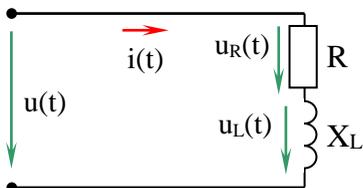


Рис. 5.3

Значение принужденной составляющей определяем из послекоммутационного режима, который протекает под действием синусоидального напряжения источника с периодом

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 0,02 \text{ с и частотой } \omega = 314 \text{ рад/с.}$$

1.4. В принужденном режиме комплексное амплитудное значение напряжения

$$\dot{U}_m = 100e^{j0} \text{ В ;}$$

комплексное сопротивление цепи:

$$Z = R + jX_L = 5 + j10 = \sqrt{5^2 + 10^2} e^{j \arctg \frac{10}{5}} = 11,18 e^{j63,4^\circ}, \text{ Ом.}$$

Комплексное амплитудное значение принужденной составляющей тока:

$$\dot{I}_{m \text{ пр}} = \frac{\dot{U}_m}{Z} = \frac{100e^{j0}}{11,18 e^{j63,4^\circ}} = 8,945 e^{-j63,4^\circ}, \text{ А .}$$

Мгновенное значение принужденной составляющей тока:

$$i_{\text{пр}}(t) = 8,945 \sin(314t - 63,4^\circ), \text{ А .}$$

В момент отпирания тиристора t_1 принужденная составляющая тока

$$i_{np}(t_1) = 8,945 \sin(314t_1 - 63,4^0) = 8,945 \sin(120^0 - 63,4^0) = 7,468, \text{ A}.$$

Таким образом, искомая величина тока:

$$i(t) = i_{cb}(t) + i_{np}(t) = A_1 e^{p(t-t_1)} + 8,945 \sin(314t - 63,4^0), \text{ A}.$$

1.5. Составляем характеристическое уравнение и определяем его корень p :

$$Z_{bx}(p) = R + pL = 0;$$

$$p = -\frac{R}{L} = -\frac{R \cdot \omega}{X_L} = -\frac{5 \cdot 314}{10} = -157, \text{ c}^{-1}.$$

Постоянная времени

$$\tau = \frac{1}{|p|} = 0,00637 \text{ c}.$$

1.6. Постоянную интегрирования находим из условия выполнения первого закона коммутации в момент отпирания тиристора t_1 :

$$i(t_{1+}) = i(t_{1-}) = 0.$$

$$\begin{aligned} i(t_1) &= i_{cb}(t_1) + i_{np}(t_1) = A_1 e^{p(t_1-t_1)} + 8,945 \sin(314t_1 - 63,4^0) = \\ &= A_1 + 8,945 \sin(120^0 - 63,4^0) = A_1 + 7,4677 = 0; \end{aligned}$$

$$A_1 = -7,4677 \text{ A}.$$

Таким образом, искомая величина тока в промежутке времени $t_1 \leq t \leq t_2$:

$$i(t) = -7,4677 e^{-157(t-t_1)} + 8,945 \sin(314t - 63,4^0), \text{ A}.$$

Напряжение на резистивном элементе определяем как

$$\begin{aligned} u_R(t) &= R \cdot i(t) = 5 \cdot (-7,4677 e^{-157(t-t_1)} + 8,945 \sin(314t - 63,4^0)) = \\ &= -37,34 e^{-157(t-t_1)} + 44,73 \sin(314t - 63,4^0), \text{ B}. \end{aligned}$$

Напряжение на индуктивном элементе:

$$\begin{aligned}
 u_L(t) &= L \cdot \frac{di(t)}{dt} = \frac{10}{314} \cdot (-7,4677 e^{-157(t-t_1)} + 8,945 \sin(314t - 63,4^{\circ}))' = \\
 &= \frac{10}{314} \cdot (-7,4677 \cdot (-157) e^{-157(t-t_1)} + 8,945 \cdot 314 \cdot \cos(314t - 63,4^{\circ})) = \\
 &= 37,34 e^{-157(t-t_1)} + 89,45 \sin(314t + 26,6^{\circ}), \text{ В.}
 \end{aligned}$$

2. Для анализа дальнейшей работы цепи необходимо ответить на следующие вопросы:

- Когда запирается тиристор?
- Успеет ли ток достичь значения принужденной составляющей?
- На каком промежутке времени цепь будет работать в принужденном режиме?

2.1. Время переходного процесса $T_{\text{мн}} = 5\tau = 0,03185 \text{ с}$. Это в 1,5925 раза превышает время первого периода напряжения источника. Переходный процесс закончился бы в момент времени $(t_1 + T_{\text{мн}}) = \frac{T}{3} + 5\tau = 0,03852 \text{ с}$, т.е. ближе к окончанию второго периода.

Так как в схеме установлен диод, то при изменении полярности напряжения на входе схемы при открытом тиристоре (в середине первого периода) по цепи диод-тиристор-источник, имеющей малое сопротивление, пойдет отрицательный ток, который запрет тиристор в момент времени t_2 , соответствующий $\omega t_2 = \pi \text{ рад} = 180^{\circ}$.

Следовательно, тиристор закроется раньше, чем закончился бы переходный процесс и начался принужденный режим работы цепи.

2.2. Независимое начальное условие для момента времени t_2 :

$$i(t_{2+}) = i(t_{2-}) = -7,4677 e^{-157(t_2 - t_1)} + 8,945 \sin(314t_2 - 63,4^0) =$$

$$= -7,4677 e^{-157(0,01 - 0,0067)} + 8,945 \sin(180^0 - 63,4^0) = 3,5744, \text{ А.}$$

2.3. В промежутке времени $t_2 \leq t \leq t_3$ тиристор заперт, расчетная схема цепи показана на рис. 5.4. Ток в нагрузке нулю не равен – запасенная в индуктивном элементе энергия будет выделяться в резисторе R, т.е. идет переходный процесс через обмотку возбуждения двигателя и диод:

$$i(t) = i_{cb}(t) + i_{np}(t),$$

где $i_{cb}(t) = A_2 e^{p(t-t_2)}$, здесь t_2 – момент запираания тиристора,

соответствующий $\omega t_2 = \frac{T}{2} = \pi$ рад = 180^0 .

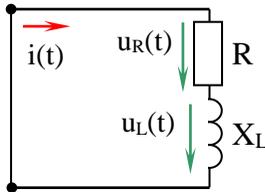


Рис. 5.4

2.4. Из рис. 5.4 следует: источник энергии в цепи отсутствует, поэтому значение принужденной составляющей тока будет равно нулю.

$$i_{np}(t) = 0.$$

Таким образом, искомая величина

$$i(t) = i_{cb}(t) = A_2 e^{p(t-t_2)}.$$

Напряжения на элементах схемы рис. 5.4

$$u_R(t) = R \cdot i(t) = -u_L(t).$$

2.5. Сравнив расчетные схемы в интервалах времени $t_1 \leq t \leq t_2$ (рис. 5.3) и $t_2 \leq t \leq t_3$ (рис. 5.4) видим, что характеристическое уравнение будет иметь тот же вид, поэтому значение p не изменится, $p = -157 \text{ с}^{-1}$.

2.6. Постоянную интегрирования находим из условия выполнения первого закона коммутации в момент запираания тиристора t_2 :

$$i(t_{2+}) = i(t_{2-}) = 3,5744, \text{ А.}$$

$$i(t_2) = i_{\text{св}}(t_2) = A_2 e^{-157(t_2 - t_2)} = A_2 = 3,5744 \text{ А.}$$

Таким образом, искомая величина тока в промежутке времени $t_2 \leq t \leq t_3$:

$$i(t) = 3,5744 e^{-157(t - t_2)}, \text{ А.}$$

Напряжения на элементах:

$$u_R(t) = R \cdot i(t) = 5 \cdot 3,5744 e^{-157(t - t_2)} = 17,87 e^{-157(t - t_2)} \text{ В.}$$

$$u_L(t) = -17,87 e^{-157(t - t_2)} \text{ В.}$$

3. Во втором периоде напряжения источника питания происходит повторное отпирание тиристора в момент времени

$$t_3 = T + \frac{T}{3} = 0,02 + \frac{0,02}{3} = 0,02667 \text{ с,}$$

поэтому необходимо проанализировать работу цепи, ответив на вопрос:

- достаточно ли этого времени, чтобы значение тока стало равным нулю и переходный процесс закончился?

3.1. Сравнив значение времени t_3 с моментом окончания переходного процесса $(t_2 + T_{\text{мн}}) = \frac{T}{2} + 5\tau = 0,04185 \text{ с}$, видим, что

тиристор откроется раньше, чем закончится переходный процесс и начнется принужденный режим работы цепи. Поэтому на втором периоде решение отличается от первого периода.

3.2. В интервале времени $t_3 \leq t \leq t_4$ и схема замещения, и решение записываются так же, как и на интервале времени $t_1 \leq t \leq t_2$, но начальные условия ненулевые:

$$i(t_3) = 3,5744 e^{-157(t_3 - t_2)} = 3,5744 e^{-157(0,02667 - 0,01)} = 0,261, \text{ А.}$$

3.3. Для интервала времени $t_3 \leq t \leq t_4$ расчетная схема представлена на рис. 5.3.

$$i(t) = i_{\text{св}}(t) + i_{\text{пр}}(t),$$

где $i_{\text{св}}(t) = A_3 e^{p(t-t_3)}$, здесь t_3 – момент отпирания тиристора,

соответствующий $\omega t_3 = \Gamma + \frac{\Gamma}{3} = 2\frac{1}{3}\pi$ рад.

3.4. Значение принужденны составляющих электрических величин будут такими же, как и на промежутке времени $t_1 \leq t \leq t_2$.

Мгновенное значение принужденной составляющей тока:

$$i_{\text{пр}}(t) = 8,945 \sin(314t - 63,4^0), \text{ А.}$$

В момент отпирания тиристора t_3 принужденная составляющая тока

$$i_{\text{пр}}(t_3) = 8,945 \sin(314t_3 - 63,4^0) = 8,945 \sin(480^0 - 63,4^0) = 7,468, \text{ А.}$$

Таким образом, искомая величина тока:

$$i(t) = i_{\text{св}}(t) + i_{\text{пр}}(t) = A_3 e^{p(t-t_3)} + 8,945 \sin(314t - 63,4^0), \text{ А.}$$

3.5. Характеристическое уравнение имеет тот же вид, что и на промежутке времени $t_1 \leq t \leq t_2$, поэтому значение p не изменится, $p = -157 \text{ с}^{-1}$.

3.6. Постоянную интегрирования находим из условия выполнения первого закона коммутации в момент отпирания тиристора t_3 :

$$i(t_{3+}) = i(t_{3-}) = 0,261 \text{ А.}$$

$$\begin{aligned} i(t_3) &= i_{\text{св}}(t_3) + i_{\text{пр}}(t_3) = A_3 e^{p(t_3-t_3)} + 8,945 \sin(314t_3 - 63,4^0) = \\ &= A_3 + 8,945 \sin(420^0 - 63,4^0) = A_3 + 7,4677 = 0,261; \end{aligned}$$

$$A_3 = -7,2067 \text{ А.}$$

Таким образом, искомая величина тока в промежутке времени $t_3 \leq t \leq t_4$:

$$i(t) = -7,2067 e^{-157(t-t_3)} + 8,945 \sin(314t - 63,4^0), \text{ А.}$$

Напряжение на резистивном элементе определяем как

$$u_R(t) = R \cdot i(t) = 5 \cdot (-7,2067 e^{-157(t-t_3)} + 8,945 \sin(314t - 63,4^0)) =$$

$$= -36,03e^{-157(t-t_3)} + 44,73 \sin(314t - 63,4^0), \text{ В.}$$

Напряжение на индуктивном элементе:

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} = \frac{10}{314} \cdot (-7,2067 e^{-157(t-t_3)} + 8,945 \sin(314t - 63,4^0))' =$$

$$= \frac{10}{314} \cdot (-7,2067 \cdot (-157)e^{-157(t-t_3)} + 8,945 \cdot 314 \cdot \cos(314t - 63,4^0)) =$$

$$= 36,03e^{-157(t-t_3)} + 89,45 \sin(314t + 26,6^0), \text{ В.}$$

4. Для интервала времени $t_4 \leq t \leq t_5$ расчетная схема представлена на рис. 5.4.

4.1. Схема замещения и решение для данного интервала времени записываются так же, как и на интервале времени $t_2 \leq t \leq t_3$, но с другими начальными условиями.

4.2. Моменту времени $t_4=0,03$ с соответствует значение $\omega t_4 = 3\pi \text{ рад} = 540^0$.

Независимое начальное условие для момента времени t_4 :

$$i(t_{4+}) = i(t_{4-}) = -7,2067 e^{-157(t_4-t_3)} + 8,945 \sin(314t_4 - 63,4^0) =$$

$$= -7,2067 e^{-157(0,03 - 0,0267)} + 8,945 \sin(540^0 - 63,4^0) = 3,706, \text{ А.}$$

4.3. В промежутке времени $t_4 \leq t \leq t_5$ тиристор заперт, расчетная схема цепи показана на рис. 5.4.

$$i(t) = i_{cb}(t) + i_{np}(t),$$

где $i_{cb}(t) = A_2 e^{p(t-t_4)}$, здесь t_4 – момент запираания тиристора.

4.4. Из рис. 5.4 следует:

$$i_{np}(t) = 0.$$

Таким образом, искомая величина

$$i(t) = i_{cb}(t) = A_4 e^{p(t-t_4)}.$$

Напряжения на элементах схемы рис. 5.4

$$u_R(t) = R \cdot i(t) = -u_L(t).$$

4.5. Характеристическое уравнение имеет тот же вид, поэтому $p = -157 \text{ с}^{-1}$.

4.6. Постоянную интегрирования находим из условия выполнения первого закона коммутации в момент запираания тиристора t_4 :

$$i(t_{4+}) = i(t_{4-}) = 3,706, \text{ А.}$$

$$i(t_2) = i_{cb}(t_2) = A_4 e^{-157(t_4 - t_4)} = A_4 = 3,706 \text{ А.}$$

Таким образом, искомая величина тока в промежутке времени $t_4 \leq t \leq t_5$:

$$i(t) = 3,706 e^{-157(t - t_4)}, \text{ А.}$$

Напряжения на элементах:

$$u_R(t) = R \cdot i(t) = 5 \cdot 3,706 e^{-157(t - t_4)} = 18,53 e^{-157(t - t_4)} \text{ В.}$$

$$u_L(t) = -18,56 e^{-157(t - t_4)} \text{ В.}$$

5. Переходный процесс в этой схеме растянут во времени и может занимать несколько периодов. Чтобы получить установившееся состояние при параметрах цепи, соответствующих графику, нужно рассчитать переходной процесс, по крайней мере, еще на двух периодах.

6. На рис. 5.5 приведены графики электрических величин протекающих процессов.

Запись мгновенного значения тока для построение временной диаграммы на примере программы MathCad показана ниже.

$$u(t) := 100 \sin 314t;$$

$$t1 := 0.00667;$$

$$u(t) := 100\sin(314t)$$

$$t1 := 0.00667$$

$$i0(t) := 0 \cdot (0 \leq t < t1)$$

$$t2 := 0.01$$

$$isv1(t) := -7.4677e^{-157(t-t1)} \cdot (t1 \leq t < t2)$$

$$ipr(t) := 8.945 \sin(314t - 63.4\text{deg})$$

$$t3 := 0.0267$$

$$isv2(t) := 3.5744e^{-157(t-t2)} \cdot (t2 \leq t < t3)$$

$$t4 := 0.03$$

$$isv3(t) := -7.2067e^{-157(t-t3)} \cdot (t3 \leq t < t4)$$

$$t5 := 0.04667$$

$$isv4(t) := 3.706e^{-157(t-t4)} \cdot (t4 \leq t < t5)$$

Результирующую кривую тока получаем как их сумма:

$$I(t) := i0(t) \cdot (0 \leq t < t1) + \\ + isv1(t) \cdot (t1 \leq t < t2) + ipr(t) \cdot (t1 \leq t < t2) + isv2(t) \cdot (t2 \leq t < t3) + \\ + [isv3(t) \cdot (t3 \leq t < t4) + ipr(t) \cdot (t3 \leq t < t4)] + isv4(t) \cdot (t4 \leq t < t5)$$

Вывод о работе цепи: физика процесса такова, что после включения обмотка возбуждения двигателя постоянного тока (на схеме рис. 5.2 - катушка индуктивности) от периода к периоду увеличивает запас энергии в виде магнитного поля до тех пор, пока столько же энергии не станут рассеивать медь, из которой изготовлена обмотка (на схеме замещения - резистор), когда схема отключается от источника.

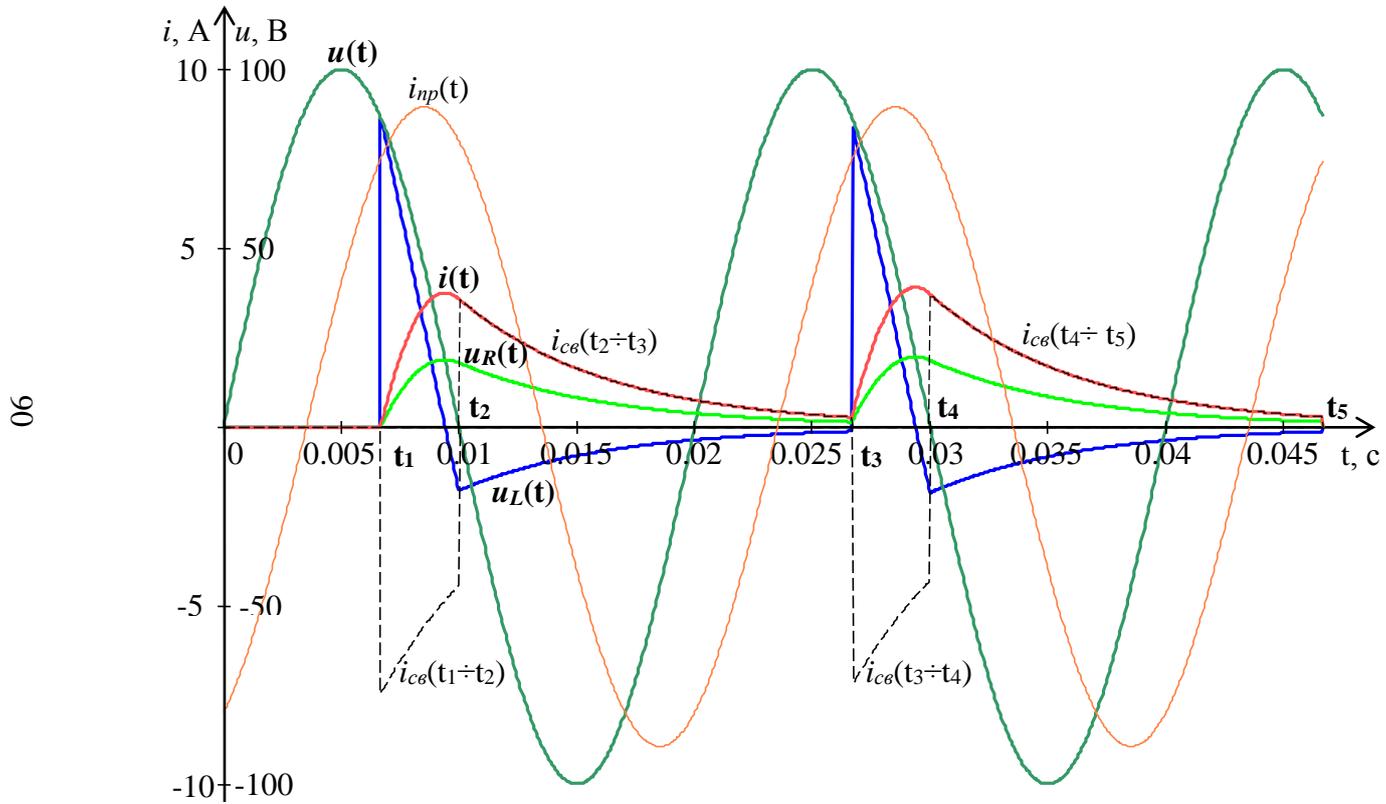


Рис. 5.5

Задача 5.2: МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Дана разветвленная магнитная цепь с намагничивающими катушками. Номер схемы магнитной цепи и данные для расчета согласно варианту заданы в табл. 5.2.

Кривая намагничивания стали магнитопровода приведена в табл. 5.3.

Задание

1. Начертить схему замещения магнитной цепи, приведенной согласно варианту на рис. 5.6.
2. Рассчитать намагничивающие токи и магнитные потоки, указанные в последней графе табл. 5.2 согласно варианту. Расчет выполнять методом двух узлов.
3. Результаты расчетов проверить с помощью первого и второго законов Кирхгофа.

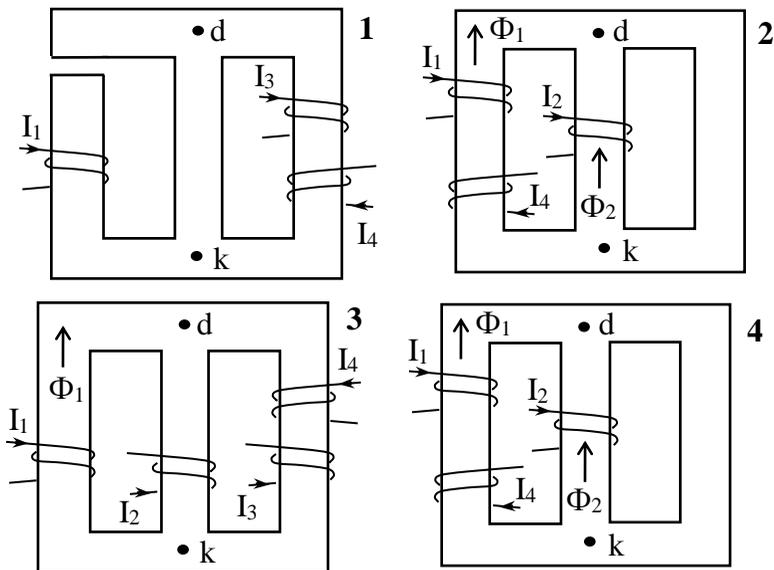


Рис. 5.6

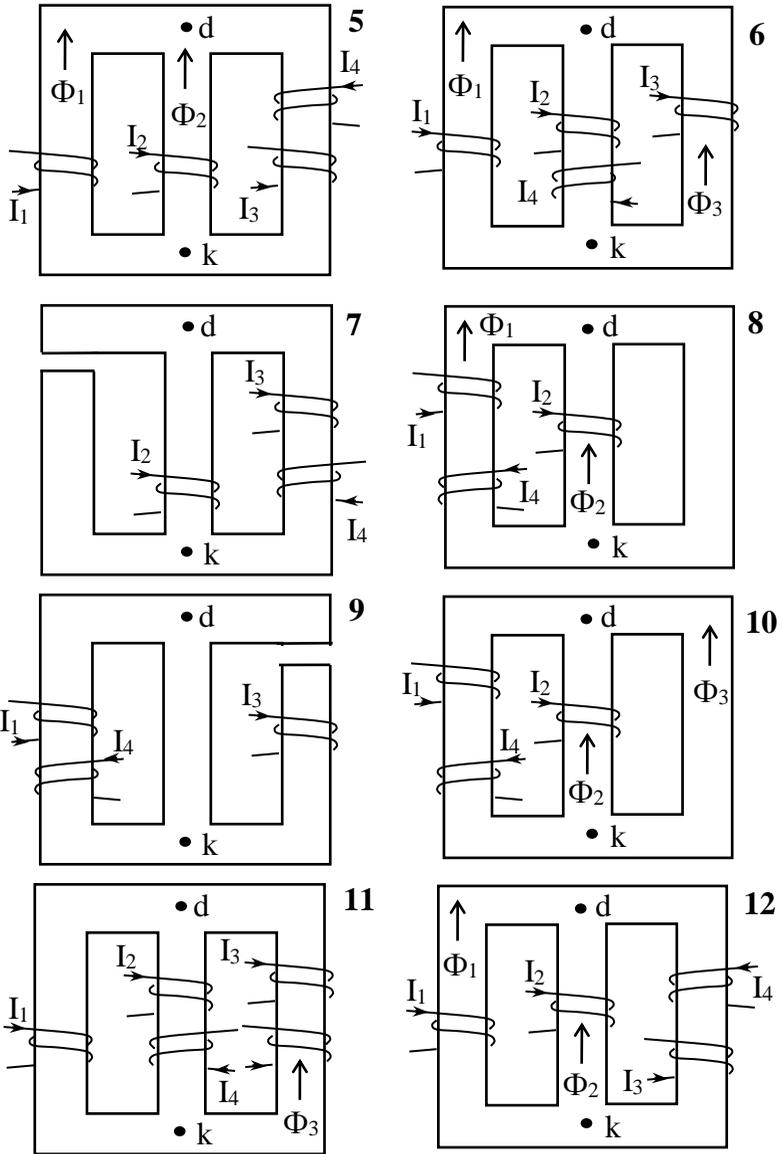


Рис. 5.6. Продолжение

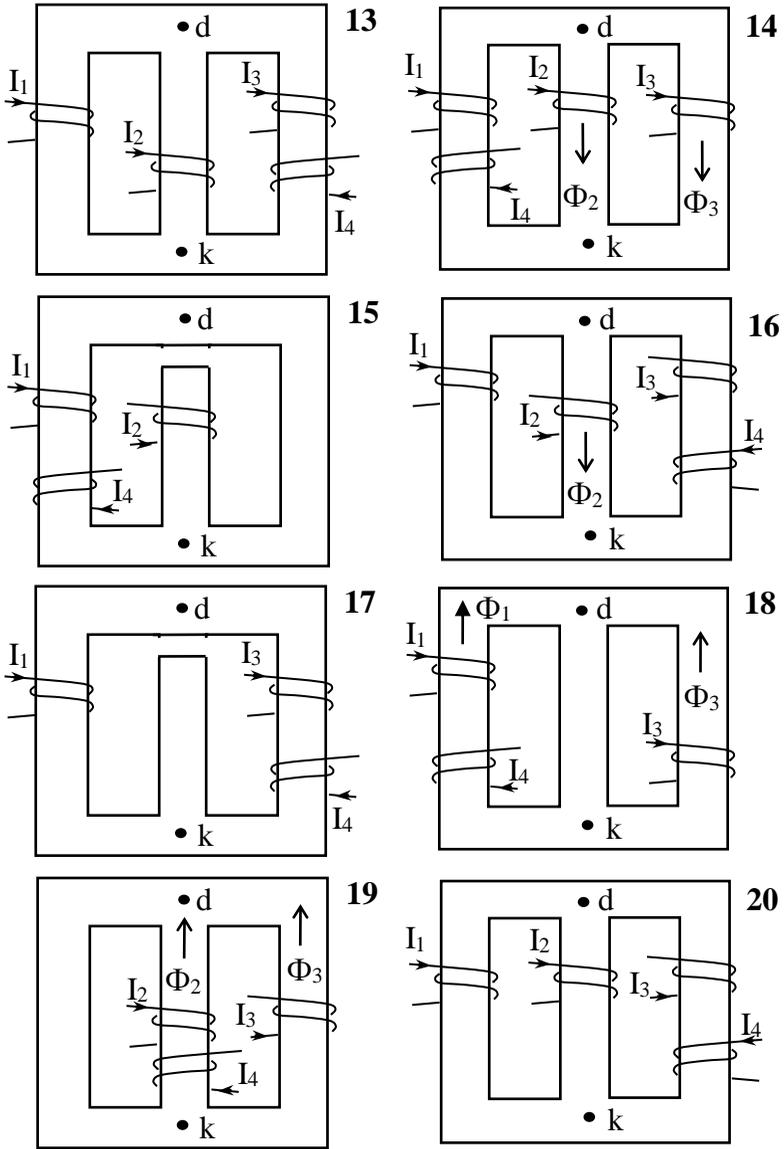


Рис. 5.6. Окончание

Таблица 5.2

№ вар.	№ рис.	l ₁ , см	S ₁ , см ²	w ₁	I ₁ , А	l ₂ , см	S ₂ , см ²	w ₂	I ₂ , А
1	1	30	4	300	1,52	10	6	-	-
2	2	100	6,15	300	0,3	33	4,2	200	-
3	3	11	1,95	100	-	3,5	0,965	400	0,05
4	4	35	2,9	140	0,25	10	4,75	390	-
5	5	30	4,3	300	0,1	12	6	300	-
6	6	30	7,3	105	1	11,5	12,3	50	0,3
7	7	13,5	7,5	-	-	4,32	1,9	100	1
8	8	30	5,6	150	0,2	10	5	200	-
9	9	32	14,4	300	0,75	25	10,5	-	-
10	10	40	42	300	0,4	13	14	-	0,3
11	11	28	7,95	290	0,5	11,5	15,8	26	1
12	12	28	3,9	38	0,5	8	6,8	275	-
13	13	30	4,2	430	0,5	10	4,8	-	0,1
14	14	19	8,1	300	0,15	6,5	5,1	210	0,1
15	15	25	8	635	0,1	10	5	-	0,1
16	16	70	97	550	0,4	35	220	250	1,4
17	17	55	55	260	1,0	18	84	-	-
18	18	55	25,3	500	0,5	25	50	-	-
19	19	43	11,9	-	-	14	11,5	100	1,1
20	20	32	9,3	270	0,065	9	7,7	-	0,2
21	3	13	2,05	100	-	3	0,94	1000	0,02
22	12	35	4,1	19	1	6	6,3	275	-
23	18	45	24,7	500	0,5	27	50,4	-	-
24	13	35	4,3	215	1	10	4,8	-	0,1
25	10	30	38	500	0,25	17	14,7	-	0,3

Продолжение табл. 5.2

№ вар	I_3 , см	S_3 , см ²	w_3	I_3 , А	w_4	I_4 , А	I_6 , мм	Дополнит. условия $\Phi \cdot 10^{-5}$ Вб	Определить
1	30	4	50	2,5	50	2,5	0,5	-	Φ_1, Φ_2
2	100	10	-	-	300	0,3	-	$\Phi_1=\Phi_2$	I_2, Φ_3
3	13	1,25	55	0,3	20	0,155	-	$\Phi_1=25$	I_1, Φ_2
4	45	8,33	-	-	50	0,5	-	$\Phi_2-\Phi_1=20$	I_2, Φ_1
5	20	4,8	100	0,42	50	0,21	-	$\Phi_2=0$	I_2, Φ_3
6	22,5	10	975	-	100	0,15	-	$\Phi_3-\Phi_1=20$	I_3, Φ_1
7	19,8	1,75	200	0,5	200	0,25	0,1	-	Φ_1, Φ_3
8	18	8,9	-	-	200	0,1	-	$\Phi_1=\Phi_2$	I_2, Φ_3
9	40	15	200	1	50	1,5	1	-	Φ_2, Φ_3
10	40	15	-	-	60	0,5	-	$\Phi_1=\Phi_3$	w_2, Φ_1
11	37	7,1	2000	-	50	0,5	-	$\Phi_3=98$	I_3, Φ_2
12	28	9,9	220	0,25	200	0,125	-	$\Phi_2-\Phi_1=20$	I_2, Φ_2
13	32	4,9	100	0,5	50	1	-	$\Phi_2=0$	w_2, Φ_1
14	15	3,2	150	-	165	0,1	-	$\Phi_2-\Phi_3=20$	I_3, Φ_1
15	25	3	50	0,2	40	0,1	0,57	$\Phi_2=70$	w_2, Φ_3
16	70	92	-	-	200	0,4	-	-	Φ_2, Φ_3
17	57	57	200	1,0	60	0,5	1,25	-	Φ_2, Φ_3
18	47	45,5	300	-	100	1	-	$\Phi_1=\Phi_3$	I_3, Φ_3
19	48	9,1	520	-	200	0,55	-	$\Phi_2=\Phi_3$	I_3, Φ_1
20	30	15,5	108	0,7	120	0,35	-	$\Phi_2-\Phi_1=20$	w_2, Φ_2
21	11	1,18	100	0,15	46	0,1	-	$\Phi_1=25$	I_1, Φ_3
22	25	9,6	200	0,2	200	0,2	-	$\Phi_2-\Phi_1=20$	I_2, Φ_3
23	48	47,5	300	-	100	1	-	$\Phi_1=\Phi_3$	I_3, Φ_1
24	20	4,4	600	0,1	200	0,2	-	$\Phi_2=0$	w_2, Φ_1
25	45	15,4	-	-	50	0,5	-	$\Phi_2=\Phi_3$	w_2, Φ_3

Таблица 5.3

H, А/м	20	40	60	80	120	200	400	600	800	1200
B, Тл	0,22	0,75	0,93	1,02	1,14	1,28	1,47	1,53	1,57	1,6

Методические указания к выполнению работы

На примере разветвленная магнитная цепи, показанной на рис. 5.7 определим магнитные потоки Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 в ветвях магнитной цепи.

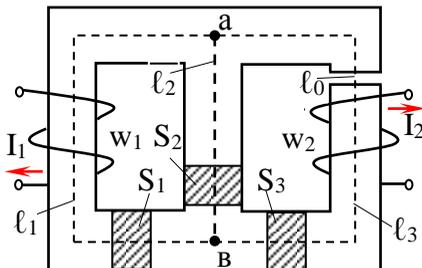


Рис. 5.7

Исходные данные для расчета:

- число витков и намагничивающие токи катушек:
 $I_1 = 0,2 \text{ A}$, $w_1 = 1500$ витков, $I_2 = 0,25 \text{ A}$, $w_2 = 800$ витков.

Размеры магнитопровода:

- длина однородных участков магнитопровода
 $l_1 = 48 \text{ см}$, $l_2 = 20 \text{ см}$, $l_3 = 40 \text{ см}$;
- ширина воздушного зазора $l_0 = 0,1 \text{ мм}$;
- сечение однородных участков магнитопровода
 $S_1 = 15,6 \text{ см}^2$, $S_2 = 10,3 \text{ см}^2$, $S_3 = 15 \text{ см}^2$.

Магнитные свойства стали, из которой изготовлен магнитопровод, определяются кривой намагничивания, заданной в виде табл. 5.4.

Таблица 5.4

H , А/м	20	40	60	80	120	200	400	600	800	1200
B , Тл	0,2	0,75	0,93	1,02	1,14	1,28	1,47	1,53	1,57	1,6

Решение. 1. Составляем расчетную схему замещения магнитной цепи (рис. 5.8). Однородные участки магнитопровода заменяем нелинейными магнитными сопротивлениями R_{M1} , R_{M2} , R_{M3} , воздушный зазор - линейным магнитным сопро-

тивлением $R_{мв}$. Намагничивающие катушки заменяем источниками магнитодвижущей силы (МДС) F_1 и F_3 , направление которых определяем по правилу правого винта: если вращательное движение направить по направлению тока в катушке, то поступательное движение винта покажет направление МДС.

Направления магнитных потоков Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 в ветвях магнитопровода выберем произвольно.

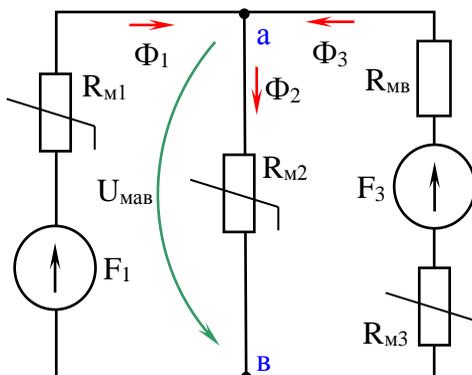


Рис. 5.8

Полученная расчетная схема магнитной цепи содержит нелинейные элементы, поэтому расчет будем выполнять графически.

Рассматриваемая схема имеет два узла, все ветви в ней включены параллельно. Для расчета магнитных потоков воспользуемся методом двух узлов.

2. Согласно первому закону Кирхгофа для магнитной цепи

$$\Phi_1(U_{мав}) + \Phi_3(U_{мав}) = \Phi_2(U_{мав}).$$

3. На первом этапе расчета строим вебер-амперные характеристики (ВАХ) $\Phi(U_m)$ для каждой ветви схемы замещения магнитной цепи в общей системе координат. Для этого воспользуемся кривой намагничивания стали магнитопровода $B=f(H)$, которая задана в табл. 5.4.

Расчет значений магнитных потоков и магнитных напряжений при построении вебер-амперных характеристик выполняем для каждой точки кривой намагничивания по следующим формулам:

- магнитный поток: $\Phi = B \cdot S$;

- магнитное напряжение на зажимах ветви находим по второму закону Кирхгофа для магнитной цепи, как алгебраическая сумма напряжений на всех элементах рассматриваемого участка:

$$U_{\text{мав}} = \sum_{k=1}^n U_{\text{mk}},$$

где U_{M} — напряжение магнитного сопротивления $U_{\text{M}} = H \cdot \ell$ (А);

U_{MB} — магнитное напряжение воздушного зазора

$$U_{\text{MB}} = H_0 \cdot \ell_0 = B \ell_0 / \mu_0 = 0,796 \cdot 10^6 B \cdot \ell_0 \text{ (А)};$$

U_{MF} — напряжение на источнике МДС $U_{\text{MF}} = F$ и направлено против направления МДС.

Для рассматриваемой схемы (рис. 5.8) уравнения для построения ВАХ для ветвей схемы замещения магнитной цепи имеют вид:

$$\text{ветвь I: } U_{\text{мав}}(\Phi_1) = F_1 - U_{\text{M1}} = w_1 I_1 - H_1 \ell_1;$$

$$\text{ветвь II: } U_{\text{мав}}(\Phi_2) = U_{\text{M2}} = H_2 \ell_2;$$

$$\text{ветвь III: } U_{\text{мав}}(\Phi_3) = F_3 - U_{\text{M3}} - U_{\text{MB}} = w_3 I_3 - H_3 \ell_3 - 0,796 \cdot 10^6 B_3 \ell_0.$$

Намагничивающие силы:

$$F_1 = I_1 w_1 = 0,2 \cdot 1500 = 300 \text{ А};$$

$$F_3 = I_3 w_3 = 0,25 \cdot 800 = 200 \text{ А}.$$

Результаты расчета представим в виде табл. 5.5. Выбирая попарно из табл. 5.5 величины Φ и $U_{\text{мав}}$ для каждой ветви схемы замещения магнитной цепи, строим вебер-амперные характеристики, представленные на рис. 5.9. ВАХ первой ветви показана синим цветом, ВАХ второй ветви – красным цветом, ВАХ третьей ветви – зеленым цветом.

Таблица 5.5

H, А/м	20	40	60	80	120	200	400	600	800	1200
B, Тл	0,2	0,75	0,93	1,02	1,14	1,28	1,47	1,53	1,57	1,6
Первая ветвь магнитопровода										
$\Phi_1=BS_1, 10^{-5}, \text{ Вб}$	34,3	117	145	159	178	200	230	239	245	250
$U_{M1}=Hl_1, \text{ А}$	9,6	19	28,8	38,4	57,8	96	192	288	334	576
$U_{\text{мав}}(\Phi_1) = w_1 I_1 - H l_1$	290,4	281	271,2	261,6	242,2	204	108	12	-34	-276
Вторая ветвь магнитопровода										
$\Phi_2=BS_2, 10^{-5}, \text{ Вб}$	22,7	77	96	105	117	132	151	158	162	165
$U_{M2}=Hl_2, \text{ А}$	4	8	12	16	24	40	80	120	160	240
$U_{\text{мав}}(\Phi_2) = H l_2$	4	8	12	16	24	40	80	120	160	240
Третья ветвь магнитопровода										
$\Phi_3=BS_3, 10^{-5}, \text{ Вб}$	33	113	140	153	171	192	221	230	236	240
$U_{M3}=Hl_3, \text{ А}$	8	16	24	32	48	80	160	240	320	480
$U_{\text{MB}}=Bl_0/\mu_0, \text{ А}$	17	69	74	81	91	102	117	122	125	127
$U'_{M3} = U_{M3} + U_0, \text{ А}$	25	76	98	113	139	182	277	362	444	607
$U_{\text{мав}}(\Phi_3) = w_3 I_3 - H_3 l_3 -$ $- 0,796 \cdot 10^6 B_3 l_0$	175	124	102	87	61	18	-77	-162	-244	-407

4. Согласно первому закону Кирхгофа для узла «а» сумма магнитных потоков равна нулю:

$$\Phi_1(U_{\text{мав}}) + \Phi_3(U_{\text{мав}}) = \Phi_2(U_{\text{мав}}).$$

Строим суммарную характеристику $(\Phi_1 + \Phi_3) = f(U_{\text{мав}})$ складывая потоки по оси ординат (розовая кривая рис. 5.9).

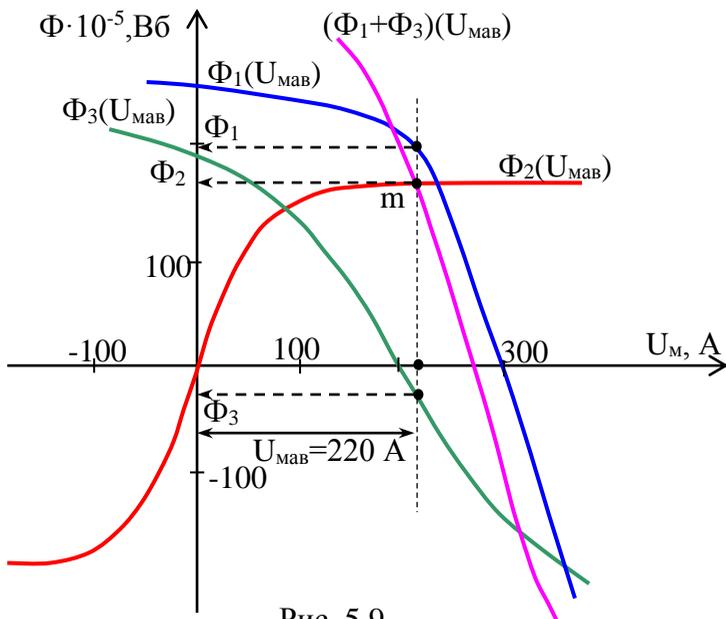


Рис. 5.9

5. Находим точку «m», где розовая кривая пересекается с ВАХ красного цвета –ВАХ второй ветви. Опуская из точки «m» перпендикуляр на ось напряжений, определяем магнитное напряжение $U_{\text{мав}}$, при котором выполняется первый закон Кирхгофа. В нашем случае $U_{\text{мав}}=220$ А.

6. Проводим вертикальную прямую через точку, соответствующую на оси напряжений магнитному напряжению $U_{\text{мав}}=220$ А и находим точки пересечения этой прямой с вебер-амперными характеристиками ветвей. Проецируя эти точки пересечения на ось магнитных потоков Φ , находим значения магнитных потоков в ветвях Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 .

Получаем следующие значения магнитных потоков:

$$\Phi_1=195 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}, \quad \Phi_2=164 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}, \quad \Phi_3=-30 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}.$$

7. Составляем для рассматриваемой схемы замещения магнитной цепи (рис. 5.8) уравнения по законам Кирхгофа.

Подставим в них числовые значения, убедимся в выполнении законов.

Согласно первому закону Кирхгофа

$$\Phi_1 + \Phi_3 - \Phi_2 = 0$$

или $195 \cdot 10^{-5} + (-30) \cdot 10^{-5} - 164 \cdot 10^{-5} \approx 0$.

Второй закон Кирхгофа:

- для первого контура $U_{M1} + U_{M2} = F_1$

или $H_1 \ell_1 + H_2 \ell_2 = w_1 I_1$;

- для второго контура

$$U_{M3} + U_{MB} + U_{M2} = F_3$$

или $H_3 \ell_3 + 0,796 \cdot 10^6 \cdot B_3 \ell_0 + H_2 \ell_2 = w_3 I_3$.

8. Рассчитываем магнитную индукцию на участках магнитопровода:

$$B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1} = \frac{195 \cdot 10^{-5}}{15,6 \cdot 10^{-4}} = 1,25 \text{ Тл};$$

$$B_2 = \frac{\Phi_2}{S_2} = \frac{164 \cdot 10^{-5}}{10,3 \cdot 10^{-4}} = 1,59 \text{ Тл};$$

$$B_3 = \frac{\Phi_3}{S_3} = \frac{-30 \cdot 10^{-5}}{15 \cdot 10^{-4}} = -0,2 \text{ Тл}.$$

9. По кривой намагничивания (табл. 5.4) определяем значения напряженности магнитного поля участков магнитопровода, соответствующие найденным значениям магнитной индукции.

При $B_1=1,25$ Тл, $B_2=1,59$ Тл, $B_3= - 0,2$ Тл значения напряженности поля соответственно будут равны:

$$H_1=180 \text{ А/м}, H_2=1100 \text{ А/м}, H_3=-18 \text{ А/м}.$$

Подставляем числовые значения в уравнения, составленные по законам Кирхгофа, и убеждаемся в их выполнении:

- для первого контура

$$H_1 \ell_1 + H_2 \ell_2 = w_1 I_1,$$

$$180 \cdot 0,48 + 1100 \cdot 0,2 = 306,4, \text{ А}$$

или $306,4$, $A \approx 300$, А;

- для второго контура

$$H_3 \ell_3 + 0,796 \cdot 10^6 \cdot B_3 \ell_0 + H_2 \ell_2 = w_3 I_3,$$

$$-18 \cdot 0,4 - 0,796 \cdot 10^6 \cdot 0,2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} + 110 \cdot 0,2 = 196,9, \text{ А}$$

или $196,9$, $A \approx 200$, А.

Задача 5.3: АНАЛИЗ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА В ДЛИННОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Однофазный генератор синусоидального напряжения соединяется с нагрузкой длинной линией. Первичные параметры линии R_0 , L_0 , G_0 , C_0 , частота f , длина линии l , действующее значение напряжения U_2 в конце линии, комплексное сопротивление нагрузки Z_H заданы в табл. 5.6 согласно варианту.

Задание

1. Рассчитать вторичные параметры линии – коэффициент распространения, коэффициент затухания α , коэффициент фазы β , волновое сопротивление Z_B , фазовую скорость, длину волны..

2. Рассчитать комплексные значения напряжения \dot{U}_1 и тока \dot{I}_1 в начале линии, активную P и полную S мощности в начале и конце линии, а также коэффициент полезного действия η линии.

3. Полагая, что линия стала линией без потерь ($R_0 = G_0 = 0$), а нагрузка на конце линии стала активной и равной модулю комплексной нагрузки Z_H , определить комплексные значения напряжения \dot{U}_1 и тока \dot{I}_1 в начале линии, а также длину электромагнитной волны λ .

Таблица 5.6

№ вар.	f, Гц	l, км	R ₀ , Ом/км	C ₀ , 10 ⁻⁹ Ф/км	L ₀ , 10 ⁻³ Гн/км	G ₀ , 10 ⁻⁶ См /км	U ₂ , В	Z _н , Ом
1	1000	177	10	5,9	4,16	0,75	70,5	1675e ^{-j11°}
2	5000	16,75	157,2	5,75	10	1,75	55,4	2770e ^{-j13°12'}
3	3000	56,7	20	6	4,1	1,25	42,3	423
4	7000	10	180,4	12,22	7,6	4,5	20	419 e ^{-j14°18'}
5	800	223	5,8	6,5	3,8	0,7	14,1	392 e ^{-j7°50'}
6	6500	10,5	204	5,6	8,54	4,2	36	800 e ^{-j15°22'}
7	4000	30,2	33,4	9,5	2,66	1,5	29,6	1130
8	9000	16,3	108	4,1	10,4	0,46	22,6	565 e ^{-j5°12'}
9	700	105	14,6	16,4	3,04	1,35	60	900 e ^{-j23°10'}
10	600	120	12,6	12,7	3,85	0,8	5	1270 e ^{-j20°}
11	1200	100	12,4	10	4,8	1,6	40	355 e ^{-j8°50'}
12	600	142	11	10	6	0,65	84,7	1620e ^{-j12°25'}
13	8000	12,7	97,2	6,4	7,5	0,82	60	667
14	2000	64,8	25,2	3,6	6,7	1	31	690 e ^{-j7°45'}
15	1800	47,1	54	6,8	7,08	1,9	24	2000e ^{-j16°15'}
16	1600	92,3	20,4	3,4	7,08	0,9	33,9	1060 e ^{-j7°15'}
17	1000	125	10	11,8	4,16	1,5	100	1188e ^{-j10°55'}
18	5000	11,85	157,2	11,5	10	3,5	78,6	1965e ^{-j13°12'}
19	3500	40	22,55	12,22	1,9	2,25	5	209,5e ^{-j14°18'}
20	800	157,5	5,8	13	3,8	1,4	20	278 e ^{-j7°50'}
21	900	57	19,2	14,8	10,8	1,55	88	1800 e ^{-j8°12'}
22	4000	21,35	33,4	19	2,66	3	42	800
23	9000	11,5	108	8,2	10,4	0,92	32	400 e ^{-j5°12'}
24	700	149	14,6	8,2	3,04	0,675	42,3	1255e ^{-j23°10'}
25	500	282	10	4,8	5,08	0,675	70,5	2200 e ^{-j15°}

4. Для линии без потерь (п.3) построить график распределения действующего значения напряжения вдоль линии в функции координаты u.

Методические указания к выполнению работы

Для схемы электрической цепи, состоящей из источника и приемника электрической энергии, связанных двухпроводной линией (рис. 5.10) определим напряжение и ток в начале линии, активную и полную мощность в начале и конце линии, а также ее КПД.

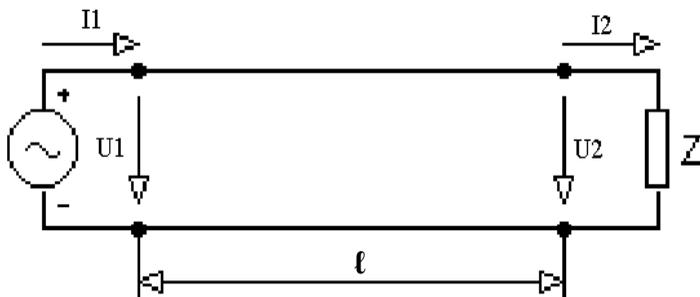


Рис. 5.10

Напряжение источника $U_1=220$ В; частота $f = 8800$ Гц;
длина $l = 2100$ м;

Параметры линии:

$R_0 = 185$ Ом/км;

$L_0 = 6,2$ м Гн /км;

$C_0 = 7,1 \cdot 10^{-9}$ Ф;

$G_0 = 16,5 \cdot 10^{-6}$ См/км.

Сопротивление нагрузки $Z_H = 110 + j260$ Ом.

Ток в линии уменьшается по мере удаления от начала линии, за счет емкостного тока и тока утечки через изоляцию. Напряжение между проводами тоже неодинаково, оно уменьшается от начала к концу линии, так как растет падение напряжения, обусловленное активным и индуктивным сопротивлениями проводов. Для расчета составляем схему замещения линии (рис. 5.11).

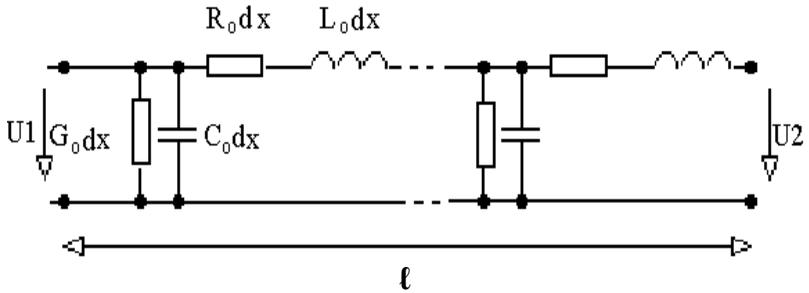


Рис. 5.11

Решение. 1. Рассчитаем вторичные параметры линии.

Циклическая частота генератора:

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 8800 = 55264 \text{ рад/с.}$$

Продольное сопротивление линии:

$$Z_0 = R_0 + j\omega L_0 = 185 + j55264 \cdot 6,2 \cdot 10^{-3} = 185 + j342,6 \text{ Ом/км.}$$

Поперечная проводимость линии:

$$Y_0 = G_0 + j\omega C_0 = 16,5 \cdot 10^{-6} + j55264 \cdot 7,1 \cdot 10^{-9} = 10^{-6}(16,5 + j392,4),$$

См/км.

Постоянная распространения волны:

$$\begin{aligned} \gamma &= \alpha + j\beta = \sqrt{Z_0 Y_0} = \sqrt{(185 + j342,6)(16,5 + j392,4) \cdot 10^{-6}} = \\ &= \sqrt{389,4e^{j62^\circ} 398,7e^{j88^\circ} \cdot 10^{-6}} = 0,391e^{j75^\circ} = 0,101 + j0,378 \text{ км}^{-1}, \end{aligned}$$

где коэффициент затухания - $\alpha = 0,101$ 1/км,

коэффициент фазы- $\beta = 0,378$ рад/км

Волновое сопротивление линии:

$$\begin{aligned} Z_B &= \sqrt{Z_0 / Y_0} = \sqrt{\frac{185 + j342,6}{10^{-6}(16,5 + j392,4)}} = \sqrt{\frac{389,4e^{j62^\circ}}{10^{-6} 392,7e^{j88^\circ}}} = \\ &= \sqrt{0,9916 \cdot 10^{-6} e^{-j26^\circ}} = 996 e^{-j13^\circ} = 970,5 - j224,1 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Фазовая скорость:

$$V_\Phi = \frac{\omega}{\beta} = \frac{55264}{0,378} = 146201 \text{ км/с.}$$

$$\text{Длина волны: } \lambda = V_{\Phi} / f = \frac{146201}{8800} = 16,6 \text{ км.}$$

2. Определяем токи, напряжения и мощности в начале и конце линии.

Уравнения установившегося синусоидального режима в линии:

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma y + \dot{I}_2 Z_B \operatorname{sh} \gamma y ;$$

$$\dot{I} = (\dot{U}_2 / Z_B) \operatorname{sh} \gamma y + \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma y ,$$

где \dot{U}_2, \dot{I}_2 - комплексные значения напряжения и тока в конце линии; \dot{U}, \dot{I} - комплексные значения напряжения и тока в точке, находящейся на расстоянии y от конца линии.

Полагая $y = \ell$, получим напряжение и ток в начале линии \dot{U}_1, \dot{I}_1 :

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma \ell + \dot{I}_2 Z_B \operatorname{sh} \gamma \ell ;$$

$$\dot{I}_1 = (\dot{U}_2 / Z_B) \operatorname{sh} \gamma \ell + \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma \ell .$$

Аргумент гиперболических функций:

$$\gamma \ell = (0,101 + j0,378)21 = 2,121 + j7,938 ;$$

$$\alpha \ell = 2,121; \beta \ell = 7,938 \text{ рад} .$$

Гиперболические косинус и синус комплексного аргумента могут быть вычислены по следующим формулам:

$$\operatorname{ch}(\alpha \ell + j \beta \ell) = \operatorname{ch} \alpha \ell \cos \beta \ell + j \operatorname{sh} \alpha \ell \sin \beta \ell ;$$

$$\operatorname{sh}(\alpha \ell + j \beta \ell) = \operatorname{sh} \alpha \ell \cos \beta \ell + j \operatorname{ch} \alpha \ell \sin \beta \ell .$$

Гиперболические функции вещественного аргумента могут быть рассчитаны по формулам:

$$\operatorname{ch} \alpha \ell = \frac{e^{\alpha \ell} + e^{-\alpha \ell}}{2} = \frac{e^{2,121} + e^{-2/121}}{2} = 4,23;$$

$$\operatorname{sh} \alpha \ell = \frac{e^{\alpha \ell} - e^{-\alpha \ell}}{2} = \frac{e^{2,121} - e^{-2/121}}{2} = 4,1.$$

При вычислении кругового косинуса и синуса необходимо помнить, что аргумент задан в радианах. Если требуется

перевести его в градусы, то можно воспользоваться соотношением:

$$\beta \ell = 7,938 \text{ рад} = 7,938 \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \text{ град} = 455^\circ ;$$

$$\cos \beta \ell = \cos 455^\circ = \cos (455 - 360^\circ) = \cos 95^\circ = -0,087;$$

$$\sin \beta \ell = \sin 455^\circ = \sin 95^\circ = 0,996.$$

Для $\text{ch } \gamma \ell$ и $\text{sh } \gamma \ell$ окончательно получаем:

$$\text{ch } \gamma \ell = 4,23(-0,087) + j 4,11 \cdot 0,996 = -0,368 + j4,094 = 4,11e^{j95^\circ};$$

$$\text{sh } \gamma \ell = 4,11(-0,087) + j4,23 \cdot 0,996 = -0,358 + j4,213 = 4,228 e^{j95^\circ}.$$

Ток в конце линии найдем из первого уравнения при замене u на ℓ :

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_2 Z_H \text{ch } \gamma \ell + j \dot{I}_2 Z_B \text{sh } \gamma \ell ;$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \frac{\dot{U}_1}{Z_H \text{ch } \gamma \ell + j Z_B \text{sh } \gamma \ell} = \\ &= \frac{220}{(110 + j260) \cdot 4,11e^{-j95^\circ} + 996e^{-j13^\circ} \cdot 4,228e^{-j95^\circ}} = \\ &= \frac{220}{-508,23 + j4523,61} = \frac{220}{4552,1e^{j96^\circ}} = 0,04833e^{-j96^\circ} \end{aligned}$$

Напряжение в конце линии найдем по закону Ома:

$$\dot{U}_2 = Z_H \dot{I}_2 = 0,04833 e^{-j96^\circ} (110 + j260) = 13,64e^{-j29^\circ} \text{ В.}$$

Ток в начале линии:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{U}_2}{Z_B} \text{sh } \gamma \ell + \dot{I}_2 \text{ch } \gamma \ell = 0,0579e^{j79^\circ} + 0,1986e^{-j1^\circ} = \\ &= 0,01105 + j 0,05684 + 0,19857 - j0,00347 = \\ &= 0,20962 + j0,05337 = 0,2163e^{j14^\circ} \text{ А.} \end{aligned}$$

Активную мощность в начале и в конце линии находим по формулам:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 = 220 \cdot 0,2163 \cos(0^\circ - 14^\circ) = 46,17 \text{ Вт} ;$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = 13,64 \cdot 0,04833 \cos(-29^\circ + 96^\circ) = 0,26 \text{ Вт.}$$

Коэффициент полезного действия линии:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{0,26}{46,17} 100\% = 0,56\%.$$

3. Полагая, что линия стала линией без потерь ($R_0=G_0=0$), а нагрузка на конце линии стала активной и равной модулю комплексной нагрузки Z_H , определяем комплексные значения напряжения \dot{U}_1 и тока \dot{I}_1 в начале линии, а также длину электромагнитной волны λ .

Для линии без потерь $R_0 = G_0 = 0$.

Рассчитаем параметры линии.

Постоянная распространения:

$$\gamma = \sqrt{j\omega L \cdot j\omega C} = j\omega\sqrt{L \cdot C} = j55264 \sqrt{6,2 \cdot 10^{-3} \cdot 7,1 \cdot 10^{-9}} = j0,367;$$

$$\alpha = 0; \beta = 0,367 \text{ рад/км.}$$

Волновое сопротивление:

$$Z_B = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{6,2 \cdot 10}{7,1 \cdot 10}} = 934,5 \text{ Ом.}$$

Фазовая скорость:

$$V_\Phi = \frac{\omega}{\beta} = \frac{55264}{0,367} = 150583 \text{ км/с.}$$

Длина волны:

$$\lambda = \frac{V_\Phi}{f} = \frac{150583}{8800} = 17,1 \text{ км.}$$

Для линии без потерь рассчитаем распределение действительного значения напряжения и тока вдоль линии в координатах y .

Так как коэффициент затухания $\alpha = 0$, то аргументом гиперболических функций является чисто мнимое число. Поскольку $\text{ch } \alpha y = 1$ и $\text{sh } \alpha y = 0$, то гиперболические функции преобразуются в тригонометрические:

$$\text{ch } \gamma y = \text{ch}(j\beta y) = \cos \beta y,$$

$$\text{sh } \gamma y = \text{sh}(j\beta y) = j \sin \beta y.$$

Уравнение для напряжения и тока в любой точке линии записываем в виде:

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \cos \beta y + j Z_B \dot{I}_2 \sin \beta y;$$

$$\dot{I} = j \frac{\dot{U}_2}{Z_B} \sin \beta y + \dot{I}_2 \cos \beta y .$$

Определяем ток в конце линии I_2 , используя первое уравнение системы и полагая, что $U = U_1$, $y = \ell$:

$$\dot{U}_1 = Z_H \dot{I}_2 \cos \beta \ell + j Z_B \dot{I}_2 \sin \beta \ell ;$$

$$\beta \ell = 0,367 \cdot 21 = 7,707 \text{ рад} = 442^\circ ;$$

$$\cos \beta \ell = 0,146 ; \sin \beta \ell = 0,99 ;$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \frac{\dot{U}_1}{Z_H \cos \beta \ell + j Z_B \sin \beta \ell} = \\ &= \frac{220}{(110 + j260) \cdot 0,146 + j984,5 \cdot 0,99} = 284e^{j89^\circ} \text{ А} . \end{aligned}$$

$$\text{Напряжение в конце линии: } \dot{U}_2 = Z_H \dot{I}_2 = 64,48e^{-j22^\circ} \text{ В} .$$

Напряжение и ток в любой точке линии определяем по формулам:

$$\dot{U} = 64,48 e^{-j22^\circ} \cos \beta y + j0,2284 \cdot 934,5 \sin \beta y ;$$

$$\dot{I} = j \frac{64,48}{934,5} e^{-j22^\circ} \sin \beta y + 0,2284 e^{-j89^\circ} \cos \beta y ;$$

$$\dot{U} = (59,78 - j 24,15) \cos \beta y + (213,41 + j3,73) \sin \beta y ;$$

$$\dot{I} = (0,0258 + j0,064) \sin \beta y + (0,004 - j0,2284) \cos \beta y ;$$

$$\dot{U} = (59,78 \cos \beta y + 213,41 \sin \beta y) + j(3,73 \sin \beta y - 24,15 \cos \beta y) ;$$

$$\dot{I} = (0,0285 \sin \beta y + 0,004 \cos \beta y) + j(0,064 \sin \beta y - 0,2284 \cos \beta y) .$$

Действующие значения напряжения и тока:

$$U = \sqrt{(59,78 \cos \beta y + 213,41 \sin \beta y)^2 + (3,73 \sin \beta y - 24,15 \cos \beta y)^2}$$

$$I = \sqrt{(0,0258 \sin \beta y + 0,004 \cos \beta y)^2 + (0,064 \sin \beta y - 0,2284 \cos \beta y)^2} .$$

$$\text{Волновая длина линии: } \beta \ell = 7,707 \text{ рад} = 2,45 \pi .$$

4. Для линии без потерь (п.3) строить график распределения действующего значения напряжения вдоль линии в функции координаты u .

Для этого выбираем несколько точек по длине линии (отсчитывая от конца линии) и рассчитаем действующие значения напряжения и тока. Результаты расчетов сводим в табл. 5.7. График распределения действующих значений напряжения и тока приведен на рис. 5.12.

Таблица 5.7

у рад	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π	$5\pi/4$	$3\pi/2$	$7\pi/4$	2π	2,45
у км	0	2,14	4,28	6,42	8,56	10,7	12,8	15,0	17,1	21,0
$\cos\beta u$	1	0,71	0	-0,7	-1	-0,7	0	0,71	1	0,14
$\sin\beta u$	0	0,71	1	0,71	0	-0,7	-1	-0,7	0	0,99
U, В	64,5	194	213	110	64,5	194	213	110	64,5	220
I, А	0,23	0,12	0,07	0,21	0,23	0,12	0,07	0,21	0,23	0,04

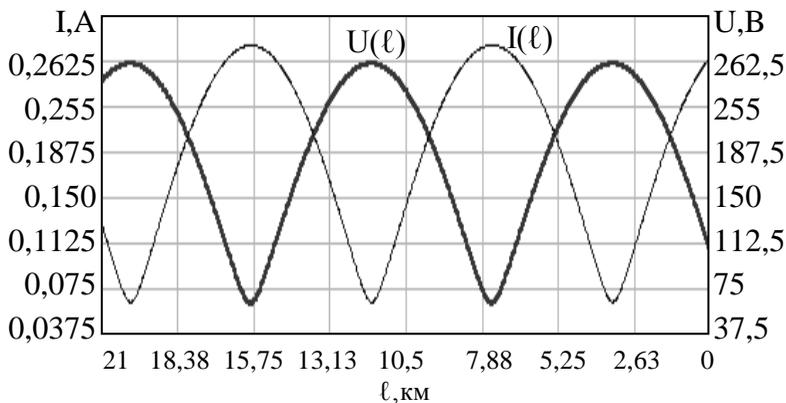


Рис. 5.12

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие «Теоретические основы электротехники: материалы для самостоятельной работы» направлено на самостоятельное выполнение студентами расчетно - графических работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники», предусмотренных учебным планом, а также на самостоятельную подготовку к решению экзаменационных задач по всем разделам изучаемого материала. Знание и умение, полученные студентами после знакомства с представленным учебным пособием, позволяет грамотно подойти к изучению дисциплин профиля.

В учебном пособии приведены примеры решения задач по всем основным разделам дисциплины «Теоретические основы электротехники»: «Линейные электрические цепи постоянного и однофазного синусоидального токов», «Трехфазные цепи», «Переходные процессы в линейных электрических цепях», «Нелинейные электрические цепи переменного тока», «Магнитные цепи», «Цепи с распределенными параметрами».

Методы анализа цепей постоянного тока, рассмотренные на конкретных примерах в данном пособии, используются далее для расчета, как линейных, так и нелинейных электрических и магнитных цепей постоянного и переменного токов. Умение рассчитывать различные симметричные и несимметричные режимы работы трехфазных цепей, знание методики расчета переходных процессов и явлений, происходящих в электрических цепях с сосредоточенными и распределенными параметрами, позволяют более успешно освоить материалы специальных дисциплин, изучаемых студентами при подготовке по профилям «Электропривод и автоматика», «Электромеханика», «Электроснабжение».

Таким образом, данное учебное пособие поможет студентам освоить дисциплину «Теоретические основы электротехники», который является одним из базовых при освоении студентами дисциплин учебного плана.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра электропривода, автоматике и управления
в технических системах

Расчетно-графическая работа № _____

«Название работы»

по дисциплине «Теоретические основы электротехники»

Вариант № _____

Выполнил: студент гр. (номер группы)
(фамилия, инициалы).

Принял: (должность преподавателя)
(фамилия, инициалы).

Дата: (число, месяц, год).

Оценка: _____

Воронеж 2016

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров / Л. А. Бессонов. - М.: Юрайт., 2012. 701 с.
2. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. - М.: Энергоатомиздат, 1989. 528 с.
3. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники / К.М. Поливанов. - М.: Энергия, 1972. 239 с.
4. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники / Г.И. Атабеков. - М.: Энергия, 1978. 245 с.
5. Шебес М.Р. Задачник по теории линейных электрических цепей / М.Р. Шебес, М.В. Каблукова. - М.: Высш. шк., 1990. 485 с.
6. Задачник по теоретическим основам электротехники (теория цепей) / под ред. К.М. Поливанова. – М.: Энергия, 1973. 304 с.
7. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники / под ред. П.А. Ионкина. - М.: Энергоиздат, 1982. 768 с.
8. Сборник задач по теоретическим основам электротехники / под ред. Л.А. Бессонова.- М.: Высш. шк., 2000. 528 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Цель выполнения расчетно-графических работ... ..	4
Требования к оформлению расчетно-графических работ	4
Расчетно-графическая работа №1. Анализ электрической цепи постоянного тока.	6
Расчетно-графическая работа № 2. Анализ линейной электрической цепи однофазного синусоидального тока	26
Расчетно-графическая работа № 3. Анализ трехфазных цепей	38
Расчетно-графическая работа № 4. Анализ переходных процессов в линейных электрических цепях постоянного тока	57
Расчетно-графическая работа № 5	75
Задача 5.1. Расчет нелинейной цепи по мгновенным значениям методом кусочно-линейной аппроксимации	75
Задача 5.2. Магнитные цепи постоянного тока	91
Задача 5.3. Анализ установившегося режима в длинной линии электропередачи	102
Заключение.....	111
Приложение.....	112
Библиографический список.....	113

Учебное издание

Попова Татьяна Владимировна
Ген Жанна Александровна
Щербаков Алексей Михайлович

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ:
ТИПОВЫЕ ЗАДАНИЯ
И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ

В авторской редакции

Компьютерный набор Ж.А. Ген

Подписано в печать 18.11.2016.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 7,1. Уч.- изд. л. 6,3. Тираж 100 экз.

Зак.№

ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14