Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной химии и физики

Электротехника

Домашние задания № 1 и № 2
для студентов строительного факультета

Учебно-методическое пособие

Уфа
2013

Учебно-методическое пособие содержит домашние задания и методические указания по расчету разветвленных цепей постоянного и переменного тока.

Приводится подробная методика расчета электрических цепей с использованием для решения уравнений с помощью ЭВМ. Даны контрольные вопросы для самопроверки и варианты заданий.

Составители: Гареев Г. Г., ст. преподаватель
Рябишина Л. А., преподаватель, к.т.н.

Рецензент: Жданов А. Г., доцент, к.т.н.

© Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

с.

1. Указания к выполнению заданий.....4
2. Задание №1. Расчет сложных цепей постоянного тока 5
2.1. Задание на расчет цепи.....5
2.2. Последовательность выполнения задания.....5
2.3. Примерный перечень вопросов для защит задания.....6
2.4. Пример расчета цепи постоянного тока.....9
2.4.1. Расчет цепи методом непосредственного применения законов Кирхгофа.....10
2.4.2. Расчет цепи методом контурных токов.....11
2.4.3. Расчет цепи методом наложения.....12
2.4.4. Баланс мощностей поля.....13
2.4.5. Построение потенциальной диаграммы.....14
3. Задание № 2. Расчет цепи синусоидального тока 15
3.1. Задание на расчет цепи.....18
3.2. Примерный перечень вопросов для защиты задания.....18
3.3. Пример расчета синусоидального тока.....18
3.3.1. Расчет токов в ветвях методом контурных токов.....19
3.3.2. Расчет мощностей и проверка правильности расчета мощностей токов при помощи уравнений баланса.....22
3.3.3. Построение векторной диаграмма токов на комплексной плоскости.....22
3.3.4. Уравнения для мгновенных значений токов.....23
3.3.5. Расчет цепи с одним источником эдс.....23
3.3.6. Расчет токов цепи символическим методом.....23
3.3.7. Определение мощностей.....24
3.3.8. Уравнения баланса активной и реактивной мощностей.....25
3.3.9. Коэффициент мощности цепи.....25
Литература.....25

Домашнее задание № 1 включает в себя анализ и расчет разветвленных цепей постоянного тока с использованием микро-ЭВМ.

Аналогичные задачи содержит задание № 2, но только для цепей переменного тока.

Прежде чем приступить к выполнению заданий, необходимо изучить теоретический материал по данным разделам курса и внимательно ознакомиться с помещенными ниже указаниями

I.УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЙ

1. Задания должны быть оформлены согласно требованиям ЕСКД.

2. Графики и диаграммы должны быть вычерчены на миллиметровой бумаге или на бумаге в клетку в удобном масштабе.

3. В ходе расчета цепей не следует менять однажды принятые направления токов и наименования узлов, сопротивление и т.д. При расчете разными методами обозначение одной и той же величины должно сохраняться.

4. Электрические схемы должны вычерчиваться с соблюдением условных графических изображений элементов этих схем. Следует строго придерживаться принятых буквенных обозначений электрических величин. Расчет каждой искомой величины следует сначала выполнять в общем виде, затем сделать подстановку числовых значений и привести окончательный результат с точностью до третьей значащей цифры с указанием единицы измерения.

5. К каждой задаче в заданиях 1 и 2 дается электрическая схема и таблица с числовыми данными. Преподаватель при выдаче задания указывает номер варианта *Nв* и значение *к* , по которым с помощью табл. I.I необходимо определить номер расчетной схемы *Nсх*, вариант параметров схемы *Nп* и какую из эдс в схеме необходимо принять равной нулю.

6. Пояснительная записка должна начинаться с указания значений *Nв* и К, исходной схемы и числовых данных.

7. Распечатку расчётов, выполненных на ЭВМ, необходимо вклеить в соответствующее место задания.

8. Все замечания, сделанные преподавателем при проверке задания, должны быть полностью сохранены при исправления ошибок. Домашнее задание, проверенное преподавателем и отвечающее перечисленным требованиям, защищается студентом. При защите студент должен быть подготовлен к ответу на любой вопрос по соответствующему разделу курса.

Таблица I. I.

Выбор номера и параметров схемы

Номер варианта *Nв*	Номер электрической схемы *Nсх*	Вариант параметров схемы *Nп*	Принять в схеме значение
1...30	1…30	*Nсх* + *К*	$E_3 = 0$
31...60	*Nв* – 30	*Nсх* + *К*	$E_2 = 0$
61...90	*Nв* - 60	*Nсх* + *К*	$E_1 = 0$

2. ЗАДАНИЕ № 1. РАСЧЕТ СЛОЖНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Задание на расчет цепи

Повиданному преподавателем номеру варианта (*Nв*) я значению *К* необходимо по табл. I.I данных указаний определить номер расчетной схемы (*Nсх*) и вариант параметров схемы (*Nn*), которые затем находят на рис. 2.1 и табл. 2.1 соответственно.

Для заданной цепи (схемы) необходимо выполнить следующее:

1. Определить токи во всех ветвях методом непосредственного использования законов Кирхгофа.
2. Определить токи в ветвях методом контурных токов.
3. Определить токи в ветвях методом наложения.
4. Составить баланс мощностей для исходной схемы.
5. Построить потенциальную диаграмму для контура включающего наибольшее количество эдс.

Примечание. Значение параметров элементов цепи, отсутствующих в схеме варианта задания, необходимо принять равными нулю, хотя они указаны в табл. 2.1 и используются при расчете других схем.

2.2 Последовательность выполнения задания

1. Выбрать произвольные направления токов в ветвях, выделить узлы и независимые контуры цепи и записать для них систему уравнений по 1-му и 2-му законам Кирхгофа.
2. Решить полученную систему линейных алгебраических уравнений на ЭВМ с использованием стандартной программы. Для этого составить матрицу из коэффициентов при неизвестных значениях токов и свободных членов и ввести ее (согласно прилагаемой инструкции) в ЭВМ. Если принятое направление тока не совпадает с действительным, то при расчете такой ток получается со знаком "минус".
3. В расчетной цепи выделить все простые контуры (т.е. такие, внутри которых отсутствуют ветви), произвольно задаться направлением контурного тока в каждом контуре.
4. Запасать для контуров уравнения по второму закону Кирхгофа относительно контурных токов и решить полученную систему уравнений (см. пункт 2).
5. Выразить токи ветвей цепи (ранее обозначенные на схеме) через контурные токи и рассчитать их.
6. Нарисовать дополнительные схемы для определения частичных токов по методу наложения. Число таких схем равно числу источников эдс исходной цепи. Каждая дополнительная схема содержит лишь один источник; остальные исключается, но остаются их внутренние сопротивления (при $R_{\text{внутр.}} = 0$ участок с эдс закорачивается).
7. Рассчитать частичные тока в ветвях от действия каждого источника.
8. Найти действительные токи ветвей, положительные направления которых указаны на исходной схеме, алгебраическим суммированием частичных токов.
9. Результаты расчета токов тремя методами свести в таблицу и сравнить.
10. Вычислить отдельно суммарную мощность источников и суммарную мощность потребителей и проверить, выполняется ли для расчетной цепи баланс мощностей.
11. Вычислить потенциал всех точек рассматриваемого контура, приняв потенциал одной из них равным нулю. Построить потенциальную диаграмму.

2.3. Примерный перечень вопросов для защиты задания

1.Начертите схему электрической цепи, состоящей из источника питания, потребителя (не содержащего эдс) и соединительных проводов. Обозначьте элементы схемы и напишите выражение закона Ома для всей цепи.

2.Напишите закон Ома для участка цепи, содержащего только пассивный приемник энергии (через сопротивление и через проводимость).

3.Напишите обобщенный закон Ома (для участка цепи, содержащего эдс).

4.Напишите выражение для напряжения на зажимах источника в режиме нагрузки.

5.Запишите выражение для эквивалентного сопротивления участка цепи, состоящего:

а) из последовательно соединенных сопротивлений;

б) из параллельно соединенных сопротивлений;

6.Как производятся "свертывание" схемы?

7. Сформулируйте законы Кирхгофа и напишите их математические выражения.

8. Изложите сущность метода расчета сложной цепи методом непосредственного применения законов Кирхгофа.

9. Почему при расчете цепи, содержащей n узлов, можно составить по первому закону Кирхгофа только n -1 уравнений?

10. В чем преимущество метода контурных токов по сравнению с методом непосредственного применения законов Кирхгофа?

11. От чего зависит число уравнений, составляемых при расчете цепи методом контурных токов?

12. По каким соображениям выбираются направления токов в ветвях исходной цепи? Как уточняются эти направления?

13. Может ли направление тока в ветви с эдс быть противоположным направлению этой эдс?

14. Определил показание вольтметра, включенного между любыми двумя точками цепи.

15. Объясните, на чем основывается метод наложения? Как производится расчет этим методом?

16. Напишите и объясните уравнение баланса мощности для сложной цепи.

Литература: [1, с. 47...67; 2, с. 16....49] .

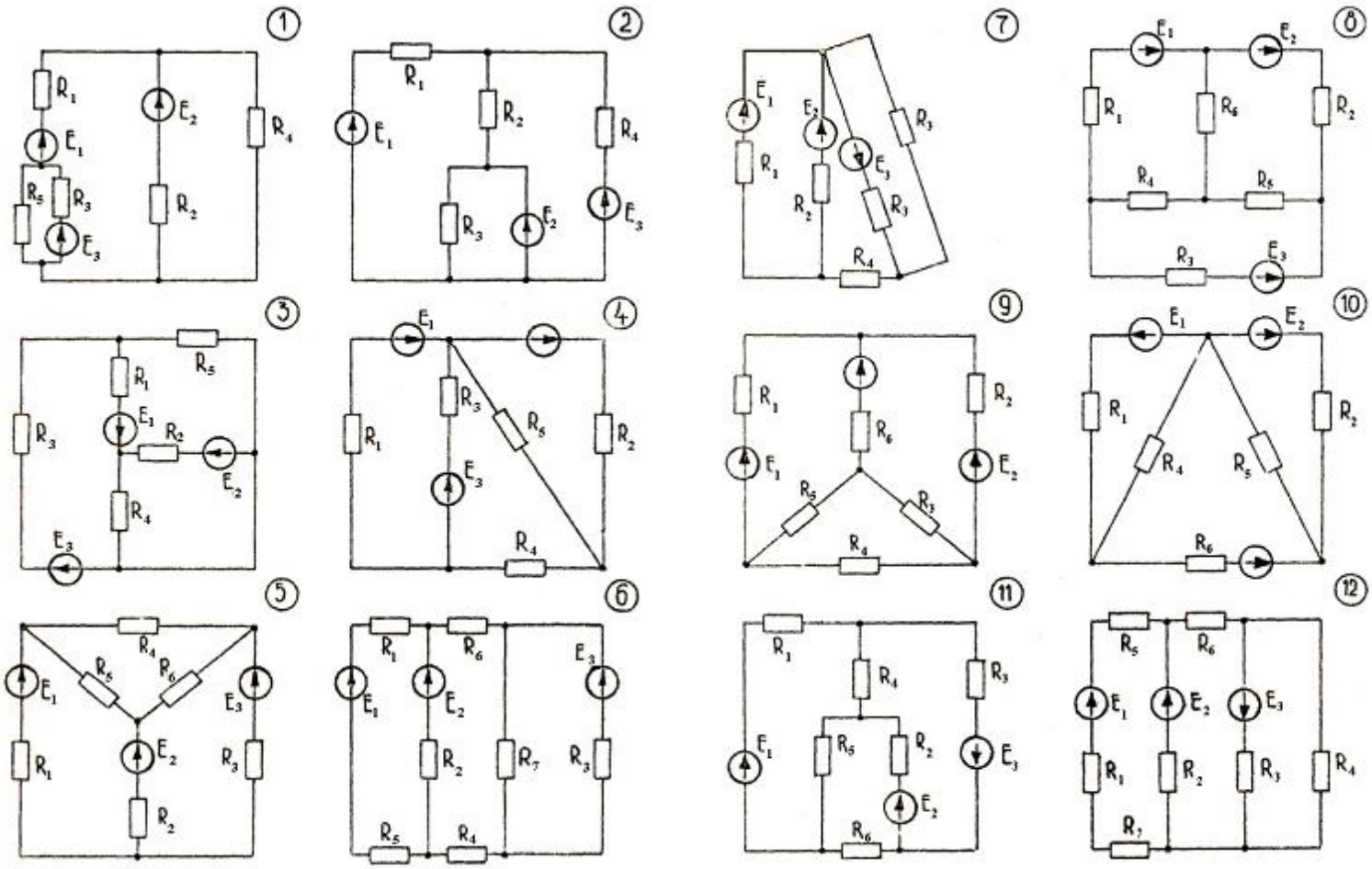


Рис. 2.1 Расчетные цепи (схемы) постоянного тока

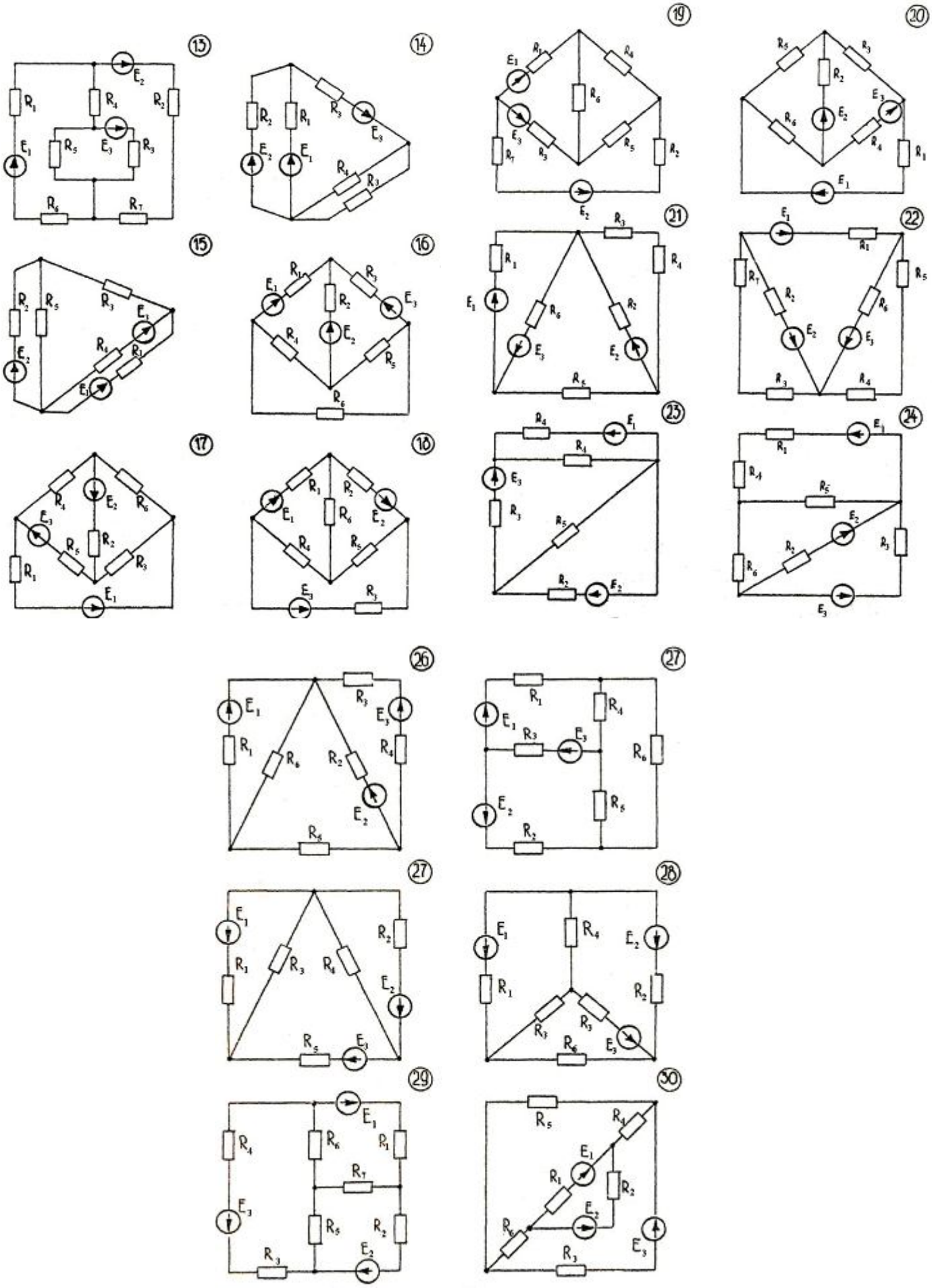


Рис. 2.1 Расчетные цепи (схемы) постоянного тока

Таблица 2.1

Значения параметров цепи (схемы) постоянного тока

Параметры цепи	E_1	E_2	E_3	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7
Ncx, Nn	В	В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
1	70	5	16	5	10	10	5	5	8	7
2	96	35	10	3	15	10	6	12	41	9
3	24	96	35	10	16	8	12	18	14	17
4	70	15	5	5	4	8	265	15	6	8
5	112	60	90	10	5	4	4	10	8	3
6	120	120	128	6	5	6	5	3	3	10
7	24	12	24	2	4	2	30	6	4	2
8	12	8	16	20	40	29	8	16	5	20
9	160	300	110	100	100	150	40	34	45	33
10	50	70	100	7	50	5	20	25	15	19
11	64	42	96	4	6	5	3	2	3	7
12	25	50	30	5	3	10	5	6	3	4
13	12	16	8	3	5	4	5	3	5	3
14	60	60	120	8	8	4	16	14	21	19
15	60	120	80	10	12	45	45	45	35	29
16	100	84	140	10	10	10	12	12	12	14
17	22	10	14	10	30	60	40	22	12	17
18	10	9	15	1	2	1	4	4	5	6
19	80	100	120	3	4	4	5	6	7	8
20	20	110	40	90	20	26	22	28	30	23
21	126	120	80	6	5	10	12	17	23	11
22	168	210	110	75	45	31	33	45	75	41
23	100	140	40	14	5	10	4	5	12	9
24	30	20	200	20	6	6	8	15	40	12
25	120	100	60	6	5	10	2	17	8	6
26	140	240	220	8	6	12	12	6	8	11
27	80	120	100	29	46	100	30	72	45	37
28	32	25	45	11	17	9	14	38	21	17
29	215	95	100	22	43	78	68	52	30	12
30	45	58	30	15	101	92	130	120	150	60

2.4. Пример расчета цепи постоянного тока

Для электрической схемы, изображенной на рис. 2.2,задано
E_1 = 120 *B*; E_2 = 100 *B*; E_3 = 0; R_1 = 6 Ом; R_2 = 5 Ом; R_3 = 10 Ом; R_4 = 2 Ом ; R_5 = 17 Ом.

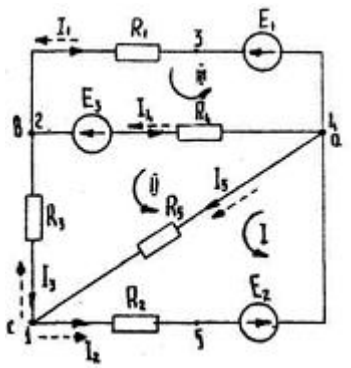


Рис. 2.2. Электрическая схема разветвленной цепи постоянного тока

2.4.1. Расчет цепи методом непосредственного применения законов Кирхгофа

Определяем количество узлов *у* в схеме и обозначаем их буквами (*у* = 3), число ветвей в схеме пять (*в* = 5). Произвольно направляем и обозначаем ток в каждой ветви.

По первому закону Кирхгофа составляем уравнение

$$n_I = y\text{-}1 = 3\text{-}1 = 2. \quad (2.1)$$

Число уравнений, которое необходимо составить по второму закону Кирхгофа,

$$n_{II} = в\text{-}n_I = 5\text{-}2 = 3. \quad (2.2)$$

По законам Кирхгофа составляем систему уравнений

$$\begin{cases} I_1 + I_2 + I_4 - I_5 = 0 & \text{для узла а ;} \\ -I_1 + I_3 - I_4 = 0; & \text{для узла в ;} \\ I_2R_2 + I_5R_5 = E_2; & \text{для I контура;} \\ -I_3R_3 - I_4R_4 - I_5R_5 = 0; & \text{для П контура;} \\ -I_1R_1 + I_4R_4 = E_1. & \text{для III контура .} \end{cases} \quad (2.3)$$

В систему уравнений (2.3) подставляем численные значения и приводим к виду, удобному для решения на ЭВМ .

$$\begin{cases} 1I_1 + 1I_2 + 0I_3 + 1I_4 - 1I_5 = 0; \\ -1I_1 + 0I_2 + 1I_3 - 1I_4 + 0I_5 = 0; \\ 0I_1 + 5I_2 + 0I_3 + 0I_4 + 17I_5 = 100; \\ 0I_1 + 0I_2 - 10I_3 - 2I_4 - 17I_5 = 0; \\ -6I_1 + 0I_2 + 0I_3 + 2I_4 + 0I_5 = 120. \end{cases} \quad (2.4)$$

Выпишем матрицу коэффициентов и свободных членов системы для решения на ЭВМ.

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 & 17 & 100 \\ 0 & 0 & -10 & -2 & -17 & 0 \\ -6 & 0 & 0 & 2 & 0 & 120 \end{vmatrix} \quad (2.5)$$

Введя в ЭВМ матрицу (2.5) (см. инструкцию с. 36), получим следующие результаты: $I_I = X_I$ = -16,745 А; $I_2 = X_2$ = 9,941 А; $I_3 = X_3$ = -6,982 А;
$I_4 = X_4$ = 9,763 А; I_5 = 2,956 А.

Отрицательные значения свидетельствуют о том, что действительное (положительное) направление токов I_1 и I_3,противоположное выбранному. На рис. 2.2 необходимо изменить направление этих токов и пунктирными линиями показать положительное направление токов во всех ветвях цепи.

2.4.2. Расчет цепи методом контурных токов

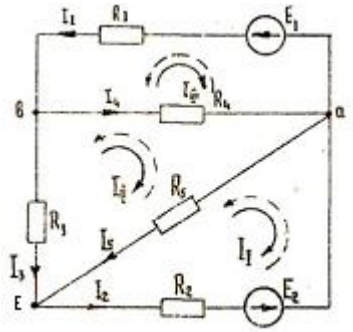


Рис. 2.3. Расчетная схема для МКТ

По методу контурных токов (МКТ) в заданной схеме (рис. 2.3) выделяем смежные контуры и указываем в них направления контурных токов I_I, I_{II}, I_{III} (для упрощения составления системы уравнений желательно направление всех контурных токов выбрать одинаковым, например, по часовой стрелке).

Запишем систему уравнений в общем виде через контурные токи по МКТ

$$\begin{cases} \\ \\ \\ \\ \end{cases}$$

Для данного примера: $R_I = R_2 + R_5 = 5 + 17 = 22$ Ом ;

$R_{II} = R_3 + R_4 + R_5 = 29$ Ом ; $R_{III} = R_1 + R_4 = 6 + 2 = 8$ ОМ $R_{I,II} = R_5 = 17$ Ом; $R_{II,III} = 2$ Ом ; $R_{I,IV} = 0$;

$\sum E_I = -E_2 = -100$ В ; $\sum E_{II} = 0$; $\sum E_{III} = -E_1 = -120$ В

Подставим в систему уравнений (2.6) численные значения и приведем ее к виду, удобному для решения на ЭВМ.

$$\begin{cases} 22I_I - 17I_{II} + 0I_{III} = -100; \\ -17I_I + 29I_{II} - 2I_{III} = 0; \\ 0I_I - 2I_{II} + 8I_{III} = -120. \end{cases} \qquad (2.7)$$

Введя в ЭВМ матрицу (2.8) системы уравнений (2.7) (см. инструкцию с. 36)

$$\begin{vmatrix} 22 & -17 & 0 & -100 \\ -17 & 29 & -2 & 0 \\ 0 & -2 & 8 & -120 \end{vmatrix} \qquad (2.8)$$

получим следующие результаты: $I_I = -9{,}941$ А; $I_{II} = -6{,}982$ А;
$I_{III} = -16{,}745$ А.

По результатам видно, что все действительные направления контурных токов, обратные выбранным. Токи I_I, I_2, I_3, протекающие по внешним участкам цепи, будут иметь значения соответствующих контурных токов и направлены по действительному (положительному) их направлению. Покажем положительное направление контурных токов и токов в ветвях схемы рис. 2.3 (положительные направления контурных токов показаны пунктирами). Токи I_4 и I_5

направляются в сторону большего положительного контурного тока. На основании вышеизложенного $I_I = I_{III}$ = 16,745 А; $I_2 = I_I$ = 9,941 А; $I_3 = I_{II}$ = 6,982 А; $I_4 = I_{III} - I_{II}$ = 16,745 – 6,982 = 9,763 А; $I_5 = I_I - I_{II}$ = 9,941 – 6,982 = 2,959 А.

2.4.3. Расчет цепи методом наложения

Изобразим основную (рис. 2.4, а) и дополнительные схемы (см.рис. 2.4, б, в), в последних оставляем по одной эдс , а вторую эдс закорачиваем. На рис. 2.4, б, в обозначим положительные направления токов в ветвях.

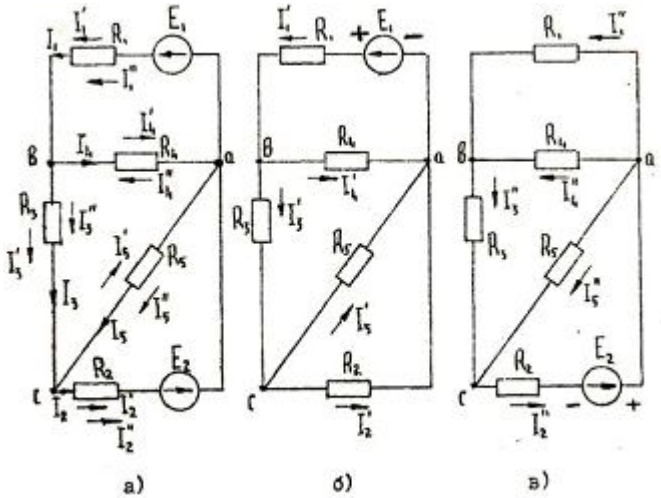


Рис. 2.4. Расчетные схемы: а)-основная; б) и в) -дополнительные - для определения частичных токов

Рассчитаем частичные токи. Для схемы рис. 2.4, б:

$$I_1' = \frac{E_1}{\dfrac{\left(\dfrac{R_2 \cdot R_5}{R_2 + R_5} + R_3\right) R_4}{\dfrac{R_2 \cdot R_5}{R_2 + R_5} + R_3 + R_4}} = \frac{120}{\dfrac{\left(\dfrac{5 \cdot 17}{5+17} + 10\right) \cdot 2}{\dfrac{5 \cdot 17}{5+17} + 10 + 2}} = \frac{120}{7,75} = 15,488 \quad A;$$

$$U_{ва}' = E_1 - I_1' R = 120 - 15,488 \cdot 6 = 27,072\ B;$$

$$I_4' = \frac{U_{ва}'}{R_4} = \frac{27,071}{2} = 13,536\ A.$$

По первому закону Кирхгофа для узла в

$I'_3 = I'_1 - I'_4$ = 15,488 - 13,536 - 1,952 А .

Токи I_2 и I_5 обратно пропорциональны сопротивлениям этих ветвей и определяются так:

$$I'_2 = I'_3 \cdot \frac{R_5}{R_5 + R_2} = 1,952 \ \frac{17}{17+5} = 1,508 \text{ А};$$

$$I'_5 = I'_3 \cdot \frac{R_2}{R_5 + R_2} = 1,952 \ \frac{5}{17+5} = 0,444 \text{ А}.$$

Для схемы рис. 2.4, в

$$I_2'' = \frac{E_2}{\dfrac{\left(\dfrac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_4} + R_3\right) R_5}{\dfrac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_4} + R_3 + R_5} + R_2} = \frac{100}{\dfrac{\left(\dfrac{6 \cdot 2}{6+2} + 10\right) \cdot 17}{\dfrac{6 \cdot 2}{6+2} + 10 + 17} + 5} = \frac{100}{11{,}857} + 8{,}432 \quad A;$$

$$U_{ac}'' = E_2 - I_2'' R_2 = 100 - 8{,}432 \cdot 5 = 57{,}840 \quad B;$$

$$I_5'' = \frac{U_{ac}''}{R_5} = \frac{57{,}84}{17} = 3{,}402 \quad A;$$

$$I_3'' = I_2'' - I_5'' = 8{,}432 - 3{,}402 = 5{,}030 \quad A;$$

$$I_1'' = I_3'' \cdot \frac{R_4}{R_1 + R_4} = 5{,}030 \cdot \frac{2}{6+2} = 1{,}257 \quad A;$$

$$I_4'' = I_3'' \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_4} = 5{,}030 \cdot \frac{6}{6+2} = 3{,}773 \quad A.$$

Переносим частичные токи схем рис. 2.4, б, в на основную расчетную схему рис. 2.4, а и по их направлению и значению определяем действительные токи основной схемы.

$$I_I = I'_I + I''_I = 15{,}488 + 1{,}257 = 16{,}745 \text{ А};$$

$$I_2 = I'_2 + I''_2 = 1{,}508 + 8{,}432 = 9{,}940 \text{ А};$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = 1{,}952 + 5{,}030 = 6{,}982 \text{ А};$$

$$I_4 = I'_4 - I''_4 = 13{,}536 - 3{,}773 = 9{,}763 \text{ А};$$

$$I_5 = I''_5 - I'_5 = 3{,}402 - 0{,}444 = 2{,}958 \text{ А}.$$

Токи I_4 и I_5 находим вычитанием соответствующего меньшего тока от большего и направляем в сторону большего частичного тока. Примечание: При расчете частичных токов для расчетных цепей 3, 5, 8, 9, 11, 16, 17, 18, 19, 20, 26, 28, 29 нужно применять преобразования схемы "треугольник" сопротивлений в эквивалентную "звезду" сопротивлений по формулам

$$R_{21} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}; \qquad R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}; \qquad R_{13} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3};$$

где R_1, R_2 , R_3 - сопротивления "треугольника";

R_{12} , R_{23}, R_{13} - эквивалентные значения "звезды" сопротивлений.

2.4.4. Баланс мощностей цепи

Проверку результата расчетов можно выполнить по балансу мощности

$$\sum_{i=1}^{n} E_i I_i = \sum_{i=1}^{m} I_i^2 Ri,$$

где *E*i, *I*i ,*R*i - соответственно значения эдс, тока и сопротивления *i*-ой ветви; *n* - число ветвей с эдс; *m* - число ветвей цепи.

В уравнение баланса произведение *E*i *I*i включается со знаком "плюс", если эдс и ток источника совпадают; в противном случае этот член включается в левую часть уравнения со

знаком "минус". Составим уравнение баланса мощности для рассчитываемой схемы (см. рис. 2.3):

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_2^5 R_5;$$

$16{,}746 \cdot 120 + 9{,}941 \cdot 100 = (\text{I}6{,}746)^2 \cdot 6 + (9{,}941)^2 \cdot 5 + (6{,}982)^2 \cdot 10 + (9{,}763)^2 \cdot 2 + (2{,}959)^2 \cdot 17;$

$3003{,}62$ Вт = $3004{,}65$ Вт.

Относительная погрешность расчета

$$\gamma\% = \frac{P_П - P_п}{P_П} \cdot 100\%$$

$$\gamma\% = \frac{3004,65 - 3003,62}{3004,65} \cdot 100\% = 0,0348\%.$$

Допустимая относительная погрешность расчета 0,5 %.

2.4.5. Построение потенциальной диаграмм

На рис. 2.2 выбираем замкнутый контур, включавший обе эдс. Для построения потенциальной диаграммы пронумеруем рассматриваемый контур цепи и примем потенциал какой-либо точки равным нулю (например, точки I, т.е. $\varphi_1 = 0$ (см. рис. 2.2). Точки контура 1, 2, 3, 4, 5, I ставим после каждого элемента схемы.

Потенциалы других точек относительно точки I ($\varphi_1 = 0$) определяются следующим образом:

$\varphi_2 = \varphi_1 + I_3 R_3 = 0 + 6{,}98 \cdot 10 = 69{,}8$ В;
$\varphi_3 = \varphi_2 + I_1 R_1 = 69{,}8 + 16{,}75 \cdot 6 = 170{,}3$ В;
$\varphi_4 = \varphi_3 - E_1 = 170{,}3 - 120 = 50{,}3$ В;
$\varphi_5 = \varphi_4 - E_2 = 50{,}3 - 100 = -49{,}7$ В;
$\varphi_1 = \varphi_5 + I_2 R_2 = -49{,}7 + 49{,}7 = 0.$

На потенциальной диаграмме откладываются потенциалы отдельных точек выбранного контура по отношению к одной точке, потенциал которой принят за нуль. Порядок расположения выбранных точек должен соответствовать порядку расположения каждого элемента на схеме с учетом величины его сопротивления. При таком построении каждой точке контура соответствует определенная точка на потенциальной диаграмме.

Приняв масштабы для единиц потенциала (m_φ) и сопротивления (m_R), построим потенциальную диаграмму.

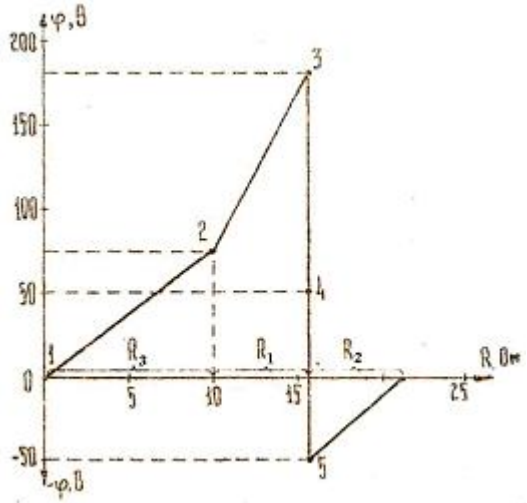


Рис. 2.5. Потенциальная диаграмма контура

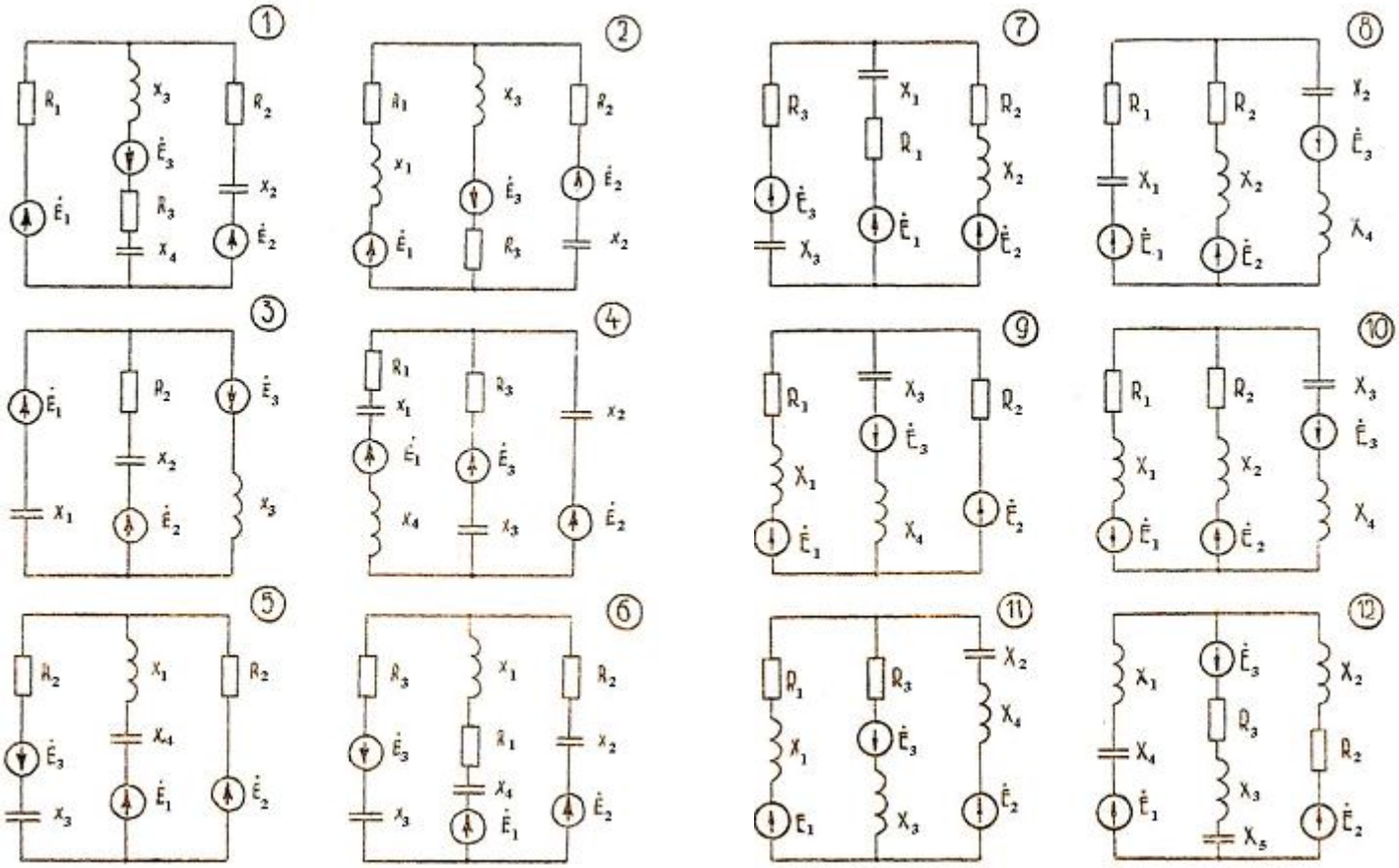
Для данного примера приняты следующие масштабы: m_φ = 2 В/мм; m_R = 0,25 Ом/мм.

По построенной потенциальной диаграмме (рис. 2.5) можно определить напряжение между любыми точками выбранного контура, что бывает необходимо при анализе работы схемы.

3. ЗАДАНИЕ № 2. РАСЧЕТ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

3.1. Задание на расчет цепи

По выданному преподавателем номеру варианта (№$_В$) и значению *К* необходимо по табл. 1.1 данных указаний определить номер расчетной схемы (№$_{сх}$) и вариант параметров схемы (№$_п$), которые затем находят на рис. 3.1 и табл. 3.1 соответственно.



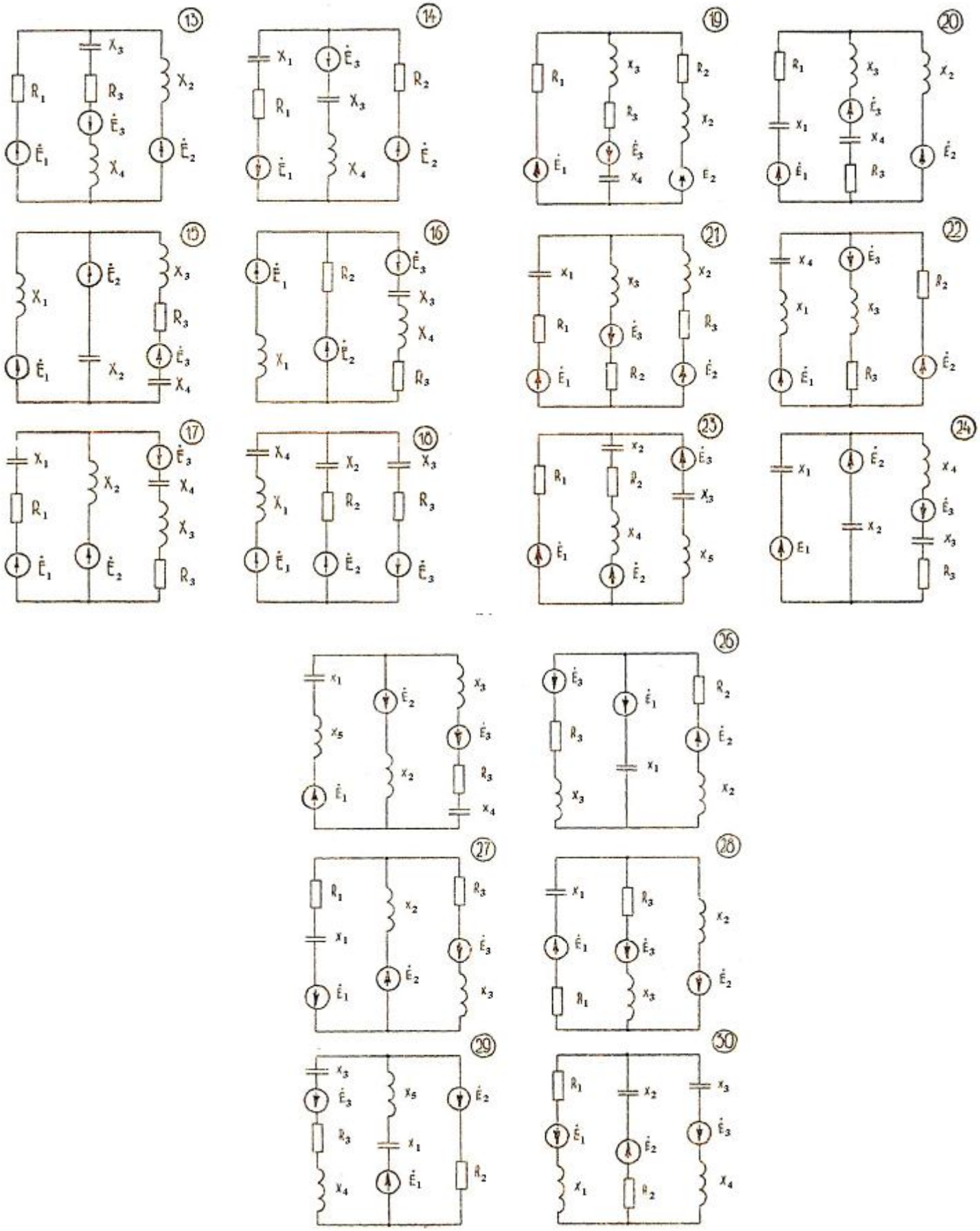


Рис. 3.1 Расчетные цепи (схемы) переменного тока

Таблица 3.1

Значения параметров цепи (схемы) переменного тока

Параметры цепи	R_1	R_2	R_3	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Ncx, Nn	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
1	10	5	11	7	4	12	17	11
2	42	21	17	13	17	14	12	9
3	14	12	13	6	4	4	3	2
4	45	58	33	19	23	10	15	22
5	12	17	21	22	9	5	14	4
6	41	41	20	16	16	16	41	34
7	39	52	19	19	14	13	34	12
8	21	16	15	12	13	21	48	32
9	47	58	37	11	9	43	15	27
10	37	78	43	30	34	77	15	14
11	28	20	31	11	40	28	12	9
12	14	19	19	7	12	8	17	16
13	125	99	78	64	101	105	78	81
14	71	67	39	41	31	21	60	44
15	87	77	55	75	95	145	105	100
16	26	36	17	37	24	34	11	9
17	75	109	145	130	115	100	85	74
18	41	51	82	102	91	72	52	34
19	17	28	39	54	61	41	21	30
20	18	13	11	12	17	10	21	16
21	61	41	21	17	11	14	19	20
22	91	127	107	33	24	47	66	57
23	41	38	28	14	10	71	26	40
24	89	100	117	99	101	180	67	69
25	44	52	32	10	12	14	30	25
26	29	33	40	17	10	31	31	11
27	55	44	35	70	30	60	50	39
28	36	39	60	45	18	40	29	41
29	67	55	43	100	61	34	85	70
30	27	63	24	55	30	72	22	30

$e_1 = 310 \sin 314t$ В; $e_2 = 310 \sin (314t + 60°)$ В; $e_3 = 141 \sin (314t - 30°)$ В

Примечание. Отсутствующие в схеме варианта задания параметры цепи (хотя они и указаны в табл. 3.1) необходимо принять равными нулю.

Для заданной цепи (схемы) необходимо выполнить следующее:

1.Рассчитать токи в ветвях методом контурных токов.

2.Определить активные и реактивные мощности источников эдс и всех пассивных элементов цепи.

3.Проверить правильность расчета токов, составив уравнения баланса активных и реактивных мощностей цепи.

4.Построить векторную диаграмму токов на комплексной плоскости.

5.Записать уравнения для мгновенных значений токов.

6.Исключить один из источников в схеме, соединив накоротко точки, к которым он присоединялся.

7.В полученной простой цепи со смешанным соединением элементов рассчитать токи во всех ветвях символическим методом.

8.Определить активную, реактивную и полную мощности цепи, а также активные и реактивные мощности всех ее элементов.

9.Выполнить проверку расчета, составив уравнения баланса активной и реактивной мощностей цепи..

10. Рассчитать коэффициент мощности цепи (cosφ) и определить его характер (отстающий или опережающий).

Литература: [1, с. 79...126; 2, с. 72...107].

3.2. Примерный перечень вопросов для защиты задания

1. Дать определения синусоидальной величины и основных её параметров: амплитуды, начальной фазы, частоты, угловой частоты.

2. Почему действующее значение синусоидальной величины является её основной характеристикой?

3. Показать связь между синусоидальной величиной и изображающим её вектором и комплексом.

4. С какой целью синусоидальные величины изображают векторами и комплексными числами?

5. Что такое векторная диаграмма?

6. Можно ли на векторной диаграмме изображать синусоидальные величины, изменяющиеся с разной частотой?

7. Объясните, почему при постоянном напряжения включение в цепь конденсатора равносильно разрыву цепи, а при переменном напряжении ток через емкость проходит?

8. Почему индуктивности элементов цепи учитывают при расчете переменных токов и не учитывают при расчете постоянных?

9. Как учитывают емкости и индуктивности элементов при расчете цепей синусоидального тока?

10. Как определить сдвиг фаз напряжения и тока цепи (угол φ)?

11. Что характеризует коэффициент мощности (cos φ)? Почему на практике стремятся увеличить cos φ ?

12. Что понимают под активной, реактивной и полной мощностями цепи? Как они рассчитываются?

13. В каких цепях возникает резонанс напряжения (тока) и почему он так называется? Каково значение коэффициента мощности при резонансе и почему оно такое?

14. В чем сущность символического метода расчета цепей переменного тока?

3.3. Пример расчета цепи синусоидального тока

Для схемы рис. 3.2 заданы: величины эдс и параметры цепи

$e_1 = 310 \cdot \sin(314\,t + 30°)$ В; $e_2 = 314 \sin(314\,t - 60°)$ В;

$R_I = 10$ Ом; $R_2 = 15$ Ом; $R_3 = 5$ Ом;

$x_I = 32$ Ом; $x_2 = 8$ Ом; $x_3 = 22$ Ом; $x_4 = 10$ Ом.

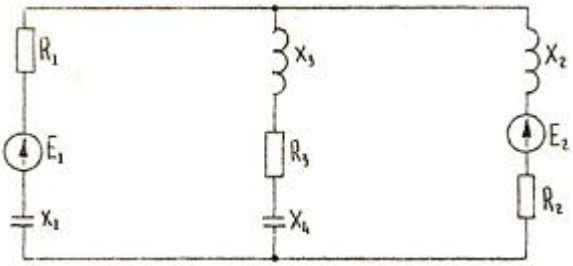


Рис. 3.2. Электрическая схема разветвленной цепи временного тока

3.3.1. Расчет токов в ветвях методом контурных токов

Предварительно представим эдс и сопротивления ветвей в комплексной форме:

$$\dot{E}_1 = E_1 e^{j\psi_1} = 220_e^{j30^\circ} = 190 + j110\,B;$$

$$\dot{E}_2 = E_2 e^{j\psi_2} = 220e^{-j60^\circ} = 110 - j190\,B.$$

Здесь $E_1 = E_2 = \dfrac{Em}{\sqrt{2}} = 310/\sqrt{2} = 220\,B$ - действующие значение эдс.

Комплексные сопротивления ветвей.

$$z_1 = R_1 - jx_1 = 10 - j\,32 = 33{,}5 \cdot e^{-j72°39'}\ \text{Ом};$$

$$z_2 = R_2 + j\,x_2 = 15 + j\,8 = 17e^{j28°04'}\ \text{Ом};$$

$$z_3 = R_3 + j(x_3 - x_4) = 5 + j\,(22 - 10) = 13e^{j67°38'}\ \text{Ом}.$$

Эквивалентная расчетная схема представлена на рис. 3.3.

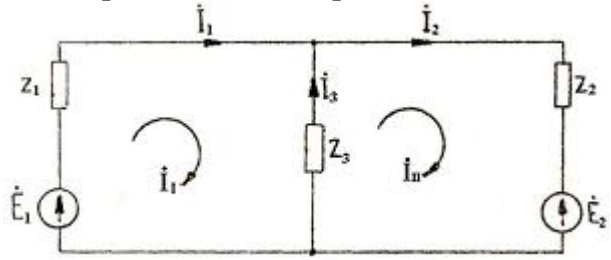


Рис. 3.3. Расчетная схема для МКТ

Схема имеет два смежных контура. Следовательно, по методу контурных токов нужно составить два уравнения. Зададимся произвольно направлениями контурных токов (в контурах удобно направлять их одинаково, например, по часовой стрелке) и составим для них уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} \dot{I}_I(z_1 + z_3) - \dot{I}_{II} z_3 = \dot{E}_3; \\ -\dot{I}_I z_3 + \dot{I}_{II}(z_2 + z_3) = -\dot{E}_2\,. \end{cases}$$

Здесь сопротивление первого контура

$$z_1 + z_3 = 10 - j32 + 5 + j12 = 15 - j20 \quad Ом;$$

сопротивление второго контура

$$z_2 + z_3 = 15 + j8 + 5 + j12 = 20 + j20 \quad Ом.$$

Сопротивление ветви, смежной для I-го и П-го контуров,

$$z_3 = 5 + j12 \quad Ом.$$

Подставляя значения сопротивлений и эдс в (3.1),получим

$$\begin{cases} (15 - j20)\dot{I}_I + (-5 - j12)\dot{I}_{II} = 190 + j110; \\ (-5 - j12)\dot{I}_I + (20 + j20)\dot{I}_{II} = -110 + j190. \end{cases}$$

Систему уравнений (3.2) проще рассчитать на ЭВМ, пользуясь комплексом программ с комплексными коэффициентам (КС) (см. инструкцию с. 36).

Для расчета системы уравнений (3.2) с помощью программа "матрица", или используя комплекс программ с действительными коэффициентами (ДС), необходимо выполнить следующие алгебраические преобразования. Комплексы контурных токов запишем в алгебраической форме

$$\dot{I}_I = I_{Iд} + jI_{IM};$$
$$\dot{I}_{II} = I_{IIд} + jI_{IIM},$$

где $I_{Iд}$ и $I_{IIд}$ - действительные составлявшие комплексов контурных токов $\dot{I}_I, \dot{I}_{II}$;

I_{IM} и I_{IIM} - мнимые составляющие комплексов контурных токов. Подставим эти токи в систему уравнений (3.1), одновременно сделав подстановку числовых значений сопротивлений и эдс:

$$\begin{cases} (I_{Iд} + jI_{IM})(15 - j20) - (I_{IIд} + I_{IIM})(5 + j12) = 190 + j110; \\ -(I_{Iд} + jI_{IM})(5 + j12) + (I_{IIд} + I_{IIM})(20 + j20) = -110 + j190. \end{cases} \qquad (3.3)$$

Раскроем скобки:

$$\begin{cases} 15I_{Iд} + j15I_{IM} - j20I_{Iд} + 20I_{IM} - j5I_{IIM} - 5I_{IId} - j12I_{IIд} + 12I_{IIM} = 190 + j110; \\ -5I_{Iд} + j5I_{IM} - j12I_{Iд} + 12I_{IM} + 20I_{IId} + j20I_{IIM} + j20I_{Iд} - 20I_{IIM} = -110 + j190. \end{cases}$$

Далее, используя известное свойство комплексных чисел, - два комплексных числа равны, если соответственно равны их вещественные и мнимые части, - запишем систему уравнений в следующем виде:

$$\begin{cases} 15I_{Iд} + 20I_{IM} - 5I_{IId} - 15I_{IIM} = 190; \\ -20I_{Iд} + 15I_{IM} - 12I_{IIд} - 5I_{IIM} = 110; \\ -5I_{Iд} + 12I_{IM} + 20I_{IIд} - 20I_{IIM} = -110; \\ -12I_{Iд} - 5I_{IM} + 20I_{IId} + 20I_{IIM} = 190. \end{cases}$$

Для решения полученной системы уравнений на ЭВМ составим матрицу из коэффициентов при действительных и мнимых составляющих токов и свободных членов. Матрица имеет вид

$$\begin{array}{ccccc} I_{I\partial} & I_{IM} & I_{II\partial} & I_{IIM} & E \end{array}$$
$$\begin{vmatrix} 15 & 20 & -5 & 12 & 190 \\ -20 & 15 & -12 & -5 & 110 \\ -5 & 12 & 20 & -20 & -110 \\ -12 & -5 & 20 & 20 & 190 \end{vmatrix} \qquad (3.6)$$

Введя матрицу в ЭВМ (см. инструкцию с. 36), получаем следующие результаты:

$$\dot{I}_I = I_{I\partial} + jI_{1M} = -3{,}123 + j6{,}035 = 6{,}8e^{j117°22'} \quad A;$$
$$\dot{I}_{II} = I_{II\partial} + jI_{IIM} = -0{,}383 + j9{,}518 = 9{,}52e^{j92°18'} \quad A.$$

Действительные токи ветвей связаны с контурными токами следующим образом (см. рис. 3.3):

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_I; \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_{II}; \quad \dot{I}_3 = \dot{I}_{II} - \dot{I}_I = 2{,}74 + j3{,}48 = 4{,}43e^{j51°48'} \quad A.$$

При определении тока $\dot{I}_3$ из большего по модулю контурного тока $\left(\dot{I}_{II}\right)$ вычитаем меньший контурный ток $\left(\dot{I}_I\right)$ и направляем ток $\left(\dot{I}_3\right)$ по направлению большего контурного тока $\left(\dot{I}_{II}\right)$.

Действующие значения токов: $I_I = 6{,}8\,A; \quad I_2 = 9{,}52\,A; \quad I_3 = 4{,}43\,A.$

3.3.2. Расчет мощностей и проверка правильности расчета мощностей токов при помощи уравнений баланса

Полные комплексные мощности источников эдс определяется по формулам

$$\tilde{S}_1 = \dot{E}_1 \overset{*}{I} \quad \text{и} \quad \tilde{S}_2 = -\dot{E}_2 \overset{*}{I}_2$$

где $\overset{*}{I}_I$ и $\overset{*}{I}_{II}$ - сопряженные комплексы соответствующих токов. Знак "минус" в выражении $\tilde{S}_2$ учитывает, что направления эдс и тока второго источника не совпадают.

Итак, $\tilde{S}_1 = \dot{E}_1 \overset{*}{I}_1 = 220e^{j30°} \cdot 6{,}8e^{-j117°22'} = 1496e^{-j87°22'} = 68{,}9 - j1494 \quad BA.$

Отсюда мощности первого источника:

полная $S_1 = 1496 \quad BA;$

активная $P_1 = 68{,}9 \quad Bm;$

реактивная $Q = -1494 \quad BAp.$

$$\tilde{S}_2 = -\dot{E}_2 \overset{*}{I}_2 = -220e^{-j60°} \cdot 9{,}5e^{-j92°18'} = -2090e^{-j152°18'} = 2090e^{j27°42'} = 1855 + j974 \quad BA.$$

Мощности второго источника:

$$S_2 = 2090 \quad BA; \quad P_2 = 1855 \quad Bm; \quad Q = 977 \quad BAp.$$

Знак "плюс" перед P означает, что источник работает в режиме генератора и отдает в цепь активную мощность; знак "минус" означает, что источник работает в режиме потребителя и потребляет активную мощность. Знак "плюс" перед Q укалывает на то, что источник развивает

(отдает в сеть) реактивную индуктивную мощность; знак "минус" - что источник отдает в сеть реактивную емкостную мощность. По результатам расчета мощностей источников можно сделать вывод, что оба источника являются генераторами активной мощности и отдают в цепь реактивную емкостную (источник E_1) и реактивную индуктивную (источник E_2) энергии.
Активные и реактивные мощности пассивных элементов удобно рассчитывать по формулам соответственно

$$P = I^2 R \quad и \quad Q = I^2 (\pm x).$$

Здесь "плюс" соответствует индуктивному сопротивлению, а "минус" - емкостному. Рассчитаем эти мощности для исследуемой цепи:

$I_1^2 R_1 = 6,8^2 \cdot 10 = 462 \quad Вт;$ $\qquad I_1^2 (-x_1) = 6,8^2 (-32) = -1480 \quad ВАр;$

$I_2^2 R_2 = 9,5^2 \cdot 15 = 1354 \quad Вт;$ $\qquad I_2^2 x_2 = 9,5^2 \cdot 8 = 722 \quad ВАр;$

$I_3^2 R_3 = 4,43^2 \cdot 5 = 98 \quad Вт;$ $\qquad I_3^2 (x_3 - x_4) = 4,43^2 (22 - 10) = 236 \quad ВАр.$

Запишем уравнения баланса активных и реактивных мощностей цепи на основании закона сохранения энергии: алгебраическая сумма активных мощностей источников равна сумме активных мощностей, потребляемых всеми активными элементами цепи; алгебраическая сумма реактивных мощностей источников равна алгебраической сумме реактивных мощностей всех реактивных элементов цепи.

Для рассчитываемой цепи

$$P_1 + P_2 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3;$$
$$68,9 + 1855 = 462 + 1354 + 98; \quad 1924 \approx 1914.$$
$$Q_1 + Q_2 = I_1^2 (-x_1) + I_2^2 x_2 + I_3^2 (x_3 - x_4);$$
$$-1494 + 974 = -1480 + 722 + 236; \quad -520 \approx -522$$

Со знаком "плюс" записываются индуктивные мощности, со знаком "минус" - емкостные. Выполнение этих равенств означает, что расчет выполнен правильно.

Максимально допустимая погрешность расчета 1 %.

3.3.3. Построение векторной диаграммы токов на комплексной плоскости

Комплекс каждого тока изображаем соответствующим ему вектором, длина которого равна действующему значению тока (модулю комплекса), а угол, образуемый им с положительным концом вещественной оси, равен начальной фазе тока (аргументу комплекса). Можно построить вектор по его проекциям на оси - действительной и мнимой частям, комплексной величины. На рис. 3.4 показана векторная диаграмма токов рассчитываемой цепи. При правильно выполненном расчете векторная диаграмма должна соответствовать, уравнению первого закона Кирхгофа (для узла цепи), т.е. $\dot{I}_2 = \dot{I}_I + \dot{I}_3 . \frac{\pi}{2}$

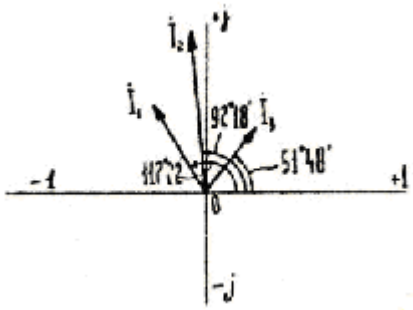


Рис. 3.4. Векторная диаграмма токов

3.3.4. Уравнения доя мгновенных значений токов

В результате расчета каждый ток получен в виде комплексов

$$\dot{I} = Ie^{j\psi},$$

где I - действующее значение тока;

ψ - начальная фаза.

Мгновенное значение тока имеет выражение

$$i = I_M \sin(\omega t + \psi) = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \psi).$$

Таким образом,

$$i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) = \sqrt{2} \cdot 6,8 \cdot \sin(314t + 117°22') = 9,6 \sin(314t + 117°22') \quad A;$$

$$i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \psi_2) = \sqrt{2} \cdot 9,5 \sin(314t + 92°18') = 13,4 \sin(314t + 92°18') \quad A;$$

$$i_3 = I_{3m} \sin(\omega t + \psi_3) = \sqrt{2} \cdot 4,43 \sin(314t + 128°12') = 6,26 \sin(314t + 57°48') \quad A.$$

3.3.5. Расчет цепи с одним источником эдс

Исключив один из источников, например, E_2, получим следующую схему (рис. 3.5). Комплексные сопротивления ветвей ранее подсчитаны:

$$z_1 = R_1 - jx_1 = 10 - j32 = 33,5e^{j72°39'} \quad Ом;$$

$$z_2 = R_2 - jx_2 = 15 + j8 = 17e^{j28°04'} \quad Ом;$$

$$z_3 = R_3 - j(x_3 - x_4) = 5 + j(22 - 10) = 5 + j12 = 13e^{j67°38'} \quad Ом.$$

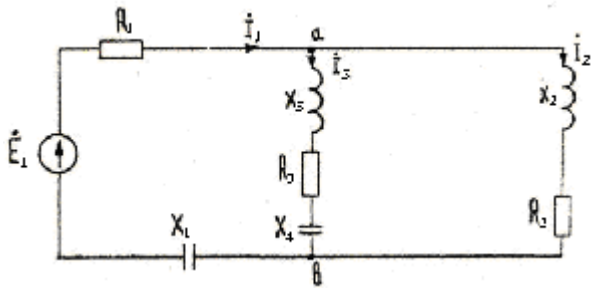


Рис. 3.5. Расчетная схема с одним источником эдс

3.3.6. Расчет токов цепи символическим методом

Определим эквивалентное сопротивление разветвленного участка цепи $Z_э$ (рис. 3.6).

$$z_э = \frac{z_2 \cdot z_3}{z_3 + z_2} = \frac{17e^{j28°44'} \cdot 13e^{j67°38'}}{(15 + j8) + (5 + j12)} = \frac{221 \cdot e^{j95°42'}}{28,3 \cdot e^{j45°}} = 7,81e^{j50°42'} = 5 + j6,04.$$

Здесь $R_э = 5$ Ом; $X_э = 6{,}04$ (индуктивное).

Эквивалентная простая последовательная цепь представлена на рис. 3.6.

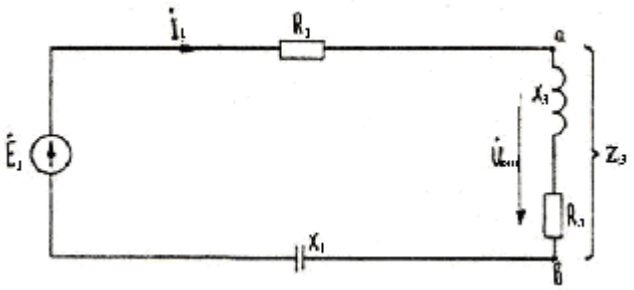


Рис. 3.6. Эквивалентная схема

Полное комплексное сопротивление всей цепи (входное сопротивление)

$$z_{вх} = z_1 + z_э = (R_1 + R_э) + j(-x_1 + x_э) = (10+5) + j(-32+6{,}04) = 15 - j25{,}96 = 30e^{-j60} \quad Ом.$$

Определяем ток $\dot{I}_1$:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{z_{вх}} = \frac{220 \cdot e^{j30^\circ}}{30e^{-j60^\circ}} = 7{,}33e^{j90^\circ} \quad A; \quad I_1 = 7{,}33 \quad A.$$

Токи в разветвлении:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{ав}}{z_2} = \dot{I}_1 \frac{z_2 \cdot z_3}{z_2 + z_3} \cdot \frac{1}{z_2} = \dot{I}_1 \frac{z_3}{z_2 + z_3} = 7{,}33e^{j90^\circ} \cdot \frac{13e^{j67^\circ 38'}}{(15+j8)(5+j12)} = 3{,}37e^{j112^\circ 38'}; \quad I_2 = 3{,}37 \quad A.$$

По аналогии

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 \frac{z_2}{z_2 + z_3} = 7{,}33e^{j90^\circ} \cdot \frac{17e^{j28^\circ 04'}}{(15+j8)(5+j12)} = 4{,}40 \cdot e^{j72^\circ 40'} \quad A; \quad I_3 = 4{,}4 \quad A.$$

3.3.7. Определение мощностей

Полная мощность (мощность на входе) равна мощности источника:

$$\tilde{S} = \dot{E}_1 \overset{*}{I}_1 = 220e^{j30} \cdot 7{,}33e^{-j90} = 1613e^{-j60} = 1613\cos(-60) + j1613\sin(-60^\circ) = 806 - j1398 \quad BA.$$

Мощности цепи равны

$$S = 1613 \quad BA; \quad P = 806 \quad Bm; \quad Q = -1398 \quad BAp\,(ёмк.).$$

Мощности на элементах цепи:

активные	реактивные
$I_1^2 R_1 = 7,33^2 \cdot 10 = 537 \quad Bm;$	$I_1^2 (-x_1) = 7,33^2 (-32) = -1719 \quad BAp;$
$I_2^2 R_2 = 3,37^2 \cdot 15 = 170 \quad Bm;$	$I_2^2 x_2 = 3,37^2 \cdot 8 = 91 \quad BAp;$
$I_3^2 R_3 = 4,4^2 \cdot 5 = 97 \quad Bm;$	$I_3^2 (x_3 - x_4) = 4,4^2 (22 - 10) = 232 \quad BAp.$

3.3.8. Уравнения баланса активной и реактивной мощностей

$$P = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3;$$

$$806 = 537 + 170 + 97; \quad 806 \approx 804.$$

$$Q = I_1^2 (-x_1) + I_2^2 x_2 + I_3^2 (x_3 - x_4);$$

$$-1398 = -1719 + 97 + 232; \quad -1398 \approx 1396.$$

Максимально допустимая погрешность расчета 1 %.

3.3.9. Коэффициент мощности цепи

$$\cos\varphi = \frac{P_u}{S_u} = \frac{R_u}{Z_u};$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{806}{1613} = 0,5 \quad (\textit{опережающий}).$$

Коэффициент мощности можно определять другим способом. Аргумент полного комплексного сопротивления $z_{вх}$ равен сдвигу фаз тока и напряжения, т.е. φ . Следовательно, $\varphi = -60^\circ$, $\cos\varphi = \cos(-60^\circ) = 0,5$ (опережающий), т.е. источник эдс E_1 питает активно-емкостную нагрузку.

ЛИТЕРАТУРА

1.Рекус Г.Г. Общая электротехника и основы промышленной электроники.-М.: Высшая школа, 2008.-654с.

2. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника.-М.: Высшая школа, 2003.-542с.