

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Ташкент 2021

Бурхонходжаев О.М., Абдураимов Э.Х., Идрисходжаева М.У., Нурматов Б.А. Электротехника и электроника: Учебно-методическое пособие – Ташкент: ТашГТУ, 2021. – 101 стр.

Данное учебно-методическое пособие рекомендуется для проведения практических занятий в высших технических учебных заведениях по дисциплине “Электротехника и электроника”.

В пособии показана теоретическая и практическая последовательность выполнения работ.

Учебно-методическое пособие поможет студентам высших технических учебных заведений расширить свои знания, охватить основные разделы курса. В процессе практических занятий студенты решат задачи на основании законов электротехники, углубляя свои знания, и выполнят домашние задания по предложенным вариантам

Печатается по решению научно-методического совета Ташкентского государственного технического университета.

Рецензенты:

проф. Бердиев У.Т. заведующий кафедрой
«Электротехника» (ТашГТУ)

Рахмонов И.У. заведующий кафедрой «Электроснабжение»
(ТГТУ)

©Ташкентский государственный технический университет 2021

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебно-методическое пособие охватывает основные разделы дисциплины «Электротехника и электроника» и включает в себя электрические цепи постоянного тока, однофазные электрические цепи синусоидального тока, трёхфазные электрические цепи, трансформаторы, электрические машины постоянного и переменного тока, а также раздел «Основы электроники».

В каждом разделе приведены краткие теоретические сведения. Приводится пример решения задачи по изучаемому разделу курса. Приведены многовариантные задания (до 50 вариантов) для самостоятельного решения.

При выборе задачи необходимо учитывать число часов отведённых для дисциплины «Электротехника и электроника» в учебной программе, а также специфику направления обучения студентов. Пособие предназначено для студентов неэлектротехнических специальностей.

Учебно-методическое пособие также может быть использовано для самостоятельной подготовки магистров и инженерно-технических работников производства.

ГЛАВА 1. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Основные законы электрических цепей.

Расчет линейной электрической цепи постоянного тока с одним источником электрической энергии.

Закон Ома

В соответствии с законом Ома ток, протекающий по участку цепи, прямо пропорционален напряжению этого участка цепи, и обратно пропорционален сопротивлению данного участка.

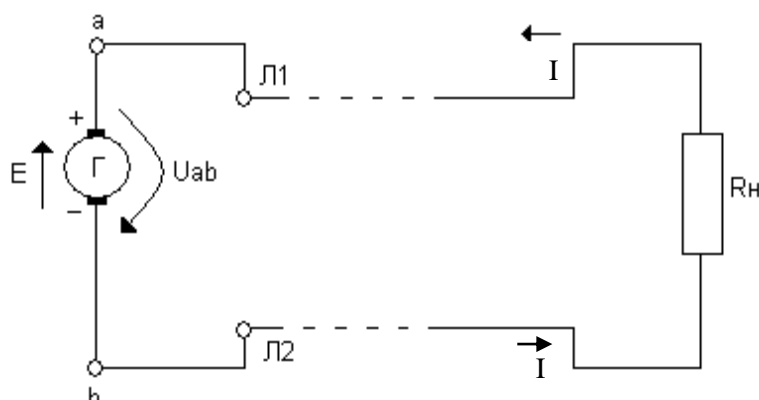


Рис. 1.1 Схема электрической цепи с одним источником

Формула закона Ома для участка цепи: $I = \frac{U}{R}$. В замкнутой цепи по всем элементам электрической цепи протекает один и тот же ток. Поэтому ток в замкнутом контуре (рис. 1.1) определяется по выражению:

$$I = \frac{E}{r_0 + R_{\text{л}} + R_{\text{н}}} \text{ или } I = \frac{E}{R_{\text{экв}}},$$

где $R_{\text{экв}} = r_0 + R_{\text{л}} + R_{\text{н}}$.

Данное выражение является законом Ома для всей (полной) цепи.

Провода L_1 и L_2 с нагрузкой $R_{\text{н}}$ образуют внешнюю цепь генератора (рис 1.1).

$$R_{\text{внеш}} = R_{\text{л}} + R_{\text{н}} \Rightarrow I = \frac{E}{r_0 + R_{\text{внеш}}}.$$

Здесь r_0 - внутреннее сопротивление генератора, $R_{л}$ - сопротивление проводов (линии), $R_{н}$ - сопротивление потребителя.

Законы Кирхгофа

Первый закон Кирхгофа. Первый закон Кирхгофа применяется для узла электрической цепи.

Точка, в которой сходятся (соединяются) три и более элемента электрической цепи, называется *узлом*. Согласно I-му закону Кирхгофа алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum_{k=3}^n I_k = 0.$$

Второй закон Кирхгофа. Этот закон справедлив для замкнутого контура электрических цепей. Согласно второму закона Кирхгофа: алгебраическая сумма ЭДС в замкнутом контуре равна алгебраической сумме падения напряжения на элементах этого контура:

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^p I_k r_k = \sum_{k=1}^p U_k.$$

Для замкнутого контура, приведенного на рис.1.2, выберем направление обхода. Токи и ЭДС, направление которых совпадают с направлением обхода, берем со знаком «+». Токи и ЭДС, направленные встречно, со знаком «-».

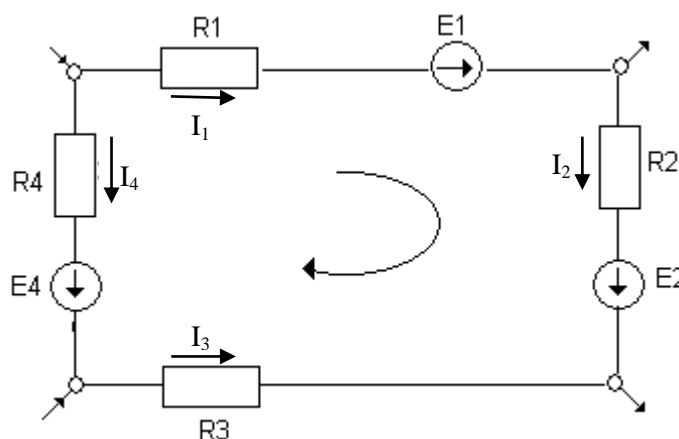


Рис. 1.2 Схема электрической цепи с тремя источниками ЭДС

Для схемы приведённой на рис.1.2 запишем уравнение по II-му закону Кирхгофа:

$$E_1 + E_2 - E_4 = I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_4 R_4 .$$

Закон Джоуля – Ленца

При протекании тока в проводнике происходит выделение тепла. *Количество выделяемой теплоты прямо пропорционально сопротивлению проводника, квадрату силы тока и времени его протекания:*

$$W = I^2 R \cdot t \quad [1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot 1 \text{ сек}]$$

Энергия, выделяемая за единицу времени, называется *мощностью*:

$$P = \frac{dA}{dt} = I^2 \cdot R \quad [\text{Вт}; \text{кВт}; \text{мВт}] \quad [1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж}/1 \text{ сек}]$$

Учитывая, что $U = I \cdot R$, тогда $I = U/R$ или $I = U \cdot g$, здесь $g = 1/R$, g – проводимость

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

Способы соединения сопротивлений. При последовательном соединении сопротивлений проводники соединяются один за другим без разветвлений и при их подключении к источнику питания, при этом по ним будет протекать один и тот же ток. Общее или эквивалентное сопротивление такой цепи равно сумме сопротивлений отдельных участков:

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

При параллельном соединении сопротивлений все проводники подключены на входное напряжение. Следовательно, общее или эквивалентное сопротивление для 2-х элементной цепи определяется из следующего выражения:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

На рис. 1.3 приведена схема преобразования сложной электрической цепи.

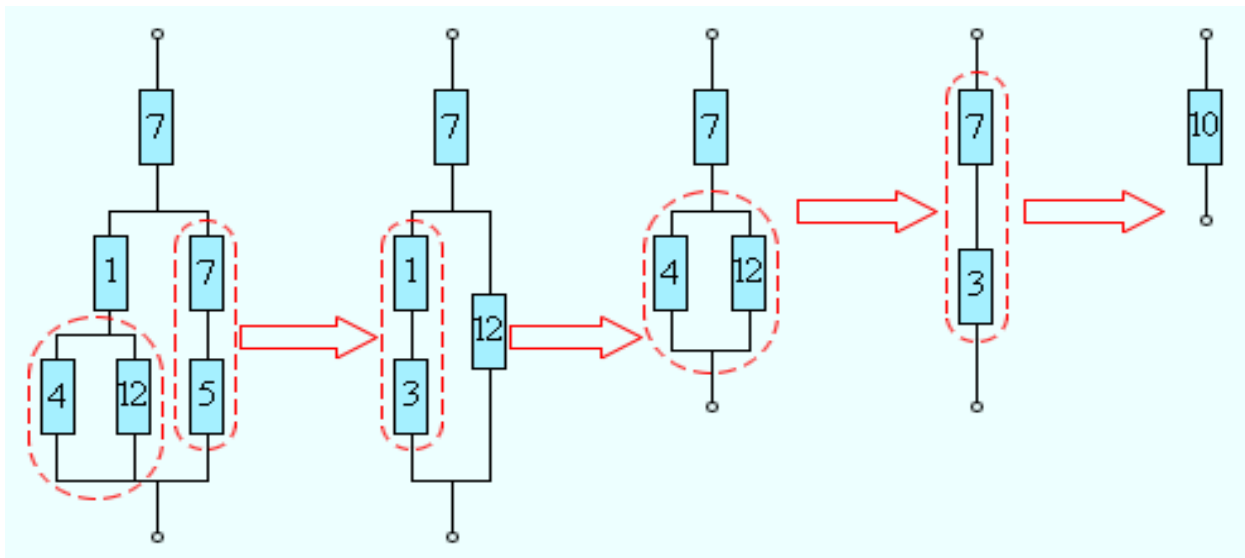


Рис. 1.3 Схема преобразования и определения эквивалентного сопротивления

Расчет разветвленной линейной цепи постоянного тока с несколькими источниками электрической энергии.

Для расчёта электрических цепей с несколькими источниками электрической энергии предусмотрено отдельные методы расчёта.

Метод расчёта электрических цепей с применением законов Кирхгофа

Согласно этому методу неизвестные токи в ветвях электрической цепи определяются из системы независимых уравнений, составляемых на основе I-го и II-го законов Кирхгофа. При этом по I-му закона составляются уравнения, число которых равно $k-1$, где k - число узлов сложной цепи. А по II-му закона Кирхгофа составляют уравнения, число которых равно $n-(k-1)$, где n -число ветвей электрической цепи.

На примере заданной схемы составим уравнения по законам Кирхгофа.

Выбираем направление токов I_1, I_2, I_3 (желательно по направлению E). Выбираем направление обхода контура по часовой стрелке.

По первому закону Кирхгофа для узла A составим уравнение, $k-1 \rightarrow 2-1=1$

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

По второму закону Кирхгофа $n - (k-1) \rightarrow 3 - (2-1) = 2$

$$1 \text{ контур: } E_1 + E_2 = I_1 R_1 + I_2 R_2 \quad (2)$$

$$2 \text{ контур: } E_2 - E_3 = I_2 R_2 - I_3 R_3 \quad (3)$$

Совместно решая уравнения (1), (2), (3), определим неизвестные токи в ветвях электрической цепи.

Метод наложения (суперпозиции)

Согласно этому методу, действительное значение тока, протекающего по ветвям, определяется как алгебраическая сумма частичных токов, вызванной каждой ЭДС в отдельности. Этот метод применяется, когда число источников не превышает трех:

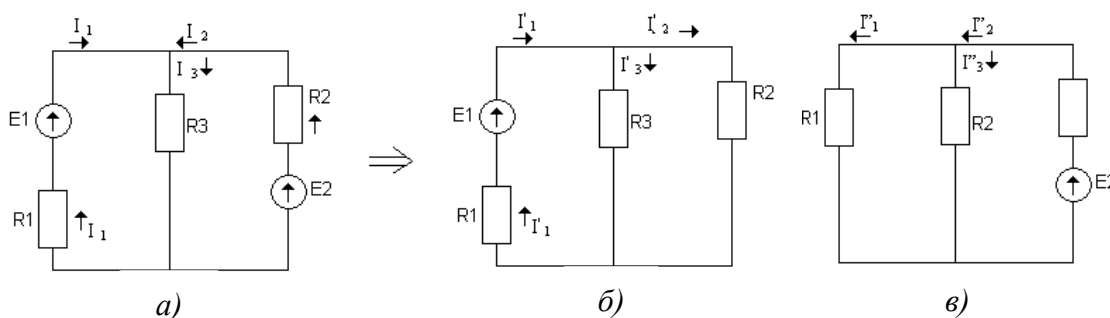


Рис.1.4 Расчётная схема

Исходная схема разбивается на две подсхемы (рис.1.4 б), в)). Для каждой подсхемы задаёмся направлениями частичных токов. Для определения частичных токов используется известная методика расчета цепи с одним источником электрической энергии. После определения частичных токов действительное значение токов определяются как алгебраическая сумма частичных токов.

Частичные токи, вызванные источником э.д.с. E_1 :

$$I'_1 = \frac{E_1}{R_{13}},$$

$$R_{13} = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2} + R_3,$$

$$I'_2 = \frac{I'_1}{R_3},$$

$$I'_3 = \frac{I'_1 \cdot R_2}{R_2 + R_3}.$$

Частичные токи, вызванные источником э.д.с. E_2 :

$$I_2'' = \frac{E_2}{R_{23}},$$

$$R_{23} = R_2 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1} + R_3,$$

$$I_1'' = \frac{I_2'' \cdot R_3}{R_1 + R_3},$$

$$I_3'' = \frac{I_2'' \cdot R_1}{R_1 + R_3}.$$

Действительные токи определяются как:

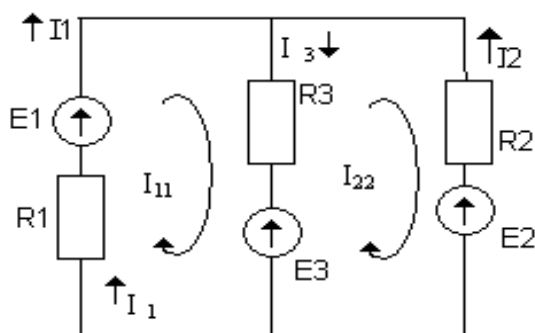
$$I_1 = I_1' - I_1'',$$

$$I_2 = I_2' - I_2'',$$

$$I_3 = I_3' - I_3''.$$

Метод контурных токов

Согласно этому методу предполагают, что по замкнутым независимым контурам протекают собственные контурные токи. И фактически ток конкретной ветви определяется как алгебраическая сумма контурных токов, протекающих по этой ветви. Контурные токи определяются только по II-му закону Кирхгофа, при этом каждый контур рассматривается как независимый. Направление обхода контура выбирается произвольно, желательно по направлению ЭДС данного контура. Число независимых уравнений определяется как $n - (k-1) = 3-1=2$.



Для этого сначала произвольно направим контурные токи и их обозначаем I_{11} и I_{22} и составим уравнение по II-му закону Кирхгофа:

$$I_{11} (R_1 + R_3) - I_{22} R_3 = E_1 - E_3$$

$$I_{22} (R_2 + R_3) - I_{11} R_3 = E_3 - E_2$$

Для упрощения вводим обозначения:

$(R_1 + R_3) = R_{11}$, $R_{22} = (R_2 + R_3)$ - контурные сопротивления;

$E_1 - E_3 = E_{11}$; $E_3 - E_2 = E_{22}$ - контурные ЭДС;

$R_{12} = R_{21} = -R_3$ - межконтурные сопротивления.

С учётом принятых обозначений:

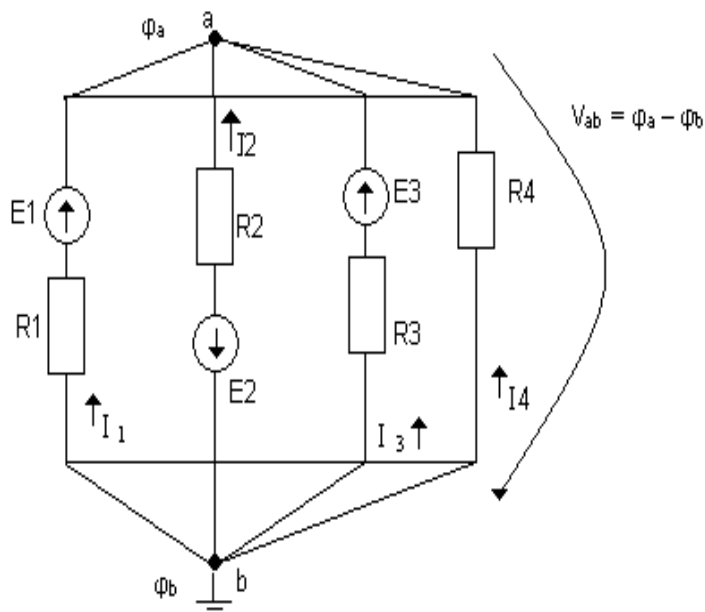
$$\begin{cases} I_{11} R_{11} - I_{22} R_{12} = E_{11} \\ I_{11} R_{21} - I_{22} R_{22} = E_{22} \end{cases}$$

После определения контурных токов I_{11} и I_{22} фактические токи в ветвях определяются по следующим формулам

$$I_1 = I_{11}; I_2 = I_{22}; I_3 = I_{11} - I_{22}.$$

Метод узловых потенциалов

При помощи этого метода сначала определяют неизвестные потенциалы узлов заданной схемы. При этом потенциал одного узла считают известным или приравнивают нулю. Относительно этого узла определяют потенциалы остальных узлов. После определения этих потенциалов на основе II-го закона Кирхгофа или же относительно ветвей по закону Ома определяют неизвестные токи.



На основе I-го закона Кирхгофа:

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0. \quad (4)$$

С учетом напряжения между узлами “а” и “b” на основе II-го закона Кирхгофа имеем следующие выражения:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 + U_{ab} &= E_1 \\ I_2 R_2 + U_{ab} &= -E_2 \\ I_3 R_3 + U_{ab} &= E_3 \\ I_4 R_4 + U_{ab} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

если из выражения (5) найти токи, тогда получим систему:

$$\begin{cases} I_1 = (E_1 - U_{ab}) / R_1 = (E_1 - U_{ab}) g_1 \\ I_2 = (-E_2 - U_{ab}) / R_2 = (-E_2 - U_{ab}) g_2 \\ I_3 = (E_3 - U_{ab}) / R_3 = (E_3 - U_{ab}) g_3 \\ I_4 = -U_{ab} / R_4 = -U_{ab} \cdot g_4 \end{cases} \quad (6)$$

если (6) подставим в (5), то получим:

$$(E_1 - U_{ab}) g_1 + (-E_2 - U_{ab}) g_2 + (E_3 - U_{ab}) g_3 + U_{ab} \cdot g_4 = 0,$$

отсюда узловое напряжение:

$$U_{ab} = E_1 g_1 - E_2 g_2 + \frac{E_3 \cdot g_3}{g_1} + g_2 + g_3 + g_4. \quad (7)$$

Если (7) подставим в (6), то определим неизвестные токи.

Практическое занятие №1. Расчёт простейших электрических цепей постоянного тока

При заданных параметрах схемы, приведённой на рис.1.5, определить токи в ветвях электрической цепи и составить баланс мощностей.

Дано: $R_1=10 \text{ Ом}; R_2=6 \text{ Ом}; R_3=R_4=6 \text{ Ом}; R_5=6 \text{ Ом}; U=120 \text{ В}.$

Определить: I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 мощность источника P_H и мощность потребителей P_P .

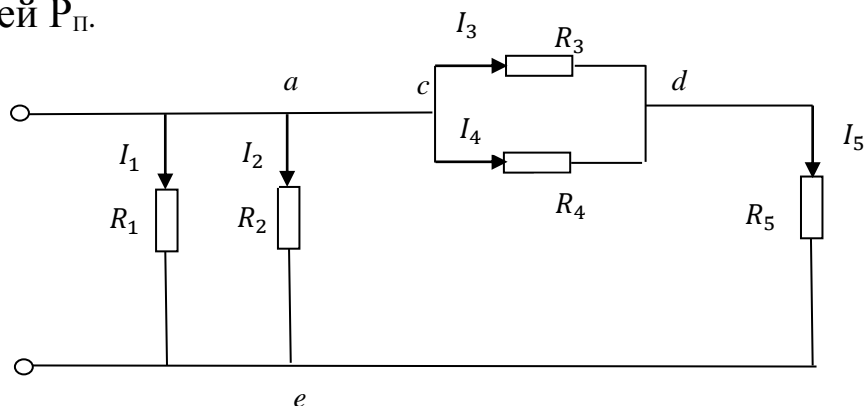


Рис.1.5 Расчётная электрическая схема

Решение:

1. Обозначим на схеме направления токов в ветвях.
2. Определим эквивалентное сопротивление участка cd :

$$R_{cd} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} = \frac{6 \cdot 6}{6 + 6} = 3 \text{ Ом.}$$

3. Определим эквивалентное сопротивление участка ce :

$$R_{ce} = R_{cd} + R_5 = 3 + 6 = 9 \text{ Ом.}$$

4. Так как сопротивления R_1, R_2 и R_{ce} соединены параллельно к источнику питания, то:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{120}{10} = 12 \text{ А;} \quad I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{120}{6} = 20 \text{ А;}$$

$$I_5 = I_{ce} = \frac{U}{R_{ce}} = \frac{120}{9} = 13,33 \text{ А.}$$

5. Чтобы определить токи I_3 и I_4 , необходимо определить напряжение участка cd :

$$U_{cd} = I_{ce} \cdot R_{cd} = 13,3 \cdot 3 = 40 \text{ В,}$$

$$\text{тогда } I_3 = \frac{U_{cd}}{R_3} = \frac{40}{6} = 6,6 \text{ А,} \quad I_4 = \frac{U_{cd}}{R_4} = \frac{40}{6} = 6,3 \text{ А}$$

или согласно I-му закону Кирхгофа $I_5 = I_3 + I_4 = 6,6 + 6,3 = 12,9 \text{ А.}$

6. Определим общий (эквивалентный) ток, потребляемый из источника:

$$I = I_1 + I_2 + I_5 = 12 + 20 + 12,9 = 44,9 \text{ A.}$$

7. Составим уравнение баланса мощности:

$$P_H = U \cdot I = 120 \cdot 44,9 = 5388 \text{ Вт.}$$

8. Мощность потребителя:

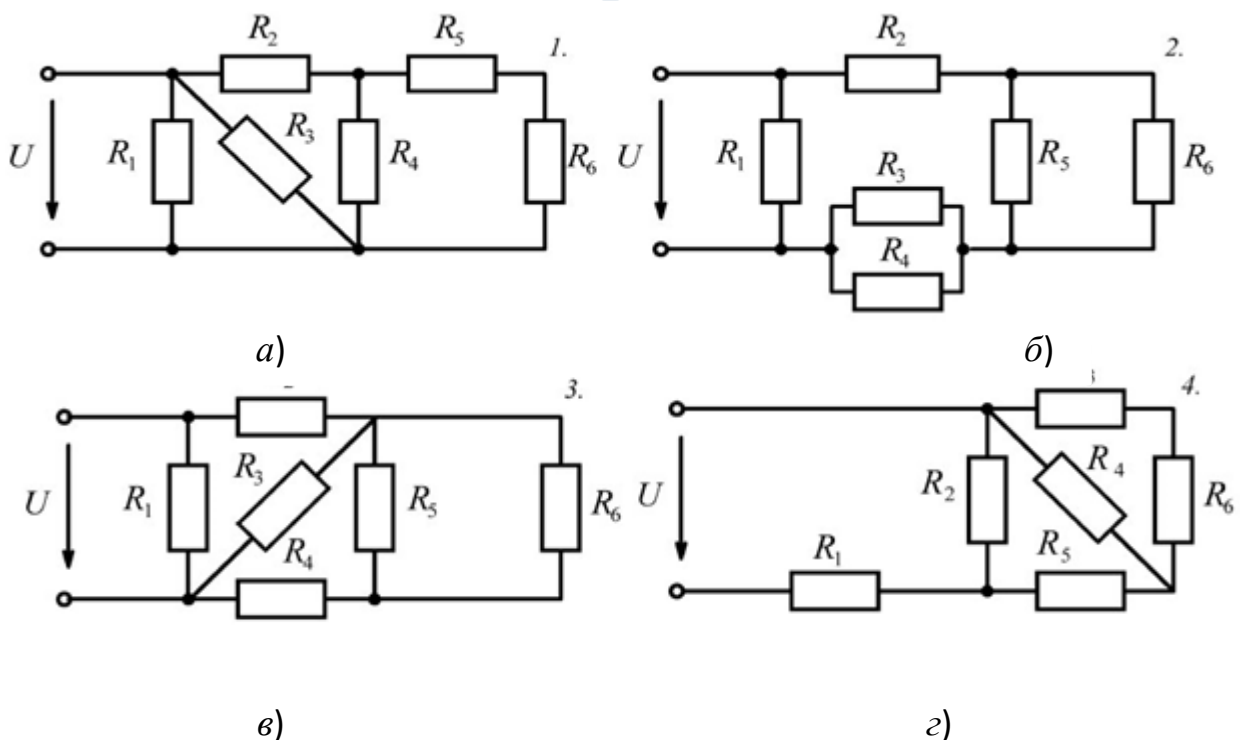
$$\begin{aligned} P_{\text{п}} &= I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5 = \\ &= 12^2 \cdot 10 + 20^2 \cdot 6 + 6,6^2 \cdot 6 + 6,3^2 \cdot 6 + 12,9^2 \cdot 6 = \\ &= 5388 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Вычисленные значения мощности источника и потребителей равны, т.е. соблюдается баланс мощностей.

Варианты заданий для самостоятельного решения.

Задание 1. Расчёт простых электрических цепей.

На рис.1.6 представлены несколько видов сложной электрической цепи. Для выбранного варианта задания определить токи во всех ветвях составить баланс мощностей. Значения сопротивлений и напряжения на зажимах цепи приведены в таблице 1.1.



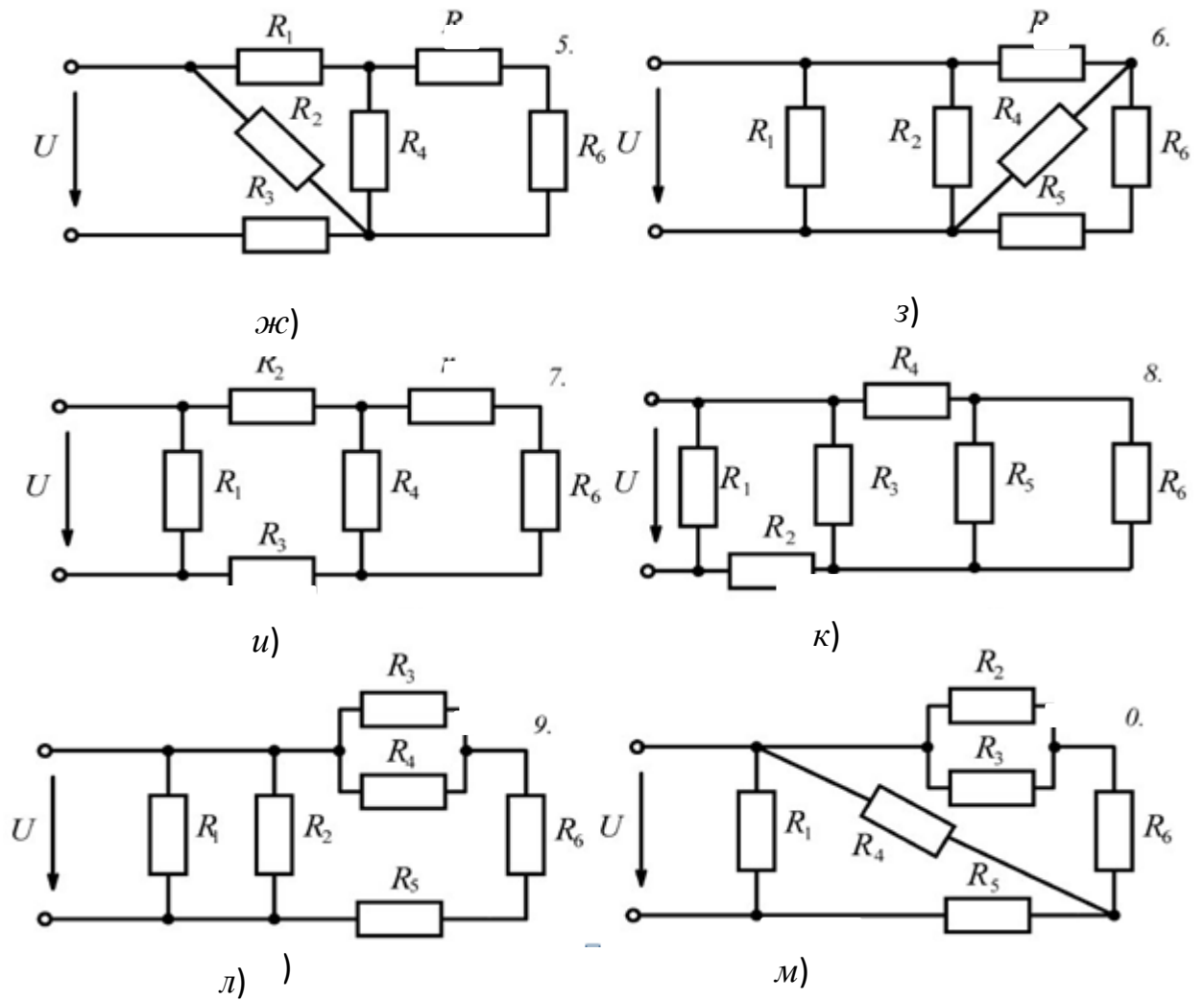


Рис.1.6 Схемы сложной электрической цепи

Таблица 1.1

Варианты	U, В	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	R ₅ , Ом	R ₆ , Ом	№ схемы
1	100	19	10	16	9	8	10	1
2	90	13	11	15	13	10	12	3
3	110	11	18	12	10	14	13	5
4	80	12	13	15	12	10	7	7
5	120	9	11	9	10	8	16	9

Продолжение таблицы 1.1

6	70	7	16	9	8	8	10	2
7	130	8	18	12	8	7	14	4
8	60	9	13	15	12	10	7	6
9	140	10	12	8	6	13	9	8
10	50	14	7	12	8	17	12	0
11	150	10	10	15	9	16	8	2
12	100	9	11	9	10	8	16	4
13	160	7	16	9	8	8	10	6
14	80	8	18	12	8	7	14	8
15	70	9	13	15	12	10	7	0
16	120	10	12	8	6	13	9	3
17	60	13	11	15	13	10	12	4
18	90	11	18	12	10	14	13	6
19	110	12	13	15	12	10	7	7
20	115	9	11	9	10	8	16	9

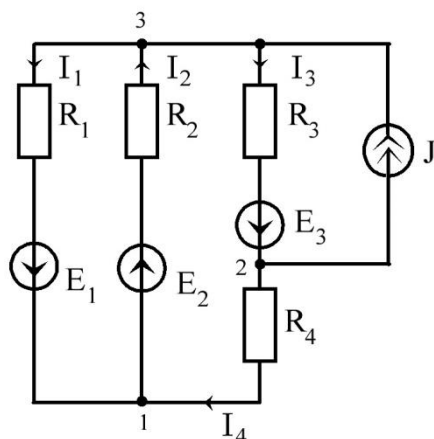
Практическое занятие №2. Расчёт сложных электрических цепей постоянного тока

По заданным параметрам электрической цепи рассчитать токи в ветвях и напряжения на элементах, составить баланс мощностей.

Для этого:

- а) составить уравнения по законам Кирхгофа;
- б) рассчитать электрическую цепь методом контурных токов;
- в) рассчитать электрическую цепь методом узловых потенциалов;
- г) составить уравнения баланса мощностей потребителя и источника;

д) методом эквивалентного генератора определить ток в заданной ветви электрической цепи.



Дано:

$$E_1 = 100 \text{ В}; \quad R_1 = 10 \text{ Ом};$$

$$E_2 = 80 \text{ В}; \quad R_2 = 15 \text{ Ом};$$

$$E_3 = 60 \text{ В}; \quad R_3 = 12 \text{ Ом};$$

$$I = 2 \text{ А}; \quad R_4 = 20 \text{ Ом}.$$

Решение.

1. Определение значения токов в ветвях с применением законов Кирхгофа

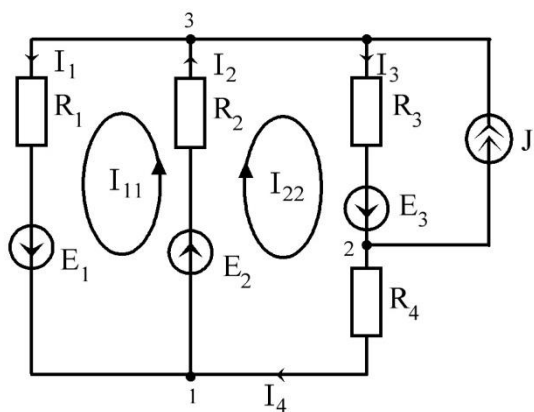
Для определения неизвестных токов $I_1, I_2 \dots I_4$ во всех ветвях данной электрической цепи необходимо составить систему уравнений *по законам Кирхгофа*. Общее число уравнений в системе должно соответствовать числу неизвестных токов, т. е. числу ветвей.

По первому закону Кирхгофа составляется число уравнений, на единицу меньшее числа узлов цепи, т.к. уравнение для последнего узла есть следствие всех предыдущих уравнений. Так как цепь состоит из трёх узлов, по первому закону Кирхгофа составим два уравнения (для 3 и 1 узла), по второму закону Кирхгофа составим два уравнения. Зададим направление токов во всех ветвях цепи. Токи, подходящие к узлу, будем считать положительными, и брать со знаком (+), а токи, отходящие от узла – отрицательными (-).

$$\begin{cases} -I_1 + I_2 - I_3 + J = 0 \\ I_1 - I_2 + I_4 = 0 \\ R_1 I_1 + R_2 I_2 = E_1 + E_2 \\ R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_4 I_4 = E_2 + E_3 \end{cases} .$$

2. Определение значения токов в ветвях методом контурных токов.

Приняв направления контурных токов для независимых контуров, составим систему уравнения по второму закону Кирхгофа.



При составлении уравнений ЭДС и токи, совпадающие с выбранным направлением обхода контура, примем условно со знаком плюс (+), а несовпадающие со знаком минус (-). В этом случае будем учитывать, что ток источника тока I протекает только по третьей ветви.

$$\begin{cases} (R_1 + R_2) \cdot I_{11} + R_2 I_{22} = E_1 + E_2 \\ R_2 I_{11} + (R_2 + R_3 + R_4) \cdot I_{22} + R_3 J = E_2 + E_3 \end{cases} .$$

Подставив численные значения, имеем:

$$\begin{cases} (10 + 15)I_{11} + 15I_{22} = 100 + 80 \\ 15I_{11} + (15 + 12 + 20)I_{22} + 12 \cdot 2 = 80 + 60 \end{cases}$$

Решив систему уравнения, получим значения контурных токов:

$$I_{11} = 7,074 \text{ A}; \quad I_{22} = 0,211 \text{ A}.$$

Определяем действительные значения токов в ветвях:

$$I_1 = I_{11} = 7,074 \text{ A}; \quad I_2 = I_{22} + I_{11} = 0,211 + 7,074 = 7,285 \text{ A};$$

$$I_3 = I_{22} + J = 0,211 + 2 = 2,211 \text{ A}; \quad I_4 = I_{22} = 0,211 \text{ A}.$$

Погрешность вычисления для первого уравнения:

$$\delta\% = \frac{180,015 - 180}{180} \cdot 100\% = 0,008\% < 1\%.$$

Полученные результаты проверяем по второму закону Кирхгофа для второго контура:

$$\begin{aligned} R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_4 I_4 &= E_2 + E_3 \\ 15 \cdot 7,285 + 12 \cdot 2,211 + 20 \cdot 0,211 &= 80 + 60 \\ 140,027 &\cong 140 \end{aligned}$$

$$\delta\% = \frac{140,027 - 140}{140} \cdot 100\% = 0,02\% < 1\%.$$

3. Определение токов в ветвях методом узловых потенциалов

Выберем произвольные направления токов во всех ветвях с пассивными элементами, а в ветвях с источниками ЭДС примем за положительное направление тока, совпадающее с направлением действия ЭДС. Тогда на основании обобщённого закона Ома:

$$I_1 = \frac{\varphi_3 - \varphi_1 + E_1}{R_1},$$

$$I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_3 + E_2}{R_2},$$

$$I_3 = \frac{\varphi_3 - \varphi_2 + E_3}{R_3},$$

$$I_4 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{R_4}.$$

В любой электрической цепи имеет смысл только понятие разности потенциалов. Поэтому потенциал одного из узлов можно принять за нулевую точку отсчёта для остальных потенциалов.

Произвольно примем потенциал узла φ_3 равным нулю и составим для остальных узлов уравнения по первому закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 + I_4 = 0 \\ I_3 - I_4 - J = 0 \end{cases}$$

Подставим выражения токов в ветвях в полученные уравнения Кирхгофа:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} \right) \varphi_1 - \frac{1}{R_4} \varphi_2 = \frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2} \\ -\frac{1}{R_4} \varphi_1 + \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) \varphi_2 = \frac{E_3}{R_3} - J \end{cases}$$

Подставив числовые значения:

$$\begin{cases} 0,21667\varphi_1 - 0,05\varphi_2 = 4,6667 \\ -0,05\varphi_1 + 0,13333\varphi_2 = 3 \end{cases}$$

Решив систему уравнения, получим значения потенциалов:

$$\varphi_2 = 29,26; \varphi_1 = 33,47.$$

После определения потенциалов найдём токи в ветвях по выражениям:

$$I_1 = \frac{\varphi_3 - \varphi_1 + E_1}{R_1} = \frac{-29,26 + 100}{10} = 7,074 \text{ А},$$

$$I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_3 + E_2}{R_2} = \frac{29,26 + 80}{15} = 7,284 \text{ А},$$

$$I_3 = \frac{\varphi_3 - \varphi_2 + E_3}{R_3} = \frac{-33,47 + 60}{12} = 2,211 \text{ А},$$

$$I_4 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{R_4} = \frac{33,47 - 29,26}{29} = 0,211 \text{ А}.$$

В результате решения задания двумя методами мы, как и следовало ожидать, получили одинаковые значения токов в ветвях. Составим теперь для расчётной цепи *баланс мощностей*.

Уравнения баланса мощностей: мощность всех источников входящих в электрическую цепь, равна суммарной мощности потребителей.

Определим мощность источников:

$$\begin{aligned} m_u &= E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 + (\varphi_3 - \varphi_2) \cdot J = \\ &= 100 \cdot 1,074 + 80 \cdot 1,284 + 60 \cdot 2,211 + (-33,47) \cdot 2 = 1355,84 \text{ eВт.} \end{aligned}$$

Определим мощность потребителей:

$$\begin{aligned} m_p &= R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 = \\ &= 10 \cdot 7,074^2 + 15 \cdot 7,284^2 + 12 \cdot 2,211^2 + 20 \cdot 0,211^2 = 1355,82 \text{ eВт.} \end{aligned}$$

Погрешность вычисления:

$$\gamma\% = \frac{1355,84 - 1355,82}{1355,82} \cdot 100\% = 0,002\% .$$

4. Метод эквивалентного источника (генератора)

Ток в любой ветви сколь угодно сложной цепи можно найти, разделив напряжение, которое будет в точках подключения ветви в разомкнутом состоянии, на сумму сопротивления ветви и эквивалентного сопротивления всей цепи относительно точек подключения.

Для определения тока первой ветви I_1 методом эквивалентного генератора вычисления производим в следующем порядке:

а) отключая сопротивление R_1 между точками "А" и "Б", определим значение тока в контуре E_2 - R_2 - R_3 - E_3 - R_4 :

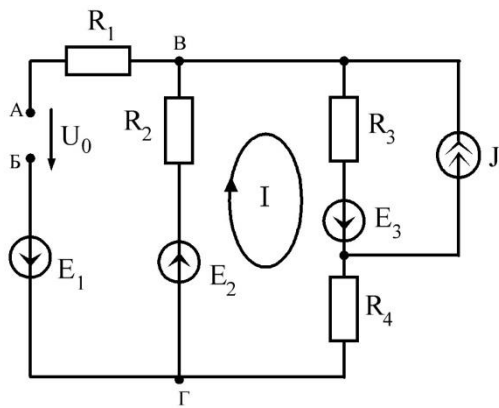
$$(R_2 + R_3 + R_4) \cdot I + R_3 \cdot I = E_2 + E_3.$$

Подставим числовые значения:

$$(15 + 12 + 20)I + 12 \cdot 2 = 80 + 60$$

$$47I = 116$$

$$I = 116 \div 47 = 2,4681 \text{ A;}$$



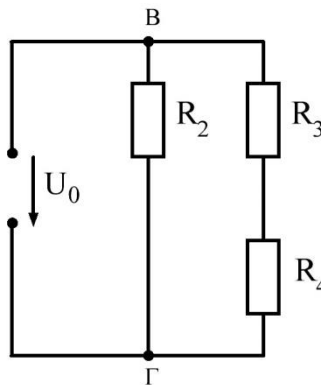
б) составив по второму правилу Кирхгофа уравнения, определим напряжения холостого режима U_0 между точками «А» и «Б»:

$$U_0 + R_2 I = E_1 + E_2,$$

из этого выражения следует,

что: $U_0 = E_1 + E_2 - R_2 I = 100 - 80 = 15 \cdot 2,4681 = 143 \text{ В};$

в) отключая источник тока, замыкая источник Э.Д.С., определим входное сопротивление схемы относительно зажимов "В" и "Г":



$$R_{\text{вх}} = \frac{R_2(R_3 + R_4)}{R_2 + R_3 + R_4} = \frac{15(12 + 30)}{15 + 12 + 30} = 10,2213 \text{ Ом},$$

г) величина вычисляемого тока

$$I_1 = \frac{U_0}{R_1 + R_{\text{вх}}} = \frac{143}{10 + 10,2213} = 7,074 \text{ А}.$$

Варианты заданий для самостоятельного решения.

Для цепи, изображенной на рис.1.7, определить токи во всех ветвях электрической цепи. Значения э.д.с., сопротивлений резистивных элементов приведены в таблице 1.2. Составить уравнения баланса мощности.

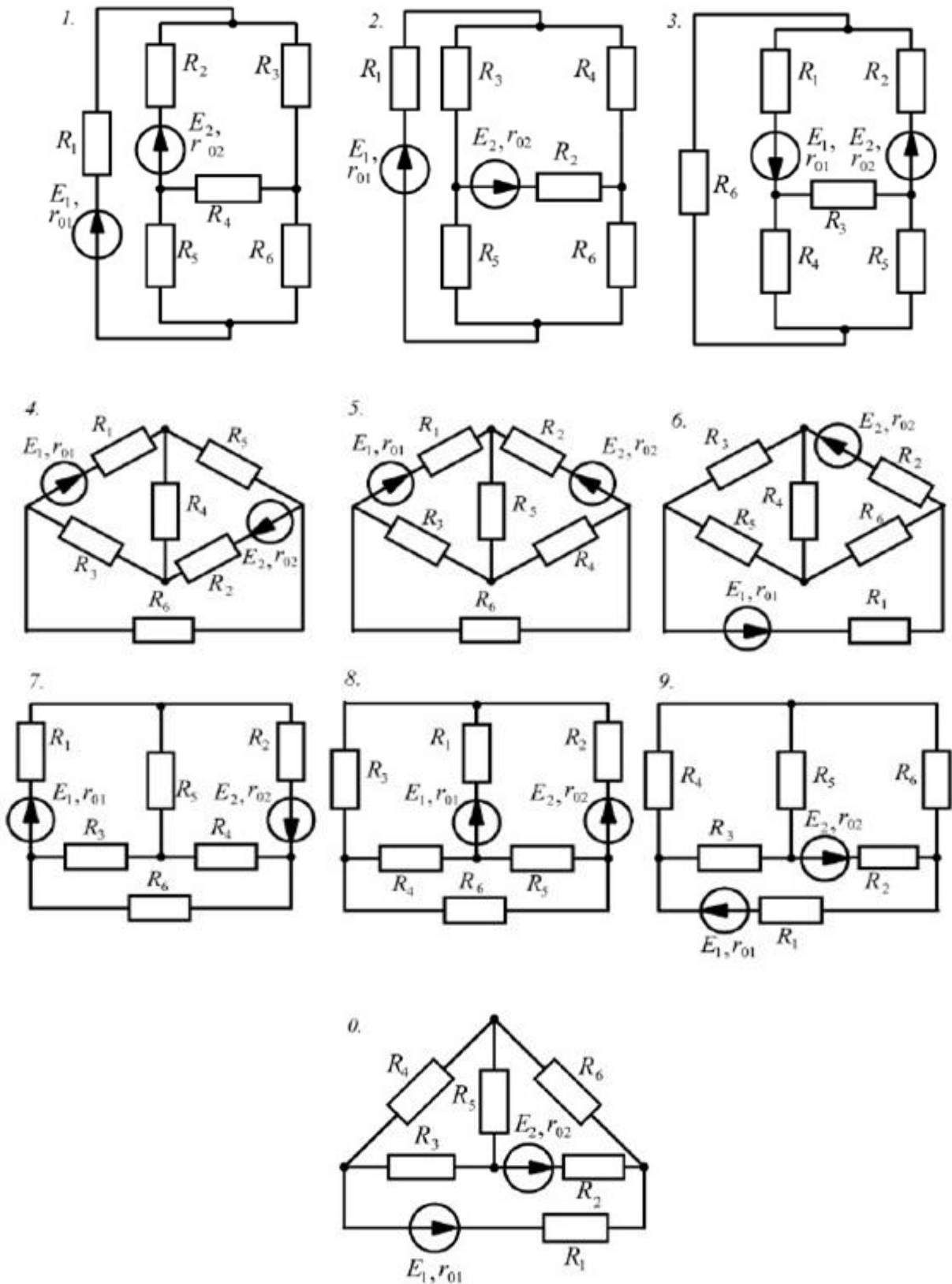


Рис.1.7. Расчётные схемы задания

Составить уравнения для определения токов путем непосредственного применения законов Кирхгофа (решать систему уравнений не следует). Определить токи в ветвях методом

контурных токов. Составить баланс мощностей. Построить потенциальную диаграмму для контура, включающего обе э.д.с.

Таблица 1.2

Варианты	$E_1,$ В	$R_{01},$ Ом	$E_2,$ В	$R_{02},$ Ом	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_4,$ Ом	$R_5,$ Ом	$R_6,$ Ом	№ схемы
1	110	0,2	15	0,8	4	3	7	6	6	6	1
2	30	0,25	115	0,6	2	8	5	2	4	5	4
3	220	0,15	60	1,0	9	4	5	5	6	7	7
4	115	0,4	30	1,2	4	7	2	2	4	5	8
5	60	0,5	100	0,5	6	3	9	3	3	3	10
6	100	0,3	60	0,8	6	8	3	6	4	6	3
7	30	0,6	115	1,2	7	4	7	2	5	8	5
8	60	0,5	220	0,5	9	3	6	5	5	8	8
9	115	0,4	30	1,2	5	3	7	5	8	9	9
10	15	0,8	110	0,8	4	6	3	8	6	3	3
11	120	0,2	15	0,8	4	4	7	5	6	8	7
12	20	0,25	115	0,6	2	6	5	3	4	8	1
13	40	0,15	60	1,0	9	4	5	5	6	7	2
14	50	0,5	220	1,2	4	7	2	2	4	5	5
15	220	0,4	30	0,5	6	3	9	3	3	3	6
16	210	0,8	110	0,8	6	8	3	6	4	6	9
17	200	0,2	15	1,2	7	4	7	2	5	8	10
18	60	0,3	60	0,8	7	8	3	6	5	6	3
19	30	0,6	115	1,2	6	4	7	2	4	8	5
20	100	0,5	220	0,5	9	3	6	5	5	8	8

ГЛАВА 2. РАСЧЕТ ОДНОФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Электрические цепи, в которых величины и направления ЭДС, напряжения и тока изменяются во времени по синусоидальному закону, называются цепями *синусоидального тока*.

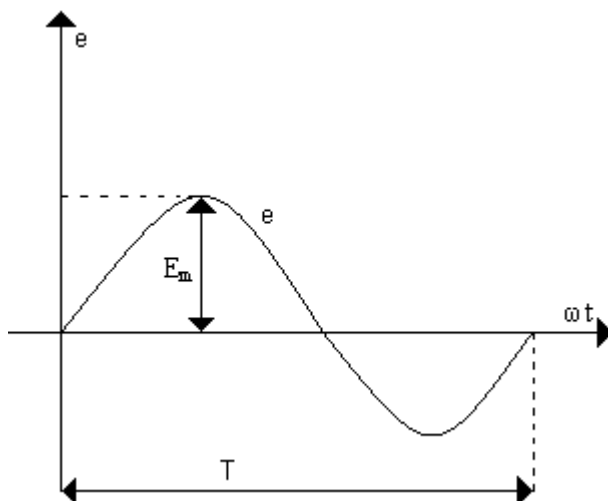


Рис. 2.1. Синусоидальное изменение ЭДС

Синусоидальный ток (ЭДС, напряжение) характеризуется следующими величинами:

- **Мгновенное значение** синусоидальной величины это значение, например, тока в каждый момент времени и определяют по формуле $i = I_m \sin(\omega t + \psi)$, где $\omega t + \psi$ - фазовый угол, определяющий значение синусоидальной величины в данный момент времени; ω - угловая частота ($\omega = 2\pi f$); мгновенные значения обозначают – строчными буквами i , u , e .
- **Амплитуда** – наибольшее мгновенное значение синусоидальной величины. Амплитуда тока, напряжения и ЭДС обозначают прописными буквами с индексом I_m , U_m , E_m .
- **Период** обозначается буквой T [с] это длительность полного цикла, в течение которого переменная величина совершает полное колебание.

- **Частота** обозначается буквой f – число периодов за 1 секунду. Единица измерения частоты – герц [Гц]. Период и частота связаны зависимостью $T=1/f$ [$\frac{1}{\text{Гц}}$, с].
- **Начальная фаза** ψ – это угол, определяющий значение величины в начальный момент времени ($t=0$). Графики ЭДС (e) с различными фазами приведены на рис 2.2.

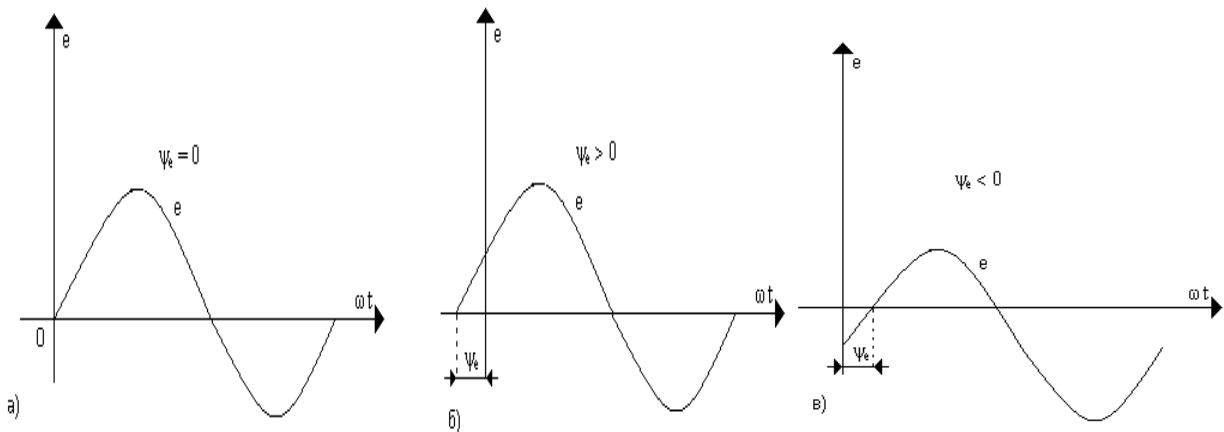


Рис.2.2. Временной сдвиг фаз

Сдвиг фаз ϕ – это разность начальных фаз двух синусоидальных величин $\phi = (\omega t + \psi_e) - (\omega t + \psi_i) = \psi_e - \psi_i$.

ϕ - разность начальных фаз между ЭДС и током

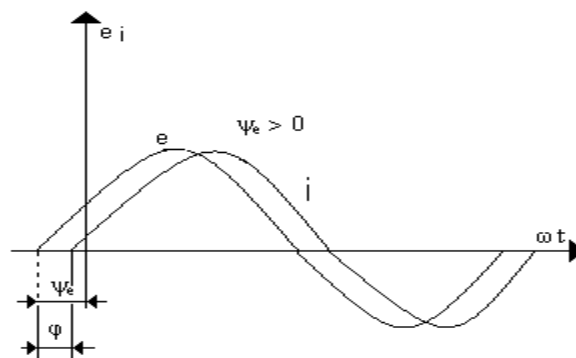


Рис. 2.3. График определения сдвига фаз

Действующее значение переменных электрических величин I , U , E является среднеквадратичным значением тока, который определяется:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}, \quad E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt}, \quad U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}.$$

Если $i = I_m \cdot \sin \omega t$, то действующее или эффективное значение переменного тока определяется:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707 U_m; \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0,707 E_m.$$

Действующий переменный ток определенного значения производит такое же тепловое и механическое воздействие, как и постоянный ток такого же значения.

Для синусоидальных переменных величин среднее значение рассчитывается для положительного полупериода:

$$I_{cp} = \frac{2}{\pi} \cdot I_m; \quad U_{cp} = \frac{2}{\pi} \cdot U_m; \quad E_{cp} = \frac{2}{\pi} \cdot E_m.$$

Электрические цепи синусоидального тока обладают активным сопротивлением R , индуктивностью L и ёмкостью C , которые являются её параметрами. Индуктивным сопротивлением называют значение $X_L = \omega L = 2\pi fL$. Ёмкостным сопротивлением называют значение $X_C = 1/\omega C = 1/(2\pi fC)$. Единицей измерения всех сопротивлений является Ом.

Для последовательно соединённых R , L и C элементами полное сопротивление цепи определяют:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Для изучения и расчёта разветвлённой (параллельной) цепи переменного тока целесообразно воспользоваться термином проводимость. В рассматриваемых цепях используются следующие

виды проводимости: $g = \frac{1}{R}$ - активная проводимость; $b = b_L - b_C$ -

реактивная проводимость (здесь $b_L = \frac{1}{\omega L}$ - индуктивная

проводимость; $b_C = \omega C$ - ёмкостная проводимость); $Y = \sqrt{b^2 + g^2}$ -

полная проводимость. Единицей измерения всех проводимостей является Сименс [См].

Практическое занятие №3. Расчет электрических цепей синусоидального тока

Пример 1. Расчёт электрических цепей синусоидального тока с последовательным соединением пассивных элементов

Дано: В электрическую цепь с синусоидальным напряжением $U=220$ В и с частотой $f=50$ Гц включены последовательно активные сопротивления, индуктивные катушки и конденсатор. Сопротивления, индуктивности и конденсатор имеют следующие параметры: $R_1=4$ Ом; $L_1=0,032$ Г; $R_2=5$ Ом; $L_2=0,016$ Г; $C=400$ мкФ.

Решение:

1. Схема электрической цепи.

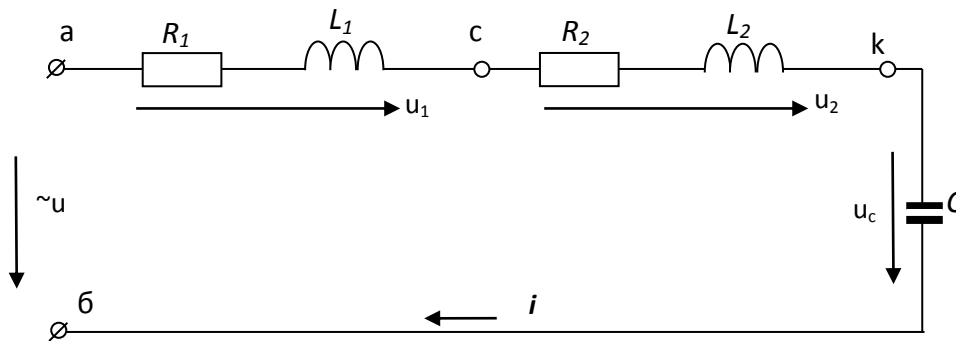


Рис. 2.1 Электрическая цепь с параллельным соединением R, L и C

2. Определим индуктивные и полные сопротивления катушек:

$$X_{L1} = \omega L_1 = 314 \cdot 0,032 = 10 \text{ Ом};$$

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2} = \sqrt{4^2 + 10^2} = \sqrt{116} = 10,6 \text{ Ом};$$

$$X_{L2} = \omega L_2 = 314 \cdot 0,016 = 5 \text{ Ом};$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{L2}^2} = \sqrt{5^2 + 5^2} = 7,07 \text{ Ом};$$

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}.$$

3. Определим сопротивление конденсатора:

$$X_c = \frac{1 \cdot 10^6}{\omega C} = \frac{10^6}{314 \cdot 400} \approx 8 \text{ Ом}.$$

4. Определим полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_{L1} + X_{L2} - X_c)^2} = \sqrt{(4 + 5)^2 + (10 + 5 - 8)^2} = \sqrt{130} = 11,4 \text{ Ом.}$$

5. Используя полное выражение закона Ома для последовательной цепи, определим ток, протекающий по цепи:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{11,4} = 19,3 \text{ А.}$$

6. Определим падение напряжения на элементах цепи:

$$U_{R1} = I \cdot R_1 = 19,3 \cdot 4 = 77,2 \text{ В};$$

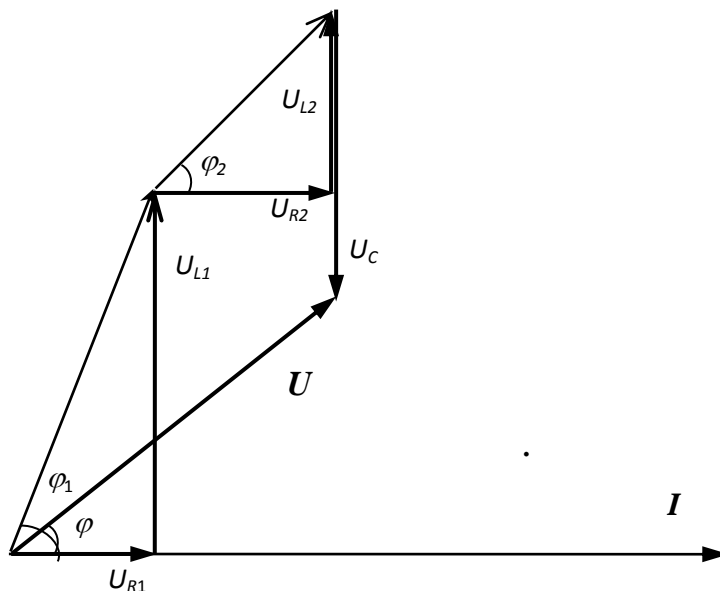
$$U_{L1} = I \cdot X_{L1} = 19,3 \cdot 10 = 193 \text{ В};$$

$$U_{R2} = I \cdot R_2 = 19,3 \cdot 5 = 96,5 \text{ В};$$

$$U_{L2} = I \cdot X_{L2} = 19,3 \cdot 5 = 96,5 \text{ В};$$

$$U_c = I \cdot X_c = 19,3 \cdot 8 = 154,4 \text{ В.}$$

7. Для построения векторной диаграммы выбираем масштаб для рассчитанных значений напряжений и тока. Так как данная цепь состоит только из последовательно соединённых элементов, то построение векторной диаграммы начинается с вектора тока I , который является общим для всей цепи. Вектор напряжения U_{R1} совпадает с вектором тока. В продолжение этого вектора располагаем вектор напряжения U_{L1} с опережением на 90° относительно вектора тока. В продолжение вектора U_{L1} размещаем вектор напряжения U_{R2} , который совпадает по фазе с вектором тока.



Масштаб:

$$m_U = 40 \text{ В/см.}$$

$$m_I = 2 \text{ А/см}$$

Рис.2.2 Векторная диаграмма заданной цепи

В продолжение вектора U_{R2} располагаем вектор напряжения U_{L2} с опережением на 90^0 . С конца вектора U_{L2} проведём вектор напряжения U_C , который отстаёт от тока на 90^0 . Последний конец вектора напряжения U_C соединим с началом вектора напряжения U_{R1} и получим вектор напряжения источника U (рис.2.2).

8. Определяем углы сдвига фаз между током и напряжениями для всей цепи: $\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg \frac{15 - 8}{9} = \arctg \frac{7}{9} = 38^0$,

здесь: $X_L = X_{L1} + X_{L2} = 10 + 5 = 15$ Ом; $R = R_1 + R_2 = 4 + 5 = 9$ Ом;

угол сдвига между током и напряжением U_1 участка *ac*:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{X_{L1}}{R_1} = \arctg \frac{10}{4} = 68^0;$$

угол сдвига между напряжением участка *ck* U_2 и током:

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X_{L2}}{R_2} = \arctg \frac{5}{5} = 45^0;$$

угол сдвига между током и напряжением $U_3 = U_C$ участка *kb*:

$$\varphi_3 = -90^0.$$

9. Определяем потребляемые цепью мощности:

$$P = I^2 R_1 + I^2 R_2 = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 220 \cdot 19,3 \cdot \cos 38^0 = 3345,89 \text{ Вт};$$

$$Q = I^2 X_{L1} + I^2 X_{L2} - I^2 X_C = U \cdot I \cdot \sin \varphi = 220 \cdot 19,3 \cdot \sin 38^0 = 2614,1 \text{ ВАр};$$

$$S = U \cdot I = 220 \cdot 19,3 = 4246 \text{ ВА}.$$

Пример 2. Расчёт электрических цепей синусоидального тока с параллельным соединением пассивных элементов

Дано: В электрическую цепь с синусоидальным напряжением $U=220$ В и с частотой $f=50$ Гц включены параллельно активные и реактивные элементы со следующими параметрами:

$R_1 = 110$ Ом, $R_2 = 40$ Ом, $L = 0,063$ Г, $R_3 = 30$ Ом, $C = 79,6$ мкФ. Определить токи в ветвях, построить векторную диаграмму токов и напряжений, определить активную, реактивную и полную мощность электрической цепи.

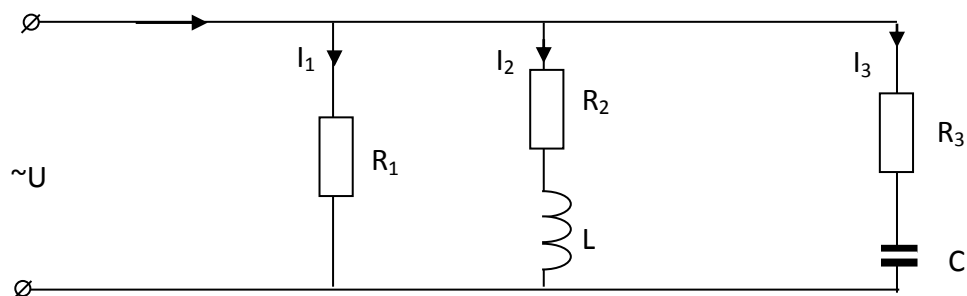


Рис.2.3 Электрическая цепь с параллельным соединением R, L и C

Решение:

1. Определим полное сопротивление ветвей:

$$Z_1 = R_1 = 110 \text{ Ом},$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{40^2 + (314 \cdot 0,0637)^2} = \sqrt{40^2 + 20^2} = 44,7 \text{ Ом}.$$

В комплексной форме

$$\underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L = 40 + j20 = 44,7e^{j27^0} \text{ Ом},$$

$$\text{здесь } \varphi_2 = \arctg \frac{X_L}{R_2} = \arctg \frac{20}{40} = 27^0;$$

$$Z_3 = \sqrt{R_3^2 + \left(\frac{10^6}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{30^2 + \left(\frac{10^6}{314 \cdot 79,6}\right)^2} = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50 \text{ Ом}$$

$$\text{или } \underline{Z}_3 = R_3 - j\frac{10^6}{\omega C} = 30 - j40 = 50e^{-j53^0} \text{ Ом},$$

$$\text{здесь } \varphi_3 = \arctg \frac{-X_C}{R_3} = \arctg \frac{-40}{30} = -53^0.$$

2. Определим токи в ветвях. Начальную фазу напряжения источника примем равным 0^0 , тогда:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{U}{R_1} = \frac{220}{110} = 2 \text{ A};$$

$$I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{220}{44,7} = 4,92 \text{ A} \quad \text{или} \quad \dot{I}_2 = \frac{220}{44,7e^{j27^0}} = 4,92 e^{-j27^0} \text{ A};$$

$$I_3 = \frac{U}{Z_3} = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ A} \quad \text{или} \quad \dot{I}_3 = \frac{220}{50e^{-j53^\circ}} = 4,4e^{j53^\circ} \text{ A.}$$

3. Ток в неразветвлённой части электрической цепи согласно первому закону Кирхгофа определяется как $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3$. Комплексные значения тока определяются через активную и реактивную составляющие:

$$\dot{I}_1 = 2 \text{ A};$$

$$\dot{I}_2 = 4,92 e^{-j27^\circ} = 4,92 \cdot \cos 27^\circ - j 4,92 \cdot \sin 27^\circ = 4,38 - j 2,23 \text{ A};$$

$$\dot{I}_3 = 4,4e^{j53^\circ} = 4,4 \cdot \cos 53^\circ + j4,4 \cdot \sin 53^\circ = 2,64 + j3,52 \text{ A};$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 2 + 4,38 - j2,23 + 2,64 + j3,52 =$$

$$= 9,02 + j1,29 = 9,1e^{j8^\circ} \text{ A},$$

$$\text{здесь} \quad \varphi = \arctg \frac{1,29}{9,02} = 8^\circ,$$

$$\text{или значение тока} \quad I = \sqrt{(9,02)^2 + (1,29)^2} = \sqrt{81,36 + 1,66} = \sqrt{83,02} = 9,1 \text{ A.}$$

4. Если не применять комплексный метод расчёта токов, то для определения тока I необходимо построить векторную диаграмму. Выбираем масштаб для токов и напряжения. Относительно вектора напряжения откладываем вектора токов в ветвях электрической цепи (рис.2.4).

$$\text{Масштаб:} \quad m_U = 20 \text{ В/см.}$$

$$m_I = 1 \text{ А/см.}$$

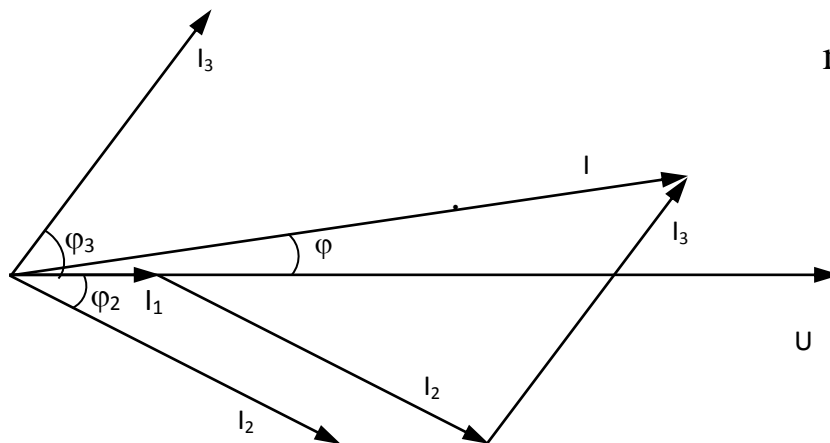


Рис.2.4 Векторная диаграмма заданной схемы

В активном сопротивлении вектор тока I_1 совпадает с вектором напряжения U .

Вектор тока I_2 отстаёт от вектора напряжения на угол равный:

$$\varphi_2 = 27^\circ$$

Вектор тока I_3 опережает вектор напряжения на угол: $\varphi_3 = -53^\circ$.

Путём сложения этих трёх векторов определяем вектор тока I в неразветвленной части электрической цепи.

Из векторной диаграммы заданной схемы $I=9,1$ А и $\varphi = -8^\circ$.

Определяем мощности электрической цепи:

$$P = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 = U \cdot I \cos \varphi = 220 \cdot 9,1 \cdot \cos 8^\circ = 1985,9 \text{ Вт};$$

$$Q = I_2^2 X_L - I_3^2 X_C = U \cdot I \cdot \sin \varphi = 220 \cdot 9,1 \cdot \sin 8^\circ = 280,3 \text{ ВАр};$$

$$S = U \cdot I = 220 \cdot 9,1 = 2002 \text{ ВА}$$

$$\text{или } S = U \cdot I = 220 \cdot 9,1 e^{-j8^\circ} = 2002 e^{-j8^\circ} = 1985,9 - j 280,3.$$

Пример 3. Расчёт электрических цепей синусоидального тока со смешанным соединением пассивных элементов

Дано: В электрическую цепь с синусоидальным напряжением $U=220\text{В}$ и с частотой $f=50\text{Гц}$ подключены две реальные индуктивные катушки со следующими параметрами: $R_1=5\text{Ом}$, $L_1=16\text{мГ}$, $R_2=4 \text{ Ом}$, $L_2=25,5\text{мГ}$; и реальный конденсатор с параметрами $R_3=6 \text{ Ом}$, $C=398 \text{ мкФ}$. Определите токи и напряжения в ветвях, определите активную, постройте векторную диаграмму токов и напряжений, реактивную и полную мощности электрической цепи.

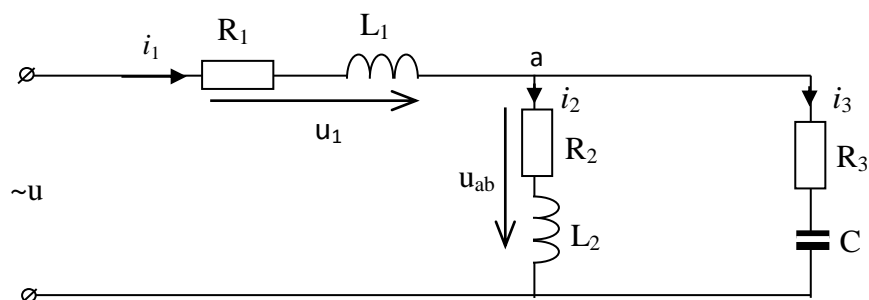


Рис.2.5 Электрическая цепь со смешанным соединением R , L и C

Решение:

1. Расчёт проведём с помощью комплексных чисел. Полное сопротивление электрической цепи определяется:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3},$$

где \underline{Z}_1 - полное сопротивление первой ветви

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 = 5 + j314 \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 5 + j5 = 7,07 e^{j45^\circ} \text{ Ом},$$

\underline{Z}_2 - полное сопротивление второй ветви

$$\underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2 = 4 + j314 \cdot 25,5 \cdot 10^{-3} = 4 + j8 = 8,9 e^{j63^\circ} \text{ Ом},$$

\underline{Z}_3 - полное сопротивление третьей ветви

$$\underline{Z}_3 = R_3 - j \frac{10^6}{\omega C} = 6 - j \frac{10^6}{314 \cdot 318} = 6 - j10 = 11,7 e^{-j59^\circ} \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление всей цепи

$$\begin{aligned} \underline{Z} &= 5 + j5 + \frac{8,9 e^{j63^\circ} \cdot 11,7 e^{-j59^\circ}}{4 + j8 + 6 - j10} = 5 + j5 + \frac{8,9 e^{j63^\circ} \cdot 11,7 e^{-j59^\circ}}{10 - j2} = 5 + j5 + \frac{8,9 e^{j63^\circ} \cdot 11,7 e^{-j59^\circ}}{10,2 e^{-j11^\circ}} = \\ &= 5 + j5 + 10,2 e^{j15^\circ} = 5 + j5 + 9,18 + j2,65 = 14,18 + j7,65 = 16,2 e^{j18^\circ} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

2. Ток в неразветвлённой части электрической цепи равен:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \frac{220}{16,2 e^{j18^\circ}} = 13,5 e^{-j18^\circ} \text{ А}.$$

Падение напряжения на сопротивление \underline{Z}_1 определяется как:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 = 13,5 e^{-j18^\circ} \cdot 7,07 e^{j45^\circ} = 95,44 e^{j28^\circ} \text{ В}.$$

Сопротивление \underline{Z}_2 и \underline{Z}_3 соединены параллельно, поэтому падение напряжения будет определяться как $\dot{U}_{ab} = \dot{I} \cdot \underline{Z}_{2-3}$.

$$\text{Здесь } \underline{Z}_{2-3} = \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 10,2 e^{j15^\circ},$$

$$\text{тогда } \dot{U}_{ab} = 13,5 e^{-j18^\circ} \cdot 10,2 e^{j15^\circ} = 137,7 e^{-j3^\circ} \text{ В}.$$

3. Определяем токи \dot{I}_2 и \dot{I}_3 :

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{аб}}{\underline{Z}_2} = \frac{137,7e^{-j3^0}}{8,9e^{j63^0}} = 15,47e^{-j69^0} \text{ А};$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{аб}}{\underline{Z}_3} = \frac{137,7e^{-j3^0}}{11,7e^{-j59^0}} = 11,76e^{j56^0} \text{ А}.$$

4. Определяем мощности электрической цепи:

а) активные мощности:

$$P_1 = I_1^2 \cdot R_1 = 13,25^2 \cdot 5 = 175,56 \cdot 5 = 877,8 \text{ Вт};$$

$$P_2 = I_2^2 \cdot R_2 = 15,18^2 \cdot 4 = 881,72 \text{ Вт};$$

$$P_3 = I_3^2 \cdot R_3 = 11,55^2 \cdot 6 = 800,4 \text{ Вт};$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 877,8 + 81,72 + 800,4 = 2559,92 \text{ Вт};$$

б) реактивные мощности:

$$Q_1 = I_1^2 X_1 = 13,25^2 \cdot 5 = 877,8 \text{ ВАр};$$

$$Q_2 = I_2^2 X_2 = 15,18^2 \cdot 8 = 1763,44 \text{ ВАр};$$

$$Q_3 = I_3^2 X_3 = -11,55^2 \cdot 10 = -1334 \text{ ВАр}.$$

Третья ветвь электрической цепи имеет активно-ёмкостной характер, поэтому реактивная мощность этой ветви принимается со знаком минус:

$$Q = Q_1 + Q_2 - Q_3 = 877,8 + 1763,44 - 1334 = 1307,24 \text{ ВАр}.$$

Полная мощность:

$$S = P + jQ = 2559,92 + j1307,24.$$

Модуль полной мощности равен:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(2559,92)^2 + (1307,24)^2} \approx \sqrt{5107600 + 1708249} \approx 2611 \text{ ВА}.$$

По результатам расчётов строим векторную диаграмму токов и напряжения. Начальную фазу напряжения источника питания

принимая равным нулю. Выбираем масштаб для вектора тока и вектора напряжения, строим векторную диаграмму (рис.2.6).

Масштаб: $m_U = 20 \text{ В/см}$.

$m_I = 3 \text{ А/см}$.

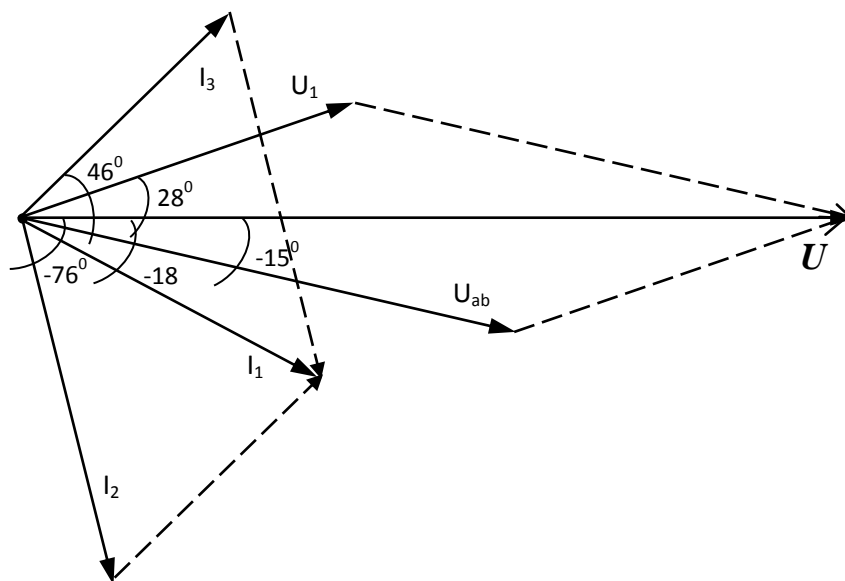


Рис.2.6 Векторная диаграмма электрической цепи со смешанным соединением R , L и C

Варианты заданий для самостоятельного решения

Расчет разветвленной цепи однофазного синусоидального тока

По приведённым в таблице 2.1 данным U напряжения, а также значения R активных, X_L индуктивных и X_C ёмкостных сопротивлений рассчитать неразветвленную электрическую цепь переменного тока.

Необходимо:

- Определить показания приборов, указанных на схеме.
- Определить закон изменения тока в цепи.
- Определить закон изменения напряжения между точками, к которым подключен вольтметр.
- Построить векторную диаграмму.

Примечание. Ваттметр, включенный так, как показано на рис.2.7; измеряет активную мощность цепи.

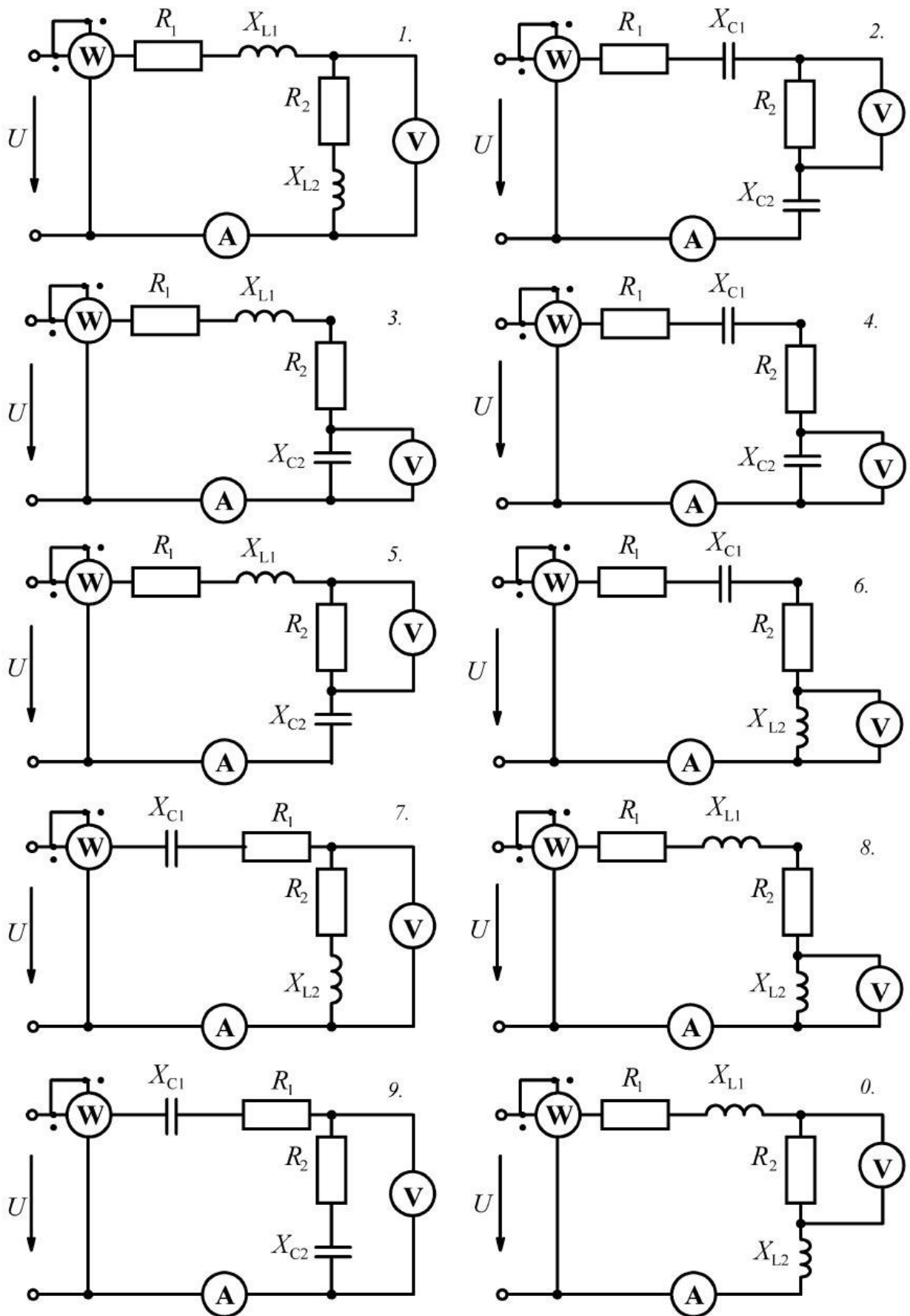


Рис.2.7 Расчётные схемы задания

Таблица 2.1

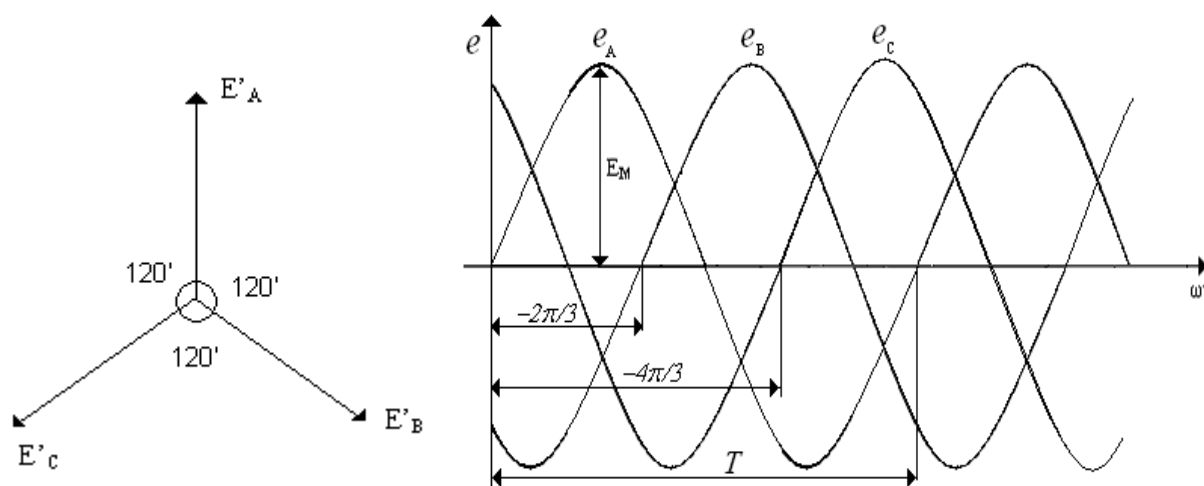
Варианты	U_m, В	φ_и, град	R₁, Ом	X_{L1}, Ом	X_{C1}, Ом	R₂, Ом	X_{L2}, Ом	X_{C2}, Ом
1	180	30	2	9	10	17	12	12
2	340	-60	8	16	6	4	4	15
3	460	15	4	8	13	6	7	4
4	200	-45	3	15	12	4	11	10
5	300	75	2	13	6	7	15	5
6	260	65	4	11	9	5	3	6
7	160	-30	6	7	10	11	2	14
8	240	-15	10	4	12	12	16	4
9	320	35	7	10	6	5	12	17
10	400	20	7	16	6	6	14	2
11	220	65	17	10	12	2	9	9
12	230	-30	4	6	4	8	16	16
13	110	-15	6	13	7	4	8	8
14	400	35	4	12	11	3	15	15
15	300	20	7	6	15	2	13	13
16	210	30	5	9	3	4	11	11
17	380	-60	11	10	2	6	7	7
18	380	15	12	12	16	10	4	4
19	210	-45	5	6	12	7	10	10
20	115	75	6	6	14	7	16	16

ГЛАВА 3. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ТРЕХФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Многофазной электрической цепью называется совокупность однофазных цепей, в которых действует э.д.с. одинаковой частоты, сдвинутые по фазе друг относительно друга и созданные одним источником.

Трехфазной называется электрическая цепь, в различных ветвях которой действуют три одинаковые по амплитуде синусоидальные э.д.с., имеющие одну и ту же частоту, сдвинутые по фазе одна относительно другой на угол 120° :

$$\begin{cases} e_A = E_m \sin \omega t \\ e_B = E_m \sin (\omega t - 120^\circ) \\ e_C = E_m \sin (\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$



$$e_A + e_B + e_C = 0$$

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$$

На практике передача электрической энергии осуществляется по схеме «звезда» или «треугольник».

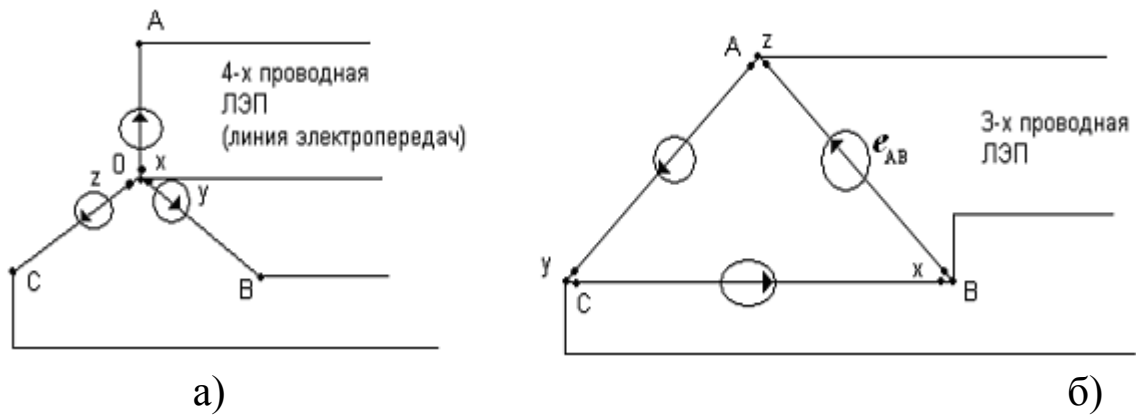


Рис.3.1 Схемы соединения трёхфазных потребителей: а) «звезда»; б) «треугольник»

В основном применяется четырехпроводная схема соединения обмоток генератора по схеме «звезда» с нулевым проводом.

Фазными называются напряжения между линейными и нейтральными проводами или между началами и концами одноименных фаз генератора и потребителя.

При соединении потребителей по схеме «звезда» $I_{\Phi} = I_{\text{Л}}$. Ток нейтрального провода определяется по первому закону Кирхгофа:

$$\bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C.$$

Для симметричной равномерной нагрузки $I_N=0$ и в таких случаях используется трёхпроводная «звезда».

Действующие значения фазных напряжений также равны между собой

$$U_A = U_B = U_C = U_{\Phi}.$$

Напряжения между двумя любыми линейными проводами (или между началами фаз А, В, С) называются *линейными* и обозначаются U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} . При соединении потребителей по схеме «звезда» линейные напряжения равны друг другу и в симметричном режиме в $\sqrt{3}$ раз превышают фазные напряжения, т.е.:

$$U_{\text{Л}} = U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = \sqrt{3} U_{\Phi}.$$

При соединении потребителей по схеме «треугольник» фазные сопротивления нагрузок соединяются между линейными проводами и для действующих значений линейных напряжений можно записать равенство:

$$U_{\Phi} = U_{\text{Л}}$$

Фазные токи I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} зависят только от величины и характера нагрузки отдельных фаз Z_{AB} , Z_{BC} и Z_{CA} . Связь между линейными и фазными токами определяется из уравнений, записанных на основании первого закона Кирхгофа для узлов «А», «В», «С»:

$$\begin{aligned}\bar{I}_A &= \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA} \\ \bar{I}_B &= \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB} \\ \bar{I}_C &= \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}\end{aligned}$$

при помощи которых можно определить токи для всех случаев трехфазной нагрузки.

При симметричной и равномерной трехфазной нагрузке линейные токи I_A , I_B , I_C равны между собой и в $\sqrt{3}$ раз больше фазных токов, т.е.:

$$I_L = \sqrt{3} I_\Phi .$$

При этом линейные и фазные токи образуют симметричную систему.

В случае несимметричной нагрузки соотношение между линейными и фазными токами можно определить из векторной диаграммы.

Мощности трёхфазных потребителей определяются для каждой фазы по отдельности, как для соединения «звезда», так и для соединения «треугольник». При симметричной и равномерной нагрузке суммарная мощность трёхфазных потребителей определяется как утроенное значение любой фазной мощности.

Практическое занятие №4. Расчёт электрических цепей трёхфазного переменного тока

Пример 1. Расчёт трехфазной электрической цепи соединённой по схеме «звезда».

Дано: три группы сопротивлений соединили по схеме «звезда» с нулевым проводом и включили в трехфазную сеть с линейным напряжением U_L . Активные сопротивления в фазах А, В и

С соответственно равны R_A, R_B, R_C ; реактивные - X_A, X_B, X_C . Для расчёта параметров начертить схему электрической цепи.

Определить: фазные токи I_A, I_B, I_C ; углы сдвига фаз в каждой фазе $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$; активную P_A, P_B, P_C , реактивную Q_A, Q_B, Q_C и полную $S_A; S_B; S_C$ мощности всей цепи. Начертить в масштабе векторную диаграмму токов и напряжений; определить графически ток в нулевом проводе.

№	$U_{Л},$ В	$R_A,$ Ом	$R_B,$ Ом	$R_C,$ Ом	$X_A,$ Ом	$X_B,$ Ом	$X_C,$ Ом	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$P_A,$ Вт	$P_B,$ Вт	$P_C,$ Вт	$Q_A,$ ВАр	$Q_B,$ ВАр	$Q_C,$ ВАр
0	380	3	8	12	4 емк	6 емк	16 инд	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Решение. Проводим поэтапное решение, предварительно составив схему.

1. Определяем параметры фазы А:

$$U_{\phi} = U_{Л}/\sqrt{3} = 380/\sqrt{3} = 220 \text{ В};$$

$$Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_A^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ Ом};$$

$$I_A = U_{\phi}/Z_A = 220/5 = 44 \text{ А};$$

$\sin\varphi_A = X_A/Z_A = 4/5 = 0,8$; $\varphi_A = 53^\circ$, ток опережает по фазе напряжение на угол φ_A ; при этом $\cos\varphi_A = 0,6$;

$$P_A = U_{\phi} \cdot I_A \cdot \cos\varphi_A = 220 \cdot 44 \cdot 0,6 = 5808 \text{ Вт};$$

$$Q_A = U_{\phi} \cdot I_A \cdot \sin\varphi_A = 220 \cdot 44 \cdot 0,8 = 7744 \text{ ВАр}.$$

2. Определяем параметры фазы В:

$$Z_B = \sqrt{R_B^2 + X_B^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \text{ Ом};$$

$$I_B = U_{\phi}/Z_B = 220/10 = 22 \text{ А};$$

$\sin\varphi_B = X_B/Z_B = 6/10 = 0,6$; $\varphi_B = 37^\circ$, причем ток отстает по фазе от напряжения на угол φ_B ; при этом $\cos\varphi_B = 0,8$;

$$P_B = U_{\phi} \cdot I_B \cdot \cos\varphi_B = 220 \cdot 22 \cdot 0,8 = 3872 \text{ Вт};$$

$$Q_B = U_{\phi} \cdot I_B \cdot \sin\varphi_B = 220 \cdot 22 \cdot 0,6 = 2904 \text{ ВАр}.$$

3. Определяем параметры фазы С:

$$Z_C = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} = \sqrt{12^2 + 16^2} = 20 \text{ Ом};$$

$$I_C = U_{\Phi} / Z_C = 220 / 20 = 11 \text{ А};$$

$\sin\varphi_C = X_C / Z_C = 16 / 20 = 0,8$; $\varphi_C = 53^\circ$, причем ток отстает по фазе от напряжения на угол φ_C ; при этом $\cos\varphi_C = 0,6$;

$$P_C = U_{\Phi} \cdot I_C \cdot \cos\varphi_C = 220 \cdot 11 \cdot 0,6 = 1452 \text{ Вт};$$

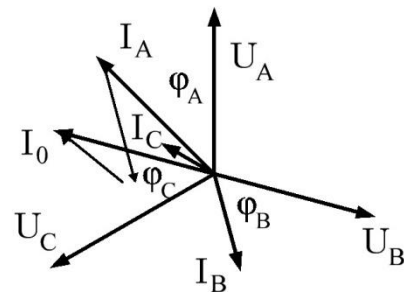
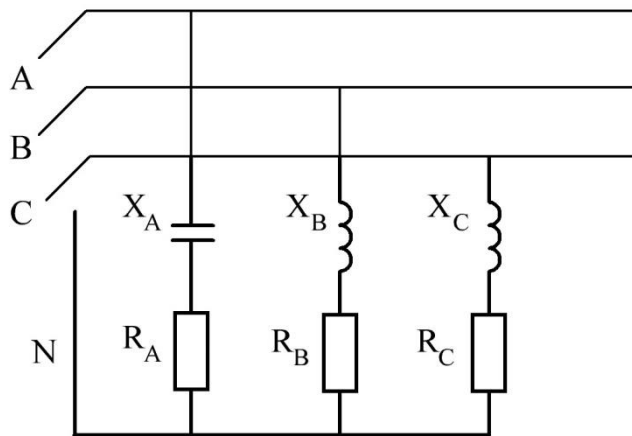
$$Q_C = U_{\Phi} \cdot I_C \cdot \sin\varphi_C = 220 \cdot 11 \cdot 0,8 = 1936 \text{ ВАр}.$$

4. Определяем мощности всей цепи:

$$P = P_A + P_B + P_C = 5808 + 3872 + 1452 = 11132 \text{ Вт}$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = -7744 + 2904 + 1936 = -2904 \text{ ВАр}$$

(знак «-» указывает на емкостный характер реактивной мощности).



5. Для построения векторной диаграммы выбираем масштабы по току: 1 см – 11 А и напряжению: 1 см – 55 В. Построение диаграммы начинаем с векторов фазных напряжений U_A , U_B , U_C , располагая их под углом 120° друг относительно друга. В фазе А ток I_A опережает фазное напряжение U_A на угол $\varphi_A = 53^\circ$. Длина вектора тока I_A в принятом масштабе составит $44/11 = 4$ см, а длина вектора фазного напряжения U_A – $220/55 = 4$ см. В фазе В угол сдвига $\varphi_B = 37^\circ$, ток отстает от фазного напряжения; длина вектора I_B равна $22/11 = 2$ см. В фазе С ток отстает по фазе от напряжения на угол $\varphi_C = 53^\circ$. Длина вектора I_C составляет $11/11 = 1$ см. Вектор

тока в нулевом проводе I_0 равен геометрической сумме трех фазных токов. Измеряя длину вектора тока I_0 , получаем в нормальном режиме 3,5 см, поэтому I_0 равен 38,5 А.

Пример 2. Расчёт трехфазной электрической цепи, соединённой по схеме «треугольник».

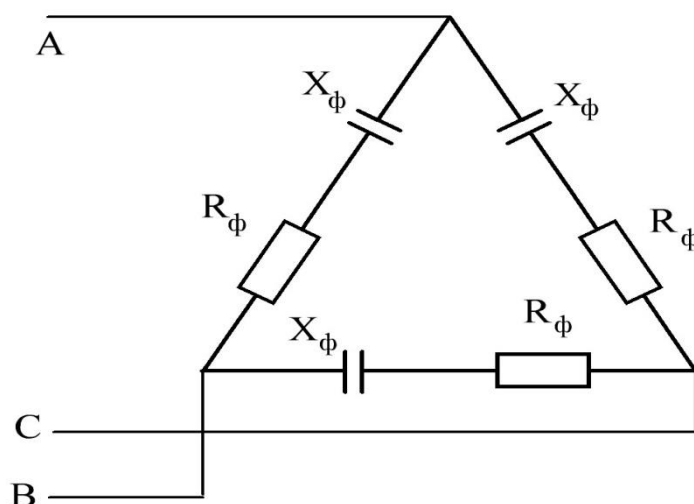
Дано: Приемник электрической энергии, соединенный по схеме «треугольник», подключен к трехфазной сети с номинальным напряжением $U_{ном}$. Активные сопротивления в фазах $R_{AB}=R_{BC}=R_{CA}=R_{\phi}$, реактивные сопротивления $X_{AB}=X_{BC}=X_{CA}=X_{\phi}$; характер сопротивлений указан в таблице.

Определить: действующие значения фазных и линейных токов, полную, активную и реактивную мощности нагрузки. Начертить схему цепи, построить векторную диаграмму токов и напряжений.

№ варианта	R_{ϕ} , Ом	X_{ϕ} , Ом	$U_{ном}$, В
0.	6	8 (емк.)	220

Решение. Проводим поэтапное решение, предварительно составив схему.

Схема цепи:



1.Цепь симметричная, поэтому ее расчет сводится к расчету одной фазы.

Определяем параметры фазы А:

$$U_{\Phi} = U_{Л} = 220\text{В};$$

$$Z_{\Phi} = \sqrt{R_{\Phi}^2 + X_{\Phi}^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10\text{Ом};$$

$$I_{\Phi} = U_{\Phi}/Z_{\Phi} = 220/10 = 22 \text{ А};$$

$$I_{Л} = \sqrt{3}I_{\Phi};$$

$$\sin\varphi_{\Phi} = X_{\Phi}/Z_{\Phi} = 8/10 = 0,8; \varphi_{\Phi} = 53^{\circ},$$

так как характер фазных сопротивлений емкостной, то ток опережает по фазе напряжение на угол φ_{Φ} ; $\cos\varphi_{\Phi} = 0,6$;

$$P_{\Phi} = U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos\varphi_{\Phi} = 220 \cdot 22 \cdot 0,6 = 2904 \text{ Вт};$$

$$Q_{\Phi} = U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \sin\varphi_{\Phi} = 220 \cdot 22 \cdot 0,8 = 3872 \text{ ВАр}.$$

2.Определяем мощности всей цепи:

$$P = 3 \cdot P_{\Phi} = 3 \cdot 2904 = 8712 \text{ Вт},$$

$$Q = 3 \cdot Q_{\Phi} = 3 \cdot 3872 = 11616 \text{ Вар}.$$

3.Для построения векторной диаграммы выбираем масштабы по току: 1 см – 11 А и по напряжению: 1 см – 55 В. Построение диаграммы начинаем с векторов фазных напряжений U_A , U_B , U_C , располагая их под углом 120° друг относительно друга. Чередувание фаз обычное: за фазой А – фаза В, за фазой В – фаза С. Длина векторов U_A , U_B , U_C составляет $220/55 = 4$ см. Фазные токи опережают по фазе напряжения на угол $\varphi_{\Phi} = 53^{\circ}$, их длина составляет: $22/11 = 2$ см. Линейные токи находим из соотношений: $I_A = I_{AB} - I_{CA}$; $I_B = I_{BC} - I_{AB}$; $I_C = I_{CA} - I_{BC}$.

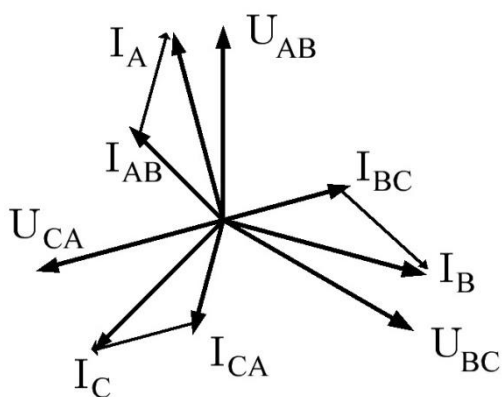


Таблица 3.1

Варианты заданий для самостоятельного решения

№ варианта	R_{Φ} , Ом	X_{Φ} , Ом	$U_{ном}$, В
1	3	4 (емк.)	380
2	8	6 (инд.)	660
3	15	20 (емк.)	208
4	40	30 (инд.)	692
5	4	3 (емк.)	104
6	6	8 (инд.)	380
7	30	40 (емк.)	660
8	20	15 (инд.)	208
9	60	80 (емк.)	692
10	80	60 (инд.)	104

Необходимо:

1. Произвести расчет параметров одной фазы.
2. Произвести расчет активной, реактивной и полной мощностей всей цепи.
3. Построить векторную диаграмму цепи.
4. Определить графически линейные токи.

Дано: к трёхфазному источнику с линейным напряжением U_L включена цепь, изображённая на рис.3.2. Значение линейного напряжения U_L активных R , индуктивных X_L , емкостных сопротивлений X_C приёмников приведена в таблице 3.3.

Определить:

- 1) При соединении приемников «звездой» определить токи в линейном и нейтральном проводах, а также активную и реактивную мощности, потребляемые цепью в следующих режимах:
 - а) в трёхфазном, при симметричной системе напряжений;
 - б) при обрыве одной фазы (см. таблицу 3.3)
- 2) При соединении приемников «треугольником» и определить фазные и линейные токи. Определить значения активной и реактивной мощностей, потребляемых цепью, и сопоставить их с соответствующими значениями, определёнными для п. 1,а. построить топографическую диаграмму и на ней показать векторы токов.

Для всех случаев построить топографические диаграммы напряжений и на них показать векторы токов.

Таблица 3.2

Вариан- ты	U_L , В	Сопротивления, Ом									Обор- вана фаза
		R_1	X_{L1}	X_{C1}	R_2	X_{L2}	X_{C2}	R_3	X_{L3}	X_{C3}	
1	220	7	8	12	11	8	7	9	6	4	А
2	380	8	9	6	5	9	4	6	8	9	В
3	380	10	7	3	4	8	9	6	8	7	С
4	220	4	8	7	7	10	5	5	9	4	А
5	220	6	8	5	4	9	11	7	10	6	В
6	380	9	8	7	6	5	4	10	11	12	С
7	220	9	6	8	6	5	5	7	11	4	А
8	380	8	10	6	7	9	4	5	11	12	В
9	220	7	6	5	4	8	9	10	12	9	С
0	380	4	8	6	6	5	9	6	8	10	А

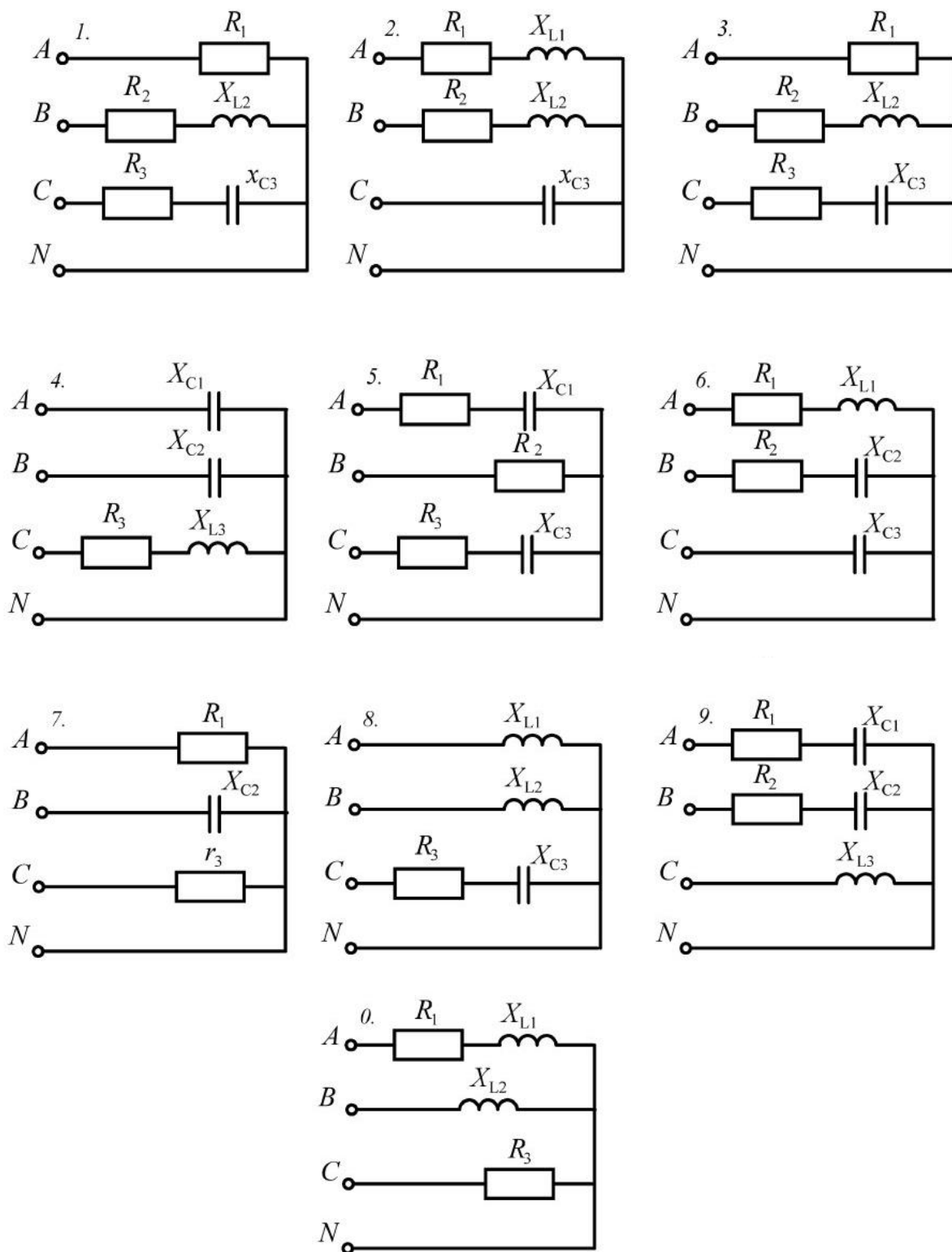


Рис.3.2. Варианты схем трёхфазных цепей, соединённых по схеме “звезда”

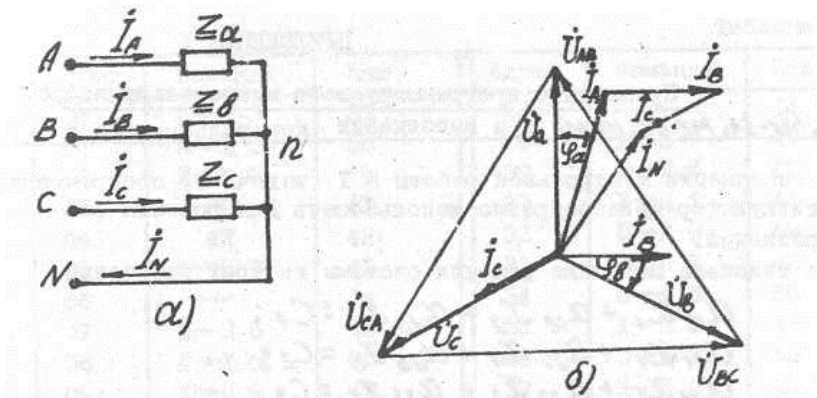


Рис.3.3. Векторная диаграмма

Топографическая диаграмма напряжений строится следующим образом, выбрав масштаб напряжений m_u строят равносторонний треугольник линейных напряжений: U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} . Пересечение биссектрис углов треугольника определяет положение (потенциал) в нейтрале источника N (приемника n). Вектора фазных напряжений U_a , U_b , U_c получают, соединив точку N с вершинами A , B , C . Затем, задавшись масштабом токов m_i , строят векторы токов. Обычно начала векторов токов совмещают с точкой n (нейтралью приемника).

На рис.3.3.,б показан вариант векторной диаграммы для трехфазной цепи с приёмниками, соединенными «звездой» (рис.3.3,а), при пренебрежимо малых сопротивлениях линейных и нейтрального проводов. Векторная диаграмма построена для случая, когда в фазе "а" приемник имеет индуктивный характер ($\varphi > 0$), в фазе "в" - емкостный ($\varphi < 0$), а в фазе "С" – φ чисто активная ($\varphi = 0$).

Пример 4. Расчёт трёхфазной электрической цепи

В трёхфазный источник с линейным напряжением $U_l = 380 \text{ В}$ и частотой сети $f = 50 \text{ Гц}$, потребители соединены по схеме «звезда» и «треугольник» (рис.3.4). При заданных параметрах схемы необходимо:

1. Определить фазные токи I_{AY}, I_{BY}, I_{CY} трёхфазных потребителей соединённых по схеме «звезда»;

2. Определить фазные токи I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} и линейные токи $I_{A\Delta}, I_{B\Delta}, I_{C\Delta}$, соединённые по схеме «треугольник»;

3. Построить единую векторную диаграмму токов и напряжения потребителей, соединённого по схеме «звезда» и «треугольник», выбрав масштаб для токов и масштаб для напряжения;

4. Определить ток нулевого (нейтрального) провода I_0 потребителя, соединённый по схеме «звезда» и линейные токи $I_{A\Delta}, I_{B\Delta}, I_{C\Delta}$ графическим построением из векторной диаграммы;

5. Определить из векторной диаграммы общие линейные токи I_1, I_2 и I_3 , т.е. показания амперметров A_1, A_2, A_3 ;

6. Аналитическим методом определить активную P , реактивную Q и полную S мощности потребителей. При этом реактивная мощность индуктивного характера Q_I принимается со знаком "+", а ёмкостного характера принимается со знаком "-";

7. По результатам графического построения, определить (с учётом знаков) активную, реактивную и полную мощности трёхфазной электрической цепи;

8. Сопоставить значения полной мощности трёхфазной электрической цепи, определённые аналитическим и графическим методами. Определить относительную погрешность.

Пример решения задания

Параметры потребителей, соединённых по схеме «звезда»:

$$\mathbf{R}_A=15 \text{ Ом}; \mathbf{R}_B=10 \text{ Ом}; \mathbf{R}_C=10 \text{ Ом};$$

$$\mathbf{L}_A=32 \text{ мГ}; \mathbf{L}_B=12 \text{ мГ};$$

$$\mathbf{C}_A=318 \text{ мкФ}; \mathbf{C}_C=852 \text{ мкФ}.$$

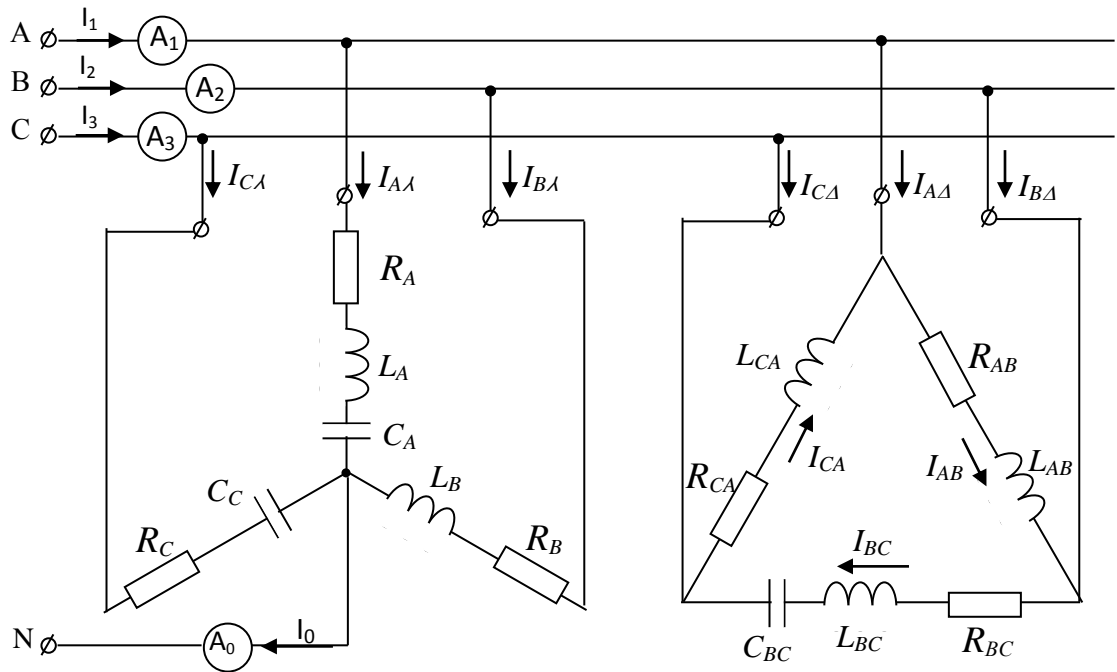


Рис. 3.4 Схема трёхфазной электрической цепи, соединённой по схеме « звезда» и «треугольник»

Параметры потребителей, соединённых по схеме «треугольник»:

$$\mathbf{R}_{AB}=9 \text{ Ом}; \mathbf{R}_{BC}=13 \text{ Ом}; \mathbf{R}_{CA}=13 \text{ Ом};$$

$$\mathbf{L}_{AB} =28 \text{ мГ}; \mathbf{L}_{BC} 48\text{мГ}; \mathbf{L}_{CA} =24 \text{ мГ};$$

$$\mathbf{C}_{BC} =419 \text{ мкФ}.$$

На рис.3.4 показана схема трёхфазной электрической цепи.

Решение

1. Определяем фазные токи потребителей, соединённых по схеме «звезда». Полное сопротивление каждой фазы:

$$z_A = \sqrt{R_A^2 + \left(\omega L_A - \frac{1}{\omega C_A} \right)^2} = \sqrt{15^2 + \left(314 \cdot 32 \cdot 10^{-3} - \frac{10^6}{314 \cdot 318} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{15^2 + (10 - 10)^2} = 15 \text{ Ом}.$$

$$z_B = \sqrt{R_B^2 + (\omega L_B)^2} = \sqrt{10^2 + (314 \cdot 12 \cdot 10^{-3})^2} = \sqrt{10^2 + 3,76^2} = 10,7 \text{ Ом},$$

$$z_C = \sqrt{R_C^2 + \left(\frac{1}{\omega C_C}\right)^2} = \sqrt{10^2 + \left(\frac{1}{314 \cdot 852 \cdot 10^{-6}}\right)^2} = \sqrt{10^2 + 3,74^2} = 10,7 \text{ Ом.}$$

Для потребителей, соединённых по схеме «звезда», фазное напряжение определяется:

$$U_{\text{л}} = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} = 220 \text{ В;}$$

Учитывая, что $U_A=U_B=U_C=U_{\Phi}$ рассчитываем фазные токи потребителей:

$$I_{A\lambda} = \frac{U_A}{z_A} = \frac{220}{15} = 14,67 \text{ А,}$$

$$I_{B\lambda} = \frac{U_B}{z_B} = \frac{220}{10,7} = 20,56 \text{ А,}$$

$$I_{C\lambda} = \frac{U_C}{z_C} = \frac{220}{10,7} = 20,56 \text{ А.}$$

2. Определение фазных токов потребителей, соединённых по схеме «треугольник». Полное сопротивление каждой фазы:

$$Z_{AB} = \sqrt{R_{AB}^2 + (\omega \cdot L_{AB})^2} = \sqrt{9^2 + (314 \cdot 28 \cdot 10^{-3})^2} = \sqrt{9^2 + 8,8^2} = \sqrt{158,4} = 12,6 \text{ Ом,}$$

$$\begin{aligned} Z_{BC} &= \sqrt{R_{BC}^2 + \left(\omega \cdot L_{BC} - \frac{1}{\omega C_{BC}}\right)^2} = \sqrt{13^2 + \left(314 \cdot 48 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{314 \cdot 419 \cdot 10^{-6}}\right)^2} = \\ &= \sqrt{13^2 + (15,1 - 7,6)^2} = \sqrt{13^2 + 7,5^2} = 15 \text{ Ом,} \end{aligned}$$

$$Z_{CA} = \sqrt{R_{CA}^2 + (\omega \cdot L_{CA})^2} = \sqrt{13^2 + (314 \cdot 24 \cdot 10^{-3})^2} = \sqrt{13^2 + 7,54^2} = \sqrt{225,8} = 15 \text{ Ом,}$$

При соединении потребителей по схеме «треугольник» фазные и линейные напряжения равны, т.е. $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\text{Л}} = 380 \text{ В}$. В этом случае фазные токи:

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{z_{AB}} = \frac{380}{12,6} = 30,16 \text{ А,}$$

$$I_{BC} = \frac{U_{BC}}{z_{BC}} = \frac{380}{15} = 25,3 \text{ А,}$$

$$I_{CA} = \frac{U_{CA}}{z_{CA}} = \frac{380}{15} = 25,3 \text{ А.}$$

3. По полученным расчётам построим единую векторную диаграмму токов и напряжения (рис. 3.5) для потребителей, соединённых по схеме «звезда» и «треугольник», предварительно выбираем масштаб тока и масштаб напряжения:

а) векторную диаграмму начинаем строить с векторов фазных напряжений и токов потребителей, соединённых по схеме «звезда». Для этого выбираем масштаб напряжения $m_u = 5 \text{ В/мм}$, масштаб тока $m_i = 1 \text{ А/мм}$. Откладываем вектор фазного напряжения фазы А вертикально (рис. 3.5). Затем относительно \bar{U}_A по направлению часовой стрелки откладываем фазные напряжения \bar{U}_B и \bar{U}_C под углом 120° и 240° соответственно. При наличии нулевого провода фазные напряжения U_A , U_B , U_C потребителя образуют симметричную систему напряжений. Соединив концы векторов фазных напряжений, получаем треугольник линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} (рис.3.5).

Для построения векторов фазных токов сначала определим сдвиг фаз между фазными напряжениями и токами.

В фазе А потребитель имеет активный характер, т.к.

$$\omega \cdot L_A = \frac{1}{\omega \cdot C_A}, \text{ то } \cos \varphi_A = \frac{R_A}{z_A} = \frac{15}{15} = 1, \text{ т.е. } \varphi_A = 0^\circ.$$

Это означает, что фазный ток I_A и фазное напряжение U_A совпадают по фазе.

В фазе В потребитель имеет активно-индуктивный характер,

$$\cos \varphi_B = \frac{r_B}{z_B} = \frac{10}{10,7} = 0,93, \text{ т.е. } \varphi_B = 21^\circ 30'$$

и ток I_B отстаёт от вектора напряжения U_B на угол $21^\circ 30'$.

В фазе С потребитель имеет активно-ёмкостной характер,

$$\cos \varphi_C = \frac{r_C}{z_C} = \frac{10}{10,7} = 0,93, \text{ т.е. } \varphi_C = 21^\circ 30',$$

т.е. вектор тока I_C опережает вектор напряжения U_C на $21^\circ 30'$.

Теперь построим вектора фазных токов относительно фазных напряжений потребителя (рис. 3.5).

б) Аналогично определяются сдвиги фаз между фазными токами I_{AB} , I_{BC} и I_{CA} и фазными напряжениями U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} для потребителей, соединённых по схеме «треугольник».

Потребитель в фазе **АВ** имеет активно-индуктивный характер, т.е. $\cos \varphi_{AB} = \frac{r_{AB}}{z_{AB}} = \frac{9}{12,5} = 0,71$, тогда $\varphi_{AB} = 45^\circ$ и вектор тока I_{AB} отстаёт от вектора напряжения на 45° .

Потребитель в фазе **ВС** имеет активно-индуктивный характер, т.е. $\omega \cdot L_{BC} > 1/\omega \cdot C_{BC}$. Поэтому

$$\cos \varphi_{BC} = \frac{r_{BC}}{z_{BC}} = \frac{13}{15} = 0,87, \quad \text{тогда } \varphi_{BC} = 29^\circ 30'$$

и ток I_{BC} отстаёт от вектора напряжения U_{BC} на $29^\circ 30'$.

Потребитель в фазе **СА** также имеет активно-индуктивный характер, т.е. $\omega \cdot L_{BC} > 1/\omega \cdot C_{BC}$. Поэтому

$$\cos \varphi_{CA} = \frac{r_{CA}}{z_{CA}} = \frac{13}{15} = 0,87, \quad \text{тогда } \varphi_{CA} = 29^\circ 30'$$

и ток I_{CA} отстаёт от вектора напряжения \bar{U}_{CA} на $29^\circ 30'$.

В векторной диаграмме вектора токов I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} строятся относительно векторов фазных напряжений \bar{U}_{AB} , \bar{U}_{BC} и \bar{U}_{CA} (рис.3.5).

4. Из векторной диаграммы (рис.3.5) определяем ток в нулевом проводе I_0 и для схемы «треугольник» линейные токи $I_{A\Delta}$, $I_{B\Delta}$ и $I_{C\Delta}$:

а) ток в нулевом I_0 проводе, в соответствии с первым законом Кирхгофа равен геометрической сумме фазных токов:

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_{A\Delta} + \bar{I}_{B\Delta} + \bar{I}_{C\Delta}.$$

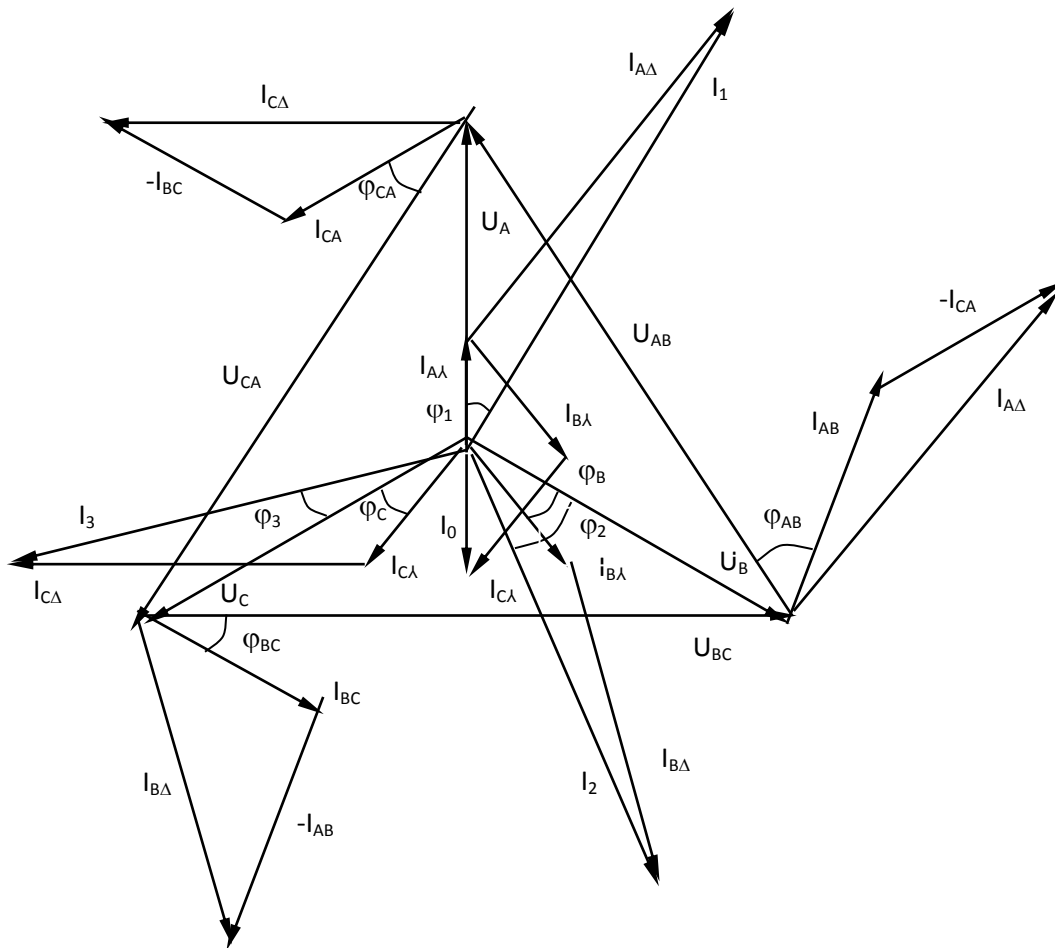


Рис.3.5 Векторная диаграмма напряжений и токов

Для определения действительного значения тока I_0 длину вектора умножаем на масштаб тока, т.е.
 $I_0 = I_{10} \cdot m_1 = 16 \text{ мм} \cdot 1 \text{ А/мм} = 16 \text{ А};$

б) линейные токи $I_{A\Delta}, I_{B\Delta}$ и $I_{C\Delta}$ для потребителей, соединённых по схеме «треугольник», определяются путём составления уравнений по первому закону Кирхгофа (рис. 3.5):

$$\begin{aligned} \bar{I}_{A\Delta} &= \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}; \\ \bar{I}_{B\Delta} &= \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB}; \\ \bar{I}_{C\Delta} &= \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}. \end{aligned}$$

Действительные значения токов $I_{A\Delta}, I_{B\Delta}$ и $I_{C\Delta}$ с учётом принятого масштаба для токов ($1 \text{ мм} = 1 \text{ А}$) будут равны, т.е.:

$$\bar{I}_{A\Delta} = 51 \text{ мм} \quad \text{или} \quad \bar{I}_{A\Delta} = 51 \text{ А};$$

$$\bar{I}_{B\Delta} = 43,5 \text{ мм} \quad \text{или} \quad \bar{I}_{B\Delta} = 43,5 \text{ А};$$

$$\bar{I}_{C\Delta} = 43,5 \text{ мм} \quad \text{или} \quad \bar{I}_{C\Delta} = 43,5 \text{ А}.$$

5. Из векторной диаграммы (рис.3.5) определим величины токов I_1 , I_2 и I_3 . Для этого геометрическим суммированием векторов фазных токов $I_{A\lambda}$, $I_{B\lambda}$ и $I_{C\lambda}$ и линейных токов $I_{A\Delta}$, $I_{B\Delta}$ и $I_{C\Delta}$ определяем показание амперметров A_1 , A_2 и A_3 , т.е. I_1 , I_2 и I_3 :

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{A\lambda} + \bar{I}_{A\Delta};$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{B\lambda} + \bar{I}_{B\Delta};$$

$$\bar{I}_3 = \bar{I}_{C\lambda} + \bar{I}_{C\Delta}.$$

С учётом принятого масштаба для токов действительные значения токов I_1 , I_2 и I_3 будут равны:

$$\bar{I}_1 = 65 \text{ мм} \quad \text{или} \quad I_1 = 65 \text{ А};$$

$$\bar{I}_2 = 63 \text{ мм} \quad \text{или} \quad I_2 = 63 \text{ А};$$

$$\bar{I}_3 = 58 \text{ мм} \quad \text{или} \quad I_3 = 58 \text{ А}.$$

6. Каждая фазная нагрузка представляет собой отдельный элемент электрической цепи, в котором происходит преобразование энергии или её обмен с источником питания. Поэтому активная и реактивная мощности трёхфазной цепи равны сумме мощностей отдельных фаз потребителей. Это можно определить как аналитическим, так и графическим методами.

а) Определение активной, реактивной и полной мощности потребителей, соединённых по схеме «звезда».

Активная мощность каждой фазы:

$$P_A = U_A I_{A\lambda} \cos \varphi_A = 220 \cdot 14,67 \cdot 1 = 3227 \text{ Вт} = 3,23 \text{ кВт};$$

$$P_B = U_B I_{B\lambda} \cos \varphi_A = 220 \cdot 20,56 \cdot 0,93 = 4207 \text{ Вт} = 4,2 \text{ кВт};$$

$$P_C = U_C I_{C\lambda} \cos \varphi_A = 220 \cdot 20,56 \cdot 0,93 = 4207 \text{ Вт} = 4,2 \text{ кВт}.$$

Активная мощность трёх фаз:

$$P_{\Delta} = P_A + P_B + P_C = 3227 + 4207 + 4207 = 11641 \text{ Вт} = 11,64 \text{ кВт}.$$

Реактивная мощность каждой фазы:

$$Q_A = U_A I_A \sin \varphi_A = 220 \cdot 14,66 \cdot 0 = 0;$$

$$Q_B = U_B I_B \sin \varphi_B = 220 \cdot 20,56 \cdot 0,37 = 1674 \text{ ВАр} = 1,67 \text{ кВАр};$$

$$Q_C = U_C I_C \sin \varphi_C = 220 \cdot 20,56 \cdot (-0,37) = -1674 \text{ ВАр} = -1,67 \text{ кВАр}.$$

Реактивная мощность трёх фаз:

$$Q_{\Delta} = Q_A + Q_B + Q_C = 0 + 1674 - 1674 = 0.$$

Полная мощность каждой фазы:

$$S_A = \sqrt{P_A^2 + Q_A^2} = \sqrt{3,23^2 + 0^2} = 3,23 \text{ кВА};$$

$$S_B = \sqrt{P_B^2 + Q_B^2} = \sqrt{4,2^2 + 1,67^2} = \sqrt{20,43} = 4,5 \text{ кВА};$$

$$S_C = \sqrt{P_C^2 + Q_C^2} = \sqrt{4,2^2 + 1,67^2} = \sqrt{20,43} = 4,5 \text{ кВА}.$$

Полная мощность трёх фаз:

$$S_{\Delta} = \sqrt{P_{\Delta}^2 + Q_{\Delta}^2} = \sqrt{11,64^2 + 0^2} = 11,64 \text{ кВА}.$$

б) Активная, реактивная и полная мощность потребителей, соединённых по схеме «треугольник».

Активная мощность каждой фазы:

$$P_{AB} = U_{AB} \cdot I_{AB} \cdot \cos \varphi_{AB} = 380 \cdot 30,16 \cdot 0,71 = 8137 \text{ Вт} = 8,14 \text{ кВт},$$

$$P_{BC} = U_{BC} \cdot I_{BC} \cdot \cos \varphi_{BC} = 380 \cdot 25,3 \cdot 0,87 = 8364 \text{ Вт} = 8,36 \text{ кВт},$$

$$P_{CA} = U_{CA} \cdot I_{CA} \cdot \cos \varphi_{CA} = 380 \cdot 25,3 \cdot 0,87 = 8364 \text{ Вт} = 8,36 \text{ кВт}.$$

Активная мощность трёх фаз:

$$P_{\Delta} = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA} = 8,14 + 8,36 + 8,36 = 24,86 \text{ кВт}.$$

Реактивная мощность каждой фазы:

$$Q_{AB} = U_{AB} \cdot I_{AB} \cdot \sin \varphi_{AB} = 380 \cdot 30,16 \cdot 0,71 = 8137 \text{ ВАр} = 8,14 \text{ кВАр} ;$$

$$Q_{BC} = U_{BC} \cdot I_{BC} \cdot \sin \varphi_{BC} = 380 \cdot 25,3 \cdot 0,49 = 4710 \text{ ВАр} = 4,71 \text{ кВАр} ;$$

$$Q_{CA} = U_{CA} \cdot I_{CA} \cdot \cos \varphi_{CA} = 380 \cdot 25,3 \cdot 0,49 = 4710 \text{ ВАр} = 4,71 \text{ кВАр} .$$

Реактивная мощность трёх фаз:

$$Q_{\Delta} = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA} = 8,14 + 4,71 + 4,71 = 17,56 \text{ кВАр} .$$

Полная мощность каждой фазы:

$$S_{AB} = \sqrt{P_{AB}^2 + Q_{AB}^2} = \sqrt{8,14^2 + 8,14^2} = 11,5 \text{ кВА} ;$$

$$S_{BC} = \sqrt{P_{BC}^2 + Q_{BC}^2} = \sqrt{8,36^2 + 4,71^2} = \sqrt{92,09} = 9,6 \text{ кВА} ;$$

$$S_{CA} = \sqrt{P_{CA}^2 + Q_{CA}^2} = \sqrt{8,36^2 + 4,71^2} = \sqrt{92,09} = 9,6 \text{ кВА} .$$

Полная мощность трёх фаз:

$$S_{\Delta} = \sqrt{P_{\Delta}^2 + Q_{\Delta}^2} = \sqrt{25,86^2 + 17,56^2} = 30,44 \text{ кВА} .$$

7. По данным, из векторной диаграммы (рис. 3.5), определим графическим методом активную, реактивную и полную мощности трёхфазной цепи. Для этого измерим углы φ_1 , φ_2 и φ_3 из векторной диаграммы:

$$\varphi_1 = 27^{\circ} 30'; \quad \varphi_2 = 35^{\circ} 30'; \quad \varphi_3 = 15^{\circ} .$$

Определяем косинусы этих углов:

$$\cos \varphi_1 = 0,887; \quad \cos \varphi_2 = 0,814; \quad \cos \varphi_3 = 0,966 .$$

Определяем синусы этих углов:

$$\sin \varphi_1 = 0,462; \quad \sin \varphi_2 = 0,581; \quad \sin \varphi_3 = 0,258 .$$

Активная мощность каждой линии:

$$P_1 = U_A \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 220 \cdot 65 \cdot 0,887 = 12684 \text{ Вт} = 12,7 \text{ кВт} ;$$

$$P_2 = U_C \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = 220 \cdot 633 \cdot 0,814 = 11282 \text{ Вт} = 11,3 \text{ кВт} ;$$

$$P_3 = U_C \cdot I_3 \cdot \cos \varphi_3 = 220 \cdot 58 \cdot 0,966 = 12326 \text{ Вт} = 12,3 \text{ кВт} .$$

Суммарная активная мощность потребителей:

$$P_{\text{гр}} = P_1 + P_2 + P_3 = 12,7 + 11,3 + 12,3 = 36,3 \text{ кВт.}$$

Реактивная мощность каждой линии:

$$Q_1 = U_A \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 = 220 \cdot 65 \cdot 0,462 = 6602 \text{ ВАр} = 6,6 \text{ кВАр};$$

$$Q_2 = U_B \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 = 220 \cdot 63 \cdot 0,581 = 8052 \text{ ВАр} = 8,05 \text{ кВАр};$$

$$Q_3 = U_C \cdot I_3 \cdot \sin \varphi_3 = 220 \cdot 58 \cdot 0,258 = 3292 \text{ ВАр} = 3,3 \text{ кВАр}.$$

Суммарная реактивная мощность потребителей:

$$Q_{\text{гр}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 6,6 + 8,05 + 3,3 = 17,95 \text{ кВАр}.$$

Полная мощность каждой линии:

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = \sqrt{12,7^2 + 6,6^2} = 14,3 \text{ кВА};$$

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = \sqrt{11,3^2 + 8,05^2} = \sqrt{192,5} = 13,9 \text{ кВА};$$

$$S_3 = \sqrt{P_3^2 + Q_3^2} = \sqrt{12,3^2 + 3,3^2} = \sqrt{162,2} = 12,8 \text{ кВА}.$$

Суммарная полная мощность трёх линий:

$$S_{\text{гр}} = \sqrt{P_{\text{гр}}^2 + Q_{\text{гр}}^2} = \sqrt{36,3^2 + 17,95^2} = 40,49 \text{ кВА}.$$

Сопоставим мощности, полученные аналитическим и графическим методами. Для этого определим полную мощность, потребляемую приёмниками:

$$P_{\text{ан}} = P_{\lambda} + P_{\Delta} = 11,64 + 24,86 = 36,5 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{ан}} = Q_{\lambda} + Q_{\Delta} = 0 + 17,6 = 17,6 \text{ кВАр};$$

$$S_{\text{ан}} = \sqrt{P_{\text{ан}}^2 + Q_{\text{ан}}^2} = \sqrt{36,5^2 + 17,6^2} = \sqrt{1637,68} = 40,52 \text{ кВА}.$$

Определим относительную погрешность расчётов:

$$\Delta S = \frac{S_{\text{ан}} - S_{\text{гр}}}{S_{\text{ан}}} \cdot 100 = \frac{40,52 - 40,49}{40,52} \cdot 100 = 0,07 \text{ \%}.$$

Относительная погрешность расчётов аналитическим и графическим методами в пределах допустимого значения.

Варианты заданий для самостоятельного расчёта трёхфазных цепей приведены в таблицах 3.3,3.4,3.5.

Таблица 3.3

Активные сопротивления трёхфазной цепи (Ом)

Фазы	Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0	20	50		40	60	30	10	25	35	40
B		25	20	10		25	15	35	20	30	
C			25	30	30		40		20	40	25
A	1	25		30	50	60	35	20	25	40	20
B		20	30		40	35	20		30	50	10
C		16	25	35		25	15	50	15	25	
A	2		45	10		60	30	10	10	40	20
B		50	20	45	10	20			36	50	30
C		30	20	30	40	30	20	25		20	
A	3	60	30	40	15	35	55	45	55	25	15
B			35			40	25	20		40	
C		35	20	15	30		40	10	30	50	40
A	4	65	10	35	45	15	20	50	35	15	45
B			30	20	10		40		20		30
C		15		10	20	40	10	20	50	30	
A	5		30	55	25	15	50	40	10	40	60
B		20		40		10		15	30	10	25
C		45	18	15	10	25	30		20	25	
A	6	10	15		10	40	25	20	40	60	50
B			20	30	40	10	40	35		20	30
C		30	35	50	25	30	30	20	30	35	

Продолжение таблицы 3.3

A	7	20	35	40	45	50	15	10	55	45	50
B		28		60	40		40	25	30	20	
C		10	20	30	25	10		15	10	25	20
A	8	30	55	15	45	25	35	45	40	10	15
B		40		25	20	40	50	20	20	40	30
C		20	15	50	10		15	30		20	
A	9	35	40	20	15	30	50	15	45		40
B			10	40	40	20		35	30	10	
C		10	20		25	10				30	30

Таблица 3.4

Индуктивности трёхфазной цепи (мГн)

Фазы	Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0		32	48		64	159	143		80	96
B		115		25,6	127	16		80	38,4	127	63,6
C		76,4	86,4	115		144	95,5	106		48	38,4
A	1	80	64		175	32	96		127	175	64
B			89	64	115		51	64	76,4		48
C		95,5	48		80	38	163		48	64	112
A	2	96		175	143	32		80	112	159	
B		76,4	140		76,4	127		25,6	80	64	
C		57,3	107	86,4	163	57,3	115	106	28,7	106	140
A	3	159	191	64		96	64		80	127	80
B		51	102	140	38,4		102	89	38,4	76,4	
C		127	66,9		86,4	28,7		106,5	115		154

Продолжение таблицы 3.4

A	4		127	112	48	159	127		112	96	32
B		38,4	89		115	127	38,4	51		25,6	89
C			57	76,4		38,2	57	76,4		64	127
A	5	96	32	175		48	64	80	64	112	
B		127	76,4		89	102		64	153	127	
C		144		76,4	127		96	38	80	66,9	51
A	6	112		48	143	127	127	143	112		80
B		38,4		153	51		80	75,4		102	140
C			76,4	48		66,9		38,2	76,4	86,4	80
A	7	143	159	80	48	191	48		96	64	143
B		89	76,4	63,6	127	112	140		51	115	
C		66,9		28,7	86,4		96	66,9	63,6		115
A	8		48	127		63,6	63,6	143		127	96
B		63,6	140		102	115	153		127		96
C		76,4	57,3	64	80		48	99,5		89	127
A	9		127	112	48	159	127		112	96	32
B		127		38,4	127	153		64	80	106	127
C		48	86,4	96		80	127	112	57,3	48	

Таблица 3.5

Ёмкости трёхфазной цепи (мкФ)

Фазы	Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0	106		127	212	64	106		157	91	71
B		199	114		66,4	114	80	72,4		159	
C		133		76	96,5		177	96,5	88,5		106

Продолжение таблицы 3.5

A	1	64	91	58		159		127	159	127	80
B		159	133		133	72,4	88,5		80		159
C		82	71		106	133	64	212	96,5	88,5	
A	2	71	159	91	106	127	318		212	318	106
B			80	199	66,4	99,5	133		100	133	
C			177	88,5	152	82	88,5	118		82	
A	3	318	64	127	318	64		159	80	71	159
B			159	88,5	88,5		66,4	88,5	159		133
C			118	106		82	106	133		106	118
A	4	27		80	318	80	127	106	64	80	
B			159	114	80		133	64	114	199	99,5
C		52		318	133	127			80		106
A	5	159	127		106	159	318		91		91
B				72,4	133	99,5	199			133	114
C		133		118		212	152	96,5	133		71
A	6	127	64	318	106		318	71	80	91	
B			133	159	159	212			159	133	127
C		76		127		71	159	133	96,5		76
A	7	91	159		71	159	106		127	80	318
B			80	114		398	72,4	159		133	72,4
C			133	177	88,5	76		76	96,5		152
A	8	80	91		159		91	106	71		159
B			159	88,5		159	133		114	89	
C		177		52		212		88,5	82	152	106
A	9	71	318		127	318	106	127	106	318	
B			188	58	80	114	159	80		100	133

С		106		127	177	152			159	80	88,5
---	--	-----	--	-----	-----	-----	--	--	-----	----	------

ГЛАВА 4. РАСЧЁТ ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформатор - это статический электрический аппарат, предназначенный для преобразования (изменения) напряжения переменного тока без изменения частоты. В зависимости от соотношения числа витков первичных и вторичных обмоток могут быть повышающими или понижающими:

$$k = \frac{w_1}{w_2},$$

где w_1 - число витков первичной обмотки;

w_2 - число витков вторичной (нагрузочной) обмотки.

Если $k > 1$, то трансформатор понижающий, если $k < 1$, то повышающий.

Каждый трансформатор рассчитывается на номинальный режим работы, который соответствует нагрузке в 100%. Величины, относящиеся к этому режиму, называются номинальными. К таким величинам относятся:

- $S_{\text{НОМ}}$ - номинальная мощность - это полная мощность, которую трансформатор, установленный на открытом воздухе, может непрерывно отдавать в течение всего срока службы (20-25 лет) при номинальном напряжении и при максимальной и среднегодовой температуре окружающего воздуха.
- $U_{1\text{НОМ}}$ - номинальное напряжение, на которое рассчитана первичная обмотка трансформатора.
- $U_{2\text{НОМ}}$ - номинальное напряжение на выводах вторичной обмотки при холостом ходе и номинальном первичном напряжении (у трехфазных трансформаторов $U_{1\text{НОМ}}$ и $U_{2\text{НОМ}}$ линейные напряжения).
- $I_{1\text{НОМ}}$ и $I_{2\text{НОМ}}$ - номинальные первичный и вторичный токи; это токи, полученные по номинальной мощности и номинальным напряжениям (у трехфазных трансформаторов $I_{1\text{НОМ}}$ и $I_{2\text{НОМ}}$ - линейные токи). Для однофазного трансформатора номинальные токи определяются:

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}}, \quad I_{2\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}}.$$

Для трехфазного трансформатора:

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}U_{1\text{НОМ}}}, \quad I_{2\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}U_{2\text{НОМ}}}.$$

Трансформаторы обычно работают с нагрузкой меньше номинальной, определяемой коэффициентом нагрузки:

$$\beta = \frac{S_2}{S_{\text{НОМ}}}.$$

Значения, отдаваемые трансформатором, активной и реактивной мощности, зависят от коэффициента мощности потребителя $\cos \varphi_2$. В трехфазных трансформаторах отношение линейных напряжений называют линейным коэффициентом трансформации, который равен отношению чисел витков обмоток, если они имеют одинаковые схемы соединения (λ / λ и Δ / Δ). При других схемах коэффициент трансформации находят по формулам (здесь отношения первичных напряжений к вторичным!):

$$k = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}} = \frac{w_1}{\sqrt{3}w_2} \quad (\text{при соединении } \Delta/\lambda);$$

$$k = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}} = \frac{\sqrt{3}w_1}{w_2} \quad (\text{при соединении } \lambda/\Delta).$$

При соединении нагрузки звездой: $U_{\text{Л}} = \sqrt{3}U_{\text{Ф}}$, $I_{\text{Л}} = I_{\text{Ф}}$.

При соединении нагрузки треугольником: $U_{\text{Л}} = U_{\text{Ф}}$, $I_{\text{Л}} = \sqrt{3}I_{\text{Ф}}$.

Для трехфазных трансформаторов, обозначив коэффициент трансформации линейных напряжений буквой k , (здесь отношения вторичных напряжений к первичным!) имеем:

При соединении обмоток по схеме Δ / Δ : $k_{\text{Л}} = \frac{U_{2\text{Л}}}{U_{1\text{Л}}} = \frac{\sqrt{3}U_{2\text{Ф}}}{\sqrt{3}U_{1\text{Ф}}} = \frac{1}{k}$;

При соединении обмоток по схеме λ/Δ : $k_{\text{Л}} = \frac{U_{2\text{Л}}}{U_{1\text{Л}}} = \frac{U_{2\text{Ф}}}{\sqrt{3}U_{1\text{Ф}}} = \frac{k}{\sqrt{3}}$;

При соединении обмоток по схеме Δ/λ : $k_{\text{Л}} = \frac{U_{2\text{Л}}}{U_{1\text{Л}}} = \frac{\sqrt{3}U_{2\text{Ф}}}{U_{1\text{Ф}}} = \frac{\sqrt{3}}{k}$.

Таким образом, при одном и том же числе витков обмоток трансформатора можно в $\sqrt{3}$ раза увеличить или уменьшить его

коэффициент трансформации, выбирая соответствующую схему соединения обмоток.

Практическое занятие №5. Расчёт трансформаторов

Пример 1. Расчет однофазного трансформатора

Дано: к электрической сети напряжением 220В необходимо подключить через понижающий однофазный трансформатор 5 ламп мощностью по 60 Вт каждая. Лампы рассчитаны на напряжение 24В, коэффициент мощности ламп $\cos\varphi_2=1$. Используя таблицу 4.1, определить рабочие и номинальные токи обмоток трансформатора, коэффициент трансформации и коэффициент нагрузки. Потерями в трансформаторе пренебречь. Схема подключения ламп к трансформатору изображена на рис.4.1. Выбрать трансформатор из таблицы 4.1

Определить:

- 1) I_1 и I_2 - рабочие токи обмоток;
- 2) $I_{1\text{ном}}$ и $I_{2\text{ном}}$ - номинальные токи обмоток, k - коэффициент трансформации, β - коэффициент нагрузки.

Решение:

1) Активная мощность, отдаваемая трансформатором нагрузке (лампам накаливания)

$$P_2 = P_{\text{лампы}} \cdot n_{\text{лампы}} = 60 \text{ Вт} \cdot 5 = 300 \text{ Вт};$$

$$(P_2 = S_2 \cos\varphi_2, \text{ где } S_2 = I_2 \cdot U_2).$$

2) Так как нагрузка на трансформатор чисто активная ($\cos\varphi_2=1$), то поэтому полная мощность трансформатора должна быть не менее:

$$S_2 = \frac{P_2}{\cos\varphi_2} = \frac{300}{1}.$$

3) Номинальное первичное напряжение трансформатора должно соответствовать напряжению сети, поэтому $U_{1\text{ном}} = U_{\text{сети}} = 220 \text{ В}$.

4) Номинальное вторичное напряжение трансформатора должно соответствовать напряжению, на которое рассчитаны лампы накаливания, поэтому $U_{2\text{ном}} = U_{\text{лампы}} = 24 \text{ В}$.

5) Пользуясь таблицей 4.1, выбираем трансформатор. Его технические данные: номинальная мощность $S_{\text{ном}} = 400 \text{ ВА}$ (что больше расчетного $S_2 = 300 \text{ ВА}$); номинальное первичное

напряжение $U_{1\text{НОМ}} = 220\text{В}$; номинальное вторичное
напряжение $U_{2\text{НОМ}} = 24\text{ В}$.

Ток холостого хода $I_0 = 20\%$ от $I_{1\text{НОМ}}$ номинального тока первичной обмотки трансформатора.

Напряжение короткого замыкания $U_K = 4,5\%$ от $U_{\text{НОМ}}$.

6) Т. к. потерями пренебрегаем, то коэффициент трансформатора может быть определен из соотношения:

$$k = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}} = \frac{220}{24} = 9,17.$$

7) Номинальный ток в первичной обмотке трансформатора

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} = \frac{400}{200} = 1,82\text{ А}.$$

Номинальный ток во вторичной обмотке трансформатора

$$I_{2\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}} = \frac{400}{24} = 16,7\text{ А}$$

или $I_{2\text{НОМ}} = I_{1\text{НОМ}} \cdot k$ (убедитесь в этом сами).

8) Коэффициент нагрузки $\beta = \frac{S_2}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{P_2}{S_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi_2} = \frac{300}{400 \cdot 1} = 0,75$.

9) Рабочие токи в обмотках трансформатора при фактической нагрузке в первичной обмотке:

$$I_1 = \beta \cdot I_{1\text{НОМ}} = 0,75 \cdot 1,82\text{ А} = 1,36\text{ А}$$

во вторичной обмотке:

$$I_2 = \beta \cdot I_{2\text{НОМ}} = 0,75 \cdot 16,7\text{ А} = 12,5\text{ А}.$$

Значения рабочих токов в обмотках трансформатора можно определить и по таким выражениям:

$$I_2 = I_{\text{лампы}} \cdot n_{\text{лампы}},$$

где

$$I_{\text{лампы}} = P_{\text{лампы}} / U_{\text{лампы}}$$

или

$$I_2 = P_2 / U_{2\text{НОМ}}$$

и т. к. здесь $k = I_1 / I_2$, то $I_1 = I_2 / k$ (убедитесь в этом сами).

10) Пользуясь техническими данными трансформатора, можно определить ток холостого хода трансформатора и напряжение короткого замыкания.

Ток холостого хода трансформатора составляет 20 % от номинального тока первичной обмотки (см. таблицу 4.1), поэтому

$$I_0 = 0,2 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 0,2 \cdot 1,82 \text{ А} = 0,36 \text{ А}.$$

Напряжение короткого замыкания трансформатора составляет 4,5 % от номинального напряжения его первичной обмотки $U_{1\text{НОМ}}$, поэтому $U_k = 0,045 \cdot U_{1\text{НОМ}} = 0,045 \cdot 220 = 9,9 \text{ В}$.

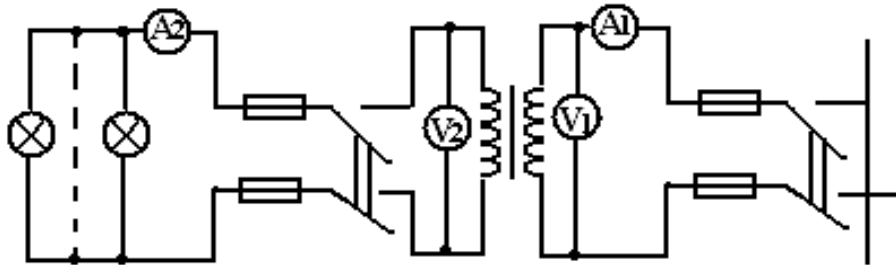


Рис. 4.1. Схема подключения однофазного трансформатора

Пример 2. Расчёт трехфазного трансформатора

Дано. Трехфазный трансформатор имеет следующие данные: номинальная мощность $S_{\text{НОМ}} = 100 \text{ кВА}$; номинальное напряжение на зажимах первичных обмоток $U_{1\text{НОМ}} = 660 \text{ В}$; номинальное напряжение на зажимах вторичных обмоток $U_{2\text{НОМ}} = 230 \text{ В}$; потери мощности в стали трансформатора $P_{\text{ст}} = 500 \text{ Вт}$; потери мощности в обмотках при номинальном токе в них $P_{\text{об.НОМ}} = 1500 \text{ Вт}$. Первичные и вторичные обмотки трансформатора соединены в звезду. От трансформатора потребляется активная мощность $P_2 = 60 \text{ кВт}$ при коэффициенте мощности $\cos\varphi_2 = 0,8$.

Определить:

- 1) линейный коэффициент трансформации k ;
- 2) номинальные токи в первичных и вторичных обмотках трансформатора $I_{1\text{НОМ}}, I_{2\text{НОМ}}$;
- 3) коэффициент нагрузки β ;
- 4) токи в первичных и вторичных обмотках трансформатора при фактической нагрузке I_1, I_2 .
- 5) суммарные потери мощности при номинальной нагрузке трансформатора $\sum P_{\text{НОМ}}$;

6) суммарные потери мощности при фактической нагрузке трансформатора $\sum P$;

7) коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке трансформатора $\eta_{\text{НОМ}}$;

8) коэффициент полезного действия при фактической нагрузке трансформатора η .

Решение.

1. Линейный коэффициент трансформации $k = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}} = \frac{660}{230} = 2,87$.

2. Номинальные токи в обмотках трансформатора:

- в первичных обмотках

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}U_{1\text{НОМ}}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 660} = 87,5 \text{ А};$$

- во вторичных обмотках

$$I_{2\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}U_{2\text{НОМ}}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 230} = 251 \text{ А}.$$

3. Коэффициент нагрузки: $\beta = P_2 / S_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi_2 = 60 / 100 \cdot 0,8 = 0,75$.

4. Токи в обмотках трансформатора при фактической нагрузке:

- в первичных обмотках $I_1 = \beta \cdot I_{1\text{НОМ}} = 0,75 \cdot 87,5 = 65,6 \text{ А};$

- во вторичных обмотках $I_2 = \beta \cdot I_{2\text{НОМ}} = 0,75 \cdot 251 = 188 \text{ А}.$

5. Суммарные потери мощности при номинальной нагрузке трансформатора

$$\sum P_{\text{НОМ}} = P_{\text{СТ}} + P_{\text{об.НОМ}} = 500 + 1500 = 2000 \text{ Вт}.$$

6. Суммарные потери мощности при фактической нагрузке трансформатора

$$\sum P = P_{\text{СТ}} + \beta^2 \cdot P_{\text{об.НОМ}} = 500 + 0,75^2 \cdot 1500 = 1344 \text{ Вт},$$

где $\beta \cdot P_{\text{об.НОМ}}$ - потери мощности в обмотках трансформатора при фактической нагрузке.

Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке трансформатора:

$$\eta_{\text{НОМ}} = \frac{P_{2\text{НОМ}} \cdot 100\%}{P_{2\text{НОМ}} + \sum P_{\text{НОМ}}} = \frac{S_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi_2 \cdot 100\%}{S_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi_2 + P_{\text{СТ}} + P_{\text{об.НОМ}}} =$$

$$= \frac{100 \cdot 0,8 \cdot 100\%}{100 \cdot 0,8 + 0,5 + 1,5} = 97,56\% .$$

Коэффициент полезного действия при фактической нагрузке трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2 \cdot 100\%}{P_2 + \sum P} = \frac{\beta S_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi_2 \cdot 100\%}{\beta \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi_2 + P_{\text{СТ}} + \beta^2 \cdot P_{\text{об.НОМ}}}$$

$$= \frac{0,75 \cdot 100 \cdot 0,8 \cdot 100\%}{0,75 \cdot 100 \cdot 0,8 + 0,5 + 0,75^2 \cdot 1,5} = 97,8\% .$$

Варианты заданий для самостоятельного решения

Для освещения рабочих мест применили в целях безопасности лампы накаливания одинаковой мощности, рассчитанные на пониженное напряжение. Для их питания установили **однофазный понижающий трансформатор**. Схема присоединения ламп к трансформатору приведена на рис.4.1.

Дано: номинальная мощность трансформатора $S_{\text{НОМ}}$; номинальные напряжения на зажимах первичной и вторичной обмоток трансформатора $U_{1\text{НОМ}}$, $U_{2\text{НОМ}}$; мощность нагрузки $P_{\text{лампы}}$; количество ламп, подключенных к трансформатору $N_{\text{лампы}}$.

Определить:

- 1) номинальные токи, на которые рассчитаны первичная и вторичная обмотки трансформатора $I_{1\text{НОМ}}$, $I_{2\text{НОМ}}$;
- 2) фактическое значение токов в обмотках трансформатора при заданной нагрузке I_1 , I_2 ;
- 3) коэффициент нагрузки трансформатора β ;
- 4) коэффициент трансформации трансформатора k .

Таблица 4.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{\text{НОМ}}$, ВА	400	250	160	100	400	250	160	100	400	250
$U_{1\text{НОМ}}$, В	220	380	660	220	380	660	220	380	660	220
$U_{2\text{НОМ}}$, В	36	24	12	24	12	36	12	36	24	12

P_{лампы}, Вт	25	40	15	25	40	60	25	40	60	25
N_{лампы}, шт	12	5	8	3	8	3	5	2	6	8

Указания: при решении задачи потерями в трансформаторе пренебречь. Считать, что лампы накаливания рассчитаны на вторичное напряжение трансформатора, т.е. $U_{\text{лампы}} = U_{2\text{ном}}$, а их коэффициент мощности $\cos \varphi = 1$.

Варианты заданий для самостоятельного решения (трехфазный трансформатор)

Для трехфазного трансформатора известны: тип трансформатора; номинальная мощность трансформатора $S_{\text{ном}}$; номинальные напряжения на зажимах первичной и вторичной обмоток трансформатора $U_{1\text{ном}}$, $U_{2\text{ном}}$; потери мощности в стали трансформатора $\Delta P_{\text{ст}}$; потери мощности в обмотках трансформатора при номинальном токе в них $P_{0\text{ном}}$; первичные и вторичные обмотки соединены в "звезду". Трансформатор работает с коэффициентом нагрузки β и коэффициентом мощности $\cos \varphi_2$.

Определить:

- линейный коэффициент трансформации k ;
- номинальные токи, на которые рассчитаны первичная и вторичная обмотки трансформатора $I_{1\text{ном}}$, $I_{2\text{ном}}$;
- рабочие токи в первичных и вторичных обмотках трансформатора I_1 , I_2 ;
- P_2 , Q_2 - активную и реактивную мощности, отдаваемые трансформатором;
- $\sum \Delta P_{\text{ном}}$ - суммарные потери мощности при номинальной нагрузке;
- $\sum \Delta P$ - суммарные потери мощности при заданном коэффициенте нагрузки.
-

Данные для своего варианта необходимо взять из таблицы 4.2 $\eta_{\text{ном}}$ - КПД трансформатора при номинальной нагрузке.

Таблица 4.2.

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Номинальные параметры трансформатора</i>	ТМ-160	ТСЗ - 250	ТМ - 400	ТСЗ - 630	ТМ -1000	ТСЗ - 160	ТМ-250	ТСЗ - 400	ТМ - 630	ТСЗ-1000
$S_{\text{ном}}$, кВА	160	250	400	630	1000	160	250	400	630	1000
$U_{1 \text{ ном}}$, кВ	6	10	10	13,8	35	10	6	10	10	15,75
$U_{2 \text{ ном}}$, кВ	0,4	0,23	0,69	0,4	0,4	0,69	0,4	0,69	0,69	0,4
$P_{\text{ст}}$, кВт	0,565	1,00	1,05	2,3	2,75	0,7	0,82	1,3	1,66	3,2
$P_{0 \text{ ном}}$, кВт	2,65	3,80	5,5	8,7	12,2	2,7	3,7	5,4	7,60	12,0
β	0,75	0,84	0,9	0,85	0,75	0,8	0,82	0,75	0,87	0,72
$\cos \varphi_2$	0,9	0,9	0,85	0,803	0,94	0,86	0,927	0,8	0,913	0,85

Дано: Трехфазный двухобмоточный трансформатор характеризуется следующими величинами: мощность S [кВА]; высшее линейное напряжение $U_{\text{вн}}$ [кВ]; низшее линейное напряжение $U_{\text{нн}}$ [кВ]; мощность потерь холостого хода ΔP_0 [Вт]; мощность потерь короткого замыкания $\Delta P_{\text{к}}$ [Вт]; напряжение короткого замыкания $U_{\text{к}}$ [кВ] ток холостого хода I_0 [А];

коэффициент полезного действия η , определенный при коэффициенте нагрузки $\beta = 1$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$ параметры упрощенной схемы замещения r_k и x_k ; параметры намагничивающей ветви r_m и x_m .

Числовые значения заданных величин, схема соединения обмоток и пункты задания, подлежащих выполнению, указаны в таблице 4.3.

Задание: сформулировать условие задачи для своего варианта и выполнить следующее:

1. Начертить схему трансформатора.
2. Определить номинальные токи в обмотках трансформатора.
3. Определить коэффициент фазных и линейных напряжений.
4. Определить мощность потерь короткого замыкания P_k .
5. Начертить упрощённую схему замещения трансформатора.
6. Определить напряжение вторичной обмотки U_2 и коэффициент полезного действия трансформатора η при значениях коэффициента нагрузки $\beta: 0,2; 0,5; 0,75; 1,0$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$ ($\varphi_2 > 0$).
7. Построить графики зависимостей $U_2(\beta)$ и $\eta(\beta)$.

Таблица 4.3

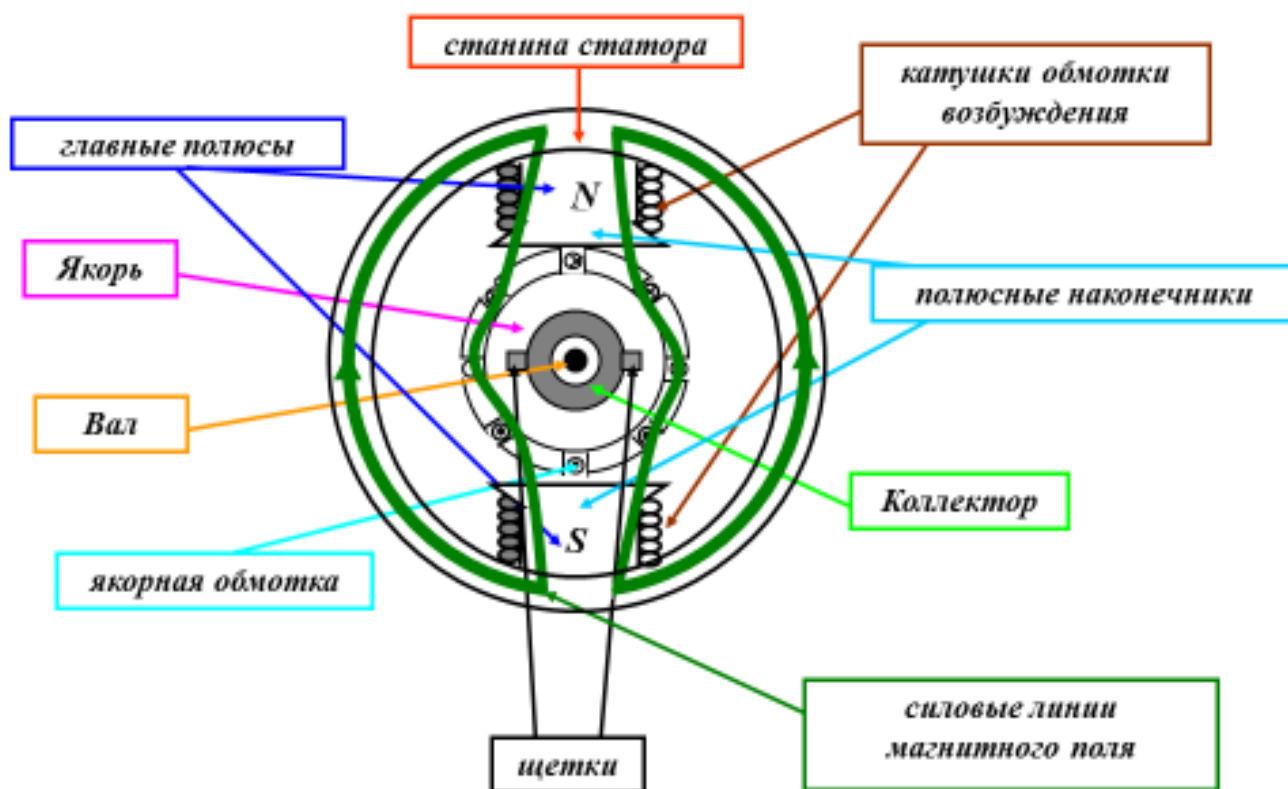
Варианты	Тип трансформатора	S, кВА	U, кВ		P ₀ , кВт	r _k , Ом	X _k , Ом	Схема соединения обмоток
			ВН	НН				
1	ТМ-25/6	25	6,3	0,4	0,105	38,14	60,41	λ/Δ
2	ТМ-40/10	40	10	0,4	0,160	59,23	98,57	λ/λ
3	ТМ-100/35	100	35	0,23	0,465	253,4	755,6	λ/Δ
4	ТМ-160/10	160	10	0,23	0,565	10,84	25,92	λ/Δ
5	ТМ-250/10	250	10	0,23	0,820	6,20	16,9	λ/Δ
6	ТМ-250/35	250	35	0,23	1,000	75,9	301,2	λ/Δ
7	ТМ-25/10	25	10	0,4	0,135	95,12	152,8	λ/λ
8	ТМ-160/35	160	35	0,4	0,610	133,9	487,7	λ/λ
9	ТМ-100/6	100	6,3	0,4	0,330	8,30	16,25	λ/λ
0	ТМ-63/6	63	6,3	0,4	0,360	13,47	26,36	λ/λ

ГЛАВА 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Машины постоянного тока используют в качестве генераторов и двигателей. С помощью генераторов осуществляется преобразование механической энергии в электрическую энергию постоянного тока. Двигатели постоянного тока используют для преобразования электрической энергии постоянного тока в механическую энергию. Одной из причин применения двигателей постоянного тока вместо асинхронных является возможность плавного регулирования скорости в широком диапазоне и получения желаемых механических характеристик. МПТ генераторы и двигатели устроены одинаково.

Электрические машины постоянного тока взаимнообратимы, т.е. могут работать как в режиме двигателя, так и генератора.

Устройство МПТ



Принцип действия генератора постоянного тока

При вращении якоря с помощью первичного двигателя, магнитные силовые линии главного полюса, создаваемые обмоткой

возбуждения, пересекают обмотки якоря и индуктируют в них ЭДС ($e = B \cdot l \cdot v$). С помощью щеточного - коллекторного устройства подключается к нагрузке. Если учесть что якорь состоит не из одного проводника, а из многих секций (обмоток), то и ЭДС и возникают во всех секциях обмоток якоря, так как щетка закреплена в одной точке (максимальное значение ЭДС), щетка будет снимать максимальные значения ЭДС. На выходе генератора получается постоянная энергия.

Действующее значение ЭДС на выходе генератора $E = C_E \Phi n$, где C_E – постоянный коэффициент зависит от геометрических размеров магнитных полюсов и числа витков обмоток; Φ – магнитный поток; n – скорость вращения якоря.

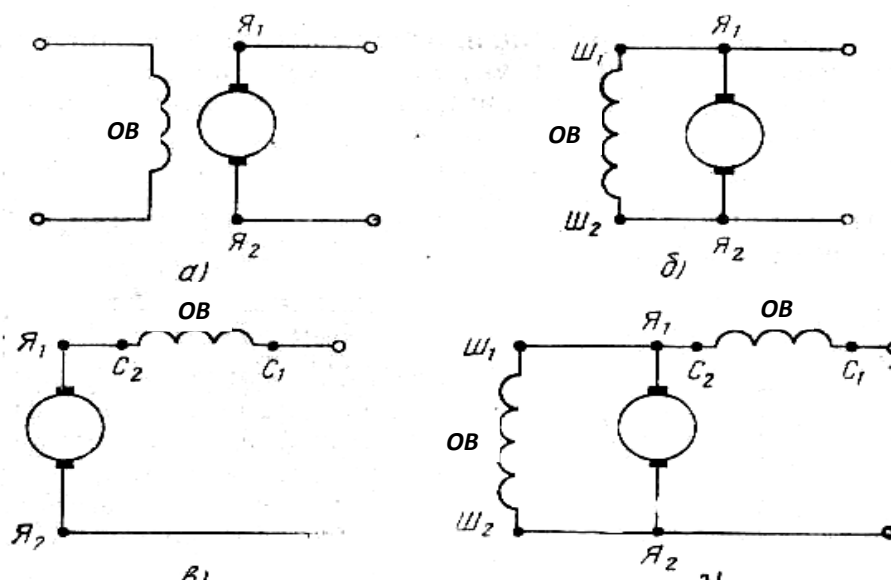


Рис. 5.1 Схемы возбуждения генераторов. а) независимое, б) параллельное, в) последовательное, г) смешанные.

Генераторы с параллельным возбуждением – у них обмотка возбуждения включена параллельно с обмоткой якоря;

генераторы с последовательным возбуждением – здесь обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря;

генераторы со смешанным возбуждением – у них две обмотки возбуждения, одна из которых включена параллельно обмотке якоря, а другая – последовательно.

Электродвижущую силу E (В) генератора постоянного тока определяют по формуле $E = C_n \Phi$: где C – постоянная величина

машины: n – частота вращения якоря, об/мин; Φ – магнитный поток, Вб.

Практическое занятие №6. Построение механической характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения по паспортным данным

В паспорте двигателя постоянного тока приводятся следующие номинальные параметры: номинальное напряжение якоря $U_{\text{НОМ}}$; номинальная мощность на валу двигателя $P_{\text{НОМ}}$; номинальная скорость вращения якоря $n_{\text{НОМ}}$; коэффициент полезного действия $\eta_{\text{НОМ}}$; сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$; сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}}$. Для построения механической характеристики определить:

- потребляемый номинальный ток двигателя $I_{\text{НОМ}}$;
- номинальный ток возбуждения $I_{\text{в}}$;
- номинальный ток якоря $I_{\text{яНОМ}}$;
- номинальный момент $M_{\text{НОМ}}$;
- э.д.с. якоря. $E_{\text{я}}$;
- скорость холостого хода n_0 .

Построить естественную и искусственную электромеханические характеристики $n=f(I_{\text{я}})$ при дополнительных сопротивлениях: $R_{\text{я1}}$, $R_{\text{я2}}$, $R_{\text{я3}}$; из характеристики определить $n_{1\text{НОМ}}$, $n_{2\text{НОМ}}$ и $n_{3\text{НОМ}}$; показать и выписать из электромеханической характеристики значения скоростей, соответствующие нагрузке $0,8I_{\text{яНОМ}}$ и $1,2I_{\text{яНОМ}}$; начертить электрическую схему включения двигателя постоянного тока в сеть.

Дано: Номинальные параметры двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением:

$$U_{\text{НОМ}} = 220 \text{ В}; P_{\text{НОМ}} = 19 \text{ кВт}; n_{\text{НОМ}} = 1500 \text{ об/мин}; \eta_{\text{НОМ}} = 86\%;$$

$$R_{\text{я}} = 0,16 \text{ Ом}; R_{\text{в}} = 110 \text{ Ом}.$$

Решение:

1. Общий ток, потребляемый двигателем из сети

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{НОМ}}} = \frac{19 \cdot 10^3}{220 \cdot 0,86} = 100 \text{ А}.$$

2. Номинальный ток возбуждения двигателя

$$I_B = \frac{U_{\text{НОМ}}}{R_B} = \frac{220}{110} = 2 \text{ А.}$$

3. Номинальный ток якоря двигателя

$$I_{\text{я ном}} = I_{\text{НОМ}} - I_B = 100 - 2 = 98 \text{ А.}$$

4. Номинальный вращающий момент двигателя

$$M_{\text{НОМ}} = 9550 \frac{P_{2\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9550 \frac{19}{1500} = 121 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

5. Номинальная э.д.с. якоря двигателя

$$E_{\text{я}} = U_{\text{НОМ}} - I_{\text{я ном}} \cdot R_{\text{я}} = 220 - 98 \cdot 0,86 = 204,4 \text{ В.}$$

6. Скорость холостого хода двигателя

$$n_0 = \frac{U_{\text{НОМ}}}{k\Phi} = \frac{U_{\text{НОМ}} \cdot n_{\text{НОМ}}}{E_{\text{я}}} = \frac{220 \cdot 1500}{204,4} = 1610 \text{ об/мин.}$$

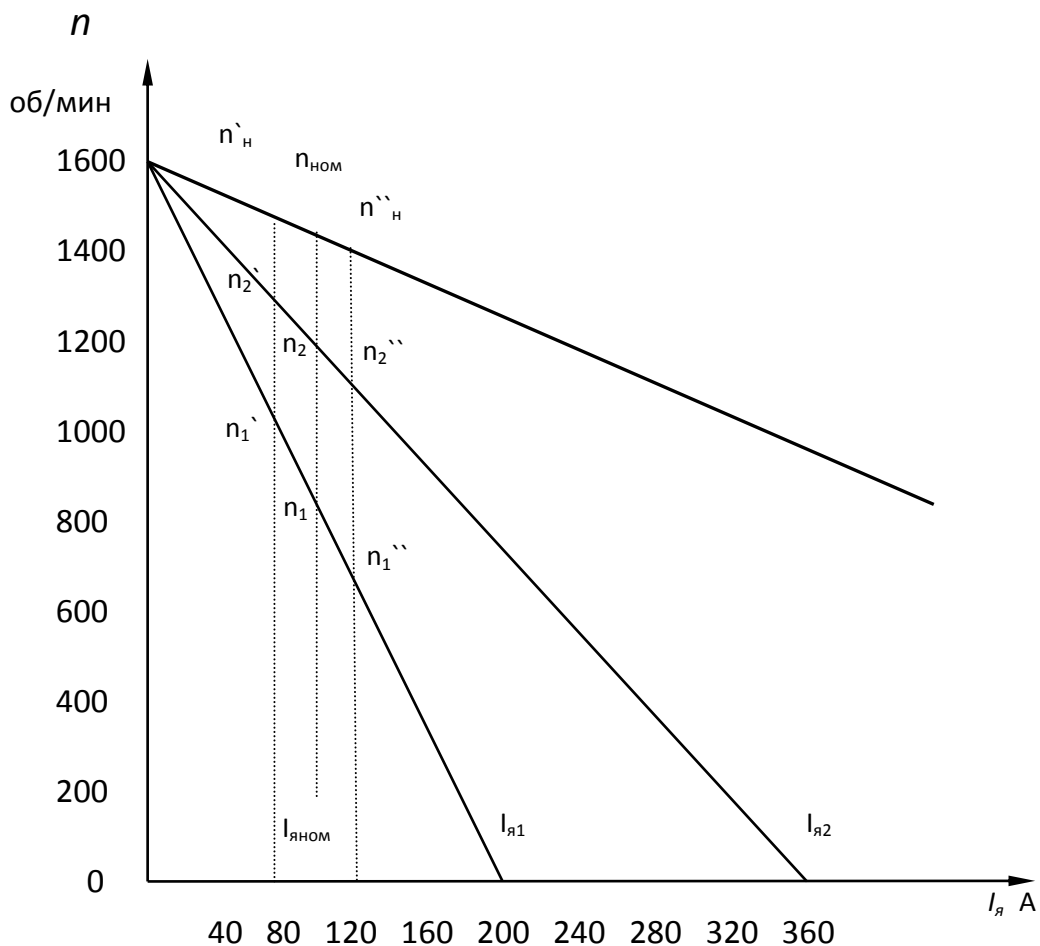


Рис. 5.2 Естественные и искусственные электромеханические характеристики двигателя

7. Пусковые токи двигателя, при различных значениях дополнительных сопротивлений в цепи якоря:

$$I_{я1} = \frac{U_{ном}}{R_я + R_{к1}} = \frac{U_{ном}}{R_я + 6R_я} = \frac{220}{7 \cdot 0,16} = 196 \text{ A.}$$

$$I_{я2} = \frac{U_{ном}}{R_я + R_{к2}} = \frac{U_{ном}}{R_я + 3R_я} = \frac{220}{4 \cdot 0,16} = 343 \text{ A.}$$

$$I_{я3} = \frac{U_{ном}}{R_я + R_{к3}} = \frac{U_{ном}}{R_я + 0} = \frac{220}{0,16} = 1375 \text{ A.}$$

8. Естественные и искусственные электромеханические характеристики двигателя (рис.5.2).

9. Скорости двигателя при номинальных значениях тока:

$$n_1 = 800 \text{ об/мин}; n_2 = 1140 \text{ об/мин}; n_{ном} = 1500 \text{ об/мин.}$$

10. Скорости двигателя, соответствующие значениям $0,8I_{яном}$ и $1,2I_{яном}$:

а) $0,8 I_{яном} = 0,8 \cdot 98 = 78,4 \text{ A}$

$$n_1' = 970 \text{ об/мин}; n_2' = 1240 \text{ об/мин}; n_{ном}' = 1525 \text{ об/мин.}$$

б) $1,2 I_{яном} = 1,2 \cdot 98 = 117,6 \text{ A}$

$$n_1'' = 630 \text{ об/мин}; n_2'' = 1040 \text{ об/мин}; n_{ном}'' = 1475 \text{ об/мин.}$$

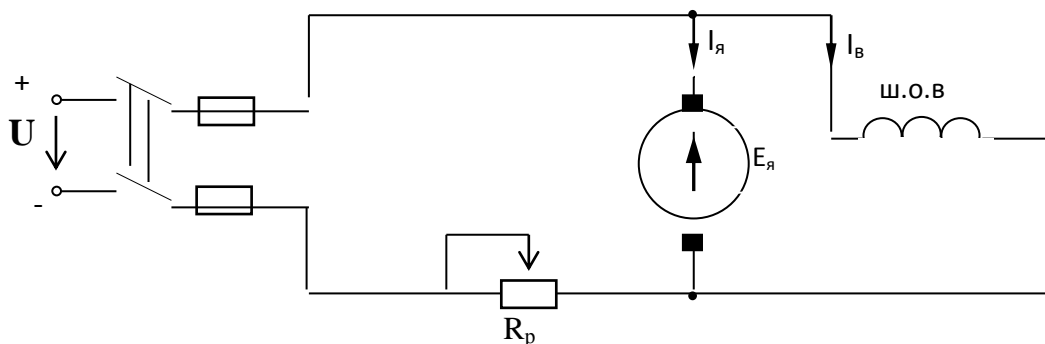


Рис.5.3 Схема включения двигателя

Таблица 5.1

**Номинальные параметры двигателя постоянного тока с
параллельным возбуждением**

Вариант	$U_{ном}, В$	$P_{ном}, кВт$	$n_{ном},$ об/мин	$\eta_{ном}, \%$	$R_{я}, Ом$	$R_{б}, Ом$
1	110	1,0	3000	77	1,2	220
2	110	1,5	3000	76	0,8	160
3	110	2,2	3000	80	0,48	110
4	110	3,2	1500	78	0,34	80
5	110	4,5	1500	80	0,23	70
6	220	6,0	3000	82,5	0,62	220
7	220	8	3000	83,6	0,44	170
8	220	11	1500	84	0,31	185
9	220	14	1500	86,5	0,29	135
10	220	19	1500	84,6	0,16	110
11	110	1	3000	77	1,2	220
12	110	1,5	3000	76	0,8	160
13	110	2,2	3000	80	0,48	110
14	110	3,2	3000	78,5	0,34	80
15	110	4,5	1500	80	0,23	70
16	220	6	1500	82,5	0,62	220
17	220	8	3000	83,5	0,44	110
18	220	11	1500	84	0,31	135
19	220	14	1500	86,5	0,21	135
20	220	19	1500	84,5	0,16	110
21	220	18	1500	85	0,15	110

22	110	1,5	3000	78	0,8	150
23	110	2,4	3000	79	0,42	110
24	110	3,4	3000	79	0,32	80
25	110	5	1500	81	0,2	70
26	110	3	3000	80	0,38	100
27	220	6,4	1500	81	0,6	220
28	220	8,6	3000	84	0,4	110
29	220	12	1500	84,4	0,3	180
30	220	25	1500	87	0,2	160
31	220	20	1500	85	0,18	120
32	220	22	3000	86	0,19	130
33	110	1,2	3000	78	1,2	220
34	110	1,6	3000	77	0,8	160
35	110	2,2	3000	80	0,48	110
36	110	3,4	1500	79	0,34	80
37	110	1,8	3000	78	0,7	160
38	220	6,2	3000	83	0,6	220
39	220	8,4	3000	84	0,4	160
40	220	14,4	1500	87	0,28	140
41	220	6	1500	80	0,58	220
42	220	8	1500	82	0,4	180
43	220	11	1500	83	0,3	180
44	220	14	1500	84	0,2	140
45	220	19	1500	85	0,18	120
46	220	18	1500	86	0,15	120

47	110	1,2	3000	78	1,2	220
48	110	1,6	3000	77	0,9	180
49	110	2,3	3000	81	0,4	80
50	220	19	1500	85	0,18	120

ГЛАВА 6. РАСЧЁТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Асинхронный двигатель трехфазного тока представляет собой электрическую машину, служащую для преобразования электрической энергии трехфазного тока в механическую.

Двигатель имеет две основные части: неподвижный статор и вращающийся ротор.

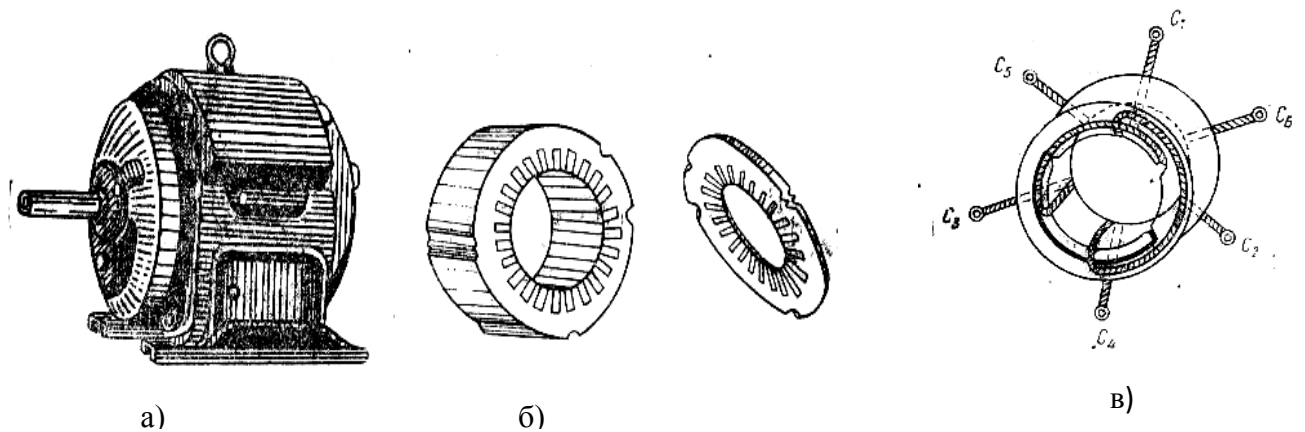


Рис. 6.1

Устройство асинхронного двигателя: а) общий вид; б) магнитный сердечник статора; в) трёхфазная обмотка статора

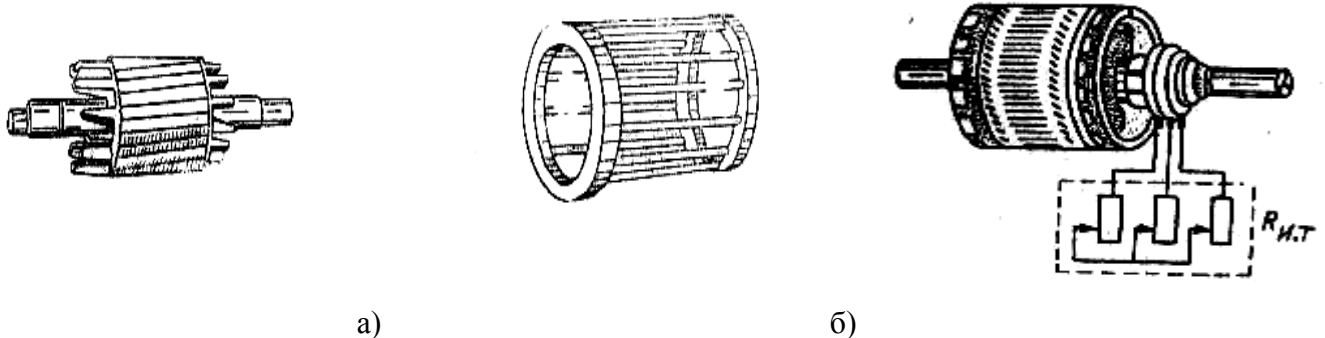


Рис. 6.2 Устройство роторов асинхронных двигателей: а) короткозамкнутый ротор; б) фазный ротор.



Рис. 6.3 Общий вид асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

В обмотке статора, включенного в сеть трехфазного тока, под действием напряжения возникает переменный ток, который создает вращающееся магнитное поле. Магнитное поле пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них (на основании закона электромагнитной индукции $L=BLV$) переменную ЭДС. Поскольку обмотка ротора замкнута, эта ЭДС вызывает в ней ток. В результате взаимодействия ротора (I_2) с магнитным потоком статора (Φ) создает вращающий момент АД ($M_{вр}$)

$$M_{вр} = C_M \cdot \Phi \cdot I_2,$$

где C_M - постоянная коэффициента зависит от зазора, геометрических размеров ротора.

Ротор вращается по направлению вращающегося магнитного поля. В АД скорость вращения ротора всегда меньше скорости магнитного поля статора, т.е. $n_1 > n_2$, поэтому такие двигатели называются асинхронными. Отставание скорости ротора от скорости магнитного поля статора называется скольжением:

$$S = (n_1 - n_2) / n_1$$

$S_{ном} = (2-4)\%$. Скорость вращения ротора на 2-4% ниже скорости вращения магнитного поля статора.

Практическое занятие №7. Расчёт электрических машин переменного тока

Пример. Построение механической характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным

Дано: Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и номинальными параметрами: мощность на валу двигателя P_{2H} ; скорость вращения ротора n_{2H} ; коэффициент мощности $\cos\varphi_{1H}$; η_H – коэффициент полезного действия подключен к трёхфазному источнику с линейным напряжением 380В. Трёхфазная обмотка статора соединена по схеме «звезда», отношение критического момента к номинальному моменту $\lambda = M_K/M_H$.

Определить:

- номинальный ток статорной обмотки $I_{фH}$;
- число пар полюсов p ;
- номинальное скольжение S_H ;
- номинальный момент на валу двигателя M_H ;
- критический момент M_K ;
- критическое скольжения S_K ;
- значения момента M , при следующих значениях скольжения $S = 0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1$;
- скорость вращения ротора n_2 .

Начертите схему подключения двигателя в сеть.

По полученным данным построить механическую характеристику двигателя $M = f(s)$ и $n_2 = f(M)$.

Решение:

1. Номинальный ток фазных обмоток статора:

$$I_{ф.н} = \frac{P_H}{\sqrt{3}U_H \cdot \cos\varphi_{1H} \cdot \eta_H} = \frac{4000}{1,7 \cdot 380 \cdot 0,89 \cdot 0,855} = 8,13 \text{ А.}$$

2. Число пар полюсов магнитного поля статора:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n_0} = \frac{3000}{1000} = 3;$$

3. Номинальное скольжение:

$$S_H = \frac{n_0 - n_{2H}}{n_0} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0,04;$$

4. Номинальный момент на валу двигателя:

$$M_H = 9550 \frac{P_{2H}}{n_{2H}} = 9550 \frac{4}{960} = 39,79 [H \cdot m]$$

5. Критический момент: $M_K = \lambda \cdot M_H = 2,2 \cdot 39,79 = 87,54 [H \cdot m]$

6. Критическое скольжение:

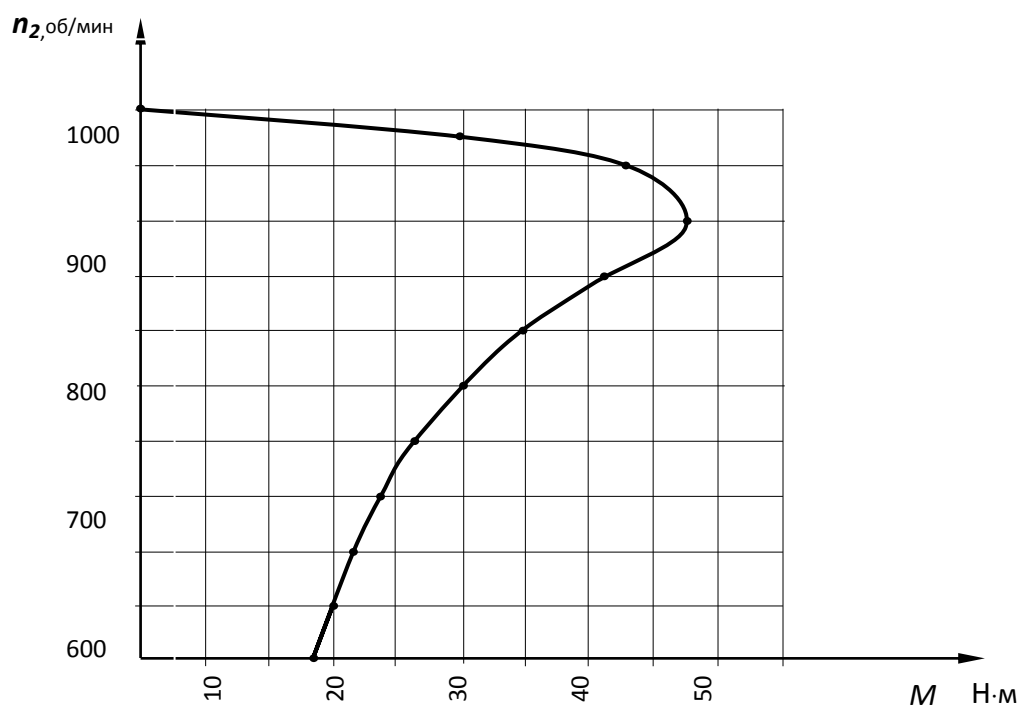
$$S_K = S_H (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,04(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,16;$$

7. Результаты расчётов, полученные с помощью выражения $n_2 = n_1 \cdot (1 - S)$ и $M = \frac{2M_K}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S}}$, записываем в таблицу 6.1.

Таблица 6.1

Расчётные данные для построения механических характеристик

S	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$n_2, \text{об/мин}$	1000	950	900	800	700	600	500	400	300	200	100	0
$M, \text{Н/м}$	0	49,8	76,7	85,4	72,7	60,4	50,8	43,6	38,1	33,7	30,2	27,3



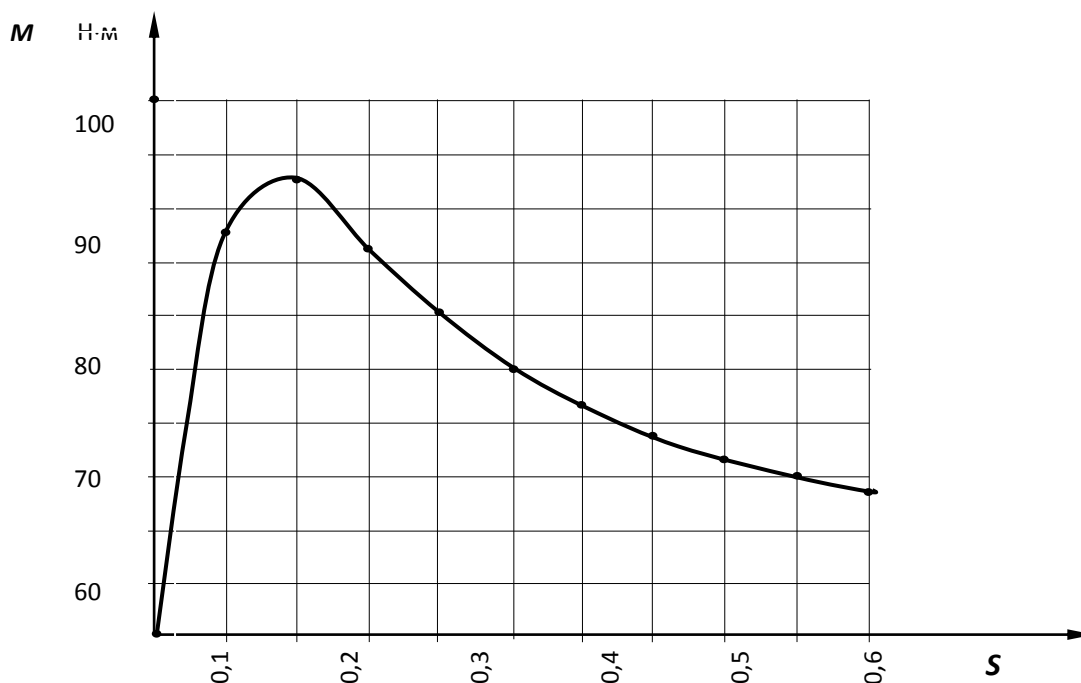


Рис. 5.4. Механические характеристики асинхронного двигателя.
Зависимости $n_2 = f(M)$ и $M = f(S)$

Строим графики $M = f(S)$ и $n_2 = f(M)$ (рис.6.4) по расчётным данным, приведённым в таблице 6.1.

Варианты заданий для самостоятельного решения

Таблица 6.2

Паспортные данные асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Варианты	Заданные значения				
	$P_{2ном}$ кВт	$n_{2ном}$ об/мин	$\eta_{ном}$ %	$\cos\varphi_{ном}$	λ
0	40	1440	90,0	0,84	2,0
1	55	1440	90,5	0,84	2,0
2	75	1450	90,5	0,85	2,0
3	100	1450	90,5	0,85	2,0
4	30	960	89,0	0,84	1,8
5	40	960	89,0	0,85	1,8

6	55	960	89,0	0,86	1,8
7	75	960	90,5	0,86	1,8
8	22	720	87,5	0,79	1,7
9	30	720	87,5	0,79	1,7
10	40	720	87,5	0,81	1,7
11	55	720	90,5	0,081	1,7
12	10	1420	85,0	0,82	2,0
13	7,5	960	84,0	0,82	1,8
14	10	960	85,0	0,83	1,8
15	5,5	710	82,0	0,72	1,7
16	2,2	875	64,0	0,72	2,3
17	3,5	910	70,5	0,73	2,5
18	5,0	940	74,5	0,68	2,9
19	7,5	945	78,5	0,69	2,8
20	11,0	953	82,5	0,71	3,1
21	7,5	720	77,5	0,69	2,6
22	11,0	720	81,0	0,70	2,9
23	16,0	710	82,5	0,74	3,0
24	22,0	710	84,5	0,67	3,0
25	30,6	720	86,0	0,71	3,0
26	0,8	1440	0,78	0,86	2,2
27	0,1	1440	0,795	0,87	2,2
28	1,5	1450	0,805	0,88	2,2
29	2,2	1450	0,83	0,89	2,2
30	3,0	960	0,845	0,89	2,2

31	4,0	960	0,855	0,89	2,2
32	5,5	960	0,86	0,89	2,2
33	7,5	960	0,87	0,89	2,2
34	10	720	0,88	0,89	2,2
35	13	720	0,88	0,89	2,2
36	17	720	0,88	0,90	2,2
37	22	720	0,88	0,90	2,3
38	30	1420	0,89	0,90	2,2
39	40	960	0,89	0,91	2,2
40	55	960	0,90	0,92	2,2
41	75	710	0,90	0,92	2,2
42	100	875	0,915	0,92	2,2
43	10	910	0,885	0,87	2,0
44	13	940	0,885	0,89	2,0
45	17	945	0,89	0,89	2,0
46	22	953	0,90	0,90	2,0
47	30	720	0,91	0,91	2,0
48	40	720	0,925	0,92	2,0
49	55	710	0,925	0,92	2,0
50	75	710	0,925	0,92	2,0

ГЛАВА 7. РАСЧЁТ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Производство и распределение электрической энергии в основном осуществляются на переменном токе вследствие простоты трансформации напряжения. Однако значительная

часть производимой электрической энергии (30-35%) используется на постоянном токе, в том числе и для передачи на расстояния.

Устройство, которое преобразует переменный ток в постоянный, называется выпрямителем.

Выпрямитель можно представить в виде структурной схемы (рис. 7.1), в которую входят: силовой трансформатор (СТ), вентильный блок (ВБ), фильтрующее устройство (ФУ), цепь нагрузки (Н).

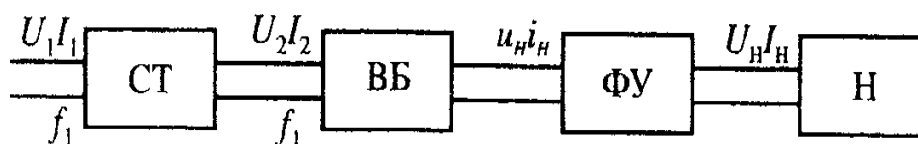


Рис. 7.1. Структурная схема выпрямителя.

Силовой трансформатор служит для согласования входного и выходного напряжений выпрямителя.

Трансформатор позволяет одновременно гальванически развязать питающую сеть U_1, I_1 с частотой f_1 , и цепь нагрузки с U_n, I_n (или U_d, I_d).

При расчете выпрямителя большое значение имеет также **коэффициент использования трансформатора по мощности**, который определяется как:

$$K_a = \frac{P_d}{S_{\text{габ}}} = \frac{U_d I_d}{(U_1 I_1 + U_2 I_2)},$$

где U_d, I_d – средние значения выпрямленного напряжения и тока, $U_1 I_1$ – действующие значения первичного напряжения и тока, $U_2 I_2$ – действующие значения вторичного напряжения и тока.

Вентильный блок выпрямляет переменный ток, подключая вторичное напряжение соответствующей фазы трансформатора к цепи постоянного тока. В вентильном блоке используются, как правило, полупроводниковые диоды или сборки на их основе. На выходе вентильного блока получают постоянное напряжение с высоким уровнем пульсаций, определяемым только числом фаз питающей сети и выбранной схемой выпрямления.

Фильтрующее устройство обеспечивает требуемый уровень пульсаций выпрямленного тока в цепи нагрузки. В качестве ФУ используются последовательно включаемые резистор или сглаживающий дроссель и параллельно включаемые конденсаторы.

Полупроводниковые выпрямители можно классифицировать по следующим признакам:

- 1) по выходной мощности (маломощные - до 600 Вт, средней мощности - до 100 кВт, и большой мощности - более 100 кВт);
- 2) по числу фаз источника (однофазные, многофазные);
- 3) по пульсности (p) выпрямителя, определяемой числом полупериодов протекания тока во вторичной обмотке трансформатора за полный период напряжения U_1 ;
- 4) по числу знакопостоянных импульсов в кривой выпрямленного напряжения U_2 за период питающего напряжения:
 - *однополупериодные*;
 - *двухполупериодные*;
 - *m -полупериодные*.

Выпрямители могут быть построены на управляемых вентилях (тиристорах, транзисторах) – управляемые выпрямители и на неуправляемых вентилях (диодах) – неуправляемые выпрямители.

Практическое занятие №8. Расчёт полупроводниковых выпрямителей

Пример. Выбор диода для схем включения однополупериодного выпрямителя

Дано: мощность потребителя $P=250$ Вт;
напряжение потребителя $U=100$ В.

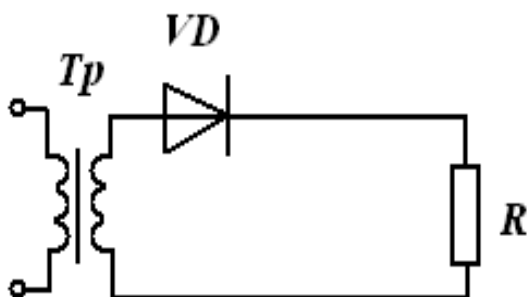


Рис. 7. 2 Однополупериодная схема выпрямления

Для однополупериодного выпрямителя необходимо выбрать диоды по данным.

Решение:

Полупроводниковые диоды обладают односторонней проводимостью электрического тока и применяются в качестве электрических вентилях в выпрямителях.

1. Определим ток потребителя

$$I = P/U = 250/100 = 2,5 \text{ A}$$

2. Найдем напряжение на диоде в закрытом состоянии (обратное)

$$U_o = \pi U = 3,14 * 100 = 314 \text{ B.}$$

3. По расчётным данным подберем диод из таблицы 7.2 [9].

Выбираем диод Д232, у которого $I_{доп} = 10\text{A} > I$; $U_{обр} = 400\text{B} > U_o$.

Варианты для самостоятельного решения приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1

Параметры расчётной схемы

Номер варианта	U, В	P, Вт
01	100	1000
02	50	500
03	100	250
04	100	750
05	20	100
06	100	50
07	100	25
08	100	20
09	100	100

10	100	200
11	127	1000
12	110	50
13	100	25
14	50	75
15	127	100
16	100	50
17	100	25
18	50	20
19	50	100
20	110	200
21	110	1000
22	20	500
23	100	250
24	100	750
25	50	100
26	100	50
27	100	1000
28	20	500
29	100	250
30	100	750
31	100	100
32	100	50
33	100	25
34	127	20
35	110	100
36	100	200
37	50	1000
38	127	500
39	100	250
40	100	750
41	50	100
42	50	1000
43	110	500
44	110	250
45	20	750
46	100	100
47	100	50

48	50	25
49	100	20
50	100	100

Таблица 7.2

Типы и параметры полупроводникового диода

Тип диода	$I_{\text{доп}}, \text{А}$	$U_{\text{обр}}, \text{В}$
Д205	0,4	400
Д207	0,1	200
Д209	0,1	400
Д210	0,1	500
Д211	0,1	600
Д214	5	100
Д214А	10	100
Д214Б	2	100
Д215	5	200
Д215А	10	200
Д215Б	2	200
Д233	10	500
Д233Б	5	500
Д234Б	5	600
Д242	5	100
Д242А	10	100
Д242Б	2	100
Д244А	10	50

Д244Б	2	50
Д302	1	200
Д243	5	200
Д243А	10	200
Д243Б	2	200
Д217	0,1	800
Д218	0.1	1000
Д221	0,4	400
Д222	0,4	600
Д224	5	50
Д224А	10	50
Д224Б	2	50
Д226	0,3	400
Д226А	0,3	300
Д231	10	300
Д231Б	5	300
Д232	10	400
Д232Б	5	400
Д244	5	50
Д303	3	150
Д304	3	100
Д305	6	50

Пример: Расчёт однофазного двухполупериодного полупроводникового выпрямителя

Дано: Полупроводниковый выпрямитель подключён к источнику напряжения прямоугольной формы (рис.7.3.).

а) значение выпрямленного напряжения $U_0 = 115 \text{ В}$;

б) значение выпрямленного тока $I_0 = 5 \text{ А}$;

в) коэффициент пульсации выпрямленного напряжения:

$$a_{\Pi_1} = \frac{E_{\sim 1}}{E_0} = 0,01 (1\%);$$

здесь $E_{\sim 1}$ - величина э.д.с. первой гармоники на выходе фильтра.

г) среднее значения стабилизированного напряжения:

$$U_{\text{уп1}} = 115 \text{ В};$$

д) величина угла изменения импульсного напряжения $2\alpha^\circ$:

$$2\alpha^\circ = 0 \div 50^\circ;$$

е) частота переменного напряжения $f = 1000 \text{ Гц}$;

ж) температура окружающей среды: $t_0 = -20 \div 60^\circ \text{ С}$.

Определить выходные параметры выпрямителя.

Решение.

На основе вышеприведённых значений выбираем схему двухполупериодного выпрямителя (рис.7.3). Величина пульсации $a_{\Pi_1} = 1\%$, требуются установить фильтр для поддержания значения напряжения на выходе выпрямителя 115 В .

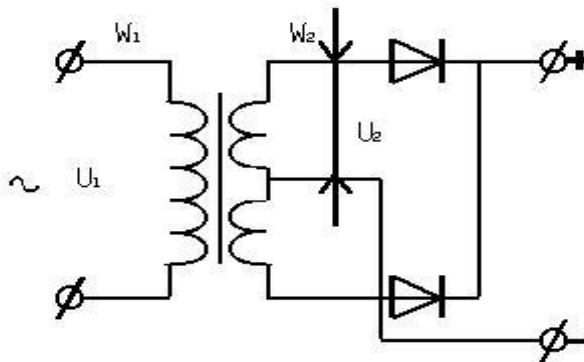


Рис. 7.3. Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя

Решение:

Определим параметры диодов выбранной схемы:

1. Обратное максимальное значение напряжения на диоде:

$$U_{обр} \approx 2\beta E_0 = 2 \cdot 1,4 \cdot 15 = 42 \text{ В},$$

здесь $\alpha = 0$, при $\beta = 1$ и $\alpha = 25^\circ$ при $\beta = 1,4$.

2. Среднее значение тока, протекающего через диод:

$$I_{од} = \frac{I_0}{2} = \frac{5}{2} = 2,5 \text{ А}.$$

3. Амплитудное значение тока, протекающего через диод:

$$I_m = I_0 = 5 \text{ А}.$$

4. На основе значений, определённых выше выбираем диод типа Д 214 [9].

Диод имеет следующие параметры:

$$I_{обд} = 5 \text{ А} > I_{об}; \quad U_{обд} = 100 \text{ В} > U_{об};$$

$$\Delta E_B \approx 1 \text{ В}; \quad f_{мд} = 1 \text{ кГц} = f.$$

Выбираем трансформатор **Тр** [9]. Тип трансформатора: Броневой.

Параметры трансформатора:

$$S = 1 \text{ кВт}; \quad B_m = 0,8 \text{ Тл}.$$

Определяем приведенное сопротивление половины вторичной обмотки трансформатора – w_2 :

$$r_{mp} = k_r \frac{E_0}{I_0 f B_m} \sqrt[4]{\frac{sfB_m}{E_0 I_0}} = 6,6 \frac{15}{5 \cdot 10^3 \cdot 0,8} \sqrt[4]{\frac{1 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{15 \cdot 5}} \approx 0,05 [Ом],$$

где k_r – коэффициент схемы выпрямителя, определяемый из таблицы 7.3.

Таблица 7.3

Коэффициенты схем выпрямителей

№	Схемы выпрямителя	k_r
1.	Однополупериодная	5,3
2.	Двухполупериодная	6,6
3.	Мостовая	4,9

Определяем параметры фильтра:

1) минимальная индуктивность фильтра дросселя:

$$L_{др.мин} = \frac{E_0}{f \cdot I_0} M_{II} = \frac{15}{10^3 \cdot 5} 0,11 = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

Здесь M_n – величина вспомогательного коэффициента, определяется из графика (рис.7.2) $\alpha = 25^0$ и $m=2$.

Выбираем из [9] дроссель с параметром $L_{др.мин} = 0,33 \cdot 10^{-3} [Гн]$:

$$L_{др} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}; \quad I_0 = 5 \text{ А}; \quad r_{др} = 0,15 \text{ Ом};$$

2) определяем среднее значение Э.Д.С. фазы вторичной обмотки:

$$U_{ур2x} = \frac{2}{m} E_0 + I_0 r_{тр} + \Delta E_{всх} + I_0 r_{др} = \frac{2}{2} 15 + 5 \cdot 0,05 + 1 + 5 \cdot 0,15 = 17 \text{ В};$$

3) величина обратного напряжения диода:

$$U_{обр} = 2U_{m2x} = 2\beta\beta_{cp2x} = 2 \cdot 1,4 \cdot 17 \approx 48 \text{ В} < U_{обрД};$$

4) величина эффективного значения тока вторичной обмотки трансформатора при $\beta=1$:

$$I_2 = \frac{I_0}{2} \sqrt{\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{5}{\sqrt{2}} = 3,5\text{A};$$

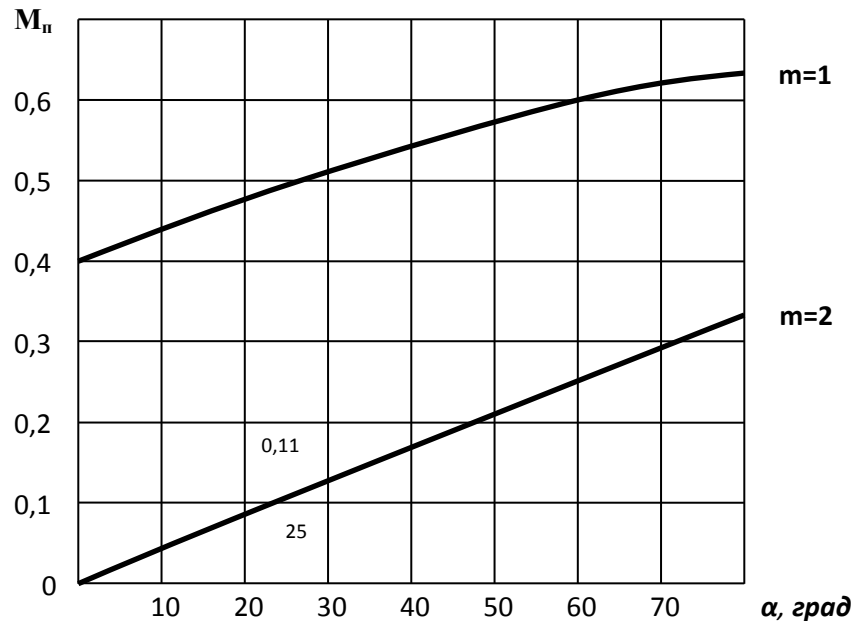


Рис.7.4 График зависимости вспомогательного коэффициента M_n от угла α

5) эффективное значение тока первичной обмотки трансформатора при $\beta=1$:

$$I_1 = \frac{nI_0}{\sqrt{\beta}} \approx \frac{U_{cp2x}}{U_{cp1}} I_0 = \frac{17}{115} \cdot 5 = 0,74\text{A};$$

6) коэффициент пульсации на входе фильтра (из графика, приведенного на рис.6.5) при $\alpha = 25^\circ$, $m=2$ и $k=1$

$$a_{\Pi_0} = 0,7(70\%);$$

7) величина коэффициента сглаживающего фильтра:

$$q_{\Pi} = \frac{a_{\Pi 0,1}}{a_{\Pi 1,1}} = \frac{0,7}{0,01} = 70;$$

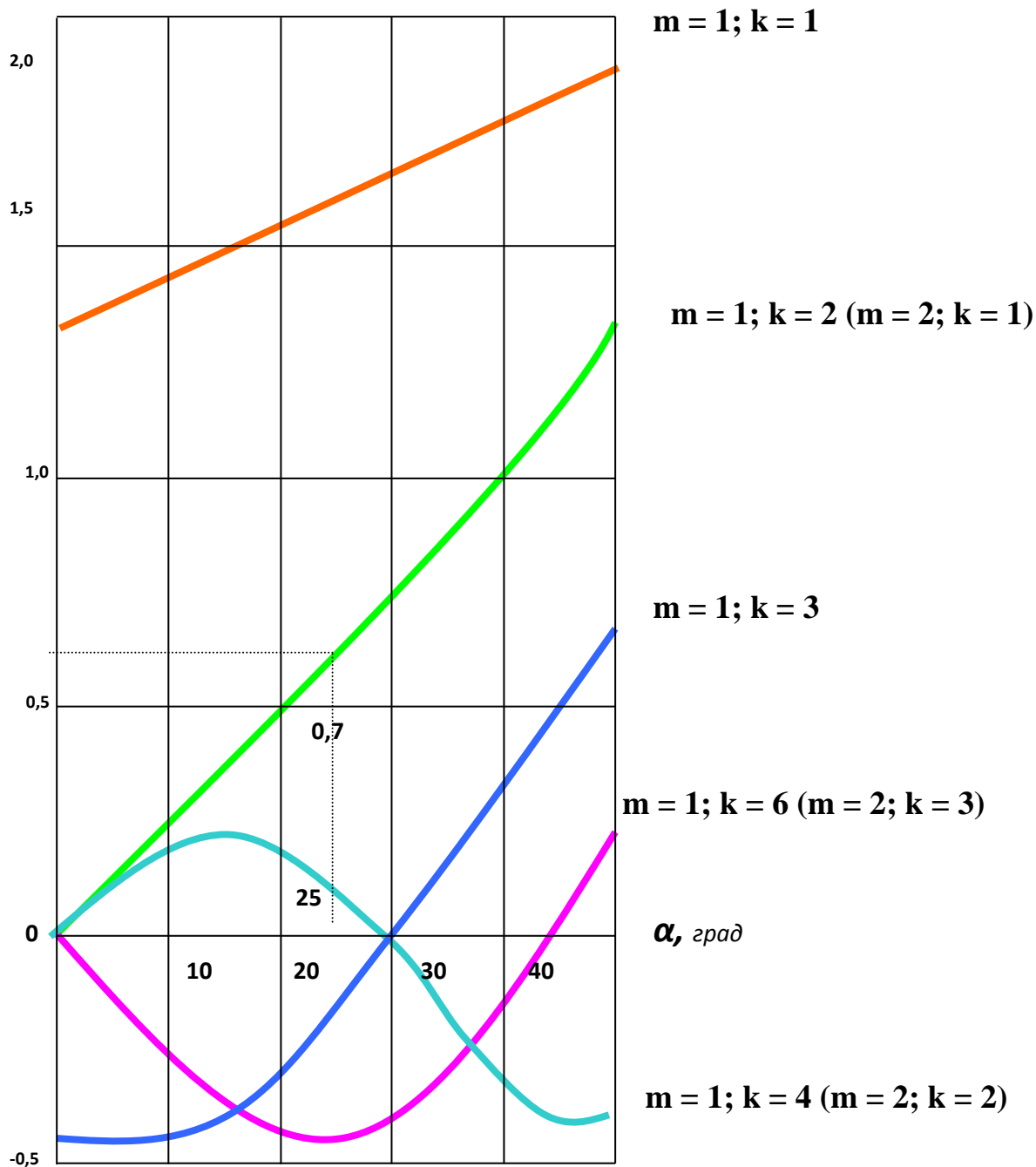


Рис. 7.5 Графики зависимости коэффициента пульсации относительно угла α

8) величина ёмкости сглаживающего фильтра:

$$C_{\phi} \geq \frac{q_{II} \cdot 10^6}{m^2 4\pi^2 f^2 L_{\partial p}} = \frac{70 \cdot 10^6}{2^2 \cdot 4\pi^2 \cdot 10^6 \cdot 10^{-3}} = 440 \text{ мкФ}.$$

С учетом величины низкой температуры (-20°C) и пульсации высокой частоты - (2 кГц) ёмкость фильтра должна быть равна:

$$C = 3 \cdot 440 \approx 1400 \text{ мкФ.}$$

Рабочее напряжение ёмкости не должно быть меньше:

$$U_{m2x} = \beta U_{cp2x} = 1,4 \cdot 17 = 24 \text{ В.}$$

Выбираем рабочее напряжение с запасом 50В, для сглаживающего фильтра выбираем конденсатор типа ЭТО –2.

Литература

1. Каримов А.С., Ибодуллаев М., Абдуллаев Б. Назарий электротехника. 1 қисм. Дарслик. Т.: Фан ва технологиялар, 2017. - 296 б.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник для вузов.-М.: Высшая школа, 2006. - 701 с.
3. Герасимов В.Г., Зайдель Х.Э., Коген-Далин В.В. и др. Сборник задач по электротехнике и электронике. Учебное пособие для неэлектротехнических спец. вузов.- М.: Высшая школа, 2010.-262 с.
4. Ермуратский П.В., Косякин А.А., Листвин В.С. и др. Справочное пособие по электротехнике и основам электроники. Учебное пособие для неэлектротехнич. спец. вузов. М.: Высшая школа, 2006. – 248 с.
5. Alimxodjayev K.T., Abdullayev B., Abidov K.G. Nazariy elektrtexnika. 1, 2- qism. Darslik.–Т.:Fan va texnologiya,2018.-288 b.
6. Amirov S.F., Yoqubov M.S., Jabborov N.G. Elektrotexnikaning nazariy asoslari. I-III qismlar. Т.: О’qituvchi, 2007. - 426 b.
7. John Bird. “Electrical and Electronic Principles and Technology” LONDON AND NEW YORK, 2014. - 455 p.
8. Усольцев А.А. Общая электротехника: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 301 с.
9. Горюнов Н. Н., Клейман А. Ю., Комков Н.Н. и др. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам 5- изд.-М.: Энергия, 2011.-744 с.
10. Полещук В. И. Задачник по электротехнике и электронике, М.: Издательский дом «Академия», 2009. – 238 с.
11. Баюков А. В., Гитцевич А. Б., Зайцев А. А. и др. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 2010. - 744 с.
12. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники. 2-е изд. - М.: Высшая школа, 2008, -752 с.

13.Бурхонходжаев О.М., Абдураимов Э.Х., Идрисходжаева М.У. Методические указания к выполнению расчетно-графических работ по дисциплине «Электротехника и электроника» – Ташкент: ТашГТУ, 2019.

14.Общая электротехника. Электронный учебник.
http://dvoika.net/education/matusko/contents_m.html

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Расчет электрических цепей постоянного тока.....	4
Практическое занятие №1. Расчёт простейших электрических цепей постоянного тока.....	11
Практическое занятие №2. Расчёт сложных электрических цепей постоянного тока.....	15
Глава 2. Расчет однофазных цепей переменного тока.....	23
Практическое занятие №3. Расчет электрических цепей синусоидального тока.....	26
Глава 3. Расчёт электрических цепей трёхфазного переменного тока.....	38
Практическое занятие №4. Расчёт электрических цепей трёхфазного переменного тока.....	40
Глава 4. Расчёт трансформатора.....	62
Практическое занятие №5. Расчёт трансформаторов.....	64
Глава 5. Электрических машин постоянного тока.....	73
Практическое занятие №6. Построение механической характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения по паспортным данным.....	75
Глава 6. Расчёт асинхронного двигателя.....	80
Практическое занятие №7. Расчёт электрических машин переменного тока.....	82
Глава 7. Расчёт полупроводниковых выпрямителя.....	87
Практическое занятие №8. Расчёт полупроводниковых выпрямителей.....	89
Литература.....	99

Редактор Ахметжанова Г.М.