

## ВВЕДЕНИЕ

Электротехника в широком понимании – это наука, изучающая способы использования электрических и магнитных явлений для практических целей. Электротехника охватывает большой комплекс вопросов и разделена на ряд областей.

Одной из важнейших областей электротехники является электроэнергетика, которая рассматривает вопросы производства электрической энергии (из других видов энергии), передачи энергии на дальние расстояния, распределение ее между потребителями и преобразование электрической энергии в другие виды энергии – механическую, тепловую, химическую и т. д.

На основе электрификации все шире внедряется комплексная механизация и автоматизация производственных процессов. Интенсивно развивается электротехнология – электротермические и электролитические способы получения и обработки металлов. Электроэнергия используется для электросварки, закалки стали токами высокой частоты, сушки древесины и т. д.

Обширное применение электротехники во всех отраслях народного хозяйства настоятельно требует знания молодыми работниками основных вопросов данной науки.

### СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савилов, Г. В. Электротехника и электроника: электронный учебник / Г. В. Савилов.– Электрон. текстовые дан. – М.: КНОРУС, 2010.
2. Касаткин, А. С. Электротехника: учебник / А. С. Касаткин, М. В. Немцов.– 9-е изд., испр. – М.: Академия, 2005. – 553 с.
3. Электротехника и электроника. Теория электрических цепей: курс лекций / К. Л. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2020. – 86 с.
4. Электротехника и электроника. Трансформаторы и электрические машины: курс лекций / К. Л. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2022. – 126 с.
5. Рекус, Г. Г. Сборник задач по электротехнике и основам электроники: учеб. пособие для неэлектротех. спец. вузов / Г. Г. Рекус, А. И. Белоусов; ред. Л. В. Честная. – М.: Высш. шк., 1991. – 416 с.
6. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник / Л. А. Бессонов.– 9-е изд., перераб. и доп.– М.: Высш. шк., 1996. – 638 с.
7. Китунович, Ф. Г. Электротехника / Ф. Г. Китунович. – Минск: Выш. шк., 1991.– 430 с.

## **ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ**

При выполнении практической работы необходимо соблюдать следующие правила:

1. В работе должно быть приведено условие задачи соответствующего варианта.

2. Выполнение задания должно сопровождаться краткими объяснениями, необходимыми обоснованиями и подробными вычислениями.

3. Задачу следует решить сначала в общем виде (формулы в буквенных выражениях) и только затем, после необходимых преобразований, подставлять соответствующие числовые значения.

4. При вычислении каждого значения нужно пояснить словами, какая величина определяется.

5. Размерность всех заданных в условиях задач величин и полученных результатов необходимо указать в соответствии с Международной системой единиц.

6. Электрические схемы должны быть вычерчены согласно установленным правилам (ГОСТ 2.702-75; 2.705-70; 2.722-68; 2.723-74; 2.728-74; 2.730-73; 2.710-81 «Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах»).

7. Графический материал желательно выполнять на миллиметровой бумаге.

8. Отчет по работе должен быть написан разборчивым почерком с ясным изображением букв и цифр текста, формул и числовых выкладок.

Чтобы получить полное представление по рассматриваемому вопросу, студент должен изучить соответствующую литературу, а также решить упражнения и задачи, приведенные в учебниках.

# Практическая работа № 1. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Цели работы:** 1. Изучить и научиться применять законы Ома и Кирхгофа при расчете электрических цепей постоянного тока.  
2. Получить практические навыки расчета электрических цепей постоянного тока.

## 1.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В сеть с постоянным напряжением  $U$  и током  $I$  включены резисторы (рис. 1.1–1.10). Данные для расчета заданы в таблице, в которой указаны значения напряжения или тока и активных сопротивлений.

**Требуется:** определить показания измерительных приборов, включенных в цепь: амперметра, вольтметра и ваттметра.

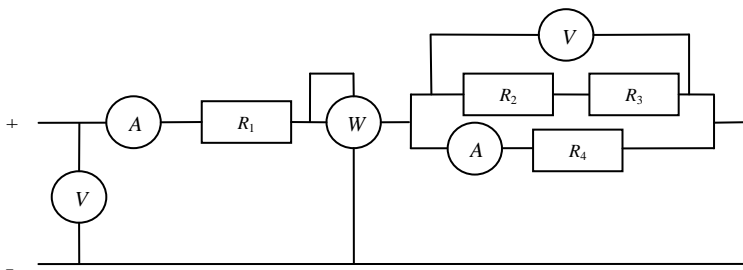


Рис. 1.1. Схема № 1

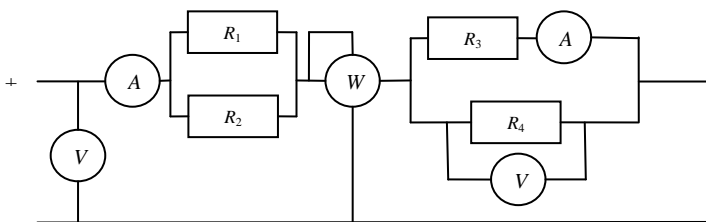


Рис. 1.2. Схема № 2

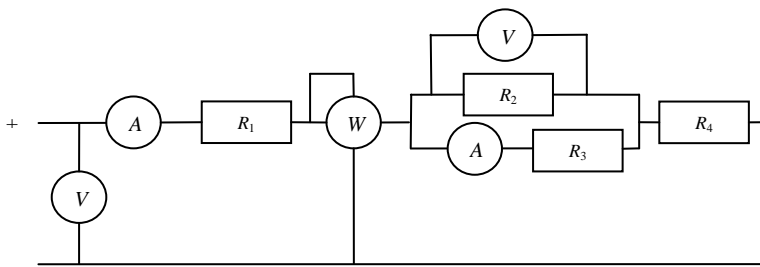


Рис. 1.3. Схема № 3

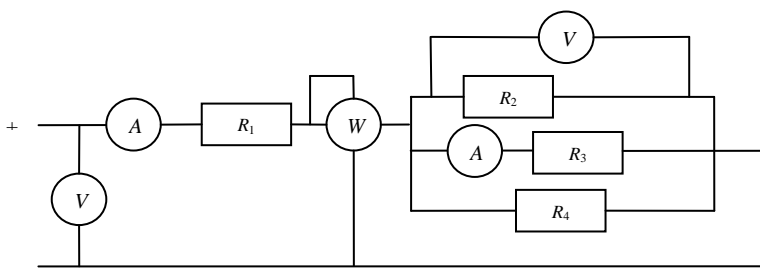


Рис. 1.4. Схема № 4

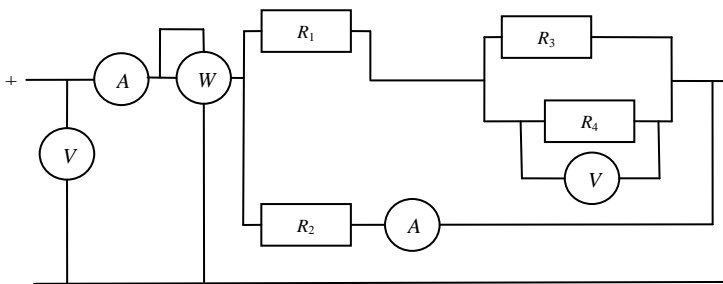


Рис. 1.5. Схема № 5

Таблица 1.1. Исходные данные

Варианты		Данные для расчета					
Номер схемы	Строка	<i>U</i>	<i>I</i>	<i>R</i> <sub>1</sub>	<i>R</i> <sub>2</sub>	<i>R</i> <sub>3</sub>	<i>R</i> <sub>4</sub>
		В	А	Ом	Ом	Ом	Ом
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	–	6	8	20	16	18
	2	125	–	28	60	120	120
	3	–	7,5	6	110	100	15
	4	160	–	24	140	60	50
	5	180	–	25	120	180	60
	6	–	5	16	25	35	40
	7	–	4,5	34	28	20	24
	8	240	–	16	100	140	60
	9	–	9	10	40	20	30
	10	200	–	16	25	35	40
2	1	–	3	36	18	45	30
	2	130	–	100	25	10	15
	3	–	2	30	45	300	75
	4	180	–	24	12	30	20
	5	–	3	300	60	60	30
	6	234	–	24	36	240	60
	7	–	6	60	40	48	24
	8	260	–	400	100	40	60
	9	350	–	40	120	100	150
	10	–	5	20	30	200	50
3	1	90	–	8	40	60	4
	2	–	4	10	15	10	14
	3	–	2	20	45	30	40
	4	220	–	12	40	60	8
	5	195	–	14	60	30	18
	6	–	2,5	8	150	100	12
	7	–	3	10	24	48	14
	8	160	–	16	50	200	8
	9	–	6	12	24	12	10
	10	100	–	3	20	30	5
4	1	60	–	3,2	12	40	10
	2	–	4,5	4	60	24	240
	3	120	–	8	200	50	60
	4	–	7,5	5,6	40	60	36
	5	–	16,5	2	30	15	40
	6	195	–	32	100	150	30
	7	200	–	4	25	100	30
	8	–	5	20	300	75	40
	9	225	–	3	36	30	45
	10	240	12	15	10	15	30

Окончание табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8
5	1	48	–	4	8	10	4
	2	75	–	12,6	10	4	6
	3	90	–	12	45	40	60
	4	–	10	24	20	10	15
	5	–	18	22	15	24	12
	6	240	–	24	48	180	120
	7	–	5	48	40	30	20
	8	–	15	10	20	100	25
	9	300	–	14	200	60	90
	10	120	5	20	40	50	200

## 1.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Задача относится к расчету однофазной цепи постоянного тока с последовательно-параллельным соединением резисторов.

В условии задачи даны численные значения активных сопротивлений  $R$  в омах (Ом), входное напряжение  $U$  в вольтах (В) или входной ток  $I$  в амперах (А) (таблица).

Эквивалентное сопротивление цепи или ее участка  $R_{\text{эКВ}}$  вычисляется по формуле

$$R_{\text{эКВ}} = \sum_{i=1}^n R_i, \quad (1.1)$$

где  $R_i$  – сопротивление последовательных элементов цепи, Ом.

Общий ток цепи  $I$  или входное напряжение  $U$  определяется исходя из закона Ома:

$$I = \frac{U}{R_{\text{эКВ}}}. \quad (1.2)$$

Для нахождения токов или напряжений на отдельных участках электрической цепи используется эквивалентное сопротивление этого участка.

При расчете разветвленных электрических цепей необходимо пользоваться 1-м законом Кирхгофа, согласно которому общий ток в цепи равен сумме токов на ветвях:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i, \quad (1.3)$$

где  $I_i$  – сила тока  $i$ -той параллельной ветви, А.

При расчете неразветвленных участков (контуров) необходимо применять 2-й закон Кирхгофа, согласно которому общее напряжение контура равно сумме напряжений на отдельных участках этого контура

$$U = \sum_{i=1}^n U_i, \quad (1.4)$$

где  $U_i$  – напряжение каждого отдельного участка контура, В.

Показание ваттметра численно равно значению активной мощности участка цепи в ваттах (Вт) или в киловаттах (кВт) и вычисляется по формуле

$$P = I^2 \sum R_k, \quad (1.5)$$

где  $\sum R_k$  – сумма активных сопротивлений участка цепи, к которому подключен ваттметр, Ом.

### 1.3. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В сеть с постоянным напряжением  $U = 40$  В включены резисторы  $R_1 = 30$  Ом;  $R_2 = 70$  Ом;  $R_3 = 19$  Ом;  $R_4 = 40$  Ом.

Требуется определить показания электроизмерительных приборов, включенных в цепь (рис. 1.6).

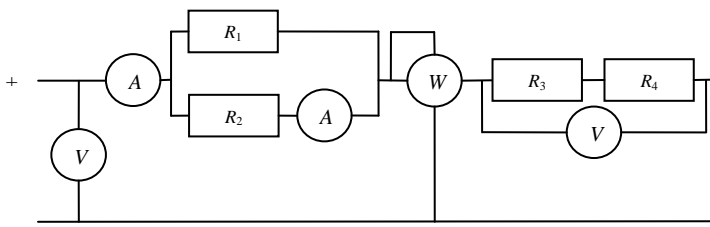


Рис. 1.6. Принципиальная электрическая схема к решению задачи

Решение:

Рассматриваемая электрическая цепь имеет смешанное соединение, поэтому для дальнейшего расчета необходимо ее преобразовать либо в цепь с последовательным соединением, либо в цепь с параллельным соединением. Выбираем преобразование в цепь с последовательным соединением.

1. Определяем эквивалентное сопротивление участка цепи  $R_{12}$ , со-

стоящего из двух параллельных ветвей, содержащих резисторы  $R_1$  и  $R_2$ :

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}.$$

Отсюда имеем

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{30 \cdot 70}{30 + 70} = 21 \text{ Ом.}$$

2. Получим эквивалентную схему цепи из резисторов  $R_{12}$ ,  $R_3$  и  $R_4$ , соединенных последовательно (рис.1.7):

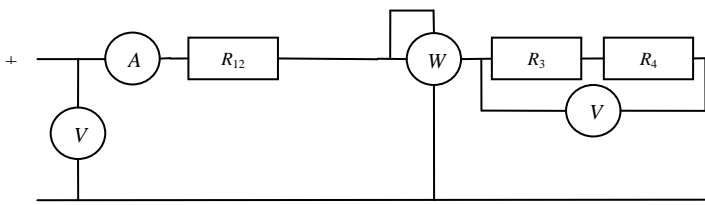


Рис. 1.7. Результат преобразования электрической цепи со смешанным соединением в цепь с последовательным соединением

Определяем полное эквивалентное сопротивление всей цепи:

$$R_{\text{эКВ}} = R_{12} + R_3 + R_4 = 21 + 19 + 40 = 80 \text{ Ом.}$$

3. Находим полный ток в цепи:

$$I = \frac{U}{R_{\text{эКВ}}} = \frac{40}{80} = 0,5 \text{ А.}$$

4. Определяем показание ваттметра:

$$P = I^2 (R_3 + R_4) = 0,5^2 \cdot (19 + 40) = 14,75 \text{ Вт.}$$

5. Вычисляем показание вольтметра на участке цепи:

$$U_{34} = I (R_3 + R_4) = 0,5 \cdot (19 + 40) = 29,5 \text{ В.}$$

6. Находим напряжение на участке цепи с параллельным соединением:

$$U_{12} = U - U_{34} = 40 - 29,5 = 10,5 \text{ В.}$$

Откуда определяем показание амперметра на параллельной ветви с резистором  $R_2$ :

$$I_2 = \frac{U_{12}}{R_2} = \frac{10,5}{70} = 0,15 \text{ А.}$$

### **Практическая работа № 2.**

## **РАСЧЕТ ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

**Цели работы:** 1. Изучить основные соотношения, возникающие в электрических цепях с последовательным соединением приемников.

2. Получить практические навыки расчета электрических цепей с последовательным соединением приемников.

### **2.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ**

В сеть с переменным синусоидальным напряжением  $U$  и током  $I$  включены последовательно резисторы, индуктивные катушки и конденсаторы (рис. 2.1–2.5). Данные для расчета заданы в таблице 2.1, в которой указаны значения напряжения или тока, активные сопротивления, индуктивности и емкости, частота питающего напряжения.

#### **Требуется:**

- 1) определить показания измерительных приборов, включенных в цепь: амперметра, вольтметра, ваттметра и фазометра;
- 2) построить векторную диаграмму напряжений;
- 3) для принципиальных электрических схем № 1, 2, определить собственную частоту колебаний  $f_0$ ;
- 4) для принципиальной электрической схемы № 3 определить значение емкости  $C$ , при которой в цепи наступит резонанс напряжений;
- 5) для принципиальных электрических схем № 4, 5 определить значение индуктивности  $L$ , при которой в цепи наступит резонанс напряжений.

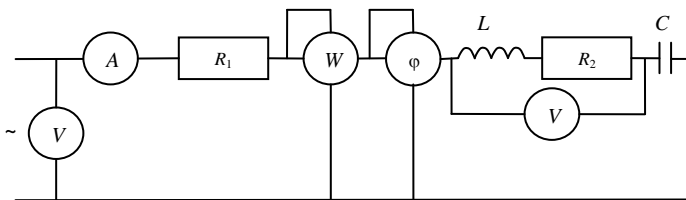


Рис. 2.1. Схема № 1

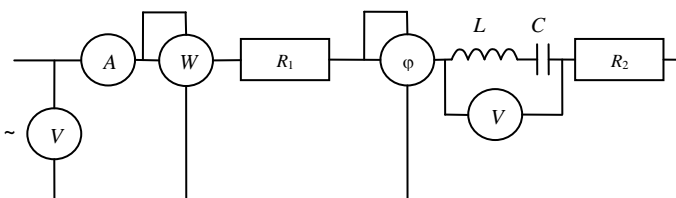


Рис. 2.2. Схема № 2

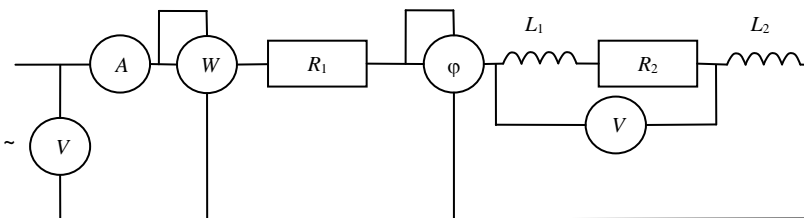


Рис. 2.3. Схема № 3

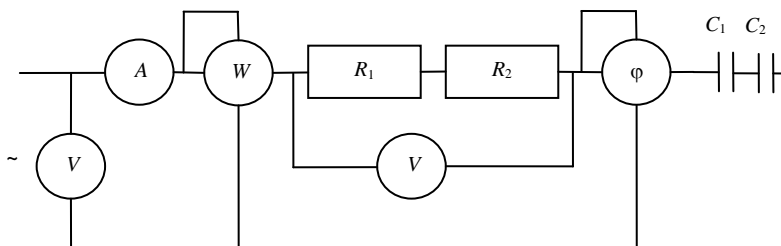


Рис. 2.4. Схема № 4

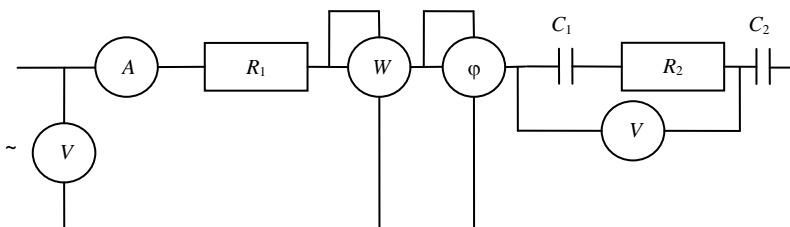


Рис. 2.5. Схема № 5

Таблица 2.1. Исходные данные

Варианты		Данные для расчета								
Номер схемы	Строка	$U$	$I$	$f$	$R_1$	$R_2$	$L_1$	$L_2$	$C_1$	$C_2$
		В	А	Гц	Ом	Ом	мГн	мГн	мкФ	мкФ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	100	–	50	10	20	100	–	200	–
	2	–	5	45	11	19	110	–	190	–
	3	110	–	40	12	18	120	–	180	–
	4	–	4,5	35	13	17	130	–	170	–
	5	120	–	30	14	16	140	–	160	–
	6	–	4	25	15	15	150	–	150	–
	7	130	–	20	16	14	160	–	140	–
	8	–	3,5	15	17	13	170	–	130	–
	9	140	–	10	18	12	180	–	120	–
	10	–	3	50	19	11	190	–	110	–
2	1	100	–	60	20	10	200	–	100	–
	2	–	2,5	55	19	11	190	–	110	–
	3	110	–	50	18	12	180	–	120	–
	4	–	2	45	17	13	170	–	130	–
	5	120	–	40	16	14	160	–	140	–
	6	–	1,5	35	15	15	150	–	150	–
	7	130	–	30	14	16	140	–	160	–
	8	–	1	25	13	17	130	–	170	–
	9	140	–	20	12	18	120	–	180	–
	10	–	0,5	15	11	19	110	–	190	–
3	1	100	–	60	15	15	90	10	–	–
	2	–	5	55	14	16	85	15	–	–
	3	110	–	50	13	17	80	20	–	–
	4	–	4,5	45	12	18	75	25	–	–
	5	120	–	40	11	19	70	30	–	–
	6	–	4	35	10	20	65	35	–	–
	7	130	–	30	9	21	60	40	–	–
	8	–	3,5	25	8	22	55	45	–	–

Окончание табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	9	140	–	20	7	23	50	50	–	–
	10	–	3	15	6	24	45	55	–	–
4	1	100	–	60	15	15	–	–	900	100
	2	–	2,5	55	16	14	–	–	850	150
	3	110	–	50	17	13	–	–	800	200
	4	–	2	45	18	12	–	–	750	250
	5	120	–	40	19	11	–	–	700	300
	6	–	1,5	35	20	10	–	–	650	350
	7	130	–	30	21	9	–	–	600	400
	8	–	1	25	22	8	–	–	550	450
	9	140	–	20	23	7	–	–	500	500
	10	–	0,5	15	24	6	–	–	450	550
5	1	100	–	60	30	2	–	–	400	600
	2	–	5	55	28	4	–	–	350	650
	3	110	–	50	26	6	–	–	300	700
	4	–	4,5	45	24	8	–	–	250	750
	5	120	–	40	22	10	–	–	200	800
	6	–	4	35	20	12	–	–	150	850
	7	130	–	30	18	14	–	–	100	900
	8	–	3,5	25	16	16	–	–	450	550
	9	140	–	20	14	18	–	–	500	500
	10	–	3	15	12	20	–	–	550	450

## 2.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Задача относится к расчету однофазной цепи переменного синусоидального тока с последовательным соединением резисторов  $R_i$ , индуктивных катушек  $X_{Lj}$  и конденсаторов  $X_{Ck}$ .

В условии задачи даны численные значения активных сопротивлений  $R$  в омах (Ом), индуктивностей катушек  $L$  в миллигенри (мГн), емкостей конденсаторов  $C$  в микрофарадах (мкФ), частота напряжения или тока  $f$  в герцах (Гц), входное напряжение  $U$  в вольтах (В) или входной ток  $I$  в амперах (А) (таблица).

Сопротивление индуктивной катушки  $X_L$  определяется по формуле

$$X_L = \omega L = 2\pi fL, \quad (2.1)$$

где  $\omega$  – угловая частота,  $\text{с}^{-1}$ ;

$f$  – промышленная частота, Гц;

$L$  – индуктивность катушки, Гн.

Сопротивление конденсатора вычисляется по формуле

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}, \quad (2.2)$$

где  $C$  – емкость конденсатора,  $\Phi$ .

**Примечание.** Чтобы получить значения реактивных сопротивлений в омах, необходимо в соответствующие формулы подставлять значения индуктивностей и емкостей соответственно в генри (Гн) и фарадах (Ф) ( $1 \text{ мГн} = 10^{-3} \text{ Гн}$ ,  $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ ).

Полное сопротивление  $Z$  последовательной цепи вычисляется по формуле

$$Z = \sqrt{(\sum R_i)^2 + (\sum X_{Li} - \sum X_{Ci})^2}, \quad (2.3)$$

где  $\sum$  – оператор, означающий суммирование;

$i$  – порядковый номер элемента.

Сила тока в цепи определяется по заданному напряжению  $U$  и полному сопротивлению  $Z$  по закону Ома:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{(\sum R_i)^2 + (\sum X_{Li} - X_{Ci})^2}}. \quad (2.4)$$

Входное напряжение определяется по соответствующей формуле

$$U = IZ = I \sqrt{(\sum R_i)^2 + (\sum X_{Li} - \sum X_{Ci})^2}. \quad (2.5)$$

Показание ваттметра численно равно значению активной мощности участка цепи в ваттах (Вт) или в киловаттах (кВт) и вычисляется по формуле

$$P = I^2 \sum R_k, \quad (2.6)$$

где  $\sum R_k$  – сумма активных сопротивлений участка цепи, к которому подключен ваттметр, Ом.

Показание фазометра определяется по формулам

$$\arccos \varphi = \frac{R_k}{Z_k}; \quad \arcsin \varphi = \frac{X_{Lk} - X_{Ck}}{Z_k}; \quad \arctan \varphi = \frac{X_{Lk} - X_{Ck}}{R_k}, \quad (2.7)$$

где  $R_k$  – активное сопротивление участка цепи, к которому подключена катушка напряжения фазометра, Ом;

$X_{Lk}$ ,  $X_{Ck}$  – реактивное сопротивление участка цепи, к которому под-

ключена катушка напряжения фазометра, Ом;

$Z_k$  – полное сопротивление данного участка, Ом.

Показание вольтметра на участке цепи вычисляется по формуле (2.5), в которой сопротивление  $Z$  заменяется сопротивлением  $Z_k$  участка цепи, к которому подключен вольтметр.

Показание амперметра численно равно значению тока  $I$  из формулы (2.4).

Собственная частота колебаний  $f_0$  вычисляется по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (2.8)$$

где  $L$  – общая индуктивность цепи, Гн;

$C$  – общая емкость цепи, Ф.

Формулы для вычисления  $L$  и  $C$  имеют вид

$$L = L_1 + L_2 + \dots + L_i; \quad (2.9)$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_i}. \quad (2.10)$$

Значение резонансной емкости или индуктивности определяется из условия резонанса напряжений для последовательной цепи:

$$\sum X_{Li} = \sum X_{Ci}. \quad (2.11)$$

Векторную диаграмму напряжений цепи нужно строить следующим образом:

1) записать векторное уравнение напряжений на основании 2-го закона Кирхгофа:

$$\bar{U} = \bar{U}_{R1} + \bar{U}_{R2} + \bar{U}_{L1} + \bar{U}_{L2} + \bar{U}_{C1} + \bar{U}_{C2}; \quad (2.12)$$

2) выбрать базовый вектор, относительно которого строят векторную диаграмму напряжений. В последовательной цепи это, как правило, вектор тока  $\bar{I}$ ;

3) учесть, что векторы  $\bar{U}_{Ri}$  совпадают по фазе с вектором тока  $\bar{I}$ , векторы  $\bar{U}_{Li}$  опережают вектор  $\bar{I}$  на  $90^\circ$ , а векторы  $\bar{U}_{Ci}$  отстают от вектора  $\bar{I}$  на  $90^\circ$ ; кроме того, стоит иметь в виду, что векторные слагаемые формулы (12) подчиняются законам переместительности и сочетательности.

### 2.3. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В сеть с переменным синусоидальным напряжением  $U = 120$  В, частотой  $f = 50$  Гц последовательно включены:  $L = 38$  Гн;  $R_1 = 5$  Ом;  $R_2 = 3$  Ом;  $C = 177$  мкФ.

Требуется определить показания электроизмерительных приборов, включенных в цепь (рис. 2.6), резонансную частоту  $f_0$ , построить векторную диаграмму напряжений.

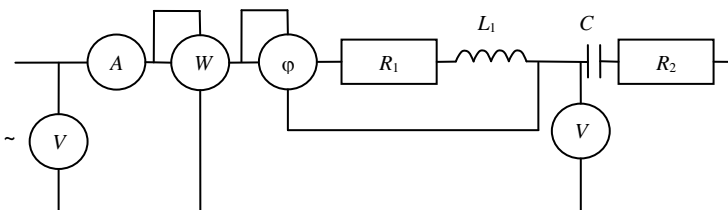


Рис. 2.6. Принципиальная электрическая схема к решению задачи

Решение:

1. Определяем сопротивление индуктивной катушки:

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 38 \cdot 10^{-3} = 11,9 \text{ Ом.}$$

2. Определяем сопротивление конденсатора:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 177 \cdot 10^{-6}} = 18 \text{ Ом.}$$

3. Находим полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(5+3)^2 + (11,9-18)^2} = 10 \text{ Ом.}$$

4. Вычисляем показание амперметра:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{120}{10} = 12 \text{ А.}$$

5. Определяем показание ваттметра:

$$P = I^2(R_1 + R_2) = 12^2 \cdot (5+3) = 1152 \text{ Вт.}$$

6. Вычисляем показание вольтметра на участке цепи:

$$U_1 = I\sqrt{R_2^2 + X_C^2} = 12 \cdot \sqrt{3^2 + 18^2} = 219 \text{ В.}$$

7. Находим показание фазометра:

$$\varphi = \arctg \frac{X_L}{R_1} = \arctg \frac{11,9}{5} = 67^\circ 21' 1''.$$

8. Определяем значение резонансной частоты:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{38 \cdot 10^{-3} \cdot 177 \cdot 10^{-6}}} = 61,4 \text{ Гц.}$$

9. Для построения векторной диаграммы выберем в качестве оси вектор силы тока  $\vec{I}$ , масштаб векторов напряжений  $\mu_U = 50 \text{ В/см}$  и вычислим напряжение на отдельных элементах цепи:

$$U_L = X_L I = 11,9 \cdot 12 = 142,8 \text{ В;}$$

$$U_{R1} = R_1 I = 5 \cdot 12 = 60 \text{ В;}$$

$$U_{R2} = R_2 I = 3 \cdot 12 = 36 \text{ В;}$$

$$U_C = X_C I = 18 \cdot 12 = 216 \text{ В.}$$

Векторная диаграмма в выбранном масштабе построена на рис. 2.7.

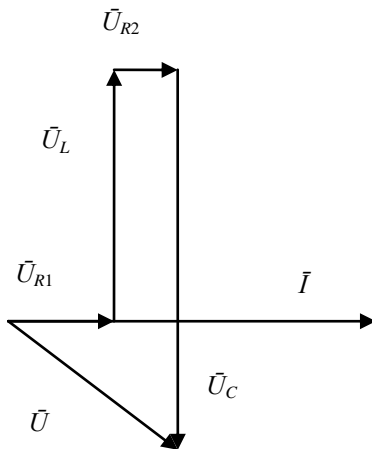


Рис. 2.7. Векторная диаграмма

Векторы напряжений на активных сопротивлениях  $\vec{U}_{R1}$  и  $\vec{U}_{R2}$  совпадают по направлению с вектором тока  $\vec{I}$ , вектор  $\vec{U}_L$  опережает, а вектор  $\vec{U}_C$  отстает от вектора тока  $\vec{I}$  на четверть периода, или  $90^\circ$ . Вектор напряжения на зажимах цепи  $\vec{U}$  равен геометрической сумме напряжений на всех ее элементах.

### Практическая работа № 3. РАСЧЕТ ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

**Цели работы:** 1. Изучить основные соотношения, возникающие в электрических цепях с параллельным соединением приемников.

2. Получить практические навыки расчета электрических цепей с параллельным соединением приемников.

#### 3.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В сеть с переменным синусоидальным напряжением  $U$  и током  $I$ , частотой  $f = 50$  Гц включены последовательно-параллельно резисторы, индуктивные катушки и конденсаторы (рис. 3.1–3.5). Данные для расчета заданы в табл. 3.1, в которой указаны значения напряжения или тока, активные, индуктивные и емкостные сопротивления.

**Требуется определить:**

1. Показания электроизмерительных приборов, включенных в цепь: амперметра, вольтметра, ваттметра и фазометра.

2. Построить векторную диаграмму токов.

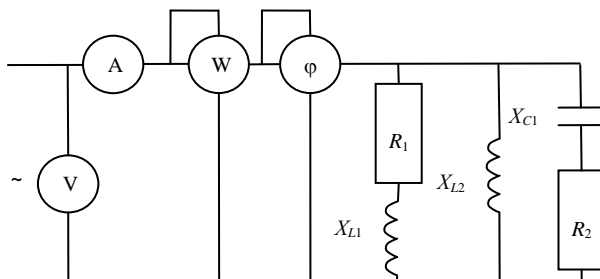


Рис. 3.1. Схема № 1

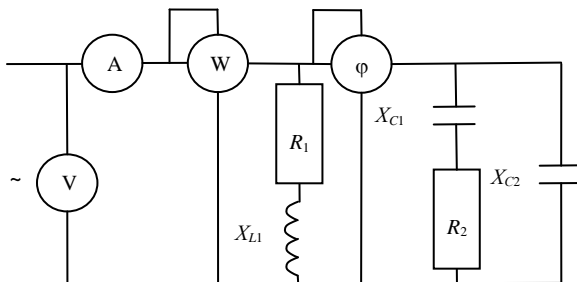


Рис. 3.2. Схема № 2

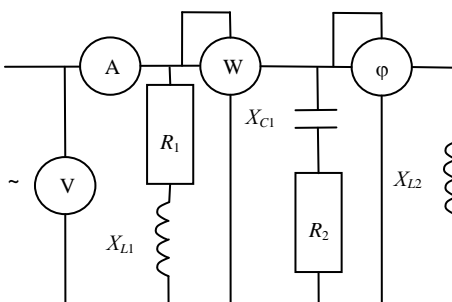


Рис. 3.3. Схема № 3

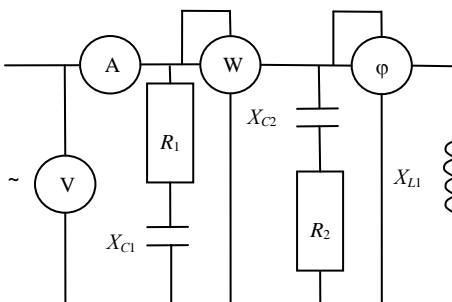


Рис. 3.4. Схема № 4

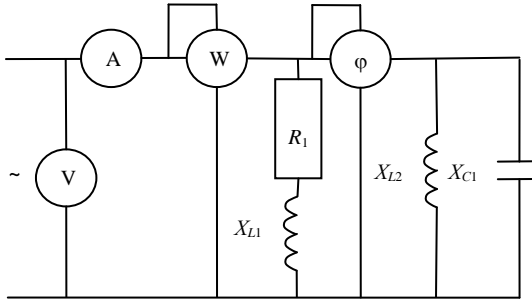


Рис. 3.5. Схема № 5

Таблица 3.1. Исходные данные

Варианты		Данные для расчета							
Номер схемы	Строка	$U$	$I$	$R_1$	$R_2$	$X_{L1}$	$X_{L2}$	$X_{C1}$	$X_{C2}$
		В	А	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	50	–	1	5	2	10	4	–
	2	–	10	2	4	4	8	6	–
	3	45	–	3	3	6	6	8	–
	4	–	12	4	5	8	4	10	–
	5	40	–	5	6	10	4	12	–
	6	–	14	6	7	12	6	14	–
	7	35	–	7	8	14	8	16	–
	8	–	16	8	7	16	10	18	–
	9	30	–	9	8	18	12	20	–
	10	–	18	10	9	20	15	22	–
2	1	50	–	10	1	5	–	5	4
	2	–	10	9	2	6	–	7	6
	3	45	–	8	3	7	–	9	8
	4	–	12	7	4	8	–	11	10
	5	40	–	6	5	9	–	13	12
	6	–	14	5	6	10	–	15	14
	7	35	–	4	7	11	–	17	16
	8	–	16	3	8	12	–	19	18
	9	30	–	2	9	10	–	21	20
	10	–	18	1	10	7	–	23	22
3	1	50	–	10	1	2	1	6	–
	2	–	18	9	2	4	5	7	–
	3	55	–	8	3	6	7	8	–
	4	–	16	7	4	8	9	10	–
	5	60	–	6	5	10	11	12	–
	6	–	14	5	6	12	13	14	–

Окончание табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	7	65	–	4	7	14	15	16	–
	8	–	12	3	8	16	17	18	–
	9	70	–	2	9	18	19	20	–
	10	–	10	5	10	20	21	22	–
4	1	75	–	20	10	8	–	8	20
	2	–	11	18	12	9	–	10	18
	3	80	–	16	14	10	–	12	16
	4	–	12	14	16	11	–	14	14
	5	85	–	12	18	12	–	16	12
	6	–	13	10	20	13	–	18	10
	7	90	–	8	22	14	–	20	8
	8	–	14	6	24	15	–	22	6
	9	95	–	4	26	16	–	24	4
	10	–	15	5	20	17	–	20	5
5	1	100	–	20	–	10	10	8	–
	2	–	14	19	–	11	9	9	–
	3	90	–	18	–	12	8	10	–
	4	–	13	17	–	13	7	11	–
	5	80	–	16	–	14	6	12	–
	6	–	12	15	–	15	5	13	–
	7	70	–	14	–	16	4	14	–
	8	–	11	13	–	15	5	15	–
	9	60	–	12	–	14	6	16	–
	10	–	10	11	–	13	7	17	–

### 3.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Задача относится к расчету однофазной цепи переменного тока с последовательно-параллельным соединением резисторов, индуктивных катушек и конденсаторов.

Даны численные значения сопротивлений  $R_1, R_2, X_{L1}, X_{L2}, X_{C1}, X_{C2}$ . Заданы также входное напряжение  $U$  или входной ток  $I$  в действующих значениях (табл. 3.1).

Данную задачу можно решать методом проводимостей, поэтому необходимо определить сначала активные проводимости ветвей  $g_i$  и всей цепи  $g$ , индуктивные проводимости ветвей  $b_{Li}$  и всей цепи  $b_L$ , емкостные проводимости ветвей  $b_{Ci}$  и всей цепи  $b_C$ , полную проводимость всей цепи  $y$ . Если рассматриваемая ветвь содержит сопротивления какого-либо вида  $R_i, X_{Li}, X_{Ci}$ , то проводимости вычисляются по формулам

$$g_i = \frac{1}{\sum R_i}; \quad b_{Li} = \frac{1}{\sum X_{Li}}; \quad b_{Ci} = \frac{1}{\sum X_{Ci}}. \quad (3.1)$$

Если рассматриваемая ветвь содержит два и более последовательно соединенных разнотипных элементов, то проводимость  $i$ -й ветви вычисляется по формулам:

$$g_i = \frac{\sum R_i}{Z_i^2}; \quad b_{Li} = \frac{\sum X_{Li}}{Z_i^2}; \quad b_{Ci} = \frac{\sum X_{Ci}}{Z_i^2}, \quad (3.2)$$

где  $Z_i$  – полное сопротивление  $i$ -й ветви.

Активная, индуктивная, емкостная проводимости всей цепи вычисляются как сумма одноименных проводимостей:

$$g = \sum g_i; \quad b_L = \sum b_{Li}; \quad b_C = \sum b_{Ci}. \quad (3.3)$$

Полная проводимость всей цепи определяется по формуле

$$y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}. \quad (3.4)$$

Входной ток  $I$  определяется по закону Ома:

$$I = Uy. \quad (3.5)$$

Входное напряжение по заданному току вычисляется из формулы (5.5).

Показание ваттметра численно равно значению активной мощности участка цепи в ваттах (Вт) или в киловаттах (кВт) и вычисляется по формуле

$$P = U^2 \cdot \sum g_k, \quad (3.6)$$

где  $\sum g_k$  – сумма активных проводимостей ветвей, к которым подключен ваттметр, См.

Показание фазометра определяется по формулам

$$\arccos \varphi = \frac{g_k}{y_k}; \quad \arcsin \varphi = \frac{b_{Lk} - b_{Ck}}{y_k}; \quad \arctan \varphi = \frac{b_{Lk} - b_{Ck}}{g_k}, \quad (3.7)$$

где  $g_k$  – активная проводимость ветвей цепи, к которым подключена катушка напряжения фазометра, См;

$b_{Lk}, b_{Ck}$  – реактивная проводимость ветвей цепи, к которым подключена катушка напряжения фазометра, См;

$y_k$  – полная проводимость данного участка, См.

Векторную диаграмму токов цепи нужно строить следующим образом:

1) записать для данной цепи векторное уравнение токов на основе 1-го закона Кирхгофа:

$$\bar{I} = \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{L1} + \bar{I}_{L2} + \bar{I}_{C1} + \bar{I}_{C2}; \quad (3.8)$$

2) выбрать базовый вектор, относительно которого строится диаграмма токов. В параллельной цепи это, как правило, вектор напряжения  $\bar{U}$ ;

3) учитывать, что векторы  $\bar{I}_{Ri}$  совпадают по фазе с вектором напряжения  $\bar{U}$ , векторы  $\bar{I}_{Li}$  отстают от вектора  $\bar{U}$  на  $90^\circ$ , а векторы  $\bar{I}_{Ci}$  опережают вектор  $\bar{U}$  на  $90^\circ$ ; кроме того, стоит иметь в виду, что векторные слагаемые формулы (8) подчиняются законам переместительности и сочетательности.

### 3.3. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В сеть с переменным синусоидальным напряжением  $U = 20$  В параллельно включены:  $R_1 = 3$  Ом,  $X_L = 4$  Ом,  $R_2 = 4$  Ом,  $X_C = 3$  Ом,  $R_3 = 4$  Ом.

Определить показания электроизмерительных приборов, включенных в цепь (рис. 5.11), и построить векторную диаграмму токов.

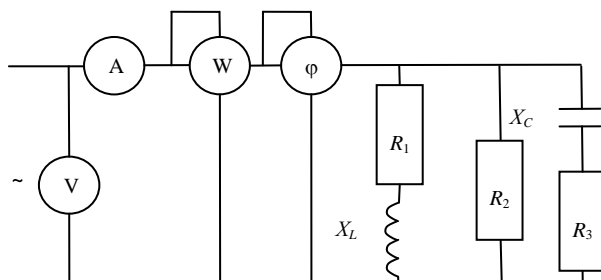


Рис. 3.6. Принципиальная электрическая схема к решению задачи

Решение:

1. Активная проводимость первой ветви:

$$g_1 = \frac{R_1}{R_1^2 + X_L^2} = \frac{3}{3^2 + 4^2} = \frac{4}{25} = 0,12 \text{ См.}$$

2. Индуктивная проводимость первой ветви:

$$b_L = \frac{R_1}{R_1^2 + X_L^2} = \frac{3}{3^2 + 4^2} = \frac{4}{25} = 0,16 \text{ См.}$$

3. Активная проводимость второй ветви:

$$g_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{4} = 0,25 \text{ См.}$$

4. Емкостная проводимость третьей ветви:

$$b_C = \frac{X_C}{R_3^2 + X_C^2} = \frac{3}{4^2 + 3^2} = \frac{3}{25} = 0,12 \text{ См.}$$

5. Активная проводимость третьей ветви:

$$g_3 = \frac{R_3}{R_3^2 + X_C^2} = \frac{4}{4^2 + 3^2} = \frac{4}{25} = 0,16 \text{ См.}$$

6. Активная проводимость всей цепи:

$$g = g_1 + g_2 + g_3 = 0,12 + 0,25 + 0,16 = 0,53 \text{ См.}$$

7. Индуктивная проводимость всей цепи:

$$b_L = 0,16 \text{ См.}$$

8. Емкостная проводимость всей цепи:

$$b_C = 0,12 \text{ См.}$$

9. Полная проводимость всей цепи:

$$y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = \sqrt{(0,53)^2 + (0,16 - 0,12)^2} = 0,532 \text{ См.}$$

10. Показание амперметра:

$$I = U \cdot (g_1 + g_2 + g_3) = 20 \cdot (0,12 + 0,25 + 0,16) = 10,63 \text{ А.}$$

11. Показание ваттметра:

$$P = U^2 \cdot (g_1 + g_2 + g_3) = 20 \cdot (0,12 + 0,25 + 0,16) = 212 \text{ Вт.}$$

12. Показание фазометра:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{b_L - b_C}{g} = \operatorname{arctg} \frac{0,16 - 0,12}{0,53} = 4^\circ 1' 9''.$$

13. Для построения векторной диаграммы выберем в качестве оси вектор напряжения  $\vec{U}$ , масштаб векторов токов  $\mu_I = 2 \text{ А/см}$  и вычислим составляющие общего тока:

$$I_{R1} = U \cdot g_1 = 20 \cdot 0,12 = 2,4 \text{ А};$$

$$I_{R2} = U \cdot g_2 = 20 \cdot 0,25 = 5 \text{ А};$$

$$I_{R3} = U \cdot g_3 = 20 \cdot 0,16 = 3,2 \text{ А};$$

$$I_{X_L} = U \cdot b_L = 20 \cdot 0,16 = 3,2 \text{ А};$$

$$I_{X_C} = U \cdot b_C = 20 \cdot 0,12 = 2,4 \text{ А}.$$

Векторная диаграмма в выбранном масштабе построена на рис. 3.7.

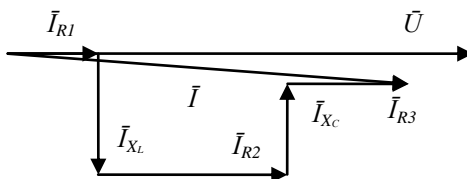


Рис. 3.7. Векторная диаграмма

Векторы  $\vec{I}_{R1}$ ,  $\vec{I}_{R2}$ ,  $\vec{I}_{R3}$  совпадают по фазе с вектором напряжения  $\vec{U}$ , вектор  $\vec{I}_{X_L}$  отстает, а вектор  $\vec{I}_{X_C}$  опережает вектор  $\vec{U}$  на четверть периода или  $90^\circ$ . Вектор общего тока  $\vec{I}$  равен геометрической сумме составляющих векторов токов.

#### Практическая работа № 4. РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ПРИЕМНИКАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, СОЕДИНЕННЫМИ СПОСОБОМ «ЗВЕЗДА»

**Цели работы:** 1. Изучение основных соотношений, возникающих в трехфазных электрических цепях с приемниками, соединенными способом «звезда».

2. Получение практических навыков расчета трехфазных электрических цепей с приемниками, соединенными способом «звезда».

## 4.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Однофазные токоприемники соединены способом «звезда» и включены в трехфазную сеть с линейным напряжением  $U_{л}$ . Тип сопротивлений, их численное значение, а также линейное напряжение заданы в табл. 4.1. Приемники фаз  $A$ ,  $B$ ,  $C$  соединены последовательно или параллельно согласно принципиальным электрическим схемам (рис. 4.1–4.5).

### Требуется:

- 1) определить силу токов  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  в фазах токоприемников  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ;
- 2) определить активную, реактивную, полную мощность каждой фазы в отдельности, а также активную, реактивную и полную мощность всех трех фаз;
- 3) построить векторную диаграмму токов и напряжений и графически определить силу тока  $I_N$  в нейтральном проводе.

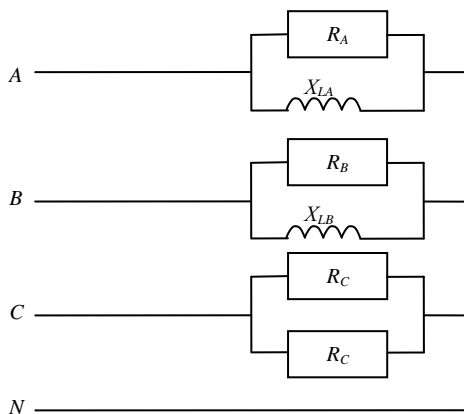


Рис. 4.1. Схема № 1

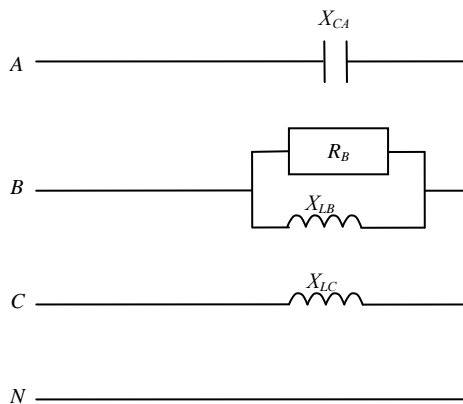


Рис. 4.2. Схема № 2

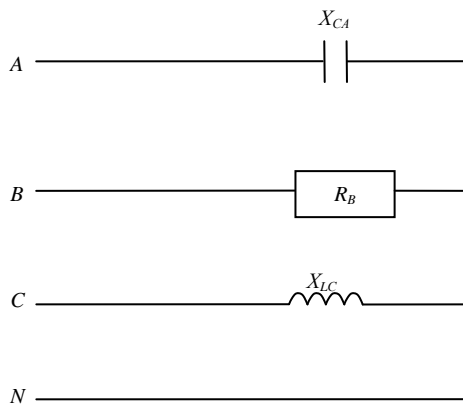


Рис. 4.3. Схема № 3

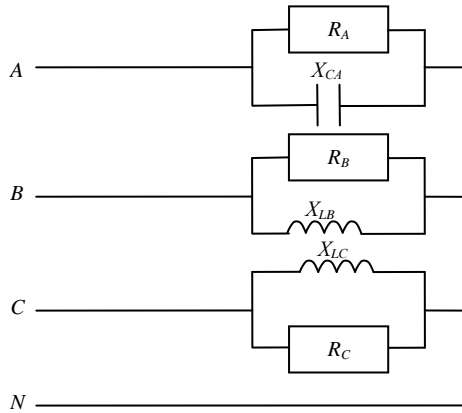


Рис. 4.4. Схема № 4

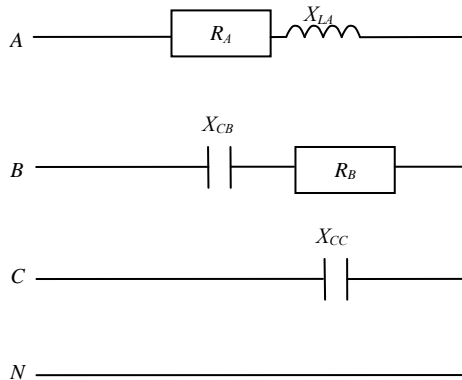


Рис. 4.5. Схема № 5

Таблица 4.1. Исходные данные

Варианты		Данные для расчета									
Номер схемы	Строка	$U_n$	$R_A$	$R_B$	$R_C$	$X_{LA}$	$X_{LB}$	$X_{LC}$	$X_{CA}$	$X_{CB}$	$X_{CC}$
		В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	150	10	30	50	20	15	—	—	—	—
	2	160	12	31	49	22	18	—	—	—	—

Продолжение табл. 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	3	170	14	32	48	24	21	–	–	–	–
	4	180	16	33	47	26	24	–	–	–	–
	5	190	18	34	46	28	27	–	–	–	–
	6	200	20	35	45	30	30	–	–	–	–
	7	210	22	36	44	32	33	–	–	–	–
	8	220	24	37	43	34	36	–	–	–	–
	9	230	26	38	42	36	39	–	–	–	–
10	240	28	39	41	38	42	–	–	–	–	
2	1	250	–	40	–	–	45	30	20	–	–
	2	260	–	41	–	–	48	31	22	–	–
	3	270	–	42	–	–	51	32	24	–	–
	4	280	–	43	–	–	54	33	26	–	–
	5	290	–	44	–	–	57	34	28	–	–
	6	300	–	45	–	–	60	35	30	–	–
	7	310	–	46	–	–	63	36	32	–	–
	8	320	–	47	–	–	66	37	34	–	–
	9	330	–	48	–	–	69	38	36	–	–
	10	340	–	49	–	–	72	39	38	–	–
3	1	350	–	50	–	–	–	40	40	–	–
	2	360	–	51	–	–	–	41	42	–	–
	3	370	–	52	–	–	–	42	44	–	–
	4	380	–	53	–	–	–	43	46	–	–
	5	390	–	54	–	–	–	44	48	–	–
	6	400	–	55	–	–	–	45	50	–	–
	7	410	–	56	–	–	–	46	52	–	–
	8	420	–	57	–	–	–	47	54	–	–
	9	430	–	58	–	–	–	48	56	–	–
	10	440	–	59	–	–	–	49	58	–	–
4	1	450	30	60	40	–	75	50	60	–	–
	2	460	32	61	39	–	78	51	62	–	–
	3	470	34	62	38	–	81	52	64	–	–
	4	480	36	63	37	–	84	53	66	–	–
	5	490	38	64	36	–	87	54	68	–	–
	6	500	40	65	35	–	90	55	70	–	–
	7	510	42	66	34	–	93	56	72	–	–
	8	520	44	67	33	–	96	57	74	–	–
	9	530	46	68	32	–	99	58	76	–	–
	10	540	48	69	31	–	102	59	78	–	–
5	1	230	7	38	–	56	–	–	–	4	20
	2	220	6	37	–	54	–	–	–	5	19
	3	210	5	36	–	52	–	–	–	6	18
	4	200	4	35	–	50	–	–	–	7	17
	5	190	3	34	–	48	–	–	–	8	16
	6	180	2	33	–	46	–	–	–	9	15

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	7	170	1	32	–	44	–	–	–	10	14
	8	160	2	31	–	42	–	–	–	11	13
	9	150	3	30	–	40	–	–	–	12	12
	10	140	4	29	–	38	–	–	–	13	11

## 4.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Задача относится к расчету трехфазных цепей переменного тока, в которых потребители соединены способом «звезда».

Дана трехфазная четырехпроводная несимметричная цепь с последовательно или параллельно соединенными элементами (активными и реактивными). Задано входное линейное напряжение.

Для определения фазного тока  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  необходимо найти полное сопротивление фазы  $Z_i$ , если элементы соединены последовательно, или полную проводимость фазы  $y_i$ , если элементы соединены параллельно. Тогда токи определяются по формулам

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A}; \quad I_B = \frac{U_B}{Z_B}; \quad I_C = \frac{U_C}{Z_C}, \quad (4.1)$$

или

$$I_A = U_A \cdot y_A; \quad I_B = U_B \cdot y_B; \quad I_C = U_C \cdot y_C, \quad (4.2)$$

где  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  – фазное напряжение цепи, В;

$Z_A$ ,  $Z_B$ ,  $Z_C$  – полные сопротивления фаз, Ом;

$y_A$ ,  $y_B$ ,  $y_C$  – полные проводимости фаз, См.

Активная мощность фазы  $P_i$  в случае последовательно или параллельно соединенных элементов вычисляется по формулам

$$P_i = I_i^2 (\sum R_i), \quad (4.3)$$

или

$$P_i = U_i^2 \cdot g_i, \quad (4.4)$$

где  $\sum R_i$  – сумма активных сопротивлений фазы, Ом;

$g_i$  – активная проводимость фазы, См.

Индуктивная мощность фазы  $Q_{Li}$  и емкостная мощность фазы  $Q_{Ci}$

определяются аналогично, только нужно подставлять вместо  $R_i$  и  $g_i$  соответственно  $X_{Li}$ ,  $X_{Ci}$ ,  $b_{Li}$ ,  $b_{Ci}$ .

Полная мощность фазы  $S_i$  вычисляется по формуле (4.5), исключая при этом ненужные слагаемые:

$$S_i = \sqrt{P_i^2 + (Q_{Li} - Q_{Ci})^2}. \quad (4.5)$$

Активная мощность всей цепи  $P$  вычисляется по формуле

$$P = \Sigma P_i. \quad (4.6)$$

Реактивная мощность всей цепи  $Q$  вычисляется по формуле

$$Q = \Sigma Q_{Li} - \Sigma Q_{Ci}. \quad (4.7)$$

Полная мощность всей цепи  $S$  определяется по формуле

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (4.8)$$

Для построения векторной диаграммы линейных и фазных напряжений и токов необходимо определить углы сдвига между фазными напряжениями и соответствующими фазными токами для всех трех фаз.

Если элементы фазы соединены последовательно, то угол  $\varphi_i$  вычисляется по формуле

$$\varphi_i = \operatorname{arctg} \frac{X_i}{R_i}, \quad (4.9)$$

где  $X_i$  – реактивное сопротивление  $i$ -й фазы, Ом;

$R_i$  – активное сопротивление  $i$ -й фазы, Ом.

Реактивное сопротивление каждой фазы вычисляется по формуле

$$X_i = \Sigma X_{Li} - \Sigma X_{Ci}. \quad (4.10)$$

Если сопротивления фазы соединены параллельно, то угол  $\varphi_i$  определяется по формуле

$$\varphi_i = \operatorname{arctg} \frac{b_i}{q_i}, \quad (4.11)$$

где  $b_i$  – реактивная проводимость  $i$ -й фазы, См;

$q_i$  – активная проводимость  $i$ -й фазы, См.

Реактивная проводимость  $i$ -ой фазы вычисляется по формуле

$$b_i = \sum b_{Li} - \sum b_{Ci}. \quad (4.12)$$

При построении векторной диаграммы необходимо выполнить следующие операции:

1) записать для данной цепи одно векторное уравнение по первому закону Кирхгофа для токов и три векторных уравнения для напряжений по второму закону Кирхгофа:

$$\vec{I}_N = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C; \quad (4.13)$$

$$\begin{cases} \vec{U}_{AB} = \vec{U}_A - \vec{U}_B \\ \vec{U}_{BC} = \vec{U}_B - \vec{U}_C; \\ \vec{U}_{CA} = \vec{U}_C - \vec{U}_A \end{cases} \quad (4.14)$$

2) векторную диаграмму напряжений начинать с построения симметричной звезды векторов фазных напряжений  $\vec{U}_A, \vec{U}_B, \vec{U}_C$ . Линейные напряжения  $\vec{U}_{AB}, \vec{U}_{BC}, \vec{U}_{CA}$  строить как векторные разности соответствующих фазных напряжений (4.14);

3) фазные токи  $\vec{I}_A, \vec{I}_B, \vec{I}_C$  нужно строить под соответствующими фазовыми углами  $\varphi_i$ , относительно своих фазных напряжений;

4) вектор тока  $\vec{I}_N$  в нейтральном проводе получить на диаграмме согласно уравнению (4.13).

### 4.3. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В трехфазную сеть, соединенную способом «звезда» (рис. 4.6), с линейным напряжением  $U_{л} = 220$  В включены однофазные токоприемники:  $R_A = 5$  Ом,  $X_{LA} = 10$  Ом,  $R_B = 10$  Ом,  $X_{LB} = 5$  Ом,  $X_{CC} = 10$  Ом.

Определить силу тока в фазах  $A, B, C$ ; активную, реактивную и полную мощности каждой фазы в отдельности; активную, реактивную и полную мощности всех трех фаз; построить векторную диаграмму токов и напряжений и графически определить силу тока в нейтральном проводе.

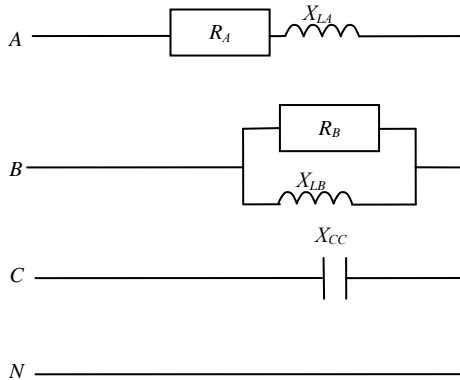


Рис. 4.6. Принципиальная электрическая схема к решению задачи

Решение:

1. Фазное напряжение цепи:

$$U_A = U_B = U_C = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В.}$$

2. Полное сопротивление фазы A:

$$Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_{LA}^2} = \sqrt{5^2 + 10^2} = 11,2 \text{ Ом.}$$

3. Активная проводимость фазы B:

$$g_B = \frac{1}{R_B} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ См.}$$

4. Индуктивная проводимость фазы B:

$$b_{LB} = \frac{1}{X_{LB}} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ См.}$$

5. Полная проводимость фазы B:

$$y_B = \sqrt{g_B^2 + b_{LB}^2} = \sqrt{0,1^2 + 0,2^2} = 0,224 \text{ См.}$$

6. Полное сопротивление фазы C:

$$Z_C = X_{CC} = 10 \text{ Ом.}$$

7. Ток фазы  $A$ :

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A} = \frac{127}{11,2} = 11,3 \text{ А.}$$

8. Ток фазы  $B$ :

$$I_B = U_B \cdot y_B = 127 \cdot 0,224 = 28,4 \text{ А.}$$

9. Ток фазы  $C$ :

$$I_C = \frac{U_C}{Z_C} = \frac{127}{10} = 12,7 \text{ А.}$$

10. Мощность фазы  $A$ :

– активная:

$$P_A = I_A^2 \cdot R_A = 11,3^2 \cdot 5 = 638,5 \text{ Вт;}$$

– реактивная:

$$Q_A = I_A^2 \cdot X_{LA} = 11,3^2 \cdot 10 = 1276,9 \text{ вар;}$$

– полная:

$$S_A = \sqrt{P_A^2 + Q_A^2} = \sqrt{638,5^2 + 1276,9^2} = 1427,6 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

11. Мощность фазы  $B$ :

– активная:

$$P_B = U_B^2 \cdot g_B = 127^2 \cdot 0,1 = 1612,9 \text{ Вт;}$$

– реактивная:

$$Q_B = U_B^2 \cdot b_{LB} = 127^2 \cdot 0,2 = 3225,8 \text{ вар;}$$

– полная:

$$S_B = \sqrt{P_B^2 + Q_B^2} = \sqrt{1612,9^2 + 3225,8^2} = 3606,6 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

12. Мощность фазы  $C$ :

– реактивная:

$$Q_C = I_C^2 \cdot X_{CC} = 12,7^2 \cdot 10 = 1612,9 \text{ вар;}$$

– полная:

$$S_C = Q_C = 1612,9 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

13. Мощность всей цепи:

– активная:

$$P = P_A + P_B = 638,5 + 1612,9 = 2251,4 \text{ Вт;}$$

– реактивная:

$$Q = Q_A + Q_B - Q_C = 1276,9 + 3225,8 - 1612,9 = 2889,8 \text{ вар};$$

– полная:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{2251,4^2 + 2889,8^2} = 3663,3 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

14. Для построения векторной диаграммы напряжений и токов выберем масштабы:  $\mu_U = 50 \text{ В/см}$ ,  $\mu_I = 10 \text{ А/см}$  и определим углы сдвига между вектором фазного напряжения и соответствующим ему вектором фазного тока:

$$\varphi_A = \arctg \frac{X_{LA}}{R_A} = \arctg \frac{10}{5} = \arctg 2 = 63^\circ 27';$$

$$\varphi_B = \arctg \frac{b_{LB}}{g_B} = \arctg \frac{0,2}{0,1} = \arctg 2 = 63^\circ 27';$$

$$\varphi_C = \arctg \frac{X_{CC}}{R_C} = \arctg \frac{10}{0} = 90^\circ.$$

Векторная диаграмма в выбранном масштабе построена на рис. 4.7.

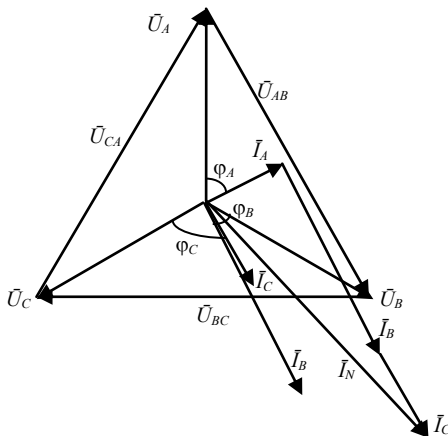


Рис. 4.7. Векторная диаграмма

Вектор тока  $\vec{I}_N$  в нейтральном проводе получен на диаграмме путем сложения векторов тока всех трех фаз:

$$\vec{I}_N = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = 3,13 \text{ см};$$

$$I_N = \bar{I}_N \cdot \mu_I = 3,13 \cdot 10 = 31,3 \text{ A.}$$

**Практическая работа № 5.**  
**РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ**  
**С ПРИЕМНИКАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ,**  
**СОЕДИНЕННЫМИ СПОСОБОМ «ТРЕУГОЛЬНИК»**

**Цели работы:** 1. Изучение основных соотношений, возникающих в трехфазных электрических цепях с приемниками, соединенными способом «треугольник».

2. Получение практических навыков расчета трехфазных электрических цепей с приемниками, соединенными способом «треугольник».

### 5.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Однофазные токоприемники соединены способом «треугольник» и включены в трехфазную сеть с линейным напряжением  $U_L$ . Тип сопротивлений, их численное значение, а также линейное напряжение заданы в табл. 5.1. Приемники фаз  $A$ ,  $B$ ,  $C$  соединены последовательно или параллельно согласно принципиальным электрическим схемам (рис. 5.1–5.5).

**Требуется:**

- 1) определить фазные силы тока  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$ ,  $I_{CA}$ ;
- 2) определить активную, реактивную, полную мощность каждой фазы в отдельности, а также активную, реактивную и полную мощность всех трех фаз;
- 3) построить векторную диаграмму токов и напряжений и графически определить линейные силы тока  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ .

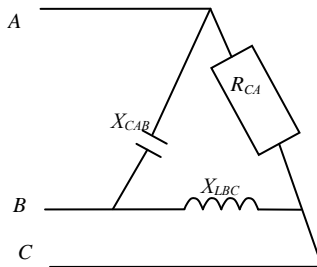


Рис. 5.1. Схема № 1

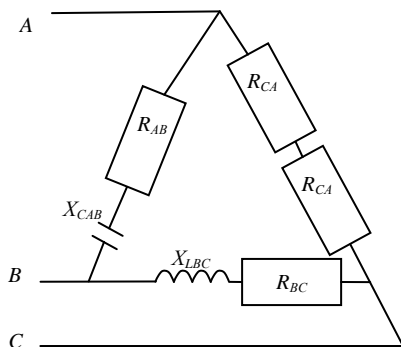


Рис. 5.2. Схема № 2

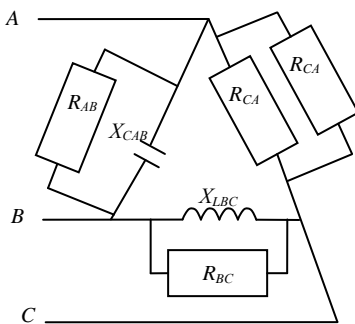


Рис. 5.3. Схема № 3

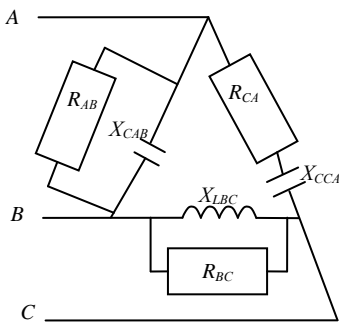


Рис. 5.4. Схема № 4

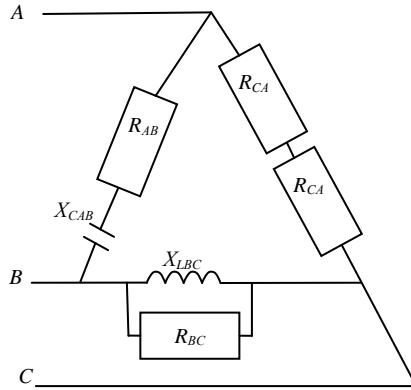


Рис. 5.5. Схема № 5

Таблица 5.1. Исходные данные

Варианты		Данные для расчета						
Номер схемы	Строка	$U_{л}$	$R_{AB}$	$R_{BC}$	$R_{CA}$	$X_{LBC}$	$X_{CAB}$	$X_{CCA}$
		В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	100	–	–	10	20	25	–
	2	150	–	–	20	50	30	–
	3	160	–	–	10	40	80	–
	4	50	–	–	5	10	25	–
	5	60	–	–	5	10	20	–
	6	80	–	–	10	20	40	–
	7	120	–	–	20	30	40	–
	8	180	–	–	30	20	10	–
	9	200	–	–	20	50	40	–
	10	210	–	–	10	5	35	–
2	1	50	3	40	5	30	4	–
	2	90	6	36	10	27	8	–
	3	120	9	32	15	24	12	–
	4	70	12	28	35	21	16	–
	5	150	15	24	30	18	20	–
	6	300	18	20	50	15	24	–
	7	140	21	16	20	12	28	–
	8	180	24	12	45	9	32	–
	9	45	27	8	5	6	36	–
	10	100	30	4	10	3	40	–
3	1	100	100	1	4	100	1	–

Окончание табл. 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	2	120	50	2	6	50	2	–
	3	140	40	4	8	40	4	–
	4	160	25	5	10	25	5	–
	5	180	20	10	12	20	10	–
	6	200	10	20	14	10	20	–
	7	220	5	25	16	5	25	–
	8	240	4	40	18	4	40	–
	9	260	2	50	20	2	50	–
	10	280	1	100	22	1	100	–
	4	1	50	1	100	3	1	100
2		90	2	50	6	2	50	8
3		120	4	40	9	4	40	12
4		70	5	25	12	5	25	16
5		150	10	20	15	10	20	20
6		300	20	10	18	20	10	24
7		140	25	5	21	25	5	28
8		180	40	4	24	40	4	32
9		45	50	2	27	50	2	36
10		100	100	1	30	100	1	40
5	1	50	3	1	5	100	4	–
	2	90	6	2	10	50	8	–
	3	120	9	4	15	40	12	–
	4	70	12	5	35	25	16	–
	5	150	15	10	30	20	20	–
	6	300	18	20	50	10	24	–
	7	140	21	25	20	5	28	–
	8	180	24	40	45	4	32	–
	9	45	27	50	5	2	36	–
	10	100	30	100	10	1	40	–

## 5.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Задача относится к расчету трехфазных цепей переменного тока, в которых потребители соединены способом «треугольник».

Дана трехфазная трехпроводная несимметричная цепь с последовательно или параллельно соединенными элементами (активными и реактивными). Задано входное линейное напряжение.

Для определения фазного тока  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$ ,  $I_{CA}$  необходимо найти полное сопротивление фазы  $Z_i$ , если элементы соединены последовательно, или полную проводимость фазы  $y_i$ , если элементы соединены па-

раллельно. Тогда токи определяются по формулам

$$I_{AB} = \frac{U_A}{Z_A}; \quad I_{BC} = \frac{U_B}{Z_B}; \quad I_{CA} = \frac{U_C}{Z_C}, \quad (5.1)$$

или

$$I_{AB} = U_A \cdot y_A; \quad I_{BC} = U_B \cdot y_B; \quad I_{CA} = U_C \cdot y_C, \quad (5.2)$$

где  $U_A, U_B, U_C$  – фазное напряжение цепи, В;

$Z_A, Z_B, Z_C$  – полные сопротивления фаз, Ом;

$y_A, y_B, y_C$  – полные проводимости фаз, См.

Активная мощность фазы  $P_i$  в случае последовательно или параллельно соединенных элементов вычисляется по формулам

$$P_i = I_i^2 (\sum R_i), \quad (5.3)$$

или

$$P_i = U_i^2 \cdot g_i, \quad (5.4)$$

где  $\sum R_i$  – сумма активных сопротивлений фазы, Ом;

$g_i$  – активная проводимость фазы, См.

Индуктивная мощность фазы  $Q_{Li}$  и емкостная мощность фазы  $Q_{Ci}$  определяются аналогично, только нужно подставлять вместо  $R_i$  и  $g_i$  соответственно  $X_{Li}, X_{Ci}, b_{Li}, b_{Ci}$ .

Полная мощность фазы  $S_i$  вычисляется по формуле (5.5), исключая при этом ненужные слагаемые:

$$S_i = \sqrt{P_i^2 + (Q_{Li} - Q_{Ci})^2}. \quad (5.5)$$

Активная мощность всей цепи  $P$  вычисляется по формуле

$$P = \sum P_i. \quad (5.6)$$

Реактивная мощность всей цепи  $Q$  вычисляется по формуле

$$Q = \sum Q_{Li} - \sum Q_{Ci}. \quad (5.7)$$

Полная мощность всей цепи  $S$  определяется по формуле

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (5.8)$$

Для построения векторной диаграммы линейных и фазных напряжений и токов необходимо определить углы сдвига между фазными напряжениями и соответствующими фазными токами для всех трех фаз.

Если элементы фазы соединены последовательно, то угол  $\varphi_i$  вычисляется по формуле

$$\varphi_i = \arctg \frac{X_i}{R_i}, \quad (5.9)$$

где  $X_i$  – реактивное сопротивление  $i$ -й фазы, Ом;

$R_i$  – активное сопротивление  $i$ -й фазы, Ом.

Реактивное сопротивление каждой фазы вычисляется по формуле

$$X_i = \sum X_{Li} - \sum X_{Ci}. \quad (5.10)$$

Если сопротивления фазы соединены параллельно, то угол  $\varphi_i$  определяется по формуле

$$\varphi_i = \arctg \frac{b_i}{q_i}, \quad (5.11)$$

где  $b_i$  – реактивная проводимость  $i$ -й фазы, См;

$q_i$  – активная проводимость  $i$ -й фазы, См.

Реактивная проводимость  $i$ -ой фазы вычисляется по формуле

$$b_i = \sum b_{Li} - \sum b_{Ci}. \quad (5.12)$$

При построении векторной диаграммы необходимо выполнить следующие операции:

1) векторную диаграмму напряжений начинать с построения симметричной звезды векторов фазных напряжений  $\vec{U}_{AB}$ ,  $\vec{U}_{BC}$ ,  $\vec{U}_{CA}$ . Линейные напряжения  $\vec{U}_A$ ,  $\vec{U}_B$ ,  $\vec{U}_C$  будут равны фазным;

3) фазные токи  $\vec{I}_{AB}$ ,  $\vec{I}_{BC}$ ,  $\vec{I}_{CA}$  нужно строить под соответствующими фазовыми углами  $\varphi_i$  относительно своих фазных напряжений;

4) векторы линейных токов  $\vec{I}_A$ ,  $\vec{I}_B$ ,  $\vec{I}_C$  строить как векторные разности соответствующих фазных токов.

### 5.3. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В трехфазную сеть, соединенную способом «треугольник» (рис. 5.6), с линейным напряжением  $U_n = 220$  В включены однофазные то-

коприемники:  $R_{AB} = 5 \text{ Ом}$ ,  $X_{CAB} = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_{CA} = 10 \text{ Ом}$ ,  $X_{LBC} = 5 \text{ Ом}$ .

Определить фазные силы тока; активную, реактивную и полную мощности каждой фазы в отдельности; активную, реактивную и полную мощности всех трех фаз; построить векторную диаграмму токов и напряжений и графически определить линейные силы тока.

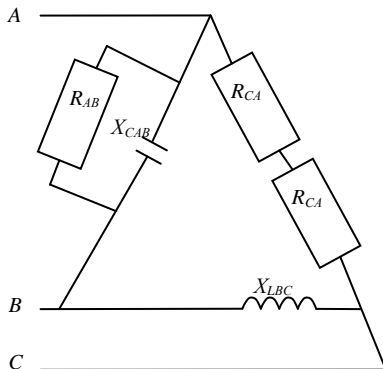


Рис. 5.6. Принципиальная электрическая схема к решению задачи

Решение:

1. Фазное напряжение цепи:

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\text{л}} = 220 \text{ В.}$$

2. Активная проводимость фазы  $AB$ :

$$g_{AB} = \frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ См.}$$

3. Индуктивная проводимость фазы  $AB$ :

$$b_{CAB} = \frac{1}{X_{CAB}} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ См.}$$

4. Полная проводимость фазы  $AB$ :

$$y_{AB} = \sqrt{g_{AB}^2 + b_{CAB}^2} = \sqrt{0,2^2 + 0,1^2} = 0,224 \text{ См.}$$

5. Полное сопротивление фазы  $BC$ :

$$Z_{BC} = X_{LBC} = 5 \text{ Ом.}$$

6. Полное сопротивление фазы  $CA$ :

$$Z_{CA} = \sqrt{2R_{CA}^2} = 2R_{CA} = 2 \cdot 10 = 20 \text{ Ом.}$$

7. Ток фазы  $AB$ :

$$I_{AB} = U_{AB} \cdot y_{AB} = 220 \cdot 0,224 = 49,3 \text{ А.}$$

8. Ток фазы  $BC$ :

$$I_{BC} = \frac{U_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{220}{5} = 44 \text{ А.}$$

9. Ток фазы  $CA$ :

$$I_{CA} = \frac{U_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{220}{20} = 11 \text{ А.}$$

10. Мощность фазы  $AB$ :

– активная:

$$P_{AB} = U_{AB}^2 \cdot g_{AB} = 220^2 \cdot 0,2 = 9680 \text{ Вт;}$$

– реактивная:

$$Q_{AB} = U_{AB}^2 \cdot b_{CAB} = 220^2 \cdot 0,1 = 4840 \text{ вар;}$$

– полная:

$$S_{AB} = \sqrt{P_{AB}^2 + Q_{AB}^2} = \sqrt{9680^2 + 4840^2} = 10822,6 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

11. Мощность фазы  $BC$ :

– реактивная:

$$Q_{BC} = I_{BC}^2 \cdot X_{LBC} = 44^2 \cdot 5 = 9680 \text{ вар;}$$

– полная:

$$S_{BC} = Q_{BC} = 9680 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

12. Мощность фазы  $CA$ :

– активная:

$$P_{CA} = I_{CA}^2 \cdot \Sigma R_{CA} = 11^2 \cdot 2 \cdot 10 = 2420 \text{ Вт;}$$

– полная:

$$S_{CA} = P_{CA} = 2420 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

13. Мощность всей цепи:

– активная:

$$P = P_{AB} + P_{CA} = 9680 + 2420 = 12100 \text{ Вт;}$$

– реактивная:

$$Q = Q_{BC} - Q_{AB} = 9680 - 4840 = 4840 \text{ вар};$$

– полная:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{12100^2 + 4840^2} = 13032,1 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

14. Для построения векторной диаграммы напряжений и токов выберем масштабы:  $\mu_U = 50 \text{ В/см}$ ,  $\mu_I = 20 \text{ А/см}$  и определим углы сдвига между вектором фазного напряжения и соответствующим ему вектором фазного тока:

$$\varphi_{AB} = \arctg \frac{b_{CAB}}{g_{AB}} = \arctg \frac{0,1}{0,2} = \arctg 0,5 = 26^\circ 34'$$

$$\varphi_{BC} = \arctg \frac{X_{LBC}}{R_{BC}} = \arctg \frac{5}{0} = 90^\circ.$$

$$\varphi_{CA} = \arctg \frac{X_{CA}}{R_{CA}} = \arctg \frac{0}{2 \cdot 10} = 0^\circ.$$

Векторная диаграмма в выбранном масштабе построена на рис. 5.7.

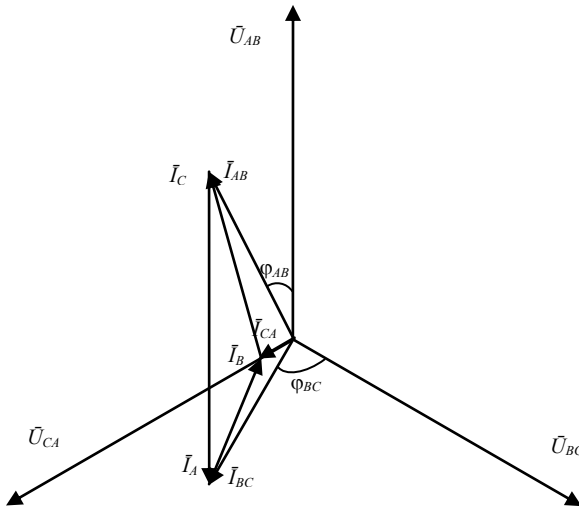


Рис. 5.7. Векторная диаграмма

Векторы линейных токов  $\bar{I}_A$ ,  $\bar{I}_B$ ,  $\bar{I}_C$  получены на диаграмме путем

соединения векторов фазных токов:

$$I_A = \bar{I}_A \cdot \mu_I = 4,13 \cdot 20 = 82,6 \text{ A};$$

$$I_B = \bar{I}_B \cdot \mu_I = 1,81 \cdot 20 = 36,2 \text{ A};$$

$$I_C = \bar{I}_C \cdot \mu_I = 2,55 \cdot 20 = 51 \text{ A}.$$

## Практическая работа № 6. РАСЧЕТ ОДНОФАЗНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Цели работы:** 1. Изучить основные соотношения, возникающие при работе однофазного трансформатора.

2. Получить практические навыки расчета однофазного силового трансформатора.

### 6.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

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. 6.1. Однофазный понижающий силовой трансформатор имеет технические данные, приведенные в табл. 6.1: номинальную мощность  $S_n$ , номинальное высшее напряжение  $U_{1н}$ , номинальное низшее напряжение  $U_{2н}$ , мощность одной лампы  $P_{л}$ , количество ламп подключенных к трансформатору  $n_{л}$ .

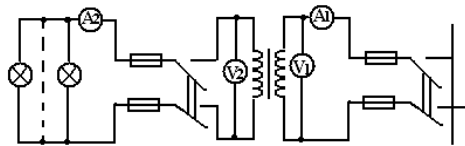


Рис. 6.1. Схема к решению задачи

**Требуется определить:**

1. Коэффициент трансформации трансформатора.
2. Номинальные токи первичной и вторичной обмоток трансформатора.
3. Коэффициент нагрузки трансформатора при коэффициенте мощности ламп  $\cos \varphi_2 = 1$ .

4. Рабочие токи первичной и вторичной обмоток трансформатора.
5. Выбрать тип трансформатора из табл. 6.2 и определить ток холостого хода и напряжение короткого замыкания трансформатора.

Таблица 6.1. Исходные данные

Варианты	Данные для расчета				
	$S_n$	$U_{1н}$	$U_{2н}$	$P_n$	$n_n$
	ВА	В	В	Вт	шт.
1	2	3	4	5	6
1	400	220	36	25	12
2	250	380	24	40	5
3	160	660	12	15	8
4	100	220	24	25	3
5	63	220	12	10	5
6	400	380	12	40	8
7	250	660	36	60	3
8	160	220	12	25	5
9	100	380	36	40	2
10	63	380	24	20	10
11	400	660	24	60	6
12	250	220	12	25	8
13	160	380	36	25	12
14	100	660	24	40	5
15	63	660	110	15	8
16	400	220	12	25	3
17	250	380	12	10	5
18	160	660	24	40	8
19	100	220	110	60	3
20	63	220	110	25	5
21	400	380	24	40	2
22	250	660	12	20	10
23	160	220	24	60	6
24	100	380	12	25	8
25	63	380	36	25	12
26	400	660	12	40	5
27	250	220	24	15	8
28	160	380	12	25	3
29	100	660	36	10	5
30	63	660	24	40	8
31	400	220	24	60	3
32	250	380	42	25	5
33	160	660	36	40	2
34	100	220	36	20	10
35	63	220	24	60	6
36	400	380	36	25	8

1	2	3	4	5	6
37	250	660	24	25	12
38	160	220	36	40	5
39	100	380	24	15	8
40	63	380	110	25	3
41	400	660	36	10	5
42	250	220	36	40	8
43	160	380	42	60	3
44	100	660	12	25	5
45	63	660	36	40	2
46	400	220	42	20	10
47	250	380	110	60	6
48	160	660	220	25	8
49	100	220	42	25	12
50	63	220	24	40	5

Таблица 6.2. Технические данные трансформаторов серии ОСМ

Тип трансформатора	Номинальная мощность $S_n$ , ВА	Номинальные напряжения		Ток холостого хода $I_0$ , %	Напряжение короткого замыкания, $U_{кз}$ , %
		$U_{1н}$	$U_{2н}$		
ОСМ-0,063	63	220, 380, 660	12, 24, 36, 42, 110, 220	24	12
ОСМ-0,1	100			24	9,0
ОСМ-0,16	160			23	7,0
ОСМ-0,25	250			22	5,5
ОСМ-0,4	400			20	4,5

## 6.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Задача относится к расчету однофазного силового трансформатора.

Коэффициент трансформации определяется как отношение номинального напряжения  $U_{1н}$  первичной обмотки к номинальному напряжению  $U_{2н}$  вторичной обмотки:

$$K = \frac{U_{1н}}{U_{2н}}. \quad (6.1)$$

Для определения номинальных токов обмоток используют отношение номинальной мощности трансформатора  $S_n$  к номинальному напряжению соответствующей обмотки:

$$I_n = \frac{S_n}{U_n}. \quad (6.2)$$

Коэффициент нагрузки трансформатора можно определить по формуле

$$K_{\text{нр}} = \frac{P_2}{S_n \cdot \cos \varphi_2}, \quad (6.3)$$

где  $\cos \varphi_2$  – коэффициент активной мощности потребителя;

$P_2$  – суммарная мощность потребителя, Вт.

Зная коэффициент нагрузки трансформатора, можно определить рабочие токи обмоток

$$I_p = K_{\text{нр}} \cdot I_n. \quad (6.4)$$

### 6.3. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Однофазный понижающий силовой трансформатор (рис. 6.1) имеет следующие технические данные: номинальную мощность  $S_n = 400$  ВА, номинальное высшее напряжение  $U_{1н} = 220$  В, номинальное низшее напряжение  $U_{2н} = 24$  В, мощность одной лампы  $P_{л} = 60$  Вт, количество ламп подключенных к трансформатору  $n_{л} = 5$  шт.

Необходимо определить коэффициент трансформации трансформатора, номинальные токи первичной и вторичной обмоток трансформатора, коэффициент нагрузки трансформатора при коэффициенте мощности ламп  $\cos \varphi_2 = 1$ , рабочие токи первичной и вторичной обмоток трансформатора. Выбрать тип трансформатора из табл. 6.2 и определить ток холостого хода и напряжение короткого замыкания трансформатора.

#### Решение

1. Коэффициент трансформации трансформатора:

$$K = \frac{U_{1н}}{U_{2н}} = \frac{220}{24} = 9,17.$$

2. Номинальные токи обмоток трансформатора:

$$I_{н1} = \frac{S_n}{U_{н1}} = \frac{400}{220} = 1,82 \text{ А.}$$

$$I_{н2} = \frac{S_n}{U_{н2}} = \frac{400}{24} = 16,7 \text{ А.}$$

3. Суммарная мощность потребителя:

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

4. Коэффициент нагрузки трансформатора:

$$K_{нр} = \frac{P_2}{S_n \cdot \cos \varphi_2} = \frac{300}{400 \cdot 1} = 0,75.$$

5. Рабочие токи обмоток трансформатора:

$$I_{р1} = K_{нр} \cdot I_{н1} = 0,75 \cdot 1,82 = 1,36 \text{ А;}$$

$$I_{р2} = K_{нр} \cdot I_{н2} = 0,75 \cdot 16,7 = 12,5 \text{ А.}$$

6. Пользуясь данными табл. 6.2 выбираем трансформатор ОСМ-0,4. Согласно техническим данным ток холостого хода составляет 20% от номинального тока первичной обмотки трансформатора, а напряжение короткого замыкания – 4,5% от номинального напряжения первичной обмотки трансформатора.

Ток холостого хода трансформатора:

$$I_0 = 0,2 \cdot I_{н1} = 0,2 \cdot 1,82 = 0,36 \text{ А.}$$

Напряжение короткого замыкания трансформатора:

$$U_k = 0,045 \cdot U_{н1} = 0,045 \cdot 220 = 9,9 \text{ В.}$$

## **Лабораторная работа № 7. РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

**Цели работы:** 1. Изучить основные соотношения, возникающие при работе трехфазного трансформатора.

2. Получить практические навыки расчета трехфазного силового трансформатора.

### **7.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ**

Трехфазный понижающий силовой трансформатор имеет технические данные, приведенные в табл. 7.1: номинальную мощность  $S_n$ , но-

минальное высшее линейное напряжение  $U_{1л}$ , номинальное низшее линейное напряжение  $U_{2л}$ , мощность потерь холостого хода (при номинальном напряжении)  $P_0$ , мощность потерь короткого замыкания (при номинальном токе)  $P_{кз}$ , схемы соединения первичных и вторичных обмоток трансформатора (рис. 7.1-7.5).

**Требуется определить:**

1. Фазные напряжения трансформатора.
2. Линейный и фазный коэффициенты трансформации трансформатора.
3. Линейные и фазные токи трансформатора.
4. Коэффициент полезного действия при коэффициенте мощности нагрузки  $\cos \varphi_m = 0,9$  и коэффициенте нагрузки  $\beta = 75\%$  от номинальной.
5. Годовой коэффициент полезного действия при полной нагрузке  $\beta = 1$  и коэффициенте мощности  $\cos \varphi_m = 0,8$ , времени работы под нагрузкой в году  $T = 7000$  ч.
6. Построить векторную диаграмму линейных и фазных напряжений для первичных и вторичных обмоток трансформатора и определить группу соединения обмоток.

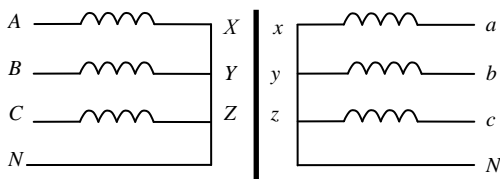


Рис. 7.1. Схема № 1

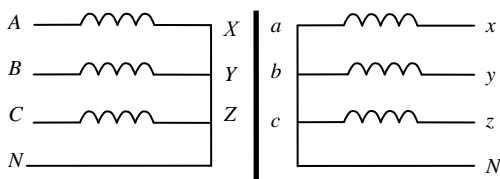


Рис. 7.2. Схема № 2

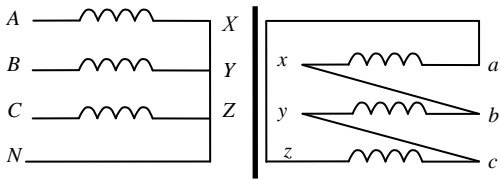


Рис. 7.3. Схема № 3

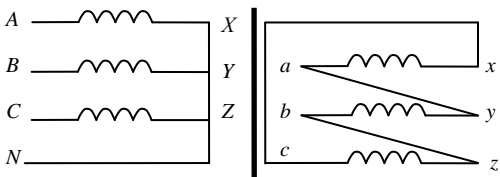


Рис. 7.4. Схема № 4

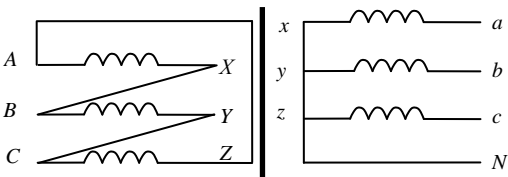


Рис. 7.5. Схема № 5

Таблица 7.1. Исходные данные

Варианты		Данные для расчета				
Номер схемы	Строка	$S_n$	$U_{1л}$	$U_{2л}$	$P_0$	$P_K$
		кВА	кВ	кВ	кВт	кВт
1	2	3	4	5	6	7
1	1	100	20	5	0,5	1
	2	200	35	10	0,6	2
	3	300	50	15	0,7	3
	4	400	65	20	0,8	4
	5	500	80	25	0,9	5
	6	600	95	30	1,0	6
	7	700	110	35	1,1	7
	8	800	125	40	1,2	8
	9	900	140	45	1,3	9
10	1000	155	50	1,4	10	

Окончание табл. 7.1

1	2	3	4	5	6	7
2	1	1100	165	55	1,5	11
	2	1200	175	60	1,6	12
	3	1300	185	65	1,7	13
	4	1400	195	70	1,8	14
	5	1500	205	75	1,9	15
	6	1600	215	80	2,0	16
	7	1700	225	85	2,1	17
	8	1800	235	90	2,2	18
	9	1900	245	95	2,3	19
	10	2000	255	100	2,4	20
3	1	2100	260	102	2,5	21
	2	2200	265	104	2,6	22
	3	2300	270	106	2,7	23
	4	2400	275	108	2,8	24
	5	2500	280	110	2,9	25
	6	2600	285	112	3,0	26
	7	2700	290	114	3,1	27
	8	2800	295	116	3,2	28
	9	2900	300	118	3,3	29
	10	3000	305	120	3,4	30
4	1	3100	310	130	3,5	31
	2	3200	315	140	3,6	32
	3	3300	320	150	3,7	33
	4	3400	325	160	3,8	34
	5	3500	330	170	3,9	35
	6	3600	335	180	4,0	36
	7	3700	340	190	4,1	37
	8	3800	345	200	4,2	38
	9	3900	350	210	4,3	39
	10	4000	355	220	4,4	40
5	1	4100	370	225	4,5	41
	2	4200	385	230	4,6	42
	3	4300	400	235	4,7	43
	4	4400	415	240	4,8	44
	5	4500	430	245	4,9	45
	6	4600	445	250	5,0	46
	7	4700	460	255	5,1	47
	8	4800	475	260	5,2	48
	9	4900	490	265	5,3	49
	10	5000	505	270	5,4	50

## 7.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Задача относится к расчету трехфазного силового трансформатора, способ соединения обмоток которого задан.

Распространенными схемами соединения обмоток трансформаторов являются схема «звезда», обозначаемая буквой У (или символом Y), и схема «треугольник», обозначаемая буквой Д (или символом Δ).

Обмотка высшего напряжения (ВН) может быть соединена или в У или в Δ независимо от способа соединения обмотки низшего напряжения (НН). Очевидно, что число основных схем соединения обмоток равно четырем, а именно Y/Y, Δ/Δ, Y/Δ и Δ/Y. Здесь перед чертой показано обозначение схемы соединения обмоток ВН, за чертой – обмоток НН. Начала обмоток ВН обозначаются заглавными латинскими буквами A, B, C; концы этих же обмоток буквами X, Y, Z. Начала обмоток НН обозначаются строчными латинскими буквами a, b, c; концы – x, y, z.

Разнообразие схем и способов соединений обмоток приводит к необходимости указывать численное значение фазового угла между векторами линейных одноименных напряжений обмоток ВН и НН трансформатора. Фазовые углы определяют так называемые группы соединения обмоток. Всего насчитывается двенадцать групп от 0 до 11 включительно.

Трехфазные трансформаторы имеют два коэффициента трансформации – линейный и фазный. Линейный коэффициент определяется как отношение линейного напряжения  $U_{1л}$  ( $U_{1н}$ ) обмотки ВН к линейному напряжению  $U_{2л}$  ( $U_{2н}$ ) обмотки НН:

$$K_{л} = \frac{U_{1л}}{U_{2л}} = \frac{U_{1н}}{U_{2н}}. \quad (7.1)$$

Фазный коэффициент трансформации равен отношению фазного напряжения обмотки ВН  $U_{1ф}$  к фазному напряжению обмотки НН  $U_{2ф}$ :

$$K_{ф} = \frac{U_{1ф}}{U_{2ф}}. \quad (7.2)$$

При соединении обмоток по способу «звезда» используют формулы:

$$U_{л} = \sqrt{3}U_{ф}, \quad (7.3)$$

$$I_{л} = I_{\phi}. \quad (7.4)$$

При соединении обмоток по способу «треугольник» используют формулы:

$$U_{л} = U_{\phi}, \quad (7.5)$$

$$I_{л} = \sqrt{3}I_{\phi}. \quad (7.6)$$

Для определения токов обмоток ВН и НН используют формулы полной мощности трансформатора:

$$S_{1н} = S_{2н}, \quad (7.7)$$

или

$$\sqrt{3}U_{1л}I_{1л} = \sqrt{3}U_{2л}I_{2л}. \quad (7.8)$$

Коэффициент полезного действия трансформатора можно определять по формуле

$$\eta = \frac{\beta S_{н} \cos \varphi_2 \cdot 100}{\beta S_{н} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{к}}, \quad (7.9)$$

где  $\cos \varphi_2$  – коэффициент активной мощности потребителя;

$P_0$  – мощность потерь холостого хода, кВт;

$P_{к}$  – мощность потерь короткого замыкания, кВт;

$\beta$  – коэффициент нагрузки трансформатора.

Годовой к. п. д. учитывает экономичность работы трансформатора за год:

$$\eta_{г} = \frac{\beta S_{н} \cos \varphi_2 T \cdot 100}{\beta S_{н} \cos \varphi_2 T + P_0 T_0 + \beta^2 P_{к} T}, \quad (7.10)$$

где  $T$  – время работы под нагрузкой, ч. Принимаем  $T = 7000$  ч;

$T_0$  – время работы на холостом ходу, ч. Принимаем  $T_0 = 8760$  ч.

При построении векторной диаграммы напряжений трансформатора с высшей и низшей сторон необходимо:

1) построить векторную диаграмму линейных и фазных напряжений обмоток ВН:  $\vec{U}_{AX}, \vec{U}_{BY}, \vec{U}_{CZ}, \vec{U}_{AB}, \vec{U}_{BC}, \vec{U}_{CA}$ . Следует учитывать, что при соединении обмоток трансформатора в треугольник линейные напряжения равны фазным;

2) построить векторную диаграмму линейных и фазных напряжений обмоток НН:  $\vec{U}_{ax}, \vec{U}_{by}, \vec{U}_{cz}, \vec{U}_{ab}, \vec{U}_{bc}, \vec{U}_{ca}$ . Векторы одноименных

фазных напряжений обмоток ВН и НН параллельны между собой, например  $\vec{U}_{AX} \parallel \vec{U}_{ax}$ ,  $\vec{U}_{BY} \parallel \vec{U}_{by}$ ,  $\vec{U}_{CZ} \parallel \vec{U}_{cz}$ . Следует учитывать также, что если на электрической схеме обозначения начал и концов обмоток ВН и НН отражаются зеркально, т.е. симметричны, то соответствующие одноименные вектора ВН и НН направлены в одну и ту же сторону. В противном случае вектора будут направлены в противоположную сторону. Аналогично необходимо учитывать и направление соединения обмоток при соединении обмоток трансформатора в треугольник ( $a, b, c$  или  $a, c, b$ );

3) для определения группы соединения обмоток трансформатора нужно по векторной диаграмме вычислить, фазовый угол между одноименными линейными векторами напряжений обмоток ВН и НН, например, угол между векторами  $\vec{U}_{AB}$  и  $\vec{U}_{ab}$ . Число получающееся в результате деления значений этого угла на  $30^\circ$  и дает искомую группу соединения обмоток трансформатора.

**Примечание.** Фазовый угол сдвига следует отсчитывать от вектора линейного напряжения обмотки ВН до одноименного вектора линейного напряжения обмотки НН по часовой стрелке.

### 7.3. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Трехфазный понижающий силовой трансформатор имеет следующие технические данные:  $S_n = 25$  кВА;  $U_{1л} = 6$  кВ;  $U_{2л} = 2$  кВ;  $P_0 = 0,2$  кВт;  $P_k = 0,1$  кВт; способ соединения обмоток (рис. 7.11)  $\Delta/\Delta$ .

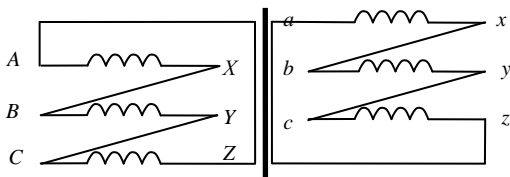


Рис 7.11. Принципиальная электрическая схема к решению задачи

Определить линейный и фазный коэффициенты трансформации, фазные напряжения, линейные и фазные токи, коэффициент полезного действия при  $\cos \varphi_2 = 0,8$  и коэффициенте нагрузки  $\beta = 80\%$  номинальной. Определить также годовой коэффициент полезного действия при полной нагрузке  $\beta = 1$ , при  $\cos \varphi_2 = 0,9$  и времени работы  $T = 5000$  ч. Построить векторную диаграмму линейных и фазных напряжений

трансформатора, определить группу трансформатора.

### Решение

1. Линейный коэффициент трансформации:

$$K_{л} = \frac{U_{1л}}{U_{2л}} = \frac{6}{2} = 3.$$

2. Фазный коэффициент трансформации:

$$K_{\phi} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{6}{2} = 3.$$

3. Фазное напряжение обмотки ВН:

$$U_{1\phi} = U_{1л} = 6 \text{ кВ.}$$

4. Фазное напряжение обмотки НН:

$$U_{2\phi} = U_{2л} = 2 \text{ кВ.}$$

5. Линейный ток обмотки ВН:

$$I_{1л} = \frac{S_{н}}{\sqrt{3}U_{1л}} = \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 6} = 2,41 \text{ А.}$$

6. Фазный ток обмотки ВН:

$$I_{1\phi} = \frac{I_{1л}}{\sqrt{3}} = \frac{2,41}{\sqrt{3}} = 1,39 \text{ А.}$$

7. Линейный ток обмотки НН:

$$I_{2л} = \frac{S_{н}}{\sqrt{3}U_{2л}} = \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 2} = 7,22 \text{ А.}$$

8. Фазный ток обмотки НН:

$$I_{2\phi} = \frac{I_{2л}}{\sqrt{3}} = \frac{7,22}{\sqrt{3}} = 4,17 \text{ А.}$$

9. Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{н}} \times \cos \alpha_2 \times 100}{\beta S_{\text{н}} \cos \alpha_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{к}}} = \frac{0,8 \times 25 \times 0,8 \times 100}{0,8 \times 25 \times 0,8 + 0,2 + 0,8^2 \times 0,1} = 98,4\%$$

10. Годовой коэффициент полезного действия:

$$\eta_{\text{год}} = \frac{\beta S_{\text{н}} \times \cos \alpha_2 \times T \times 100}{\beta S_{\text{н}} \cos \alpha_2 \times T + P_0 \times T_0 + \beta^2 P_{\text{к}} \times T} = \frac{1 \times 25 \times 0,9 \times 5000 \times 100}{1 \times 25 \times 0,9 \times 5000 + 0,2 \times 8760 + 1^2 \times 0,1 \times 5000} = 98\%$$

11. Для построения векторной диаграммы напряжений выберем масштаб напряжений обмоток ВН и НН,  $\mu_U = 2$  кВ/см. Векторы линейных (фазных) напряжений обмоток НН параллельны векторам фазных напряжений обмоток ВН (рис. 7.12, а).

Из векторной диаграммы номер группы трансформатора определяется делением фазового угла сдвига между векторами  $\vec{U}_{AB}$  и  $\vec{U}_{ab}$  на  $30^\circ$ , в результате имеем 12, то есть нулевую группу трансформатора  $\Delta/\Delta-0$  (см. рис.7.12, б.).

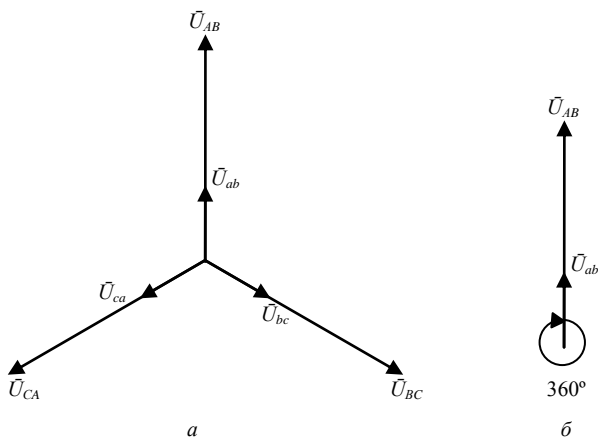


Рис. 7.12. Векторные диаграммы

## Практическая работа № 8. РАСЧЕТ СТОИМОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

**Цели работы:** 1. Изучить основные соотношения, возникающие при работе однофазного трансформатора.

2. Получить практические навыки расчета однофазного силового трансформатора.

## Практическая работа № 9. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

**Цели работы:** 1. Изучить основные соотношения, выражающие взаимосвязь между электрическими величинами, характеризующими данный тип электрической машины.

2. Получить практические навыки расчета электрических машин.

### 9.1. РАСЧЕТ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

#### 9.1.1. Исходные данные

Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением работает в номинальном режиме (рис. 9.1). Он имеет технические данные, приведенные в табл. 9.1: номинальную мощность  $P_n$ , номинальное напряжение  $U_n$ , сопротивление обмотки якоря  $R_a$ , сопротивление обмотки возбуждения  $R_b$ , номинальный коэффициент полезного действия  $\eta_n$ .

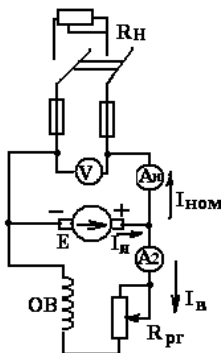


Рис. 9.1. Схема генератора постоянного тока с параллельным возбуждением

#### Требуется определить:

1. Значения токов нагрузки, возбуждения и якоря.
2. Потери мощности в якоря, обмотке возбуждения и щеточном контакте. Потери холостого хода, добавочные потери и суммарные потери мощности.
3. ЭДС генератора.

Таблица 9.1. Исходные данные для расчета генератора постоянного тока с параллельным возбуждением

Варианты	Данные для расчета				
	$P_n$	$U_n$	$R_{я}$	$R_{в}$	$\eta_n$
	Вт	В	Ом	Ом	%
1	2	3	4	5	6
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					

Окончание табл. 9.1

1	2	3	4	5	6
10					
11					
12					
13					
14					
15					

### 9.1.2. Методические рекомендации по решению задачи

Для расчета генератора постоянного тока с параллельным возбуждением необходимо усвоить устройство и принцип действия электрических машин постоянного тока.

Электродвижущая сила  $E$  генератора определяется по формуле:

$$E = U_n + I_{я} \cdot R_{я}, \quad (9.1)$$

где  $U_n$  – номинальное напряжение, В;

$I_{я}$  – ток обмотки якоря, А;

$R_{я}$  – сопротивление цепи якоря, Ом.

Ток якоря  $I_{я}$  можно найти, сложив ток нагрузки генератора  $I_n$  и ток обмотки возбуждения  $I_{в}$

$$I_{я} = I_n + I_{в}. \quad (9.2)$$

Ток нагрузки определяют по формуле

$$I_n = \frac{P_n}{U_n}, \quad (9.3)$$

где  $P_n$  – номинальная мощность генератора, Вт.

Для нахождения тока обмотки возбуждения используют следующее выражение

$$I_b = \frac{U_n}{R_b}, \quad (9.3)$$

где  $R_b$  – сопротивление обмотки возбуждения, Ом.

Номинальный КПД генератора  $\eta_n$  определяется по формуле

$$\eta_n = \frac{P_n}{P_1} \times 100, \quad (9.4)$$

где  $P_1$  – мощность, потребляемая генератором от первичного двигателя, Вт. Она находится:

$$P_1 = P_n + \Sigma P, \quad (9.5)$$

где  $\Sigma P$  – суммарные потери мощности в генераторе, Вт.

Суммарные потери мощности  $\Sigma P$  состоят из потерь мощности в якоре  $P_я$ , потерь мощности в обмотке возбуждения  $P_в$ , потерь мощности в щеточном контакте  $P_щ$ , потерь холостого хода  $P_х$  и добавочных потерь  $P_{доб}$ :

$$\Sigma P = P_я + P_в + P_щ + P_х + P_{доб}. \quad (9.6)$$

Потери мощности в обмотке якоря и обмотке возбуждения можно определить из следующих выражений:

$$P_я = I_я^2 \cdot R_я; \quad (9.7)$$

$$P_в = I_в^2 \cdot R_в. \quad (9.8)$$

Потери мощности в щеточном контакте зависят от величины падения напряжения на щетках

$$P_щ = \Delta U_щ \cdot I_я, \quad (9.9)$$

где  $\Delta U_щ$  – падение напряжения на щетках генератора, В. Для графитных щеток  $\Delta U_щ = 2$  В.

Добавочные потери мощности  $P_{доб}$  обычно составляют 1% от номинальной мощности

$$P_{доб} = 0,01 \cdot P_n. \quad (9.10)$$

### 9.1.3. Пример решения задачи

Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением (рис. 9.1) имеет следующие технические данные: номинальную мощность  $P_n = 16000$  Вт, номинальное напряжение  $U_n = 230$  В, сопротивление обмотки якоря  $R_я = 0,13$  Ом, сопротивление обмотки возбуждения  $R_в = 164$  Ом, номинальный коэффициент полезного действия  $\eta_n = 90,1\%$ .

Необходимо определить значения токов нагрузки, возбуждения и якоря; потери мощности в якоря, обмотке возбуждения и щеточном контакте, потери холостого хода, добавочные потери и суммарные потери мощности; ЭДС генератора.

#### Решение

1. Ток нагрузки генератора:

$$I_n = \frac{P_n}{U_n} = \frac{16000}{230} = 69,6 \text{ А.}$$

2. Ток возбуждения генератора:

$$I_в = \frac{U_n}{R_в} = \frac{230}{164} = 1,4 \text{ А.}$$

3. Ток обмотки якоря:

$$I_я = I_n + I_в = 69,6 + 1,4 = 71 \text{ А.}$$

4. Мощность, потребляемая генератором от первичного двигателя:

$$P_1 = \frac{P_n}{\eta_n} = \frac{16000}{0,901} = 17758 \text{ Вт.}$$

5. Суммарные потери мощности:

$$\Sigma P = P_1 - P_n = 17758 - 16000 = 1758 \text{ Вт.}$$

6. Потери мощности в обмотке якоря:

$$P_я = I_я^2 \cdot R_я = 71^2 \cdot 0,13 = 655 \text{ Вт.}$$

7. Потери мощности в обмотке возбуждения:

$$P_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 \cdot R_{\text{в}} = 1,4^2 \cdot 164 = 321 \text{ Вт.}$$

8. Потери мощности в щеточном контакте:

$$P_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_{\text{я}} = 2 \cdot 71 = 142 \text{ Вт.}$$

9. Добавочные потери мощности:

$$P_{\text{доб}} = 0,01 \cdot P_{\text{н}} = 0,01 \cdot 16000 = 160 \text{ Вт.}$$

10. Потери холостого хода:

$$P_{\text{х}} = \Sigma P - (P_{\text{я}} + P_{\text{в}} + P_{\text{щ}} + P_{\text{доб}}) = 1758 - (655 + 321 + 142 + 160) = 480 \text{ Вт.}$$

11. ЭДС генератора:

$$E = U_{\text{н}} + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} = 230 + 71 \cdot 0,13 = 239,23 \text{ В.}$$

## 9.2. РАСЧЕТ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА СО СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

### 9.2.1. Исходные данные

Двигатель постоянного тока со смешанным возбуждением работает в номинальном режиме (рис. 9.2). Он имеет технические данные, приведенные в табл. 9.2: номинальную мощность на валу двигателя  $P_{2\text{н}}$ , номинальное напряжение  $U_{\text{н}}$ , ток, потребляемый двигателем из сети  $I_{\text{н}}$ , номинальную частоту вращения вала двигателя  $n_{\text{н}}$ , сопротивление обмотки возбуждения  $R_{\text{в}}$ , номинальный коэффициент полезного действия  $\eta_{\text{н}}$ .

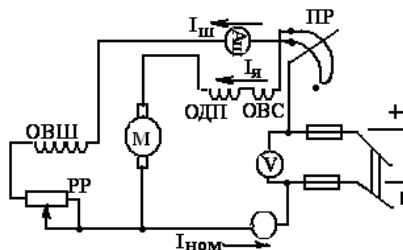


Рис. 9.2. Схема двигателя постоянного тока со смешанным возбуждением

**Требуется определить:**

1. Значения токов нагрузки, возбуждения и якоря.
2. Потери мощности в якоре, обмотке возбуждения и щеточном контакте. Потери холостого хода, добавочные потери и суммарные потери мощности.
3. ЭДС генератора.

Таблица 9.1. Исходные данные для расчета генератора постоянного тока с параллельным возбуждением

Варианты	Данные для расчета				
	$P_n$	$U_n$	$R_{я}$	$R_{в}$	$\eta_n$
	Вт	В	Ом	Ом	%
1	2	3	4	5	6
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					

Окончание табл. 9.1

1	2	3	4	5	6
10					
11					
12					
13					
14					
15					

**9.1.2. Методические рекомендации по решению задачи**

Для расчета генератора постоянного тока с параллельным возбуждением необходимо усвоить устройство и принцип действия электрических машин постоянного тока.

Электродвижущая сила  $E$  генератора определяется по формуле:

$$E = U_n + I_{я} \cdot R_{я}, \quad (9.1)$$

где  $U_n$  – номинальное напряжение, В;

$I_a$  – ток обмотки якоря, А;

$R_a$  – сопротивление цепи якоря, Ом.

Ток якоря  $I_a$  можно найти, сложив ток нагрузки генератора  $I_n$  и ток обмотки возбуждения  $I_b$

$$I_a = I_n + I_b. \quad (9.2)$$

Ток нагрузки определяют по формуле

$$I_n = \frac{P_n}{U_n}, \quad (9.3)$$

где  $P_n$  – номинальная мощность генератора, Вт.

Для нахождения тока обмотки возбуждения используют следующее выражение

$$I_b = \frac{U_n}{R_b}, \quad (9.3)$$

где  $R_b$  – сопротивление обмотки возбуждения, Ом.

Номинальный КПД генератора  $\eta_n$  определяется по формуле

$$\eta_n = \frac{P_n}{P_1} \times 100, \quad (9.4)$$

где  $P_1$  – мощность, потребляемая генератором от первичного двигателя, Вт. Она находится:

$$P_1 = P_n + \Sigma P, \quad (9.5)$$

где  $\Sigma P$  – суммарные потери мощности в генераторе, Вт.

Суммарные потери мощности  $\Sigma P$  состоят из потерь мощности в якоре  $P_a$ , потерь мощности в обмотке возбуждения  $P_b$ , потерь мощности в щеточном контакте  $P_{щ}$ , потерь холостого хода  $P_x$  и добавочных потерь  $P_{доб}$ :

$$\Sigma P = P_a + P_b + P_{щ} + P_x + P_{доб}. \quad (9.6)$$

Потери мощности в обмотке якоря и обмотке возбуждения можно определить из следующих выражений:

$$P_a = I_a^2 \cdot R_a; \quad (9.7)$$

$$P_b = I_b^2 \cdot R_b. \quad (9.8)$$

Потери мощности в щеточном контакте зависят от величины падения напряжения на щетках

$$P_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_{\text{я}}, \quad (9.9)$$

где  $\Delta U_{\text{щ}}$  – падение напряжения на щетках генератора, В. Для графитных щеток  $\Delta U_{\text{щ}} = 2$  В.

Добавочные потери мощности  $P_{\text{доб}}$  обычно составляют 1% от номинальной мощности

$$P_{\text{доб}} = 0,01 \cdot P_{\text{н}}. \quad (9.10)$$

### 9.1.3. Пример решения задачи

Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением (рис. 9.1) имеет следующие технические данные: номинальную мощность  $P_{\text{н}} = 16000$  Вт, номинальное напряжение  $U_{\text{н}} = 230$  В, сопротивление обмотки якоря  $R_{\text{я}} = 0,13$  Ом, сопротивление обмотки возбуждения  $R_{\text{в}} = 164$  Ом, номинальный коэффициент полезного действия  $\eta_{\text{н}} = 90,1\%$ .

Необходимо определить значения токов нагрузки, возбуждения и якоря; потери мощности в якоре, обмотке возбуждения и щеточном контакте, потери холостого хода, добавочные потери и суммарные потери мощности; ЭДС генератора.

#### Решение

1. Ток нагрузки генератора:

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} = \frac{16000}{230} = 69,6 \text{ А.}$$

2. Ток возбуждения генератора:

$$I_{\text{в}} = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{в}}} = \frac{230}{164} = 1,4 \text{ А.}$$

3. Ток обмотки якоря:

$$I_{\text{я}} = I_{\text{н}} + I_{\text{в}} = 69,6 + 1,4 = 71 \text{ А.}$$

4. Мощность, потребляемая генератором от первичного двигателя:

$$P_1 = \frac{P_u}{\eta_n} = \frac{16000}{0,901} = 17758 \text{ Вт.}$$

5. Суммарные потери мощности:

$$\Sigma P = P_1 - P_n = 17758 - 16000 = 1758 \text{ Вт.}$$

6. Потери мощности в обмотке якоря:

$$P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{я}} = 71^2 \cdot 0,13 = 655 \text{ Вт.}$$

7. Потери мощности в обмотке возбуждения:

$$P_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 \cdot R_{\text{в}} = 1,4^2 \cdot 164 = 321 \text{ Вт.}$$

8. Потери мощности в щеточном контакте:

$$P_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_{\text{я}} = 2 \cdot 71 = 142 \text{ Вт.}$$

9. Добавочные потери мощности:

$$P_{\text{доб}} = 0,01 \cdot P_n = 0,01 \cdot 16000 = 160 \text{ Вт.}$$

10. Потери холостого хода:

$$P_x = \Sigma P - (P_{\text{я}} + P_{\text{в}} + P_{\text{щ}} + P_{\text{доб}}) = 1758 - (655 + 321 + 142 + 160) = 480 \text{ Вт.}$$

11. ЭДС генератора:

$$E = U_n + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} = 230 + 71 \cdot 0,13 = 239,23 \text{ В.}$$