

**Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учрежде-  
ние высшего профессионального образования  
Уфимский государственный авиационный технический университет**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА**

**Методические указания  
к выполнению расчетно-графических работ  
по дисциплинам  
«Электротехника и электроника» и  
«Общая электротехника и электроника»**

**Уфа 2012**

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Уфимский государственный авиационный технический университет

Кафедра теоретических основ электротехники

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Методические указания  
к выполнению расчетно-графических работ  
по дисциплинам  
«Электротехника и электроника» и  
«Общая электротехника и электроника»

Уфа 2012

Составители: Р.В. Ахмадеев, И.В. Вавилова, П.А. Грахов,  
Т.М. Крымская, О.В. Мельничук

УДК 621.3 (07)

ББК 31.2 (я7)

Э45

Электрические цепи и электромагнитные устройства: Методические указания к выполнению расчетно-графических работ по дисциплинам «Электротехника и электроника» и «Общая электротехника и электроника» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост.: Р.В. Ахмадеев, И.В. Вавилова, П.А. Грахов, Т.М. Крымская, О.В. Мельничук.-Уфа, 2012. – 84с.

Методические указания содержат варианты заданий по расчетно-графическим работам и рекомендации по их выполнению.

Методические указания соответствуют требованиям, предъявляемым Государственным образовательным стандартом к содержанию дисциплин «Электротехника и электроника» и «Общая электротехника и электроника».

Методические указания предназначены для студентов направлений подготовки бакалавров и дипломированных специалистов: 150201, 150202, 150204, 150206, 150207, 50400, 150500, 150600, 150702, 150900, 151000, 200500, 200503, 220400, 230300.

Предназначено для студентов вышеуказанных специальностей и направлений подготовки очной, очно-заочной и заочной форм обучения, включая филиалы.

Табл. 14. Ил.62. Библиогр.: 9 назв.

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. кафедры ТОЭ УГАТУ  
А.Р. Фатхиев;  
канд. техн. наук, доц. кафедры ЭМ УГАТУ  
Ю.В. Афанасьев.

© Уфимский государственный авиационный  
технический университет, 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Задача ЭЦ-1. Расчет линейной электрической цепи постоянного тока.....	7
Задача ЭЦ-2. Расчет электрической цепи однофазного синусоидального тока.....	6
Задача ЭЦ-3. Расчет трехфазной цепи .....	35
Задача МЦ-2. Расчет характеристик силовых трансформаторов.....	51
Задача ЭМ-3. Расчет характеристик асинхронных двигателей.....	63
Критерии результативности расчетно-графических работ.....	75
Приложение П-1. Конструктивное исполнение электрических машин.....	76
Приложение П-2. Пример оформления титульного листа.....	82
Литература.....	83

## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания к выполнению расчетно-графических работ являются составной частью учебно-методического комплекса (УМК) по дисциплинам «Электротехника и электроника» и «Общая электротехника и электроника» для следующих направлений и специальностей подготовки специалистов и бакалавров: 150201 Машины и технология обработки металлов давлением, 150202 Оборудование и технология сварочного производства, 150204 Машины и технология литейного производства, 150206 Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов, 150207 Реновация средств и объектов материального производства в машиностроении, 150400 Технологические машины и оборудование, 150500 Материаловедение и технологии материалов и покрытий, 150600 Материаловедение и технологии новых материалов, 150702 Физика металлов, 150900 Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств, 151000 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 200500 Метрология, Стандартизация и сертификация, 200503 Стандартизация и сертификация, 220400 Мехатроника и робототехника, 230300 Организационно-технические системы.

Тематика и содержание расчетно-графических работ (РГР) составлены в соответствии с требованиями Государственных образовательных стандартов и рекомендациями типовой программы дисциплины «Электротехника и электроника», рекомендованной Минобразованием России для направлений подготовки бакалавров и специалистов в области техники и технологии.

*Целью РГР* является развитие инженерного мышления, приобретение знаний, необходимых для изучения специальных дисциплин, связанных с проектированием и эксплуатацией электротехнического оборудования.

Выполнение студентами РГР способствует получению ими знаний, умений и навыков, необходимых для квалифицированного использования того или иного электротехнического устройства в процессе решения проектно-конструкторских задач, а также правильного выбора необходимых электротехнических, электронных и электроизмерительных устройств; умению правильно эксплуатировать эти уст-

ройства и составлять совместно с инженерами-электриками технические задания на разработку электрических частей автоматизированных устройств для управления энергетическими установками и гидроприводами.

В процессе выполнения РГР приобретаются практические навыки по построению моделей и схем замещения электрических цепей, электромагнитных устройств, электрических машин, а также расчету основных эксплуатационных характеристик электротехнического оборудования, необходимых как при изучении дальнейших специальных дисциплин, так и в практической деятельности инженеров-механиков при работе с технологическим оборудованием, имеющим электрический привод и современные измерительные системы.

В результате выполнения РГР студент

*получает практическое представление о*

- методах анализа электрических и магнитных цепей;
- принципах действия, эксплуатационных особенностях и критериях выбора электромагнитных устройств, электрических машин и приборов;

- принципах действия и возможностях применения электроизмерительных приборов и способах измерения электрических величин.

*учится:*

- использовать основные свойства и характеристики электрических цепей;

- различать принципы действия, конструктивные и эксплуатационные особенности электрических машин и приводов;

- изображать электрические схемы по требованиям к оформлению технической документации и изображения электротехнических систем в соответствии с ЕСКД и ГОСТ;

*приобретает навыки:*

- практического анализа работы электрических цепей и выполнения простейших оценочных электромагнитных расчетов;

- чтения и расчета электротехнических схем и расчета основных характеристик электротехнических устройств;

- выбора средств и методов расчета, измерений, оценки достоверности получаемых результатов.

Каждое задание расчетно-графической работы содержит условие задачи, поясняющий текст, а также рекомендации по преобразо-

ванию схемы и ссылки на литературу, где разобраны аналогичные задачи.

В зависимости от специальности задание может корректироваться преподавателем в соответствии с учебной программой дисциплины.

Пояснительная записка к расчетно-графической работе оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-79 «Общие требования к текстовым документам», ГОСТ 2.106-68 «Текстовые документы».

Пояснительная записка выполняется на листах на одной стороне листа формата А4 с основной надписью. Титульный лист является первым листом. Пример оформления титульного листа приведен в приложении.

Каждая расчетно-графическая работа должна содержать следующие основные части:

- расчетная схема с подклеенной машинной распечаткой индивидуального задания и условия задачи,
- расчет, с обоснованием и объяснением проделанной работы,
- необходимые графики и векторные или временные диаграммы.

При оформлении работы следует руководствоваться следующими правилами.

1. Рисунки, графики, схемы выполняются в соответствии с требованиями ГОСТ 2.702-75.

2. Расчет каждой искомой величины следует выполнять сначала в общем виде, а затем в полученную формулу подставить числовые значения и привести окончательный результат с указанием единицы измерения. Решение задач не следует перегружать приведением всех алгебраических преобразований и арифметических расчетов.

3. В ходе решения задачи не следует изменять однажды принятые направления токов, напряжений, наименование узлов и т.д. При решении одной и той же задачи различными методами одна и та же величина должна обозначаться одним и тем же буквенным символом.

Нумерация страниц должна быть сквозной, включая иллюстрации и графики.

## 1. Расчетно-графическая работа ЭЦ-1

### РАСЧЕТ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Цель работы:* теоретическое изучение методов анализа сложных электрических цепей постоянного тока.

*Задачи работы:* в результате выполнения расчетно-графической работы студенты должны:

- знать основные законы электротехники и методы расчета электрических цепей, на которых они базируются;
- уметь выполнять простейшие электрические расчеты; оформлять электротехнические схемы в соответствии с требованиями ГОСТ;
- иметь навыки составления математических моделей для расчета электрических цепей, оценки достоверности получаемых результатов и обработки результатов, полученных разными методами.

#### 1.1. Задание

Для заданной схемы (рис.1.1 - 1.28) требуется:

- 1) определить токи в ветвях с помощью уравнений, составленных по законам Кирхгофа;
- 2) определить токи в ветвях методом контурных токов;
- 3) определить токи в ветвях методом узловых потенциалов;
- 4) определить токи в ветвях методом наложения;
- 5) составить уравнение баланса мощностей;
- 6) определить показания вольтметра;
- 7) определить ток  $I_1$  в ветви с сопротивлением  $R_1$  по методу эквивалентного генератора и построить график зависимости  $I_1 = f(R_1)$  при изменении  $R < R_1 < 10R$ .

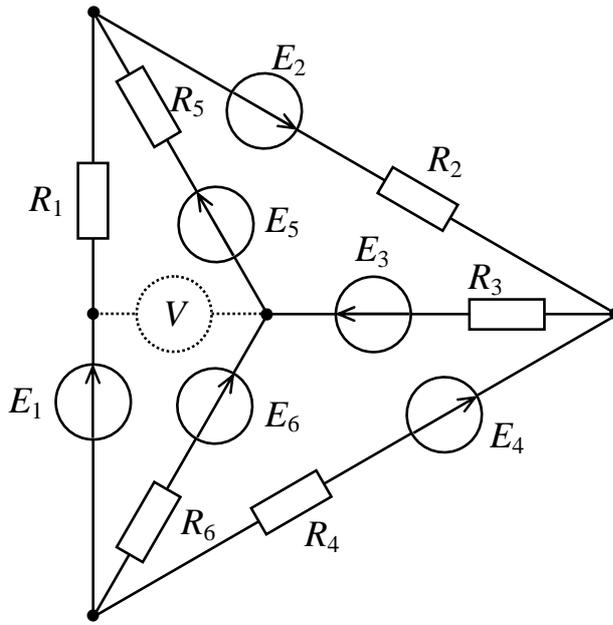
Номер схемы, её параметры ( $R_i, E_i$ ) выдаются преподавателем каждому студенту индивидуально в виде распечатки на ЭВМ или из табл.1.1 и 1.2.

Таблица 1.1

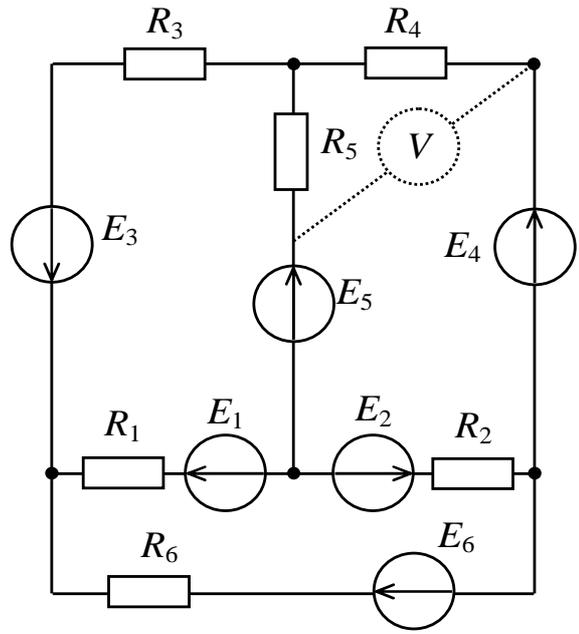
Число десятков в номере задания	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_5$
0	-	-	+	+	-	+
1	+	-	-	+	-	+
2	-	-	+	+	-	-
3	+	-	-	+	+	-
4	-	+	-	+	+	-
5	+	+	-	+	-	-
6	+	+	-	-	+	-
7	-	+	+	-	+	-
8	-	+	+	-	-	+
9	+	-	+	-	-	+

Таблица 1.2

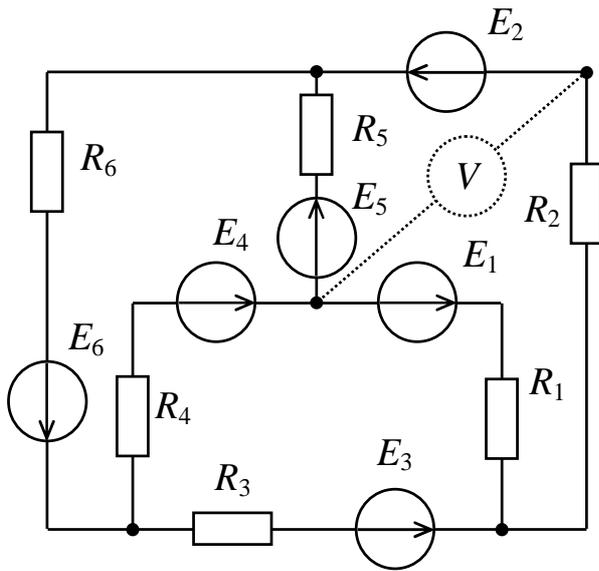
Число единиц в номере задания	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$
0	-42	14	-43	56	36	49	93	16	31	58	10	46
1	30	45	11	-55	75	10	11	75	48	35	63	87
2	23	44	54	10	19	-41	39	43	34	91	26	79
3	80	-53	19	35	-29	27	96	16	85	40	62	91
4	16	12	39	18	25	48	77	12	69	70	84	49
5	40	-44	19	-50	17	51	87	81	27	37	12	78
6	45	33	-48	51	22	-42	12	95	11	18	17	46
7	25	-13	44	-49	24	41	42	23	20	73	65	94
8	47	11	19	-29	-51	31	66	68	58	34	18	96
9	-31	26	30	38	20	-39	89	15	40	24	48	30



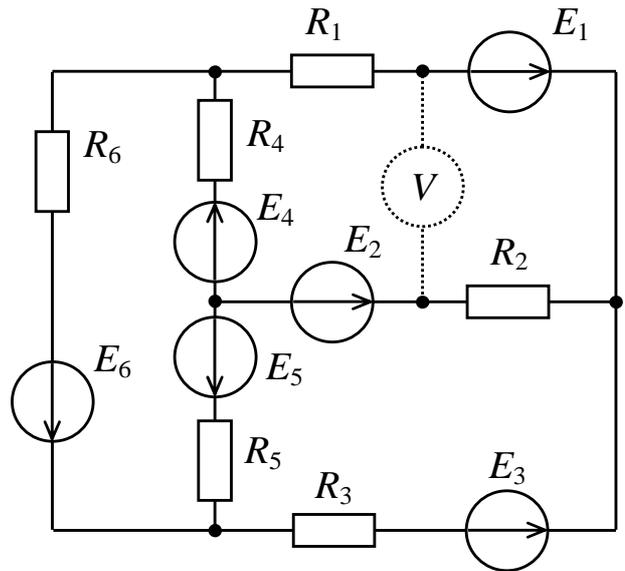
*Puc. 1.1*



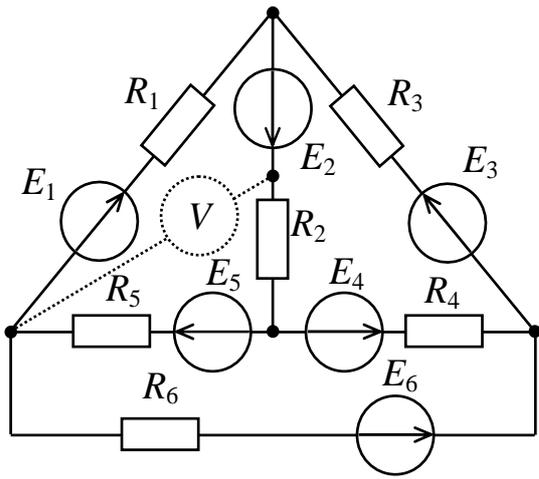
*Puc. 1.2*



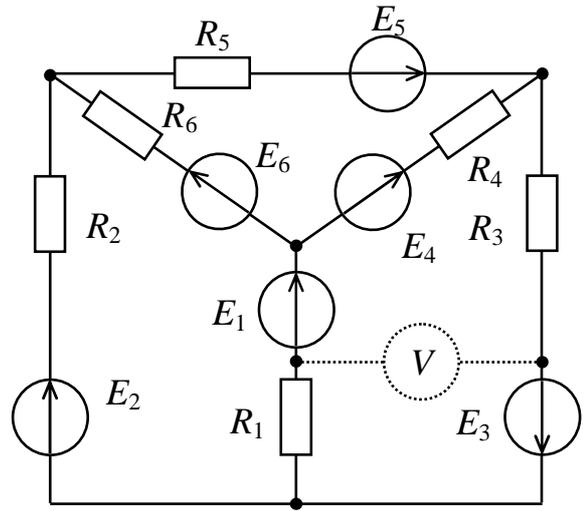
*Puc. 1.3*



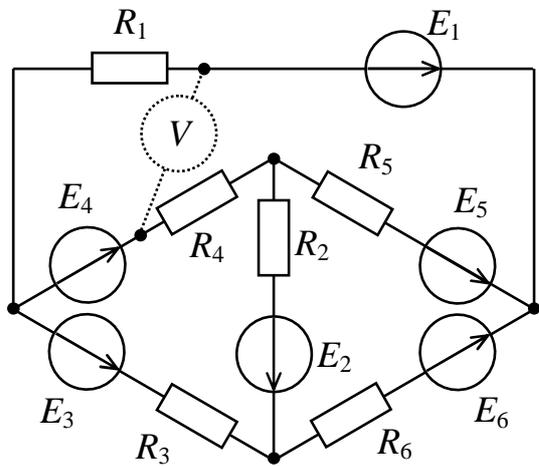
*Puc. 1.4*



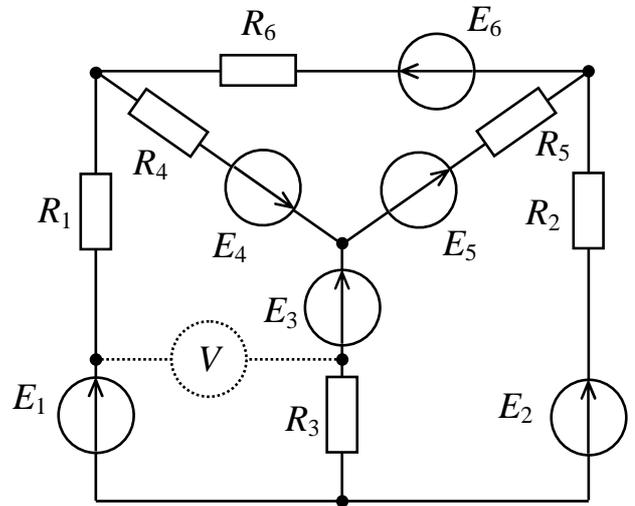
*Puc. 1.5*



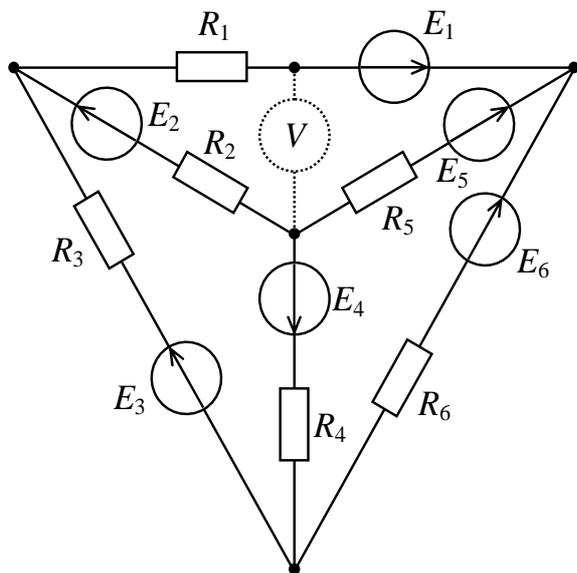
*Puc. 1.6*



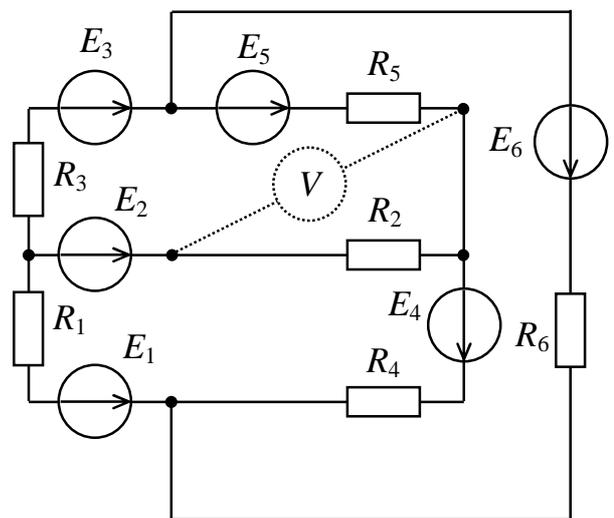
*Puc. 1.7*



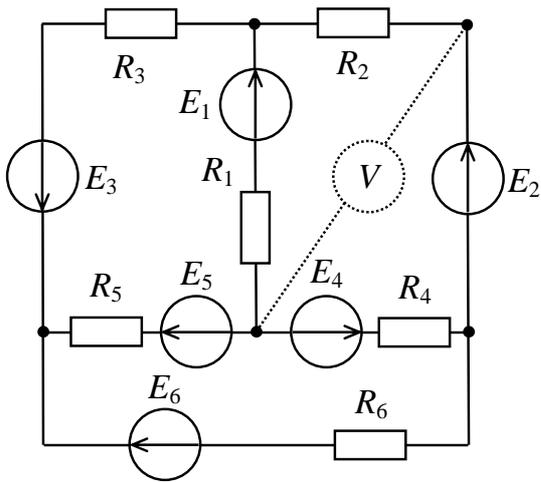
*Puc. 1.8*



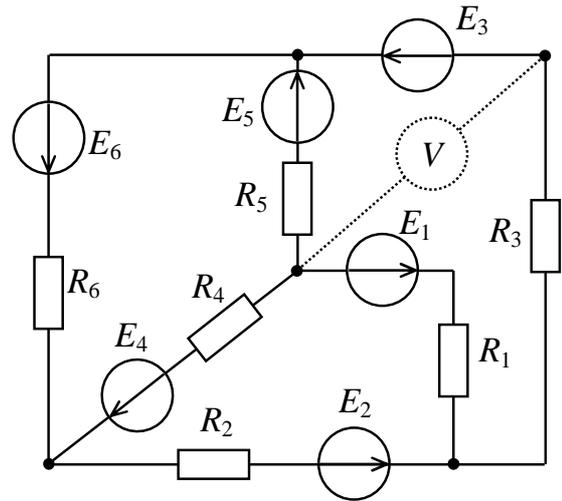
*Puc. 1.9*



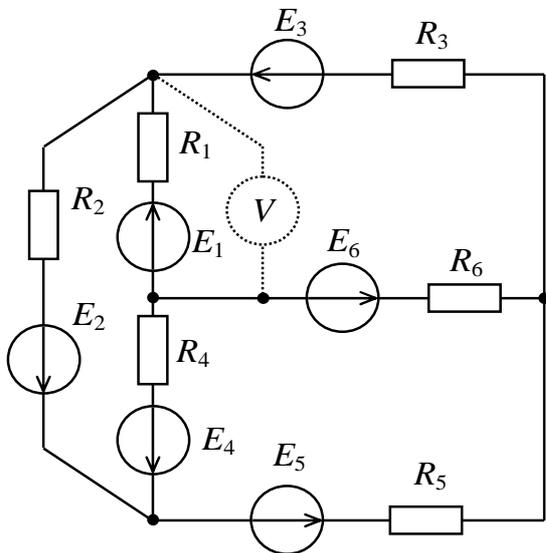
*Puc. 1.10*



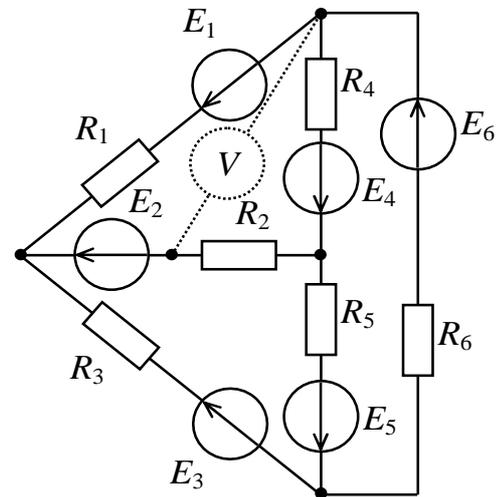
*Puc. 1.11*



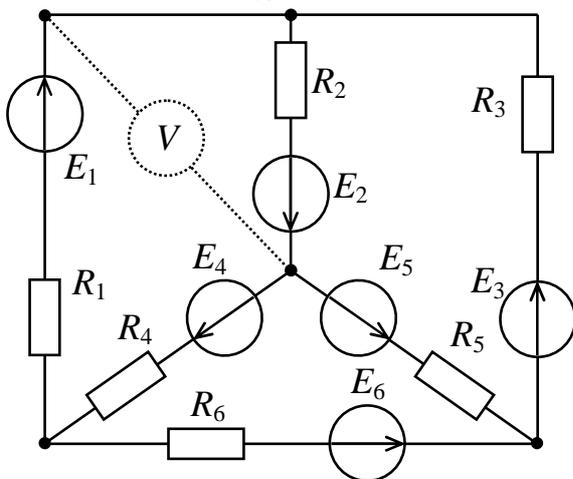
*Puc. 1.12*



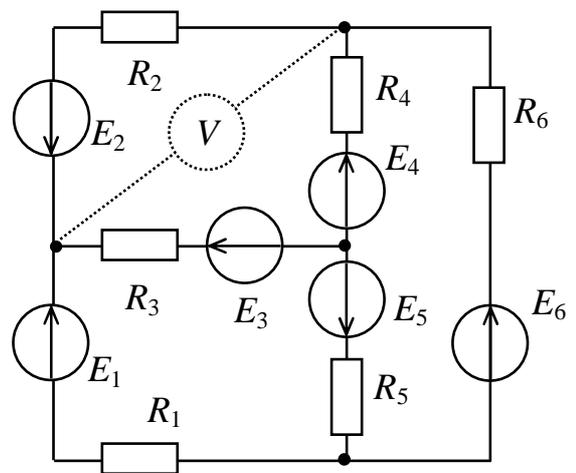
*Puc. 1.13*



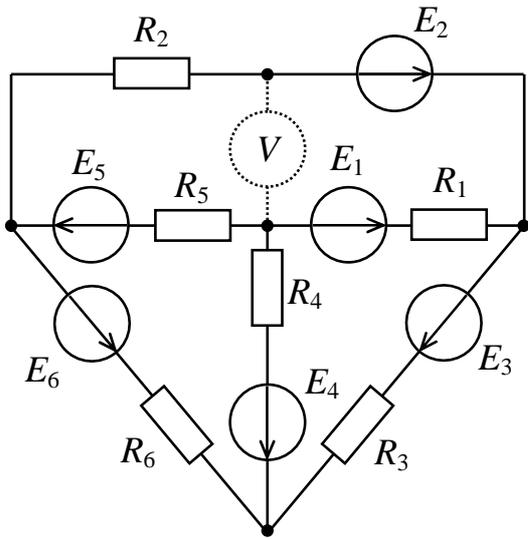
*Puc. 1.14*



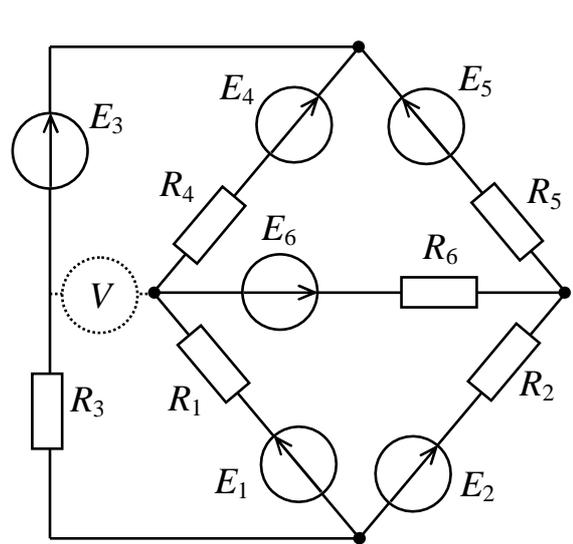
*Puc. 1.15*



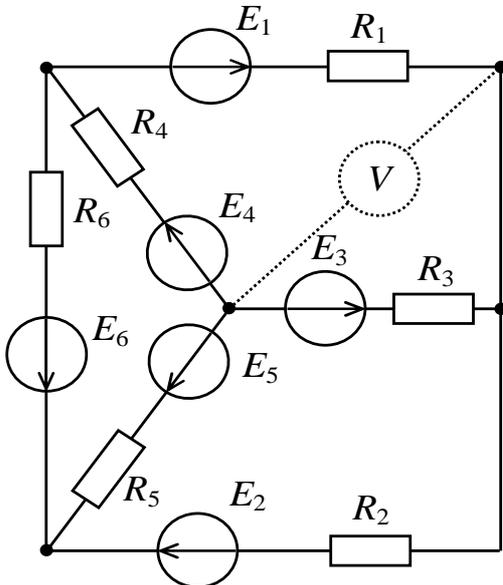
*Puc. 1.16*



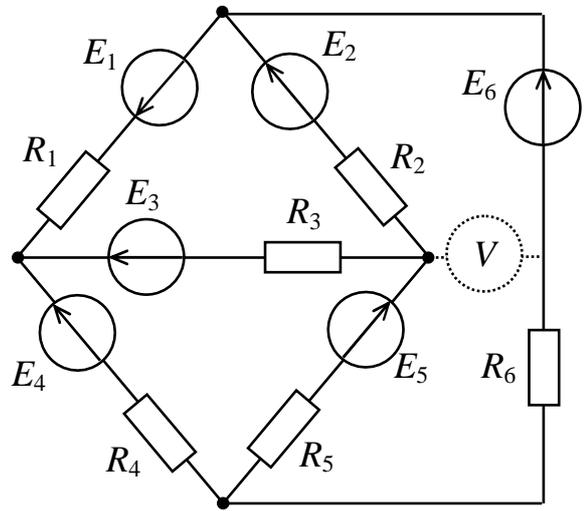
*Puc. 1.17*



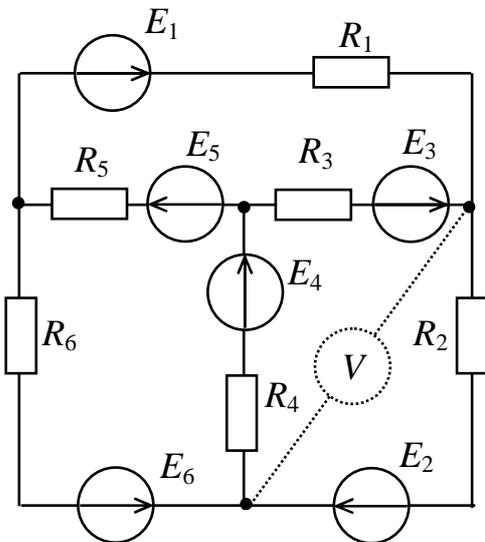
*Puc. 1.18*



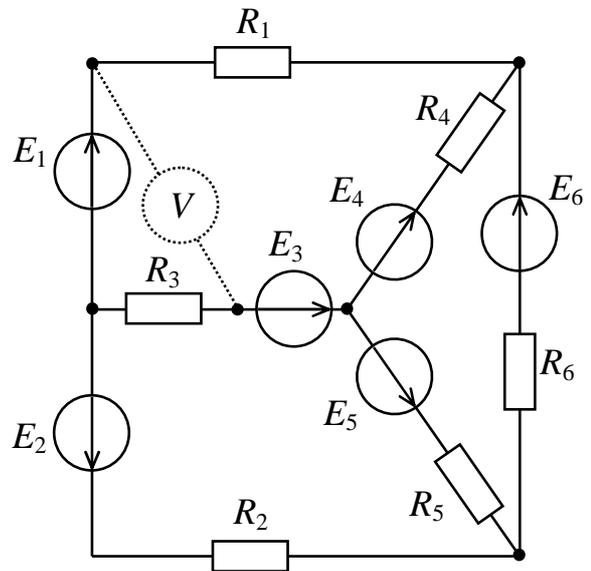
*Puc. 1.19*



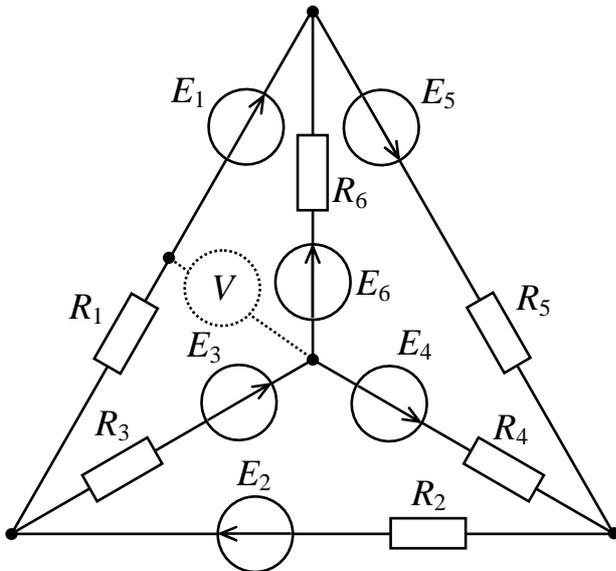
*Puc. 1.20*



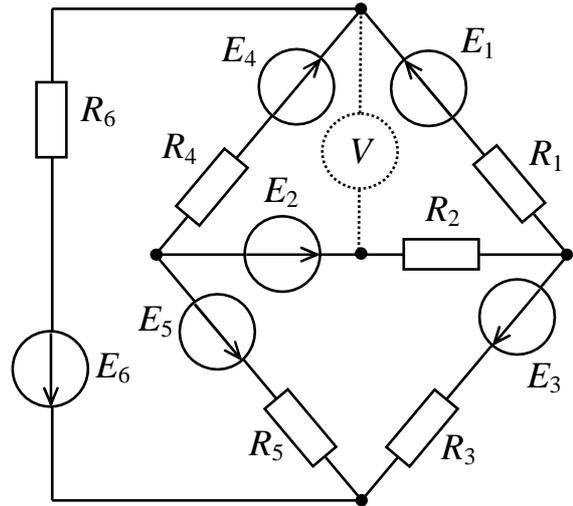
*Puc. 1.21*



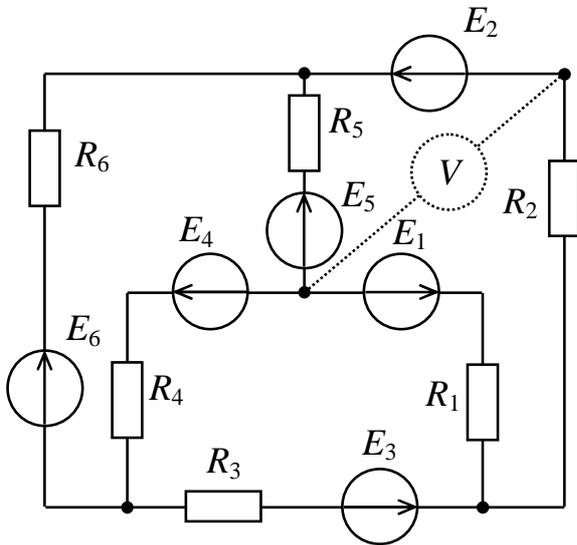
*Puc. 1.22*



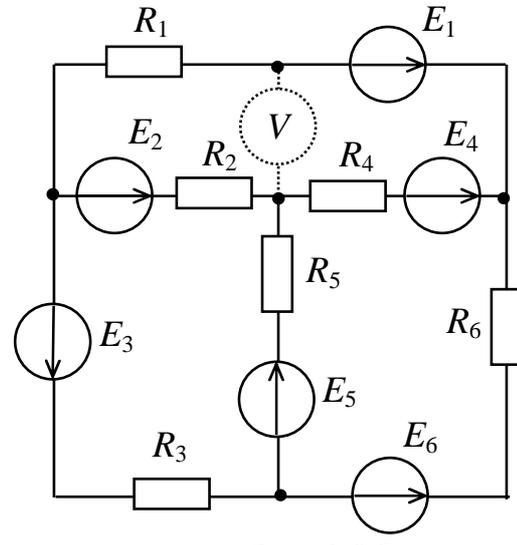
*Puc. 1.23*



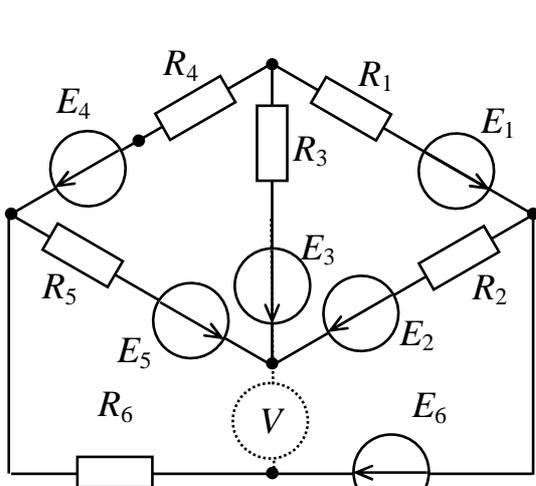
*Puc. 1.24*



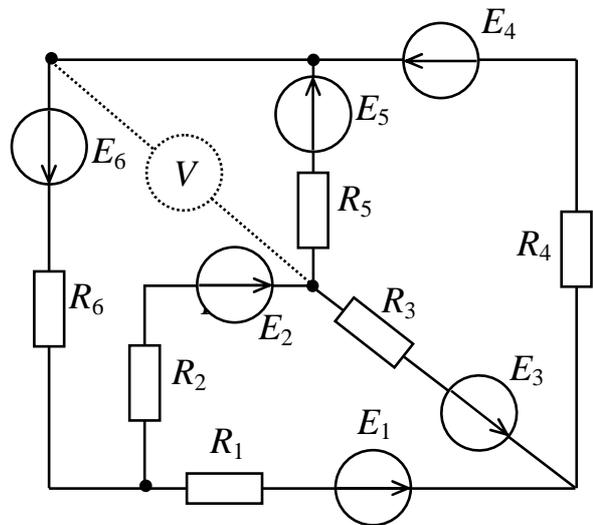
*Puc. 1.25*



*Puc. 1.26*



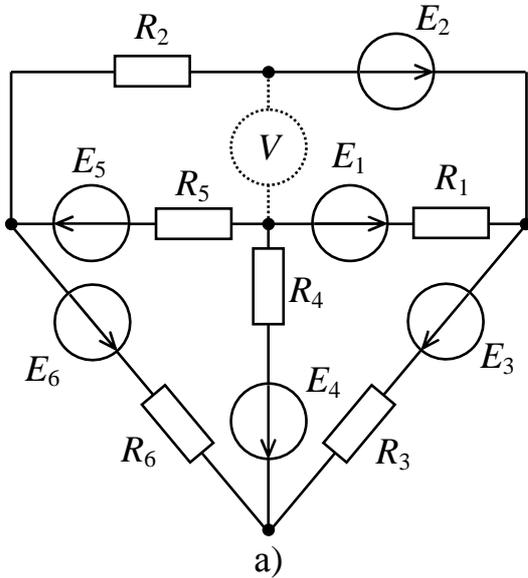
*Puc. 1.27*



*Puc. 1.28*

## 1.2. Методические рекомендации

По исходной схеме электрической цепи, например рис. 1.29, а и машинной распечатке индивидуального задания (рис. 1.29, б) сформируйте свою расчетную схему (рис. 1.30). Участок цепи, где величина источника ЭДС приравнена к нулю – закорачивается.



С80-106854-17  
 $R_1 = 39$   $R_2 = 34$   
 $R_3 = 78$   $R_4 = 71$   
 $R_5 = 88$   $R_6 = 22$   
 $E_1 = 0$   $E_2 = 0$   
 $E_3 = 0$   $E_4 = -69$   
 $E_5 = 18$   $E_6 = -39$

б)

Рис. 1.29

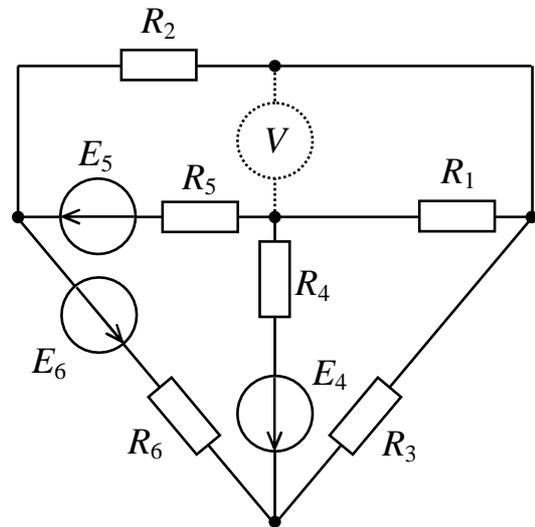


Рис. 1.30

В машинной распечатке индивидуального задания сопротивления резисторов  $R$  указаны в Омах [Ом], величины источников ЭДС  $E$  – в Вольтах [В].

Перед выполнением задания рекомендуется ознакомиться с задачами 2.1-2.9. учебного пособия [9].

## 1.3. Примеры расчёта линейных электрических цепей постоянного тока с несколькими источниками ЭДС

**Задача 1.3.1.** Рассчитать цепь методом непосредственного применения законов Кирхгофа. Составить баланс мощностей. Схема электрической цепи приведена на рис. 1.31. Параметры цепи:  $E_1 = 9$ , В;

$E_5 = 45, \text{ В}; R_1 = 19,5, \text{ Ом}; R_2 = 7,5, \text{ Ом}; R_3 = 13,5, \text{ Ом}; R_4 = 10,5, \text{ Ом}; R_5 = 15, \text{ Ом}; R_6 = 6, \text{ Ом}.$

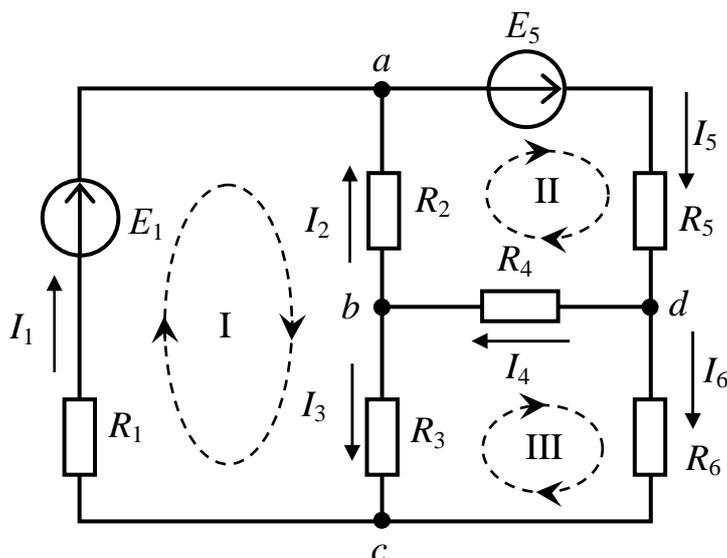


Рис. 1.31

*Решение*

Под понятием «рассчитать цепь» предполагается определение токов в ветвях.

Определяется количество ветвей в цепи: общее число ветвей -  $n_B=6$ , с источником тока  $n_J=0$  ветвей. Значит необходимо составить 6 независимых уравнений по законам Кирхгофа.

На основании теоремы о независимости уравнений определяется количество уравнений по I и по II законам Кирхгофа.

Количество уравнений, составляемых по первому закону Кирхгофа

$$n_I = n_y - 1 = 4 - 1 = 3,$$

где  $n_y=4$  – количество потенциальных узлов.

Уравнения составляются для любых узлов.

Количество уравнений, составляемых по второму закону Кирхгофа

$$n_{II} = n_B - n_J - (n_y - 1) = 6 - 0 - (4-1) = 3.$$

Уравнения составляются для независимых замкнутых контуров.

Выбираются положительные направления токов и обозначаются стрелками. Так же стрелками обозначаются направления обхода независимых контуров: I, II, III.

Уравнения по первому закону для узлов:

$$\text{узел } a: I_1 + I_2 - I_5 = 0;$$

$$\text{узел } b: -I_2 - I_3 + I_4 = 0;$$

$$\text{узел } c: -I_1 + I_3 + I_6 = 0.$$

Уравнения по второму закону для контуров:

$$\begin{aligned} \text{контур I: } & R_1 \cdot I_1 - R_2 \cdot I_2 + R_3 \cdot I_3 = E_1; \\ \text{контур II: } & R_2 \cdot I_2 + R_5 \cdot I_5 + R_4 \cdot I_4 = E_5; \\ \text{контур III: } & -R_3 \cdot I_3 - R_4 \cdot I_4 + R_6 \cdot I_6 = 0. \end{aligned}$$

Система уравнений в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ R_1 & -R_2 & R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & R_4 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & -R_3 & -R_4 & 0 & R_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_1 \\ E_5 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Система уравнений в матричной форме после подстановки численных значений:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 19,5 & -7,5 & 13,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7,5 & 0 & 10,5 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & -13,5 & -10,5 & 0 & 6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 9 \\ 45 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Решение системы уравнений на компьютере можно получить при помощи разработанной на кафедре ТОЭ УГАТУ программы «Gauss», а также стандартных математических пакетов, таких как *MatCad* или *Maple* и др.

Решением данной системы уравнений, являются следующие значения токов:

$$\begin{aligned} I_1 &= 0,9465, \text{ А}; & I_2 &= 0,9826, \text{ А}; & I_3 &= -0,1546, \text{ А}; \\ I_4 &= 0,8280, \text{ А}; & I_5 &= 1,9291, \text{ А}; & I_6 &= 1,1011, \text{ А}. \end{aligned}$$

Проверка полученного решения производится составлением баланса мощностей, потребляемых резисторами и получаемых от источников:

$$\begin{aligned} P_{\text{потр}} &= R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 + R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2 + R_5 \cdot I_5^2 + R_6 \cdot I_6^2 = \\ &= 19,5 \cdot 0,9465^2 + 7,5 \cdot 0,9826^2 + 13,5 \cdot (-0,1546)^2 + 10,5 \cdot 0,8280^2 + \\ &\quad + 15 \cdot 1,9291^2 + 6 \cdot 1,1011^2 = 95,3278, \text{ Вт}, \\ P_{\text{ист}} &= E_1 \cdot I_1 + E_5 \cdot I_5 = 9 \cdot 0,9465 + 45 \cdot 1,9291 = 95,3280, \text{ Вт}. \end{aligned}$$

$$P_{\text{потр}} = P_{\text{ист.}}$$

Баланс мощностей сходится.

*Задача 1.3.2.* Рассчитать цепь задачи 1.3.1 методом контурных токов. Составить баланс мощностей.

*Решение*

Определяется количество независимых контуров в цепи:

$$n_{\text{II}} = n_{\text{В}} - n_{\text{J}} - (n_{\text{У}} - 1) = 6 - 0 - (4 - 1) = 3,$$

где  $n_{\text{В}}=6$  - общее число ветвей в цепи;

$n_{\text{J}}=0$  - число ветвей, содержащих источник тока;

$n_{\text{У}}=4$  - количество потенциальных узлов.

Выберем  $n_{\text{II}} = 3$  независимых контура и положительные направления контурных токов ( $I_{\text{I}}$ ,  $I_{\text{II}}$ ,  $I_{\text{III}}$ ), протекающих в них (рис. 1.32).

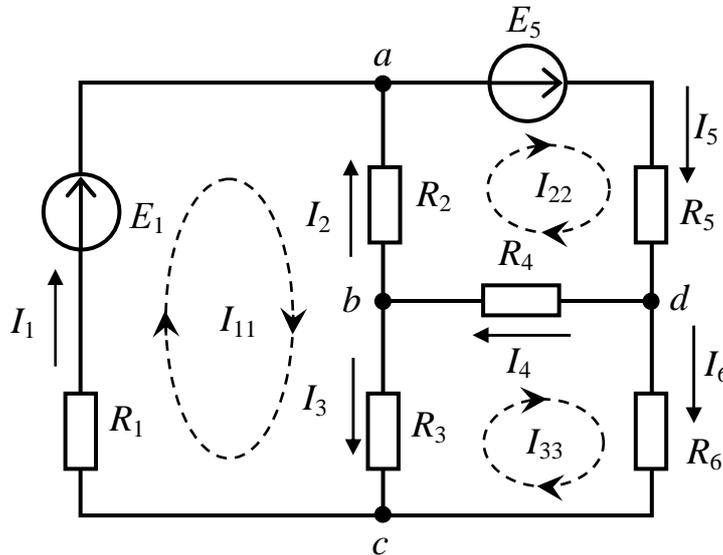


Рис. 1.32

Составляется система уравнений по методу контурных токов для независимых контуров:

$$(R_1 + R_2 + R_3) \cdot I_{11} - R_2 \cdot I_{22} - R_3 \cdot I_{33} = E_1;$$

$$-R_2 \cdot I_{11} + (R_2 + R_4 + R_5) \cdot I_{22} - R_4 \cdot I_{33} = E_5;$$

$$-R_3 \cdot I_{11} - R_4 \cdot I_{22} + (R_3 + R_4 + R_6) \cdot I_{33} = 0.$$

Подставляются численные значения в уравнения системы

$$(19,5 + 7,5 + 13,5) \cdot I_{11} - 7,5 \cdot I_{22} - 13,5 \cdot I_{33} = 9;$$

$$-7,5 \cdot I_{11} + (7,5 + 10,5 + 15) \cdot I_{22} - 10,5 \cdot I_{33} = 45;$$

$$-13,5 \cdot I_{11} - 10,5 \cdot I_{22} + (13,5 + 10,5 + 6) \cdot I_{33} = 0.$$

Система уравнений в матричной форме после подстановки численных значений принимает вид:

$$\begin{bmatrix} 40,5 & -7,5 & -13,5 \\ -7,5 & 33 & -10,5 \\ -13,5 & -10,5 & 30 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9 \\ 45 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Решением данной системы уравнений являются следующие значения контурных токов:

$$I_{11} = 0,9465, \text{ A}; \quad I_{22} = 1,9291, \text{ A}; \quad I_{33} = 1,1011, \text{ A}.$$

Выбираются положительные направления токов в рассматриваемой схеме и обозначаются стрелками (рис. 1.32). Токи в ветвях схемы выражаются через контурные токи:

$$I_1 = I_{11} = 0,9465, \text{ A};$$

$$I_2 = I_{22} - I_{11} = 1,9291 - 0,9465 = 0,9826, \text{ A};$$

$$I_3 = I_{11} - I_{33} = 0,9465 - 1,1011 = -0,1546, \text{ A};$$

$$I_4 = I_{22} - I_{33} = 1,9291 - 1,1011 = 0,8280, \text{ A};$$

$$I_5 = I_{22} = 1,9291, \text{ A};$$

$$I_6 = I_{33} = 1,1011, \text{ A}.$$

*Задача 1.3.3.* Рассчитать цепь задачи 1.3.2 методом узловых потенциалов. Определить показания вольтметра (рис. 1.33).

*Решение*

Выбираются условно положительные направления токов во всех ветвях схемы. Потенциал одного из узлов принимается равным нулю (заземляется). Пусть  $\varphi_{33} = 0, \text{ В}$  (рис. 1.33).

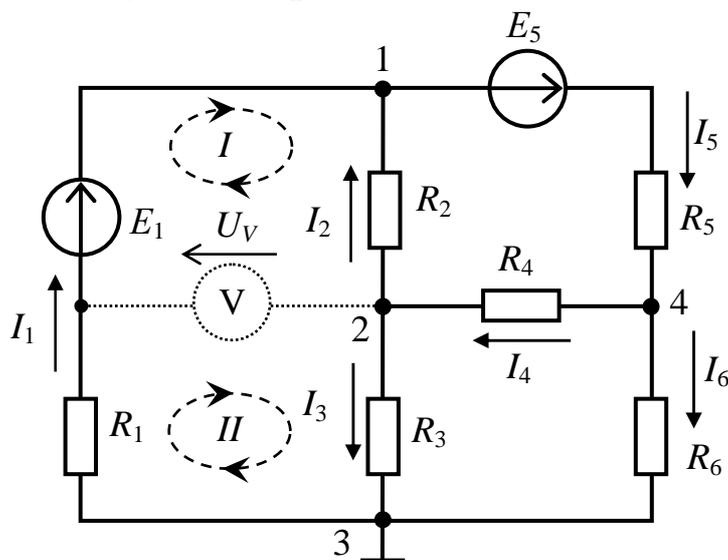


Рис. 1.33

Поскольку метод узловых потенциалов основан на первом законе Кирхгофа, то количество необходимых уравнений определяется следующим образом:

$$n_1 = n_y - 1 = 4 - 1 = 3,$$

где  $n_y=4$  – количество потенциальных узлов.

Составляется система уравнений из  $n_1$  уравнений относительно потенциалов незаземлённых узлов:

$$\begin{aligned} G_{11} \cdot \varphi_{11} - G_{12} \cdot \varphi_{22} - G_{14} \cdot \varphi_{44} &= J_{11}; \\ - G_{21} \cdot \varphi_{11} + G_{22} \cdot \varphi_{22} - G_{24} \cdot \varphi_{44} &= J_{22}; \\ - G_{41} \cdot \varphi_{11} - G_{42} \cdot \varphi_{22} + G_{44} \cdot \varphi_{44} &= J_{44}. \end{aligned}$$

где  $G_{ii}$  – собственная проводимость  $i$ -го узла;

$G_{ij}$  – взаимная проводимость  $i$ -го и  $j$ -го узлов;

$J_{ij}$  – узловой ток  $i$ -го узла.

Следовательно, систему можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot \varphi_{11} - \frac{1}{R_2} \cdot \varphi_{22} - \frac{1}{R_5} \cdot \varphi_{44} &= \frac{E_1}{R_1} - \frac{E_5}{R_5}; \\ -\frac{1}{R_2} \cdot \varphi_{11} + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right) \cdot \varphi_{22} - \frac{1}{R_4} \cdot \varphi_{44} &= 0; \\ -\frac{1}{R_5} \cdot \varphi_{11} - \frac{1}{R_4} \cdot \varphi_{22} + \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}\right) \cdot \varphi_{44} &= \frac{E_5}{R_5}. \end{aligned}$$

Решением данной системы уравнений являются следующие значения потенциалов узлов:

$$\varphi_{11} = -9,4567, \text{ В}; \quad \varphi_{22} = -2,0872, \text{ В}; \quad \varphi_{44} = 6,60671, \text{ В}.$$

Определяются токи во всех ветвях схемы из выражений, составленных на основе закона Ома:

$$I_1 = G_1 \cdot (\varphi_{33} - \varphi_{11} + E_1) = \frac{1}{R_1} \cdot (\varphi_{33} - \varphi_{11} + E_1) = 0,9465, \text{ A};$$

$$I_2 = G_2 \cdot (\varphi_{22} - \varphi_{11}) = \frac{1}{R_2} \cdot (\varphi_{22} - \varphi_{11}) = 0,9826, \text{ A};$$

$$I_3 = G_3 \cdot (\varphi_{22} - \varphi_{33}) = \frac{1}{R_3} \cdot (\varphi_{22} - \varphi_{33}) = -0,1546, \text{ A};$$

$$I_4 = G_4 \cdot (\varphi_{44} - \varphi_{22}) = \frac{1}{R_4} \cdot (\varphi_{44} - \varphi_{22}) = 0,8280, \text{ A};$$

$$I_5 = G_5 \cdot (\varphi_{11} - \varphi_{44} + E_5) = \frac{1}{R_5} \cdot (\varphi_{11} - \varphi_{44} + E_5) = 1,9291, \text{ A};$$

$$I_6 = G_6 \cdot (\varphi_{44} - \varphi_{33}) = \frac{1}{R_6} \cdot (\varphi_{44} - \varphi_{33}) = 1,1011, \text{ A}.$$

Показания вольтметра можно определить, составив уравнение согласно второму закону Кирхгофа для любого независимого замкнутого контура, содержащего вольтметр (рис. 1.33).

Для первого контура:

$$U_V - R_2 \cdot I_2 = E_1;$$

$$U_V = E_1 + R_2 \cdot I_2 = 9 + 7,5 \cdot 0,9826 = 16,3695, \text{ В}.$$

Для второго контура:

$$-U_V + R_1 \cdot I_1 + R_3 \cdot I_3 = 0;$$

$$U_V = R_1 \cdot I_1 + R_3 \cdot I_3 = 19,5 \cdot 0,9465 + 13,5 \cdot (-0,1546) = 16,3696, \text{ В}.$$

*Задача 1.3.4.* Рассчитать цепь задачи 1.3.3 методом наложения.

*Решение*

Определяется количество источников энергии в схеме:  $n_E = 2$ .

Составляется  $n_E$  схем с одним источником энергии для определения частичных токов, при этом все идеальные источники энергии кроме одного закорачивают. Выбираются условно положительные направления токов во всех ветвях схем (рис. 1.34).

Любой ток схемы определяется как алгебраическая сумма частичных токов, вызванных каждым источником электрической энергии в отдельности.

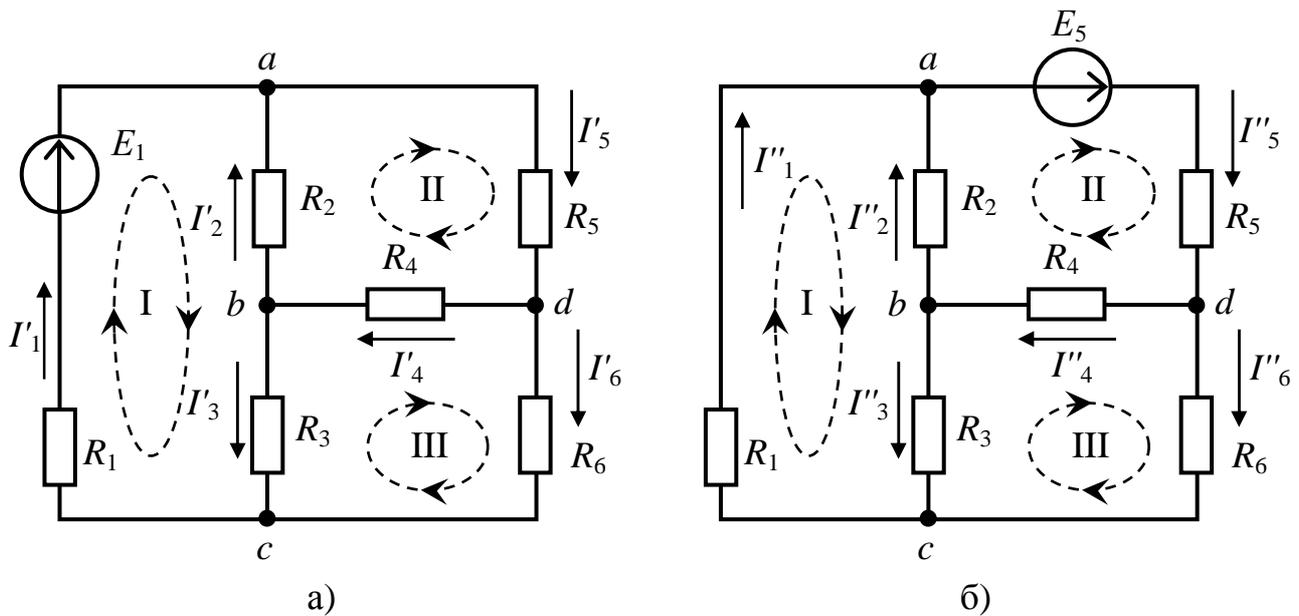


Рис. 1.34

Определить частичные токи, вызванные каждым источником электрической энергии в отдельности (рис. 1.34), любым известным методом, например по законам Кирхгофа.

Для схемы, изображенной на рис. 1.34, а:

$$\text{узел } a: I'_1 + I'_2 - I'_5 = 0;$$

$$\text{узел } b: -I'_2 - I'_3 + I'_4 = 0;$$

$$\text{узел } c: -I'_1 + I'_3 + I'_6 = 0.$$

$$\text{контур I: } R_1 \cdot I'_1 - R_2 \cdot I'_2 + R_3 \cdot I'_3 = E_1;$$

$$\text{контур II: } R_2 \cdot I'_2 + R_5 \cdot I'_5 + R_4 \cdot I'_4 = 0;$$

$$\text{контур III: } -R_3 \cdot I'_3 - R_4 \cdot I'_4 + R_6 \cdot I'_6 = 0.$$

Решением данной системы уравнений являются следующие значения токов:

$$I'_1 = 0,3069, \text{ А}; \quad I'_2 = -0,1789, \text{ А}; \quad I'_3 = 0,124, \text{ А};$$

$$I'_4 = -0,0549, \text{ А}; \quad I'_5 = 0,1279, \text{ А}; \quad I'_6 = 0,1829, \text{ А}.$$

Для схемы, изображенной на рис. 1.34, б):

$$\text{узел } a: I''_1 + I''_2 - I''_5 = 0;$$

$$\text{узел } b: -I''_2 - I''_3 + I''_4 = 0;$$

$$\text{узел } c: -I''_1 + I''_3 + I''_6 = 0.$$

$$\text{контур I: } R_1 \cdot I''_1 - R_2 \cdot I''_2 + R_3 \cdot I''_3 = 0;$$

$$\text{контур II: } R_2 \cdot I''_2 + R_5 \cdot I''_5 + R_4 \cdot I''_4 = E_5;$$

$$\text{контур III: } -R_3 \cdot I''_3 - R_4 \cdot I''_4 + R_6 \cdot I''_6 = 0.$$

Решением данной системы уравнений являются следующие значения токов:

$$I''_1 = 0,6396, \text{ A}; \quad I''_2 = 1,1615, \text{ A}; \quad I''_3 = -0,2786, \text{ A};$$

$$I''_4 = 0,8829, \text{ A}; \quad I''_5 = 1,8012, \text{ A}; \quad I''_6 = 0,9182, \text{ A}.$$

Определить токи схемы как алгебраическую сумму частичных токов:

$$I_1 = I'_1 + I''_1 = 0,3069 + 0,6396 = 0,9465, \text{ A};$$

$$I_2 = I'_2 + I''_2 = (-0,1789) + 1,1615 = 0,9826, \text{ A};$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = 0,124 + (-0,2786) = -0,1546, \text{ A};$$

$$I_4 = I'_4 + I''_4 = (-0,0549) + 0,8829 = 0,828, \text{ A};$$

$$I_5 = I'_5 + I''_5 = 0,1279 + 1,8012 = 1,9291, \text{ A};$$

$$I_6 = I'_6 + I''_6 = 0,1829 + 0,9182 = 1,1011, \text{ A}.$$

*Задача 1.3.5.* В схеме задачи 1.3.3 определить ток  $I_1$ .

*Решение*

Для определения тока в одной ветви самым рациональным является использование метода эквивалентного источника (генератора). Этот метод относится к методам частичного анализа цепей, т.е. не требует определения токов во всех ветвях. Исходная схема для расчета представлена на рис. 1.35.

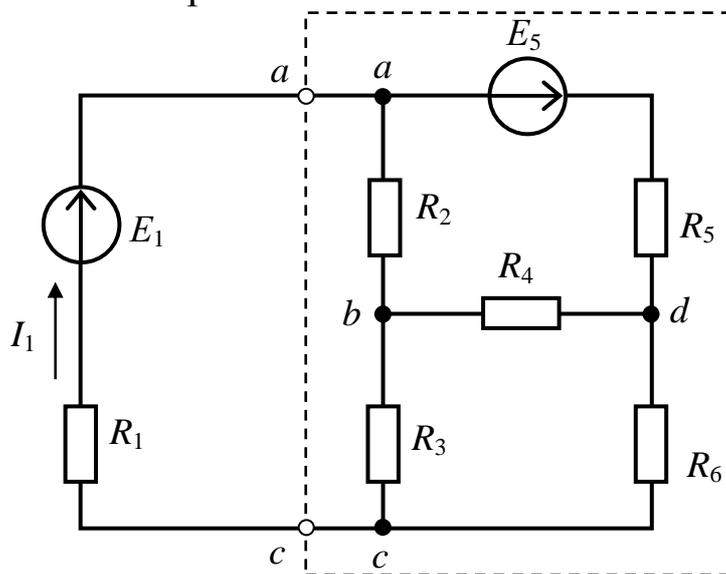


Рис. 1.35

Применение метода эквивалентного генератора основано на теореме об эквивалентном генераторе, согласно которой действие всех источников питания (на рисунке обведено пунктиром) на ветвь с неизвестным током заменяется воздействием одного, так называемого «эквивалентного», генератора. Этот генератор на эквивалентной схеме замещения (рис. 1.36, а) соединяется последовательно с исследуемой ветвью (на рисунке обведен пунктиром).

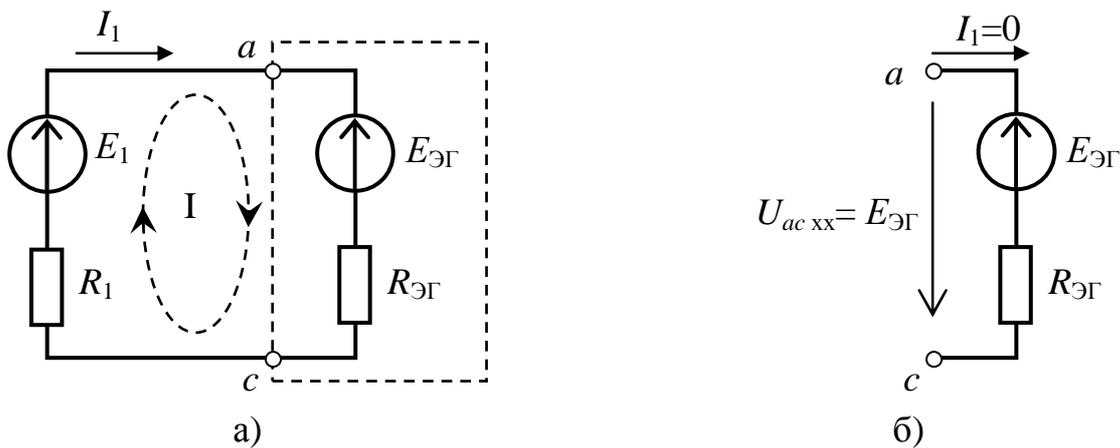


Рис. 1.36

Согласно второму закону Кирхгофа для первого контура (рис. 1.36, а) ток в ветви определяется из простого выражения:

$$I_1 = \frac{E_1 - E_{ЭГ}}{R_{ЭГ} + R_1},$$

где:  $E_{ЭГ} = U_{ac \text{ xx}}$  – напряжение между зажимами эквивалентного генератора  $a$  и  $c$  в режиме холостого хода (рис. 1.36, б);

$R_{ЭГ} = R_{ac \text{ xx}}$  – сопротивление между зажимами  $a$  и  $c$  пассивного двухполюсника, полученного из схемы, соответствующей холостому ходу эквивалентного генератора.

Решение распадается на два основных этапа – определение эквивалентной ЭДС и определение входного сопротивления относительно точек  $ac$ .

- 1) Определение ЭДС эквивалентного генератора -  $E_{ЭГ}$  (рис. 1.37).

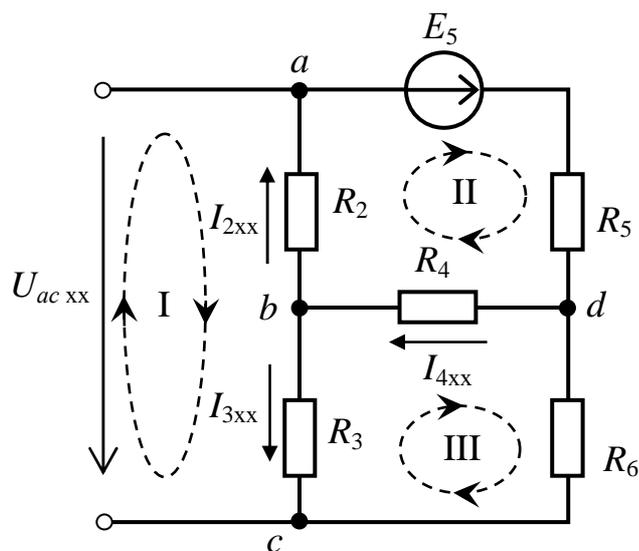


Рис. 1.37

Составляются уравнения для определения токов в ветвях схемы любым методом, например, по законам Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \text{узел } d: I_{4xx} - I_{2xx} - I_{3xx} &= 0; \\ \text{контур II: } R_2 \cdot I_{2xx} + R_5 \cdot I_{2xx} + R_4 \cdot I_{4xx} &= E_5; \\ \text{контур III: } -R_3 \cdot I_{3xx} - R_4 \cdot I_{4xx} - R_6 \cdot I_{3xx} &= 0. \end{aligned}$$

Подставляются численные значения в уравнения:

$$\begin{aligned} I_{4xx} - I_{2xx} - I_{3xx} &= 0; \\ 7,5 \cdot I_{2xx} + 15 \cdot I_{2xx} + 10,5 \cdot I_{4xx} &= 45; \\ -13,5 \cdot I_{3xx} - 10,5 \cdot I_{4xx} - 6 \cdot I_{3xx} &= 0. \end{aligned}$$

Решением данной системы уравнений, являются следующие значения токов

$$I_{2xx} = 1,53453, \text{ А}; I_{3xx} = -0,53708, \text{ А}; I_{4xx} = 0,99744, \text{ А}.$$

Для определения ЭДС эквивалентного генератора составляется уравнение согласно второму закону Кирхгофа для первого контура:

$$\begin{aligned} E_{ЭГ} = U_{ac \text{ xx}} &= -R_2 \cdot I_{2xx} + R_3 \cdot I_{3xx} = -7,5 \cdot 1,53453 + 13,5 \cdot (-0,53708) = \\ &= -18,759555, \text{ В}. \end{aligned}$$

2) Определение эквивалентного сопротивления двухполюсника -  $R_{ЭГ} = R_{ac \text{ xx}}$ .

Для определения эквивалентного сопротивления двухполюсника все источники ЭДС закорачиваются (их внутренние сопротивления равны нулю), а источники тока размыкаются (их внутренние сопротивления равны бесконечности) – рис. 1.38, а.

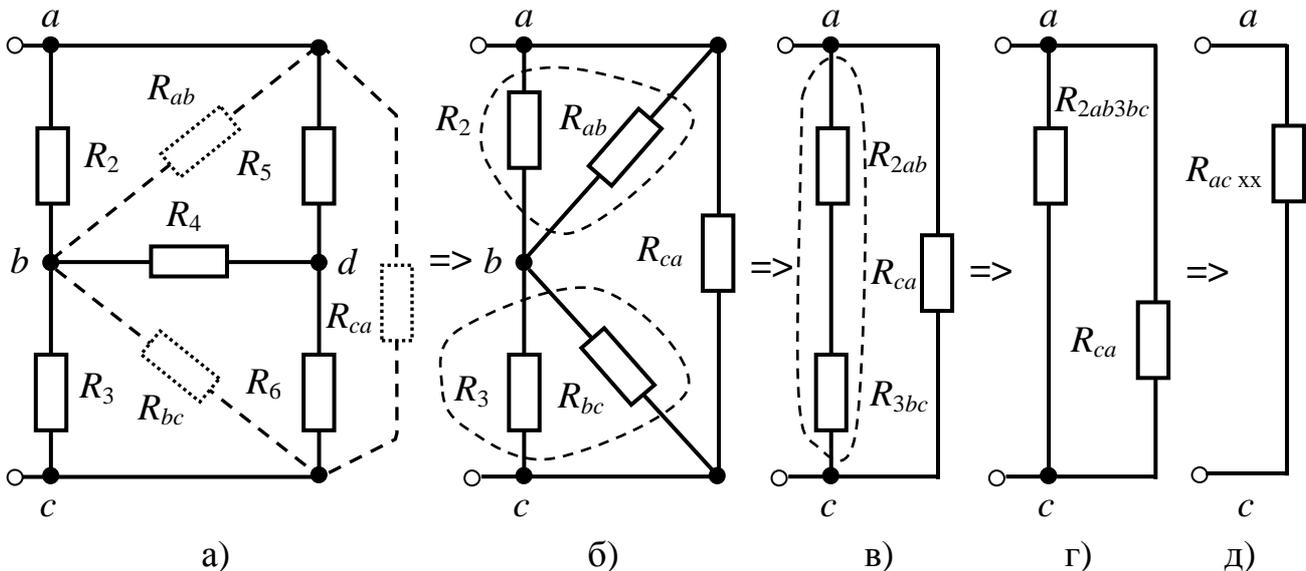


Рис. 1.38

Произведется эквивалентное преобразование звезды, образованной сопротивлениями  $R_4, R_5, R_6$  в треугольник:

$$R_{ab} = R_4 + R_5 + \frac{R_4 \cdot R_5}{R_6} = 10,5 + 15 + \frac{10,5 \cdot 15}{6} = 51,75, \text{ Ом.}$$

$$R_{bc} = R_4 + R_6 + \frac{R_4 \cdot R_6}{R_5} = 10,5 + 6 + \frac{10,5 \cdot 6}{15} = 20,7, \text{ Ом.}$$

$$R_{ca} = R_5 + R_6 + \frac{R_5 \cdot R_6}{R_4} = 15 + 6 + \frac{15 \cdot 6}{10,5} = 29,57, \text{ Ом.}$$

Далее производятся преобразования на параллельно включенных участках цепи (рис. 1.38, б):

$$R_{2ab} = \frac{R_2 \cdot R_{ab}}{R_2 + R_{ab}} = \frac{7,5 \cdot 51,75}{7,5 + 51,75} = 6,55, \text{ Ом;}$$

$$R_{3bc} = \frac{R_3 \cdot R_{bc}}{R_3 + R_{bc}} = \frac{13,5 \cdot 20,7}{13,5 + 20,7} = 8,17, \text{ Ом.}$$

Резисторы  $R_{2ab}$  и  $R_{3bc}$  включены последовательно (рис. 1.38, в):

$$R_{2ab3bc} = R_{2ab} + R_{3bc} = 6,55 + 8,17 = 14,72 \text{ Ом.}$$

Эквивалентное сопротивление цепи (рис. 1.38, г, д):

$$R_{\text{ЭГ}} = R_{ac \text{ xx}} = \frac{R_{ca} \cdot R_{2ab3bc}}{R_{ca} + R_{2ab3bc}} = \frac{29,57 \cdot 14,72}{29,57 + 14,72} = 9,83, \text{ Ом.}$$

Искомый ток в первой ветви определяется из уравнения:

$$I_1 = \frac{E_1 - E_{\text{ЭГ}}}{R_{\text{ЭГ}} + R_1} = \frac{9 - (-18,759555)}{9,83 + 19,5} = 0,9465, \text{ А.}$$

## 2. Расчетно-графическая работа ЭЦ-2

### РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

*Цель работы:* исследование работы электрической цепи синусоидального тока с параллельным соединением ветвей и повышение коэффициента мощности цепи.

*Задачи работы:* в результате выполнения расчетно-графической работы студенты должны:

- знать основные законы и особенности расчета электрических цепей синусоидального тока,
- уметь выполнять простейшие электрические расчеты; оформлять электротехнические схемы в соответствии с требованиями ГОСТ;
- иметь навыки составления математических моделей для расчета электрических цепей, оценки достоверности получаемых результатов и обработки результатов расчета в виде построения векторных диаграмм.

#### 2.1. Задание

В сеть включены по приведенной схеме две ветви (рис. 2.1), требуется:

- 1) определить показания приборов;
- 2) вычислить полную комплексную мощность цепи;
- 3) рассчитать параметры элемента  $X$  (индуктивности или емкости), при включении которого в цепи наступит резонанс токов;
- 4) построить векторно-потенциальные диаграммы токов и напряжений для режимов до и после подключения компенсирующего элемента  $X$ .

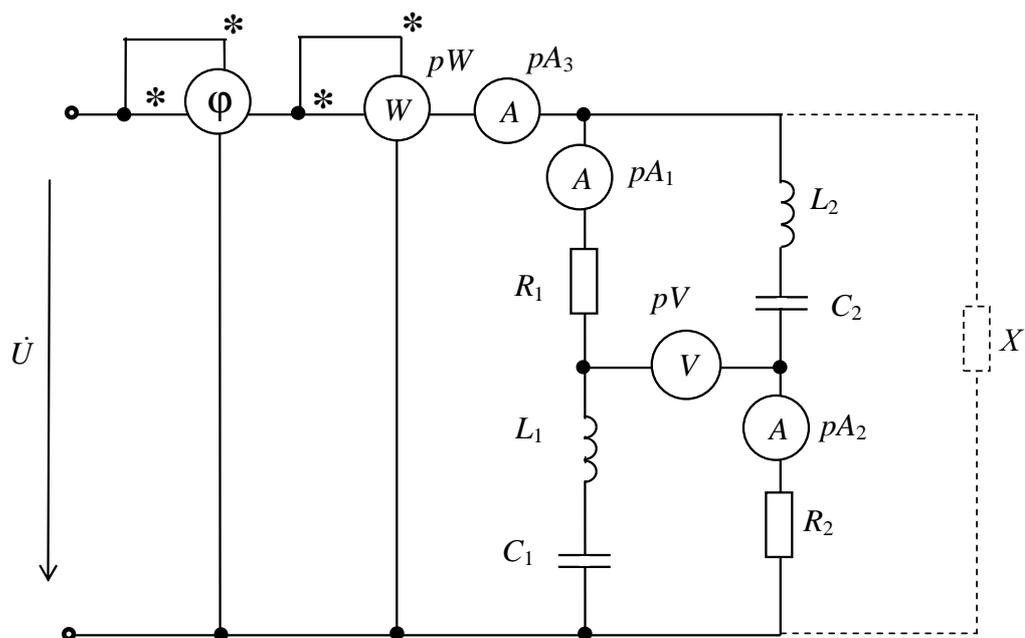


Рис. 2.1

Характеристики сети и параметров сопротивлений ветвей выдаются преподавателем каждому студенту индивидуально в виде распечатки на ЭВМ или из табл. 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1

Число десятков в номере задания	$U$	$f$	$R_1$	$L_1$	$C_1$	$R_2$	$L_2$	$C_2$
0	220	70	+	+	-	-	-	+
1	127	60	-	+	+	+	+	-
2	127	80	+	+	+	-	-	+
3	220	90	-	+	-	+	+	+
4	100	100	+	-	+	+	-	-
5	150	120	+	-	+	-	-	+
6	200	400	+	+	-	-	+	+
7	140	120	-	-	+	+	-	+
8	160	70	-	+	+	+	+	+
9	170	50	+	+	+	-	+	-

Таблица 2.2

Число единиц в номере задания	$R_1$	$L_1$	$C_1$	$R_2$	$L_2$	$C_2$
0	56	114	49	58	460	16
1	55	450	10	35	870	75
2	10	440	41	91	790	43
3	35	153	27	40	91	16
4	18	102	48	70	490	12
5	50	404	51	37	178	81
6	51	330	42	18	146	95
7	49	130	41	73	94	23
8	29	110	31	34	196	68
9	38	260	39	24	300	15

## 2.2. Методические рекомендации

В распечатке и в таблицах напряжения заданы в Вольтах [В], частота – в Герцах [Гц], сопротивления – в Омах [Ом], индуктивности – в миллигенри [мГн], емкости – в микрофарадах [мкФ].

По исходной схеме электрической цепи и машинной распечатке индивидуального задания сформируйте свою расчетную схему.

Если в распечатке указано нулевое значение – это означает, что данный элемент в расчетной схеме отсутствует и данный участок необходимо замкнуть. Так, например, для индивидуального задания СМ-209 2-9 расчетная схема приобретает вид, представленный на рис. 2.2.

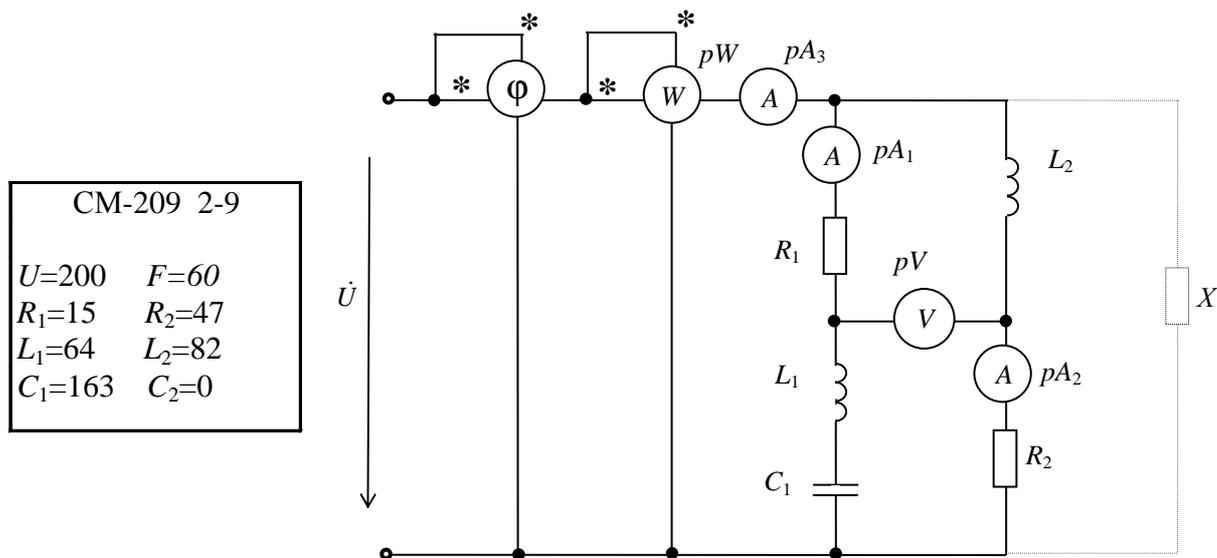


Рис. 2.2

Перед выполнением задания рекомендуется ознакомиться с задачами 3.1 – 5.5 учебного пособия [9].

### 2.3. Примеры расчёта линейных электрических цепей однофазного синусоидального тока

*Задача 2.3.1.* К цепи, изображенной на рис. 2.3, а, приложено напряжение  $U_{\text{вх}}=12$  В. Параметры элементов цепи:  $R_1=10\sqrt{3}$ , Ом;  $R_2=20\sqrt{3}$ , Ом;  $X_L=10$ , Ом;  $X_c=20$ , Ом. Определить показания приборов и построить векторную диаграмму токов и напряжений.

*Решение*

Изобразим схему в виде расчетной схемы замещения, представив сопротивления элементов цепи и входное напряжение  $\dot{U}_{\text{вх}}$  в комплексной форме (рис. 2.3, б). Модули комплексов действующих значений будут являться показаниями приборов.

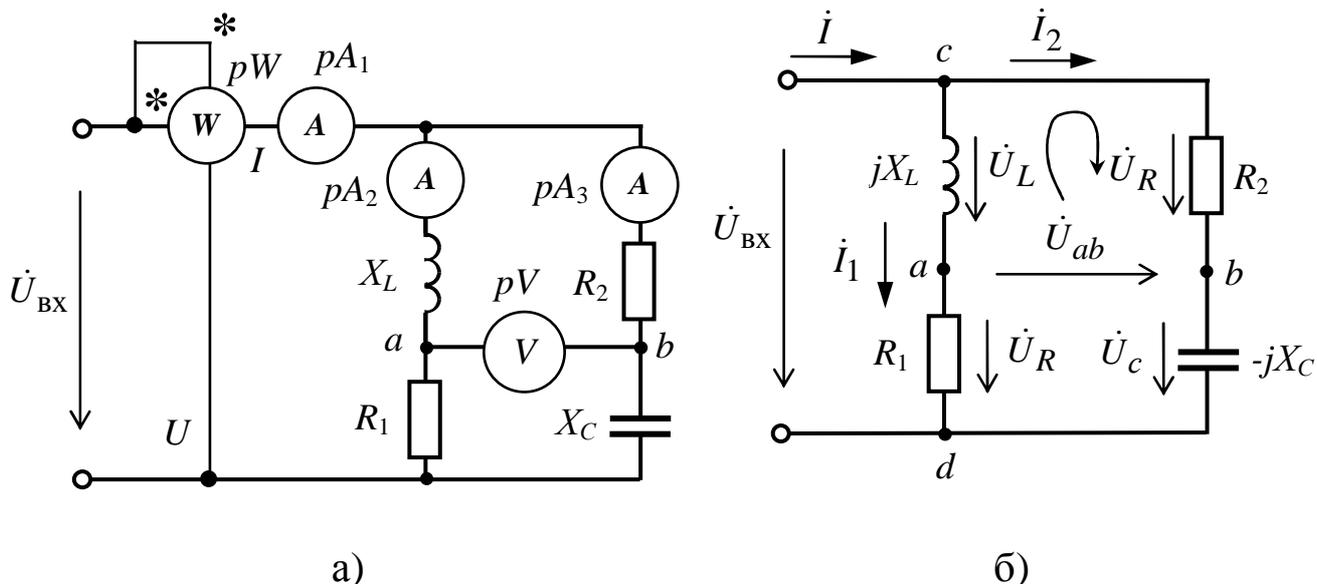


Рис. 2.3

Цепь содержит две параллельные ветви, на каждой из которых действует одно и то же напряжение  $\dot{U}_{\text{BX}}$ . Так как для напряжения на входе начальная фаза не задана, то она принимается равной нулю, т.е.

$$\dot{U}_{\text{BX}} = U_{\text{BX}} e^{j\psi_u} = 12 e^{j0^\circ} = 12, \text{ В.}$$

Определяются комплексные сопротивления обеих ветвей:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_L = 10\sqrt{3} + j10 = 20 e^{j30^\circ}, \text{ Ом;}$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 - jX_C = 20\sqrt{3} - j20 = 40 e^{-j30^\circ}, \text{ Ом.}$$

Определим комплексные токи в ветвях  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  по закону Ома:

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_{\text{BX}} / \underline{Z}_1 = 12 e^{j0^\circ} / (20 e^{j30^\circ}) = 0,6 e^{-j30^\circ}, \text{ А;}$$

$$\dot{I}_2 = \dot{U}_{\text{BX}} / \underline{Z}_2 = 12 e^{j0^\circ} / (40 e^{-j30^\circ}) = 0,3 e^{j30^\circ}, \text{ А;}$$

или в алгебраической форме записи:

$$\dot{I}_1 = 0,6 \cos(-30^\circ) + j0,6 \sin(-30^\circ) = 0,52 - j0,3, \text{ А;}$$

$$\dot{I}_2 = 0,3 \cos(30^\circ) + j0,3 \sin(30^\circ) = 0,26 + j0,15, \text{ А.}$$

Ток в неразветвленной части цепи определяется в соответствии с первым законом Кирхгофа для узла *c* (рис. ЭЦ-2.3, б):

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0,52 - j0,3 + 0,26 + j0,15 = 0,78 - j0,15, \text{ А}$$

или в показательной форме записи комплекса

$$\dot{I} = \sqrt{0,78^2 + 0,15^2} \cdot e^{j \arctg \frac{0,15}{0,78}} = 0,8 e^{-j10,89^\circ}, \text{ А.}$$

Показания амперметров соответственно составят:

$$pA_1 \Rightarrow 0,8, \text{ А}; pA_2 \Rightarrow 0,6, \text{ А}; pA_3 \Rightarrow 0,3, \text{ А}.$$

Для определения показания вольтметра  $pV$  определяется напряжение  $U_{ab}$ , при этом составим уравнение по второму закону Кирхгофа для любого контура в который входит это напряжение (рис. 2.3, б). Например, уравнение по второму закону Кирхгофа в комплексной форме для контура  $acba$  (обход контура по часовой стрелке):

$$-(j X_L) \dot{I}_1 + R_2 \dot{I}_2 - \dot{U}_{ab} = 0.$$

Откуда

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= R_2 \dot{I}_2 - (j X_L) \dot{I}_1 = \\ &= 20\sqrt{3} (0,26 + j0,15) - (j10)(0,52 - j0,3) = 6 + j(0) = 6 e^{j0^\circ}, \text{ В}. \end{aligned}$$

Показание вольтметра соответственно составит:  $pV \Rightarrow 6, \text{ В}$ .

Ваттметр измеряет активную мощность, выделившуюся на активных сопротивлениях  $R_1$  и  $R_2$ ,

$$P = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 = 10\sqrt{3} \cdot 0,6^2 + 20\sqrt{3} \cdot 0,3^2 = 9,36, \text{ Вт}.$$

Показание ваттметра может быть также определено следующим образом

$$P = \operatorname{Re}[\dot{U}_{\text{ВХ}} \underline{\dot{I}}] = \operatorname{Re}[12 \cdot (0,78 + j0,15)] = \operatorname{Re}[(9,36 + j1,8)] = 9,36, \text{ Вт},$$

где  $\underline{\dot{I}}$  - сопряженное значение тока  $\dot{I}$ .

Показание ваттметра соответственно составит:  $pW \Rightarrow 3,36 \text{ Вт}$ .

Построение векторной диаграммы токов и напряжений поводится следующим образом. Находятся падения напряжений  $\dot{U}_L, \dot{U}_C, \dot{U}_{R_1}, \dot{U}_{R_2}$  на соответствующих элементах схемы (рис. 2.3, б):

$$\dot{U}_L = (+j X_L) \dot{I}_1 = 0,6 e^{-j30^\circ} \cdot 10 e^{j90^\circ} = 6 e^{j60^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_{R_1} = R_1 \dot{I}_1 = 0,6 e^{-j30^\circ} \cdot 10\sqrt{3} = 10,38 e^{-j30^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_{R_2} = R_2 \dot{I}_2 = 0,3 e^{j30^\circ} \cdot 20\sqrt{3} = 10,38 e^{j30^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_C = (-j X_C) \dot{I}_2 \cdot 0,3 e^{j30^\circ} \cdot 20 e^{-j90^\circ} = 6 e^{-j60^\circ}, \text{ В}.$$

Построение векторов напряжений на элементах каждой ветви осуществляется в соответствии с уравнениями, составленными согласно второму закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{U}_L + \dot{U}_{R_1} - \dot{U}_{\text{BX}} &= 0; \\ \dot{U}_{R_2} + \dot{U}_C - \dot{U}_{\text{BX}} &= 0. \end{aligned}$$

Откуда:

$$\begin{aligned} \dot{U}_L + \dot{U}_{R_1} &= \dot{U}_{\text{BX}}; \\ \dot{U}_{R_2} + \dot{U}_C &= \dot{U}_{\text{BX}}. \end{aligned}$$

Векторная диаграмма токов и напряжений представлена на рис. 2.4.

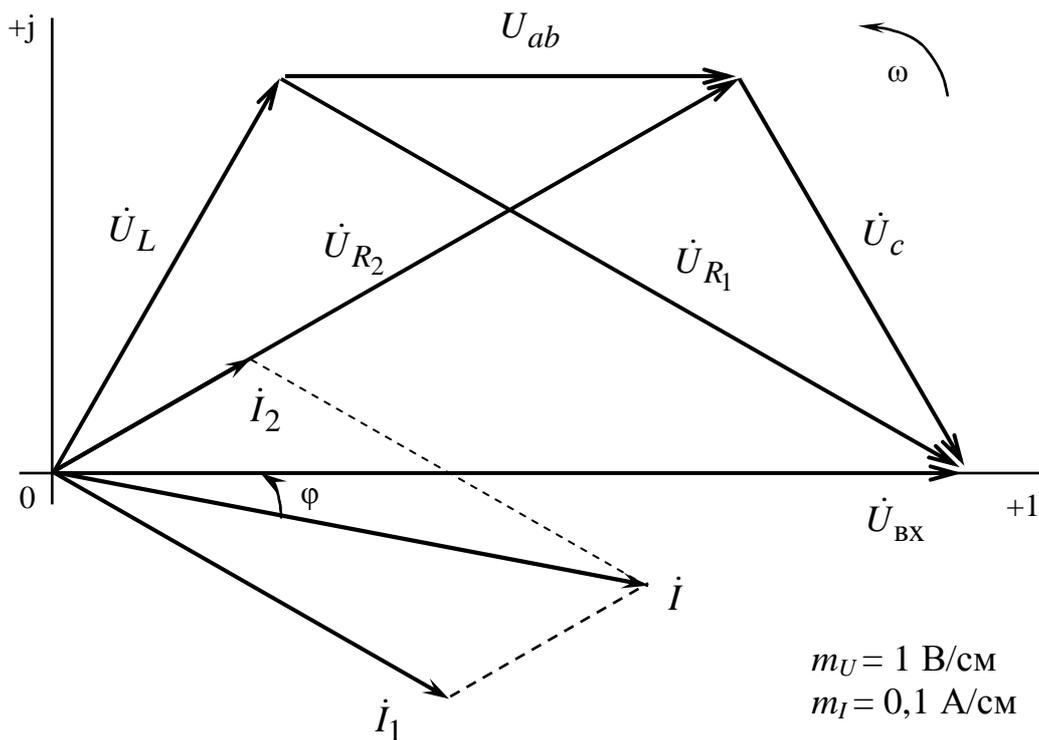


Рис. 2.4

**Задача 2.3.2.** Катушка индуктивности с параметрами  $R_k=30 \text{ Ом}$ ,  $X_k=40 \text{ Ом}$  включена в сеть синусоидального тока  $220 \text{ В}$ . Определить, конденсатор какой емкости  $C$  нужно подключить, чтобы коэффициент мощности цепи стал равен единице.

*Решение*

Электрическая схема подключения емкости к катушке для улучшения коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ ) изображена на рис. 2.5.

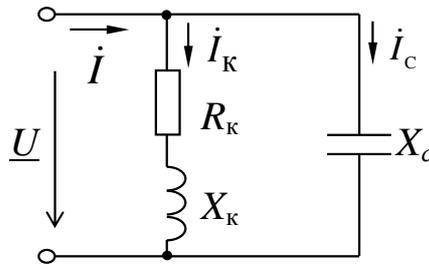


Рис. 2.5

Комплексное сопротивление катушки:

$$\underline{Z}_k = R_k + jX_k = 30 + j40 = 50e^{j53,8'}, \text{ Ом.}$$

Ток, протекающий в катушке, при отсутствии компенсации:

$$\dot{i}_k = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_k} = \frac{220e^{j0}}{50e^{j53,8'}} = 4,4e^{-j53,8'}, \text{ А.}$$

Угол сдвига фаз при этом  $\varphi_k = \psi_u - \psi_i = 0 - (-53,8^\circ) = 53,8^\circ$ , а  $\cos\varphi = \cos 53,8^\circ = 0,59$ .

Проводимость катушки:

$$\underline{Y}_k = \frac{1}{\underline{Z}_k} = \frac{1}{50e^{j53,8'}} = 0,02e^{-j53,8'} = 0,012 - j0,016 \text{ См.}$$

Рассчитаем активную и реактивную составляющие тока катушки:

$$I_R = G_k \cdot U = 220 \cdot 0,012 = 2,64 \text{ А.}$$

$$I_L = B_k \cdot U = 220 \cdot 0,016 = 3,52 \text{ А.}$$

Для достижения  $\cos\varphi=1$  параллельно обмотке двигателя нужно подключить конденсатор емкостью  $C$ , проводимость которого может быть определена из формулы

$$\varphi = \arctg \frac{B_L - B_c}{G} \text{ или } B_c = B_L - G \cdot \tg\varphi, \text{ См.}$$

Определим угол  $\varphi$ :  $\varphi = \arccos 1 = 0^\circ$ .

Емкостная проводимость:

$$B_c = 0,016 - 0,012 \cdot \tg 0^\circ = 0,016, \text{ См.}$$

Емкостная составляющая тока:

$$I_c = B_c \cdot U = 220 \cdot 0,016 = 3,52, \text{ А.}$$

Емкостное сопротивление:

$$X_c = \frac{1}{B_c} = \frac{1}{0,016} = 62,5, \text{ Ом.}$$

Емкость конденсатора

$$C = \frac{1}{\omega X_c} = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{2\pi 50 \cdot 62,5} \approx 51 \cdot 10^{-6}, \Phi = 51, \text{ мкФ.}$$

По расчетным значениям токов строим векторную диаграмму токов и напряжений (рис. 2.6), где  $\dot{I}_K$  – ток катушки до подключения конденсатора, а ток  $\dot{I}$  – результирующий ток после подключения конденсатора.

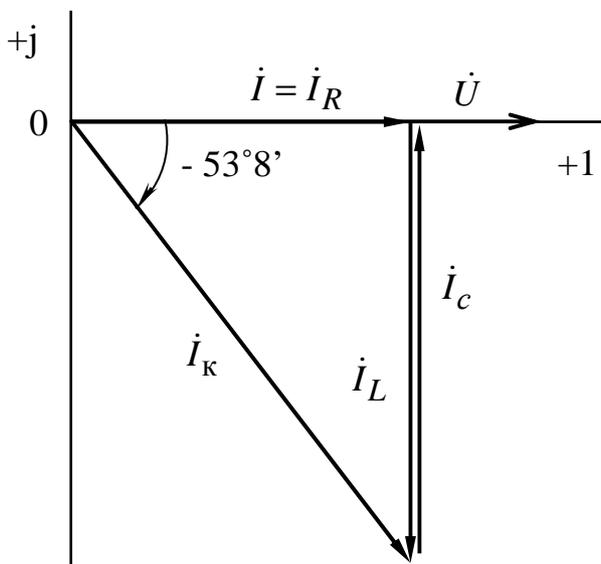


Рис. 2.6

Результирующий ток  $I$  после компенсации составит:

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} = \sqrt{2,64^2 + (3,52 - 3,52)^2} = 2,64, \text{ А.}$$

В результате компенсации ток в проводах катушки ( $I$ ), уменьшился по сравнению со случаем без компенсации ( $I_K$ ) в 1,7 раза, т.е уменьшились потери на нагрев этих проводов.

### 3. Расчетно-графическая работа ЭЦ-3

#### РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

*Цель работы:* исследование трехфазной электрической цепи при различных режимах работы приемников, соединенных звездой, приобретение навыков построения векторных диаграмм токов и напряжений

*Задачи работы:* в результате выполнения расчетно-графической работы студенты должны:

- знать основные соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами, особенности расчета трехфазных цепей;
- уметь оформлять электротехнические схемы в соответствии с требованиями ГОСТ;
- иметь навыки расчета в комплексных числах, построения векторных диаграмм, оценки достоверности результата путем сравнения результатов расчета с этими диаграммами.

#### 3.1. Задание

В трехфазную сеть включены однофазные приемники, которые образуют симметричную и несимметричную нагрузки (рис. 3.1.). При заданном напряжении сети и параметрах приемников требуется:

- 1) составить схему включения приемников;
- 2) определить линейные и фазные токи в каждом трехфазном приемнике;
- 3) построить векторные диаграммы токов и напряжений каждого приемника;
- 4) определить активную и реактивную мощности каждого приемника;
- 5) составить схему включения ваттметров для измерения активной мощности каждого трехфазного приемника.

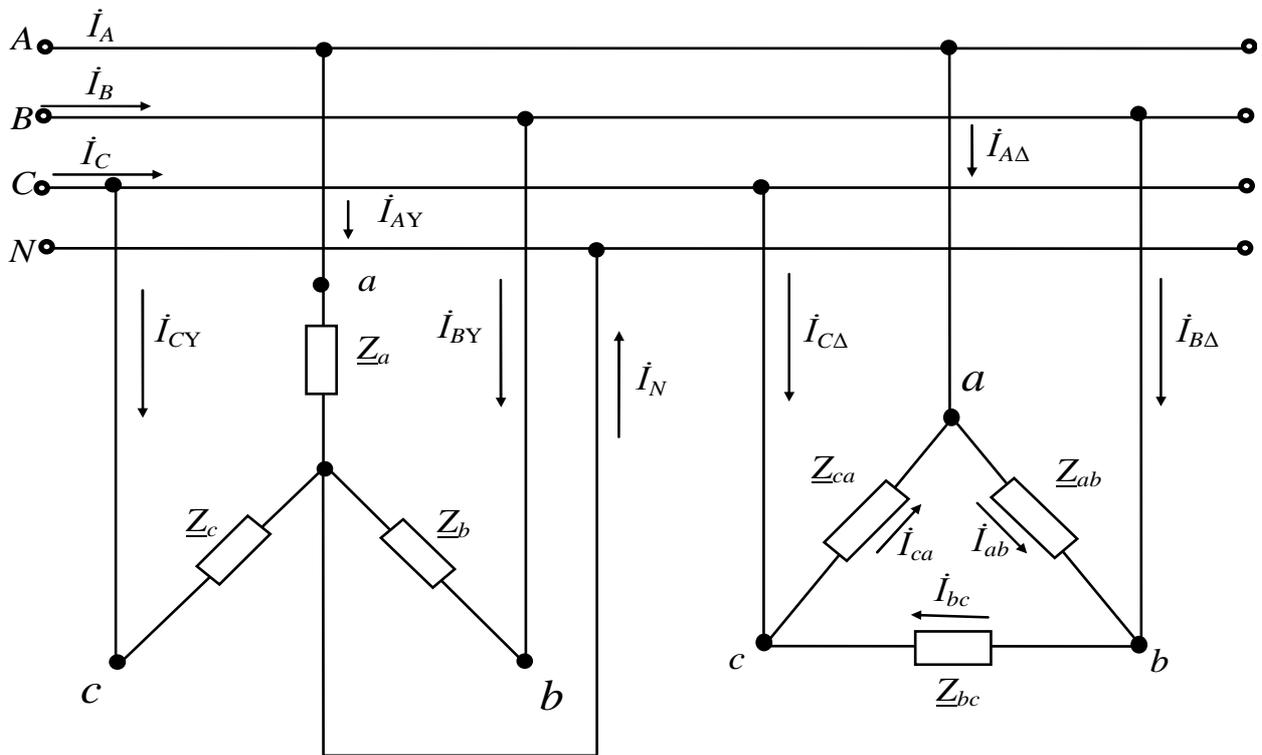


Рис. 3.1

**Примечание:** при симметричной нагрузке, включенной по схеме «звезда», нейтральный провод отсутствует.

Данные приёмников выдаются преподавателем каждому студенту индивидуально в виде распечатки на ЭВМ или из табл. 3.1 и 3.2.

Если задание выдается с помощью таблиц, то число десятков в номере варианта берется из табл.3.1, а число единиц – из табл.3.2.

Например, для варианта № 32 будут следующие исходные данные:

№		Сх.	$U_{\text{сети}}$	$R_1$	$L_1$	$C_1$	$R_2$	$L_2$	$C_2$	$R_3$	$L_3$	$C_3$
3	Симметр.	Y	127	+	-	+	-	-	-	-	-	-
	Не симметр.	$\Delta$		+	+	-	+	-	+	+	+	-

№	$R_1$	$L_1$	$C_1$	$R_2$	$L_2$	$C_2$	$R_3$	$L_3$	$C_3$
2	91	790	43	77	120	69	10	440	41

Таблица 3.1

№		Сх.	$U_{\text{сети}}$	$R_1$	$L_1$	$C_1$	$R_2$	$L_2$	$C_2$	$R_3$	$L_3$	$C_3$
0	Симметр.	Y	220	+	-	+	-	-	-	-	-	-
	Не симметр.	$\Delta$		+	+	-	+	-	+	+	+	-
1	Симметр.	Y	380	+	-	+	-	-	-	-	-	-
	Не симметр.	$\Delta$		+	+	-	+	-	+	+	+	-
2	Симметр.	Y	660	+	-	+	-	-	-	-	-	-
	Не симметр.	$\Delta$		+	+	-	+	-	+	+	+	-
3	Симметр.	Y	127	+	-	+	-	-	-	-	-	-
	Не симметр.	$\Delta$		+	+	-	+	-	+	+	+	-
4	Симметр.	$\Delta$	220	+	-	+	-	-	-	-	-	-
	Не симметр.	Y		+	+	-	+	-	+	+	+	-
5	Симметр.	$\Delta$	380	+	-	+	-	-	-	-	-	-
	Не симметр.	Y		+	+	-	+	-	+	+	+	-
6	Симметр.	$\Delta$	660	+	-	+	-	-	-	-	-	-
	Не симметр.	Y		+	+	-	+	-	+	+	+	-
7	Симметр.	$\Delta$	127	+	-	+	-	-	-	-	-	-
	Не симметр.	Y		+	+	-	+	-	+	+	+	-
8	Симметр.	$\Delta$	220	+	-	+	-	-	-	-	-	-
	Не симметр.	Y		+	+	-	+	-	+	+	+	-
9	Симметр.	$\Delta$	380	+	-	+	-	-	-	-	-	-
	Не симметр.	Y		+	+	-	+	-	+	+	+	-

Таблица 3.2

№	$R_1$	$L_1$	$C_1$	$R_2$	$L_2$	$C_2$	$R_3$	$L_3$	$C_3$
0	58	460	16	11	175	48	56	114	49
1	35	870	75	27	280	142	55	450	10
2	91	790	43	77	120	69	10	440	41
3	40	91	16	37	120	83	35	153	27
4	70	490	12	42	93	44	18	102	48
5	37	178	81	33	192	61	50	404	51
6	18	146	95	73	165	94	51	330	42
7	73	94	23	97	489	88	49	130	41
8	34	196	68	39	577	27	29	110	31
9	24	300	15	22	210	120	38	260	39

### 3.2. Методические рекомендации

По исходной схеме электрической цепи и машинной распечатке индивидуального задания сформируйте свою расчетную схему. Если в распечатке указано нулевое значение, это означает, что данный элемент в расчетной схеме отсутствует, участок закорачивается.

В общем случае однофазные приемники, которые образуют симметричный и несимметричный трехфазные приемники, содержат один или два элемента, включенные последовательно.

Так, например, для индивидуального задания 902491-10 расчетная схема приобретает вид, представленный на рис. 3.2.

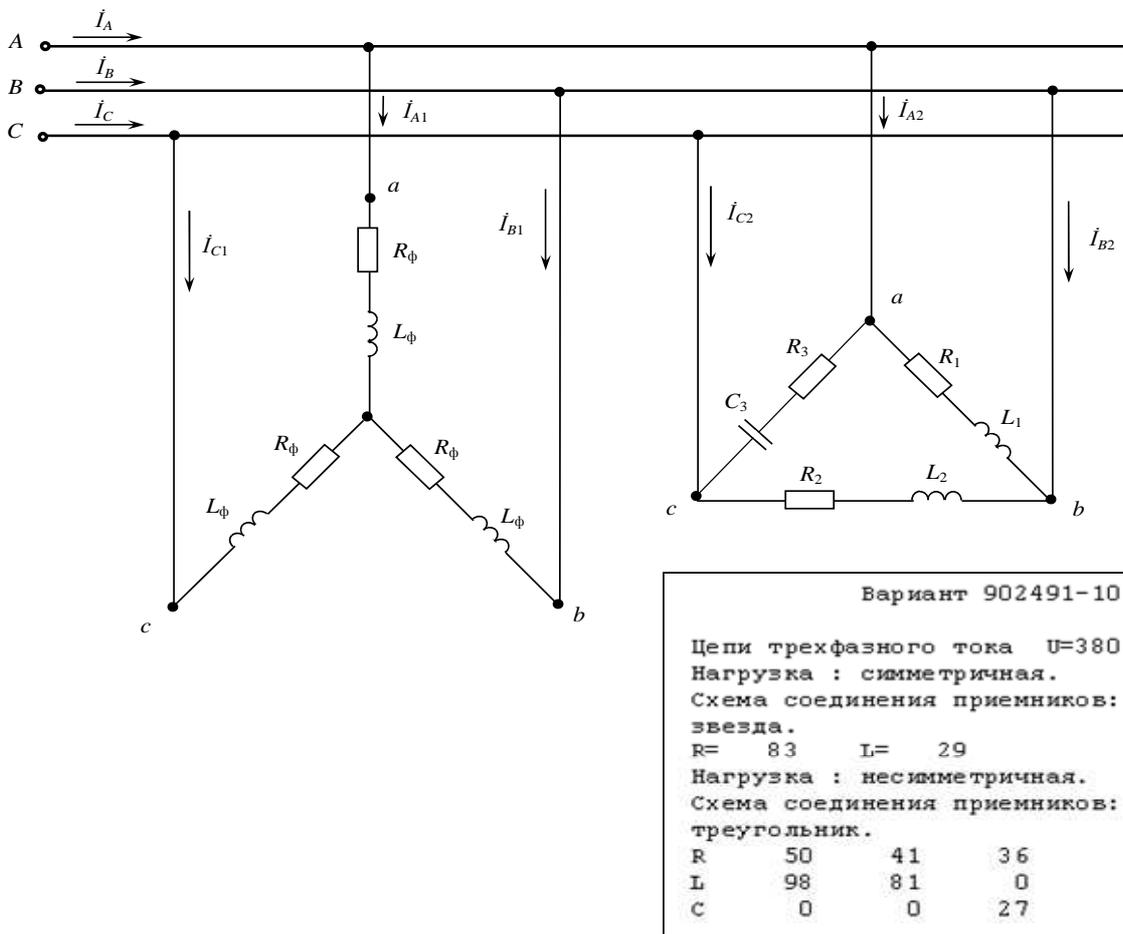


Рис. 3.2

Сопротивления заданы в Омах [Ом], индуктивности в Миллигенри [мГн], емкости в микрофарадах [мкФ]. Частоту питающей сети принять  $f = 50$  Гц.

Перед выполнением задания рекомендуется ознакомиться с задачами 6.1-7.3. учебного пособия [9].

### 3.3. Примеры расчёта трехфазных цепей

**Задача 3.3.1.** К трехфазной линии с линейным напряжением  $U_{\text{л}} = 380$  В подключены три одинаковых однофазных приемника ( $R_{\text{ф}} = 3$ , Ом,  $X_{C\text{ф}} = 4$ , Ом), соединенные по схеме «звезда с нейтральным проводом» (рис. 3.3). Определить токи в фазах и нейтральном проводе, а также потребляемую мощность (активную, реактивную, полную). Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

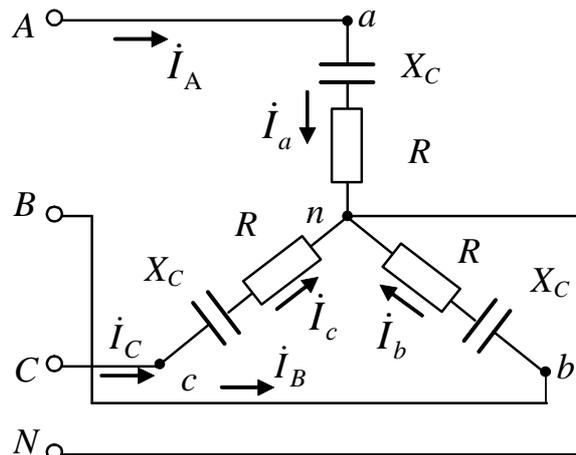


Рис. 3.3

*Решение*

Нагрузка всех фаз одинакова, поэтому расчет проводят для одной фазы.

Определяется фазное напряжение:

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

или в комплексной форме, принимая начальную фазу  $\psi_{uA} = 0$ ,

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A = U_{\text{ф}} e^{j\psi_{uA}} = 220 e^{j0^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B = U_{\text{ф}} e^{j\psi_{uB}} = 220 e^{-j120^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C = U_{\text{ф}} e^{j\psi_{uC}} = 220 e^{j120^\circ}, \text{ В}.$$

Нагрузка всех фаз одинакова, поэтому комплексные сопротивления всех фаз одинаковые:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = R_{\text{ф}} - jX_{\text{ф}} = Z_{\text{ф}} e^{j\varphi_{\text{ф}}} = (3 + j4), \text{ Ом} = 5 e^{-j53^\circ}, \text{ Ом};$$

где  $Z_{\text{ф}} = \sqrt{R_{\text{ф}}^2 + X_{C\text{ф}}^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5, \text{ Ом};$

$$\varphi_{\phi} = \arctg \frac{-X_{C\phi}}{R_{\phi}} = \arctg \left(-\frac{4}{3}\right) = -53^{\circ}.$$

Фазные и линейные токи определим по закону Ома:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{220e^{j0^{\circ}}}{5e^{-j53^{\circ}}} = 44e^{j53^{\circ}}, \text{ A};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{220e^{-j120^{\circ}}}{5e^{-j53^{\circ}}} = 44e^{-j67^{\circ}}, \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{220e^{j120^{\circ}}}{5e^{-j53^{\circ}}} = 44e^{j173^{\circ}}, \text{ A}.$$

Строим векторную диаграмму фазных и линейных напряжений в выбранном масштабе  $m_U$ , откладываем векторы токов в масштабе  $m_I$  в фазах под углом  $\varphi_{\phi} = -53^{\circ}$  к собственным фазным напряжениям. Звезда токов получается симметричной, ток в нейтральном проводе  $\dot{I}_N$  равен нулю (рис. 3.4):  $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ .

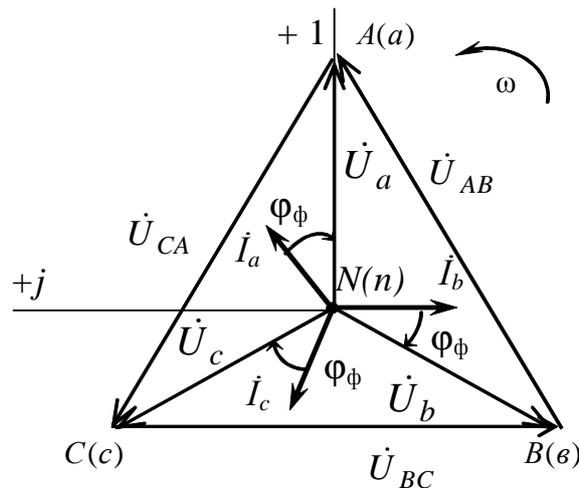


Рис. 3.4

При обрыве нейтрального провода режим работы приемников не изменится, так как ток там отсутствует, поэтому при симметричной нагрузке **наличие нейтрального провода необязательно**.

Активная мощность, потребляемая нагрузкой каждой фазы одинакова, поэтому суммарная активная мощность может быть определена следующим образом:

$$\begin{aligned} P &= 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3}U_{\text{Л}}I_{\text{Л}} \cos \varphi_{\phi} = \\ &= \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 44 \cdot \cos (-53^{\circ}) = 17375, \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Реактивная мощность:

$$Q = 3U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi_{\phi} = \sqrt{3}U_{Л}I_{Л} \sin \varphi_{\phi} = \\ = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 44 \sin \cdot (-53^{\circ}) = -23101, \text{вар.}$$

Полная мощность:

$$S = 3U_{\phi}I_{\phi} = \sqrt{3}U_{Л}I_{Л} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 44 = 28959, \text{ВА.}$$

Измерения активной и реактивной мощностей производят с помощью трех, двух или одного ваттметров, используя различные схемы их включения.

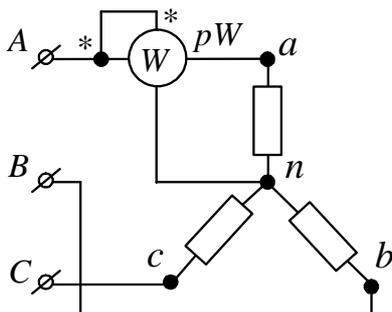


Рис. 3.5

При симметричном приемнике, соединенном по схеме «звезда с нейтральным проводом» или «звезда без нейтрального проводом», активная мощность одной фазы  $P_{\phi}$  определяется с помощью одного ваттметра по схеме рис. 3.5, тогда активная мощность трехфазной цепи:

$$P = 3 P_{\phi} = 3 P_{PW} = 3U_a I_a \cos \varphi_a = \\ = 3 \cdot 380 \cdot 44 \cdot \cos(-53^{\circ}) = 17375, \text{Вт.}$$

**Задача 3.3.2.** Три однофазных приемника соединены по схеме «звезда с нейтральным проводом» и включены в трехфазную сеть напряжением 380 В. Сопротивлением нейтрального провода можно пренебречь. Сопротивления фаз:

$$\underline{Z}_a = (30 + j40), \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_b = (24 + j18), \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_c = (80 - j60), \text{ Ом.}$$

Требуется изобразить схему включения приемников; определить токи в проводах сети; построить векторную диаграмму токов и напряжений; изобразить схему включения ваттметров для измерения активной мощности и определить их показания; вычислить активную, реактивную и полную (кажущуюся) мощности.

*Решение*

Схемы включения приемников принципиальная (а) и замещения (б) представлены на рис. 3.6.

Наличие нейтрального провода обеспечивает симметричную систему фазных напряжений на приемниках.

Напряжение сети – это линейное напряжение.

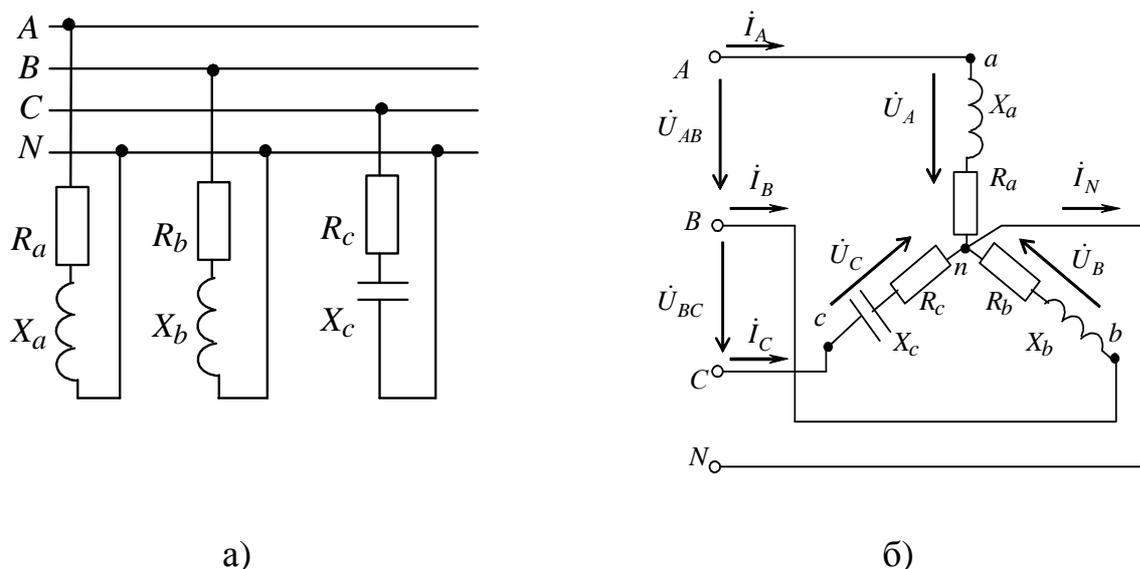


Рис. 3.6

Определяется фазное напряжение:

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

Система фазных напряжений в комплексной форме:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A = U_{\phi} e^{j0} = 220 e^{j0^{\circ}}, \text{ В;}$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B = U_{\phi} e^{-j120^{\circ}} = 220 e^{-j120^{\circ}}, \text{ В;}$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C = U_{\phi} e^{j120^{\circ}} = 220 e^{j120^{\circ}}, \text{ В.}$$

Сопротивления фаз

$$\underline{Z}_a = R_a + jX_a = 30 + j40 = 50 e^{j53^{\circ}}, \text{ Ом;}$$

$$\underline{Z}_b = R_b + jX_b = 24 + j18 = 30 e^{j37^{\circ}}, \text{ Ом;}$$

$$\underline{Z}_c = R_c - jX_c = 80 - j60 = 100 e^{-j37^{\circ}}, \text{ Ом.}$$

Для схемы соединения приемников «звезда» фазные и линейные токи равны между собой и определяются согласно закону Ома:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{220 e^{j0^{\circ}}}{50 e^{j53^{\circ}}} = 4,4 e^{-j53^{\circ}} = (2,6 - j3,5), \text{ А;}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{220 e^{-j120^{\circ}}}{30 e^{j37^{\circ}}} = 7,3 e^{-j157^{\circ}} = (-6,7 - j2,8), \text{ А;}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{220 e^{j120^{\circ}}}{100 e^{-j37^{\circ}}} = 2,2 e^{j157^{\circ}} = (-2,0 + j0,8), \text{ А.}$$

Ток в нейтральном проводе

$$\begin{aligned} \dot{I}_N &= \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 2,6 - j3,5 - 6,7 - j2,8 - 2,0 + j0,8 = \\ &= (-6,1 - j5,5) = 8,2e^{-j138^\circ}, \text{ А.} \end{aligned}$$

Для построения векторной диаграммы токов и напряжений необходимо выбрать масштабы напряжений  $m_U$  и токов  $m_I$ . Относительно комплексных осей откладываются фазные и линейные напряжения и токи со своими начальными фазами. Ток в нейтральном проводе – это результат геометрического сложения векторов фазных токов, и его расположение и длина должны соответствовать расчетному значению  $\dot{I}_N$  (рис. 3.7, а).

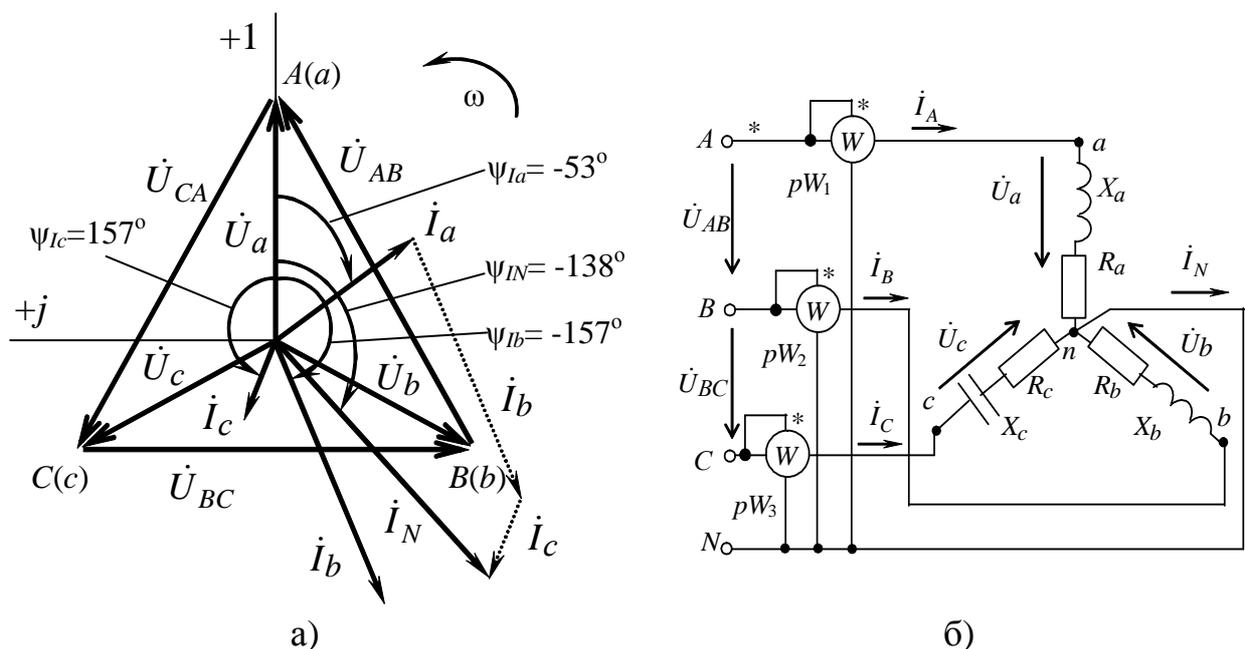


Рис. 3.7

Для измерения активной мощности в четырехпроводных сетях используется метод трех ваттметров (рис. 3.7, б).

Активная мощность цепи при включении ваттметров по рис. 3.7, б, определится следующим образом:

-показание первого ваттметра  $pW_1$ :

$$\begin{aligned} P_1 &= \operatorname{Re}[\dot{U}_A \dot{I}_A] = \operatorname{Re}[220e^{j0^\circ} \cdot 4,4e^{j53^\circ}] = \\ &= 220 \cdot 4,4 \cdot \cos 53^\circ = 582,56, \text{ Вт;} \end{aligned}$$

-показание второго ваттметра  $pW_2$ :

$$\begin{aligned} P_2 &= \operatorname{Re}[\dot{U}_B \dot{I}_B] = \operatorname{Re}[220e^{-j120^\circ} \cdot 7,3e^{j157^\circ}] = \\ &= 220 \cdot 7,3 \cdot \cos 37^\circ = 1282,61, \text{ Вт;} \end{aligned}$$

-показание третьего ваттметра  $pW_3$ :

$$P_3 = \operatorname{Re}[\dot{U}_C \dot{I}_C^*] = \operatorname{Re}[220e^{j120^\circ} \cdot 2,2e^{-j157^\circ}] = \\ = 220 \cdot 2,2 \cdot \cos(-37^\circ) = 386,54, \text{ Вт.}$$

Активная мощность цепи:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 582,56 + 1282,61 + 386,54 = 2251,71, \text{ Вт.}$$

Активная мощность, потребляемая нагрузкой:

$$P = P_a + P_b + P_c = R_a I_a^2 + R_b I_b^2 + R_c I_c^2 = \\ = 30 \cdot 4,4^2 + 24 \cdot 7,3^2 + 80 \cdot 2,2^2 \approx 2246,96, \text{ Вт;}$$

или

$$P = P_a + P_b + P_c = U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c = \\ = 220 \cdot 4,4 \cdot \cos 53^\circ + 220 \cdot 7,3 \cdot \cos 37^\circ + 220 \cdot 2,2 \cdot \cos(-37^\circ) \approx 2251,7, \text{ Вт.}$$

Реактивная мощность:

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c = X_a I_a^2 + X_b I_b^2 - X_c I_c^2 = \\ = 40 \cdot 4,4^2 + 18 \cdot 7,3^2 - 80 \cdot 2,2^2 \approx 1346,42, \text{ вар.}$$

Реактивная мощность  $Q_c$  отрицательная, так как сопротивление фазы  $c$  носит емкостной характер.

Полная мощность:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{2251,7^2 + 1346,42^2} = 2623,55, \text{ ВА;}$$

или

$$\underline{S} = \underline{S}_a + \underline{S}_b + \underline{S}_c = \dot{U}_a \dot{I}_a^* + \dot{U}_b \dot{I}_b^* + \dot{U}_c \dot{I}_c^* = P + jQ = \\ = 2251,7 + j1346,42 \approx 2623,55 \cdot e^{j31^\circ}, \text{ ВА.}$$

**Задача 3.3.3.** К трехфазной системе напряжением 380, В подключены три одинаковых приемника ( $R_\phi = 3$ , Ом,  $X_{L\phi} = 4$ , Ом), соединенные по схеме «треугольник» (рис. 3.8). Определить токи в фазных и линейных проводах и потребляемую мощность (активную, реактивную, полную). Построить векторную диаграмму токов и напряжений. Изобразить схему включения ваттметров для измерения активной мощности и определить их показания.

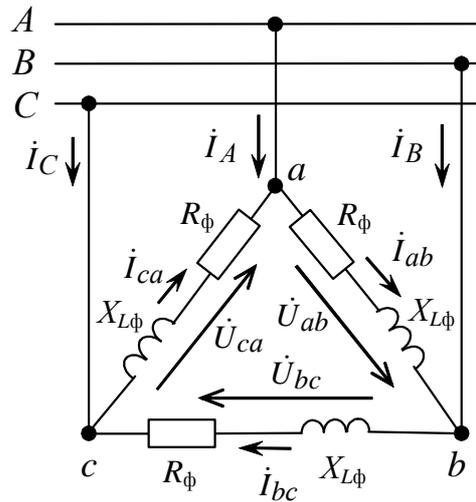


Рис. 3.8

### Решение

Нагрузка всех фаз одинакова, поэтому расчет проводится для одной фазы.

Комплексное сопротивление всех фаз одинаково:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = R_\phi + jX_{L\phi} = Z_\phi e^{j\varphi_\phi} = (3 + j4), \text{ Ом} = 5e^{j53^\circ}, \text{ Ом};$$

где  $Z_\phi = \sqrt{R_\phi^2 + X_{L\phi}^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5, \text{ Ом};$

$$\varphi_\phi = \arctg \frac{X_{L\phi}}{R_\phi} = \arctg \left( \frac{4}{3} \right) = 53^\circ.$$

Напряжение сети - это линейное напряжение, кроме того, в схеме соединения «треугольник»  $U_\phi = U_\text{л} = 380, \text{ В}$ , то есть фазные напряжения приемников равны линейным напряжениям источников. Следовательно, система фазных напряжений приемников в комплексной форме будет иметь вид:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB} = U_\text{л} e^{j30^\circ} = 380 e^{j30^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC} = U_\text{л} e^{-j90^\circ} = 380 e^{-j90^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{CA} = U_\text{л} e^{j150^\circ} = 380 e^{j150^\circ}, \text{ В}.$$

Поскольку нагрузка симметричная, то модули фазных токов одинаковые и по закону Ома равны:

$$I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi} = \frac{380}{5} = 76, \text{ А};$$

а и их фазы отличаются от фаз соответствующих напряжений на один и тот же угол, равный  $\varphi_\phi = 53^\circ$ .

Следовательно, фазные токи равны:

$$\dot{I}_{ab} = 76e^{-j53^\circ} = (45,74 - j60,70), \text{ А};$$

$$\dot{I}_{bc} = 76e^{-j143^\circ} = (-60,70 - j45,74), \text{ А};$$

$$\dot{I}_{ac} = 76e^{j97^\circ} = (-9,26 + j75,43), \text{ А}.$$

Модули линейных токов так же одинаковые (только для симметричной нагрузки) и равны:

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}} = \sqrt{3} \cdot 76 = 131,6, \text{ А}.$$

Активная мощность, потребляемая нагрузкой:

$$P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 131,6 \cdot \cos 53^\circ = 51969, \text{ Вт} \approx 52, \text{ кВт};$$

реактивная мощность:

$$Q = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 131,6 \cdot \sin 53^\circ = 69293, \text{ вар} \approx 69, \text{ квар};$$

полная мощность:

$$S = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 131,6 = 86616, \text{ ВА} \approx 87, \text{ кВА}.$$

Векторная диаграмма может быть построена в двух вариантах, в зависимости от изображения системы напряжения (рис. 3.9). Предварительно выбирают масштабы тока и напряжения. Фазные токи отстают от соответствующих напряжений на угол  $\varphi_{\text{ф}} = 53^\circ$ . Линейные токи находятся из соотношений, составленных согласно первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

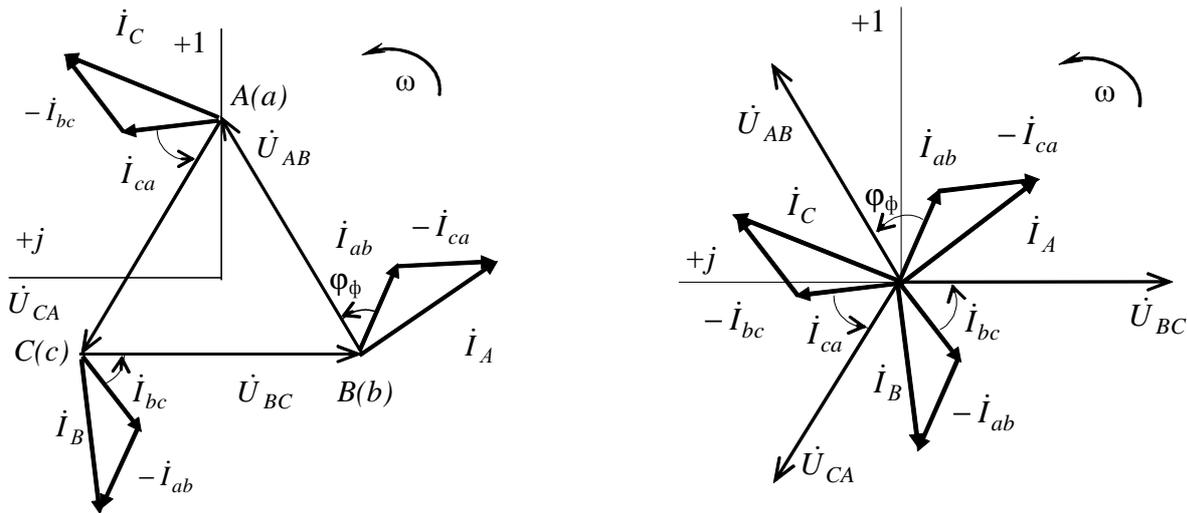


Рис. 3.9

Измерения активной и реактивной мощностей производятся с помощью трех, двух или одного ваттметров, используя различные схемы их включения.

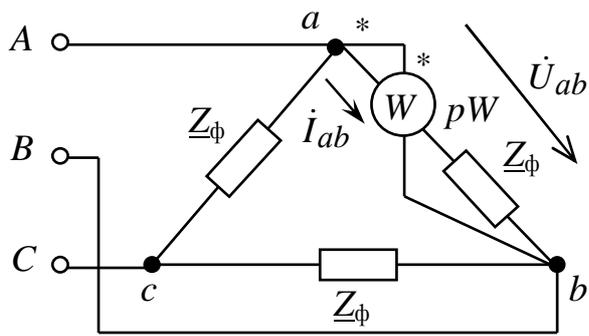


Рис.3.10

При симметричном приемнике активная мощность одной фазы  $P_\phi$  определяется с помощью одного ваттметра по схеме рис. 3.10, тогда активная мощность трехфазной цепи:

$$\begin{aligned}
 P &= 3 P_\phi = 3 P_{pW} = \\
 &= 3 U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_{ab} = 3 U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi = \\
 &= 3 \cdot 380 \cdot 76 \cdot \cos(53^\circ) \approx 52, \text{ кВт.}
 \end{aligned}$$

**Задача 3.3.4.** К трехпроводной трехфазной линии с напряжением 380, В подключены три однофазных приемника по схеме «треугольник» с параметрами:  $R_1=5$ , Ом;  $R_2=6$ , Ом;  $X_{L2}=8$ , Ом;  $R_3=4$ , Ом;  $X_{C3}=3$ , Ом. Определить токи в фазах и линейных проводах, активную, реактивную и полную мощность. Построить векторную диаграмму токов и напряжений. Изобразить схему включения ваттметров для измерения активной мощности и определить их показания.

*Решение*

Однофазные приемники к трехпроводной сети подключаются по схеме «треугольник» (рис. 3.11).

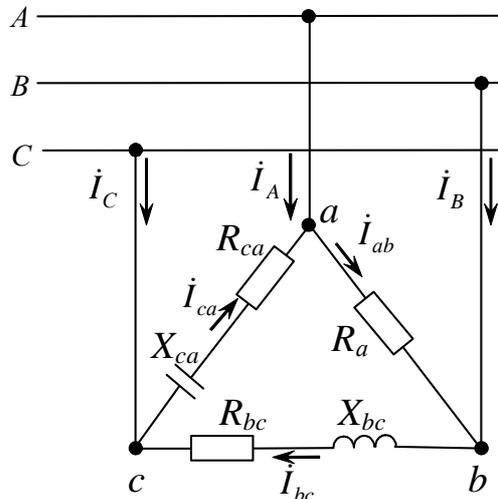


Рис. 3.11

Нагрузка несимметричная, поэтому ток каждой фазы нужно считать отдельно.

Напряжение сети - это линейное напряжение, кроме того, в схеме соединения «треугольник»  $U_\phi = U_\Delta = 380$ , В, то есть фазные напряжения приемников равны линейным напряжениям источников. Следовательно, система фазных напряжений приемников в комплексной форме будет иметь вид:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB} = U_{\text{л}} e^{j30^\circ} = 380 e^{j30^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC} = U_{\text{л}} e^{-j90^\circ} = 380 e^{-j90^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{CA} = U_{\text{л}} e^{j150^\circ} = 380 e^{j150^\circ}, \text{ В}.$$

Комплексные сопротивления фаз:

$$\underline{Z}_{ab} = R_{ab} = R_1 = 5 \text{ Ом} = 5 e^{j0^\circ}, \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{bc} = R_{bc} + jX_{bc} = R_2 + jX_{L2} = 6 + j8, \text{ Ом} = 10 e^{j53^\circ}, \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{ca} = R_{ca} + jX_{ca} = R_3 - jX_{C3} = 4 - j3, \text{ Ом} = 5 e^{-j37^\circ}, \text{ Ом};$$

Фазные токи определяются согласно закону Ома:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{380 e^{j30^\circ}}{5 e^{j0^\circ}} = 76 e^{-j30^\circ} =$$

$$= 76 \cdot \cos 30^\circ + j76 \cdot \sin 30^\circ = (65,8 + j38), \text{ А};$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{380 e^{-j90^\circ}}{10 e^{j53^\circ}} = 38 e^{-j143^\circ} =$$

$$= 38 \cdot \cos(-143^\circ) + j38 \cdot \sin(-143^\circ) = (-30,3 - j22,9), \text{ А};$$

$$\dot{I}_{ac} = \frac{\dot{U}_{ac}}{\underline{Z}_{ac}} = \frac{380 e^{j150^\circ}}{5 e^{-j37^\circ}} = 76 e^{j187^\circ} =$$

$$= 76 \cdot \cos(187^\circ) + j76 \cdot \sin(187^\circ) = (-75,4 - j9,3), \text{ А}.$$

Линейные токи определяются из фазных по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 65,8 + j38,0 - (-75,4 - j9,3) =$$

$$= 141,2 + j47,3 = 148,9 e^{j18,5^\circ}, \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = -30,3 - j22,9 - (65,8 + j38,0) =$$

$$= -96,1 - j60,9 = 113,8 e^{-j147,6^\circ}, \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = -75,4 - j9,3 - (-30,3 - j22,9) =$$

$$= -45,1 + j13,6 = 47,1 e^{j163,2^\circ}, \text{ А}.$$

Сумма линейных токов должна равняться нулю:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 141,2 + j47,3 - 96,1 - j60,9 - 45,1 + j13,6 = 0.$$

Активная мощность:

$$P = R_{ab}I_{ab}^2 + R_{bc}I_{bc}^2 + R_{ca}I_{ca}^2 =$$

$$= 5 \cdot 76^2 + 6 \cdot 38^2 + 4 \cdot 76^2 = 60648, \text{ Вт} = 60,6, \text{ кВт.}$$

Реактивная мощность:

$$Q = X_{ab}I_{ab}^2 + X_{bc}I_{bc}^2 - X_{ca}I_{ca}^2 =$$

$$= 0 + 8 \cdot 38^2 - 3 \cdot 76^2 = -5776, \text{ вар} \approx 5,8, \text{ квар;}$$

здесь знак “минус” показывает, что преобладает емкостная нагрузка.

Полная мощность:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{60648^2 + 5776^2} = 60875, \text{ ВА} = 60,9, \text{ кВА.}$$

Векторные диаграммы токов и напряжений в двух вариантах представлены на рис. 3.12.

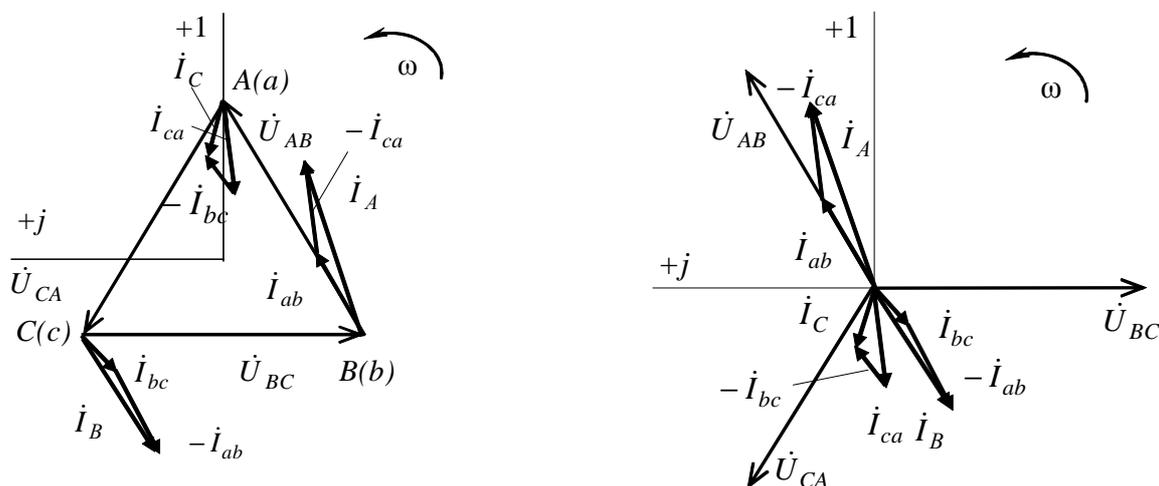


Рис. 3.12

Предварительно выбирают масштабы тока и напряжения. Векторы фазных токов  $\dot{I}_{ab}$ ,  $\dot{I}_{bc}$ ,  $\dot{I}_{ca}$  откладывают относительно векторов соответствующих напряжений под углами  $\varphi_{ab} = 0^\circ$ ,  $\varphi_{bc} = 53^\circ$ ,  $\varphi_{ca} = -37^\circ$  или в соответствии с полученными их начальными фазами  $\psi_{ab} = 30^\circ$ ;  $\psi_{bc} = -143^\circ$ ;  $\psi_{ca} = 187^\circ$ . Затем по первому закону Кирхгофа строят векторы линейных токов  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$ ,  $\dot{I}_C$ , длина и направление которых должны соответствовать расчетным данным:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

В трехпроводных сетях для измерения активной мощности используется метод двух ваттметров, причем один из ваттметров включается на “перевернутое” линейное напряжение (рис. 3.13).

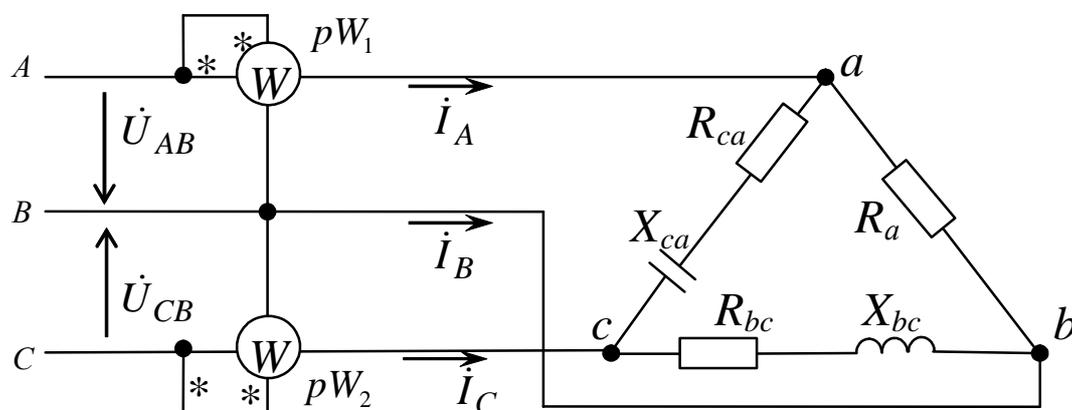


Рис. 3.13

Активная мощность цепи при включении ваттметров по рис. 3.13 определится следующим образом:

-показание первого ваттметра  $pW_1$ :

$$P_1 = \operatorname{Re}[\dot{U}_{AB} \dot{I}_A^*] = \operatorname{Re}[380e^{j30^\circ} \cdot 148,9e^{-j18,5^\circ}] =$$

$$= 380 \cdot 148,9 \cdot \cos 115^\circ = 55444,7, \text{ Вт};$$

-показание второго ваттметра  $pW_2$ :

$$P_2 = \operatorname{Re}[\dot{U}_{CB} \dot{I}_C^*] = \operatorname{Re}[-380e^{-j90^\circ} \cdot 47,1e^{-j163^\circ}] =$$

$$= \operatorname{Re}[380e^{j90^\circ} \cdot 47,1e^{-j163^\circ}] = 380 \cdot 47,1 \cdot \cos(-73,2^\circ) = 5172,5, \text{ Вт}.$$

Активная мощность цепи:

$$P = P_1 + P_2 = 55444,7 + 5172,5 = 60617,2, \text{ Вт} \approx 60,6, \text{ кВт}$$

## 4. Расчетно-графическая работа МЦ-2

### РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

*Цель работы:* изучение конструкции, принципа действия и режимов работы. Определение основных параметров трансформатора и построение Т-образной схемы замещения по паспортным данным.

*Задачи работы:* в результате выполнения работы студенты должны:

- знать принцип работы, технические характеристики, методы расчета трансформаторов;
- уметь рассчитывать основные параметры трансформаторов по паспортным и справочным данным;
- иметь навыки построения основных эксплуатационных характеристик.

#### 4.1. Задание

По техническим данным трехфазного двухобмоточного трансформатора требуется:

1) рассчитать и изобразить Т - образную схему замещения одной фазы.

При коэффициентах нагрузки  $\beta = 0,05; 0,2; 0,4; 0,8; 1,0; 1,2$ :

2) построить внешнюю характеристику  $U_2 = f(I_2)$ ;

3) определить и построить зависимости:

а) КПД:  $\eta = f(\beta)$ ;

б) отклонение напряжения  $\Delta U_2$ :  $\Delta U_2 = f(\beta)$ ;

4) построить векторную диаграмму трансформатора.

В табл. 4.1 приведены характер и коэффициент мощности нагрузки, при которой необходимо определить зависимости  $U_2 = f(I_2)$ ,  $\eta = f(\beta)$ ;  $\Delta U_2 = f(\beta)$ , а также построить векторную диаграмму трансформатора.

Таблица 4.1

Характер нагрузки	<i>R</i>	<i>RL</i>	<i>RL</i>	<i>RL</i>	<i>RC</i>	<i>RC</i>	<i>RC</i>
$\cos\varphi$	1	0,9	0,8	0,7	0,9	0,8	0,7
№ варианта	1; 8; 15; 22; 29; 36;43; 50; 57; 64; 71; 78; 85	2; 9; 16; 23; 30; 37;44; 51; 58; 65; 72; 79; 86	3; 10;17; 24; 31; 38; 45; 52; 59; 66; 73; 80; 87	4; 11;18; 25; 32; 39; 46; 53; 60; 67; 74; 81; 88	5; 12;19; 26; 33; 40; 47; 54; 61; 68; 75; 82; 89	6; 13;20; 27; 34; 41; 48; 55; 62; 69; 76; 83; 90	7; 14;21; 28; 35; 42; 49; 56; 63; 70; 77; 84

Технические характеристики трансформаторов приведены в табл. 4.2.

Способ соединения обмоток:

- 1)  $Y/Y_H - 0$  для четных вариантов;
- 2)  $\Delta/Y_H - 11$  для нечетных вариантов.

Таблица 4.2

№ варианта	Тип трансформатора	Мощность, кВА	Верхний предел номинального напряжения обмотки, кВ		Потери, кВт		Ток хол. хода, %	Напряжение КЗ на номинальной ступени, %
			ВН	НН	ХХ	КЗ		
	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ТМ - 25/6	25	6,3	0,23	0,170	0,6	5,15	4,5
2	ТМ - 40/6	40	6,3	0,4	0,240	0,880	4,5	4,5
3	ТМ - 63/6	63	6,3	0,4	0,360	1,28	4,5	4,5
4	ТМ -100/6	100	6,3	0,4	0,490	1,97	4,15	4,5
5	ТМ -160/6	160	6,3	0,23	0,73	2,65	3,85	4,5
6	ТМ -250/6	250	6,3	0,4	1,05	3,7	3,7	4,5
7	ТМ - 400/6	400	6,0	0,23	1,2	5,5	2,1	4,5
8	ТМВМ-25/6	25	6,3	0,23	0,105	0,6	0,6	4,5
9	ТМВМ-40/10	40	10,0	0,23	0,15	0,88	0,6	4,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	TMBM-63/6	63	6,3	0,23	0,22	1,28	0,55	4,5
11	TMBM-100/6	100	6,3	0,4	0,31	1,97	0,55	4,5
12	TMBM-160/6	160	6,3	0,4	0,46	2,65	0,5	4,5
13	TMBM-250/6	250	6,3	0,23	0,66	3,7	0,5	4,5
14	TM - 25/6	25	6,3	0,4	0,170	0,6	5,15	4,5
15	TM- 25/10	25	10,0	0,23	0,170	0,6	5,15	4,5
16	TM - 40/10	40	10,0	0,4	0,240	0,880	4,5	4,5
17	TM - 63/10	63	10,0	0,4	0,360	1,28	2,8	4,5
18	TM-100/10	100	10,0	0,4	0,490	1,97	4,15	4,5
19	TM-160/10	160	10,0	0,23	0,73	2,65	3,85	4,5
20	TM-250/10	250	10,0	0,23	1,05	3,7	3,7	4,5
21	TM-400/10	400	10,0	0,23	1,2	5,5	2,1	4,5
22	TMBM-25/10	25	10,0	0,23	0,105	0,6	0,6	4,5
23	TM - 40/10	40	10,0	0,23	0,240	0,880	4,5	4,5
24	TMBM-100/10	100	10,0	0,4	0,31	1,97	0,55	4,5
25	TMBM-160/10	160	10,0	0,23	0,46	2,65	0,5	4,5
26	TMBM-250/10	250	10,0	0,23	0,66	3,7	0,5	4,5
27	TМГ-100/10-X1	100	10,0	0,23	0,29	1,97	2,0	4,5
28	TМБГ-250/10-X1	250	10,0	0,23	0,525	3,7	0,45	4,7
29	TCM-320/10	320	10,0	0,525	1,35	4,65	5,5	4,5
30	TC3-169/10	160	6,0	0,23	0,7	2,7	5,5	4,0
31	TM - 63/10	63	10,0	0,23	0,360	1,28	2,8	4,5
32	TC3- 400/10	400	6,0	0,23	1,3	5,4	5,5	3,0
33	TC3C-630/10	630	6,3	0,4	2,0	8,5	8,0	2,0
34	TM -63/20	63	20,0	0,4	0,390	1,28	4,5	5,0
35	TM-100/20	100	20,0	0,4	0,625	1,97	4,15	6,5
36	TM-100/20	100	20,0	0,23	0,625	1,97	4,15	6,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
37	TM -63/20	63	20,0	0,23	0,390	1,28	4,5	5,0
38	TM-100/35	100	35,0	0,4	0,625	1,97	4,15	6,5
39	TM-100/35	100	35,0	0,23	0,625	1,97	4,15	6,5
40	TM -250/3	250	3,0	0,4	1,05	3,7	3,7	4,5
41	TM -160/3	160	3,0	0,23	0,73	2,65	3,85	4,5
42	TMBM-63/6	63	10,0	0,4	0,22	1,28	0,55	4,5
43	TM - 40/6	40	6,3	0,23	0,240	0,880	4,5	4,5
44	TM - 63/6	63	6,3	0,23	0,360	1,28	4,5	4,5
45	TM -250/6	250	6,3	0,23	1,05	3,7	3,7	4,5
46	TM - 400/6	400	6,0	0,4	1,2	5,5	2,1	4,5
47	TMBM-25/6	25	6,3	0,4	0,105	0,6	0,6	4,5
48	TMBM-63/6	63	6,3	0,4	0,22	1,28	0,55	4,5
49	TMBM-100/6	100	6,3	0,23	0,31	1,97	0,55	4,5
50	TMBM-160/6	160	6,3	0,23	0,46	2,65	0,5	4,5
51	TMBM-40/10	40	10,0	0,23	0,15	0,88	0,6	4,5
52	TM -160/6	160	6,3	0,4	0,73	2,65	3,85	4,5
53	TM -250/6	250	6,3	0,69	1,05	3,7	3,7	4,5
54	TM - 400/6	400	6,0	0,69	1,2	5,5	2,1	4,5
55	TMBM-40/6	40	6,3	0,4	0,15	0,88	0,6	4,5
56	TMBM-160/6	160	6,3	0,69	0,46	2,65	0,5	4,5
57	TM -160/6	160	6,3	0,69	0,73	2,65	3,85	4,5
58	TMBM-160/6	160	10,0	0,69	0,46	2,65	0,5	4,5
59	TH3- 25/10	25	10,0	0,4	0,12	0,49	3,0	4,5
60	TMГ-160/10-X1	160	10,0	0,23	0,44	2,65	1,8	4,5
61	TMBГ-250/10-X1	250	10,0	0,69	0,525	3,7	0,45	4,5
62	TMГ-400/10-X1	400	10,0	0,23	0,8	5,5	1,1	4,5
63	TM-160/10	160	10,0	0,4	0,73	2,65	3,85	4,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
64	TM-250/10	250	10,0	0,69	1,05	3,7	3,7	4,5
65	TM-400/10	400	10,0	0,69	1,2	5,5	2,1	4,5
66	TMBM-40/6	40	6,3	0,23	0,15	0,88	0,6	4,5
67	TMГ-100/10-X1	100	10,0	0,4	0,29	1,97	2,0	4,5
68	TMГ-160/10-X1	160	10,0	0,4	0,44	2,65	1,8	4,5
69	TMГ-400/10-X1	400	10,0	0,4	0,8	5,5	1,1	4,5
70	TMBM-250/10	250	10,0	0,4	0,66	3,7	0,5	4,5
71	TC-630/10	630	10,0	0,4	2,0	7,3	5,5	1,5
72	TM-250/10	250	10,0	0,4	1,05	3,7	3,7	4,5
73	TMBГ-250/10-X1	250	10,0	0,4	0,525	3,7	0,45	4,5
74	TM-100/10	100	10,0	0,23	0,490	1,97	4,15	4,5
75	TMBM-25/10	25	10,0	0,4	0,105	0,6	0,6	4,5
76	TMBM-63/10	63	10,0	0,23	0,22	1,28	0,55	4,5
77	TMГ-160/10-X1	160	10,0	0,69	0,44	2,65	1,8	4,5
78	TMГ-400/10-X1	400	10,0	0,69	0,8	5,5	1,1	4,5
79	TC3-400/15	400	13,8	0,4	1,4	6,0	8,0	3,5
80	TM-400/10	400	10,0	0,4	1,2	5,5	2,1	4,5
81	TMBM-100/10	100	10,0	0,23	0,31	1,97	0,55	4,5
82	TMBM-160/10	160	10,0	0,4	0,46	2,65	0,5	4,5
83	TMBM-250/6	250	6,3	0,4	0,66	3,7	0,5	4,5
84	TM-160/10	160	10,0	0,69	0,73	2,65	3,85	4,5
85	TMBM-250/10	250	10,0	0,69	0,66	3,7	0,5	4,5
86	TM- 25/10	25	10,0	0,4	0,170	0,6	5,15	4,5
87	TC3- 250/15	250	13,8	0,4	1,1	4,4	8,0	4,0
88	TC3-250/10	250	6,0	0,4	1,0	3,8	5,5	3,5
89	TM -100/6	100	6,3	0,23	0,490	1,97	4,15	4,5
90	TMBM-250/6	250	6,3	0,69	0,66	3,7	0,5	4,5

## 4.2. Методические рекомендации

Для расшифровки обозначения трансформаторов следует учесть, что установлены следующие условные обозначения:

ТМ – трехфазный масляный;

ТНЗ – трехфазный с регулированием под нагрузкой с естественным масляным охлаждением;

ТМВМ – трехфазный с принудительной циркуляцией воды и естественной циркуляцией масла;

ТМГ – трехфазный масляный с герметичным исполнением;

ТМВГ – трехфазный масляный с принудительной циркуляцией воды и естественной циркуляцией масла с герметичным исполнением;

ТСЗ – трехфазный, естественное воздушное охлаждение при защищенном исполнении;

ТСЗС – трехфазный, сухой, защищенный.

## 4.3. Примеры расчёта силовых трансформаторов

*Задача 4.3.1.* Однофазный трансформатор характеризуется следующими номинальными величинами: мощность  $S_n = 30$  кВА, первичное напряжение  $U_{1н} = 10$ , кВ, вторичное напряжение  $U_{2н} = 0,4$ , кВ. Мощность потерь холостого хода  $P_0 = 250$  Вт; ток холостого хода  $i_0 = 3,5$  %; мощность потерь короткого замыкания  $P_k = 600$ , Вт; напряжение короткого замыкания  $U_k = 5,5$  %.

Определить параметры полной схемы замещения трансформатора. Принять, что в опыте короткого замыкания мощность потерь делится поровну между первичной и вторичной обмотками.

*Решение:*

Расчет ведем по номинальным характеристикам трансформатора, которые обычно приводятся в каталоге. Под номинальной мощностью трансформатора понимается полная мощность  $S_n$ , которая всегда задается в кВА. Номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток ( $U_{1н}$  и  $U_{2н}$ ) в каталоге и на паспортном щитке приводятся в кВ.

Параметры схемы замещения (рис. 4.1) определяют из опытов холостого хода и короткого замыкания.

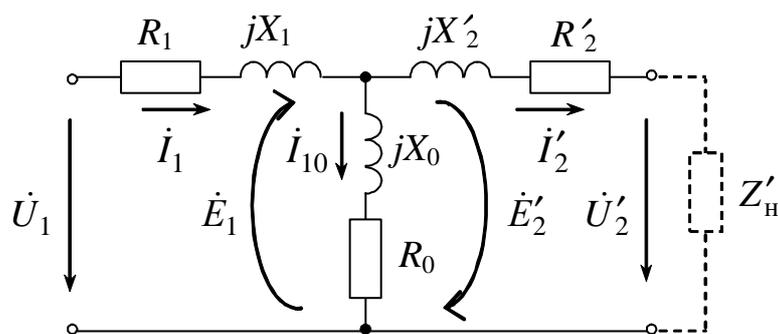


Рис. 4.1

Величины сопротивлений  $X_0$  и  $R_0$  намагничивающей ветви схемы замещения определяются по результатам опыта *холостого хода* (ХХ).

В опыте ХХ первичная обмотка трансформатора присоединяется к источнику переменного тока напряжением  $U_{1н}$ , а вторичная цепь трансформатора размыкается, т.е.  $I_2 = 0$ . Под действием приложенного напряжения  $U_1$  в первичной цепи протекает ток  $I_{10}$ , называемый током холостого хода.

Ток  $I_{10}$  очень мал и обычно не превышает нескольких процентов от номинального первичного тока. Поэтому с большой степенью точности падением напряжения на активном и реактивном сопротивлениях первичной обмотки можно пренебречь, а уравнение электрического состояния записать как:

$$\dot{U}_{1н} = -\dot{E}_1.$$

Следовательно, схема замещения в опыте ХХ имеет вид (рис. 4.2):

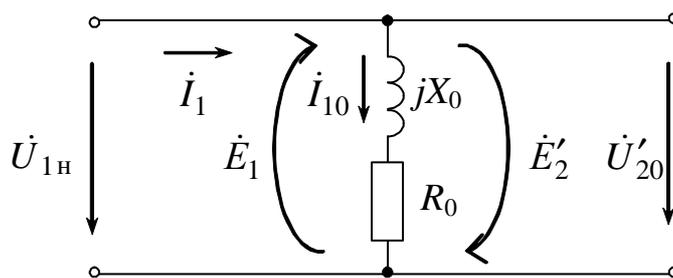


Рис. 1.2

$I_{10}$  выражают в процентах по отношению к номинальному первичному току  $I_{1н}$  и эта величина  $i_0$  относится к «паспортным» параметрам трансформатора:

$$i_0 = \left( \frac{I_{10}}{I_{1н}} \right) \times 100\%.$$

Ток  $I_{1н}$ , можно вычислить по номинальным параметрам ( $S_H = 30$ , кВА и  $U_{1н} = 10$ , кВ):

$$I_{1н} = S_H / U_{1н} = 30 \times 10^3 / 10 \times 10^3 = 3, \text{ А.}$$

Следовательно,

$$I_{10} = (i_0 \times I_{1н}) / 100\% = (3,5 \times 3) / 100 = 0,105, \text{ А.}$$

Мощность  $P_0$ , потребляемая трансформатором в режиме ХХ, равна магнитным потерям (потерями в стали), т.е.  $P_0 \approx P_{ст}$ .

В соответствии со схемой изображенной на рисунке 4.2, вся активная мощность в этой «цепи» потребляется резистивным элементом  $R_0$ , следовательно:

$$R_0 = P_0 / (I_{10})^2 = 250 / (0,105)^2 = 22675,74, \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление «цепи»  $Z_0$  в опыте ХХ

$$Z_0 = U_{1н} / I_{10} = 10 \times 10^3 / 0,105 = 95238,1, \text{ Ом.}$$

Тогда сопротивление  $X_0$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{95238,1^2 - 22674,74^2} = 92499,4, \text{ Ом.}$$

Величины сопротивлений «продольной» ветви схемы замещения  $R_k = R_1 + R'_2$  и  $X_k = X_1 + X'_2$  определяются по результатам опыта *короткого замыкания* (КЗ).

Под *опытом короткого замыкания* (КЗ) трансформатора понимается такой режим, при котором его вторичная обмотка при испытании замкнута накоротко, а к первичной обмотке подводится пониженное напряжение, называемое напряжением короткого замыкания  $U_{1к}$ , при этом в обмотках протекают номинальные токи  $I_{1н}$  и  $I_{2н}$ .

Мощность, измеряемая в первичной цепи в режиме короткого замыкания, равна приблизительно номинальным электрическим потерям на нагрев обмоток трансформатора  $P_k = P_{обм}$ .

Мощностью потерь в стали  $P_{ст}$  (пропорциональных величине магнитного потока) можно пренебречь, так как  $U_1$  мало, следовательно, мал и рабочий магнитный поток, пропорциональный этому напряжению.

Намагничивающая составляющая тока первичной обмотки в опыте короткого замыкания  $I_{10к}$  пренебрежительно мал, следовательно, схему замещения с большой степенью точности можно представить в виде:

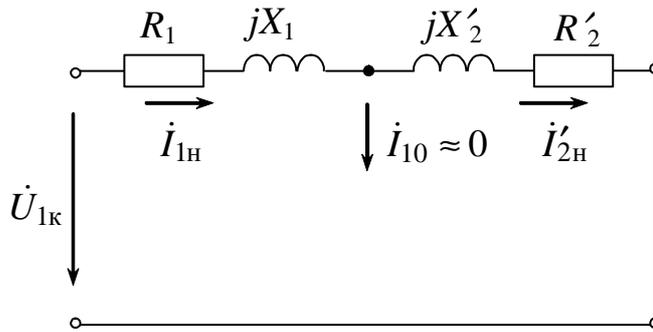


Рис.4.3

Напряжения  $U_K$ , которое выражается в процентах к номинальному напряжению первичной обмотки  $U_{1н}$ :

$$U_K(\%) = 100 \frac{U_{1к}}{U_{1н}},$$

является паспортной величиной. Для рассматриваемого трансформатора  $U_K = 5,5\%$  (см условия задачи).

Определяется  $U_{1к}$ :

$$U_{1к} = (U_{1н} \times U_K) / 100\% = (10 * 10^3 \times 5,5\%) / 100\% = 550, \text{ В.}$$

при этом в обмотках протекают номинальные токи  $I_{1н}$  и  $I_{2н}$ .

Так как активная мощность, потребляемая цепью в режиме короткого замыкания, затрачивается на активном сопротивлении обмоток ( $P_K = P_{обм}$ ), представленных на схеме (рис. 4.3) элементами  $R_1$  и  $R'_2$  и, при этом, в обмотках протекают номинальные токи  $I_{1н} = I'_{2н}$ , суммарное сопротивление можно рассчитать .

$$R_K = R_1 + R'_2 = P_K / (I_{1н})^2 = 600 / (3)^2 = 66,66, \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление «цепи»  $Z_K$  в опыте КЗ

$$Z_K = U_{1к} / I_{1н} = 550 / 3 = 183,33, \text{ Ом.}$$

Тогда сопротивление  $X_K$ :

$$X_K = X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{183,33^2 - 66,66^2} = 170,78, \text{ Ом.}$$

Принимая, что в опыте короткого замыкания мощность потерь делится поровну между первичной и вторичной обмотками, можно определить как параметры продольной ветви схемы замещения, так и реальные величины активных и реактивных сопротивлений первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$R_1 = R'_2 = R_K / 2 = 33,33, \text{ Ом; } X_1 = X'_2 = X_K / 2 = 85,39, \text{ Ом.}$$

На схеме замещения параметры вторичной цепи «приводятся» к первичной в соответствии с выражениями:

$$R'_2 = k^2 \times R_2; \quad X'_2 = k^2 \times X_2.$$

где  $k$  – коэффициент трансформации, который определяется по результатам опыта ХХ.

При холостом ходе отношение первичного напряжения ко вторичному равно с большой точностью коэффициенту трансформации

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_{1H}}{U_{20}} = (10 \times 10^3) / 400 = 25.$$

Отметим, что номинальным напряжением вторичной обмотки  $U_{2H}$  принимается напряжение трансформатора в опыте холостого хода  $U_{20}$ , тогда

$$R_2 = R'_2 / k^2 = 33,33 / (25)^2 = 0,0533, \text{ Ом};$$

$$X_2 = X'_2 / k^2 = 85,39 / (25)^2 = 0,1366, \text{ Ом}.$$

Таким образом, все параметры схемы замещения определены.

**Задача 4.3.2.** Для трехфазного трансформатора, паспортные данные которого приведены в таблице 4.3, построить Т-образную схему замещения.

Таблица 4.3

Тип трансформатора	$S_H$ , кВА	$U_{1H}$ , кВ	$U_{2H}$ , кВ	$i_0$ , %	$u_k$ , %	$P_0$ , кВт	$P_k$ , кВт	Способ соединения обмоток
ТМ-40/10	40	10	0,4	3,0	4,5	0,190	0,880	Y / Y – 0

В отличие от однофазного схема замещения трехфазного трансформатора составляется для одной фазы.

При этом, следует учитывать следующие особенности расчета:

- номинальная полная мощность трансформатора  $S_H$  и мощности потерь -  $P_0$  в опыте холостого хода и  $P_k$  в опыте короткого замыкания приходятся на три фазы;

- номинальные фазные напряжения  $U_{1Hф}$  и  $U_{2Hф}$ , а также фазные токи  $I_{1Hф}$  и  $I_{2Hф}$  определяются в соответствии со способом соединения первичных и вторичных обмоток, так как под номинальными напряжениями понимаются линейные напряжения на зажимах трансформаторов режиме холостого хода.

*Решение:*

Строится Т-образная схема замещения (рис.4.1) для одной фазы трехфазного трансформатора ТМ-40/10, паспортные параметры которого приведены в таблице 4.3.

Номинальные токи трансформатора (под ними всегда понимаются линейные токи) равны:

$$I_{1H} = S_H / (\sqrt{3} U_{1H}) = 40 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} 10 \cdot 10^3) = 2,31, \text{ А};$$
$$I_{2H} = S_H / (\sqrt{3} U_{2H}) = 40 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 10^3) = 57,74, \text{ А}.$$

Первичная обмотка рассматриваемого трехфазного трансформатор имеет схему соединения «звезда», а вторичная - «звезда с нулевым проводом», следовательно, номинальные фазные напряжения:

$$U_{1H\phi} = U_{1H} / \sqrt{3} = 10 \cdot 10^3 / \sqrt{3} = 5,774, \text{ кВ};$$
$$U_{2H\phi} = U_{2H} / \sqrt{3} = 0,4 \cdot 10^3 / \sqrt{3} = 0,231, \text{ кВ};$$

а фазные токи при  $I_{1H\phi}$  и  $I_{2H\phi}$  при таком способе соединения обмоток равны линейным.

Ток холостого хода первичной обмотки

$$I_{10} = (i_0 \times I_{1H\phi}) / 100\% = (3,0 \times 2,31) / 100 = 0,0693, \text{ А}.$$

Напряжение в опыте короткого замыкания  $U_{1K}$

$$U_{1K} = (U_{1H} \times U_K) / 100\% = (10 \cdot 10^3 \times 4,5 \%) / 100\% = 450, \text{ В}.$$

Далее расчет параметров схемы замещения в целом аналогичен расчету, проведенному для однофазного трансформатора (см. задачу 4.3.1) с учетом распределения потерь на три фазы

$$R_0 = (P_0/3) / (I_{10})^2 = (0,190 \cdot 10^3 / 3) / (0,0693)^2 = 13187,6 \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление ветви намагничивания  $Z_0$ :

$$Z_0 = U_{1H\phi} / I_{10} = (5,774 \cdot 10^3) / 0,0693 = 83318,9, \text{ Ом};$$

тогда сопротивление  $X_0$ :

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{83318,9^2 - 13187,6^2} = 82268,6, \text{ Ом}.$$

Параметры продольной ветви схемы замещения

$$R_K = R_1 + R'_2 = (P_K/3) / (I_{1H\phi})^2 = (0,88 \cdot 10^3 / 3) / (2,31)^2 = 54,97, \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление  $Z_K$

$$Z_K = U_{1K} / I_{1H\phi} = 450 / 2,31 = 194,8, \text{ Ом};$$

тогда сопротивление  $X_k$ :

$$X_k = X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{194,8^2 - 54,97^2} = 186,89, \text{ Ом.}$$

Принимая, как и в задаче 4.3.1, что в опыте короткого замыкания мощность потерь делится поровну между первичной и вторичной обмотками, можно определить как параметры продольной ветви схемы замещения одной фазы трансформатора:

$$R_1 = R'_2 = R_k / 2 = 27,485, \text{ Ом; } X_1 = X'_2 = X_k / 2 = 93,445, \text{ Ом.}$$

Параметры схемы замещения определены.

Построение внешней характеристики  $U = f(I)$  и эксплуатационных характеристик  $\Delta u_2 = f(\beta)$  и  $\eta = f(\beta)$  осуществляется с помощью следующих выражений.

Коэффициент нагрузки

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{НОМ}}} = \frac{I_1}{I_{1\text{НОМ}}}.$$

Изменение напряжения  $U_2$  в режиме нагрузки (в %)

$$\Delta u_2 = \beta u_k \cos(\varphi_2 - \varphi_k), \%$$

где  $u_k = \frac{U_{1к}}{U_{1н}} \cdot 100\%.$

КПД трансформатора

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_2 + \Delta P_x + \beta^2 \Delta P_k}$$

Построение векторных диаграмм токов и напряжений производится с учетом характера нагрузки. Угол между током  $\dot{I}_2$  и  $\dot{E}_2$  равен

$$\psi = \text{arctg} \frac{X'_2 + X'_H}{R'_2 + R'_H},$$

## 5. Расчетно-графическая работа ЭМ-1

### РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Цель работы:* изучение конструкции, принципа действия, расчет характеристик трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

*Задачи работы:* в результате выполнения работы студенты должны:

- знать принцип работы, паспортные и технические характеристики, конструктивные особенности трехфазных асинхронных двигателей;
- уметь составлять и читать электротехнические схемы включения двигателей в трехфазную сеть, определять основные электро-механические величины двигателя по паспортным и справочным данным;
- иметь навыки расчета механической и некоторых рабочих характеристик.

#### 5.1. Задание

По заданным параметрам асинхронного двигателя (табл. 5.1):

- 1) определить схему включения обмотки статора;
- 2) рассчитать и построить механическую характеристику  $n_2 = f(M)$  и характеристику “момент - скольжение”  $M = f(s)$ ;
- 3) рассчитать значение пускового тока;
- 4) определить, возможен ли запуск электродвигателя при аварийном пониженном напряжении сети на  $\Delta U, \%$ ;
- 5) рассчитать сечение токоподводящих проводов, приняв плотность тока  $3 \text{ А/мм}^2$ .

Таблица 5.1

Технические характеристики асинхронных электродвигателей

	Тип двигателя	$P_H$ кВт	$U_{НОМ}$ В	$n_H$ об/мин	$\eta$ %	$\cos \varphi_H$	$\alpha$	$\beta$	$\lambda$	$\Delta U$ %
1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12
<b><math>U_{сети} = 380 В</math></b>										
1	<b>4А50В2</b>	0,12	380	2710	63,0	0,70	4,0	2,0	2,2	10
2	<b>РА200L8</b>	15	380	730	88	0,8	5,7	2,0	2,5	7
3	<b>АИР315S6</b>	110	220/380	987	93	0,92	6	1,4	2,3	15
4	<b>4А56А2</b>	0,18	380	2800	66,0	0,76	4,0	2,0	2,2	20
5	<b>4А56В4</b>	0,18	380	1365	64,0	0,64	3,5	2,1	2,2	5
6	<b>РА200L4</b>	30	380/660	1475	91	0,86	7,7	2,7	3,2	3
7	<b>АИР160 М4</b>	18,5	380/660	1455	90,5	0,89	7	1,9	2,9	15
<b><math>U_{сети} = 380 В</math></b>										
8	<b>4А63А6</b>	0,18	380	885	56,0	0,62	3,0	2,2	2,2	6
9	<b>РА208</b>	15	380/660	730	88	0,8	5,7	2,0	2,5	7
10	<b>АИР3S6</b>	110	220/380	987	93	0,92	6	1,4	2,3	10
11	<b>4А63В2</b>	0,55	380	2740	73,0	0,86	4,5	2,0	2,2	8
12	<b>4А71А4</b>	0,55	380	1390	70,5	0,70	4,5	2,0	2,2	10
13	<b>РА71А2</b>	0,37	380	2800	71	0,81	5,0	2,3	2,4	9
14	<b>АИРА2</b>	0,09	220/380	2655	60	0,75	4,5	2,2	2,2	12
15	<b>4А71В6</b>	0,55	380	900	67,5	0,71	4,0	2,0	2,2	6
16	<b>4А80В8</b>	0,55	380	700	64,0	0,65	3,5	1,6	1,7	11
17	<b>4А71А2</b>	0,75	380	2840	77,0	0,87	5,5	2,0	2,2	13
18	<b>РА10В4</b>	3	380	1420	81	0,81	6,2	2,2	2,6	6

1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12
19	<b>АИР250М2</b>	90	220/380	2940	93	0,92	7,5	1,8	3	7
20	<b>4А80А6</b>	0,75	380	915	69,0	0,74	4,0	2,0	2,2	10
21	<b>4А90А8</b>	0,75	380	700	68,0	0,62	3,5	1,6	1,9	8
22	<b>РА18М</b>	22	380/660	2940	90,5	0,89	7,5	2,1	3,5	10
23	<b>АИР132S4</b>	7,5	220/380	1440	87,5	0,86	7,5	2,0	2,5	9
24	<b>4А71В2</b>	1,1	380	2810	77,5	0,87	5,5	2,0	2,2	12
25	<b>4А80А4</b>	1,1	220/380	1420	75,0	0,81	5,0	2,0	2,2	6
26	<b>РА160L2</b>	18,5	380	2940	90	0,88	7,5	2,0	3,2	11
27	<b>АИР160S6</b>	11,0	220/380	970	88	0,83	6,5	2,0	2,7	13
28	<b>4А90В8</b>	1,1	220/380	700	70,0	0,68	3,5	1,6	1,9	6
29	<b>4А80А2</b>	1,5	220/380	2850	81,0	0,85	6,5	2,1	2,6	7
30	<b>РА90L2</b>	2,2	380	2820	82	0,87	6,5	2,9	3,4	10
31	<b>АИР132S8</b>	4	220/380	716	83	0,7	6,0	1,8	2,2	8
32	<b>4А80В4</b>	1,5	220/380	1415	77,0	0,83	5,0	2,0	2,2	10
<b><math>U_{\text{сети}} = 380 \text{ В}</math></b>										
33	<b>4А80В2</b>	2,2	380	2850	83,0	0,87	6,5	2,1	2,6	9
34	<b>РА160ML6</b>	11,0	380	970	88,5	0,82	6,5	2,2	2,9	6
35	<b>АИР132М6</b>	7,5	220/380	960	85,5	0,81	7,0	2,0	2,2	7
36	<b>4А904</b>	2,2	220/380	1425	80,0	0,83	6,0	2,1	2,4	10
37	<b>4А1006</b>	2,2	220/380	950	81,0	0,73	5,0	2,0	2,2	8
38	<b>РА112М2</b>	4,0	380	2895	84	0,87	6,8	2,2	3,3	10
39	<b>АИР132М8</b>	5,5	220/380	712	83	0,74	6,0	1,8	2,2	9
40	<b>4А112МА8</b>	2,2	380	700	76,5	0,71	5,0	1,9	2,2	12
44	<b>4А902</b>	3,0	380	2840	84,5	0,88	6,5	2,1	2,5	6
45	<b>4А1004</b>	3,0	380	1435	82,0	0,83	6,0	1,6	2,4	11
46	<b>4А112МА6</b>	3,0	380	955	81,0	0,76	6,0	2,0	2,5	13

1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12
47	RA80A2	9,0	380	2820	74	0,83	5,3	2,5	2,7	7
48	AIP80B4	1,5	220/380	1395	78	0,83	5,5	1,6	2,2	15
49	4A112MB8	3,0	380	700	79,0	0,74	5,0	1,9	2,2	6
50	4A112MB6	4,0	380	950	82,0	0,81	6,0	2,0	2,5	7
51	4A132M2	11,0	380/660	2900	88,0	0,90	7,5	1,7	2,8	10
52	RA80B2	1,1	380	2880	77	0,86	5,2	2,6	2,8	8
53	AIP112MB8	5,5	220/380	712	83	0,74	6,0	1,8	2,2	10
54	4A132M6	4,0	380	950	82	0,81	6,0	2,0	2,2	9
55	4A1606	11,0	380/660	975	86,0	0,86	6,0	1,2	2,2	12
56	4A160M8	11,0	380	730	87,0	0,75	6,0	1,4	2,2	6
57	RA132SA2	5,5	380	2880	89	0,89	6,5	2,4	3,0	11
58	AIP112MB8	3,0	220/380	708	79	0,74	6,0	1,8	2,2	13
59	4A1602	15,0	380/660	2940	88,0	0,91	7,0	1,4	2,2	10
60	4A1604	15,0	380/660	1465	88,5	0,88	7,0	1,4	2,3	9
<b><math>U_{\text{сети}} = 660 \text{ В}</math></b>										
61	4A1802	22,0	380/660	2945	88,5	0,91	7,5	1,4	2,5	6
62	4A1804	22,0	380/660	1470	90,0	0,90	6,5	1,4	2,3	7
63	4A200M6	22,0	660	975	90,0	0,90	6,5	1,3	2,4	10
64	4AH180M6	22,0	380/660	975	88,5	0,87	6,0	1,2	2,0	8
65	RA200LA2	30,0	380/660	2950	92	0,89	7,5	2,4	3,0	10
66	AIP250S6 MB8	45,0	660	980	92,5	0,85	6,5	1,5	2,3	9
67	4A2008	22,0	380/660	730	88,5	0,84	5,5	1,2	2,0	12
68	4A200M2	37,0	380/660	2945	90,0	0,89	7,5	1,4	2,5	6
69	4A200M4	37,0	380/660	1475	91,0	0,90	7,0	1,4	2,5	11
70	4A225M6	37,0	380/660	980	91,0	0,89	6,5	1,2	2,3	13
71	4A2508	37,0	660	735	90,0	0,83	6,0	1,2	2,0	7

1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12
72	4A28010	37,0	380/660	590	91,0	0,78	6,0	1,0	1,8	15
73	4A2002	45,0	660	2945	91,0	0,90	7,5	1,4	2,5	6
74	4A2004	45,0	380/660	1475	92,0	0,90	7,0	1,4	2,5	7
75	RA80B2	1,1	380	2880	77	0,86	5,2	2,6	2,8	10
76	АИР112МВ8	5,5	660	712	83	0,74	6,0	1,8	2,2	8
77	4АН225М6	45,0	660	980	91,0	0,87	6,5	1,2	2,0	10
78	4АН2508	45,0	660	770	91,0	0,81	5,5	1,2	1,9	9
79	4A2502	75,0	380/660	2960	91,0	0,89	7,5	1,2	2,5	12
80	4A2504	75,0	660	1480	93,0	0,90	7,0	1,2	2,3	6
81	4A2806	75,0	380/660	985	92,0	0,89	5,5	1,4	2,2	11
82	RA180L4	22,0	660	1480	91	0,88	7,0	2,1	2,9	13
83	АИР250S4	75,0	380/660	1477	94	0,88	7,5	1,7	2,5	7
84	4A280M8	75,0	380/660	735	92,5	0,85	5,5	1,2	2,0	15
85	4A315M10	75,0	660	590	92,0	0,80	6,0	1,0	1,8	14
<b><math>U_{\text{сети}} = 660 \text{ В}</math></b>										
86	4A35512	75,0	380/660	490	91,5	0,76	6,0	1,0	1,8	3
87	4A250M2	90,0	380/660	2960	92,0	0,90	7,5	1,2	2,5	4
88	4A250M4	90,0	380/660	1480	93,0	0,91	7,0	1,2	2,3	6
89	4A280M6	90,0	380/660	985	92,5	0,89	5,5	1,4	2,2	7
90	4A3158	90,0	380/660	740	93,0	0,85	6,5	1,2	2,3	10
91	4A35510	90,0	380/660	590	92,5	0,83	6,0	1,0	1,8	8
92	4A355M12	90,0	380/660	495	92,0	0,76	6,0	1,0	1,8	10
93	4A315M2	2000	380/660	2970	92,5	0,90	7,0	1,2	2,2	9
94	RA200LB2	37,0	380/660	2850	92	0,89	7,5	2,6	2,8	12
95	АИР112МВ8	110	380/660	738	93	0,86	6,0	1,1	2,2	6
96	4АН280M2	2000	660	2960	94,5	0,90	6,5	1,2	2,2	11
97	4A315M4	2000	660	1480	94,0	0,92	6,0	1,3	2,2	13

1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12
98	4АН3154	2000	660	1475	94,0	0,91	6,0	1,2	2,0	7
99	4А355М6	200,0	660	985	94,0	0,90	6,5	1,4	2,2	15
100	4АН355М8	200,0	660	740	94,0	0,86	5,5	1,2	1,9	6

**Примечание:**

В таблице приняты следующие обозначения:

-  $\alpha = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{н}}}$  - кратность пускового тока;

-  $\beta = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}}$  - кратность пускового момента;

-  $\lambda = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{н}}}$  - кратность максимального момента (перегрузочная

способность двигателя).

## 5.2. Методические рекомендации

1) При определении схемы включения в сеть обмоток статора следует учесть, что номинальное напряжение двигателя:

- 380 В соответствует соединению обмоток двигателя – «звезда»;
- 660 В соответствует соединению обмоток двигателя – «звезда»;
- 220/380, 380/660 соответствует соединению обмоток двигателя – «треугольник»/«звезда».

2) Построение механической характеристики следует производить по основным расчетным точкам – холостого хода, номинального режима, критического режима и пуска, а также двум произвольно выбранным точкам в области устойчивой работы двигателя.

3) Для определения частоты вращения магнитного поля статора ( $n_1$ ) необходимо знать число пар полюсов двигателя. Для этого можно воспользоваться маркировкой двигателя.

Обозначение двигателя включает в себя следующую структуру:

$\underline{Y}$     $\underline{A}$     $\underline{X}$     $\underline{X}$     $\underline{XXX}$     $\underline{X}$     $\underline{X}$     $\underline{X}$     $\underline{X}$     $\underline{X}$   
 1   2   3   4   5   6   7   8   9   10

1 – порядковый номер серии;

2 – род двигателя – асинхронный;

3 – исполнение по степени защиты (Н – IP23, отсутствие данного знака - IP44);

4 - исполнение двигателя по материалу станины и щита (А – станина и щиты алюминиевые; Х – станина алюминиевая, щиты чугунные или наоборот; отсутствие данного знака означает, что станина и щиты чугунные или стальные);

5 - высота оси вращения;

6 - условная длина станины по МЭК (S,M,L);

7 – длина сердечника статора (А или В, отсутствие данного знака означает одну длину в установочном размере);

8 – климатические исполнения по ГОСТ 15150-69 (У – для умеренного климата);

9 – число полюсов: 2,4,6,8,10,12;

10 – категория размещения по ГОСТ 15150-69(3) (1 – на открытом воздухе; 2 – в помещения, в которых отсутствует прямое воздействие атмосферных осадков и солнечной радиации; 3 – закрытые помещения с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий).

Стандарты на конструктивное исполнение электрических машин приведены в приложении П-1.

Примеры обозначения асинхронных двигателей:

● 5А250М-4

5А – асинхронный двигатель 5 серии;

250 – высота оси вращения, мм;

М – длина средняя корпуса по установочным размерам;

4 – число полюсов (1500 об/мин).

● RA100M4

RA – российский асинхронный двигатель;

100 – высота оси вращения, мм;

М – длина средняя корпуса по установочным размерам;

4 – число полюсов (1500 об/мин).

● 4А200L4УЗ

4А – асинхронный двигатель 4 серии закрытый обдуваемый;

200 – высота оси вращения, мм;

L – большая длина корпуса по установочным размерам;

4 – число полюсов (1500 об/мин);

У – для районов с умеренным климатом,  
З – категория размещения -для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий.

- АИР250S6

АИР – асинхронный двигатель серии АИР: разработка этой серии базировалась, кроме отечественных стандартов, на рекомендациях МЭК (Международной электротехнической комиссии);

250 – высота оси вращения, мм;

S – малая длина корпуса по установочным размерам;

6 – число полюсов (1000 об/мин).

### 5.3. Примеры расчёта характеристик асинхронных двигателей

*Задача 5.3.1.* Асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором типа 4А100S4 имеет следующие паспортные данные: напряжение  $U = 220/380\text{В}$ , номинальная мощность  $P_{\text{н}} = 3$ , кВт; частота вращения  $n_{\text{н}} = 1434$ , об/мин; КПД  $\eta = 82,0\%$ ; коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0,83$ ; кратность пускового тока  $\alpha = 6,0$ ; перегрузочная способность двигателя  $\lambda = 2,4$ ; кратность пускового момента  $\beta = 2,0$ .

Определить, номинальный и пусковой токи двигателя при соединении обмотки статора в треугольник и звезду. Построить механическую характеристику не менее чем по 6 расчетным точкам. Определить, возможен ли пуск нагруженного двигателя, если подводимое напряжение на 10% ниже номинального и если пуск производится путем переключения обмоток статора со звезды на треугольник от сети с напряжением 220В.

*Решение:*

Для определения числа пар полюсов можно воспользоваться маркировкой двигателя, частотой вращения магнитного поля или ротора.

Структура типоразмера двигателя следующая приведена в методических указаниях.

Для заданного двигателя число полюсов по маркировке – 4, следовательно, две пары полюсов  $p=2$

Частота вращения магнитного поля  $n_1 = 60f_1/p = 1500$  об/мин. Эту же величину можно получить отталкиваясь от номинальной частоты вращения ротора  $n_H = 1434$  об/мин и используя стандартную шкалу скоростей, при этом частота вращения поля будет иметь ближайшее большее значение -  $n_1 = 1500$  об/мин.

Номинальное значение скольжения

$$s_H = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1500 - 1434}{1500} = 0,044 \text{ или } 4,4 \%$$

### Определение электрических характеристик двигателя

Для определения фазных, линейных и пусковых токов (фазными токами являются токи в обмотках статора, линейными – токи в подводящих проводах) нужно учесть, что если двигатель рассчитан на работу от сети переменного тока с напряжением 220/380В, то это значит, что каждая фаза обмотки статора рассчитана на напряжение 220В. Обмотку необходимо включить по схеме “треугольник”, если в сети линейное напряжение  $U = 220$ В, и по схеме “звезда”, если в сети линейное напряжение  $U = 380$ В (рис 5.1)

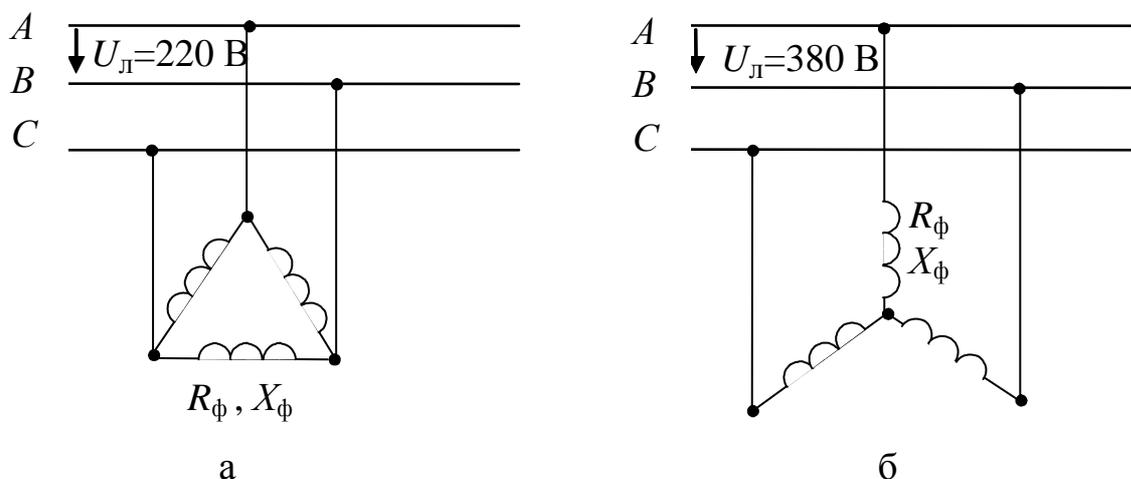


Рис. 5.1 Схемы соединения обмоток статора:  
а) треугольник; б) звезда

Мощность потребляемая двигателем из сети:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{3000}{0,82} = 3750, \text{ об/мин.}$$

Определим фазный, линейный и пусковой токи при линейном напряжении  $U_{л} = 220$ , В и соединении обмотки статора по схеме «треугольник», при этом  $U_{л} = U_{\phi}$ .

Фазный ток в обмотке статора:

$$I_{\phi} = \frac{P_1}{3U_{\phi} \cos \varphi} = \frac{3750}{3 \cdot 220 \cdot 0,83} = 6,85, \text{ А.}$$

Линейный ток – ток в проводах, питающих двигатель:

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi} = \sqrt{3} \cdot 6,85 = 11,92, \text{ А.}$$

Пусковой ток:

$$I_{\text{п}} = \alpha \cdot I_{\text{л}} = 6 \cdot 11,92 = 71,52, \text{ А.}$$

Найдем значения фазных, линейных и пусковых токов, если обмотки статора включены по схеме “звезда” и подключены к сети с линейным напряжением  $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ .

Значение фазного тока найдем из формулы мощностей для линейных значений токов и напряжений с учетом того, что при данном соединении линейный ток равен фазному:

$$I_{\phi} = I_{\text{л}} = \frac{P_1}{3U_{\phi} \cos \varphi} = \frac{3750}{3 \cdot 220 \cdot 0,83} = 6,85, \text{ А.}$$

Пусковой ток:

$$I_{\text{п}} = \alpha \cdot I_{\text{л}} = 6 \cdot 6,85 = 41,1, \text{ А.}$$

Из сопоставления токов можно увидеть, что фазные токи получились одинаковыми, а линейные и пусковые токи при схеме включения по схеме «треугольник» больше в  $\sqrt{3}$  раз. Для уменьшения этих токов на момент пуска обмотки статора включают по схеме «звезда».

### *Определение механических параметров и построение механической характеристики*

Механическая характеристика двигателя является основной характеристикой и представляет собой зависимость  $M = f(n_2)$ , а в свою очередь  $n_2 = f(s)$ .

Механическая характеристика строится по четырем основным и нескольким вспомогательным токам. Основные точки следующие:

1. *Режим холостого хода:*  $M = 0, s = 0, n_2 = n_1 = 1500 \text{ об/мин.}$
2. *Номинальный режим:*  $M = M_{\text{н}}, s = s_{\text{н}}, n_2 = n_{\text{н}}.$

Номинальный вращающий момент двигателя:

$$M_{\text{н}} = 9,55 \frac{P_2}{n_2} = 9,55 \cdot \frac{3000}{1434} = 19,97 \approx 20, \text{ Нм;}$$

$$n_2 = n_{\text{н}} = 1434, \text{ об/мин.}$$

3. *Критическая точка:*  $M = M_{\text{макс}}, s = s_{\text{кр}}, n_2 = n_{\text{кр}}.$

Максимальный момент определяется по заданной перегрузочной способности двигателя:

$$M_{\max} = \lambda M_H = 2,4 \cdot 19,97 = 47,95 \approx 48, \text{ Нм.}$$

Критическое скольжение –  $s_{\text{кр}}$ , при котором асинхронная машина развивает максимальный вращающий момент.

$$s_{\text{кр}} = s_H (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,044 \cdot \left( 2,4 + \sqrt{(2,4)^2 - 1} \right) = 0,202$$

Используя основную формулу скольжения можно определить  $n_{\text{кр}}$ :

$$n_{\text{кр}} = n_1 (1 - s_{\text{кр}}) = 1500 (1 - 0,202) = 1197, \text{ об/мин.}$$

4. *Момент пуска:*  $M = M_{\text{п}}$ ,  $s = 1$ ,  $n_2 = 0$ .

Пусковой момент определяется по заданной кратности пускового момента  $\beta$ :

$$M_{\text{п}} = \beta M_H = 2,0 \cdot 19,97 = 39,94 \text{ Нм} \approx 40, \text{ Нм.}$$

Для расчета промежуточных точек воспользуемся упрощенной формулой, которая позволяет определить момент при любых значениях скольжения:

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}$$

Следует только учесть, что эта формула наиболее точно описывает механическую характеристику на участке устойчивой работы (от холостого хода до достижения максимального момента), на участке неустойчивой работы и, особенно при значениях скольжения, близких к пусковым, появляется значительная погрешность. Двигатели рассматриваемой серии конструктивно выполнены с глубоким пазом, то есть с улучшенными пусковыми свойствами, а в данной формуле это не учтено.

Выбираются две промежуточные расчетные точки при значениях скольжения в диапазоне устойчивой работы двигателя: 0,02 (интервал между точкой холостого хода и номинальным режимом) и 0,1 (интервал между номинальным режимом и критической точкой). Скорость вращения ротора  $n_2$  при этих скольжениях вычисляем исходя из основной формулы скольжения:

$$n_2 = n_1 (1 - s).$$

Результаты расчета механической характеристики сводим в таблицу:

$s$	0	0,02	$s_H = 0,044$	0,1	$s_{кр} = 0,202$	$s_{\Pi} = 1$
$M$ , Нм	0	9,5	20	38,4	48	40
$n_2$ , об/мин	1500	1470	1434	1350	1197	0

Механическая характеристика имеет вид, представленный на рис.5.2.

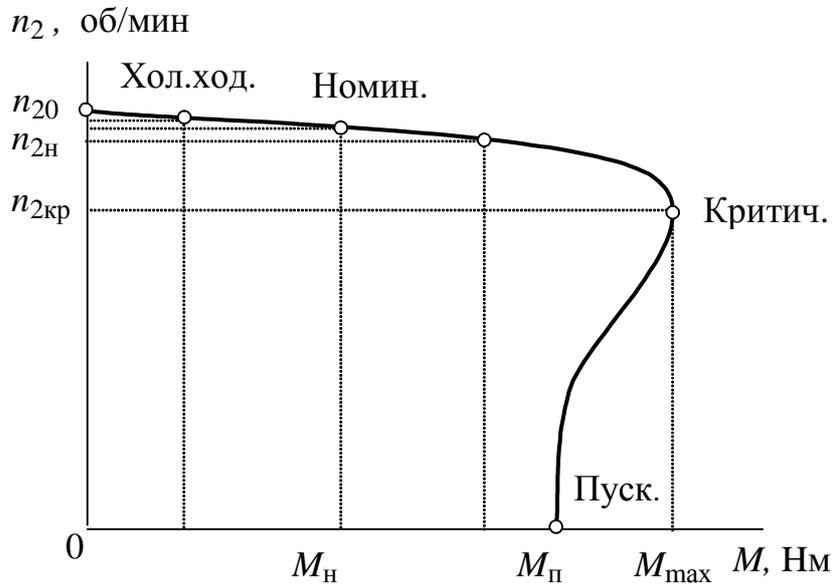


Рис. 5.2

*Определение возможности пуска двигателя при номинальной нагрузке и пониженном напряжении.*

Вращающий момент на валу двигателя:

$$M = CU^2$$

где  $C$  – постоянный коэффициент, зависящий от конструктивных данных двигателя;

$U$  – подводимое к статору напряжение.

При понижении напряжения на 10% подводимое напряжение станет  $U' = 0,9U_H$ , вращающий момент:

$$M' = C(U')^2 = C(0,9U_H)^2 = 0,81CU_H^2 = 0,81M_H = 0,81 \cdot 20 = 16,2, \text{ Нм.}$$

Соответственно пусковой момент:

$$M'_{\Pi} = \beta M' = 2,0 \cdot 16,2 = 32,4, \text{ Нм.}$$

Сравниваем этот момент с номинальным –  $M'_{\Pi} > M_H$ , т.е. пуск возможен.

Для понижения пусковых токов часто пуск асинхронных двигателей осуществляют при пониженном напряжении. Двигатели, работающие при соединении обмоток статора по схеме «треугольник», пускают без нагрузки путем включения обмоток статора на время

пуска по схеме «звезда». Определим пусковой момент двигателя при данном виде пуска.

В момент пуска обмотки находятся под напряжением  $U_{\phi} = U_{\text{л}}/\sqrt{3} = 220/\sqrt{3} = 127$ , В, что составляет 57,7% от  $U_{\text{н}}$ , пусковой момент при этом:

$$M_{\text{п}} = CU^2 = C(0,577U_{\text{н}})^2 = 0,33CU_{\text{н}}^2 = 0,33M_{\text{н}} = 0,33 \cdot 20 = 6,6, \text{ Нм.}$$

Полученный момент меньше номинального, именно поэтому пуск осуществляют в режиме холостого хода. После разгона двигателя обмотки переключают на схему «треугольник» и нагружают двигатель номинальным моментом.

Пусковой ток при этом уменьшится в  $\sqrt{3}$  раз по сравнению с прямым пуском по схеме «треугольник» и составит:

$$I_{\text{п}}' = \frac{I_{\text{п}}}{\sqrt{3}} = \frac{71,52}{\sqrt{3}} = 41,3, \text{ А.}$$

## **КРИТЕРИИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ**

Расчетно-графическая работа считается выполненной в том случае, если числовые ответы, полученные студентом, совпали с ответами преподавателя с точностью не более 10% и пояснительная записка оформлена в полном соответствии с требованиями, указанными выше.

Защита проводится в соответствии с графиком самостоятельной работы студентов, до начала зачетной и экзаменационной сессии. Защита принимается преподавателем, проводившим практические и лабораторные занятия в группе или читающим лекции по данному курсу.

Отметка «зачтено» выставляется в случае успешного выполнения заданий расчетно-графической работы, правильного оформления, положительного ответа на вопросы по теме расчетно-графической работы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ П-1

### КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

#### Стандартизация по внешним воздействующим факторам

ГОСТ 15150-69 устанавливает условные обозначения климатического исполнения электрических машин и категорию их размещения при эксплуатации. Сведения о них приведены в табл. П-1.1 и П-1.2.

Таблица П-1.1

#### Климатическое исполнение электрических машин

Исполнение	Обозначение
Электрические машины, предназначенные для эксплуатации на суше, на реках, озерах для микроклиматических районов: <ul style="list-style-type: none"><li>- с умеренным климатом</li><li>- с холодным климатом</li><li>- с влажным тропическим климатом<ul style="list-style-type: none"><li>- с сухим тропическим климатом, как с сухим, так и с влажным тропическим климатом для всех макроклиматических районов на суше</li></ul></li><li>-общеклиматическое исполнение</li></ul>	У ХЛ ТВ ТС Т  0
Электрические машины, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с морским климатом: <ul style="list-style-type: none"><li>- с умеренно-холодным морским климатом<ul style="list-style-type: none"><li>- с морским тропическим климатом, в том числе и на судах каботажного плавания</li></ul></li><li>- на судах неограниченного района плавания</li></ul>	М ТМ  ОМ
Электрические машины, предназначенные для всех макроклиматических районов на суше и на море	В

Таблица П-1.2

Условные обозначения категории размещения электрических машин

Исполнение	Обозначение
Для эксплуатации на открытом воздухе	1
Для эксплуатации на открытом воздухе или в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе (отсутствие прямого воздействия солнечной радиации и атмосферных осадков)	2
Для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий	3
Для эксплуатации в помещениях с искусственно регулируемые климатическими условиями (например, в закрытых отапливаемых производственных помещениях)	4
Для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью (например, в неотапливаемых и невентилируемых помещениях, в том числе в шахтах)	5

### Стандартизация по конструктивным особенностям

ГОСТ 1454-96 регламентирует конструктивное исполнение машины по степени защиты от воздействия внешней среды и от проникновения в них воды, например, IP23, по способу охлаждения (например: IC01, IC0141), способу монтажа, например IM2. IP означает International Protection, IC – International Cooling, IM – International Mounting.

Электрические машины различают *по степени защиты от внешних воздействий и защите персонала*. Согласно стандарту обозначение степеней защиты состоит из букв IP и следующих за ней цифр. IP означает International Protection, первые цифры означают защиту от соприкосновения и проникновения твердых тел в машину, вторые — степень защиты машины от проникновения воды. В табл. П-1.3 приведены основные виды исполнения машин по степени защищенности от воздействия среды.

Исполнение машин по степени защищенности от воздействия внешней среды

	Условное обозначение	Конструктивное исполнение машин
	IP00	Открытая электрическая машина
	IP10, 1P20	Защищенная от прикосновения и попадания посторонних предметов машина
	IP01, IP11, IP21, IP12, IP22, IP13, IP23, IP43	Каплезащищенная машина: защищенная от капель воды; защищенная от капель воды и от прикосновения и попадания посторонних предметов
	IP44, IP54	Брызгозащищенная машина: защищенная от брызг и прикосновения, попадания посторонних предметов
	IP55	Машина, защищенная от водяных струй, прикосновения, попадания посторонних предметов и вредных отложений пыли
	IP56	Машина, защищенная от захлестывания морской волной на палубе корабля, прикосновения, попадания посторонних предметов и вредных отложений пыли
	IP57	Машина, защищенная от проникновения воды внутрь при кратковременном погружении в воду
	IP58	Машина, защищенная от проникновения воды внутрь при неограниченно длительном погружении в воду
		Взрывозащищенная машина, предназначенная для работы во взрывоопасной среде и устроенная так, что при взрыве газов внутри машины возникающее пламя не может проникнуть в окружающую среду
0		Влагостойкая машина – для работы при большой влажности
1		Морозостойкая машина – для работы при возможности образования инея
2		Химостойкая машина – для работы при воздействии химических реагентов
3		Тропическая электрическая машина – для работы при возможности образования плесневых грибов

Наибольшее применение находят машины со степенью защиты IP22, IP23 – защищенные машины, IP44 – закрытые машины.

**Исполнения по способу монтажа** обозначают буквами IM – начальные буквы английских слов International Mounting и следующих за ними четырех цифр.

Первая цифра обозначает группу конструктивного исполнения,

- 1 – машину на лапах с одним или двумя подшипниковыми щитами;
- 2 – то же, с фланцем на подшипниковом щите;
- 3 – машину без лап с одним или двумя подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите;
- 4 – без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на станине;
- 5 – без подшипниковых щитов;
- 6 – на лапах с подшипниковыми щитами и со стоячковыми подшипниками;
- 7 – на лапах со стоячковыми подшипниками (без подшипниковых щитов);
- 8 – с вертикальным валом, кроме групп от IM1 до IM4;
- 9 – специального исполнения по способу монтажа.

Вторая и третья цифры обозначают способ монтажа, например, при группе конструктивного исполнения 1 цифры 00 – машину с горизонтально направленным концом вала и креплением к фундаменту лапами; 01 – с вертикально направленным концом вала вниз и креплением к стене лапами; при группе 3 цифры 01 соответствуют вертикально направленному концу вала вниз и креплению к фундаменту фланцем и т. д.

Четвертая цифра обозначает исполнение конца вала электрической машины:

- 0 – без конца вала;
- 1 – с одним цилиндрическим концом вала;
- 2 – с двумя цилиндрическими концами вала;
- 3 – с одним коническим концом вала;
- 4 – с двумя коническими концами вала;
- 5 – с одним фланцевым концом вала;
- 6 – с двумя фланцевыми концами вала;

7 – с фланцевым концом вала на стороне *D* и цилиндрическим концом вала на стороне *N*, причем под стороной *D* понимается при одном конце вала для двигателей – приводная, а при равных диаметрах для машин на лапах с коробкой выводов, расположенных не сверху, – сторона, с которой коробка выводов видна справа;

Наиболее распространенные исполнения по способу монтажа приведены в табл. П-1.4.

Таблица П-1.4

Группы конструктивных исполнений электрических машин

Условное обозначение	Конструктивное исполнение машин
IM1	Машины на лапах с подшипниковыми щитами
IM2	Машины на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах)
IM3	Машины без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите
IM4	Машины без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на станине
IM5	Машины без подшипников
IM6	Машины с подшипниковыми щитами и стоячковыми подшипниками
IM7	Машины со стоячковыми подшипниками (без подшипниковых щитов)
IM8	Машины с вертикальным валом, не охватываемые группами от IM1 до IM4
IM9	Машины специального исполнения по способу монтажа

**Способы охлаждения** электрических машин обозначаются буквами IC – International Cooling, и цифрами, например, 01 — машина с самовентиляцией. Наибольшее применение находят следующие способы охлаждения: IC 0141 – машина, обдуваемая наружным вентилятором, расположенным на ее валу.

Для электрических машин чаще всего применяют следующие способы охлаждения:

IC01 – защищенная машина с самовентиляцией; вентилятор расположен на валу машины;

IC0141 – закрытая машина, обдуваемая наружным вентилятором, расположенным на валу машины;

IC0641 – закрытая машина, обдуваемая наружным пристроенным вентилятором с приводным электродвигателем, установленным на машине и питаемым независимо от охлаждаемой машины;

IC0041 – закрытая машина с естественным охлаждением;

IC0151 – закрытая машина с охлаждением с помощью встроенного охладителя (с использованием окружающей среды);

IC0161 – закрытая машина с охлаждением с помощью пристроенного охладителя (с использованием окружающей среды);

IC13 – защищенная машина с независимой вентиляцией; охлаждение с помощью подводящей трубы, осуществляемое пристроенным зависимым устройством;

IC17 – защищенная машина с независимой вентиляцией; охлаждение с помощью подводящей трубы, осуществляемое отдельным и независимым устройством;

IC05 – то же, охлаждение с помощью встроенного вентилятора с приводным электродвигателем, установленным на машине и питаемым независимо от охлаждаемой машины;

IC06 – то же, охлаждение с помощью пристроенного двигателя-вентилятора, питаемого независимо от охлаждаемой машины;

IC37 – закрытая машина с независимой вентиляцией; охлаждение с помощью подводящей и отводящей труб, осуществляемое отдельным и независимым устройством.

## ПРИЛОЖЕНИЕ П-2

### *ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ*

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФГБОУ ВПО  
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Кафедра ТОЭ

Расчетно–графическая работа  
по дисциплине «Электротехника и электроника»  
«Расчет электрической цепи постоянного тока»

Выполнил:  
студент гр. ДВ-261  
Иванов М.А.

Проверил:  
преподаватель  
Петров И.Л.

з.Уфа 2012

## ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин А. С. Электротехника: учеб. пособие для студ неэнерг. спец.вузов/ А. С. Касаткин, М. В. Немцов.-8-е изд., испр.- М.:Академия,2003.-544 с.
2. Иванов И. И., Соловьев Г.И., Равдоник В.С. Электротехника: Учебник. 4-е изд., стер.- СПб.: Лань, 2006.- 496с.
3. Беневоленский С.Б., Марченко А.Л. Основы электротехники. Учебное пособие для вузов. – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2006. – 568с.
4. Жаворонков М.А. Электротехника и электроника: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / М.А.Жаворонков, А.В.Кузин. – М.: «Академия», 2005. – 400с.
5. Кононенко В.В., Мишкович В.И. и др./Под. ред. Кононенко В.В. Практикум по электротехнике и электронике: Учеб. пособие для вузов – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 384с.
6. Иванов И.И. Электротехника. Основные положения, примеры и задачи: Учеб. пособие/ И.И. Иванов, А.Ф. Лукин, Г.И. Соловьев.-2-е изд., испр.-СПб.:Лань,2002.-192 с.
7. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: Учеб. пособие для вузов/ И. И. Алиев.-4-е изд., доп.- Ростов н/Д: Феникс, 2003.-480 с.
8. Электрические и магнитные цепи: практикум по дисциплине «Электротехника и электроника» /Р.В.Ахмадеев, И.В.Вавилова, П.А.Грахов, Т.М.Крымская.- Уфа: УГАТУ, 2007.- 78с.
9. Электротехника и электроника. Часть 1. Электрические и магнитные цепи: Учебный комплект по дисциплине «Электротехника и электроника». Учебное электронное издание / Р.В. Ахмадеев, И.В. Вавилова, П.А. Грахов. – Уфа: УГАТУ, 2007. – 268 с.

Составители: АХМАДЕЕВ Рашит Вадутович  
ВАВИЛОВА Ирина Владимировна  
ГРАХОВ Павел Анатольевич  
КРЫМСКАЯ Татьяна Махмутовна  
МЕЛЬНИЧУК Ольга Васильевна

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Методические указания  
к расчетно-графическим работам  
по дисциплинам  
«Электротехника и электроника» и  
«Общая электротехника и электроника»

Подписано в печать 2012. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman  
Сур.

Усл.печ. л.            Уч.-изд. л.    .

Тираж 100 экз. Заказ №.....

ФГБОУ ВПО

Уфимский государственный авиационный технический университет  
Редакционно-издательский комплекс УГАТУ  
450000, Уфа – центр, ул. К. Маркса,12