

Задание к контрольной работе

Номер варианта выбирается по двум последним цифрам номера зачетной книжки. Если две последние цифры более 50, то для определения номера необходимо вычесть 50. (Для студентов очников номер варианта определяется по номеру в учебном журнале).

К выполнению контрольной работы можно приступать только после изучения теоретического материала по рекомендованной литературе и внимательного изучения методических указаний.

При выполнении контрольной работы необходимо руководствоваться следующими правилами.

1. Начиная решение задачи, указать, какие физические законы или методы предполагается использовать при решении, привести математическую запись этих законов и методов.

2. В ходе решения задачи не следует изменять однажды принятые направления токов и наименований узлов, сопротивлений, а также обозначения, заданные условием. При решении одной и той же задачи различными методами одну и ту же величину надлежит обозначать одним и тем же буквенным символом.

3. Расчет каждой определяемой величины следует выполнить сначала в общем виде, а затем в полученную формулу подставить числовые значения и привести окончательный результат с указанием единиц измерения.

4. Промежуточные и конечные результаты расчетов должны быть выделены из текста и каждому этапу решения нужно давать пояснения.

5. Решение задач не следует перегружать приведением всех алгебраических преобразований и арифметических расчетов.

6. Для элементов электрических схем следует пользоваться обозначениями, применяемыми в учебниках по ТОЭ и электротехнике.

7. При построении кривых выбирать такой масштаб, чтобы на 1 см оси координат приходилось $1 \cdot 10^{\pm n}$ или $2 \cdot 10^{\pm n}$ единиц измерения физической величины, где n – целое число. Градуировку осей выполнять, начиная с нуля,

равномерно через один или через два сантиметра. Числовые значения координат точек, по которым строятся кривые, не приводить. Весь график и целом и отдельные кривые на нем должны иметь названия.

К представленным на проверку контрольным заданиям предъявляются следующие требования:

1. Основные положения решения должны быть подробно объяснены. Вычисления должны быть сделаны с точностью до третьей значащей цифры.

2. Рисунки, графики, схемы, в том числе и заданные условием задачи, должны быть выполнены аккуратно и в соответствии со стандартами.

3. В тетради следует оставлять поля шириной не менее 4 см для замечаний преподавателя.

4. Незачтенное задание должно быть выполнено заново и представлено на повторную проверку вместе с первоначальной работой и замечаниями преподавателя. Исправление ошибок в ранее проверенном тексте не допускается. Если неправильно выполнена не вся работа, а только часть ее, то переработанный и исправленный текст следует записать в тетради после первоначального текста под заголовком «Исправление ошибок».

5. Контрольные задания должны быть датированы и подписаны студентом.

ЗАДАЧА 1. Для электрической цепи, схема которой изображена на рис. 1.1–1.50, по заданным в табл. 1 сопротивлениям и э. д. с. выполнить следующее:

1) составить систему уравнений, необходимых для определения токов по первому и второму законам Кирхгофа;

2) найти все токи, пользуясь методом контурных токов;

3) проверить правильность решения, применив метод узлового напряжения. Предварительно упростить схему, заменив треугольник сопротивлений эквивалентной звездой.

Начертить расчетную схему с эквивалентной звездой и показать на ней токи;

4) определить ток в резисторе R_6 методом эквивалентного генератора;

5) определить показание вольтметра и составить баланс мощностей для заданной схемы;

6) построить в масштабе потенциальную диаграмму для внешнего контура.

Таблица 1

Вариант	Рисунок	$E_1, В$	$E_2, В$	$E_3, В$	$R_{01}, Ом$	$R_{02}, Ом$	$R_{03}, Ом$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_4, Ом$	$R_5, Ом$	$R_6, Ом$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1.1	24	22	12	1	-	2	2	1	8	4	10	4
2	1.2	50	16	4	1.5	-	1	6	2	3	2	4	4
3	1.3	36	12	26	-	0,8	1	4	8	3	1	2	7
4	1.4	15	5	28	-	0,8	0,6	9	3	2	4	2	5
5	1.5	16	25	32	2	0,5	-	5	2	8	2	2	6
6	1.6	6	15	28	0,6	-	1	6	4	3	2	5	3
7	1.7	12	6	24	0,4	1	-	4	5	6	5	3	2
8	1.8	6	22	8	-	1	0,8	4	6	4	3	2	2
9	1.9	22	6	12	-	0,4	0,6	5	7	3	6	1	2
10	1.10	4	20	6	0,6	-	0,5	3	10	4	8	10	4
11	1.11	6	24	8	1	-	0,8	9	8	2	5	10	4
12	1.12	16	8	10	0,4	0,6	-	2,6	6	6	5	8	5
13	1.13	45	10	5	0,8	1,5	-	4,2	4	2	10	4	2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
14	1.14	12	36	12	-	0,6	1	5	2	2	5	6	8
15	1.15	14	8	36	1,2	0,6	-	2	4	8	5	6	8
16	1.16	10	8	34	2	-	1,5	4	2	2	6	5	6
17	1.17	70	12	6	0,6	1,2	-	6	2	12	5	10	5
18	1.18	12	36	6	-	0,6	0,6	3	2,4	4,4	10	2	2
19	1.19	12	30	14	0,5	-	0,5	3,5	4	4,5	3	1	3
20	1.20	10	8	28	-	1	0,4	5	2	8	12	3	4
21	1.21	20	65	8	1,2	-	1	5	4	2	3	10	3
22	1.22	54	27	5	0,9	1	-	8	3	1	4	2	2
23	1.23	34	10	22	-	0,8	0,8	4	2	3	2	6	2
24	1.24	4	60	14	-	0,7	1	1	4	2	2	8	3
25	1.25	10	32	16	0,4	1	-	2	5	2	2	6	4
26	1.26	30	15	25	0,8	0,6	-	2	4	3	1	6	5
27	1.27	12	32	14	0,6	-	0,6	1,4	6	1	7	1	5
28	1.28	5	12	35	0,3	-	0,6	1,2	6	4	2	2	2
29	1.29	40	24	8	-	0,2	0,2	3	3	2	4	3	1
30	1.30	12	42	10	0,8	1	-	5	3	3	3	2	1
31	1.31	24	22	12	1	-	2	2	1	8	4	10	4
32	1.32	50	16	4	1.5	-	1	6	2	3	2	4	4
33	1.33	36	12	24	-	0,5	0,6	4	8	2	1	3	7
34	1.34	16	4	32	-	0,8	0,4	9	3	2	4	2	5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
35	1.35	14	20	28	0,8	1,2	-	5	2	8	2	2	6
36	1.36	5	16	32	0,4	-	0,7	6	4	3	2	3	5
37	1.37	8	6	24	0,8	0,3	-	3	5	6	6	2	3
38	1.38	8	20	5	-	0,8	1,2	4	6	4	4	2	2
39	1.39	21	5	10	-	0,2	0,6	5	7	2	8	1	1
40	1.40	4	8	16	0,8	-	0,7	2,7	8	4	8	10	2
41	1.41	4	24	6	1	-	0,4	9	8	2	6	10	4
42	1.42	16	8	7	0,2	0,6	-	3	5	5	6	12	6
43	1.43	46	14	8	1	1,5	-	4	4	2	10	6	3
44	1.44	14	38	14	-	0,8	1,2	3	5	2	5	6	9
45	1.45	12	8	40	1,2	0,6	-	2	3	8	5	7	8
46	1.46	8	8	36	1,5	-	1,2	3	2	4	6	5	6

Продолжение таблицы 1

47	1.47	72	12	4	0,8	1.5	-	6	1	8	4	10	4
48	1.48	10	46	5	-	0,4	0,6	3	2	2	10	5	5
49	1.49	14	30	10	0,5	-	0,5	3,5	2	3	3	2	4
50	1.50	8	6	24	-	1	0,8	5	2	8	12	4	2

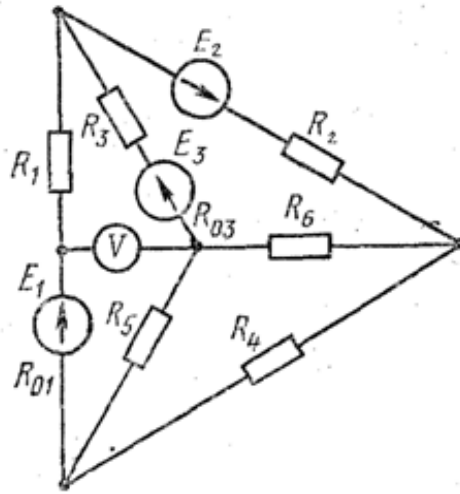


Рис. 1.1

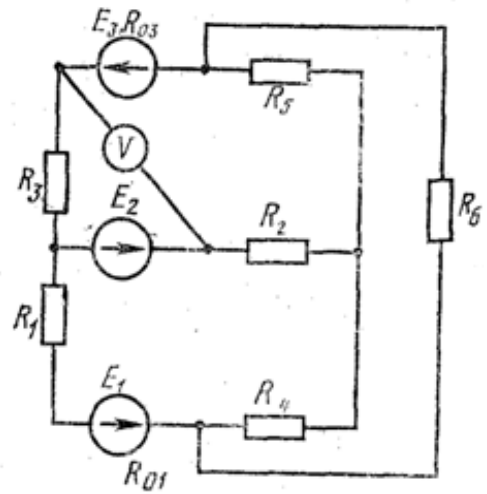


Рис. 1.2

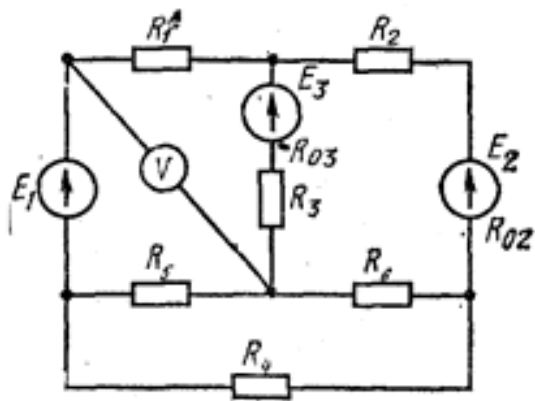


Рис. 1.3

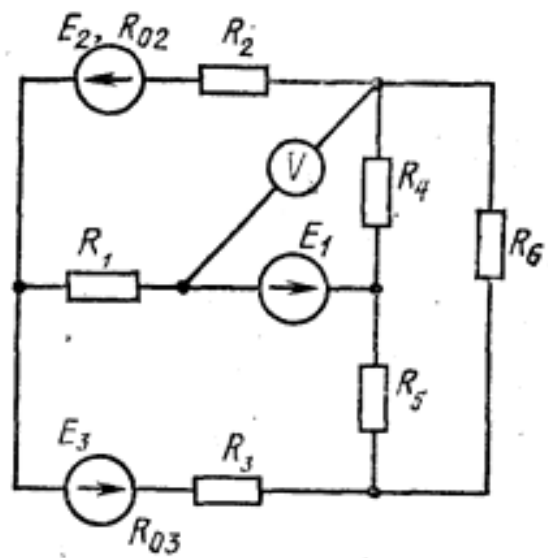


Рис. 1.4

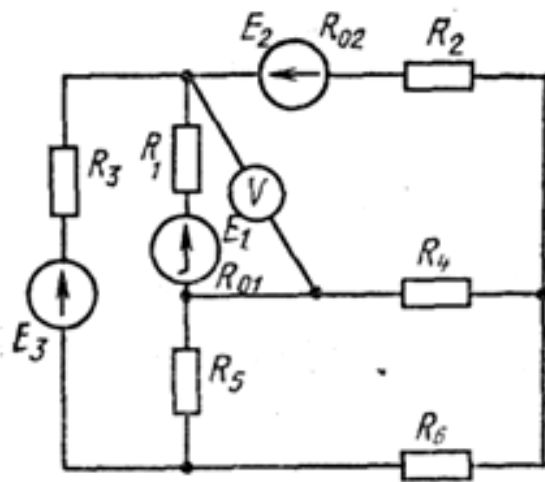


Рис. 1.5

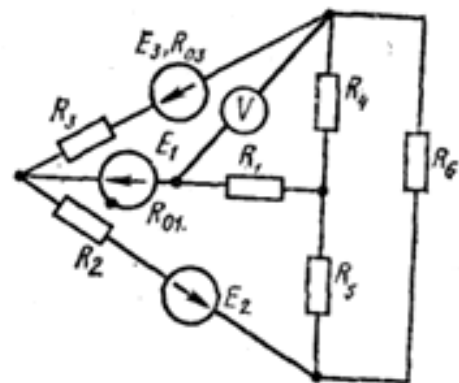


Рис. 1.6

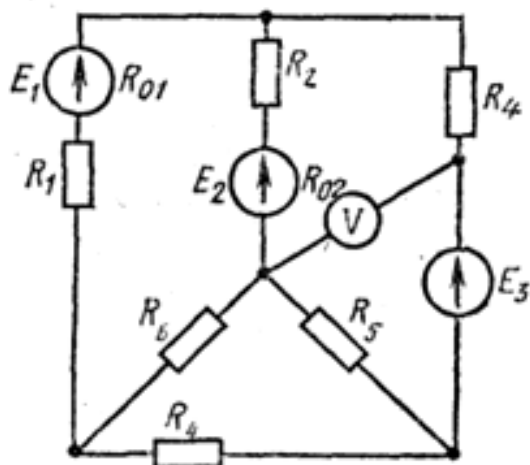


Рис. 1.7

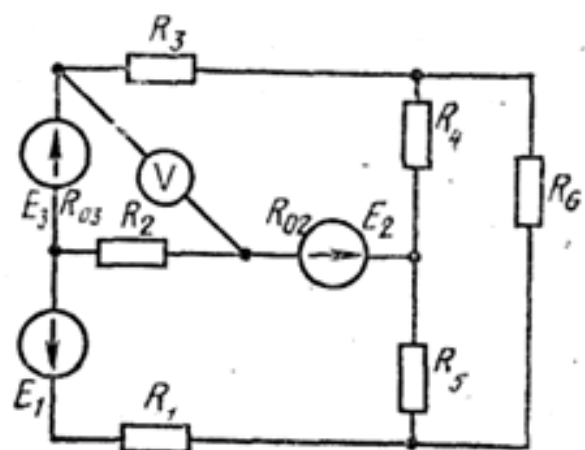


Рис. 1.8

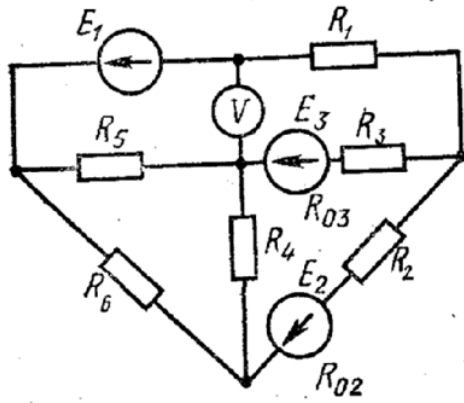


Рис. 1.9

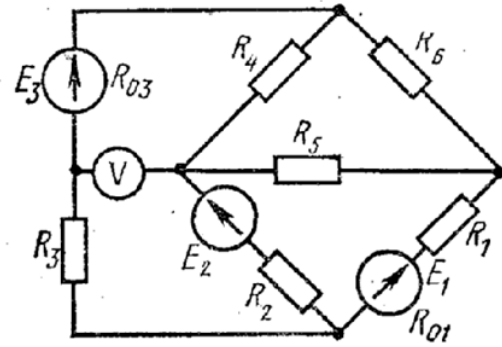


Рис. 1.10

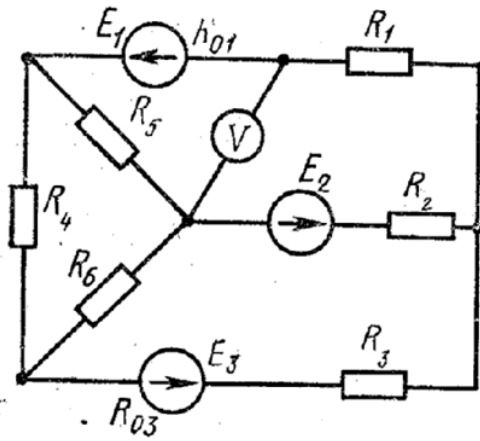


Рис. 1.11

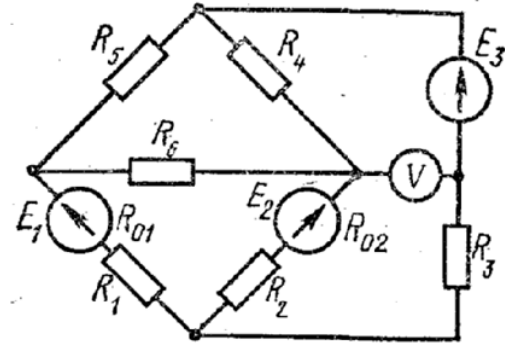


Рис. 1.12

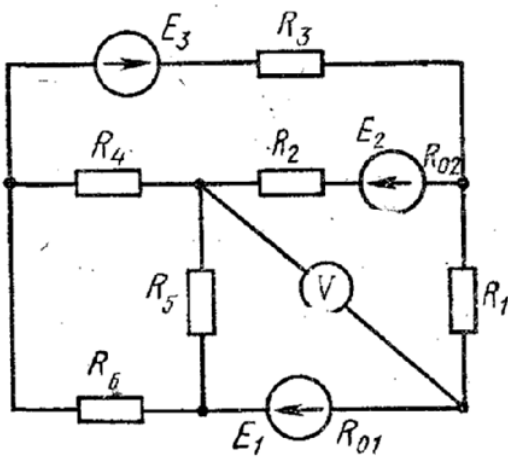


Рис. 1.13

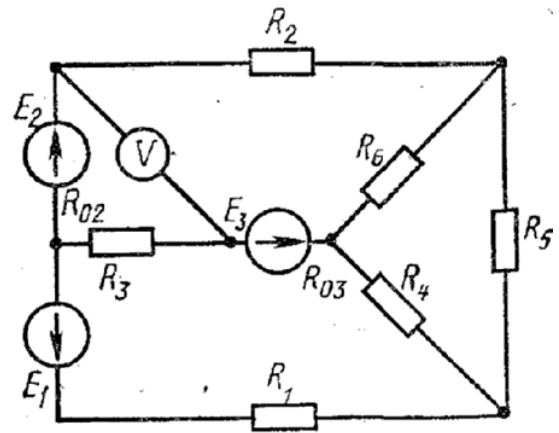


Рис. 1.14

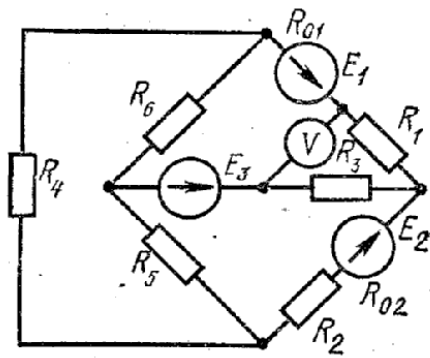


Рис. 1.15

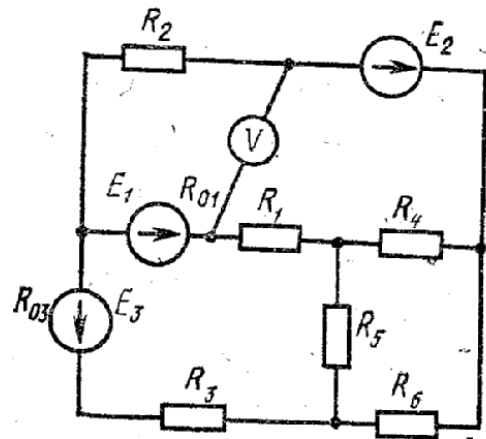


Рис. 1.16

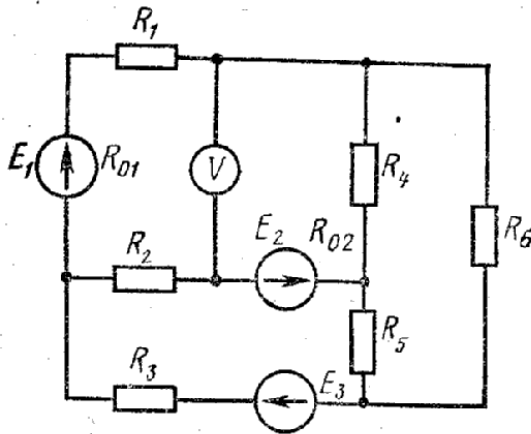


Рис. 1.17

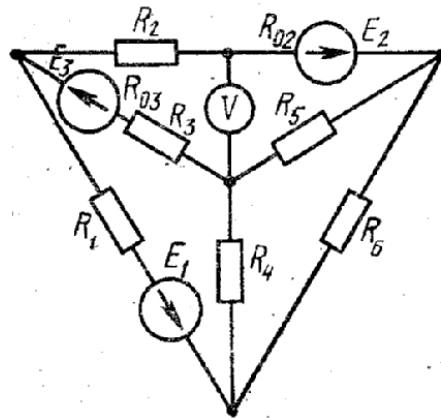


Рис. 1.18

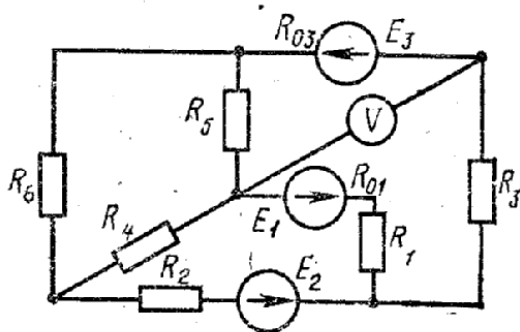


Рис. 1.19

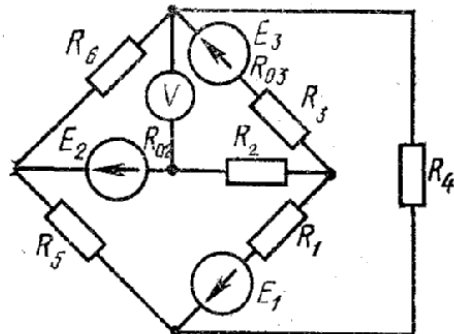


Рис. 1.20

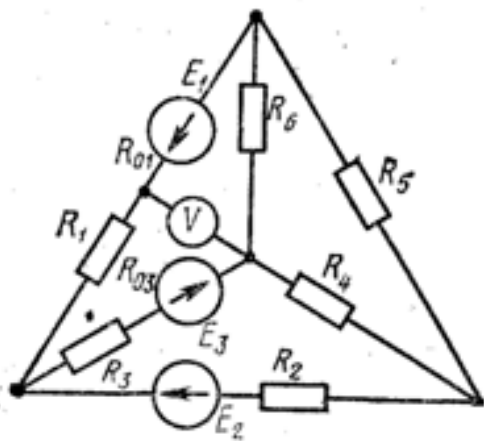


Рис. 1.21

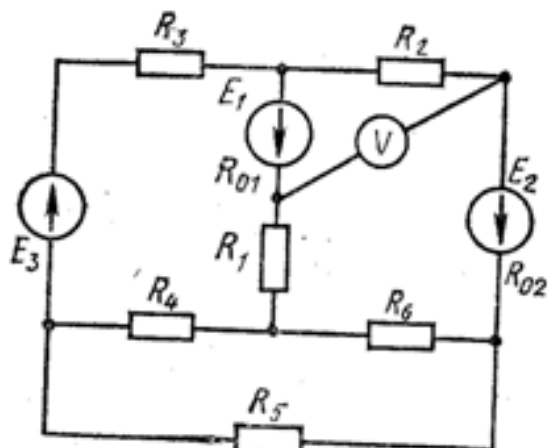


Рис. 1.22

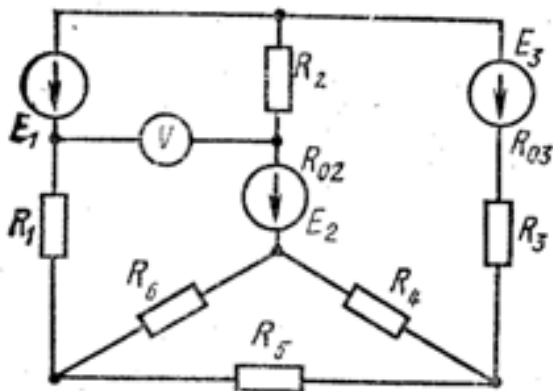


Рис. 1.23

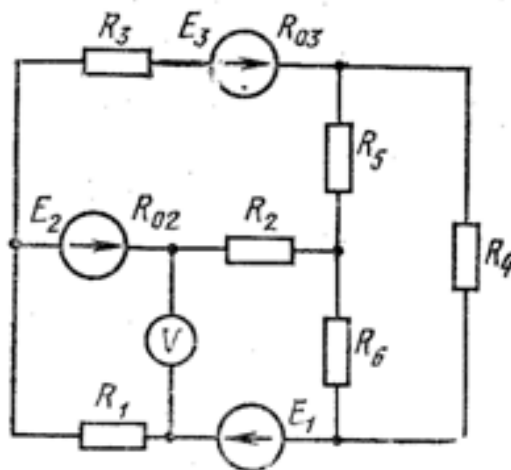


Рис. 1.24

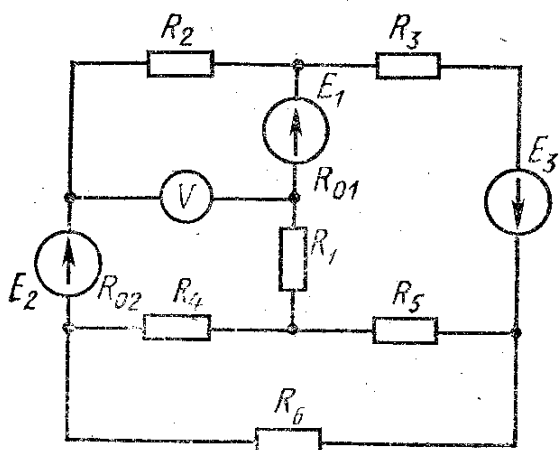


Рис. 1.25

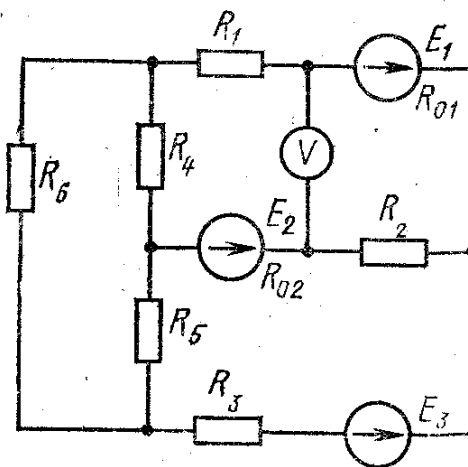


Рис. 1.26

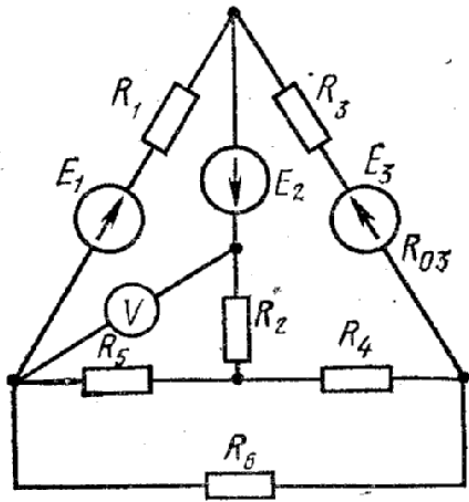


Рис. 1.27

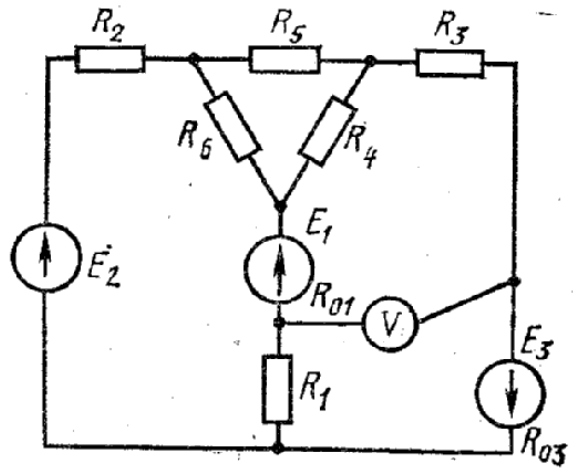


Рис. 1.28

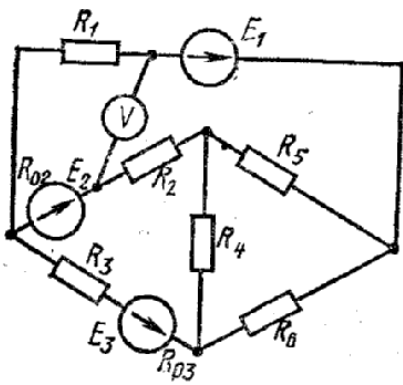


Рис. 1.29

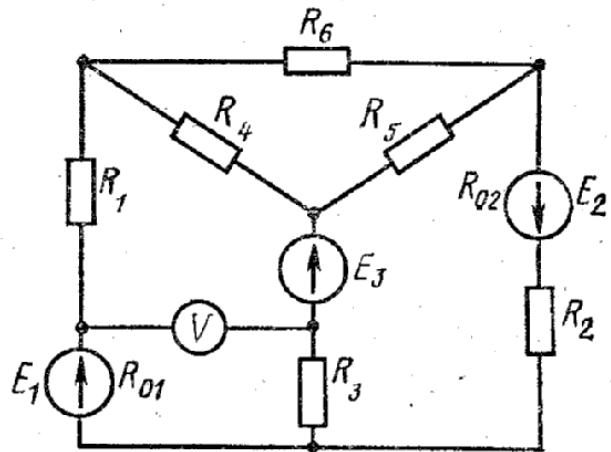


Рис. 1.30

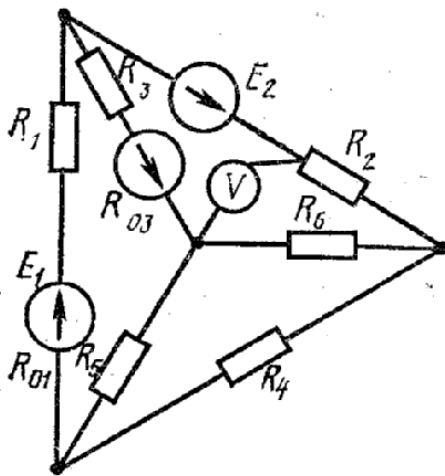


Рис. 1.31

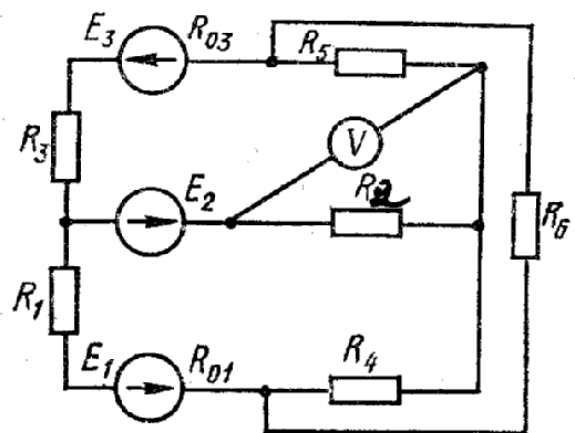


Рис. 1.32

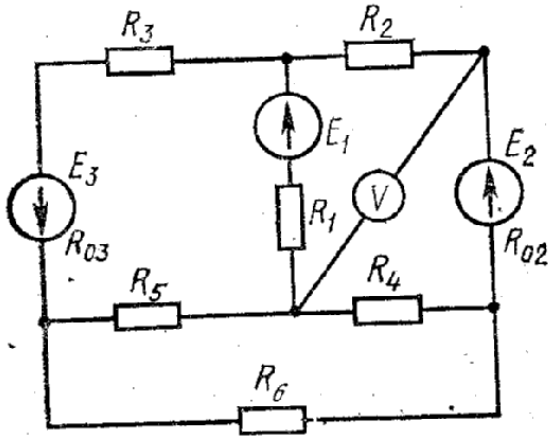


Рис. 1.33

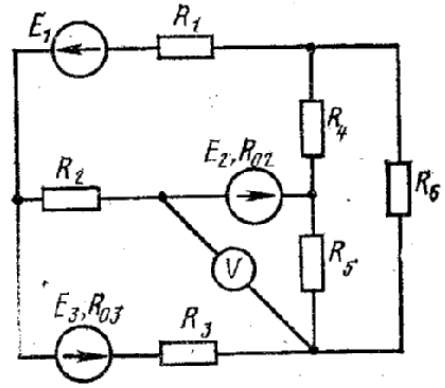


Рис. 1.34

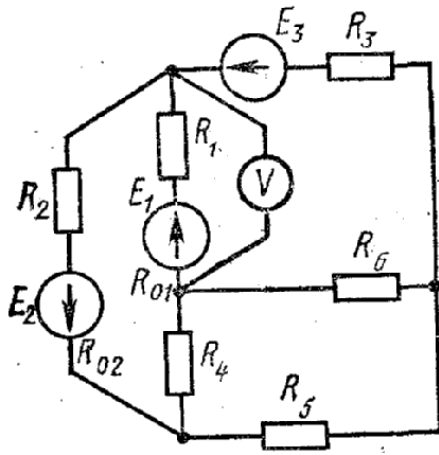


Рис. 1.35

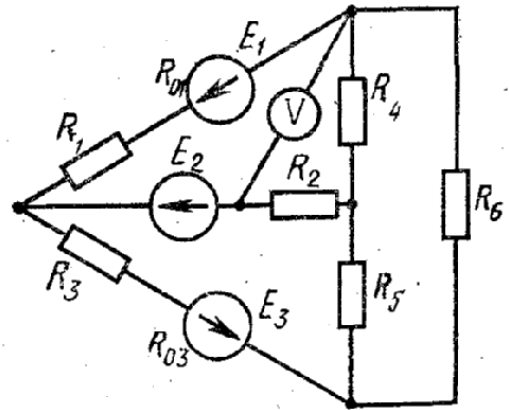


Рис. 1.36

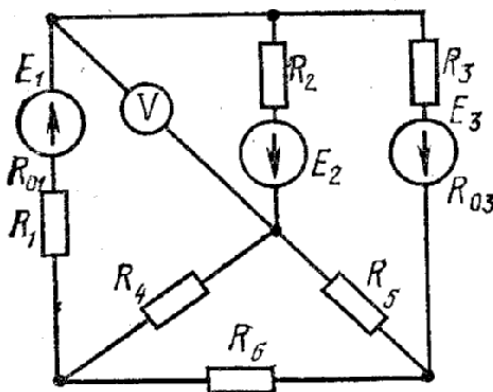


Рис. 1.37

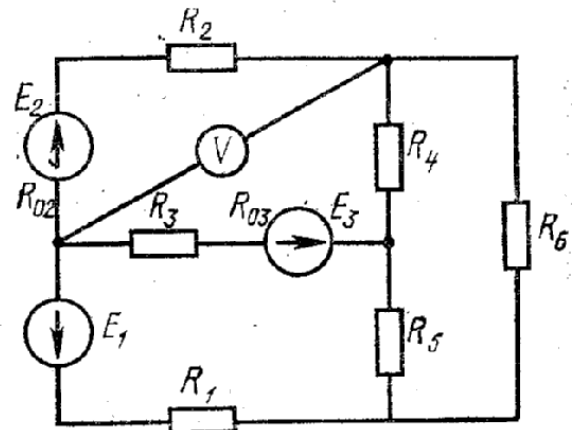


Рис. 1.38

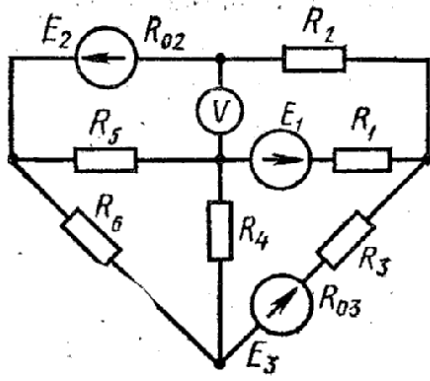


Рис. 1.39

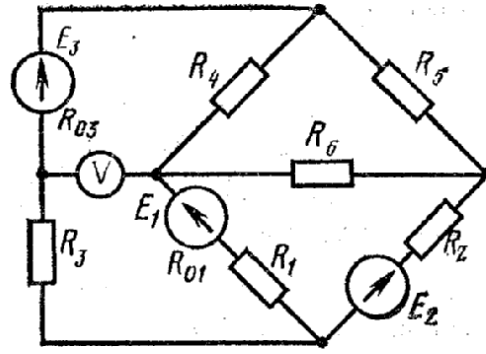


Рис. 1.40

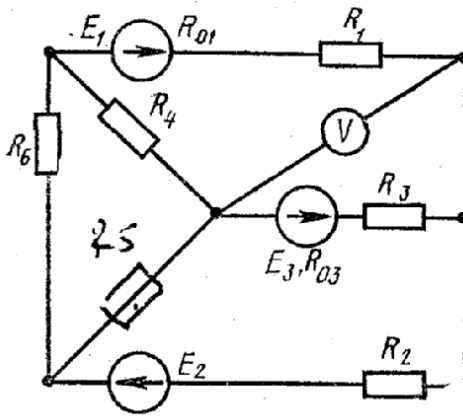


Рис. 1.41

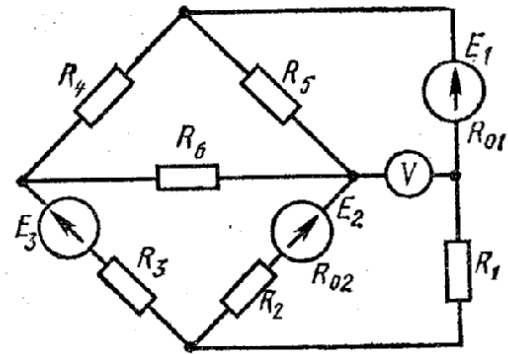


Рис. 1.42

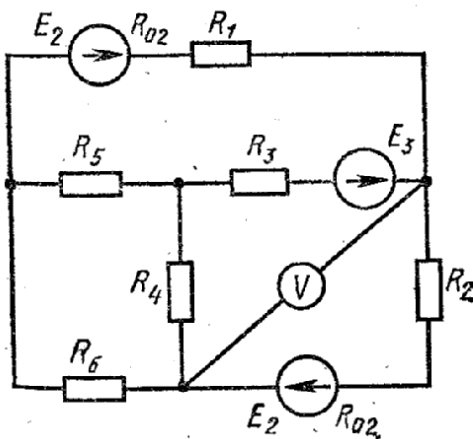


Рис. 1.43

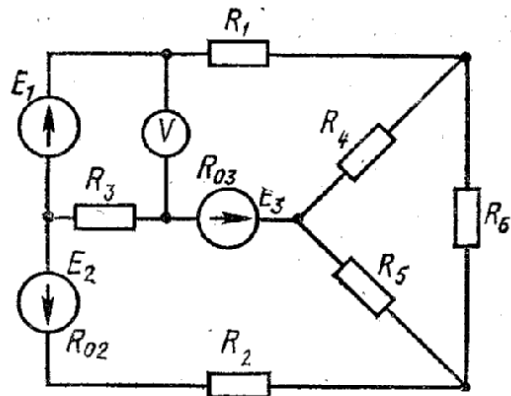


Рис. 1.44

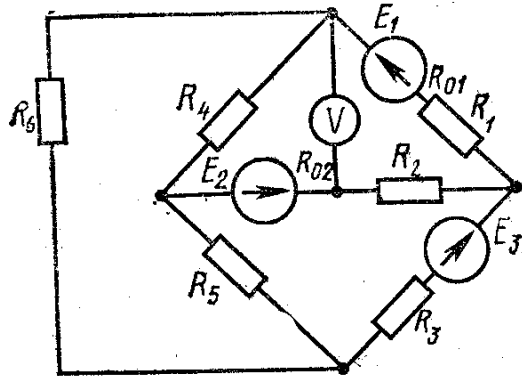


Рис. 1.45

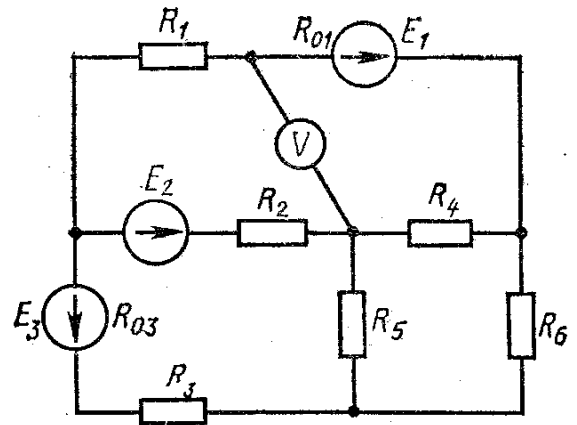


Рис. 1.46

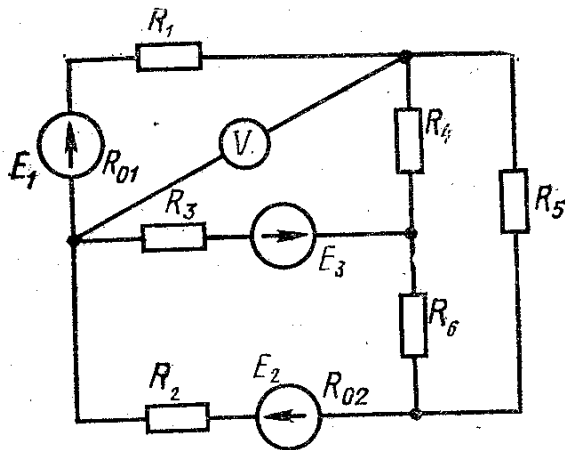


Рис. 1.47

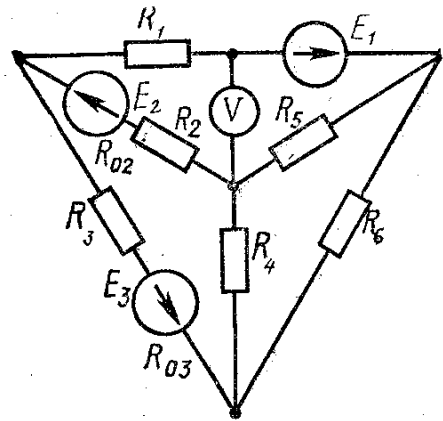


Рис. 1.48

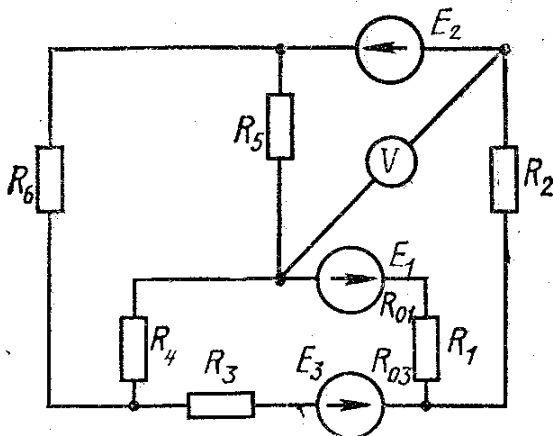


Рис. 1.49

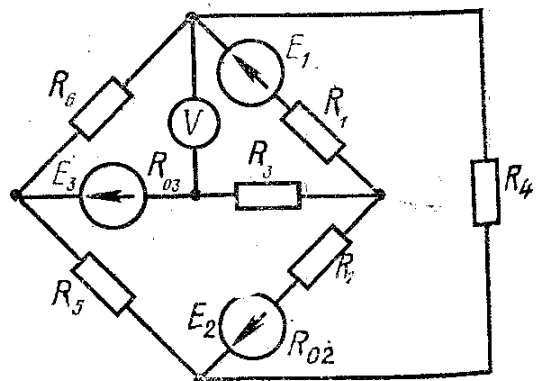


Рис. 1.50

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧИ 1

Дано: $R_1=5 \text{ Ом}$, $R_2= 3 \text{ Ом}$, $R_3=3 \text{ Ом}$, $R_4=3 \text{ Ом}$, $R_5=2 \text{ Ом}$, $R_6=1 \text{ Ом}$, $R_{01}=0,8 \text{ Ом}$, $R_{02}=1 \text{ Ом}$, $E_1=10 \text{ В}$, $E_2=40 \text{ В}$, $E_3=20 \text{ В}$

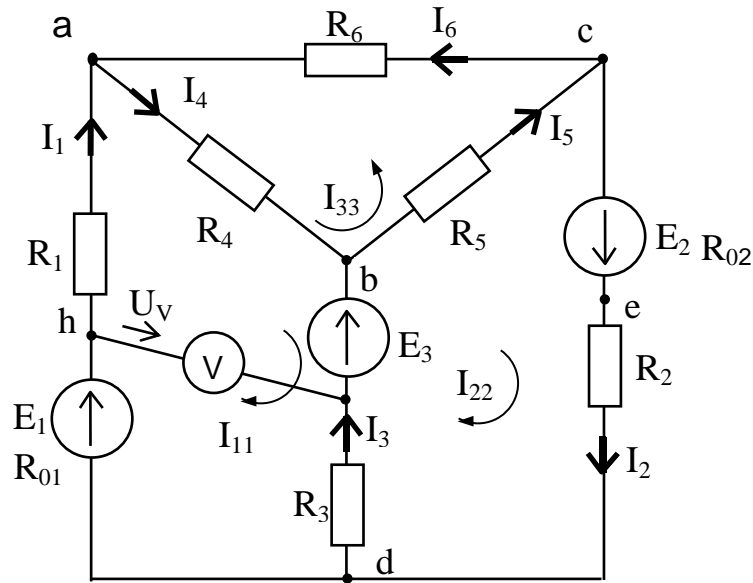


Рис. 1

1. В схеме, изображенной на рис. 1 количество узлов $n=4$ (a, b, c, d), количество ветвей $m=6$ (ab, bc, ac, cd, bd, da).

Покажем на схеме условно положительные направления токов $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$. По первому закону Кирхгофа составим $n-1=3$ уравнения:

$$\begin{cases} a: I_1 - I_4 + I_6 = 0 \\ b: I_3 - I_5 + I_4 = 0 \\ c: -I_2 + I_5 - I_6 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

По второму закону Кирхгофа составим $m-(n-1)=6-3=3$ уравнения:

$$\begin{cases} I_1(R_1 + R_{01}) - I_3R_3 - I_4R_4 = E_1 - E_3 \\ I_2(R_2 + R_{02}) + I_3R_3 + I_5R_5 = E_2 + E_3 \\ I_4R_4 + I_5R_5 + I_6R_6 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

2. Определим токи методом контурных токов (МКТ).

Покажем на рис. 1 контурные токи I_{11}, I_{22}, I_{33} . Выразим действительные токи через контурные: $I_1=I_{11}$, $I_2=I_{11}$, $I_3=I_{22} - I_{11}$, $I_4=I_{11}+I_{33}$, $I_5=I_{22}+I_{33}$, $I_6=I_{33}$ и подставим в (2), получим:

$$\begin{cases} I_{11}(R_1 + R_{01} + R_3 + R_4) - I_{22}R_3 + I_{33}R_4 = E_1 - E_3 \\ -I_{11}R_3 + I_{22}(R_2 + R_{02} + R_3 + R_5) + I_{33}R_5 = E_2 + E_3 \\ I_{11}R_4 + I_{22}R_5 + I_{33}(R_4 + R_5 + R_6) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Подставим числовые значения и перепишем систему (3) в матричной форме:

$$\begin{vmatrix} 11,8 & -3 & 3 \\ -3 & 9 & 2 \\ 3 & 2 & 6 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -10 \\ 60 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Примечание. Матрица сопротивлений симметрична главной диагонали.

Решим систему, например, методом Крамера:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 11,8 & -3 & 3 \\ -3 & 9 & 2 \\ 3 & 2 & 6 \end{vmatrix} = 419$$

$$\Delta_{I_{11}} = \begin{vmatrix} -10 & -3 & 3 \\ 60 & 9 & 2 \\ 0 & 2 & 6 \end{vmatrix} = 940$$

$$\Delta_{I_{22}} = \begin{vmatrix} 11,8 & -10 & 3 \\ -3 & 60 & 2 \\ 3 & 0 & 6 \end{vmatrix} = 3468$$

$$\Delta_{I_{33}} = \begin{vmatrix} 11,8 & -3 & -10 \\ -3 & 9 & 60 \\ 3 & 2 & 0 \end{vmatrix} = -1626$$

$$I_{11} = \frac{\Delta_{I_{11}}}{\Delta} = 2,243437 \text{ A}$$

$$I_{22} = \frac{\Delta_{I_{22}}}{\Delta} = 8,27685 \text{ A}$$

$$I_{33} = \frac{\Delta_{I_{33}}}{\Delta} = -3,880668 \text{ A}$$

Действительные токи в ветвях:

$$I_1 = 2,243437 \text{ A},$$

$$I_2 = 8,27685 \text{ A},$$

$$I_3 = 6,033413 \text{ A},$$

$$I_4 = -1,637232 \text{ A},$$

$$I_5 = 4,396181 \text{ A},$$

$$I_6 = -3,880668 \text{ A}.$$

3. Проверим правильность решения, применив метод узлового напряжения. Для этого упростим схему, заменив треугольник сопротивлений R_4, R_5, R_6 эквивалентной звездой (см. рис.2).

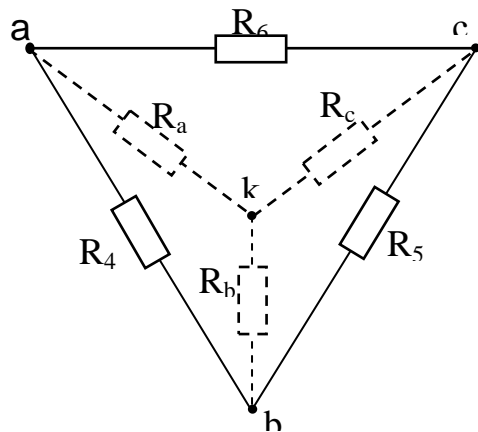


Рис. 2

Определим сопротивления звезды:

$$R_a = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5 + R_6} = 0,5 \text{ Ом}$$

$$R_b = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5 + R_6} = 1 \text{ Ом}$$

$$R_c = \frac{R_5 R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = 0,3(3) \text{ Ом}$$

Измененная схема представлена на рис.3:

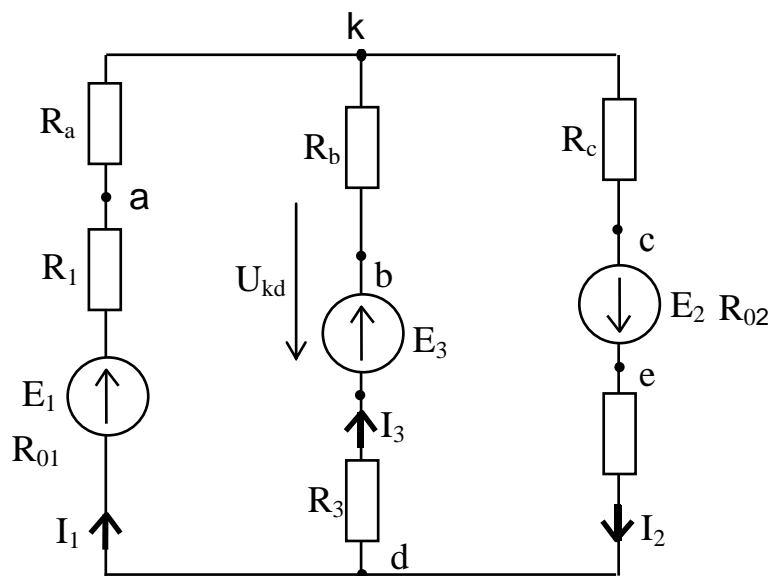


Рис. 3

Определим проводимости ветвей:

$$g_1 = \frac{1}{R_1 + R_{01} + R_a} = 0,158730158 \text{ См}$$

$$g_2 = \frac{1}{R_2 + R_{02} + R_c} = 0,23076923 \text{ См}$$

$$g_3 = \frac{1}{R_3 + R_b} = 0,25 \text{ См}$$

Покажем на схеме рис.3 узловое напряжение U_{kd} и определим его значение по формуле:

$$U_{kd} = \frac{E_1 g_1 - E_2 g_2 + E_3 g_3}{g_1 + g_2 + g_3} = -4,133651524 \text{ В}$$

По закону Ома определим токи:

$$I_1 = (-U_{kd} + E_1) g_1 = 2,243437 \text{ А}$$

$$I_2 = (U_{kd} + E_2) g_2 = 8,27685 \text{ А}$$

$$I_3 = (-U_{kd} + E_3) g_3 = 6,033413 \text{ А}$$

Результаты расчётов токов I_1, I_2, I_3 в МКТ и МУН совпали.

4. Определим ток I_6 методом эквивалентного генератора. Для этого уберем из схемы рис.1 резистор R_6 , а на его зажимах проставим напряжение U_{xx} , по направлению совпадающее с током I_6

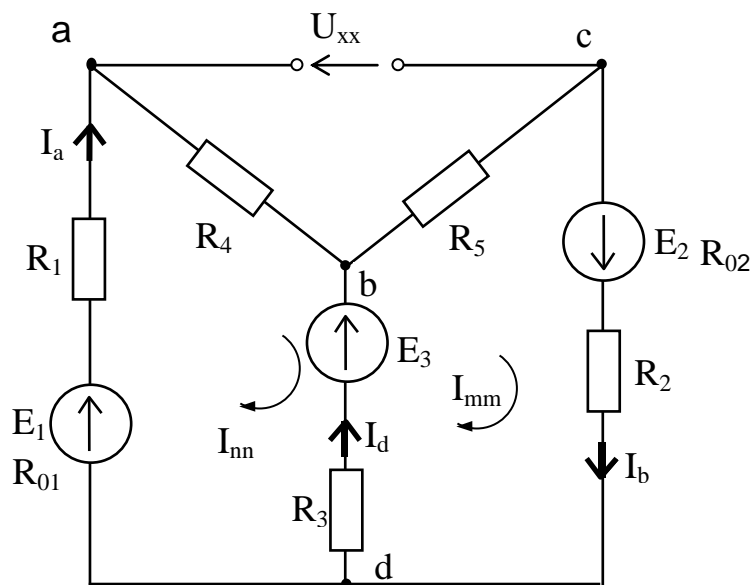


Рис. 4

В измененной схеме (см. рис 16) два узла b и d и три ветви (bd, bad, bcd) и следовательно три неизвестных тока. Покажем на схеме их условно положительные направления (токи I_a, I_b, I_d) и определим их МКТ:

$$\begin{cases} I_{nn}(R_1 + R_{01} + R_3 + R_4) - I_{mm}R_3 = E_1 - E_3 \\ -I_{nn}R_3 + I_{mm}(R_2 + R_{02} + R_3 + R_5) = E_2 + E_3 \end{cases}$$

Подставим числовые значения, перепишем систему в матричной форме и решим ее:

$$\begin{vmatrix} 11,8 & -3 \\ -3 & 9 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} I_{nn} \\ I_{mm} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -10 \\ 60 \end{vmatrix}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 11,8 & -3 \\ -3 & 9 \end{vmatrix} = 97,2$$

$$\Delta_{I_{nn}} = \begin{vmatrix} -10 & -3 \\ 60 & 9 \end{vmatrix} = 90$$

$$\Delta_{I_{mm}} = \begin{vmatrix} 11,8 & -10 \\ -3 & 60 \end{vmatrix} = 678$$

$$I_{nn} = \frac{\Delta_{I_{nn}}}{\Delta} = 0,925926 \text{ A}$$

$$I_{mm} = \frac{\Delta_{I_{mm}}}{\Delta} = 6,975309 \text{ A}$$

$$I_{nn} = I_a, I_{mm} = I_b, I_d = I_{mm} - I_{nn}$$

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа для любого контура, включающего U_{xx} :

$$U_{xx} + I_a R_4 + I_b R_5 = 0 \Rightarrow U_{xx} = -I_a R_4 - I_b R_5 = -16,72839506 \text{ В.}$$

Определим входное сопротивление схемы. Для этого источники э.д.с. закоротим, оставив их внутренние сопротивления (см. рис.5)

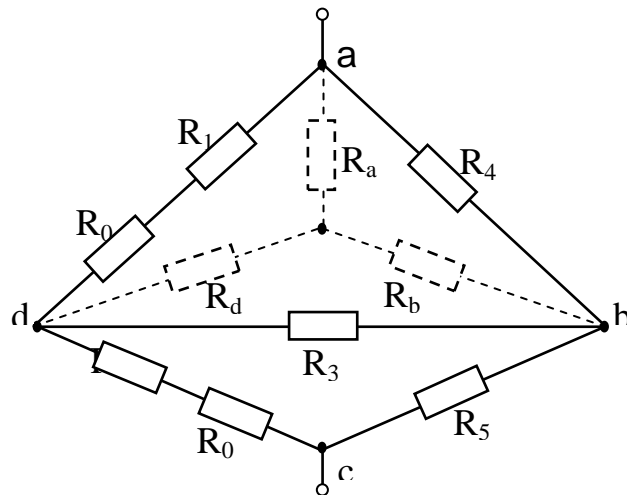


Рис. 5

$$R_a = \frac{(R_1 + R_{01})R_4}{R_1 + R_{01} + R_4 + R_3} = 1,474576271 \text{ Ом}$$

$$R_b = \frac{R_3 R_4}{R_1 + R_{01} + R_4 + R_3} = 4,50 \text{ Ом}$$

$$R_d = \frac{(R_1 + R_{01}) R_3}{R_1 + R_{01} + R_4 + R_3} = 1,474576271 \text{ м}$$

$$R_{\text{вх}} = R_a + \frac{(R_d + R_2 + R_{02})(R_b + R_5)}{R_d + R_2 + R_{02} + R_b + R_5} = 3,310699588 \text{ Ом}$$

По теореме об эквивалентном генераторе определим ток I_6 :

$$I_6 = \frac{U_{\text{xx}}}{R_6 + R_{\text{вх}}} = -3,880668 \text{ А}$$

Значение тока I_6 совпало со значением, рассчитанным МКТ.

5. Определим показание вольтметра. Для этого составим уравнение по второму закону Кирхгофа для контура, включающего U_v :

$$U_v - I_4 R_4 - I_1 R_1 = E_3 \Rightarrow U_v = E_3 + I_1 R_1 + I_4 R_4 = 26,31 \text{ В}$$

Составим баланс мощностей. Определим мощность источников:

$$P_{\text{ист.}} = E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 = 474,18 \text{ Вт}$$

Мощность приемников:

$$P_{\text{пр}} = I_1^2 (R_1 + R_{01}) + I_2^2 (R_2 + R_{02}) + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 = 474,18 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{ист.}} = P_{\text{пр.}}$$

6. Начертим потенциальную диаграмму для внешнего контура (см. рис. 1). Заземлим, например, узел с.

$$\varphi_c = 0$$

$$\varphi_e = \varphi_c + E_2 - I_2 R_{02} = 31,7 \text{ В}$$

$$\varphi_d = \varphi_e - I_2 R_2 = 6,9 \text{ В}$$

$$\varphi_h = \varphi_d + E_1 - I_1 R_{01} = 15,1 \text{ В}$$

$$\varphi_a = \varphi_h - I_1 R_1 = 3,9 \text{ В}$$

$$\varphi_c = \varphi_a + I_6 R_6 = 0 \text{ В}$$

Потенциальная диаграмма изображена на рис. 6.

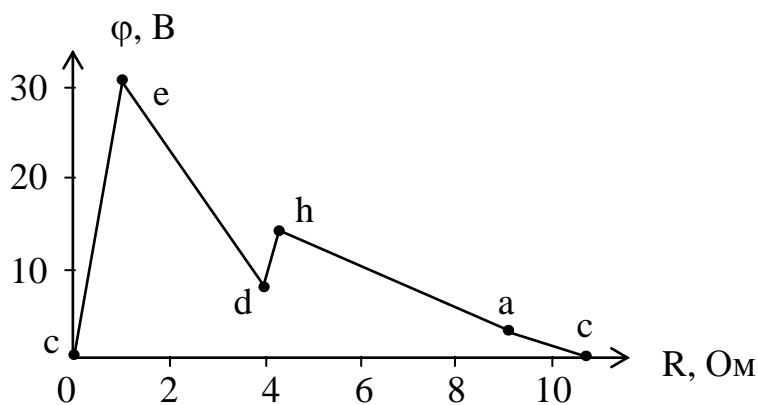


Рис. 6

ЗАДАЧА 2. Для электрической цепи, схема которой изображена на рис. 3.1 - 3.17, по заданным в табл. 3 параметрам и линейному напряжению, определить фазные и линейные токи, ток в нейтральном проводе (для четырехпроводной схемы), активную мощность всей цепи и каждой фазы отдельно. Построить векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости.

Таблица 3

Вариант	Рисунок	$U_{лн}, В$	$R_{ab}, Ом$	$R_{bc}, Ом$	$R_{ca}, Ом$	$X_{ab}, Ом$	$X_{bc}, Ом$	$X_{ca}, Ом$	$R_{ab}, Ом$	$R_{bc}, Ом$	$R_{ca}, Ом$	$X_{ab}, Ом$	$X_{bc}, Ом$	$X_{ca}, Ом$
1	3.1	127	2	4	6	2	3	4	-	-	-	-	-	-
2	3.1	220	4	6	10	3	6	8	-	-	-	-	-	-
3	3.1	380	4	3	6	4	8	4	-	-	-	-	-	-
4	3.2	127	3	4	6	6	3	4	-	-	-	-	-	-
5	3.2	220	5	9	12	5	6	10	-	-	-	-	-	-
6	3.2	380	6	12	16	6	8	16	-	-	-	-	-	-
7	3.3	127	3	5	7	5	6	10	-	-	-	-	-	-
8	3.3	220	7	11	14	2	4	7	-	-	-	-	-	-
9	3.3	380	10	16	20	10	12	20	-	-	-	-	-	-
10	3.4	127	2	3	4	7	6	5	-	-	-	-	-	-
11	3.4	220	4	6	8	5	2	3	-	-	-	-	-	-
12	3.4	380	4	6	3	8	4	8	-	-	-	-	-	-
13	3.5	127	6	-	-	-	4	6	-	-	-	-	-	-
14	3.5	220	10	-	-	-	8	8	-	-	-	-	-	-
15	3.5	380	12	-	-	-	10	14	-	-	-	-	-	-
16	3.6	127	-	-	-	-	-	-	2	2	2	4	4	4
17	3.6	220	-	-	-	-	-	-	4	4	4	6	6	6
18	3.6	380	-	-	-	-	-	-	10	10	12	6	5	6
19	3.7	127	-	-	-	-	-	-	2	5	4	3	2	2
20	3.7	220	-	-	-	-	-	-	8	4	6	10	12	14
21	3.7	380	-	-	-	-	-	-	2	4	6	2	3	4
22	3.8	127	-	-	-	-	-	-	4	6	10	3	6	8
23	3.8	220	-	-	-	-	-	-	4	3	6	4	8	4
24	3.8	380	-	-	-	-	-	-	3	4	6	6	3	4
25	3.9	127	-	-	-	-	-	-	5	9	12	5	6	10

Продолжение табл.3

26	3.9	220	-	-	-	-	-	-	6	12	16	6	8	16
27	3.9	380	-	-	-	-	-	-	7	11	14	2	4	7
28	3.10	127	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	8	8
29	3.10	220	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	4	6
30	3.10	380	-	-	-	-	-	-	15	-	-	-	10	20
31	3.11	127	3	-	-	-	4	4	-	-	-	-	-	-
32	3.11	220	5	-	-	-	6	6	-	-	-	-	-	-
33	3.11	380	10	-	-	-	12	12	-	-	-	-	-	-
34	3.12	127	2	-	-	-	3	3	-	-	-	-	-	-
35	3.12	220	8	-	-	-	10	10	-	-	-	-	-	-
36	3.12	380	12	-	-	-	15	15	-	-	-	-	-	-
37	3.13	127	-	-	-	-	-	-	-	2	4	6	2	3
38	3.13	220	-	-	-	-	-	-	-	4	3	6	4	8
39	3.13	380	-	-	-	-	-	-	-	7	11	14	2	4
40	3.14	127	-	-	-	-	-	-	4	8	4	-	10	6
41	3.14	220	-	-	-	-	-	-	5	4	5	-	6	3
42	3.14	380	-	-	-	-	-	-	10	5	5	-	2	5
43	3.15	127	-	-	-	-	-	-	-	2	3	4	7	6
44	3.15	220	-	-	-	-	-	-	-	4	6	8	5	2
45	3.15	380	-	-	-	-	-	-	-	4	6	3	8	4
46	3.16	127	-	-	-	-	-	-	5	-	6	8	3	2
47	3.16	220	-	-	-	-	-	-	8	-	7	7	2	2
48	3.16	380	-	-	-	-	-	-	10	-	12	8	10	4
49	3.17	127	-	4	-	10	-	15	-	-	-	-	-	-
50	3.17	220	-	4	-	12	-	20	-	-	-	-	-	-

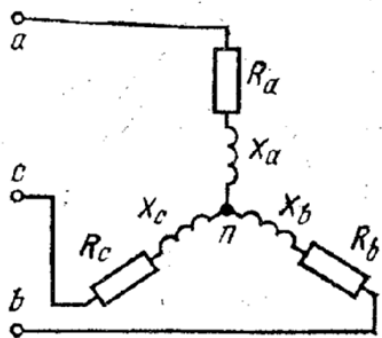


Рис. 3.1

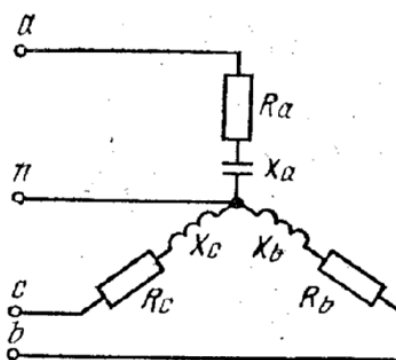


Рис. 3.2

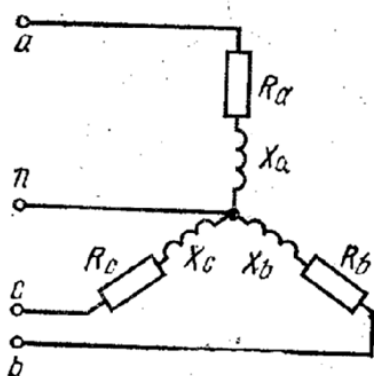


Рис. 3.3

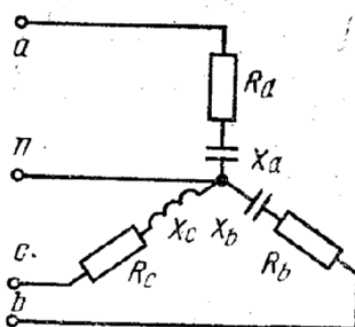


Рис. 3.4

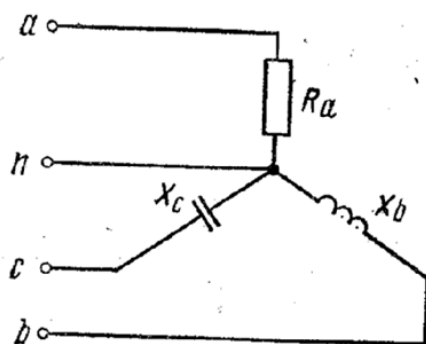


Рис. 3.5

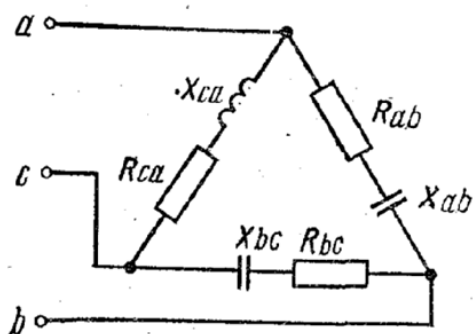


Рис. 3.6

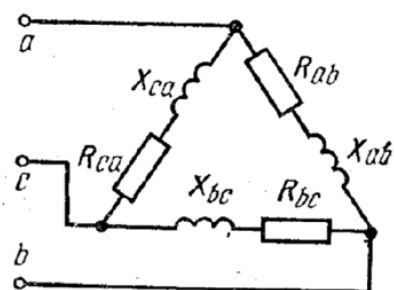


Рис. 3.7

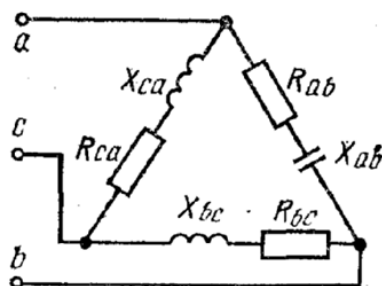


Рис. 3.8

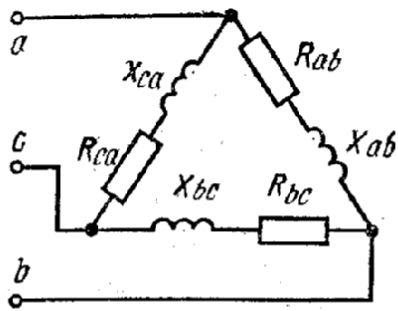


Рис. 3.9

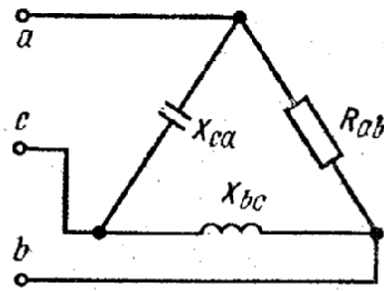


Рис. 3.10

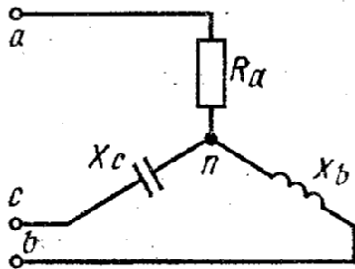


Рис. 3.11

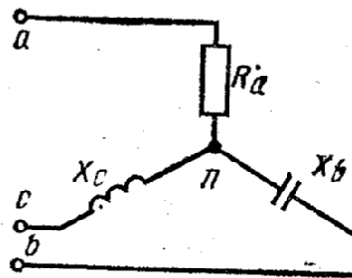


Рис. 3.12

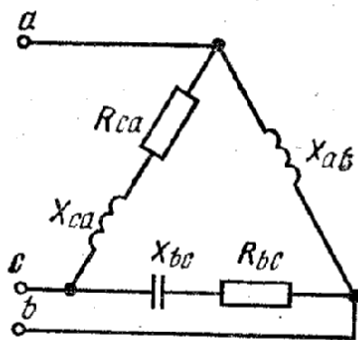


Рис. 3.13

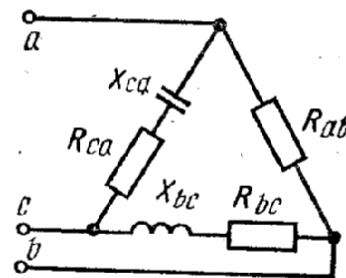


Рис. 3.14

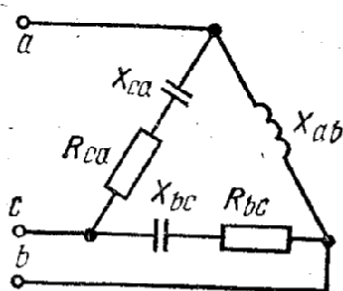


Рис. 3.15

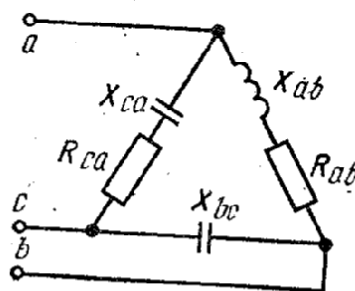


Рис. 3.16

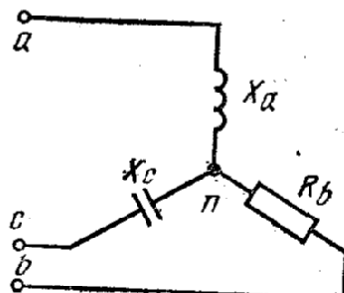


Рис. 3.17

ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧИ 2

Пример №1

Дано: $U_{л}=380\text{В}$, $R_b=4\text{ Ом}$, $R_c=x_c=10\text{ Ом}$, $x_a=20\text{ Ом}$,

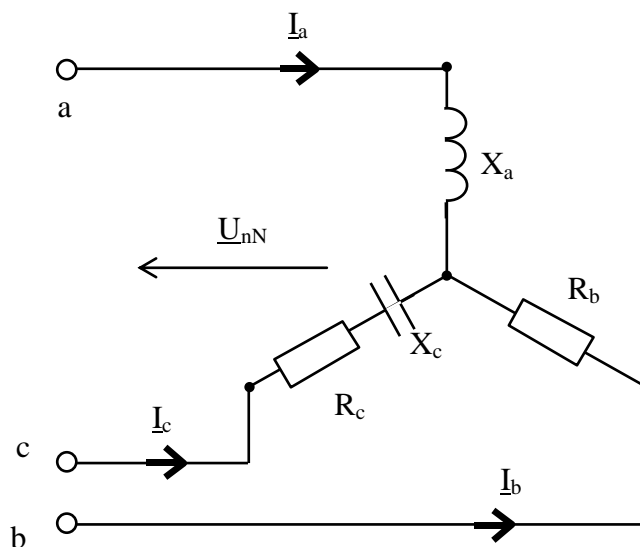


Рис.1

Определить токи, активную мощность всей цепи и каждой фазы отдельно. Построить векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости.

На рис.1 представлена трехфазная трех проводная (без нейтрального провода) цепь. Приемник соединен по схеме звезда. Нагрузка приемника не симметричная.

Решение

1. Определим фазное напряжение источника, который на схеме не показан:

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

2. Запишем комплексные значения ЭДС источника:

$$\underline{E}_A = 220\text{ В}$$

$$\underline{E}_B = 220e^{-j120^\circ} = -110 - j190,5(\text{В})$$

$$\underline{E}_C = 220e^{j120^\circ} = -110 + j190,5(\text{В})$$

3. Определим проводимости ветвей:

$$Y_a = \frac{1}{z_a} = \frac{1}{20j} = -0,05j(\text{См}); \quad Y_b = \frac{1}{z_b} = \frac{1}{4} = 0,25(\text{См});$$

$$Y_c = \frac{1}{z_c} = \frac{1}{10 - j10} = 0,05 + j0,05(\text{См})$$

4. Вычислим напряжение смещения нейтрали:

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{E}_A Y_a + \underline{E}_B Y_b + \underline{E}_C Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c} = -141,75 - j182(B)$$

5. Определим напряжения на фазах приемника:

$$\underline{U}_a = \underline{E}_A - \underline{U}_{nN} = 361,75 + j182(B)$$

$$\underline{U}_b = \underline{E}_B - \underline{U}_{nN} = 31,75 - j8,5(B)$$

$$\underline{U}_c = \underline{E}_C - \underline{U}_{nN} = 31,75 + j372,5(B)$$

6. По закону Ома определим токи:

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{z_a} = 9,1 - j18,1 = 20,26 e^{-j63^\circ} A$$

$$\underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{z_b} = 7,9 - j2,1 = 8,17 e^{-j15^\circ} A$$

$$\underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{z_c} = -17 + j20,2 = 26,4 e^{j130^\circ} A$$

7. Мощность каждой фазы приемника равна:

$$P_a = \text{Re}(\underline{U}_a \underline{I}_a^*) = \text{Re}(361,75 + j182)(9,1 + j18,1) = 0 \text{Вт}$$

$$P_b = \text{Re}(\underline{U}_b \underline{I}_b^*) = \text{Re}(31,75 - j8,5)(7,9 + j2,1) = 268,7 \text{Вт}$$

$$P_c = \text{Re}(\underline{U}_c \underline{I}_c^*) = \text{Re}(31,75 + j372,5)(-17 - j20,2) = 6984,8 \text{Вт}$$

. Мощность трехфазной системы определим как сумму мощностей каждой фазы в отдельности

$$P_{3\phi} = P_a + P_b + P_c = 7253,5 \text{Вт}$$

8. Построим в масштабе векторную диаграмму токов и напряжений.

Выберем масштаб:

$$m_I = 6 \frac{A}{\text{см}} \quad m_U = 50 \frac{B}{\text{см}}$$

Векторная диаграмма представлена на рис.2.

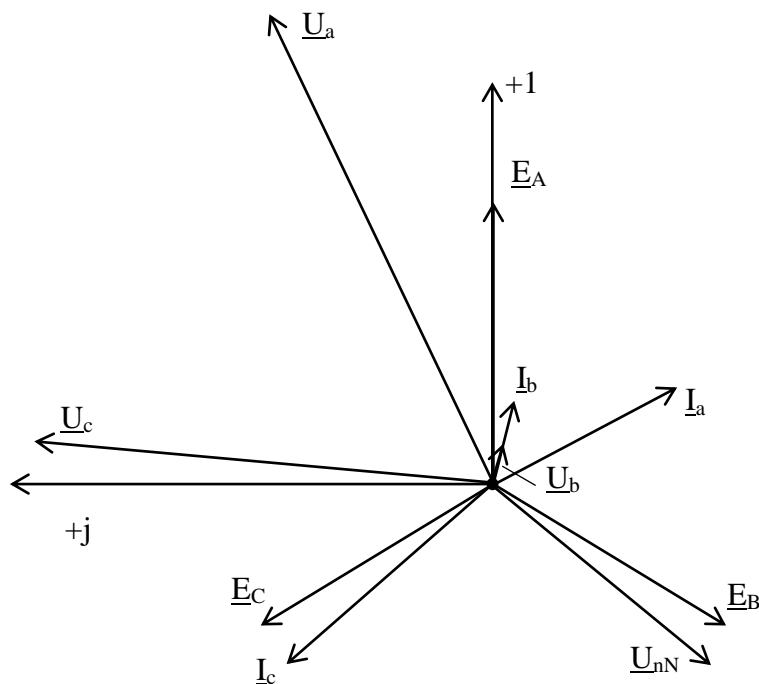


Рис.2

Пример №2

Дано: $U_{л}=380\text{В}$, $x_a=20\text{ Ом}$, $R_b=4\text{ Ом}$, $R_c=x_c=10\text{ Ом}$.

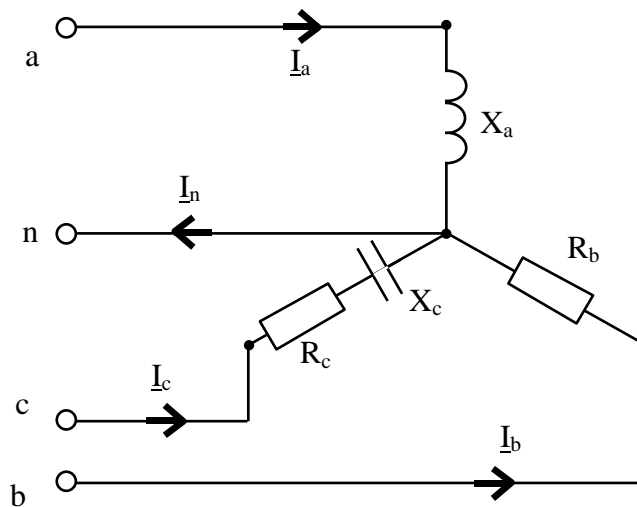


Рис.3

Определить токи, активную мощность всей цепи и каждой фазы отдельно. Построить векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости

Решение

На рис.3. представлена трехфазная четырех проводная система (с нейтральным проводом $z_n=0$). Т.к. линейные напряжения источника в задачах №2 и №3 одинаковы, то фазные напряжения и ЭДС источника определяются так же, как в задаче №2, поэтому п.п.1,2 выполняются аналогично.

3. $U_{nN}=0$ т.к. сопротивление нейтрального провода равно 0, а проводимость $Y_n = \frac{1}{z_n} = \infty$, поэтому напряжения на фазах приемника равно

ЭДС источника: $\underline{U}_a = \underline{E}_A$; $\underline{U}_b = \underline{E}_B$; $\underline{U}_c = \underline{E}_C$

4. Определим токи:

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{E}_A}{z_a} = -j11 = 11e^{-j90^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{I}_b = \frac{\underline{E}_B}{z_b} = -27,5 - j47,6 = 54,97e^{-j120^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{I}_c = \frac{\underline{E}_C}{z_c} = -15 + j4 = 15,52e^{j165^\circ} \text{ A}$$

По первому закону Кирхгофа ток в нейтральном проводе равен:

$$\underline{I}_n = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = -42,5 - j54,6 \text{ (A)}$$

5. Мощность каждой фазы приемника равна:

$$P_a = \text{Re}(\underline{U}_a \underline{I}_a^*) = 0 \text{ Вт}$$

$$P_b = \text{Re}(\underline{U}_b \underline{I}_b^*) = 12092,8 \text{ Вт}$$

$$P_c = \text{Re}(\underline{U}_c \underline{I}_c^*) = 2142 \text{ Вт}$$

Мощность трехфазной системы равна:

$$P_{3\phi} = P_a + P_b + P_c = 14504,8 \text{ Вт}$$

6. Построим в масштабе векторную диаграмму токов и напряжений.

Выберем масштаб: $m_I = 8 \frac{\text{А}}{\text{см}}$ $m_U = 50 \frac{\text{В}}{\text{см}}$

Векторная диаграмма представлена на рис.4

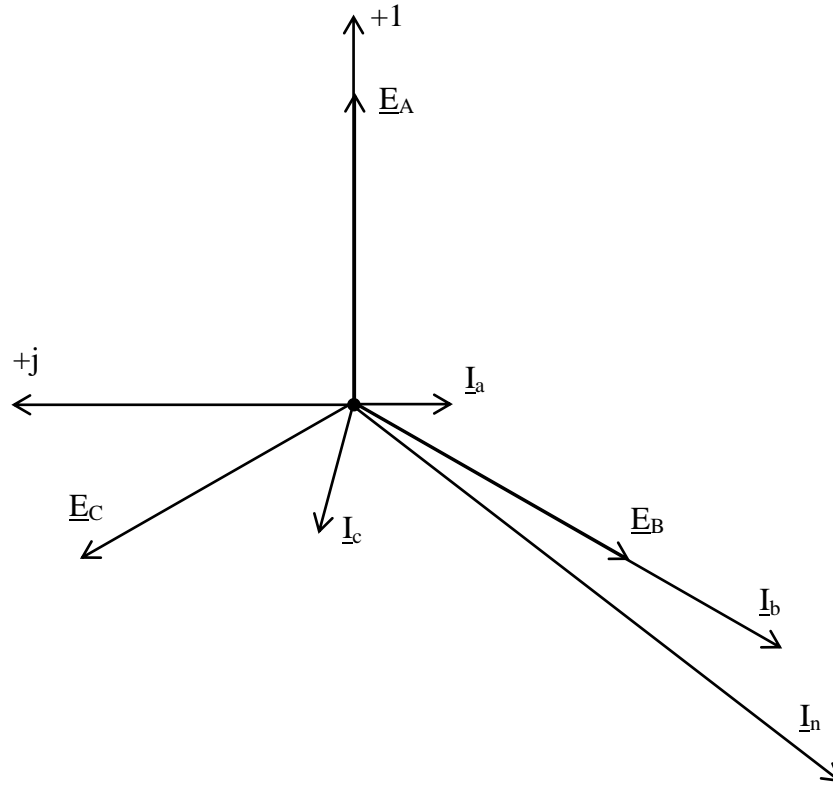


Рис.4

Пример №3

Дано: $U_{л} = 380 \text{ В}$, $x_{ab} = 20 \text{ Ом}$, $R_{bc} = 4 \text{ Ом}$, $R_{ca} = x_{ca} = 10 \text{ Ом}$.

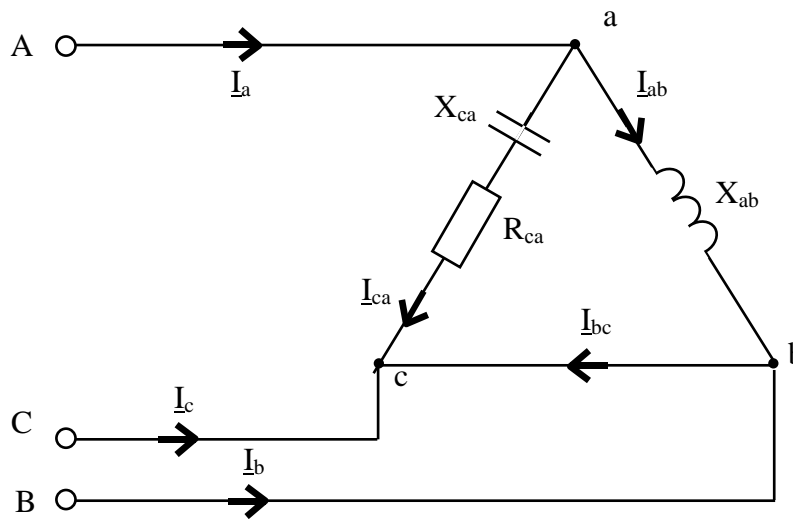


Рис. 5

Определить токи, активную мощность всей цепи и каждой фазы отдельно. Построить векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости

На рис.5 представлена трехфазная трех проводная цепь, в которой приемник соединен по схеме треугольник.

Решение

1. Запишем комплексные значения линейных напряжений источника:

$$\underline{U}_{AB} = 380 \text{ В}$$

$$\underline{U}_{BC} = 380e^{-j120^\circ} = -190 - j329 \text{ (В)}$$

$$\underline{U}_{CA} = 380e^{j120^\circ} = -190 + j329 \text{ (В)}$$

2. Определим фазные токи по закону Ома:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{AB}}{z_{ab}} = -j19 = 19e^{-j90^\circ} \text{ А}$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{BC}}{z_{bc}} = -47,5 - j82,25 = 95e^{-j120^\circ} \text{ А}$$

$$\underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{CA}}{z_{ca}} = -26 + j7 = 26,92e^{j165^\circ} \text{ А}$$

3. Из первых законов Кирхгофа, записанных для узлов а, б, с, определим линейные токи:

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 26 - j26 \text{ (А)}$$

$$\underline{I}_b = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = -47,5 - j63,25 \text{ (А)}$$

$$\underline{I}_c = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = 21,5 + j89,25 \text{ (А)}$$

4. Определим активную мощность фаз ab, bc, ca и активную мощность всей трехфазной цепи:

$$P_{ab} = \text{Re}(\underline{U}_{AB} \underline{I}_{ab}^*) = 0 \text{ Вт}$$

$$P_{bc} = \text{Re}(\underline{U}_{BC} \underline{I}_{bc}^*) = 18035 \text{ Вт}$$

$$P_{ca} = \text{Re}(\underline{U}_{CA} \underline{I}_{ca}^*) = 2637 \text{ Вт}$$

$$P_{3\phi} = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = 20672 \text{ Вт}$$

5. Построим в масштабе векторную диаграмму токов и напряжений. Выберем масштаб:

$$m_I = 15 \frac{\text{А}}{\text{см}} \quad m_U = 100 \frac{\text{В}}{\text{см}}$$

Векторная диаграмма представлена на рис.6.

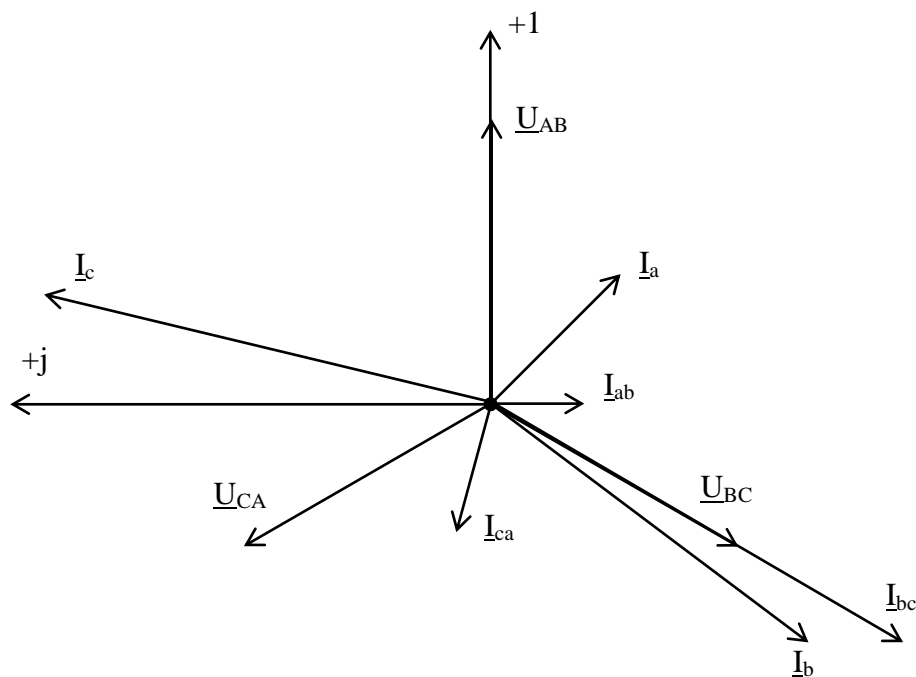


Рис.6

ЗАДАЧА 3. Для трехфазного трансформатора, параметры которого приведены в табл. 1, определить:

- номинальный ток первичной I_{1H} и вторичной I_{2H} обмоток;
- ток холостого хода трансформатора I_0 ;
- коэффициент мощности холостого хода $\cos \varphi_0$;
- угол магнитных потерь в стали δ ;
- напряжение короткого замыкания U_K
- параметры схемы замещения;
- построить внешнюю характеристику $U_2 = f(\beta)$;
- построить зависимость КПД от нагрузки $\eta = f(\beta)$;
- построить в масштабе векторную диаграмму приведенного трансформатора.

При расчете параметров схемы замещения определить фактические значения сопротивлений r_1, X_1, Z_1 первичной обмотки, приведенные и фактические значения сопротивлений $r_2', X_2', Z_2', r_2, X_2, Z_2$ вторичной обмотки и сопротивления намагничивающей цепи r_0, X_0, Z_0 . Изобразить схему

замещения.

Таблица 1

Паспортные параметры трансформаторов

№ варианта	Группа соединений	Паспортные данные							
		S _{НОМ} , кВ·А	U _{1НОМ} , В	U ₂₀ , В	u _к , %	I ₀ , %	P _к , Вт	P ₀ , Вт	
0	Y/Y ₀ - 0	10	6300	400	5,0	10,0	335	105	
1	Y/Δ - 11	20	6300	230	5,0	9,0	600	180	
2	Y/Y ₀ - 0	30	10000	400	5,0	9,0	850	300	
3	Y/Y ₀ - 0	50	10000	400	5,0	8,0	1325	440	
4	Y/Y ₀ - 0	75	10000	230	5,0	7,5	1875	590	
5	Y/Y ₀ - 0	100	10000	525	5,0	7,5	2400	730	
6	Y/Δ - 11	180	10000	525	5,0	7,0	4100	1200	
7	Y/Y ₀ - 0	240	10000	525	5,0	7,0	5100	1600	
8	Y/Δ - 11	320	35000	10500	6,5	7,5	6200	2300	
9	Y/Y ₀ - 0	420	10000	525	5,5	6,6	7000	2100	
10	Y/Y ₀ - 0	25	6000	230	4,5	3,0	600	125	
11	Y/Y ₀ - 0	25	10000	230	4,7	3,0	690	125	
12	Y/Δ - 11	25	6000	400	4,5	3,0	600	125	
13	Y/Δ - 11	25	10000	400	4,7	3,0	690	125	
14	Y/Y ₀ - 0	40	10000	230	4,5	3,0	880	180	
15	Y/Y ₀ - 0	40	6000	230	4,5	3,0	880	180	
16	Y/Y ₀ - 0	40	6000	400	4,7	3,0	1000	180	
17	Y/Δ - 11	40	10000	400	4,0	3,2	690	125	
18	Y/Δ - 11	63	6000	230	4,5	2,8	1280	260	
19	Y/Δ - 11	63	6000	400	4,5	2,8	1280	260	
20	Y/Y ₀ - 0	63	10000	230	4,7	2,8	1470	260	
21	Y/Y ₀ - 0	63	10000	400	4,7	2,8	1470	260	
22	Y/Y ₀ - 0	63	2000	400	4,7	2,8	1470	260	
23	Y/Y ₀ - 0	63	20000	230	4,7	2,8	1470	260	
24	Y/Y ₀ - 0	63	2000	400	4,5	2,8	1280	260	
25	Y/Δ - 11	100	10000	230	4,7	2,6	2270	365	
26	Y/Δ - 11	100	10000	400	4,7	2,6	2270	365	
27	Y/Δ - 11	100	6000	230	4,5	2,6	1970	365	
28	Y/Y ₀ - 0	100	6000	400	4,5	2,6	1970	365	
29	Y/Δ - 11	100	20000	230	4,7	2,6	2270	465	
30	Y/Y ₀ - 0	100	20000	400	4,7	2,6	2270	465	
31	Y/Δ - 11	100	35000	230	4,7	2,6	2270	465	
32	Y/Y ₀ - 0	100	35000	400	4,7	2,6	2270	465	
33	Y/Δ - 11	160	6000	230	4,5	2,4	2650	540	
34	Y/Δ - 11	160	6000	400	4,5	2,4	2650	540	
35	Y/Y ₀ - 0	160	10000	230	4,5	2,4	3100	540	
36	Y/Y ₀ - 0	160	10000	400	4,5	2,47	3100	540	
37	Y/Δ - 11	160	6000	690	4,5	2,4	2650	540	
38	Y/Δ - 11	250	6000	230	4,5	2,3	3700	780	
39	Y/Δ - 11	250	6000	400	4,5	2,3	3700	780	
40	Y/Y ₀ - 0	250	10000	230	4,7	2,3	4200	780	
41	Y/Y ₀ - 0	250	10000	690	4,7	2,3	4200	780	
42	Y/Y ₀ - 0	400	3000	400	4,5	3,2	5500	1080	
43	Y/Y ₀ - 0	400	6000	400	4,5	3,2	5500	1080	
44	Y/Y ₀ - 0	400	6000	690	4,5	3,2	5500	1080	
45	Y/Y ₀ - 0	400	6300	400	4,5	3,2	5500	1080	

46	Y/Y ₀ - 0	400	100000	230	4,5	3,2	5500	1080	
----	----------------------	-----	--------	-----	-----	-----	------	------	--

Окончание табл. 1

47	Y/Y ₀ - 0	400	10000	400	4,5	3,2	5500	1080	
48	Y/Y ₀ - 0	400	10000	690	4,5	3,2	5500	1080	
49	Y/Y ₀ - 0	630	3000	400	5,0	3,2	7600	1680	
50	Y/Y ₀ - 0	630	6000	400	5,0	3,2	7600	1680	

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧИ 3

Для трехфазного трансформатора мощностью $S_{\text{ном}} = 100 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, соединение обмоток Y/Y₀ - 0, известно: номинальное напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора $U_{1 \text{ ном}} = 6000 \text{ В}$, напряжение на зажимах вторичной обмотки в режиме холостого хода $U_{20} = 400 \text{ В}$, напряжение короткого замыкания $u_{\text{к}} = 5,5 \%$, мощность короткого замыкания $P_{\text{к}} = 2400 \text{ Вт}$, мощность холостого хода $P_0 = 600 \text{ Вт}$, ток холостого хода $i_0 = 7,0 \%$.

Определить: 1) сопротивление обмоток трансформатора R_1, X_1, R_2, X_2 ; 2) сопротивление намагничивающей цепи Z_0 и его составляющие R_0 и X_0 , которыми заменяется магнитная цепь трансформатора; 3) угол магнитных потерь δ .

Построить характеристики трансформатора: 1) зависимость $U_2 = f(\beta)$ напряжения от нагрузки (внешняя характеристика); 2) зависимость $\eta = f(\beta)$ коэффициента полезного действия от нагрузки; β – коэффициент нагрузки трансформатора (коэффициент мощности нагрузки принять $\cos \varphi_2 = 0,75$).

Построить векторную диаграмму трансформатора при нагрузке, составляющей 0,8 от номинальной мощности трансформатора $S_{\text{ном}}$ и $\cos \varphi_2 = 0,75$). Составить T-образную схему замещения трансформатора.

Решение.

1. Полная паспортная мощность трансформатора $S_{\text{ном}}$ соответствует вторичной обмотке. Так как КПД трансформатора близок к 100 %, то значение $S_{\text{ном}}$ близко к мощности его первичной обмотки. Для трехфазного трансформатора $S_{\text{ном}} = \sqrt{3} \cdot U_{1 \text{ ном}} I_{1 \text{ ном}}$, где $U_{1 \text{ ном}}$ и $I_{1 \text{ ном}}$ номинальные значения напряжения и тока первичной обмотки. Отсюда

$$I_{1 \text{ ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1 \text{ ном}}} = \frac{100 \cdot 1000 \text{ Вт}}{\sqrt{3} \cdot 6000 \text{ В}} = 9,62 \text{ А}.$$

По условию ток холостого хода $i_0 = 7,0 \%$, тогда фактическое значение $I_0 = 0,07 \cdot 9,62 \text{ A} = 0,67 \text{ A}$.

$$\text{Мощность потерь холостого хода } P_0 = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} I_0 \cdot \cos \varphi_0,$$

где φ_0 – сдвиг фаз между током и напряжением в первичной обмотке, откуда

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_0} = \frac{600 \text{ Вт}}{\sqrt{3} \cdot 6000 \text{ В} \cdot 0,67 \text{ А}} = 0,086, \text{ а угол } \varphi_0 = \arccos(0,086) = 85,07^\circ.$$

$$\text{Угол магнитных потерь } \delta = 90^\circ - \varphi_0 \approx 90^\circ - 85^\circ = 5^\circ.$$

Напряжение короткого замыкания $u_k = 5,5 \%$ от $U_{\text{ном}}$, где $U_{\text{ном}}$ – линейное значение напряжения. По условию трансформатор включен по схеме Y/Y_0 , тогда действующее значение линейного напряжения короткого замыкания $U_K = 0,055 \cdot 6000 \text{ В} = 330 \text{ В}$, а значение фазного напряжения

$$\text{короткого замыкания } U_{K\phi} = \frac{U_K}{\sqrt{3}} = 190,5 \text{ В}.$$

Ток короткого замыкания I_K соответствует номинальному значению $I_{\text{ном}}$. При соединении в звезду линейный ток равен фазному, поэтому $I_K = I_{K\phi} = I_{\text{ном}} = 9,62 \text{ А}$.

Коэффициент трансформации трансформатора

$$k = \frac{U_{\text{ном}}}{U_{20}} = \frac{6000 \text{ В}}{400 \text{ В}} = 15$$

2. Расчет сопротивлений схемы замещения трансформатора

Полное сопротивление короткого замыкания фазы

$$Z_K = \frac{U_{K\phi}}{I_{K\phi}} = \frac{190,5 \text{ В}}{9,62 \text{ А}} = 19,8 \text{ Ом}.$$

Мощность потерь короткого замыкания $P_K = 3 \cdot (I_K)^2 \cdot R_K$, откуда активное сопротивление короткого замыкания $R_K = \frac{P_K}{3 \cdot I_K^2} = \frac{2400}{3 \cdot 9,6^2} = 8,7 \text{ Ом}.$

Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{19,6^2 - 8,7^2} = 17,9 \text{ Ом}.$$

По найденным значениям сопротивлений короткого замыкания можно определить синус и косинус угла сдвига фаз между током и напряжением в режиме КЗ:

$$\cos \varphi_K = \frac{R_K}{Z_K} = \frac{8,7}{19,8} = 0,44 \quad \text{и} \quad \sin \varphi_K = \frac{X_K}{Z_K} = \frac{17,9}{19,8} = 0,9$$

Активное сопротивление первичной обмотки

$$R_1 = (R_2)' = \frac{R_K}{2} = \frac{8,7 \text{ Ом}}{2} = 4,35 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление первичной обмотки

$$X_1 = (X_2)' = \frac{X_K}{2} = \frac{17,9 \text{ Ом}}{2} = 8,95 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление вторичной обмотки

$$R_2 = \frac{R_2'}{k^2} = \frac{4,35 \text{ Ом}}{225} = 0,0193 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление первичной обмотки

$$X_2 = \frac{X_2'}{k^2} = \frac{8,95 \text{ Ом}}{225} = 0,0398 \text{ Ом.}$$

Сопротивления намагничивающей цепи:

$$\text{- полное } Z_0 = \frac{U_{\text{НОМ}\phi}}{I_{0\phi}} = \frac{6000 \text{ В}}{\sqrt{3} \cdot 0,67 \text{ А}} = 5180 \text{ Ом};$$

$$\text{- активное } R_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I^2} = \frac{600 \text{ Вт}}{3 \cdot (0,67 \text{ А})^2} = 447 \text{ Ом};$$

$$\text{- индуктивное } X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{5180^2 - 447^2} = 5160 \text{ Ом.}$$

3. Расчет КПД трансформатора. КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_K},$$

где β – коэффициент нагрузки трансформатора. Так как параметры $S_{\text{НОМ}}$, P_0 , P_K и $\cos \varphi_2$ являются постоянными, КПД является функцией только одной переменной β , то есть $\eta = f(\beta)$. Задаваясь набором дискретных значений β (0,01; 0,025; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0) можно вычислить соответствующие значения η . Результаты расчета занесем в табл. 3.

Коэффициент нагрузки имеет максимальное значение, которое вычисляется по паспортным значениям для мощностей потерь P_0 и P_K :

$$\beta_{\text{max}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}} = \sqrt{\frac{600 \text{ Вт}}{2400 \text{ Вт}}} = 0,5 \quad \text{и тогда } \eta_{\text{max}} = \eta(\beta_{\text{max}}) = 0,969.$$

4. Расчет потери напряжения и параметров внешней характеристики. При изменении коэффициента нагрузки напряжение на вторичной обмотке изменяется:

$$\Delta u_2 = \beta \cdot (u_{ка} \cdot \cos \varphi_2 + u_{кр} \cdot \sin \varphi_2),$$

где $u_{ка}$ и $u_{кр}$ – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания u_k , выраженные в процентах или относительных единицах, причем $u_{ка} = u_k \cdot \cos \varphi_k$, а $u_{кр} = u_k \cdot \sin \varphi_k$. Подставляя вычисленные ранее значения, получим $u_{ка} = 5,5 \cdot 0,44 = 2,42$ и $u_{кр} = 5,5 \cdot 0,9 = 4,95$. Так как u_k , $\cos \varphi_k$ и $\cos \varphi_2$ величины постоянные, то зависимость $\Delta u_2 = f(\beta)$ является линейной: $\Delta u_2(\beta) = k \cdot \beta$, где $k = (u_{ка} \cdot \cos \varphi_2 + u_{кр} \cdot \sin \varphi_2) = 2,42 \cdot 0,75 + 4,95 \cdot 0,66 = 5,082$ (%). В итоге $\Delta u_2 = 5,082 \cdot \beta$, $u_2 = 100\% - \Delta u_2 = 100\% - 5,082 \cdot \beta$, а абсолютное значение $U_2 = u_2 \cdot U_{20}$. Зависимость линейна, ее можно построить по двум точкам, но для последующих расчетов значения u_2 и U_2 вычисляются для выбранного выше набора дискретных значений β и заносятся в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета КПД и напряжения на вторичной обмотке

Параметр	Коэффициент нагрузки трансформатора β												
	0,01	0,025	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
β	0,01	0,025	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
η	0,555	0,757	0,904	0,924	0,956	0,965	0,967	0,969	0,967	0,966	0,964	0,963	0,962
$\Delta u_2, \%$	-	-	-	0,507	1,014	1,521	2,028	2,535	3,042	3,549	4,056	4,563	5,070
U_2, V	-	-	-	397,97	395,94	393,92	391,89	389,86	387,83	385,80	383,78	381,75	379,72

5. Построение векторной диаграммы

По условию векторную диаграмму требуется построить для коэффициента нагрузки $\beta = 0,8$ и коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi_2 =$

0,75. Векторная диаграмма строится для одной фазы, поэтому все величины должны быть рассчитаны для фазных значений.

Из таблицы 3 для заданных параметров линейное напряжение

$$U_2(0,8) = 383,78 \text{ В, тогда фазное } U_{2\phi} = \frac{U_{2л}}{\sqrt{3}} = \frac{383,78}{\sqrt{3}} = 221,8 \text{ В.}$$

Приведенное значение вторичного напряжения

$$U'_{2\phi} = U_{2\phi} \cdot k = 221,8 \text{ В} \cdot 15 = 3327,6 \text{ В.}$$

Вектор тока $I_{2\phi}$ отстает по фазе от вектора напряжения $U_{2\phi}$ на заданный угол φ_2 и для $\beta = 0,8$ имеет значение $I_2 = 0,8 \cdot I_{2\text{ном}}$, где $I_{2\text{ном}}$ вычисляется через полную паспортную мощность $S_{\text{ном}}$:

$$I_{2\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2\text{ном}}} = \frac{100 \cdot 1000}{1,73 \cdot 400} = 144,51 \text{ А.}$$

Тогда $I_{2\phi}(0,8) = 0,8 \cdot 144,51 = 115,6 \text{ А}$, а приведенное значение тока $I'_{2\phi} =$

$$\frac{I_{2\phi}}{k} = \frac{115,6}{15} = 7,71 \text{ А. Сдвиг фаз между приведенными значениями тока и}$$

напряжения $I'_{2\phi}$ и $U'_{2\phi}$ остается неизменным, то есть φ_2 . Построение векторной диаграммы удобно начать с векторов $I'_{2\phi}$, $U'_{2\phi}$ и угла φ_2 .

Рекомендуется выполнять следующие подготовительные операции и требования:

- изображать диаграмму по размерам страницы или на отдельном листе миллиметровой бумаги;

- выбрать масштаб для векторов исходя из размеров листа и значений параметров;

- внимательно рассмотреть взаимное расположение векторов на типовой векторной диаграмме и по возможности придерживаться того же расположения. Обратит внимание на то, что векторы $U'_{2\phi}$, E_1 и E'_2 ориентируются вниз под небольшим углом (ориентация может быть совершенно произвольной).

С учетом замечаний начинают выполнять диаграмму с вектора $U'_{2\phi}$, который направляется от середины листа вниз. Под углом φ_2 к вектору $U'_{2\phi}$ строится вектор тока $I'_{2\phi}$, который отстает от напряжения и сдвинут по фазе

по часовой стрелке.

Вектор ЭДС E'_2 строится на основе уравнения электрического состояния вторичной обмотки:

$$\underline{E}'_2 = \underline{U}'_{2\phi} + \underline{I}'_{2\phi} \cdot r'_2 + j\underline{I}'_{2\phi} \cdot X'_2,$$

где модуль произведения $I'_{2\phi} \cdot r'_2 = 7,71 \text{ A} \cdot 4,35 \text{ Ом} = 33,6 \text{ В}$;

$$\text{а } I'_{2\phi} \cdot X'_2 = 7,71 \text{ A} \cdot 8,95 \text{ Ом} = 68,3 \text{ В}.$$

Вектор $\underline{I}'_{2\phi} \cdot r'_2$ есть напряжение на активном сопротивлении, по фазе совпадает с направлением тока $\underline{I}'_{2\phi}$. Изобразим его на векторной диаграмме, совмещая начало с концом вектора $\underline{U}'_{2\phi}$. Вектор $j\underline{I}'_{2\phi} \cdot X'_2$ есть напряжение на индуктивном сопротивлении, оно опережает напряжение $\underline{I}'_{2\phi} \cdot r'_2$ на угол 90° . Изобразим его, совмещая начало с концом вектора $\underline{I}'_{2\phi} \cdot r'_2$ с поворотом на 90° против часовой стрелки.

Примечание. Для наглядности рисунок выполнен с нарушением пропорций напряжений относительно общего масштаба.

Фрагмент векторной диаграммы для описанной части на рис. 1.

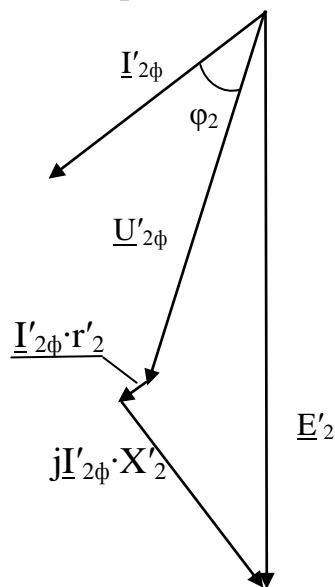


Рис. 1. Фрагмент векторной диаграммы

Вектор магнитного потока $\underline{\Phi}_m$ по закону электромагнитной индукции всегда опережает наведенную им ЭДС \underline{E}'_2 и \underline{E}_1 на угол 90° . Изобразим его из начала векторной диаграммы с поворотом против часовой стрелки в произвольном масштабе. Ток холостого хода \underline{I}_0 опережает магнитный поток на угол потерь $\delta = 5^\circ$. После его построения на основе уравнения

намагничивающих токов ($\underline{I}_{1\phi} = \underline{I}_0 - \underline{I}'_{2\phi}$) можно изобразить вектор тока первичной обмотки $\underline{I}_{1\phi}$.

Вектор напряжения первичной обмотки \underline{U}_1 строится на основе уравнения электрического состояния первичной обмотки:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_{1\phi} \cdot r_1 + j\underline{I}_{1\phi} \cdot X_1,$$

где произведение $\underline{I}_{1\phi} \cdot r_1$ есть падение напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки, а $\underline{I}_{1\phi} \cdot X_1$ на ее индуктивном сопротивлении.

В этих произведениях неизвестен ток $\underline{I}_{1\phi}$, соответствующий току $\underline{I}_{2\phi}$ при $\beta = 0,8$. Его можно определить по масштабу на векторной диаграмме или пренебречь током \underline{I}_0 в уравнении намагничивающих токов и принять, что $\underline{I}_{1\phi} = \underline{I}'_{2\phi} = 7,71$ А. Тогда $\underline{I}_{1\phi} \cdot r_1 = \underline{I}'_{2\phi} \cdot r'_2 = 33,6$ В, а $\underline{I}_{1\phi} \cdot X_1 = \underline{I}'_{2\phi} \cdot X'_2 = 68,3$ В.

Построение векторов уравнения $\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_{1\phi} \cdot r_1 + j\underline{I}_{1\phi} \cdot X_1$ аналогично построению векторов по уравнению электрического состояния вторичной обмотки. При этом необходимо учесть условие, что $E_1 = E'_2$ и что вектор \underline{E}_1 по направлению противоположен вектору $-\underline{E}_1$.

В итоге векторная диаграмма в целом будет соответствовать рис. 3, а схема замещения рис. 2.

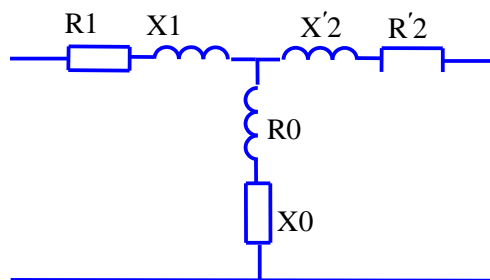


Рис. 2. Схема замещения трансформатора

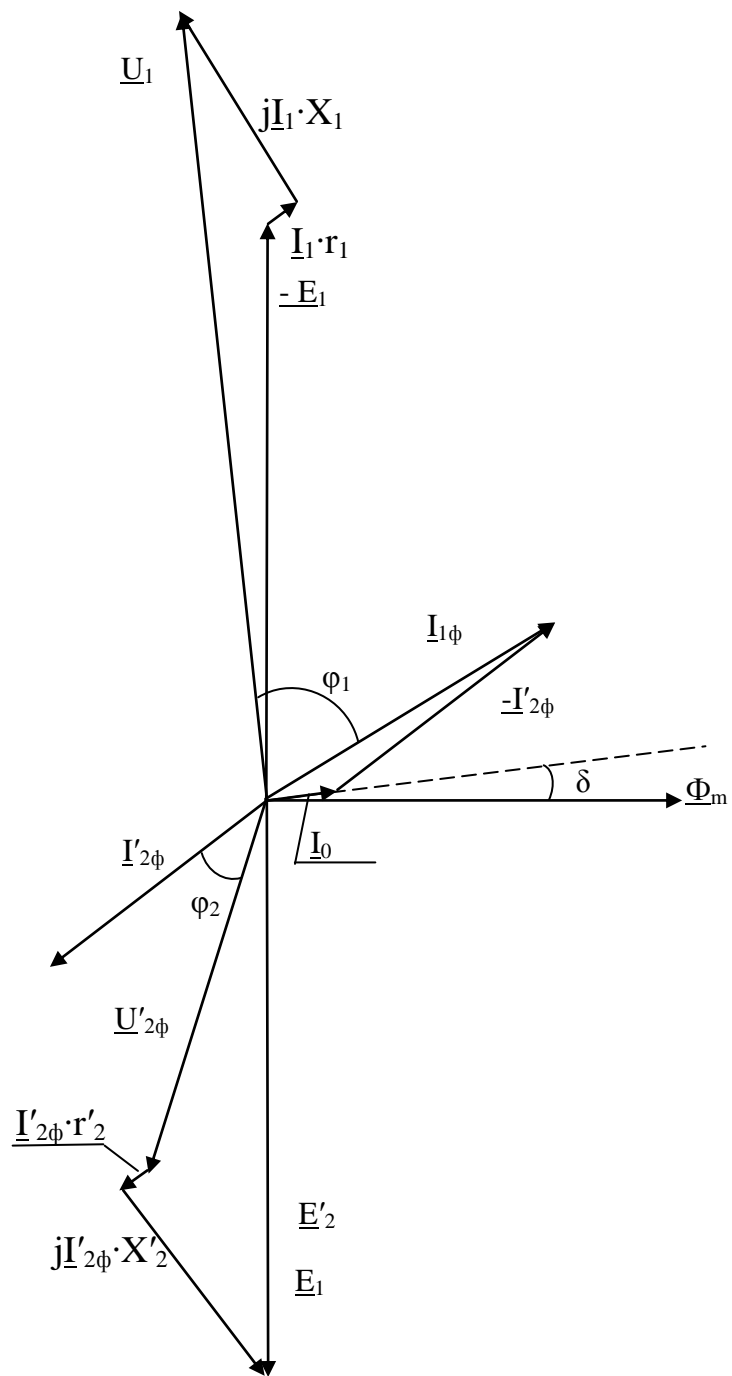


Рис. 3. Векторная диаграмма трансформатора для $\beta = 0,8$ и $\cos \varphi_2 = 0,75$

