

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Факультет информационных технологий и управления

Кафедра теоретических основ электротехники

Типовой расчет №2 по курсу: «Теория электрических цепей»

Шифр студента №650502 – 13

Проверил

Батюков С. В.

Выполнил

Ст. гр. №650502
Левдорович Д. А.

Минск 2017

1. Исходные данные представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Исходные данные

Номер ветви	Начало-конец	Сопротивления			Источник ЭДС		Источник тока	
		R	X_C	X_L	мод.	арг.	мод.	арг.
1	24	61	0	0	0	0	0	0
2	41	0	59	23	0	0	0	0
3	12	82	0	55	15	157	0	0
4	23	64	0	47	0	0	0	0
5	43	31	23	21	0	0	0	0
6	13	33	34	17	0	0	0	0

2. Схема электрической цепи, полученная для рассматриваемого варианта задания, изображена на рис. 2.1.

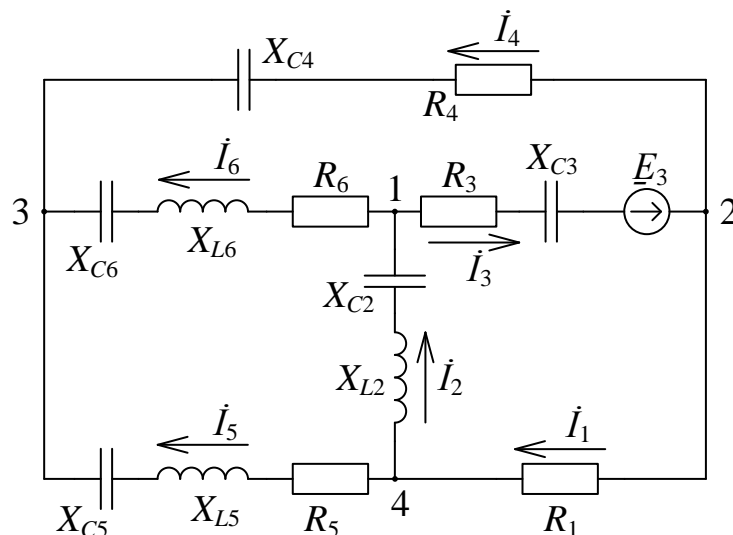


Рисунок 2.1 – Исходная схема

3. Расчет цепи с одним источником ЭДС целесообразно проводить методом преобразования. Обозначим направления токов в ветвях заданной цепи (рис. 3.1). Запишем комплексные сопротивления каждой из ветвей:

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_1 &= R_1 = 61 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_2 = jX_{L2} - jX_{C2} = j59 - j23 = j36 \text{ Ом}; \\
 \underline{Z}_3 &= R_3 - jX_{C3} = 82 - j55 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_4 = R_4 - jX_{C4} = 64 - j47 \text{ Ом}; \\
 \underline{Z}_5 &= R_5 + jX_{L5} - jX_{C5} = 31 + j23 - j21 = 31 + j2 \text{ Ом}; \\
 \underline{Z}_6 &= R_6 + jX_{L6} - jX_{C6} = 33 + j34 - j17 = 33 + j17 \text{ Ом}.
 \end{aligned}$$

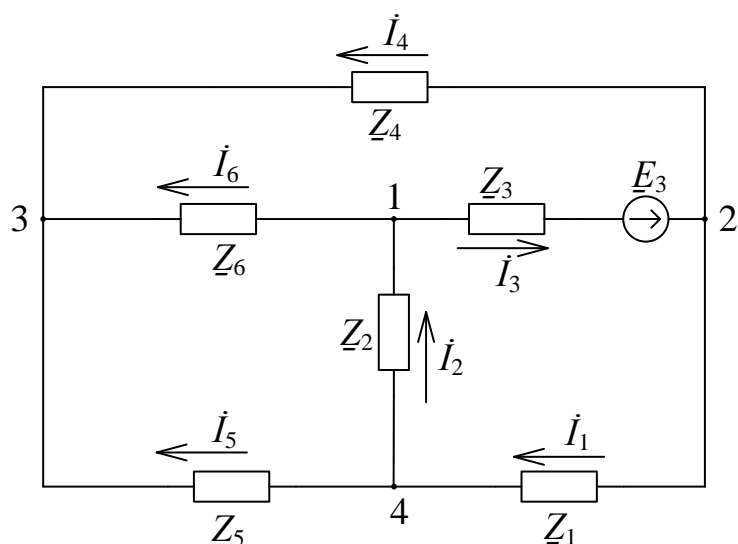


Рисунок 3.1 – Исходная схема

Преобразуем заданную цепь. Треугольник 1 – 3 – 4 преобразуем в звезду (рис. 3.2).

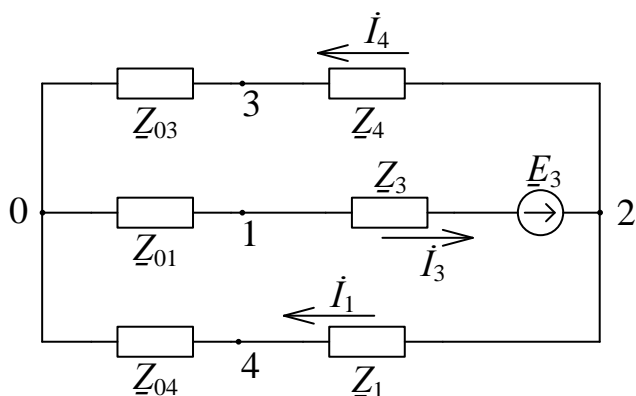


Рисунок 3.2 – Исходная схема после первого преобразования

Определим комплексные сопротивления Z_{03} , Z_{01} , Z_{04} :

$$Z_{03} = \frac{Z_6 \cdot Z_5}{Z_2 + Z_5 + Z_6} = \frac{(33 + j17) \cdot (31 + j2)}{j36 + 33 + j17 + 31 + j2} = 13,469 - j2,309 \text{ Ом};$$

$$Z_{01} = \frac{Z_6 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_5 + Z_6} = \frac{(33 + j17) \cdot j36}{j36 + 33 + j17 + 31 + j2} = 3,675 - j15,404 \text{ Ом};$$

$$Z_{04} = \frac{Z_2 \cdot Z_5}{Z_2 + Z_5 + Z_6} = \frac{j36 \cdot (31 + j2)}{j36 + 33 + j17 + 31 + j2} = 7,972 - j10,586 \text{ Ом}.$$

Преобразуем последовательно соединенные сопротивления Z_{03} и Z_4 , Z_{01} и Z_3 , Z_{04} и Z_1 (см. рис. 3.3).

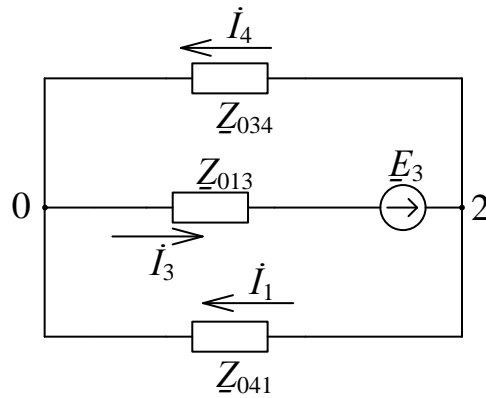


Рисунок 3.3 – Преобразованная исходная схема

$$\underline{Z}_{034} = \underline{Z}_{03} + \underline{Z}_4 = 13,469 - j2,309 + 64 - j47 = 77,469 - j49,309 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{013} = \underline{Z}_{01} + \underline{Z}_3 = 3,675 - j15,404 + 82 - j55 = 85,675 - j39,596 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{041} = \underline{Z}_{04} + \underline{Z}_1 = 7,972 + j10,586 + 61 = 68,972 - j10,586 \text{ Ом}.$$

Для определения напряжения U_{20} по методу узловых напряжений необходимо составить одно уравнение:

$$\dot{U}_{20} \cdot \left(\frac{1}{\underline{Z}_{041}} + \frac{1}{\underline{Z}_{013}} + \frac{1}{\underline{Z}_{034}} \right) = \frac{\underline{E}_3}{\underline{Z}_{013}}.$$

Отсюда

$$\dot{U}_{20} = \frac{\frac{\underline{E}_3}{\underline{Z}_{013}}}{\frac{1}{\underline{Z}_{041}} + \frac{1}{\underline{Z}_{013}} + \frac{1}{\underline{Z}_{034}}} = -4,578 + j0,975 = 4,681e^{j167,972^\circ} \text{ В}.$$

Определим токи в схеме рис. 3.3 на основании второго закона Кирхгофа:

$$\dot{I}_3 = \frac{-\dot{U}_{20} + \underline{E}_3}{\underline{Z}_{013}} = \frac{-4,578 + j0,975 + 10}{85,675 - j39,596} = -0,11 + j5,962 \cdot 10^{-3} \text{ А},$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{20}}{\underline{Z}_{041}} = \frac{-4,578 + j0,975}{68,972 - j10,586} = -0,063 + j0,024 \text{ А},$$

$$\dot{I}_4 = \frac{\dot{U}_{20}}{\underline{Z}_{034}} = \frac{-4,578 + j0,975}{77,469 - j49,309} = -0,048 - j0,018 \text{ А}.$$

По схеме рис. 3.2 определим напряжения между узлами 3, 1, 4:

$$\dot{U}_{31} = \dot{I}_4 \dot{Z}_{03} + \dot{I}_3 \dot{Z}_{01} = -1,182 - j1,81 = 2,162e^{-j123,159^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{14} = -\dot{I}_3 \dot{Z}_2 - \dot{I}_1 \dot{Z}_{04} = 1,25 + j2,154 = 2,491e^{j59,886^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{34} = \dot{I}_4 \dot{Z}_{03} - \dot{I}_1 \dot{Z}_{04} = 0,067 + j0,345 = 0,351e^{j78,956^\circ} \text{ В}.$$

Определим токи $\dot{I}_6, \dot{I}_2, \dot{I}_5$ (см. рис. 3.1):

$$\dot{I}_6 = \frac{-\dot{U}_{31}}{\underline{Z}_6} = \frac{1,182 + j1,81}{33 + j17} = 0,051 + j0,029 = 0,058e^{j29,586^\circ} \text{ А},$$

$$\dot{I}_2 = \frac{-\dot{U}_{14}}{\underline{Z}_2} = \frac{-1,25 - j2,154}{j36} = -0,06 + j0,035 = 0,069e^{j149,886^\circ} \text{ А},$$

$$\dot{I}_5 = \frac{-\dot{U}_{34}}{\underline{Z}_5} = \frac{-0,067 - j0,345}{31 + j2} = -2,878 \cdot 10^{-3} - j0,011 = 0,011e^{-j104,735^\circ} \text{ А}.$$

Значения токов $\dot{I}_3, \dot{I}_1, \dot{I}_4$ в алгебраической и показательной формах имеют вид:

$$\dot{I}_3 = -0,11 + j5,962 \cdot 10^{-3} = 0,111e^{j176,911^\circ} \text{ А},$$

$$\dot{I}_1 = -0,063 + j0,024 = 0,067e^{j159,246^\circ} \text{ А},$$

$$\dot{I}_4 = -0,048 - j0,018 = 0,051e^{-j159,552^\circ} \text{ А}.$$

4. Составление баланса мощностей для схемы рис. 3.1. Мощность источника равна

$$\tilde{S} = \underline{E}_3 \cdot \dot{I}_3^* = 10 \cdot (-0,11 - j5,962 \cdot 10^{-3}) = 1,56 - j0,565 \text{ Вт}.$$

Мощность, потребляемая в цепи, равна сумме активной(P) и реактивной(Q) мощностей:

$$P = |\dot{I}_1|^2 \cdot R_1 + |\dot{I}_3|^2 \cdot R_3 + |\dot{I}_4|^2 \cdot R_4 + |\dot{I}_5|^2 \cdot R_5 + |\dot{I}_6|^2 \cdot R_6 = 1,56 \text{ Вт},$$

$$Q = |\dot{I}_2|^2 \cdot (X_{L2} - X_{C2}) + |\dot{I}_3|^2 \cdot (-X_{C3}) + |\dot{I}_4|^2 \cdot (-X_{C3}) +$$

$$+ |\dot{I}_5|^2 \cdot (X_{L5} - X_{C5}) + |\dot{I}_6|^2 \cdot (X_{L6} - X_{C6}) = -0,565 \text{ ВАр},$$

$$\hat{S} = P + jQ = 1,56 - j0,565 \text{ ВА},$$

$$\tilde{S} = \hat{S}.$$

5. По условию полагаем, что существует индуктивная связь между индуктивностями L_5 и L_6 . Наличие индуктивной связи обозначим на рисунке 5.1 двусторонней стрелкой, возле которой указывается взаимная индуктивность M . Одноименные зажимы индуктивно связанных катушек обозначены на этом же рисунке точками. Так как токи относительно одноименных зажимов направлены одинаково, то имеет место согласное включение индуктивностей.

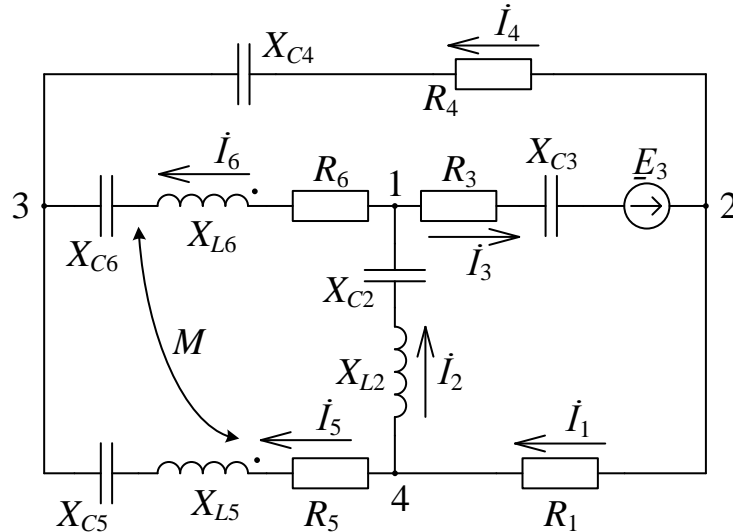


Рисунок 5.1 – Исходная схема при наличии индуктивной связи

Определим число уравнений, необходимое для описания цепи по законам Кирхгофа. Неизвестных токов в цепи – 6. Число узлов в цепи – 4. Следовательно, по первому закону Кирхгофа необходимо записать 3 уравнения и по второму закону Кирхгофа необходимо записать 3 уравнения. Для мгновенных значений токов и напряжений уравнения будут иметь вид:

$$i_2 = i_3 + i_6,$$

$$i_3 = i_1 + i_4,$$

$$i_1 = i_2 + i_5,$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} - \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + R_6 i_6 + M \frac{di_5}{dt} + L_6 \frac{di_6}{dt} - \frac{1}{C_6} \int i_6 dt + \frac{1}{C_5} \int i_5 dt -$$

$$-L_5 \frac{di_5}{dt} - M \frac{di_6}{dt} - R_5 i_5 = 0,$$

$$R_3 i_3 - \frac{1}{C_3} \int i_3 dt + R_1 i_1 + L_2 \frac{di_2}{dt} - \frac{1}{C_2} \int i_2 dt = e_3,$$

$$R_4 i_4 - \frac{1}{C_4} \int i_4 dt + \frac{1}{C_6} \int i_6 dt - L_6 \frac{di_6}{dt} - M \frac{di_5}{dt} - R_6 i_6 + R_3 i_3 - \frac{1}{C_3} \int i_3 dt = e_3.$$

Запишем эти же уравнения в комплексной форме:

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_3 + \dot{I}_6,$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 + \dot{I}_4,$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_5,$$

$$jX_{L2}\dot{I}_2 - jX_{C3}\dot{I}_3 + R_6\dot{I}_6 + jX_M\dot{I}_5 + jX_{L6}\dot{I}_6 - jX_{C6}\dot{I}_6 + jX_{C5}\dot{I}_5 - \\ - jX_{L5}\dot{I}_5 - jX_M\dot{I}_6 - R_5\dot{I}_5 = 0,$$

$$R_3\dot{I}_3 - jX_{C3}\dot{I}_3 + R_1\dot{I}_1 + jX_{L2}\dot{I}_2 - jX_{C2}\dot{I}_2 = \underline{E}_3,$$

$$R_4\dot{I}_4 - jX_{C4}\dot{I}_4 + jX_{C6}\dot{I}_6 - jX_{L6}\dot{I}_6 - jX_M\dot{I}_5 - R_6\dot{I}_6 + R_3\dot{I}_3 - jX_{C3}\dot{I}_3 = \underline{E}_3$$

6. Расчет схемы (рис. 6.1) методом законов Кирхгофа произведен в программной среде Mathcad 14 и представлен в приложении 1.

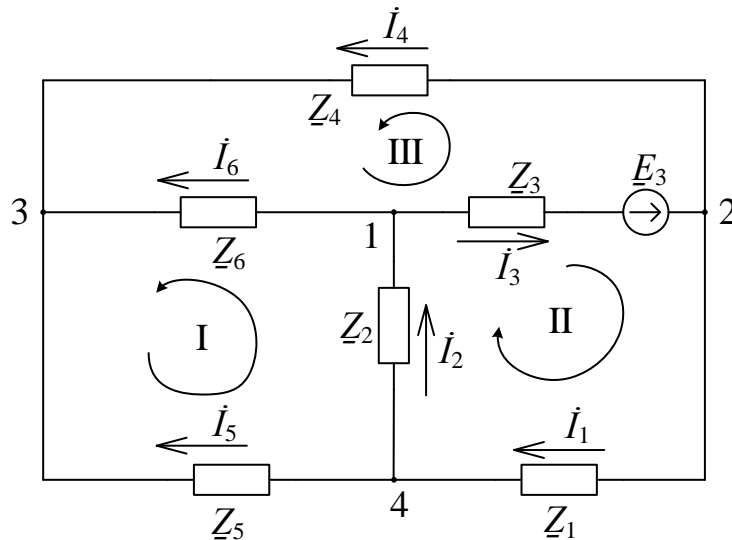


Рисунок 6.1 – Исходная схема к п. 6

7. Расчет схемы (рис. 7.1) методом контурных токов произведен в программной среде Mathcad 14 и представлен в приложении 2.

8. Расчет схемы (рис 8.1) методом узловых потенциалов произведен в программной среде Mathcad 14 и представлен в приложении 3.

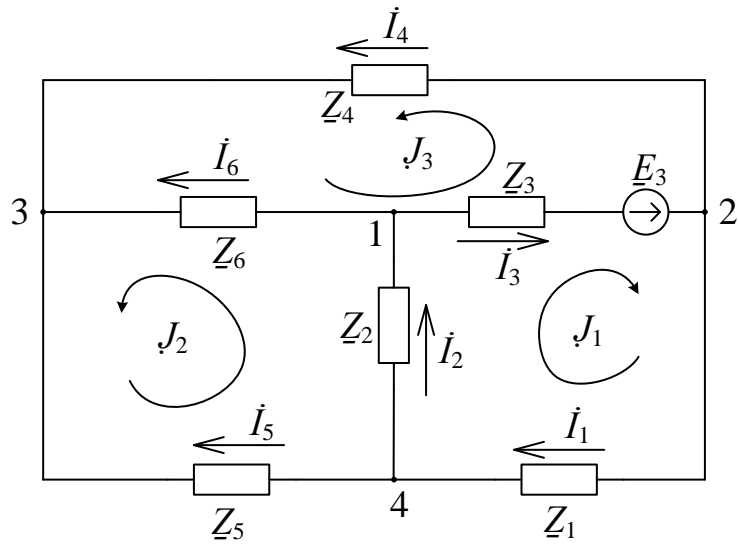


Рисунок 7.1 – Исходная схема к п. 7

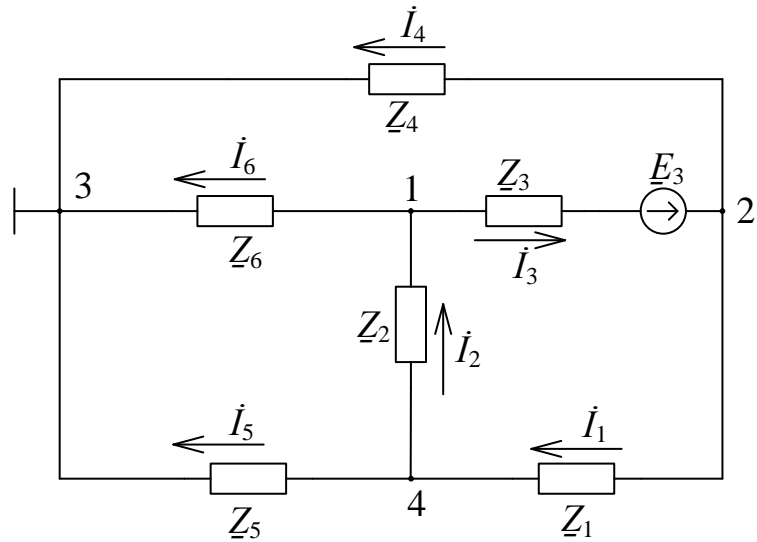


Рисунок 8.1 – Исходная схема к п. 8

9. Расчет тока в ветви 2 исходной цепи (рис. 9.1) методом эквивалентного генератора напряжения. Токи в двухконтурной цепи найдем по методу контурных токов:

$$\begin{cases} \underline{J}_1 \cdot (\underline{Z}_6 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_5) + \underline{J}_2 \cdot (\underline{Z}_6 + \underline{Z}_3) = \underline{E}_3, \\ \underline{J}_2 \cdot (\underline{Z}_6 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}_4) + \underline{J}_1 \cdot (\underline{Z}_6 + \underline{Z}_3) = \underline{E}_3. \end{cases}$$

Решая полученную систему из двух уравнений, имеем

$$\underline{J}_1 = -0,04 + j0,018 \text{ A},$$

$$\underline{J}_2 = -0,05 - j0,011 \text{ A},$$

Значения токов \dot{I}_3, \dot{I}_1 равны

$$\dot{I}_3 = \underline{J}_1 + \underline{J}_2 = -0,04 + j0,018 - 0,05 - j0,011 = -0,09 + j7,136 \cdot 10^{-3} \text{ A},$$

$$\dot{I}_1 = \underline{J}_1 = -0,04 + j0,018 \text{ A}.$$

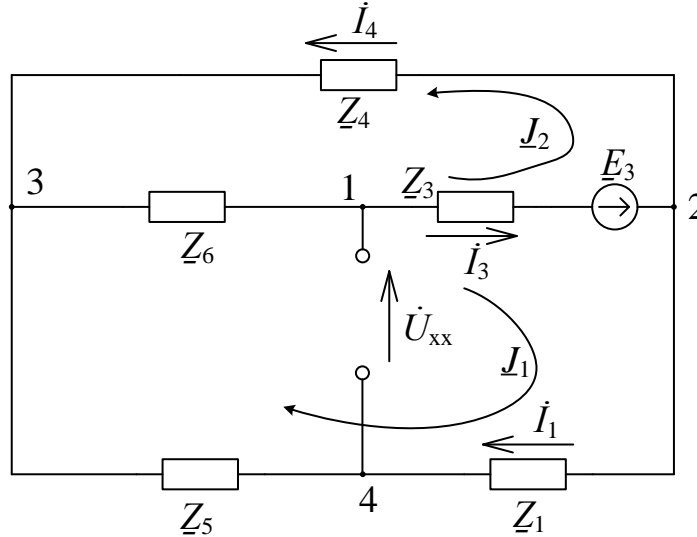


Рисунок 9.1 – Исходная схема к п. 9

Определим значение напряжения генератора холостого хода

$$\dot{U}_{xx} = \dot{I}_3 \cdot \underline{Z}_3 - \underline{E}_3 + \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 = (-0,09 + j7,136 \cdot 10^{-3}) \cdot (82 - j55) - 15e^{j157^\circ} + (-0,04 + j0,018) \cdot 61 = 4,372 + j0,802 = 4,445e^{j10,397^\circ} \text{ В}.$$

Для определения сопротивления генератора преобразуем «треугольник» сопротивлений 1 – 2 – 3 в «звезду» (рис. 9.2) по формулам

$$\underline{Z}_{01} = \frac{\underline{Z}_6 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 + \underline{Z}_6} = 17,509 + j5,963,$$

$$\underline{Z}_{02} = \frac{\underline{Z}_3 \cdot \underline{Z}_4}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 + \underline{Z}_6} = 28,102 - j27,851,$$

$$\underline{Z}_{03} = \frac{\underline{Z}_6 \cdot \underline{Z}_4}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 + \underline{Z}_6} = 14,273 + j4,191.$$

Определим полное сопротивление генератора

$$\underline{Z} = \underline{Z}_{01} + \frac{(\underline{Z}_{02} + \underline{Z}_1) \cdot (\underline{Z}_{03} + \underline{Z}_5)}{\underline{Z}_{02} + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{03} + \underline{Z}_5} = 48,849 + j5,736 = 49,184e^{j6,697^\circ} \text{ Ом}.$$

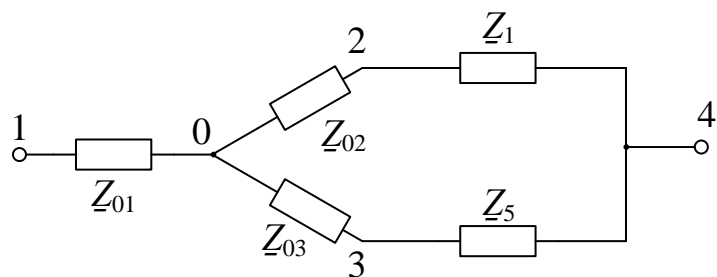


Рисунок 9.2 – Схема после преобразования сопротивлений

Ток в ветви 2 равен

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{XX}}{\underline{Z} + \underline{Z}_2} = \frac{4,372 + j0,802}{48,849 + j4,736 + j36} = 0,06 - j0,035 = 0,069e^{-j30,114^\circ} \text{ А.}$$

10. Расчет данных для построения векторной диаграммы (рис. 10.1) выполнен в программной среде Mathcad 14 и представлен в приложении 4.

Таблица 10.1 – Полученные результаты

	Алгебраическая форма		Показательная форма	
	Re	Im	модуль	φ , град
ток \dot{I}_1	-0,063	0,024	0,067	159,246
ток \dot{I}_2	-0,06	0,035	0,069	149,886
ток \dot{I}_3	-0,11	0,006	0,111	176,911
ток \dot{I}_4	-0,048	-0,018	0,051	-159,552
ток \dot{I}_5	-0,003	-0,011	0,011	-104,735
ток \dot{I}_6	0,051	0,029	0,058	29,586
Мощность $S_{\text{ист}}$	1,56	-0,565	1,66	-19,911
Мощность $S_{\text{потр}}$	1,56	-0,565	1,66	-19,911
U_{XX}	4,372	0,802	4,445	10,397
$\underline{Z}_{\text{ГЕН}}$	48,849	5,736	49,184	6,697

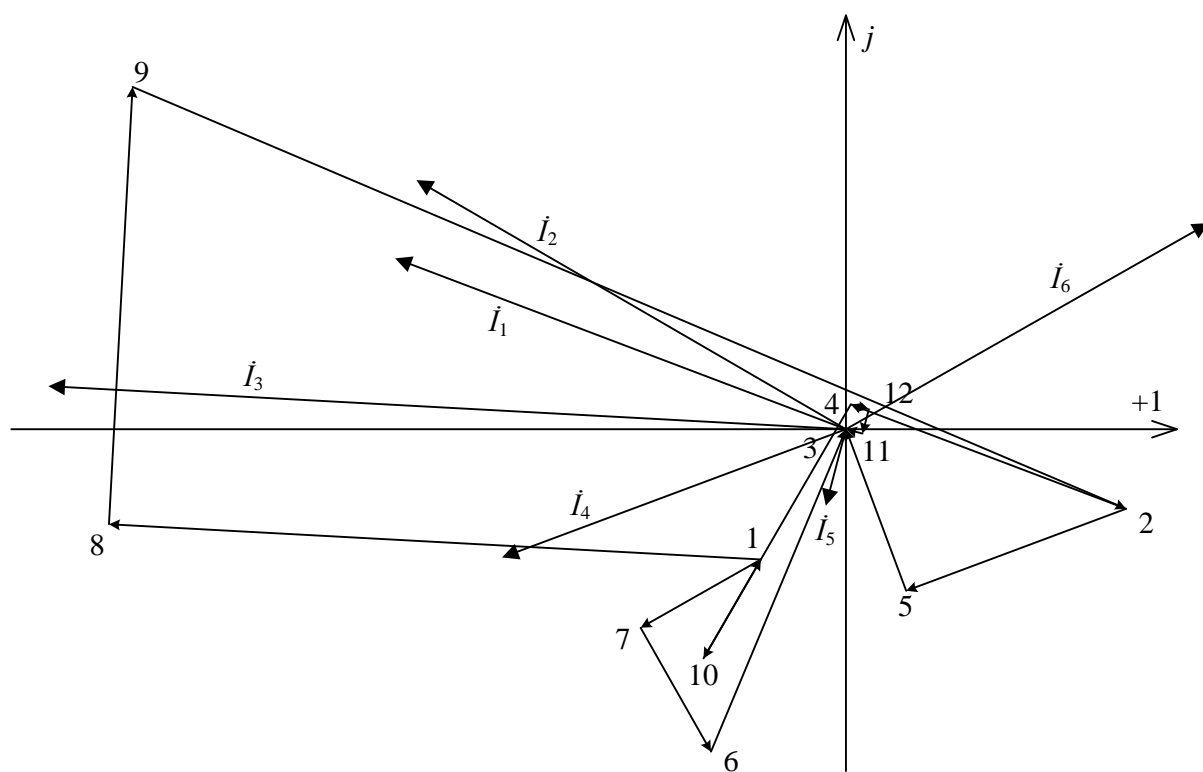


Рисунок 10.1 – Векторная диаграмма напряжений и токов

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
(обязательное)

Расчет исходной схемы методом законов Кирхгофа

Записываем уравнения, описывающие цепь в матричном виде

$Z \cdot I = B$, где: Z - квадратная матрица 6х6,

B - матрица-столбец правых частей,

I - матрица-столбец искомых токов.

$$Z := \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & Z2 & 0 & 0 & -Z5 & Z6 \\ Z1 & Z2 & Z3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z3 & Z4 & 0 & -Z6 \end{pmatrix} \quad B := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ E3 \\ E3 \end{pmatrix}$$

Вводим численные значения элементов матриц

$$Z = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 36i & 0 & 0 & -31 - 2i & 33 + 17i \\ 61 & 36i & 82 - 55i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 82 - 55i & 64 - 47i & 0 & -33 - 17i \end{pmatrix}$$

Находим неизвестные токи, умножая обратную матрицу Z на матрицу B .

$$I := Z^{-1} \cdot B$$

Выводим численные значения найденных токов в виде вектора-столбца

$$I = \begin{pmatrix} -0.063 + 0.024i \\ -0.06 + 0.035i \\ -0.11 + 5.962i \times 10^{-3} \\ -0.048 - 0.018i \\ -2.878 \times 10^{-3} - 0.011i \\ 0.051 + 0.029i \end{pmatrix}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

(обязательное)

Расчет исходной схемы методом контурных токов

Записываем уравнения, описывающие цепь в матричном виде
 $Z * J = B$, где: Z - квадратная матрица 6х6,
 B - матрица-столбец правых частей,
 J - матрица-столбец искомых контурных токов.

$$Z := \begin{pmatrix} Z1 + Z2 + Z3 & Z2 & Z3 \\ Z2 & Z2 + Z6 + Z5 & -Z6 \\ Z3 & -Z6 & Z3 + Z4 + Z6 \end{pmatrix} \quad B := \begin{pmatrix} E3 \\ 0 \\ E3 \end{pmatrix}$$

Находим неизвестные токи, умножая обратную матрицу Z на матрицу B .

$$\underline{J} := Z^{-1} \cdot B$$

Выводим численные значения найденных токов в виде вектора-столбца

$$J = \begin{pmatrix} -0.063 + 0.024i \\ 2.878 \times 10^{-3} + 0.011i \\ -0.048 - 0.018i \end{pmatrix}$$

$$\underline{J1} := J_0$$

$$J2 := J_1$$

$$J3 := J_2$$

$$\underline{I1} := J1 = -0.063 + 0.024i$$

$$\underline{I2} := J1 + J2 = -0.06 + 0.035i$$

$$\underline{I3} := J1 + J3 = -0.11 + 5.962i \times 10^{-3}$$

$$\underline{I4} := J3 = -0.048 - 0.018i$$

$$\underline{I5} := -J2 = -2.878 \times 10^{-3} - 0.011i$$

$$\underline{I6} := J2 - J3 = 0.051 + 0.029i$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3
(обязательное)

Расчет исходной схемы методом узловых потенциалов

$$\begin{aligned}
Y_{11} &:= \frac{1}{Z_6} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_2} & Y_{14} &:= \frac{-1}{Z_2} & I_{11} &:= \frac{E_3}{Z_3} \\
Y_{22} &:= \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4} & Y_{12} &:= \frac{-1}{Z_3} & I_{22} &:= \frac{-E_3}{Z_3} \\
Y_{44} &:= \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_5} & Y_{24} &:= \frac{-1}{Z_1} & I_{44} &:= 0
\end{aligned}$$

Записываем уравнения, описывающие цепь в матричном виде

$Y * \phi = I$, где: Y - квадратная матрица 3x3,

I - матрица-столбец правых частей,

ϕ - матрица-столбец искомых потенциалов.

$$Y := \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{14} \\ Y_{12} & Y_{22} & Y_{24} \\ Y_{14} & Y_{24} & Y_{44} \end{pmatrix} \quad \underline{I} := \begin{pmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{44} \end{pmatrix}$$

$$\underline{\phi} := Y^{-1} \cdot I$$

$$\Phi = \begin{pmatrix} -1.182 - 1.81i \\ 3.894 - 1.105i \\ 0.067 + 0.345i \end{pmatrix}$$

$$\Phi_1 := \Phi_0$$

$$\Phi_2 := \Phi_1$$

$$\Phi_3 := 0$$

$$\Phi_4 := \Phi_2$$

$$I_{1N} := \frac{-\Phi_2 + \Phi_4}{Z_1} = -0.063 + 0.024i$$

$$I_{2N} := \frac{-\Phi_4 + \Phi_1}{Z_2} = -0.06 + 0.035i$$

$$\underline{I_{3N}} := \frac{-\Phi_1 + \Phi_2 - E_3}{Z_3} = 0.188 + 0.063i$$

$$I_{4N} := \frac{\Phi_3 - \Phi_2}{Z_4} = -0.048 - 0.018i$$

$$I_{5N} := \frac{\Phi_3 - \Phi_4}{Z_5} = -2.878 \times 10^{-3} - 0.011i$$

$$I_{6N} := \frac{\Phi_3 - \Phi_1}{Z_6} = 0.051 + 0.029i$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

(обязательное)

Расчет потенциалов в промежуточных точках схемы для построения
векторной диаграммы

$$\begin{array}{lll}
F1 = -1.182 - 1.81i & |F1| = 2.162 & \frac{\arg(F1)}{\deg} = -123.159 \\
F2 = 3.894 - 1.105i & & \\
F3 = 0 & |F2| = 4.047 & \frac{\arg(F2)}{\deg} = -15.844 \\
F4 = 0.067 + 0.345i & |F4| = 0.351 & \frac{\arg(F4)}{\deg} = 78.956
\end{array}$$

$$F5 := F3 + I4 \cdot j \cdot XC4 = 0.837 - 2.245i$$

$$F6 := F3 + I6 \cdot j \cdot XC6 = -0.489 + 0.861i$$

$$F7 := F6 - I6 \cdot R6 = -2.16 - 0.088i$$

$$F8 := F1 + I3 \cdot R3 = -10.242 - 1.321i$$

$$F9 := F2 + E3 = -9.914 + 4.756i$$

$$F10 := F4 + I2 \cdot j \cdot XL2 = -1.981 - 3.186i$$

$$\underline{F11} := F3 + I5 \cdot j \cdot XC5 = 0.23 - 0.06i$$

$$F12 := F11 - I5 \cdot R5 = 0.319 + 0.279i$$

$$|F5| = 2.396 \quad \frac{\arg(F5)}{\deg} = -69.552$$

$$|F6| = 0.99 \quad \frac{\arg(F6)}{\deg} = 119.586$$

$$|F7| = 2.162 \quad \frac{\arg(F7)}{\deg} = -177.67$$

$$|F8| = 10.327 \quad \frac{\arg(F8)}{\deg} = -172.653$$

$$|F9| = 10.996 \quad \frac{\arg(F9)}{\deg} = 154.372$$

$$|F10| = 3.751 \quad \frac{\arg(F10)}{\deg} = -121.868$$

$$|F11| = 0.238 \quad \frac{\arg(F11)}{\deg} = -14.735$$

$$|F12| = 0.424 \quad \frac{\arg(F12)}{\deg} = 41.15$$