

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники»

Кафедра теоретических основ электротехники

Типовой расчет №2 по курсу: «Теория электрических цепей»
Шифр студента №950502-12

Проверил: Батюков С. В.
Выполнил: ст. гр. 950502
Деркач А. В.

Минск 2020

1. Чертеж исходной схемы

Исходные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные

Номер ветви	Начало-конец	Сопротивления			Источник ЭДС		Источник тока	
		R	X_L	X_C	мод.	арг.	мод.	арг.
1	34	0	55	0	0	0	0	0
2	41	0	28	97	0	0	0	0
3	12	85	0	0	0	0	0	0
4	25	0	47	31	65	21	0	0
5	56	75	0	83	0	0	0	0
6	63	0	26	0	0	0	0	0
7	45	73	0	29	0	0	0	0
8	13	12	0	0	0	0	0	0

Начертим схему согласно заданному варианту (рис. 1):

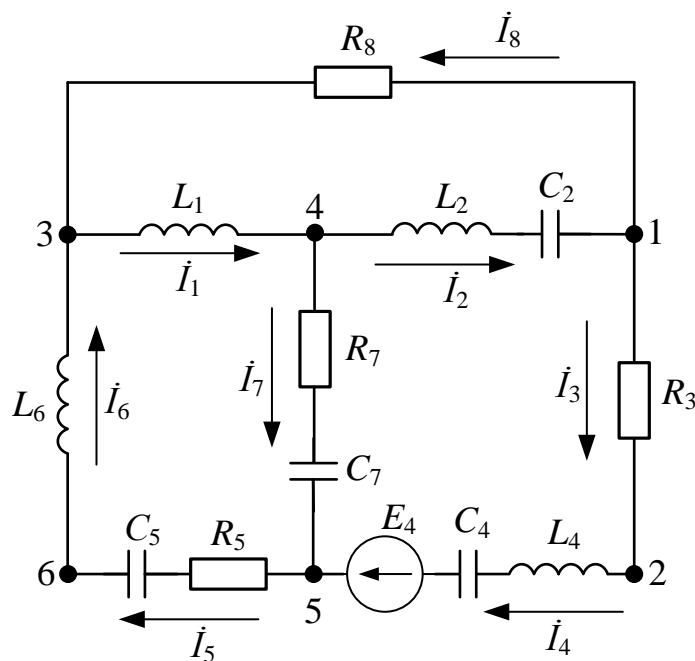


Рисунок 1 – Исходная схема

2. Нахождение комплексных сопротивлений

Найдем комплексные сопротивления каждой ветви схемы (рис. 1)

$$Z_1 = jX_{L_1} = j55 \text{ Ом}$$

$$Z_2 = jX_{L_2} - jX_{C_2} = -j69 \text{ Ом}$$

$$Z_3 = R_3 = 85 \text{ Ом}$$

$$Z_4 = jX_{L4} - jX_{C4} = j16 \text{ Ом}$$

$$Z_5 = R_5 - jX_{C5} = 75 - j83 \text{ Ом}$$

$$Z_6 = jX_{L6} = j26 \text{ Ом}$$

$$Z_7 = R_7 - jX_{C7} = 73 - j29 \text{ Ом}$$

$$Z_8 = R_8 = 12 \text{ Ом}$$

Объединим последовательно включенные комплексные сопротивления Z_3 и Z_4 , Z_5 и Z_6 в эквивалентные комплексные сопротивления и получим схему (рис. 2):

$$Z_{34} = Z_3 + Z_4 = 85 + j16 \text{ Ом}$$

$$Z_{56} = Z_5 + Z_6 = 75 - j57 \text{ Ом}$$

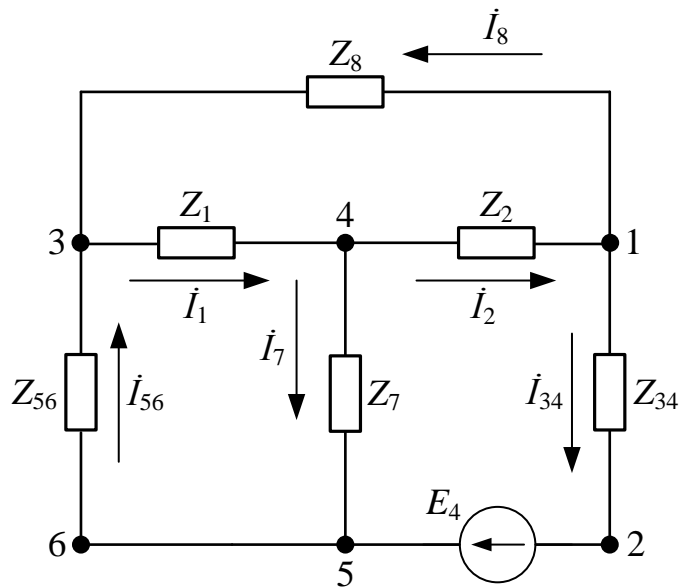


Рисунок 2

Преобразуем треугольник Z_1 - Z_{56} - Z_7 в эквивалентную звезду (рис. 3):

$$Z_{156} = \frac{Z_1 \cdot Z_{56}}{Z_1 + Z_{56} + Z_7} = 14,7 + j30,951 \text{ Ом}$$

$$Z_{17} = \frac{Z_1 \cdot Z_7}{Z_1 + Z_{56} + Z_7} = 4,881 + j28,151 \text{ Ом}$$

$$Z_{567} = \frac{Z_{56} \cdot Z_7}{Z_1 + Z_{56} + Z_7} = 33,329 - j35,83 \text{ Ом}$$

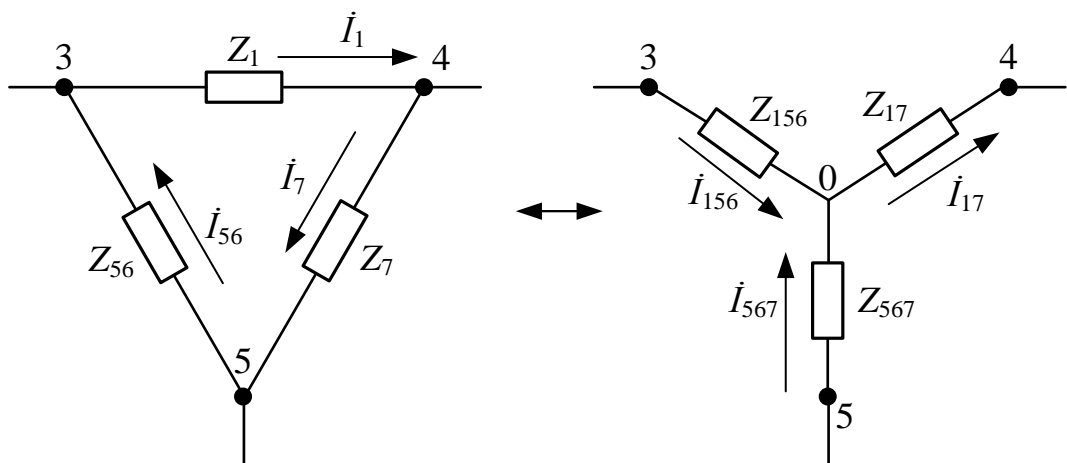


Рисунок 3

После всех преобразований получаем схему (рис. 4):

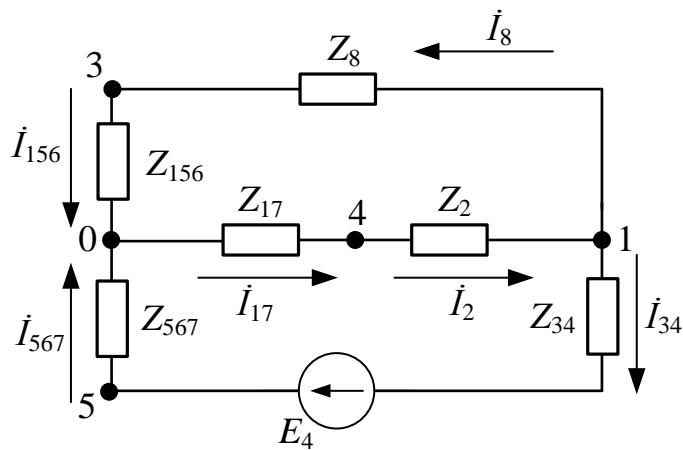


Рисунок 4

Объединим последовательно включенные комплексные сопротивления Z_8 и Z_{156} , Z_{17} и Z_2 , Z_{34} и Z_{567} в эквивалентные комплексные сопротивления (рис. 5):

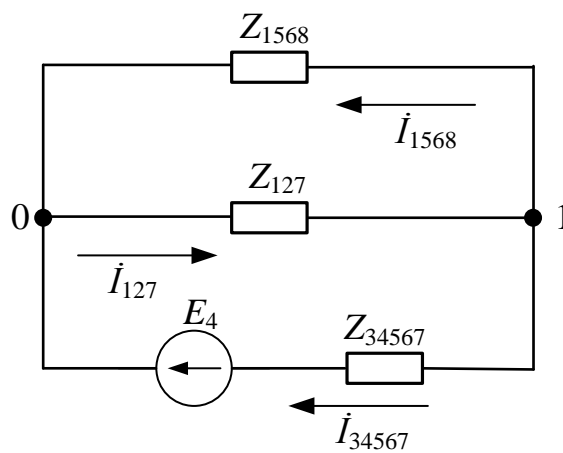


Рисунок 5

$$Z_{1568} = Z_{156} + Z_8 = 26,7 + j30,951 \text{ Ом}$$

$$Z_{127} = Z_{17} + Z_2 = 4,881 - j40,849 \text{ Ом}$$

$$Z_{34567} = Z_{567} + Z_{34} = 118,329 - j19,83 \text{ Ом}$$

Найдём общее сопротивление цепи, изображенной на рисунке 5:

$$Z_{\text{общ}} = \frac{Z_{127} \cdot Z_{1568}}{Z_{127} + Z_{1568}} + Z_{34567} = 167,032 - j34,317 \text{ Ом}$$

Найдем общий ток цепи:

$$\dot{I}_{\text{общ}} = \frac{\dot{E}_4}{Z_{\text{общ}}} = 0,321 + j0,205 \text{ А}$$

Теперь найдем токи в схеме, постепенно разворачивая цепь:

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_{\text{общ}} = 0,321 + j0,205 \text{ А}$$

$$\dot{I}_4 = \dot{I}_3 = 0,321 + j0,205 \text{ А}$$

Для нахождения токов \dot{I}_{127} и \dot{I}_{1568} воспользуемся правилом плеч:

$$\dot{I}_{127} = \dot{I}_{\text{общ}} \cdot \frac{Z_{1568}}{Z_{127} + Z_{1568}} = -0,076 + j0,465 \text{ А}$$

$$\dot{I}_{1568} = -\dot{I}_{\text{общ}} \cdot \frac{Z_{127}}{Z_{127} + Z_{1568}} = -0,397 + j0,259 \text{ А}$$

Поэтому:

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{127} = -0,076 + j0,465 \text{ А}$$

$$\dot{I}_8 = \dot{I}_{1568} = -0,397 + j0,259 \text{ А}$$

Для нахождения оставшихся токов найдем напряжение между узлами 3 и 4:

$$\dot{U}_{34} = -\dot{I}_8 \cdot Z_8 - \dot{I}_2 \cdot Z_2 = -27,305 - j8,322 \text{ В}$$

Находим сами токи:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{34}}{Z_1} = -0,151 + j0,496 \text{ A}$$

$$\dot{I}_7 = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 = -0,076 + j0,032 \text{ A}$$

$$\dot{I}_5 = \dot{I}_4 + \dot{I}_7 = 0,245 + j0,237 \text{ A}$$

$$\dot{I}_6 = \dot{I}_5 = 0,245 + j0,237 \text{ A}$$

По найденным действующим значениям токов записываем их мгновенные значения:

$$i_1 = \sqrt{2} \cdot 0,519 \sin(\omega t + 106,951^\circ) \text{ A}$$

$$i_2 = \sqrt{2} \cdot 0,471 \sin(\omega t + 99,231^\circ) \text{ A}$$

$$i_3 = \sqrt{2} \cdot 0,381 \sin(\omega t + 32,61^\circ) \text{ A}$$

$$i_4 = \sqrt{2} \cdot 0,381 \sin(\omega t + 32,61^\circ) \text{ A}$$

$$i_5 = \sqrt{2} \cdot 0,341 \sin(\omega t + 44,036^\circ) \text{ A}$$

$$i_6 = \sqrt{2} \cdot 0,341 \sin(\omega t + 44,036^\circ) \text{ A}$$

$$i_7 = \sqrt{2} \cdot 0,082 \sin(\omega t + 157,269^\circ) \text{ A}$$

$$i_8 = \sqrt{2} \cdot 0,474 \sin(\omega t + 146,827^\circ) \text{ A}$$

3. Баланс мощностей

Составим баланс мощностей:

Определяем полную комплексную мощность, отдаваемую источником ЭДС:

$$S = \dot{E}_4 \cdot \bar{I}_4 = 24,27 - j4,986 \text{ ВА.}$$

Найдём активную мощность приёмников энергии:

$$P_{\text{потр.}} = |\dot{I}_3|^2 \cdot R_3 + |\dot{I}_5|^2 \cdot R_5 + |\dot{I}_7|^2 \cdot R_7 + |\dot{I}_8|^2 \cdot R_8 = 24,27 \text{ Вт}$$

Найдём реактивную мощность приёмников энергии:

$$P_{\text{потр.}} = |\dot{I}_1|^2 \cdot X_{L_1} + |\dot{I}_2|^2 \cdot (X_{L_2} - X_{C_2}) + |\dot{I}_4|^2 \cdot (X_{L_4} - X_{C_4}) - |\dot{I}_5|^2 \cdot X_{C_5} + |\dot{I}_6|^2 \cdot X_{L_6} - |\dot{I}_7|^2 \cdot X_{C_7} = -4,986 \text{ ВАр}$$

Поскольку активные и реактивные мощности источника ЭДС равны активной и реактивной мощности приемников энергии, то баланс мощностей выполняется.

4. Векторная диаграмма

Для построения топографической векторной диаграммы добавим в схему дополнительные точки (рис. 6):

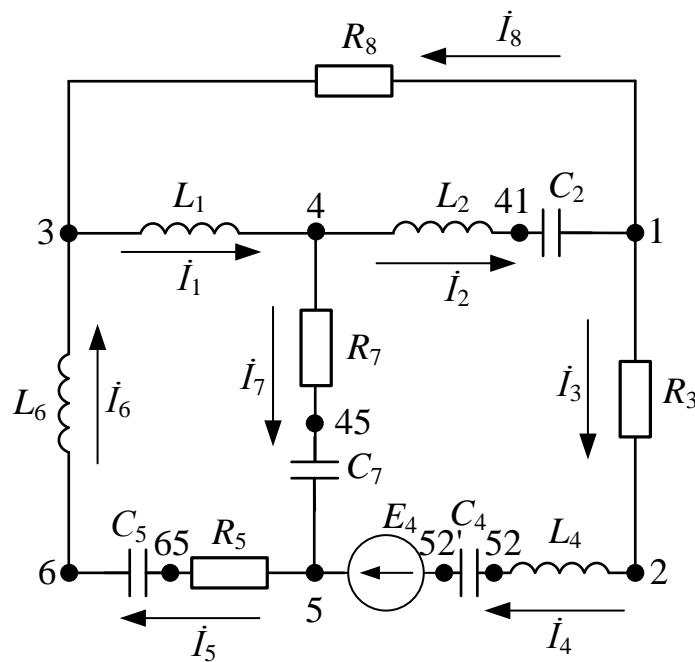


Рисунок 6

Рассчитаем потенциалы точек каждого замкнутого контура, приняв потенциал точки 4 равным 0.

Контур 1:

$$\dot{\phi}_4 = 0 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_{45} = \dot{\phi}_4 + \dot{I}_7 \cdot R_7 = -5,533 + j2,318 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_5 = \dot{\phi}_{45} - jX_{C_7} \cdot \dot{I}_7 = -4,612 + j4,516 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_{65} = \dot{\phi}_5 + \dot{I}_5 \cdot R_5 = 13,786 + j22,305 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_6 = \dot{\phi}_{65} - jX_{C_5} \cdot \dot{I}_5 = 33,472 + j1,944 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_3 = \dot{\phi}_6 + jX_{L_6} \cdot \dot{I}_6 = 27,305 + j8,322 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_4 = \dot{\phi}_3 + jX_{L_1} \cdot \dot{I}_1 = 0 \text{ В}$$

Контур 2:

$$\dot{\phi}_4 = 0 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_{41} = \dot{\phi}_4 + jX_{L_2} \cdot \dot{I}_2 = -13,012 - j2,115 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_1 = \dot{\phi}_{41} - jX_{C_2} \cdot \dot{I}_2 = 32,064 + j5,211 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_2 = \dot{\phi}_1 + \dot{I}_3 \cdot R_3 = 59,358 + j22,672 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_{52} = \dot{\phi}_2 + jX_{L_4} \cdot \dot{I}_4 = 49,702 + j37,764 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_{52'} = \dot{\phi}_{52} - jX_{C_4} \cdot \dot{I}_4 = -56,071 + j27,81 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_5 = \dot{\phi}_{52'} - \dot{E}_4 = -4,612 + j4,516 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_{45} = \dot{\phi}_5 + jX_{C_7} \cdot \dot{I}_7 = -5,533 + j2,318 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_4 = \dot{\phi}_{45} - \dot{I}_7 \cdot R_7 = 0 \text{ В}$$

Контур 3:

$$\dot{\phi}_4 = 0 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_{41} = \dot{\phi}_4 + jX_{L_2} \cdot \dot{I}_2 = -13,012 - j2,115 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_1 = \dot{\phi}_{41} - jX_{C_2} \cdot \dot{I}_2 = 32,064 + j5,211 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_3 = \dot{\phi}_1 + \dot{I}_8 \cdot R_8 = 27,305 + j8,322 \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_4 = \dot{\phi}_3 + jX_{L_1} \cdot \dot{I}_1 = 0 \text{ В}$$

Векторная диаграмма токов и совмещенная с ней топографическая векторная диаграмма напряжений представлена в приложении А.

5. Уравнения по законам Кирхгофа при наличии индуктивной связи между любыми двумя индуктивностями

По условию полагаем, что существует индуктивная связь между индуктивностями L_1 и L_2 . Наличие индуктивной связи обозначим на рисунке 7 двусторонней стрелкой, возле которой обозначаем взаимную индуктивность M . Одноименные зажимы индуктивно связанных катушек обозначим точками. Так как токи относительно одноименных зажимов направлены одинаково, то имеет место согласное включение индуктивностей.

Число уравнений для законов Кирхгофа определяем по формулам:

$$N_{\text{ур. уз}} = N_{\text{уз}} - 1 = 6 - 1 = 5$$

$$N_{\text{ур. к}} = N_{\text{в}} - N_{\text{уз}} + 1 - N_{\text{л}} = 8 - 6 + 1 - 0 = 3$$

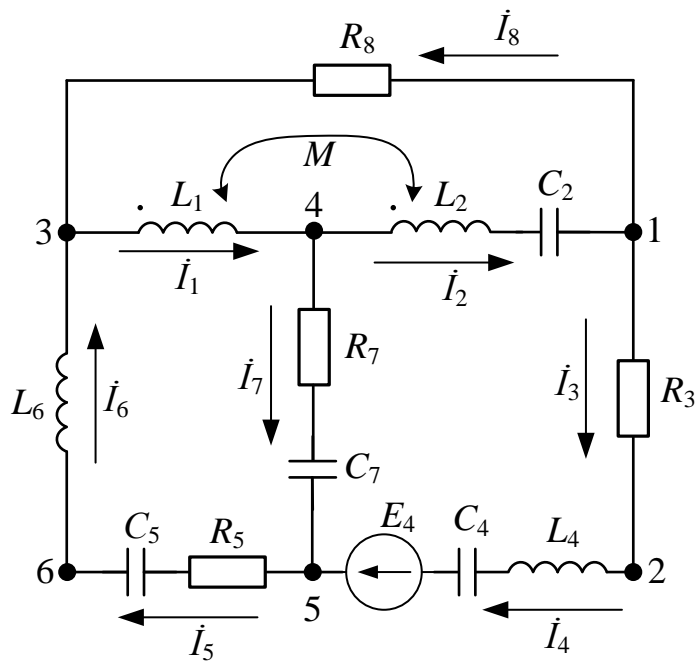


Рисунок 7

Составим систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_2 = \dot{I}_3 + \dot{I}_8 - 1 \text{ узел} \\ \dot{I}_3 = \dot{I}_4 - 2 \text{ узел} \\ \dot{I}_6 + \dot{I}_8 = \dot{I}_1 - 3 \text{ узел} \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_7 - 4 \text{ узел} \\ \dot{I}_7 + \dot{I}_4 = \dot{I}_5 - 5 \text{ узел} \\ \dot{I}_6 \cdot Z_6 + \dot{I}_1 \cdot Z_1 + \dot{I}_2 \cdot jX_M + \dot{I}_7 \cdot Z_7 + \dot{I}_5 \cdot Z_5 = 0 - \text{I контур} \\ \dot{I}_2 \cdot Z_2 + \dot{I}_1 \cdot jX_M + \dot{I}_3 \cdot Z_3 + \dot{I}_4 \cdot Z_4 - \dot{I}_7 \cdot Z_7 = \dot{E}_4 - \text{II контур} \\ -\dot{I}_8 \cdot Z_8 - \dot{I}_1 \cdot Z_1 - \dot{I}_2 \cdot jX_M - \dot{I}_2 \cdot Z_2 - \dot{I}_1 \cdot jX_M = 0 - \text{III контур} \end{array} \right.$$

6. Метод законов Кирхгофа

Число уравнений для законов Кирхгофа определяем по формулам:

$$N_{\text{ур. уз}} = N_{\text{уз}} - 1 = 6 - 1 = 5$$

$$N_{\text{ур. к}} = N_{\text{в}} - N_{\text{уз}} + 1 - N_{\text{J}} = 8 - 6 + 1 - 0 = 3$$

Выбор контуров указан на рисунке 8:

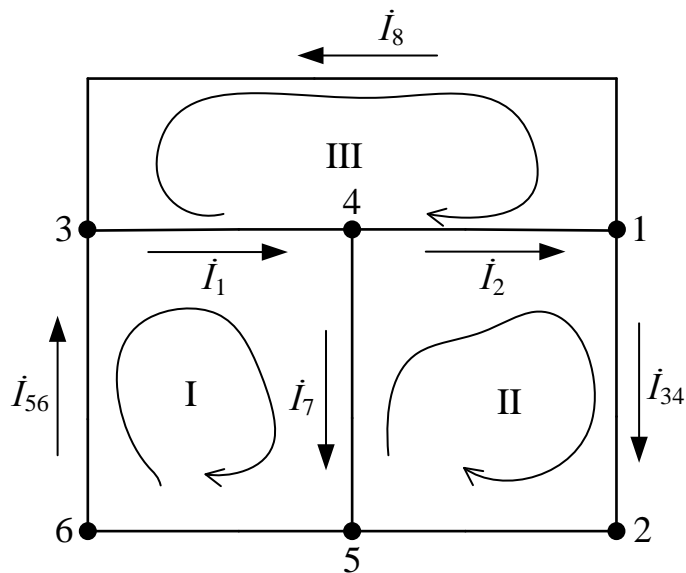


Рисунок 8

Составляем систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{I}_2 = \dot{I}_3 + \dot{I}_8 - 1 \text{ узел} \\ \dot{I}_3 = \dot{I}_4 - 2 \text{ узел} \\ \dot{I}_6 + \dot{I}_8 = \dot{I}_1 - 3 \text{ узел} \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_7 - 4 \text{ узел} \\ \dot{I}_7 + \dot{I}_4 = \dot{I}_5 - 5 \text{ узел} \\ \dot{I}_6 \cdot Z_6 + \dot{I}_1 \cdot Z_1 + \dot{I}_7 \cdot Z_7 + \dot{I}_5 \cdot Z_5 = 0 - \text{I контур} \\ \dot{I}_2 \cdot Z_2 + \dot{I}_3 \cdot Z_3 + \dot{I}_4 \cdot Z_4 - \dot{I}_7 \cdot Z_7 = \dot{E}_4 - \text{II контур} \\ -\dot{I}_8 \cdot Z_8 - \dot{I}_1 \cdot Z_1 - \dot{I}_2 \cdot Z_2 = 0 - \text{III контур} \end{cases}$$

Решение системы уравнений приведено в приложении Б:

$$\dot{I}_1 = -0,151 + j0,496 \text{ A}$$

$$\dot{I}_2 = -0,076 + j0,465 \text{ A}$$

$$\dot{I}_3 = 0,321 + j0,205 \text{ A}$$

$$\dot{I}_4 = 0,321 + j0,205 \text{ A}$$

$$\dot{I}_5 = 0,245 + j0,237 \text{ A}$$

$$\dot{I}_6 = 0,245 + j0,237 \text{ A}$$

$$\dot{I}_7 = -0,076 + j0,032 \text{ A}$$

$$\dot{I}_8 = -0,397 + j0,259 \text{ A}$$

7. Метод контурных токов

Число уравнений находим по данной формуле:

$$N_{\text{ур.к}} = N_{\text{в}} - N_{\text{уз}} + 1 - N_{\text{I}} = 6 - 4 + 1 - 0 = 3.$$

Выбор контуров указан на рисунке 9.

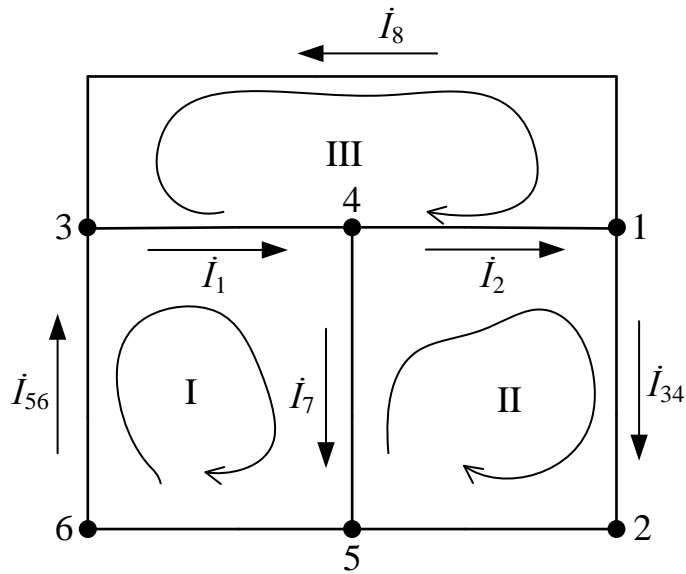


Рисунок 9

Составляем систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{I}_{11} \cdot (Z_1 + Z_7 + Z_{56}) - \dot{I}_{22} \cdot Z_7 - \dot{I}_{33} \cdot Z_1 = 0 \\ \dot{I}_{22} \cdot (Z_2 + Z_{34} + Z_7) - \dot{I}_{11} \cdot Z_7 - \dot{I}_{33} \cdot Z_2 = \dot{E}_4 \\ \dot{I}_{33} \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_8) - \dot{I}_{11} \cdot Z_1 - \dot{I}_{22} \cdot Z_2 = 0 \end{cases}$$

Решение системы уравнений приведено в приложении В:

$$\dot{I}_{11} = 0,245 + j0,237 \text{ A}$$

$$\dot{I}_{22} = 0,321 + j0,205 \text{ A}$$

$$\dot{I}_{33} = 0,397 - j0,259 \text{ A}$$

Токи в цепи находим следующим образом:

$$\begin{aligned}
\dot{I}_1 &= \dot{I}_{11} - \dot{I}_{33} = -0,151 + j0,496 \text{ A} \\
\dot{I}_2 &= \dot{I}_{22} - \dot{I}_{33} = -0,076 + j0,465 \text{ A} \\
\dot{I}_3 &= \dot{I}_{22} = 0,321 + j0,205 \text{ A} \\
\dot{I}_4 &= \dot{I}_{22} = 0,321 + j0,205 \text{ A} \\
\dot{I}_5 &= \dot{I}_{11} = 0,245 + j0,237 \text{ A} \\
\dot{I}_6 &= \dot{I}_{11} = 0,245 + j0,237 \text{ A} \\
\dot{I}_7 &= \dot{I}_{11} - \dot{I}_{22} = -0,076 + j0,032 \text{ A} \\
\dot{I}_8 &= -\dot{I}_{33} = -0,397 + j0,259 \text{ A}
\end{aligned}$$

8. Метод узловых напряжений

Число уравнений, составляемых по методу узловых напряжений, равно:

$$N_{yp} = N_y - 1 - N_{ЭДС} = 4 - 1 - 0 = 3$$

Базисный узел $\varphi_4 = 0$ В, искомые узловые напряжения – \dot{U}_{14} , \dot{U}_{34} , \dot{U}_{54} .

Схема для решения методом узловых напряжений представлена на рисунке 10:

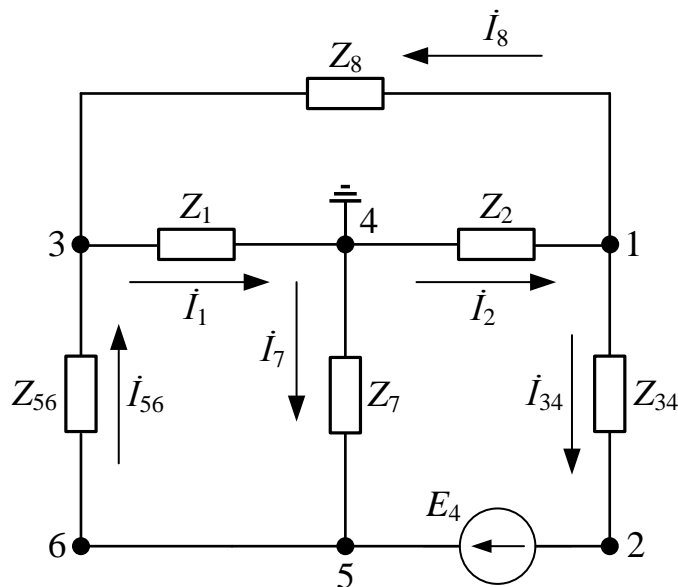


Рисунок 10

Составим систему уравнений для неизвестных узловых напряжений:

$$\begin{cases} \dot{U}_{14} \cdot \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_{34}} + \frac{1}{Z_8} \right) - \dot{U}_{34} \cdot \frac{1}{Z_8} - \dot{U}_{54} \cdot \frac{1}{Z_{34}} = -\frac{\dot{E}_4}{R_{34}} \\ -\dot{U}_{14} \cdot \frac{1}{Z_8} + \dot{U}_{34} \cdot \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_{56}} + \frac{1}{Z_8} \right) - \dot{U}_{54} \cdot \frac{1}{Z_{56}} = 0 \\ -\dot{U}_{14} \cdot \frac{1}{Z_{34}} - \dot{U}_{34} \cdot \frac{1}{Z_{56}} + \dot{U}_{54} \cdot \left(\frac{1}{Z_{34}} + \frac{1}{Z_7} + \frac{1}{Z_{56}} \right) = \frac{\dot{E}_4}{Z_{34}} \end{cases}$$

Решение системы уравнений приведено в приложении Г.

Решив систему уравнений, получили следующие значения узловых напряжений:

$$\dot{U}_{14} = -32,064 - j5,211 \text{ В}$$

$$\dot{U}_{34} = -27,305 - j8,322 \text{ В}$$

$$\dot{U}_{54} = 4,612 - j4,516 \text{ В}$$

Находим токи в узлах с помощью закона Ома:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{34}}{Z_1} = -0,151 + j0,496 \text{ А}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{-\dot{U}_{14}}{Z_2} = -0,076 + j0,465 \text{ А}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{14} - \dot{U}_{54} + \dot{E}_4}{Z_{34}} = 0,321 + j0,205 \text{ А}$$

$$\dot{I}_4 = \dot{I}_3 = 0,321 + j0,205 \text{ А}$$

$$\dot{I}_5 = \frac{\dot{U}_{54} - \dot{U}_{34}}{Z_{56}} = 0,245 + j0,237 \text{ А}$$

$$\dot{I}_6 = \dot{I}_5 = 0,245 + j0,237 \text{ А}$$

$$\dot{I}_7 = \frac{-\dot{U}_{54}}{Z_7} = -0,076 + j0,032 \text{ А}$$

$$\dot{I}_8 = \frac{\dot{U}_{14} - \dot{U}_{34}}{Z_8} = -0,397 + 0,259 \text{ А}$$

9. Метод эквивалентного генератора

Делаем разрыв в ветви 4 и получаем следующую цепь (рис. 11):

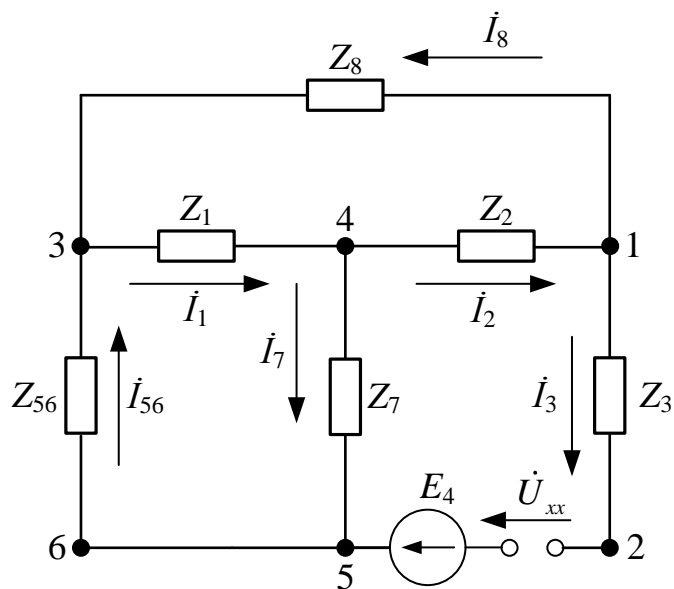


Рисунок 11

Находим токи с помощью метода контурных токов. Для этого выберем контуры, которые показаны на рисунке 12.

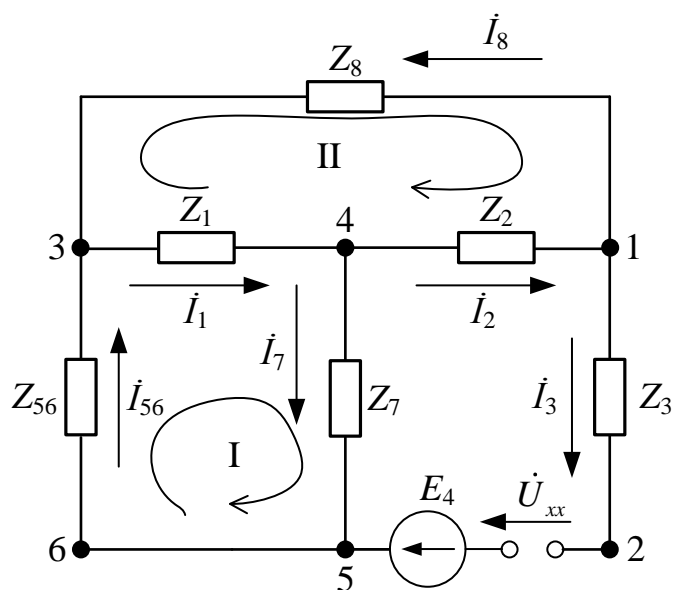


Рисунок 12

Составляем систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{I}_{11} \cdot (Z_1 + Z_{56} + Z_7) - \dot{I}_{22} \cdot Z_1 = 0 \\ \dot{I}_{22} \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_8) - \dot{I}_{11} \cdot Z_1 = 0 \end{cases}$$

Решение системы уравнений:

$$\dot{I}_{11} = 0 \text{ A}$$

$$\dot{I}_{22} = 0 \text{ A}$$

Находим напряжение холостого хода (см. рис. 11):

$$\dot{U}_{xx} = -\dot{I}_{22} \cdot Z_2 + \dot{I}_{11} \cdot Z_7 + \dot{E}_4 = 60,683 + j23,294 \text{ В}$$

Найдем $Z_{\text{ЭКВ}}$, для этого преобразуем схему в пассивную (рис. 13).

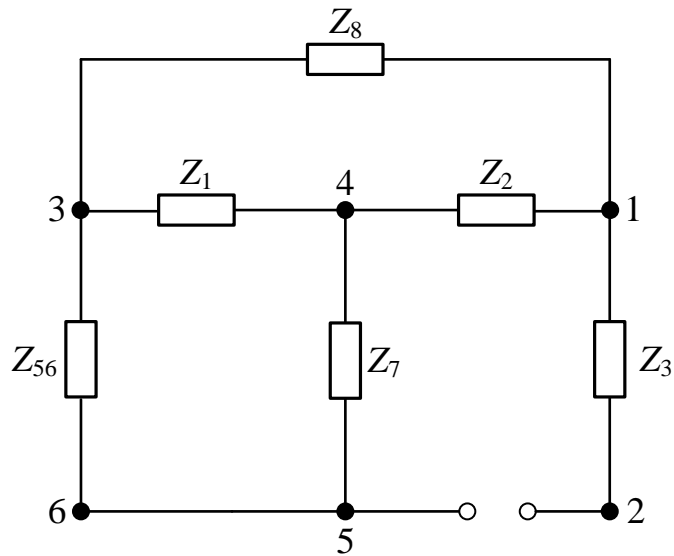


Рисунок 13

Преобразуем треугольник Z_1 - Z_7 - Z_{56} в эквивалентную звезду (рис. 14).

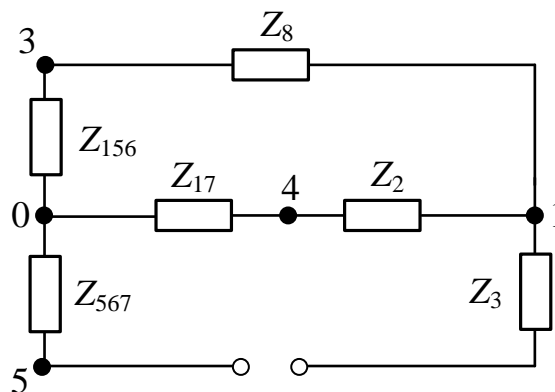


Рисунок 14

$$Z_{156} = \frac{Z_1 \cdot Z_{56}}{Z_1 + Z_{56} + Z_7} = 14,7 + j30,951 \text{ Ом}$$

$$Z_{17} = \frac{Z_1 \cdot Z_7}{Z_1 + Z_{56} + Z_7} = 4,881 + j28,151 \text{ Ом}$$

$$Z_{567} = \frac{Z_{56} \cdot Z_7}{Z_1 + Z_{56} + Z_7} = 33,329 - j35,83 \text{ Ом}$$

Объединим последовательно включенные комплексные сопротивления Z_{17} и Z_2 , Z_{156} и Z_8 в эквивалентные комплексные сопротивления (рис. 15).

$$Z_{127} = Z_{17} + Z_2 = 4,881 - j40,849 \text{ Ом}$$

$$Z_{1568} = Z_{156} + Z_8 = 26,7 + j30,951 \text{ Ом}$$

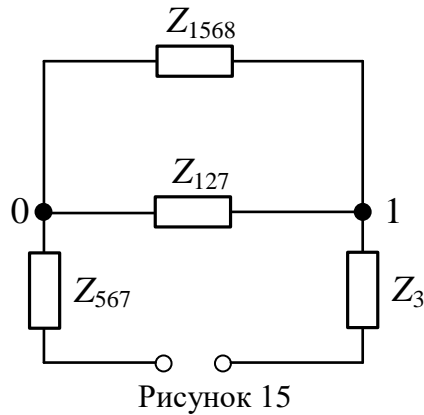


Рисунок 15

Рассчитаем $Z_{\text{экв}}$:

$$Z_{\text{экв}} = \frac{Z_{127} \cdot Z_{1568}}{Z_{127} + Z_{1568}} + Z_{567} + Z_3 = 167,032 - j50,317 \text{ Ом}$$

Находим \dot{I}_4 по формуле:

$$\dot{I}_4 = \frac{\dot{U}_{xx}}{Z_{\text{экв}} + Z_4} = 0,321 + j0,205 \text{ А}$$

Результаты расчета занесены в таблицу 2:

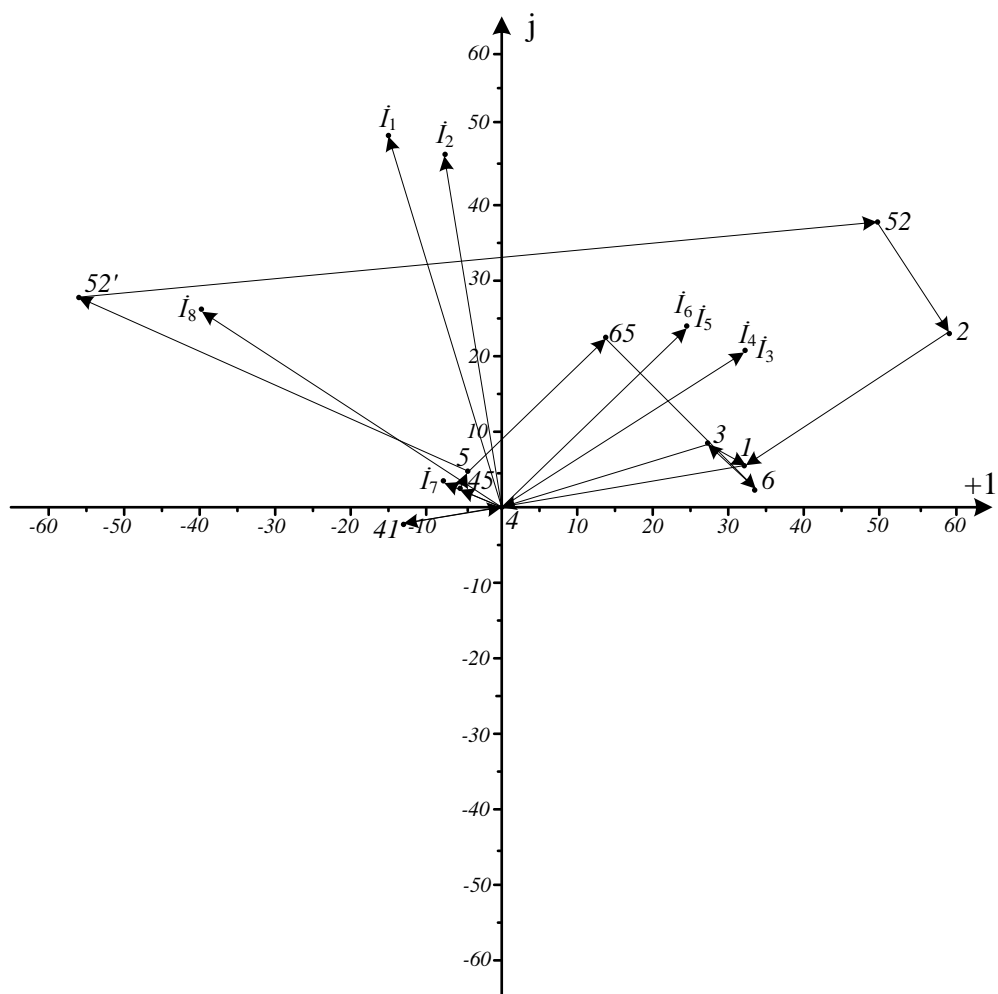
Таблица 2 – Результаты расчета

	Алгебраическая форма		Показательная форма	
	Re	Im	модуль	φ , град
ток \dot{I}_1	-0,151	0,496	0,519	106,951
ток \dot{I}_2	-0,076	0,465	0,471	99,231
ток \dot{I}_3	0,321	0,205	0,381	32,61
ток \dot{I}_4	0,321	0,205	0,381	32,61
ток \dot{I}_5	0,245	0,237	0,341	44,036
ток \dot{I}_6	0,245	0,237	0,341	44,036
ток \dot{I}_7	-0,076	0,032	0,082	157,269
ток \dot{I}_8	-0,397	0,259	0,474	146,827
Мощность $S_{уст}$	24,27	-4,986	24,777	-11,61
Мощность $S_{номр}$	24,27	-4,986	24,777	-11,61
\dot{U}_{xx}	60,683	23,294	65	21
$Z_{ген}$	167,032	-50,317	174,446	-16,765

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Векторная диаграмма токов и совмещенная с ней топографическая векторная диаграмма напряжений

Масштаб: $\dot{I} : 100\text{мм} = 1\text{ A}$
 $\dot{\phi} : 1\text{мм} = 1\text{В}$



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Определение токов методом законов Кирхгофа (расчеты MATHCAD)

$XL_1 := 55$	$XC_2 := 97$	$R_3 := 85$	$j := \sqrt{-1}$
$XL_2 := 28$	$XC_4 := 31$	$R_5 := 75$	
$XL_4 := 47$	$XC_5 := 83$	$R_7 := 73$	
$XL_6 := 26$	$XC_7 := 29$	$R_8 := 12$	
$E_4 := 60.682724063281 + j \cdot 23.293926252559$		$E_4 = 60.683 + 23.294i$	
$Z_1 := j \cdot XL_1 = 55i$		$Z_5 := R_5 - j \cdot XC_5 = 75 - 83i$	
$Z_2 := j \cdot XL_2 - j \cdot XC_2 = -69i$		$Z_6 := j \cdot XL_6 = 26i$	
$Z_3 := R_3 = 85$		$Z_7 := R_7 - j \cdot XC_7 = 73 - 29i$	
$Z_4 := j \cdot XL_4 - j \cdot XC_4 = 16i$		$Z_8 := R_8 = 12$	
$Z_{34} := Z_3 + Z_4 = 85 + 16i$			
$Z_{56} := Z_5 + Z_6 = 75 - 57i$			
</			

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Определение токов методом контурных токов (расчеты MATHCAD)

$XL_1 := 55$	$XC_2 := 97$	$R_3 := 85$	$j := \sqrt{-1}$
$XL_2 := 28$	$XC_4 := 31$	$R_5 := 75$	
$XL_4 := 47$	$XC_5 := 83$	$R_7 := 73$	
$XL_6 := 26$	$XC_7 := 29$	$R_8 := 12$	
$E_4 := 60.682724063281 + j \cdot 23.293926252559$	$E_4 = 60.683 + 23.294i$		
$Z_1 := j \cdot XL_1 = 55i$	$Z_5 := R_5 - j \cdot XC_5 = 75 - 83i$		
$Z_2 := j \cdot XL_2 - j \cdot XC_2 = -69i$	$Z_6 := j \cdot XL_6 = 26i$		
$Z_3 := R_3 = 85$	$Z_7 := R_7 - j \cdot XC_7 = 73 - 29i$		
$Z_4 := j \cdot XL_4 - j \cdot XC_4 = 16i$	$Z_8 := R_8 = 12$		
$Z_{34} := Z_3 + Z_4 = 85 + 16i$			
$Z_{56} := Z_5 + Z_6 = 75 - 57i$			
Определение приближения	$I_{11} := 0$		
	$I_{22} := 0$		
	$I_{33} := 0$		
	$I_{11} \cdot (Z_1 + Z_7 + Z_{56}) - I_{22} \cdot Z_7 - I_{33} \cdot Z_1 = 0$ $I_{22} \cdot (Z_2 + Z_{34} + Z_7) - I_{11} \cdot Z_7 - I_{33} \cdot Z_2 = E_4$ $I_{33} \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_8) - I_{11} \cdot Z_1 - I_{22} \cdot Z_2 = 0$		
Решатель	$\begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{bmatrix} := \text{find}(I_{11}, I_{22}, I_{33}) = \begin{bmatrix} 0.245 + 0.237i \\ 0.321 + 0.205i \\ 0.397 - 0.259i \end{bmatrix}$		
	$I_1 := I_{11} - I_{33} = -0.151 + 0.496i$ $I_2 := I_{22} - I_{33} = -0.076 + 0.465i$ $I_3 := I_{22} = 0.321 + 0.205i$ $I_4 := I_{22} = 0.321 + 0.205i$	$I_5 := I_{11} = 0.245 + 0.237i$ $I_6 := I_{11} = 0.245 + 0.237i$ $I_7 := I_{11} - I_{22} = -0.076 + 0.032i$ $I_8 := -I_{33} = -0.397 + 0.259i$	

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Определение токов методом узловых напряжений (расчеты MATHCAD)

$XL_1 := 55$	$XC_2 := 97$	$R_3 := 85$	$j := \sqrt{-1}$
$XL_2 := 28$	$XC_4 := 31$	$R_5 := 75$	
$XL_4 := 47$	$XC_5 := 83$	$R_7 := 73$	
$XL_6 := 26$	$XC_7 := 29$	$R_8 := 12$	
$E_4 := 60.682724063281 + j \cdot 23.293926252559$		$E_4 = 60.683 + 23.294i$	
$Z_1 := j \cdot XL_1 = 55i$	$Z_5 := R_5 - j \cdot XC_5 = 75 - 83i$		
$Z_2 := j \cdot XL_2 - j \cdot XC_2 = -69i$	$Z_6 := j \cdot XL_6 = 26i$		
$Z_3 := R_3 = 85$	$Z_7 := R_7 - j \cdot XC_7 = 73 - 29i$		
$Z_4 := j \cdot XL_4 - j \cdot XC_4 = 16i$	$Z_8 := R_8 = 12$		
$Z_{34} := Z_3 + Z_4 = 85 + 16i$	+		
$Z_{56} := Z_5 + Z_6 = 75 - 57i$			
Ограничительные приближения	$U_{14} := 0$		
	$U_{34} := 0$		
	$U_{54} := 0$		
	$U_{14} \cdot \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_{34}} + \frac{1}{Z_8} \right) - U_{34} \cdot \frac{1}{Z_8} - U_{54} \cdot \frac{1}{Z_{34}} = -\frac{E_4}{Z_{34}}$		
	$-U_{14} \cdot \frac{1}{Z_8} + U_{34} \cdot \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_{56}} + \frac{1}{Z_8} \right) - U_{54} \cdot \frac{1}{Z_{56}} = 0$		
Решатель	$-U_{14} \cdot \frac{1}{Z_{34}} - U_{34} \cdot \frac{1}{Z_{56}} + U_{54} \cdot \left(\frac{1}{Z_{34}} + \frac{1}{Z_7} + \frac{1}{Z_{56}} \right) = \frac{E_4}{Z_{34}}$		
	$\begin{bmatrix} U_{14} \\ U_{34} \\ U_{54} \end{bmatrix} := \text{find}(U_{14}, U_{34}, U_{54}) = \begin{bmatrix} -32.064 - 5.211i \\ -27.305 - 8.322i \\ 4.612 - 4.516i \end{bmatrix}$		
$I_1 := \frac{U_{34}}{Z_1} = -0.151 + 0.496i$		$I_5 := \frac{U_{54} - U_{34}}{Z_{56}} = 0.245 + 0.237i$	
$I_2 := \frac{-U_{14}}{Z_2} = -0.076 + 0.465i$		$I_6 := I_5 = 0.245 + 0.237i$	
$I_3 := \frac{U_{14} - U_{54} + E_4}{Z_{34}} = 0.321 + 0.205i$		$I_7 := \frac{-U_{54}}{Z_7} = -0.076 + 0.032i$	
$I_4 := I_3 = 0.321 + 0.205i$		$I_8 := \frac{U_{14} - U_{34}}{Z_8} = -0.397 + 0.259i$	