

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Кафедра теоретических основ электротехники

Типовой расчет №1 по курсу: «Теория электрических цепей»  
Шифр студента №950501-6

Проверил: Батюков С. В.  
Выполнил: ст. гр. 950501  
Деркач А. В.

Минск 2020

## 1. Чертеж исходной схемы

Исходные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные

$E_1$ , В	$E_2$ , В	$E_8$ , В	$J_{02}$ , А	$J_{06}$ , А	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом	$R_6$ , Ом	$R_7$ , Ом	$R_8$ , Ом
300	100	200	1	1	910	290	640	910	390	170	650	920

Начертим схему согласно заданному варианту (рис. 1):

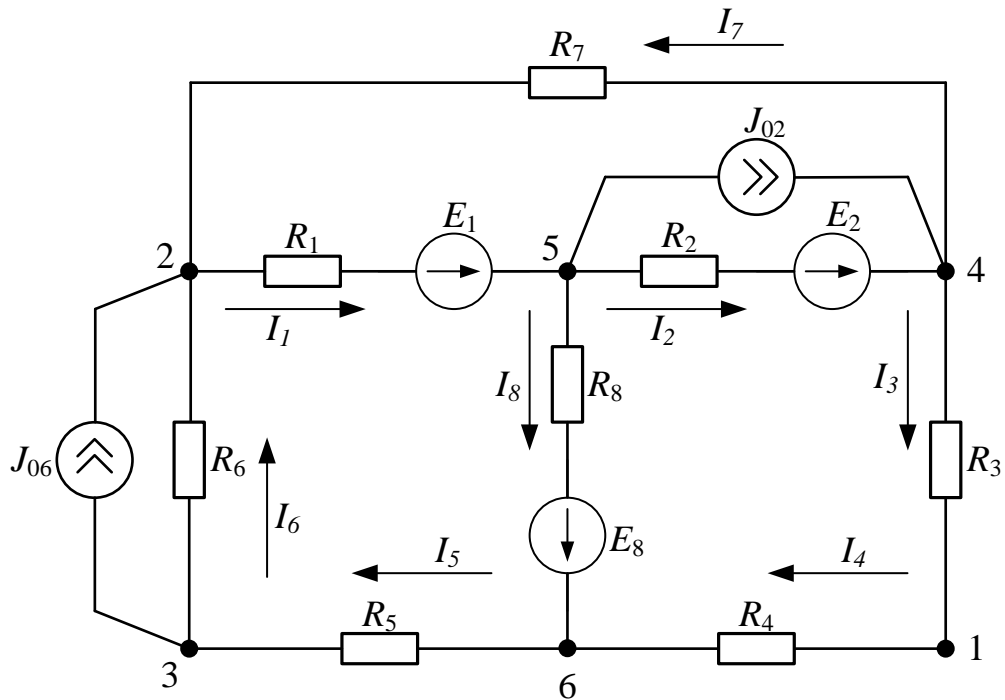


Рисунок 1 – Исходная схема

## 2. Преобразование схемы к двухконтурной

Заменяем источники тока  $J_{02}$  и  $J_{06}$  эквивалентными им источниками напряжения  $E_{02}$  и  $E_{06}$ . Объединим последовательно включенные источники напряжения  $E_{02}$  и  $E_2$  в эквивалентный источник напряжения  $E_{22}$ . Объединим последовательно включенные сопротивления  $R_3$  и  $R_4$ ,  $R_5$  и  $R_6$  (рис. 2):

$$E_{02} = J_{02} \cdot R_2 = 290 \text{ В}$$

$$E_{06} = J_{06} \cdot R_6 = 170 \text{ В}$$

$$E_{22} = E_{02} + E_2 = 390 \text{ В}$$

$$R_{34} = R_3 + R_4 = 1550 \text{ Ом}$$

$$R_{56} = R_5 + R_6 = 560 \text{ Ом}$$

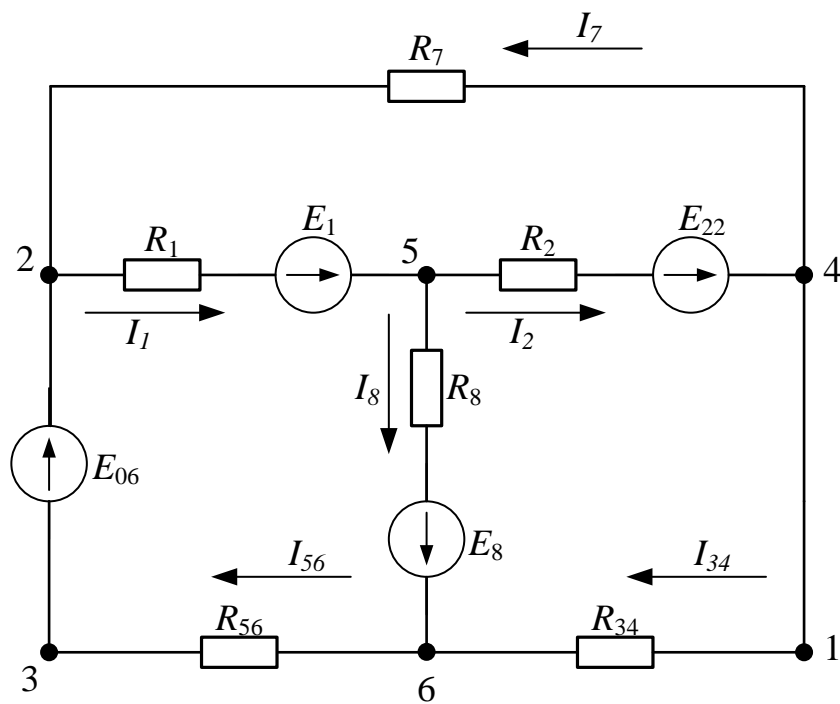


Рисунок 2

Заменим источники напряжения  $E_1$  и  $E_{22}$  эквивалентными им источниками тока  $J_1$  и  $J_{22}$  (рис. 3):

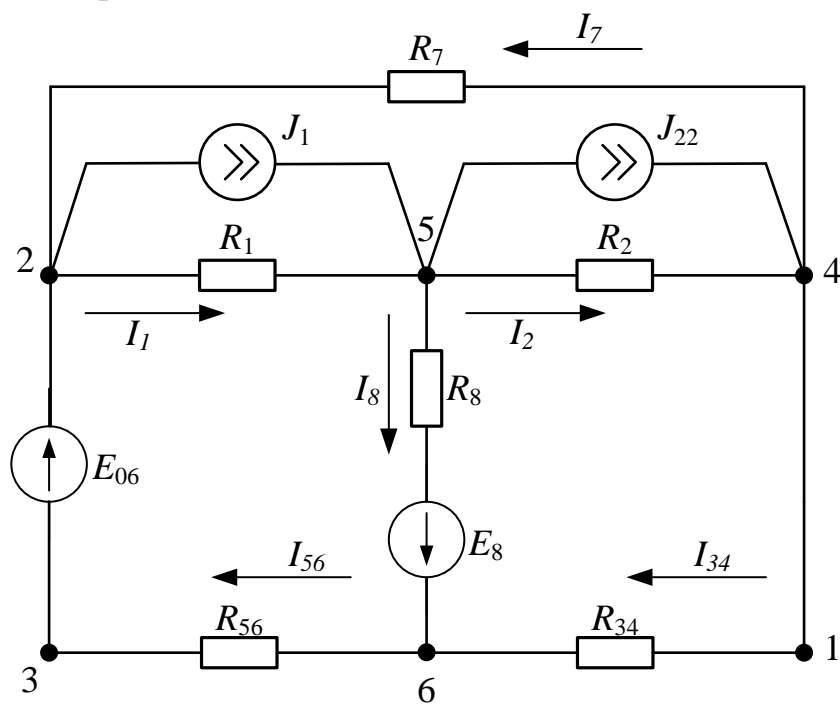


Рисунок 3

Преобразуем треугольник  $R_1$ - $R_2$ - $R_7$  в эквивалентную звезду (рис. 4):

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_7} = 142,649 \text{ Ом}$$

$$R_{17} = \frac{R_1 \cdot R_7}{R_1 + R_2 + R_7} = 319,730 \text{ Ом}$$

$$R_{27} = \frac{R_2 \cdot R_7}{R_1 + R_2 + R_7} = 101,892 \text{ Ом}$$

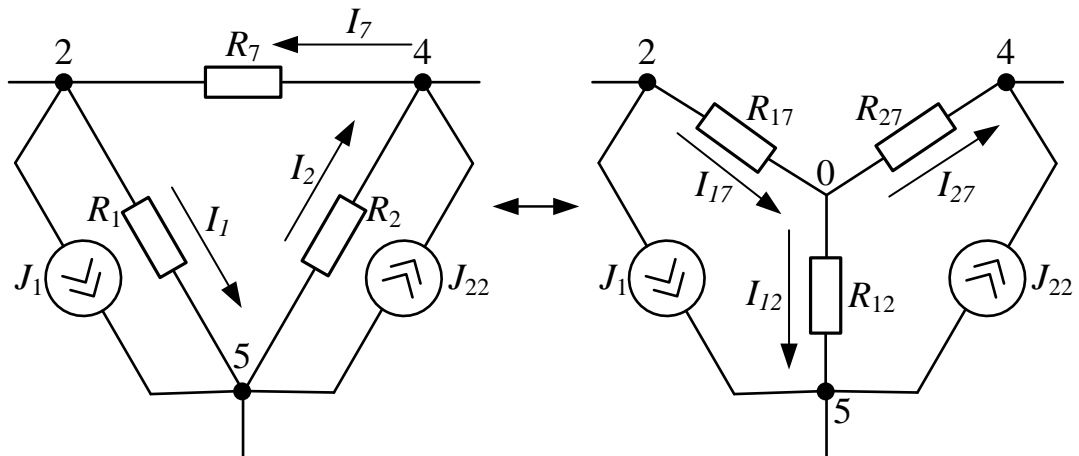


Рисунок 4

Заменяем источники тока  $J_1$  и  $J_{22}$  эквивалентными им источниками напряжения  $E_{17}$ ,  $E_{27}$ ,  $E_{121}$  и  $E_{122}$ . Объединим последовательно включенные источники напряжения  $E_{121}$  и  $E_{122}$  в эквивалентный источник напряжения  $E_{12}$  (рис. 5):

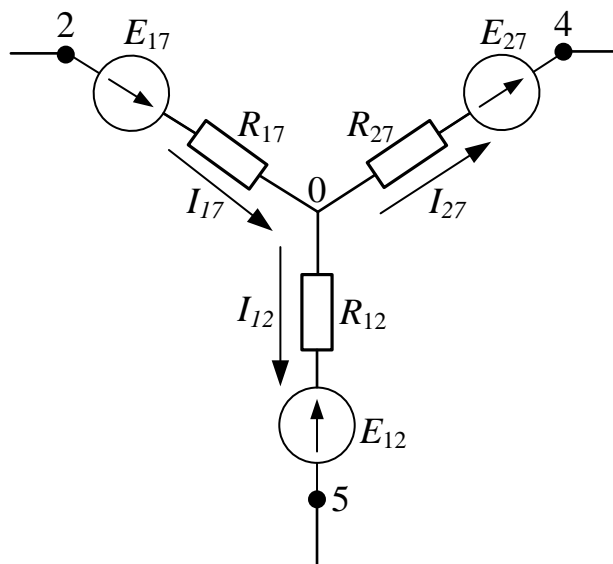


Рисунок 5

$$E_{17} = J_1 \cdot R_{17} = 105,405 \text{ В}$$

$$E_{27} = J_{22} \cdot R_{27} = 137,027 \text{ В}$$

$$E_{121} = J_1 \cdot R_{12} = 47,027 \text{ В}$$

$$E_{122} = J_{22} \cdot R_{12} = 191,838 \text{ В}$$

$$E_{12} = E_{122} - E_{121} = 144,811 \text{ В}$$

После всех преобразований получаем схему (рис. 6):

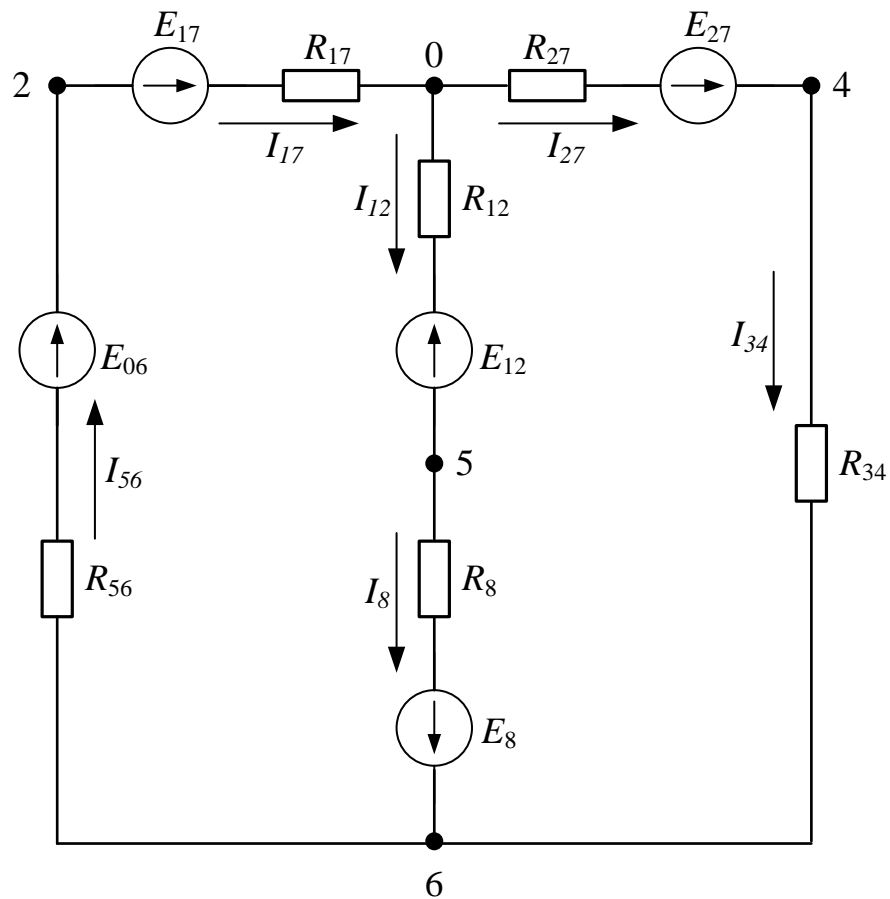


Рисунок 6

Объединим последовательно включенные источники напряжения  $E_{06}$  и  $E_{17}$ ,  $E_{12}$  и  $E_8$  в эквивалентные источники напряжения  $E_{167}$  и  $E_{128}$ . Объединим последовательно включенные сопротивления  $R_{17}$  и  $R_{56}$ ,  $R_{12}$  и  $R_8$ ,  $R_{27}$  и  $R_{34}$  в эквивалентные сопротивления (рис. 7):

$$E_{167} = E_{06} + E_{17} = 275,405 \text{ В}$$

$$E_{128} = E_8 - E_{12} = 55,189 \text{ В}$$

$$R_{1567} = R_{17} + R_{56} = 879,730 \text{ Ом}$$

$$R_{128} = R_{12} + R_8 = 1063,649 \text{ Ом}$$

$$R_{2347} = R_{34} + R_{27} = 1652,892 \text{ Ом}$$

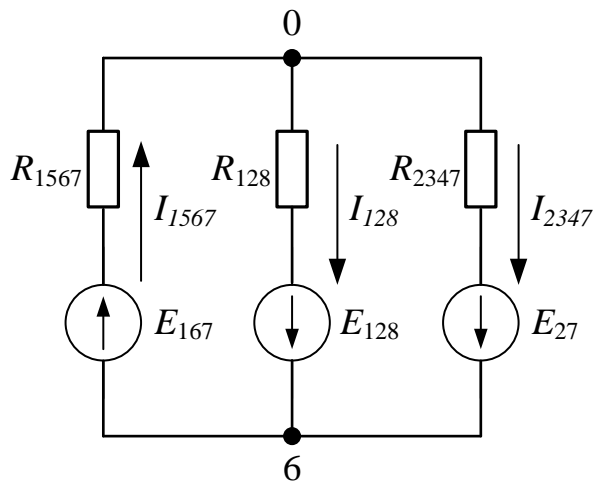


Рисунок 7

### 3. Метод двух узлов

Принимаем  $\varphi_0 = 0$  и находим узловое напряжение  $U_{60}$ .

$$U_{60} \cdot g_{66} = I_{y6}$$

Находим собственную проводимость шестого узла и узловой ток:

$$g_{66} = \frac{1}{R_{1567}} + \frac{1}{R_{128}} + \frac{1}{R_{2347}} = 0,003 \frac{1}{\text{Ом}}$$

$$I_{y6} = \frac{E_{128}}{R_{128}} + \frac{E_{27}}{R_{2347}} - \frac{E_{167}}{R_{1567}} = -0,178 \text{ A}$$

Находим  $U_{60}$ :

$$U_{06} = \frac{I_{y6}}{g_{66}} = -66,404 \text{ В}$$

Находим токи в данной схеме:

$$U_{06} = -E_{167} + I_{1567} \cdot R_{1567}$$

$$U_{06} = E_{128} - I_{128} \cdot R_{128}$$

$$U_{06} = E_{27} - I_{2347} \cdot R_{2347}$$

$$I_{1567} = \frac{U_{06} + E_{167}}{R_{1567}} = 0,238 \text{ A}$$

$$I_{128} = \frac{E_{128} - U_{06}}{R_{128}} = 0,144 \text{ A}$$

$$I_{2347} = \frac{E_{27} - U_{06}}{R_{2347}} = 0,123 \text{ A}$$

#### 4. Нахождение токов и исходной схеме

$$I_3 = I_{34} = I_{2347} = 0,123 \text{ A}$$

$$I_4 = I_{34} = I_{2347} = 0,123 \text{ A}$$

$$I_5 = I_{56} = I_{1567} = 0,238 \text{ A}$$

$$I_6 = I_{56} - J_{06} = I_{1567} - J_{06} = -0,762 \text{ A}$$

$$I_8 = I_{128} = 0,144 \text{ A}$$

Токи в треугольнике  $R_8$ - $R_{56}$ - $R_1$  (рис. 4) найдем с помощью закона Ома:

$$U_{24} = -E_{17} + I_{56} \cdot R_{17} + I_{34} \cdot R_{27} - E_{27} = -153,925 \text{ В}$$

$$U_{25} = -E_{17} + I_{56} \cdot R_{17} + I_8 \cdot R_{12} + E_{12} = 131,688 \text{ В}$$

$$U_{45} = E_{27} - I_{34} \cdot R_{27} + I_8 \cdot R_{12} + E_{12} = 285,612 \text{ В}$$

$$I_1 = \frac{U_{25} + E_1}{R_1} = 0,474 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{-U_{45} + E_{22}}{R_2} = -0,640 \text{ A}$$

$$I_7 = \frac{-U_{24}}{R_7} = 0,237 \text{ A}$$

#### 5. Нахождение напряжения между узлами 3 и 5

$$U_{35} = -I_5 \cdot R_5 + E_8 - I_8 \cdot R_8 = 2,075 \text{ В}$$

#### 6. Баланс мощностей

Составим баланс мощностей:

Найдём мощность источников энергии:

$$\begin{aligned} P_{ист} &= E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + E_8 \cdot I_8 - J_{02} \cdot (I_2 \cdot R_2 - E_2) - J_{06} \cdot I_6 \cdot R_6 = \\ &= 516,419868 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Найдём мощность приёмников энергии:

$$P_{np} = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5 + I_6^2 \cdot R_6 + \\ + I_7^2 \cdot R_7 + I_8^2 \cdot R_8 = 516,419868 \text{ Вт}$$

Поскольку мощность источников энергии равна мощности приемников энергии, то баланс мощностей выполняется.

## 7. Метод законов Кирхгофа

Число уравнений для законов Кирхгофа определяем по формулам:

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

$$N_{\text{ур. к}} = N_{\text{в}} - N_{\text{уз}} + 1 - N_{\text{л}} = 10 - 6 + 1 - 2 = 3$$

Выбор контуров указан на рисунке 8:

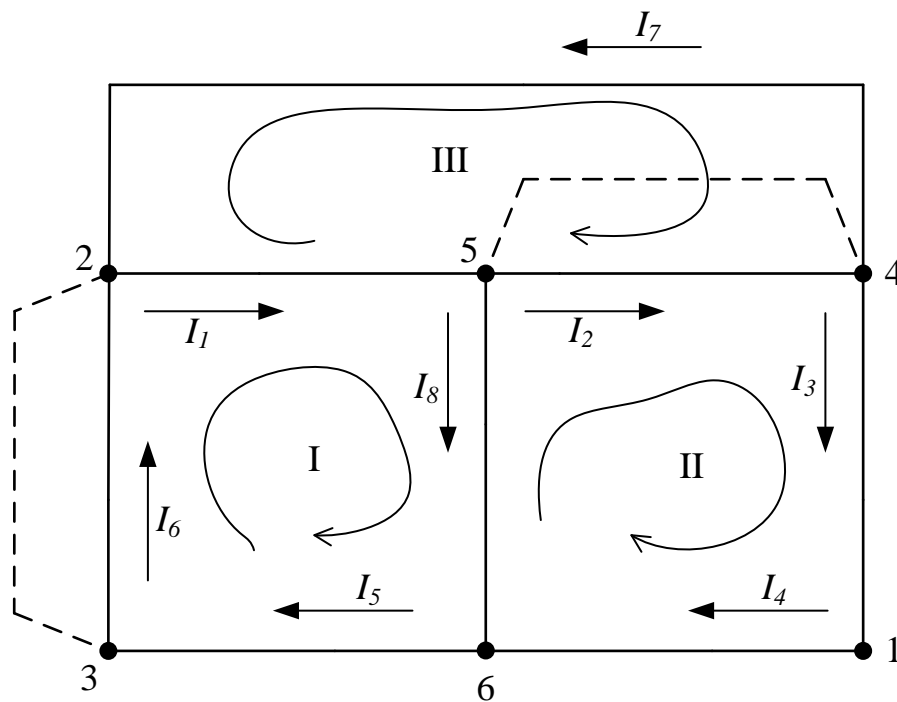


Рисунок 8

Составляем систему уравнений:



$$\left\{ \begin{array}{l} I_3 = I_4 - 1 \text{ узел} \\ I_7 + I_6 + J_{06} = I_1 - 2 \text{ узел} \\ I_5 = J_{06} + I_6 - 3 \text{ узел} \\ J_{02} + I_2 = I_3 + I_7 - 4 \text{ узел} \\ I_1 = I_8 + I_2 + J_{02} - 5 \text{ узел} \\ I_1 \cdot R_1 + I_8 \cdot R_8 + I_5 \cdot R_5 + I_6 \cdot R_6 = E_1 + E_8 - \text{I контур} \\ I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 + I_4 \cdot R_4 - I_8 \cdot R_8 = E_2 - E_8 - \text{II контур} \\ -I_7 \cdot R_7 - I_2 \cdot R_2 - I_1 \cdot R_1 = -E_2 - E_1 - \text{III контур} \end{array} \right.$$

Решение системы уравнений приведено в приложении А:

$$I_1 = 0,474 \text{ A}$$

$$I_2 = -0,64 \text{ A}$$

$$I_3 = 0,123 \text{ A}$$

$$I_4 = 0,123 \text{ A}$$

$$I_5 = 0,238 \text{ A}$$

$$I_6 = -0,762 \text{ A}$$

$$I_7 = 0,237 \text{ A}$$

$$I_8 = 0,114 \text{ A}$$

## 8. Метод контурных токов

Число уравнений находим по данной формуле:

$$N_{\text{ур.к}} = N_{\text{в}} - N_{\text{уз}} + 1 - N_{\text{J}} = 9 - 5 + 1 - 2 = 3.$$

Выбор контуров указан на рисунке 9.

Контурные токи  $I_{44}$  и  $I_{55}$  равны соответствующим источникам тока:

$$I_{44} = J_{06} = 1 \text{ A}$$

$$I_{55} = J_{02} = 1 \text{ A}$$

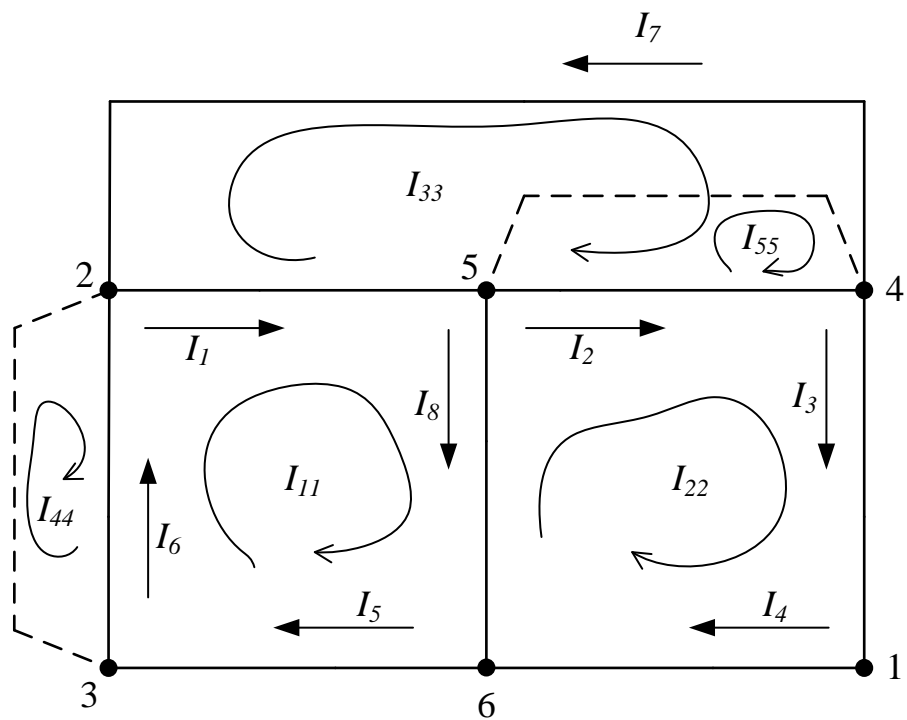


Рисунок 9

Составляем систему уравнений:

$$\begin{cases} I_{11} \cdot (R_1 + R_8 + R_5 + R_6) - I_{22} \cdot R_8 - I_{33} \cdot R_1 - I_{44} \cdot R_6 = E_1 + E_8 \\ I_{22} \cdot (R_2 + R_3 + R_4 + R_8) - I_{11} \cdot R_8 - I_{33} \cdot R_2 - I_{55} \cdot R_2 = E_2 - E_8 \\ I_{33} \cdot (R_1 + R_7 + R_2) - I_{11} \cdot R_1 - I_{22} \cdot R_2 + I_{55} \cdot R_2 = -E_2 - E_1 \end{cases}$$

Решение системы уравнений приведено в приложении Б:

$$I_{11} = 0,238 \text{ A}$$

$$I_{22} = 0,123 \text{ A}$$

$$I_{33} = -0,237 \text{ A}$$

Токи в цепи находим следующим образом:

$$I_1 = I_{11} - I_{33} = 0,474 \text{ A}$$

$$I_2 = I_{22} - I_{33} - I_{55} = -0,640 \text{ A}$$

$$I_3 = I_{22} = 0,123 \text{ A}$$

$$I_4 = I_{22} = 0,123 \text{ A}$$

$$I_5 = I_{11} = 0,238 \text{ A}$$

$$I_6 = I_{11} - I_{44} = -0,762 \text{ A}$$

$$I_7 = -I_{33} = 0,237 \text{ A}$$

$$I_8 = I_{11} - I_{22} = 0,114 \text{ A}$$

## 9. Метод узловых напряжений

Число уравнений, составляемых по методу узловых напряжений, равно:

$$N_{yp} = N_y - 1 - N_{ЭДС} = 5 - 1 - 0 = 4$$

Базисный узел  $\varphi_5 = 0 \text{ В}$ , искомые узловые напряжения –  $U_{25}, U_{35}, U_{45}, U_{65}$ .

Схема для решения методом узловых напряжений представлена на рисунке 10:

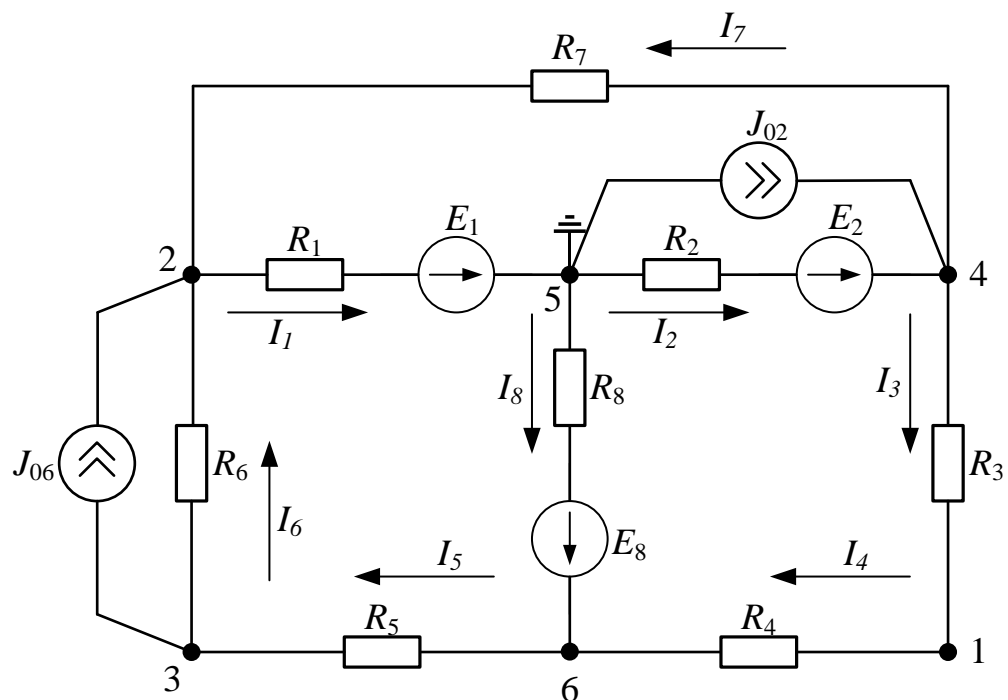


Рисунок 10

Составим систему уравнений для неизвестных узловых напряжений:

$$\begin{cases} U_{25} \cdot \left( \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_6} \right) - U_{35} \cdot \frac{1}{R_6} - U_{45} \cdot \frac{1}{R_7} - U_{65} \cdot 0 = J_{06} - \frac{E_1}{R_1} \\ -U_{25} \cdot \frac{1}{R_6} + U_{35} \cdot \left( \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_5} \right) - U_{45} \cdot 0 - U_{65} \cdot \frac{1}{R_5} = -J_{06} \\ -U_{25} \cdot \frac{1}{R_7} - U_{35} \cdot 0 + U_{45} \cdot \left( \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4} \right) - U_{65} \cdot \frac{1}{R_3 + R_4} = J_{02} + \frac{E_2}{R_2} \\ -U_{25} \cdot 0 - U_{35} \cdot \frac{1}{R_5} - U_{45} \cdot \frac{1}{R_3 + R_4} + U_{65} \cdot \left( \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_3 + R_4} \right) = \frac{E_8}{R_8} \end{cases}$$

Решение системы уравнений приведено в приложении В.

Решив систему уравнений, получили следующие значения узловых напряжений:

$$U_{25} = 131,688 \text{ В}$$

$$U_{35} = 2,075 \text{ В}$$

$$U_{45} = 285,612 \text{ В}$$

$$U_{65} = 94,729 \text{ В}$$

Находим токи в узлах с помощью закона Ома:

$$I_1 = \frac{U_{25} + E_1}{R_1} = 0,474 \text{ А}$$

$$I_2 = \frac{-U_{45} + E_2}{R_2} = -0,640 \text{ А}$$

$$I_3 = \frac{U_{45} - U_{65}}{R_3 + R_4} = 0,123 \text{ А}$$

$$I_4 = I_3 = 0,123 \text{ А}$$

$$I_5 = \frac{U_{65} - U_{35}}{R_5} = 0,238 \text{ А}$$

$$I_6 = \frac{U_{35} - U_{25}}{R_6} = -0,762 \text{ А}$$

$$I_7 = \frac{U_{45} - U_{25}}{R_7} = 0,237 \text{ А}$$

$$I_8 = \frac{-U_{65} + E_8}{R_8} = 0,114 \text{ A}$$

## 10. Метод эквивалентного генератора

Исключаем сопротивление  $R_1$  и получаем следующую цепь (рис. 11):

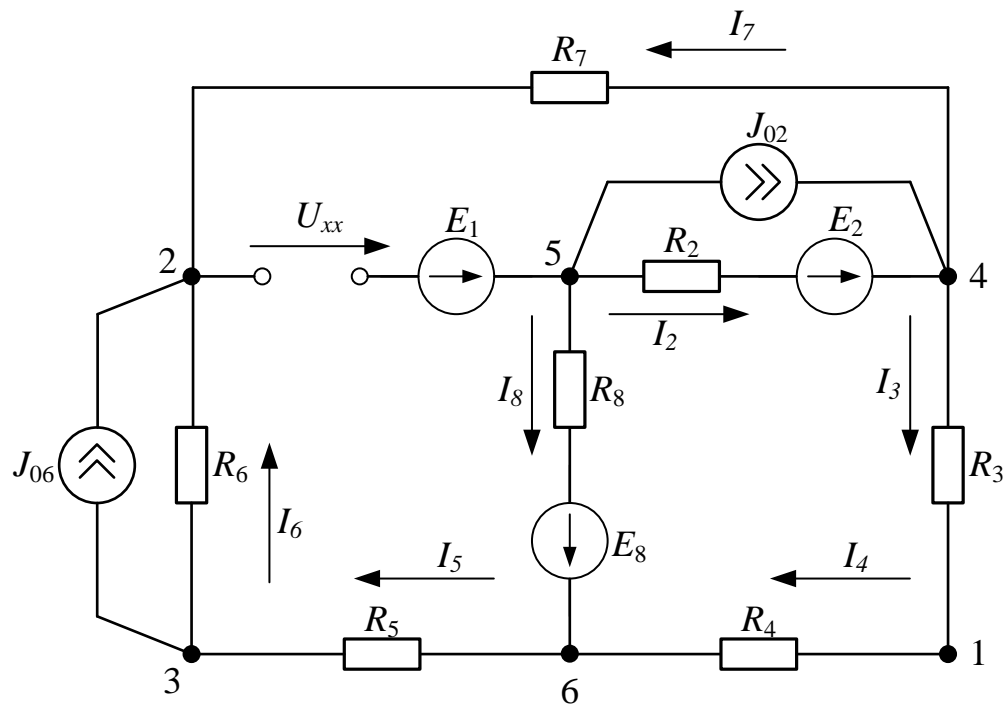


Рисунок 11

Преобразуем источники тока в эквивалентные источники напряжения и получаем цепь, представленную на рисунке 12.

$$E_{06} = J_{06} \cdot R_6 = 170 \text{ В}$$

$$E_{22} = J_{02} \cdot R_2 + E_2 = 390 \text{ В}$$

Находим токи с помощью метода контурных токов. Для этого выберем контуры, которые показаны на рисунке 13.

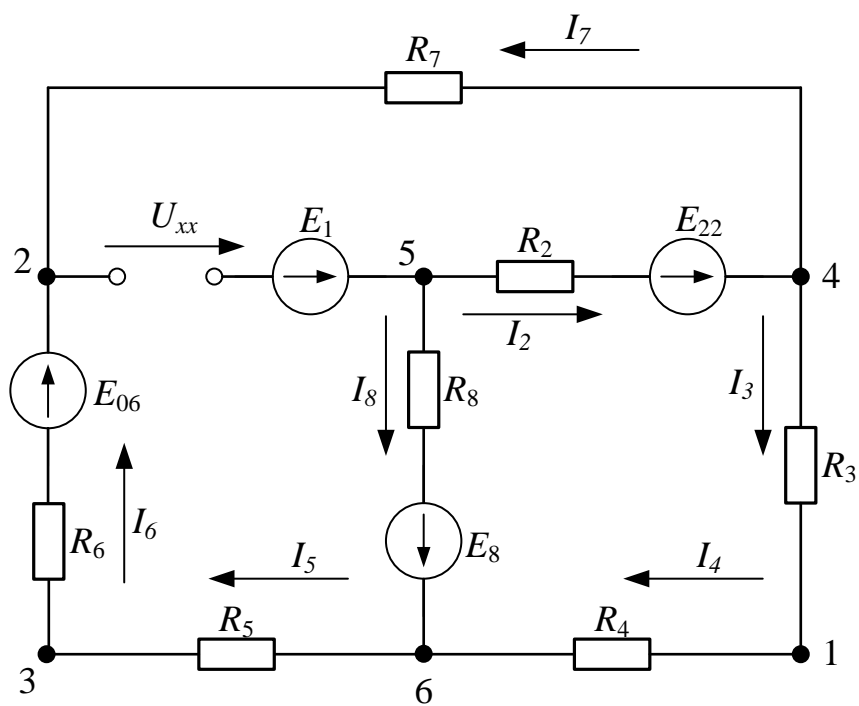


Рисунок 12

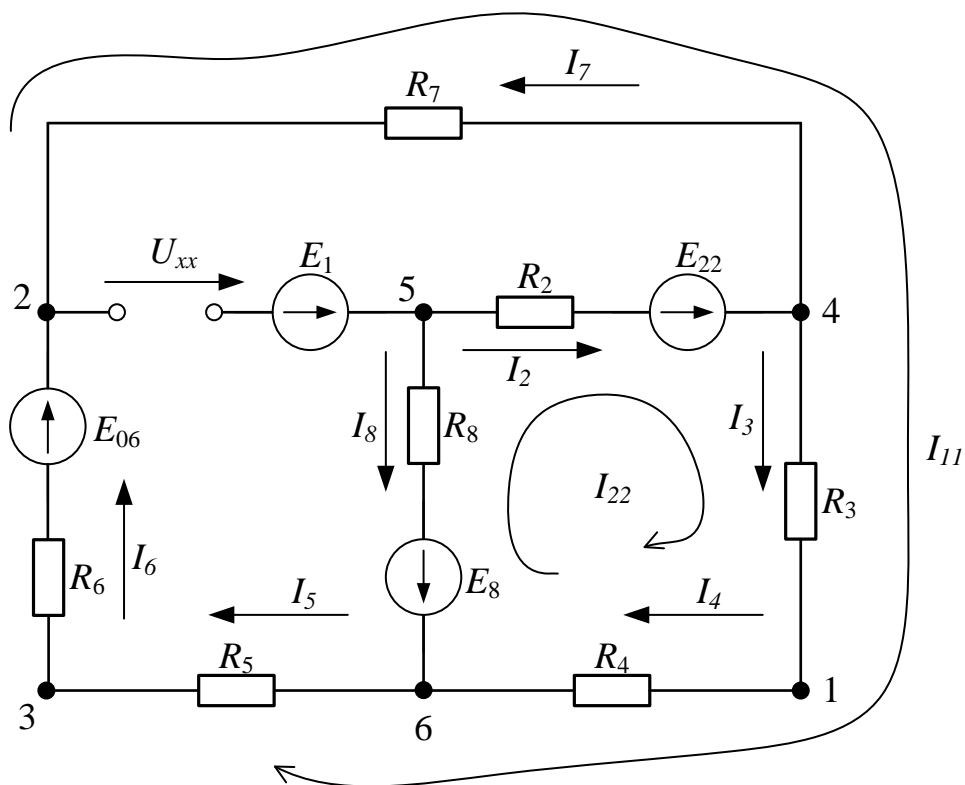


Рисунок 13

Составляем систему уравнений:

$$\begin{cases} I_{11} \cdot (R_7 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6) + I_{22} \cdot (R_3 + R_4) = E_{06} \\ I_{22} \cdot (R_2 + R_3 + R_4 + R_8) + I_{11} \cdot (R_3 + R_4) = -E_8 + E_{22} \end{cases}$$

Решение системы уравнений:

$$I_{11} = 0,033 \text{ A}$$

$$I_{22} = 0,050 \text{ A}$$

Находим напряжение холостого хода (см. рис. 12):

$$U_{xx} = I_{11} \cdot R_7 + E_{22} + E_1 - I_{22} \cdot R_2 = 697,266 \text{ В}$$

Найдем  $R_{\text{эКВ}}$ , для этого преобразуем схему в пассивную (рис. 14).

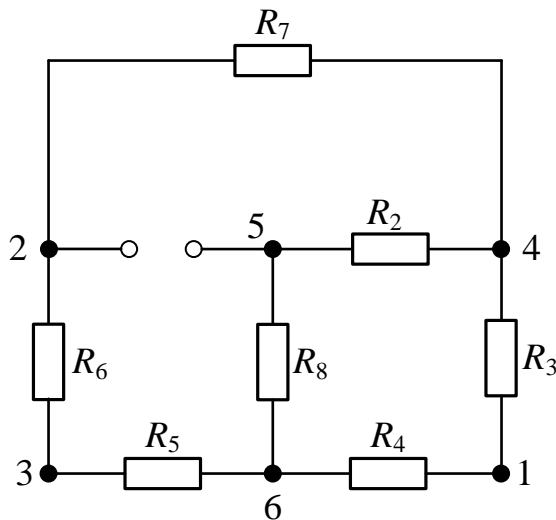


Рисунок 14

Объединим последовательно включенные сопротивления  $R_5$  и  $R_6$ ,  $R_3$  и  $R_4$  в эквивалентные сопротивления (рис. 15).

$$R_{34} = R_3 + R_4 = 1550 \text{ Ом}$$

$$R_{56} = R_5 + R_6 = 560 \text{ Ом}$$

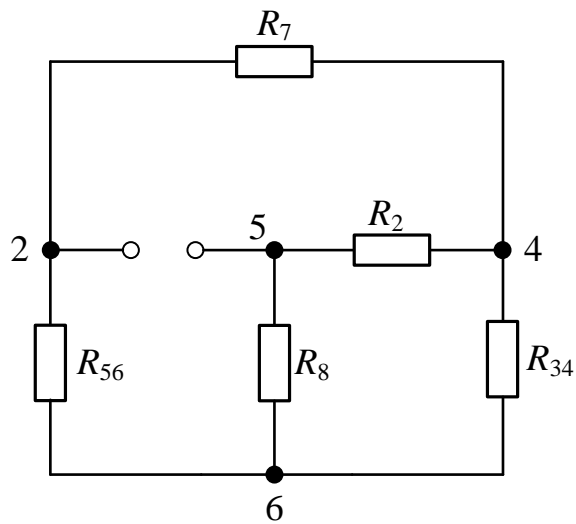


Рисунок 15

Преобразуем треугольник  $R_2$ - $R_8$ - $R_{34}$  в эквивалентную звезду (рис. 16).

$$R_{28} = \frac{R_2 \cdot R_8}{R_2 + R_8 + R_{34}} = 96,667 \text{ Ом}$$

$$R_{234} = \frac{R_2 \cdot R_{34}}{R_2 + R_8 + R_{34}} = 162,862 \text{ Ом}$$

$$R_{348} = \frac{R_8 \cdot R_{34}}{R_2 + R_8 + R_{34}} = 516,667 \text{ Ом}$$

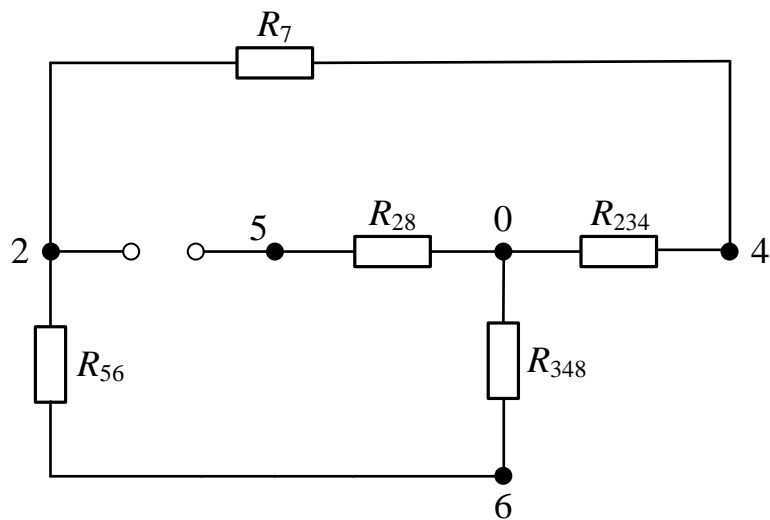


Рисунок 16

Объединим последовательно включенные сопротивления  $R_{234}$  и  $R_7$ ,  $R_{56}$  и  $R_{348}$  в эквивалентные сопротивления (рис. 17).



$$R_{2347} = R_{234} + R_7 = 812,862 \text{ Ом}$$

$$R_{34568} = R_{348} + R_{56} = 1076,667 \text{ Ом}$$

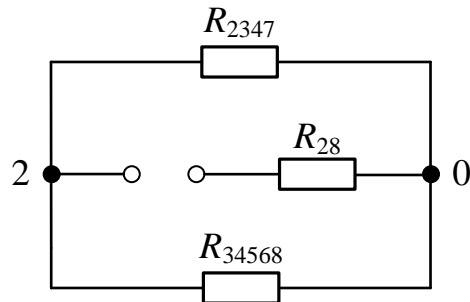


Рисунок 17

Рассчитаем  $R_{\text{экв}}$ :

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_{2347} \cdot R_{34568}}{R_{2347} + R_{34568}} + R_{28} = 559,841 \text{ Ом}$$

Находим  $I_1$  по формуле:

$$I_1 = \frac{U_{\text{xx}}}{R_{\text{экв}} + R_1} = 0,474 \text{ А}$$

Результаты расчета занесены в таблицу 2:

Таблица 2 – Результаты расчетов

$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$I_4,$ А	$I_5,$ А	$I_6,$ А	$I_7,$ А	$I_8,$ А	$U_{35},$ В	$U_{\text{xx}},$ В	$R_{\text{ген}},$ Ом	$P,$ Вт
0,474	-0,640	0,123	0,123	0,238	-0,762	0,237	0,114	2,075	697,266	559,841	516,420

## 11. Построение потенциальной диаграммы

18) Построим потенциальную по контуру по контуру 2-7-5-8-4-1-6-3-2 (рис.

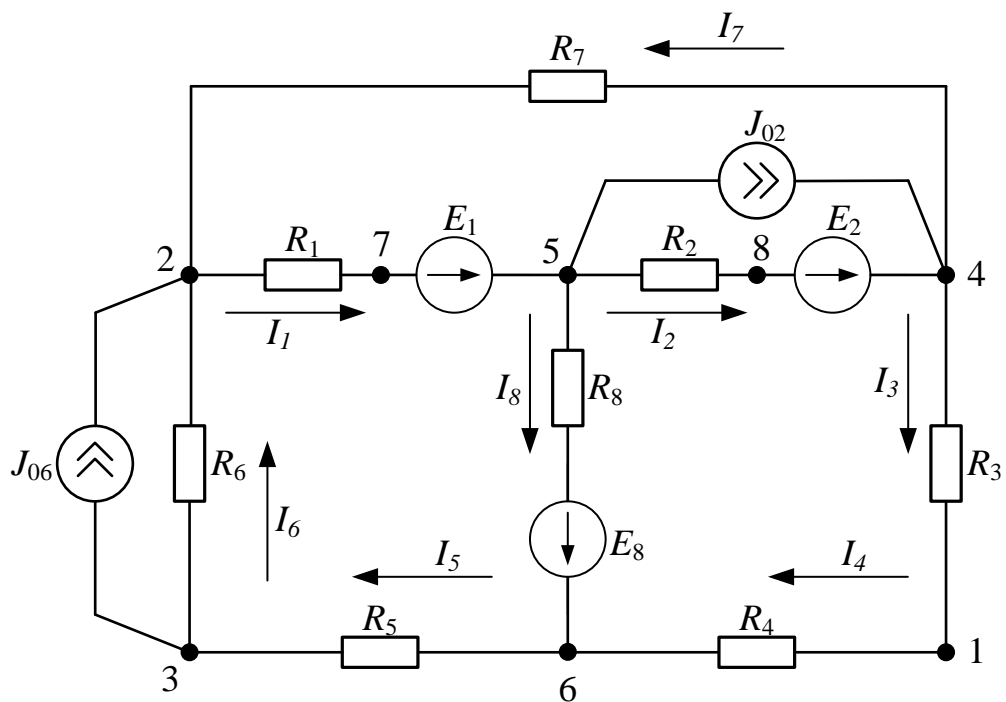


Рисунок 18

Найдем потенциалы узлов по следующим формулам:

$$\varphi_2 = 0 \text{ В}$$

$$\varphi_7 = \varphi_2 - I_1 \cdot R_1 = -431,686 \text{ В}$$

$$\varphi_5 = \varphi_7 + E_1 = -131,688 \text{ В}$$

$$\varphi_8 = \varphi_5 - I_2 \cdot R_2 = 53,925 \text{ В}$$

$$\varphi_4 = \varphi_8 + E_2 = 159,925 \text{ В}$$

$$\varphi_1 = \varphi_4 - I_3 \cdot R_3 = 75,109 \text{ В}$$

$$\varphi_6 = \varphi_1 - I_4 \cdot R_4 = -36,958 \text{ В}$$

$$\varphi_3 = \varphi_6 - I_5 \cdot R_5 = -129,612 \text{ В}$$

$$\varphi_2 = \varphi_3 - I_6 \cdot R_6 = 0 \text{ В}$$

Потенциальная диаграмма изображена на рисунке 19:

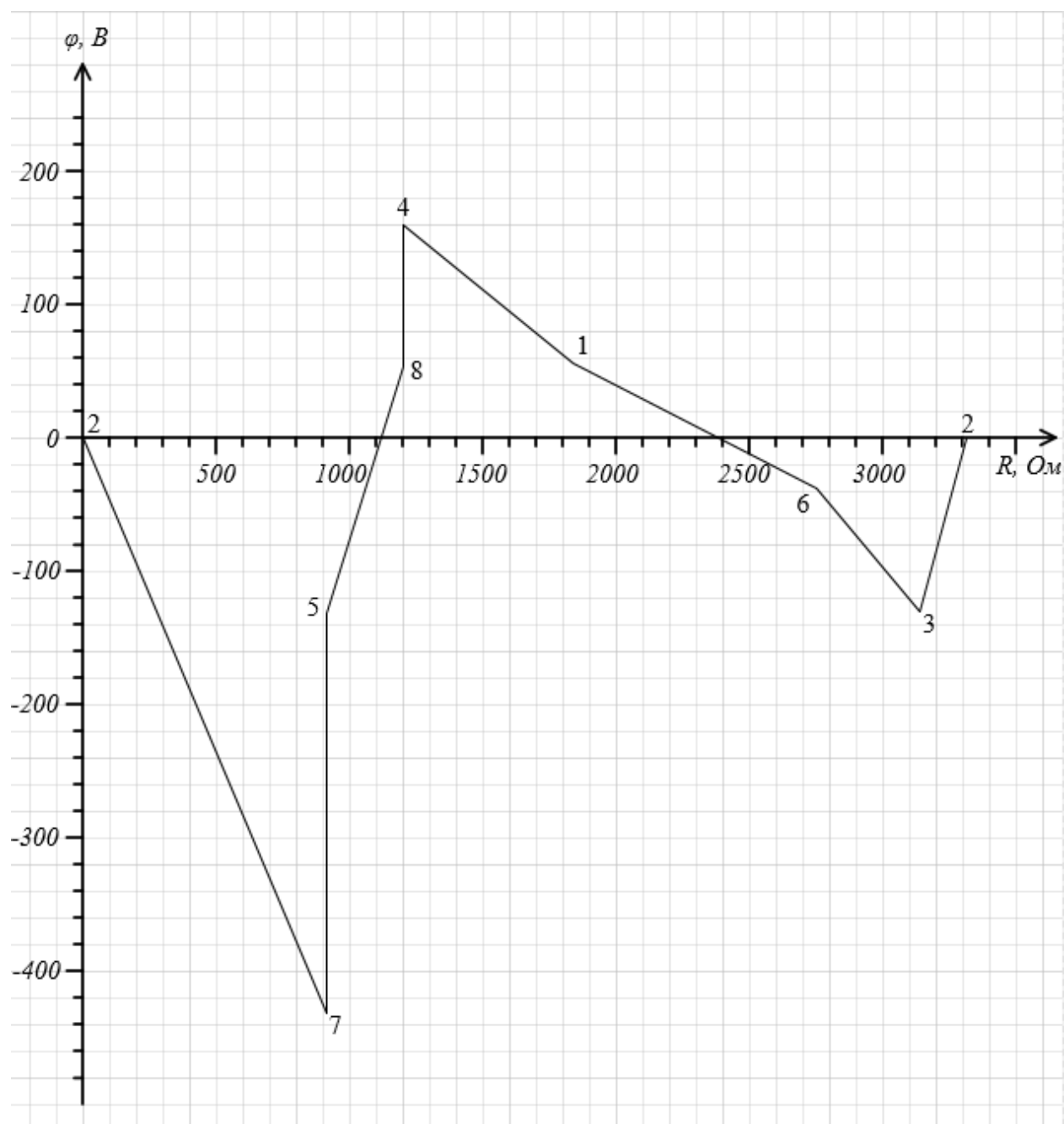


Рисунок 19

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Определение токов методом законов Кирхгофа (расчеты MATHCAD)

$R_1 := 910$	$R_5 := 390$	$J_{02} := 1$	$E_8 := 200$
$R_2 := 290$	$R_6 := 170$	$J_{06} := 1$	
$R_3 := 640$	$E_2 := 100$	$R_7 := 650$	
$R_4 := 910$	$E_1 := 300$	$R_8 := 920$	
<div> <div>Ограничения/начальные приближения</div> <div> <math>I_1 := 0</math>  <math>I_2 := 0</math>  <math>I_3 := 0</math>  <math>I_4 := 0</math> </div> <div> <math>I_5 := 0</math>  <math>I_6 := 0</math>  <math>I_7 := 0</math>  <math>I_8 := 0</math> </div> </div>			
<div> <div>Решатель</div> <div> <math>I_3 = I_4</math>  <math>I_7 + I_6 + J_{06} = I_1</math>  <math>I_5 = J_{06} + I_6</math>  <math>J_{02} + I_2 = I_3 + I_7</math>  <math>I_1 = I_8 + I_2 + J_{02}</math> </div> <div> <math>I_1 \cdot R_1 + I_8 \cdot R_8 + I_5 \cdot R_5 + I_6 \cdot R_6 = E_1 + E_8</math>  <math>I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 + I_4 \cdot R_4 - I_8 \cdot R_8 = E_2 - E_8</math>  <math>-I_7 \cdot R_7 - I_2 \cdot R_2 - I_1 \cdot R_1 = -E_2 - E_1</math> </div> </div>			
<div> <div>Решатель</div> <div> <math>\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \end{bmatrix} := \text{find}(I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8)</math> </div> </div>			
$I_1 = 0.474$	$I_5 = 0.238$		
$I_2 = -0.64$	$I_6 = -0.762$		
$I_3 = 0.123$	$I_7 = 0.237$		
$I_4 = 0.123$	$I_8 = 0.114$		

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Определение токов методом контурных токов (расчеты MATHCAD)

$R_1 := 910$	$R_5 := 390$	$J_{02} := 1$	$E_8 := 200$
$R_2 := 290$	$R_6 := 170$	$J_{06} := 1$	
$R_3 := 640$	$E_2 := 100$	$R_7 := 650$	
$R_4 := 910$	$E_1 := 300$	$R_8 := 920$	

Ограничения Начальные приближения

$I_{11} := 0$   
 $I_{22} := 0$   
 $I_{33} := 0$   
 $I_{44} := 0$   
 $I_{55} := 0$

Ограничения

$I_{44} = J_{06}$   
 $I_{55} = J_{02}$   
 $I_{11} \cdot (R_1 + R_8 + R_5 + R_6) - I_{22} \cdot R_8 - I_{33} \cdot R_1 - I_{44} \cdot R_6 = E_1 + E_8$   
 $I_{22} \cdot (R_2 + R_3 + R_4 + R_8) - I_{11} \cdot R_8 - I_{33} \cdot R_2 - I_{55} \cdot R_2 = E_2 - E_8$   
 $I_{33} \cdot (R_1 + R_7 + R_2) - I_{11} \cdot R_1 - I_{22} \cdot R_2 + I_{55} \cdot R_2 = -E_2 - E_1$

Решатель

$$\begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \\ I_{44} \\ I_{55} \end{bmatrix} := \text{find}(I_{11}, I_{22}, I_{33}, I_{44}, I_{55})$$

$I_{11} = 0.238$	$I_{22} = 0.123$	$I_{33} = -0.237$
$I_1 := I_{11} - I_{33} = 0.474$	$I_5 := I_{11} = 0.238$	
$I_2 := I_{22} - I_{33} - I_{55} = -0.64$	$I_6 := I_{11} - I_{44} = -0.762$	
$I_3 := I_{22} = 0.123$	$I_7 := -I_{33} = 0.237$	
$I_4 := I_{22} = 0.123$	$I_8 := I_{11} - I_{22} = 0.114$	

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Определение токов методом узловых напряжений (расчеты MATHCAD)

	$R_1 := 910$	$R_5 := 390$	$J_{02} := 1$	$E_8 := 200$
	$R_2 := 290$	$R_6 := 170$	$J_{06} := 1$	
	$R_3 := 640$	$E_2 := 100$	$R_7 := 650$	
	$R_4 := 910$	$E_1 := 300$	$R_8 := 920$	$\phi_5 := 0$
Начальные приближения	$\phi_2 := 0$			
	$\phi_3 := 0$			
Ограничения	$\phi_4 := 0$			
	$\phi_6 := 0$			
	$\phi_2 \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7} \right) - \phi_3 \cdot \frac{1}{R_6} - \phi_4 \cdot \frac{1}{R_7} - \phi_6 \cdot 0 = J_{06} - \frac{E_1}{R_1}$			
	$-\phi_2 \cdot \frac{1}{R_6} + \phi_3 \cdot \left( \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_5} \right) - \phi_4 \cdot 0 - \phi_6 \cdot \frac{1}{R_5} = -J_{06}$			
	$-\phi_2 \cdot \frac{1}{R_7} - \phi_3 \cdot 0 + \phi_4 \cdot \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4} + \frac{1}{R_7} \right) - \phi_6 \cdot \left( \frac{1}{R_3 + R_4} \right) = J_{02} + \frac{E_2}{R_2}$			
Решатель	$-\phi_2 \cdot 0 - \phi_3 \cdot \frac{1}{R_5} - \phi_4 \cdot \left( \frac{1}{R_3 + R_4} \right) + \phi_6 \cdot \left( \frac{1}{R_4 + R_3} + \frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_5} \right) = \frac{E_8}{R_8}$			
	$\begin{bmatrix} \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \phi_6 \end{bmatrix} := \text{find}(\phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_6)$			
	$\phi_2 = 131.688$	$\phi_3 = 2.075$	$\phi_4 = 285.612$	$\phi_6 = 94.729$
	$I_1 := \frac{\phi_2 - \phi_5 + E_1}{R_1} = 0.474$	$I_4 := \frac{\phi_4 - \phi_6}{R_3 + R_4} = 0.123$	$I_7 := \frac{\phi_4 - \phi_2}{R_7} = 0.237$	
	$I_2 := \frac{\phi_5 - \phi_4 + E_2}{R_2} = -0.64$	$I_5 := \frac{\phi_6 - \phi_3}{R_5} = 0.238$	$I_8 := \frac{\phi_5 - \phi_6 + E_8}{R_8} = 0.114$	
	$I_3 := \frac{\phi_4 - \phi_6}{R_3 + R_4} = 0.123$	$I_6 := \frac{\phi_3 - \phi_2}{R_6} = -0.762$		