

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный исследовательский университет

«Московский институт электронной техники»

Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина

Курсовая работа

По дисциплине

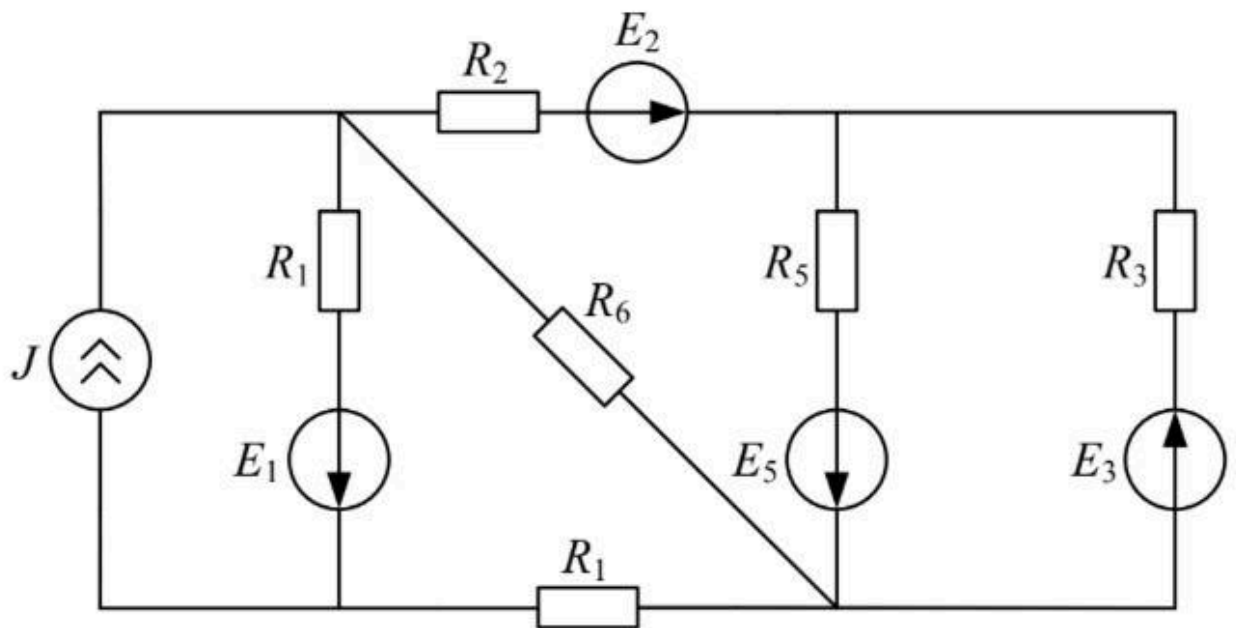
«Электротехника»

Вариант 26

Выполнила: Чурина Маргарита Эн-22

Москва 2025

## Часть 1



Параметры схемы

$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$	$J$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$
В						А	Ом						
10	12	14	8	15	20	6	6	3	4	1	5	10	3

1.МЭП (Метод эквивалентных преобразований) – найти ток в любой ветви схемы.

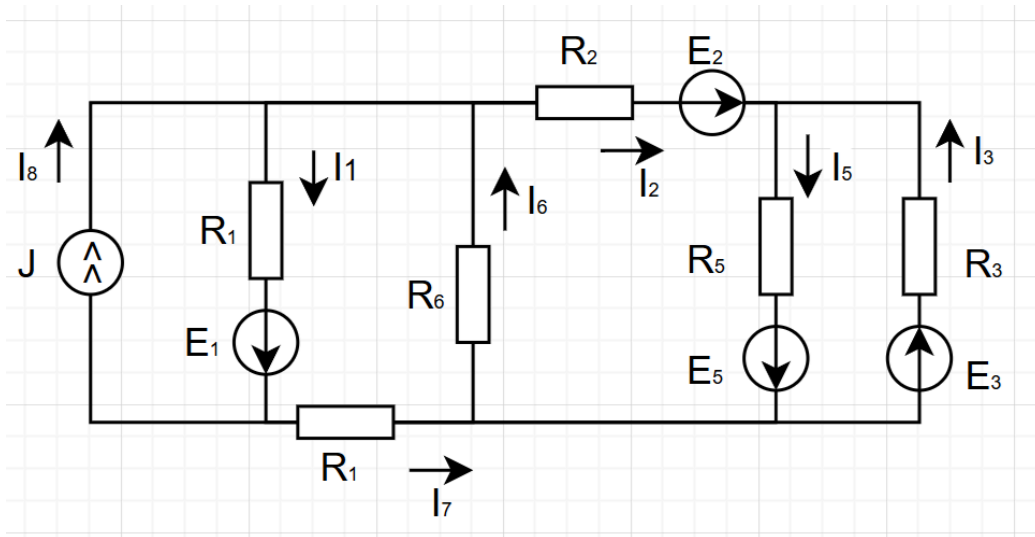


Рисунок 1.

Преобразуем реальные источники ЭДС ветвей 1, 3, 5 в реальные источники тока.

$$J_5 = \frac{E_5}{R_5} = \frac{15}{5} = 3 \text{ A}$$

$$J_3 = \frac{E_3}{R_3} = \frac{14}{4} \text{ A}$$

$$J_1 = \frac{E_1}{R_1} = \frac{10}{6} \text{ A}$$

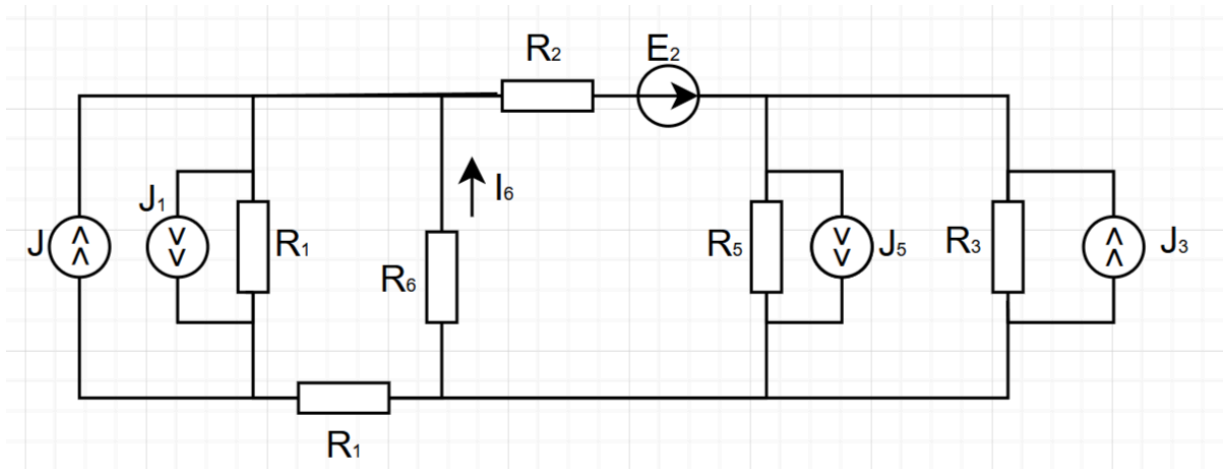


Рисунок 2.

Параллельно соединенные сопротивления  $R_3$  и  $R_5$ , а также источники тока  $J_3$  и  $J_5$  заменяем эквивалентными  $R_{53}$  и  $J_{53}$ .

$$R_{53} = \frac{R_5 \cdot R_3}{R_5 + R_3} = \frac{5 \cdot 4}{5 + 4} = \frac{20}{9} \text{ Ом}$$

$$J_{53} = J_3 - J_5 = \frac{14}{4} - 3 = 0,5 \text{ А}$$

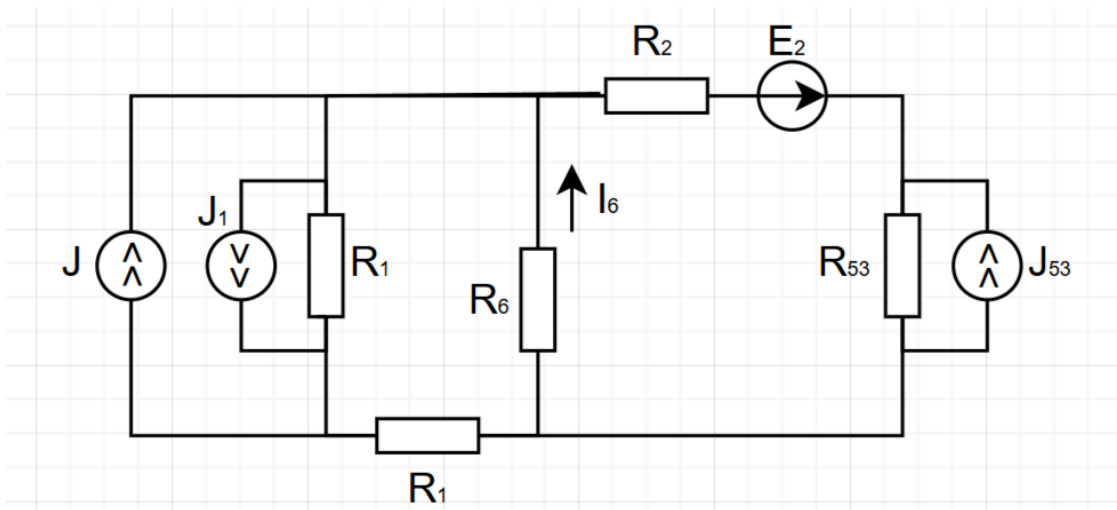


Рисунок 3.

Реальный источник тока ( $J_{53}$ ,  $R_{53}$ ) заменим на реальный источник ЭДС ( $E_{53}$ ,  $R_{53}$ ).

$$E_{53} = J_{53} \cdot R_{53} = 0,5 \cdot \frac{20}{9} = \frac{10}{9} \text{ В}$$

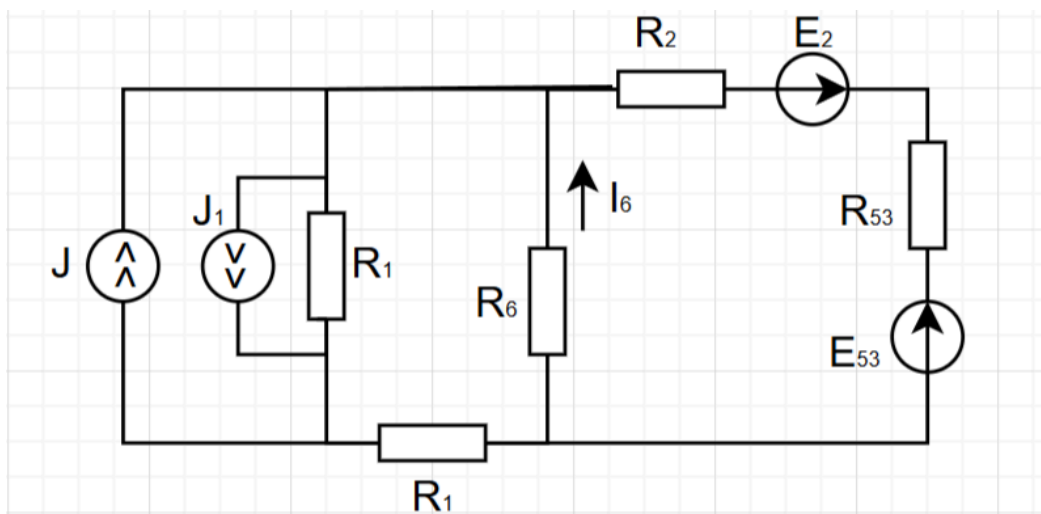


Рисунок 4.

Последовательно соединенные сопротивления  $R_{53}$  и  $R_2$ , а также источники ЭДС заменим на эквивалентные  $R_{235}$  и  $E_{235}$ .

$$E_{235} = E_{53} - E_2 = \frac{10}{9} - 12 = -\frac{98}{9} \text{ В}$$

$$R_{235} = R_{53} + R_2 = \frac{20}{9} + 3 = \frac{47}{9} \text{ Ом}$$

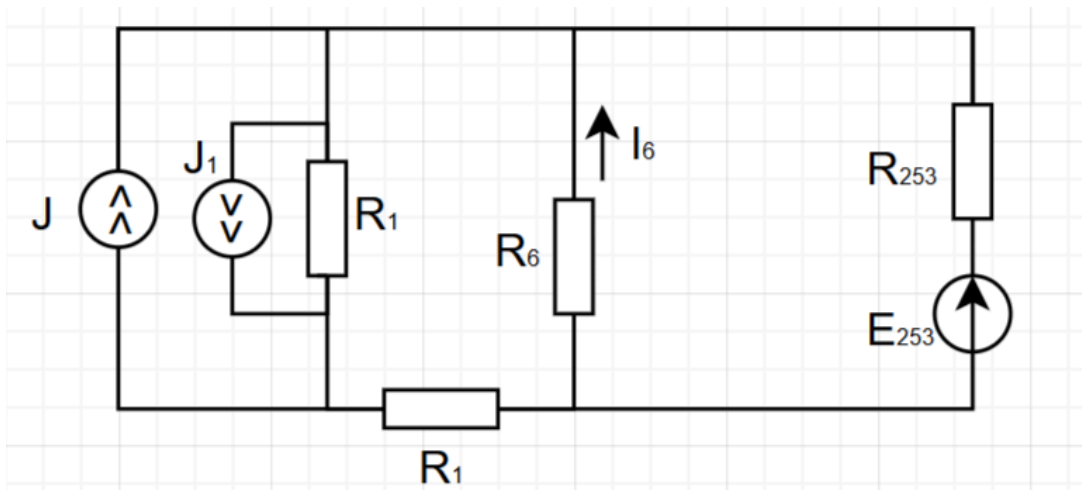


Рисунок 5.

Параллельно соединенные источники тока  $J$  и  $J_1$  заменяем эквивалентным  $J_{11}$ .

$$J_{11} = J_1 - J = \frac{10}{6} - 6 = -\frac{13}{3} \text{ А}$$

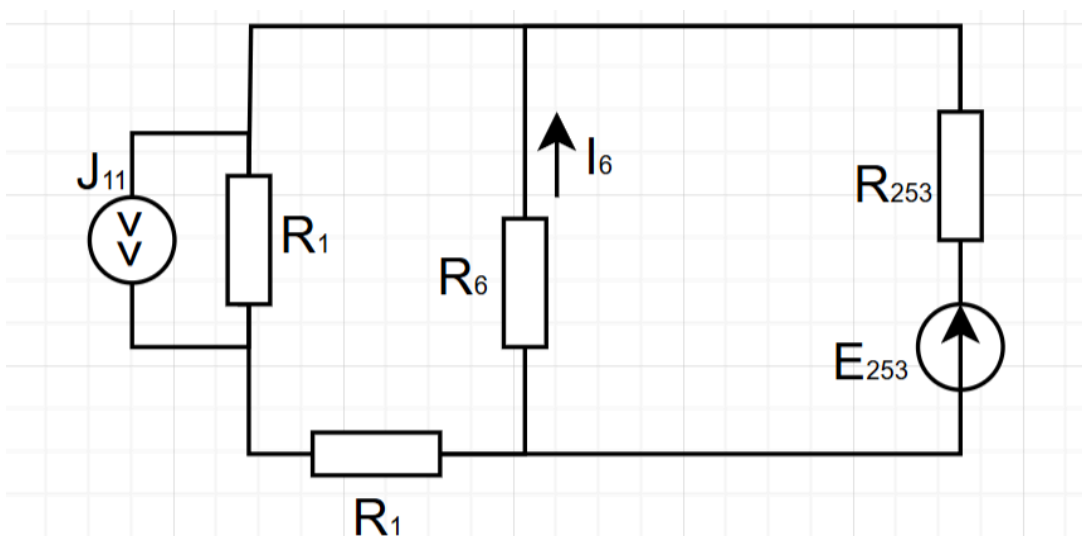


Рисунок 6.

Реальный источник тока ( $J_{11}$ ,  $R_1$ ) заменим на реальный источник ЭДС ( $E_{11}$ ,  $R_1$ ).

$$E_{11} = J_{11} \cdot R_1 = -\frac{13}{3} \cdot 6 = -26 \text{ В}$$

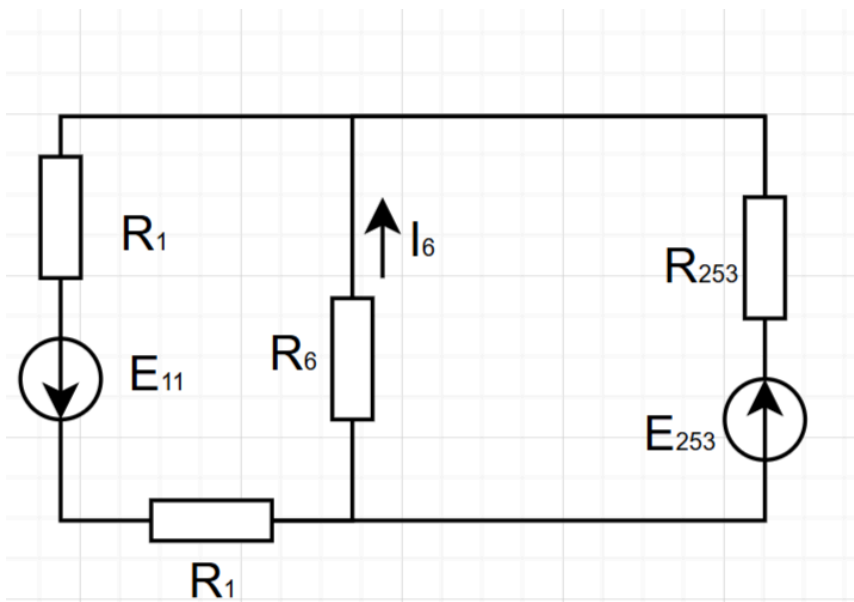


Рисунок 7.

Последовательно соединенные сопротивления  $R_1$  и  $R_1$  заменим на эквивалентное  $R_{11}$ .

$$R_{11} = R_1 + R_1 = 6 + 6 = 12 \text{ Ом}$$

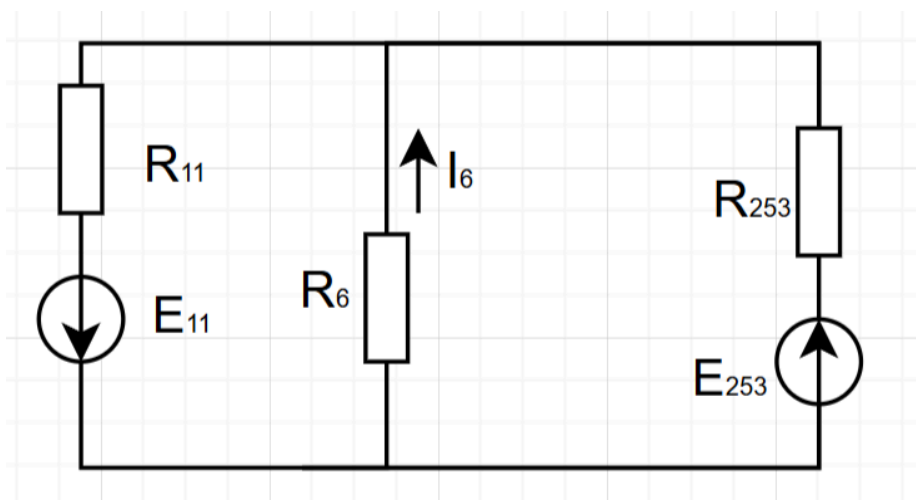


Рисунок 8.

Преобразуем реальный источник ЭДС ветви 11, 235 в реальные источники тока.

$$J'_{11} = \frac{E_{11}}{R_{11}} = \frac{-26}{12} \text{ A}$$

$$J_{235} = \frac{E_{235}}{R_{235}} = \frac{-98}{9} : \frac{47}{9} = -\frac{98}{47} \text{ A}$$

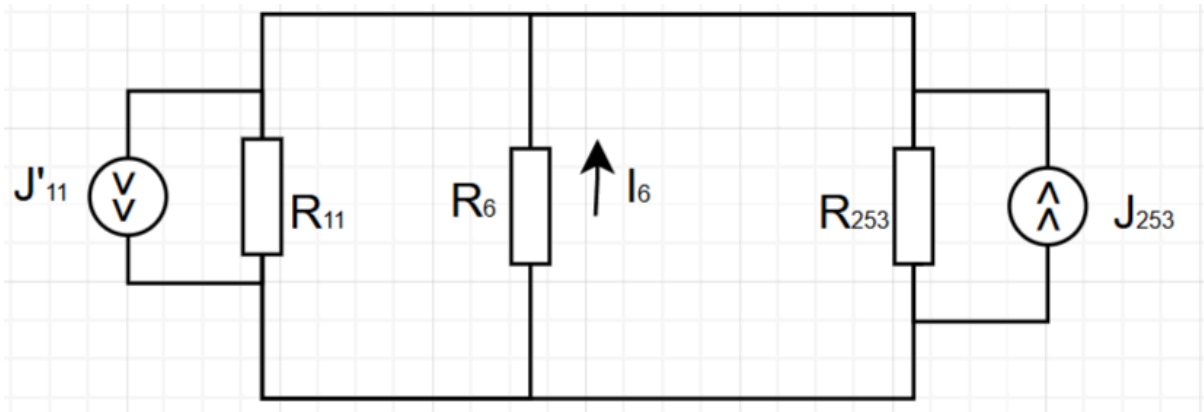


Рисунок 9.

Параллельно соединенные сопротивления  $R_{11}$  и  $R_{235}$ , а также источники тока  $J'_{11}$  и  $J_{235}$  заменяем эквивалентными  $R_{\text{ЭКВ}}$  и  $J_{\text{ЭКВ}}$ .

$$J_{\text{ЭКВ}} = J'_{11} - J_{235} = \frac{-26}{12} + \frac{98}{47} = -\frac{23}{282} \text{ A}$$

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_{11} \cdot R_{235}}{R_{11} + R_{235}} = \frac{12 \cdot \frac{47}{9}}{12 + \frac{47}{9}} = \frac{564}{155} \text{ Ом}$$

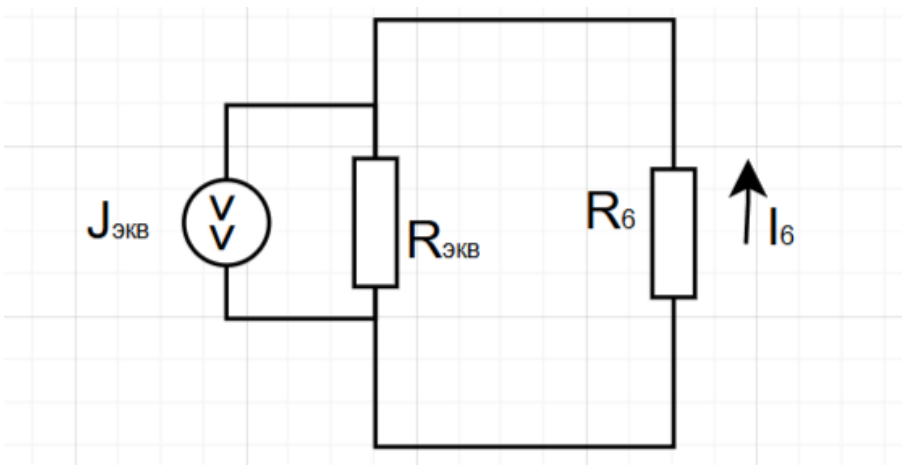


Рисунок 10.

Реальный источник тока ( $J_{\text{ЭКВ}}$ ,  $R_{\text{ЭКВ}}$ ) заменим на реальный источник ЭДС ( $E_{\text{ЭКВ}}$ ,  $R_{\text{ЭКВ}}$ ).

$$E_{\text{ЭКВ}} = J_{\text{ЭКВ}} \cdot R_{\text{ЭКВ}} = -\frac{23}{282} \cdot \frac{564}{155} = -\frac{46}{155} \text{ В}$$

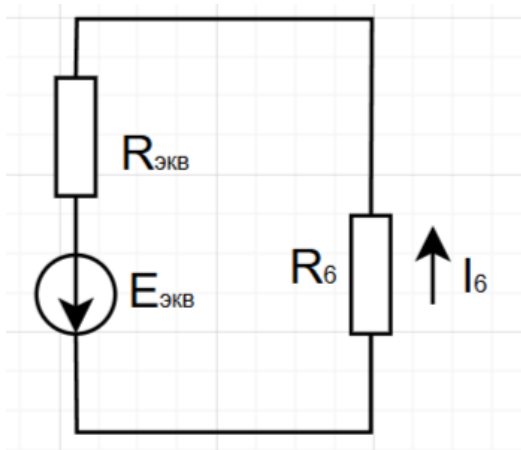


Рисунок 11.

По закону Ома найдем ток  $I_6$ ,  $R_{\text{ЭКВ}}$  и  $R_6$  соединены последовательно.

$$I_6 = \frac{E_{\text{ЭКВ}}}{R_{\text{ЭКВ}} + R_6} = -\frac{46}{155} : \left( \frac{564}{155} + 10 \right) = -\frac{23}{1057} = -0,0218 \text{ А}$$



2. Законы Кирхгофа (найти все токи в ветвях).

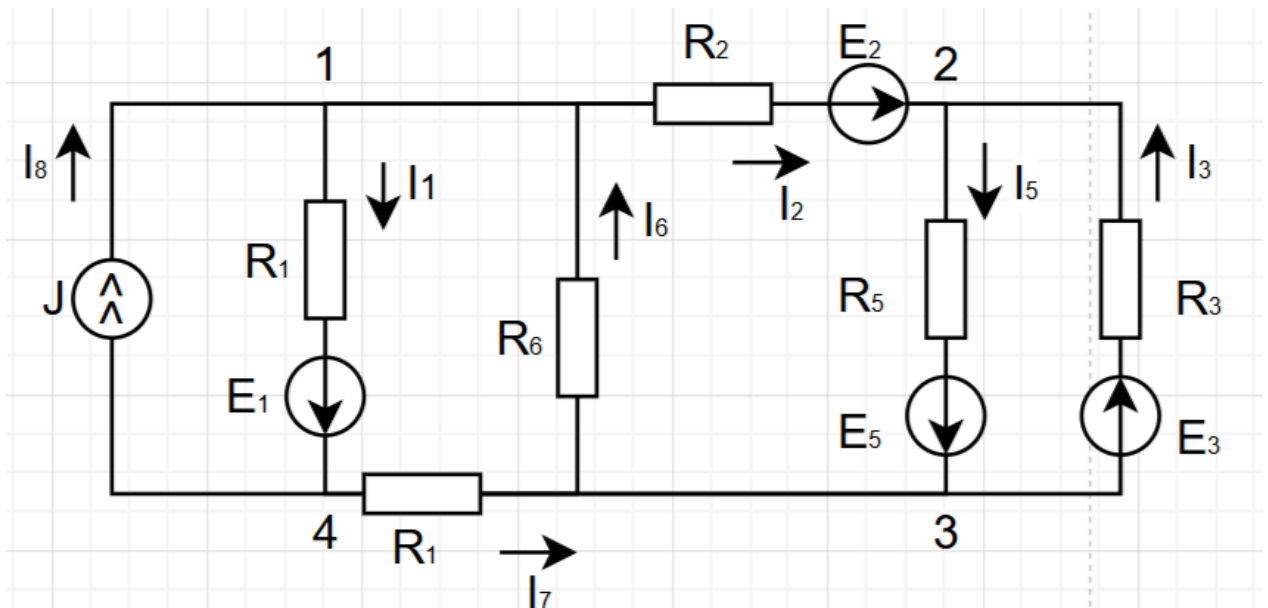


Рисунок 12.

Составим  $N_1$  уравнений по первому закону Кирхгофа и  $N_2$  уравнений по второму закону Кирхгофа.

$$N_1 = n - 1 = 4 - 1 = 3, N_2 = v - (n-1) - \sum_k J_k = 7 - (4-1) - 1 = 3; \text{ где } n - \text{ общее}$$

число узлов,  $v$  - общее число ветвей,  $\sum_k J_k$  - число ветвей, содержащих источник тока.

Для всех узлов, кроме четвертого, запишем уравнения по первому закону Кирхгофа:

$$I_6 + J - I_1 - I_2 = 0$$

$$I_2 + I_3 - I_5 = 0$$

$$I_5 + I_7 - I_6 - I_3 = 0$$

Выбираем независимые контуры и обозначаем произвольно направления их обхода.

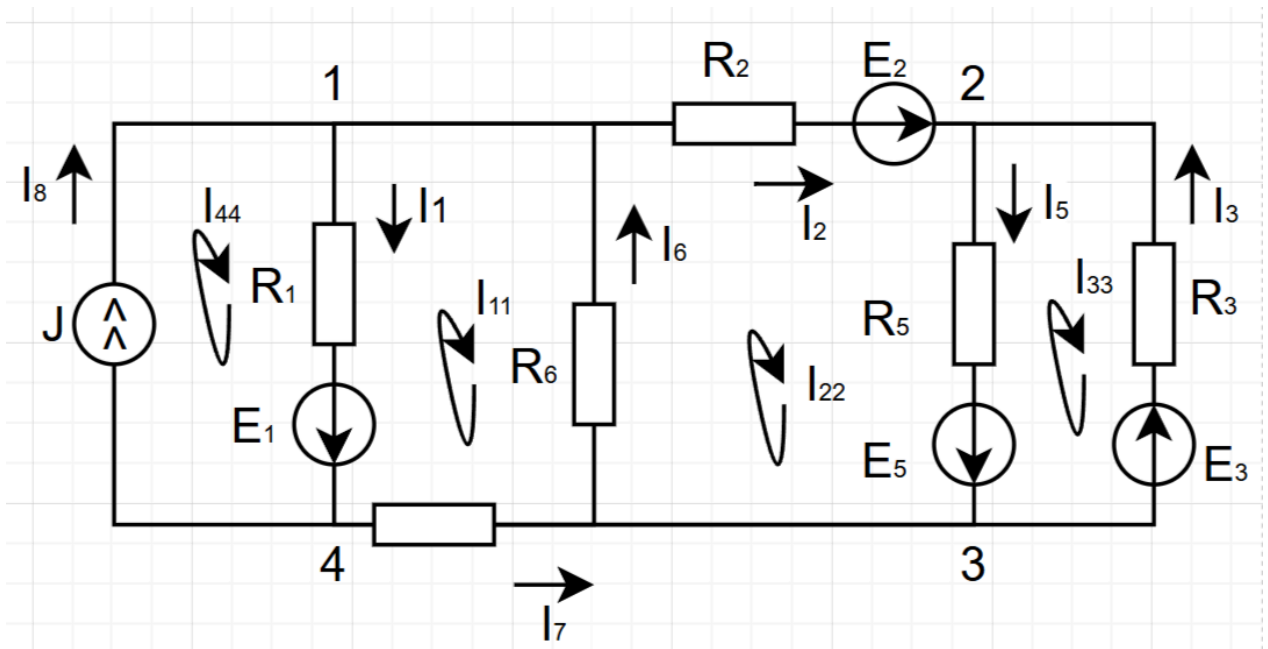


Рисунок 13.

Составляем уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$I_2 R_2 + I_5 R_5 + I_6 R_6 = E_2 + E_5$$

$$-I_6 R_6 - I_1 R_1 - I_7 R_7 = -E_1$$

$$-I_3 R_3 - I_5 R_5 = -E_5 - E_3$$

При решении двух систем, находим токи.

$$I_1 = 3,852 \text{ A}$$

$$I_2 = 2,127 \text{ A}$$

$$I_3 = 2,041 \text{ A}$$

$$I_5 = 4,168 \text{ A}$$

$$I_6 = -0,0218 \text{ A}$$

$$I_7 = -2,149 \text{ A}$$

3. МКТ (Метод контурных токов) – найти токи во всех ветвях.

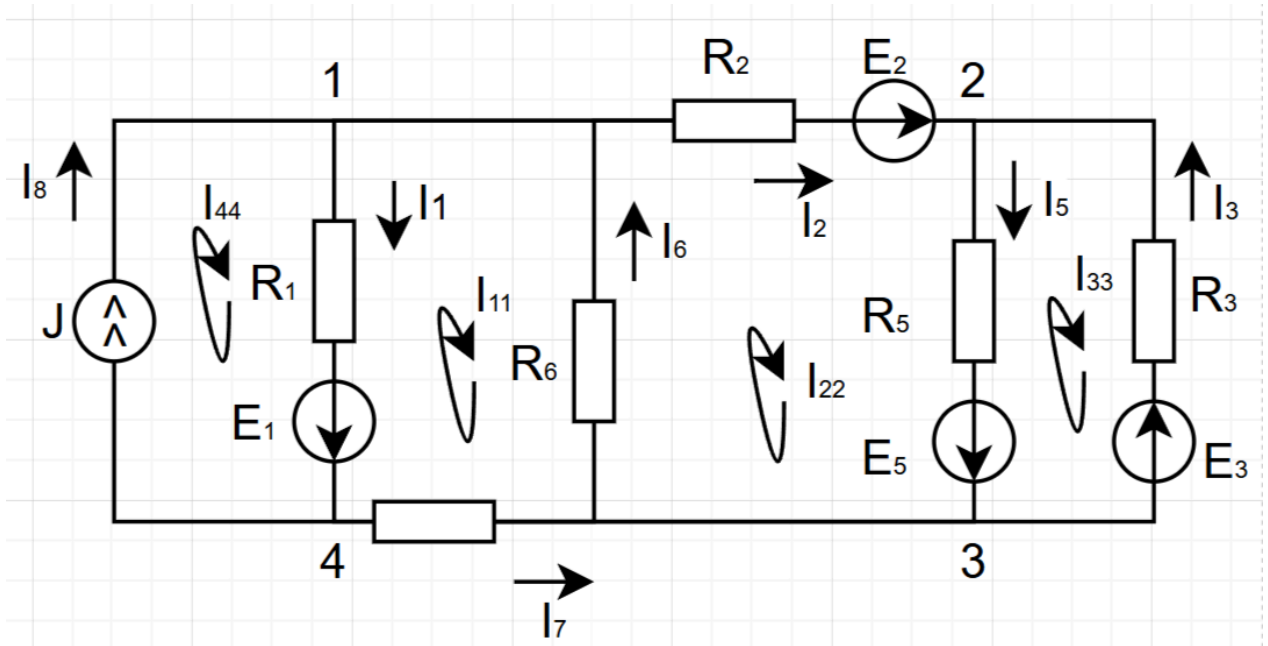


Рисунок 14.

Число уравнений, составляемых по МКТ:  $N = v - (n-1) - \sum_k J_k$

$$N = 7 - (4-1) - 1 = 3.$$

Записываем уравнения по второму закону Кирхгофа.

$$I_2 R_2 + I_5 R_5 + I_6 R_6 = E_2 + E_5$$

$$-I_6 R_6 - I_1 R_1 - I_7 R_7 = -E_1$$

$$-I_3 R_3 - I_5 R_5 = -E_5 - E_3$$

Выражаем токи ветвей через контурные токи. В периферийных ветвях контурные токи равны токам ветвей, в смежных ветвях токи равны алгебраической сумме контурных токов, протекающих в них.

$$I_1 = I_{44} - I_{11}$$

$$I_2 = I_{22}$$

$$I_3 = -I_{33}$$

$$I_5 = I_{22} + I_{33}$$

$$I_6 = -I_{11} + I_{22}$$

$$I_7 = - I_{11}$$

$$I_8 = I_{44}$$

Подставляем в уравнения второго закона Кирхгофа вместо токов ветвей их выражения через контурные токи, раскрываем скобки.

$$I_{11}(R_1 + R_1 + R_6) - I_{22}R_6 - I_{44}R_1 = - E_1$$

$$I_{22}(R_6 + R_2 + R_5) - I_{11}R_6 - I_{33}R_5 = E_2 + E_5$$

$$I_{33}(R_5 + R_3) - I_{22}R_5 = - E_5 - E_3$$

Решая систему, находим токи.

$$I_{11} = 2,15 \text{ A}$$

$$I_{22} = 2,13 \text{ A}$$

$$I_{33} = - 2,04 \text{ A}$$

$$I_1 = I_{44} - I_{11} = 6 - 2,15 = 3,85 \text{ A}$$

$$I_2 = I_{22} = 2,13 \text{ A}$$

$$I_3 = - I_{33} = 2,04 \text{ A}$$

$$I_5 = I_{22} + I_{33} = 2,13 + 2,04 = 4,17 \text{ A}$$

$$I_6 = - I_{11} + I_{22} = - 2,15 + 2,13 = - 0,02 \text{ A}$$

$$I_7 = - I_{11} = -2,15 \text{ A}$$

4. МУП (Метод узловых потенциалов) – найти токи во всех ветвях.

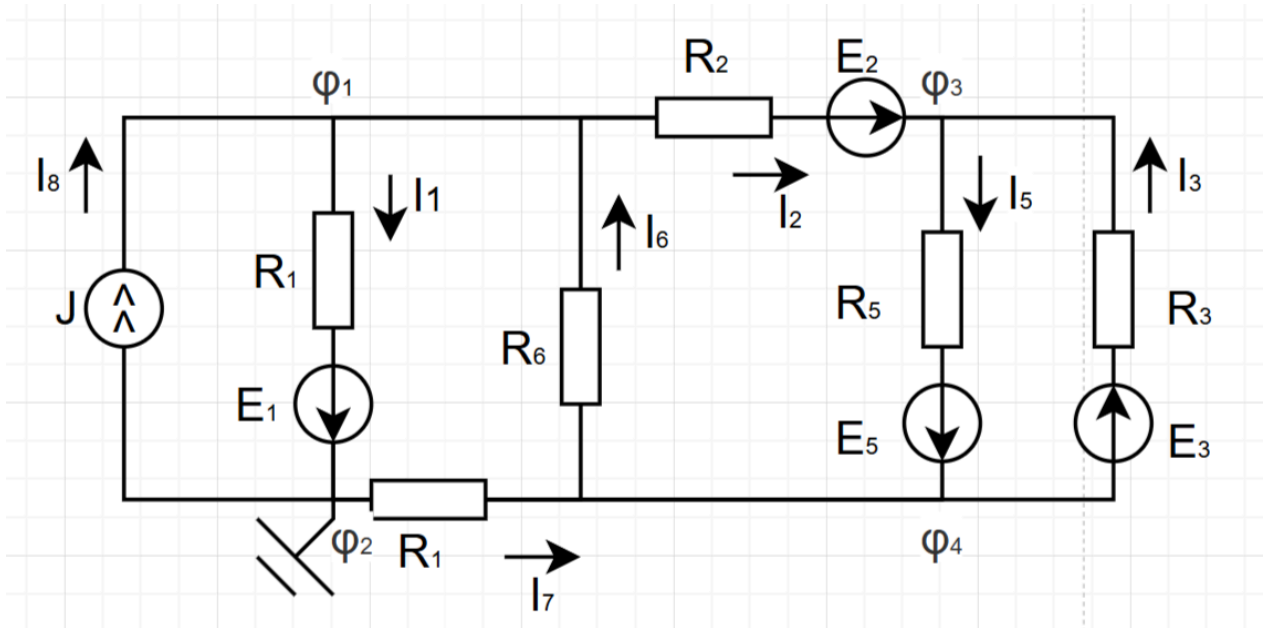


Рисунок 15.

Заземляем узел 2,  $\varphi_2 = 0$ .

Число уравнений, составляемых по МУП, для узлов (кроме заземленного) :  $N = n - 1 = 4 - 1 = 3$ .

Определяем значения  $g$ .

$$g_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{6} \frac{1}{\text{Ом}}$$

$$g_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{3} \frac{1}{\text{Ом}}$$

$$g_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{4} \frac{1}{\text{Ом}}$$

$$g_5 = \frac{1}{R_5} = \frac{1}{5} \frac{1}{\text{Ом}}$$

$$g_6 = \frac{1}{R_6} = \frac{1}{10} \frac{1}{\text{Ом}}$$

Запишем уравнения для токов ветвей по обобщенному закону Ома.

$$I_1 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + E_1}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_3 + E_2}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{\varphi_4 - \varphi_3 + E_3}{R_3}$$

$$I_5 = \frac{\varphi_3 - \varphi_4 + E_5}{R_5}$$

$$I_6 = \frac{\varphi_4 - \varphi_1}{R_6}$$

$$I_7 = \frac{\varphi_2 - \varphi_4}{R_1}$$

Запишем систему уравнений относительно потенциалов узлов.

$$\varphi_1(g_2 + g_1 + g_6) - \varphi_3 g_2 - \varphi_4 g_6 = -E_1 g_1 - E_2 g_2 + J$$

$$\varphi_3(g_2 + g_5 + g_3) - \varphi_1 g_2 - \varphi_4(g_5 + g_3) = E_2 g_2 - E_5 g_5 + E_3 g_3$$

$$\varphi_4(g_1 + g_6 + g_5 + g_3) - \varphi_1 g_6 - \varphi_3(g_5 + g_3) = E_5 g_5 - E_3 g_3$$

Решая систему, находим потенциалы.

$$\varphi_1 = 13,109 \text{ В}$$

$$\varphi_3 = 18,728 \text{ В}$$

$$\varphi_4 = 12,891 \text{ В}$$

Подставляя в формулы для токов потенциалы, находим токи.

$$I_1 = \frac{13,109 + 10}{6} = 3,85 \text{ А}$$

$$I_2 = \frac{13,109 - 18,728 + 12}{3} = 2,127 \text{ А}$$

$$I_3 = \frac{12,891 - 18,728 + 14}{4} = 2,04 \text{ А}$$

$$I_5 = \frac{18,728 - 12,891 + 15}{5} = 4,17 \text{ А}$$

$$I_6 = \frac{12,891 - 13,109}{10} = -0,0218 \text{ A}$$

$$I_7 = \frac{-12,891}{6} = -2,149 \text{ A}$$

5. МЭГ (Метод эквивалентного генератора) – найти ток в любой ветви.

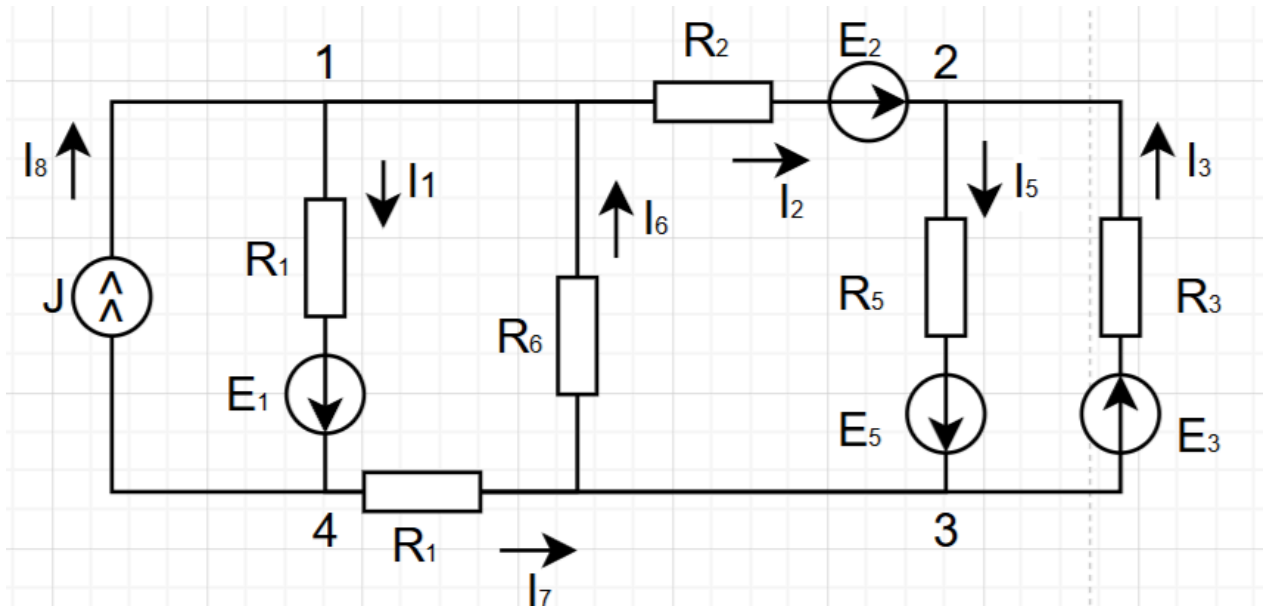


Рисунок 16.

Удаляем из электрической цепи шестую ветвь.

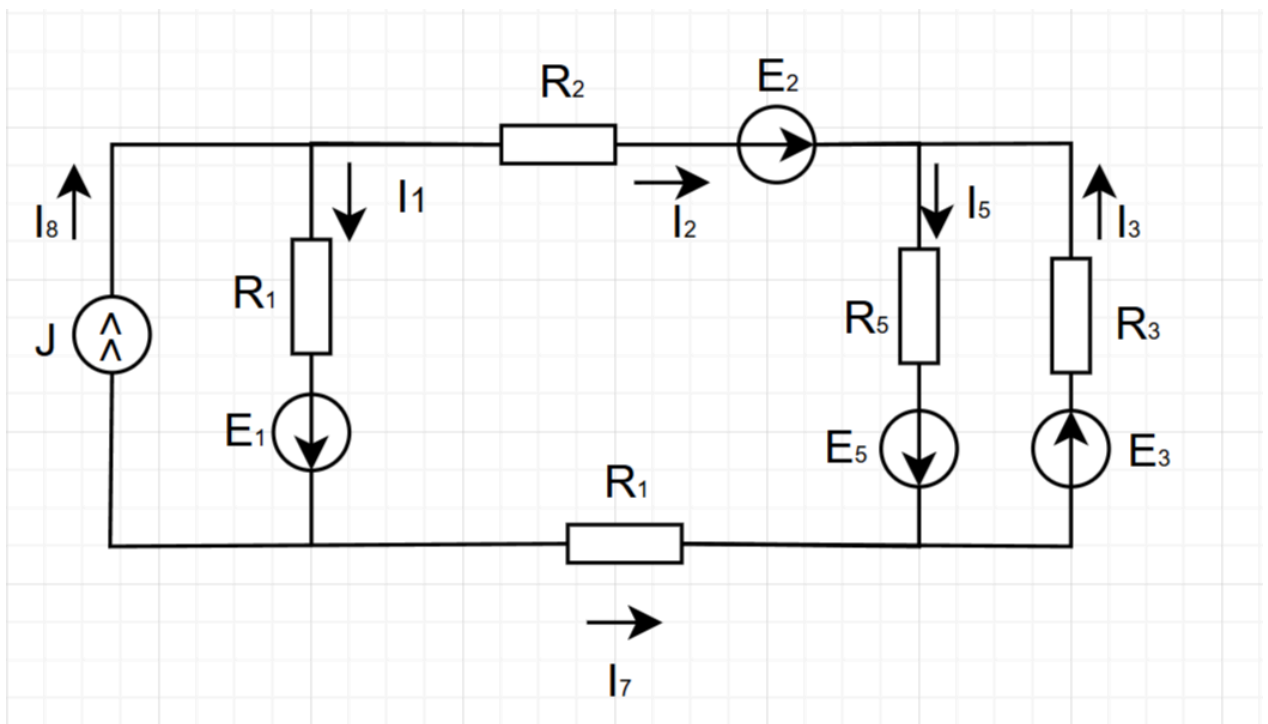


Рисунок 17.

Для определения  $U_{xx}$  находим токи  $I_1$  и  $I_7$ . Для этого воспользуемся методом контурных токов.



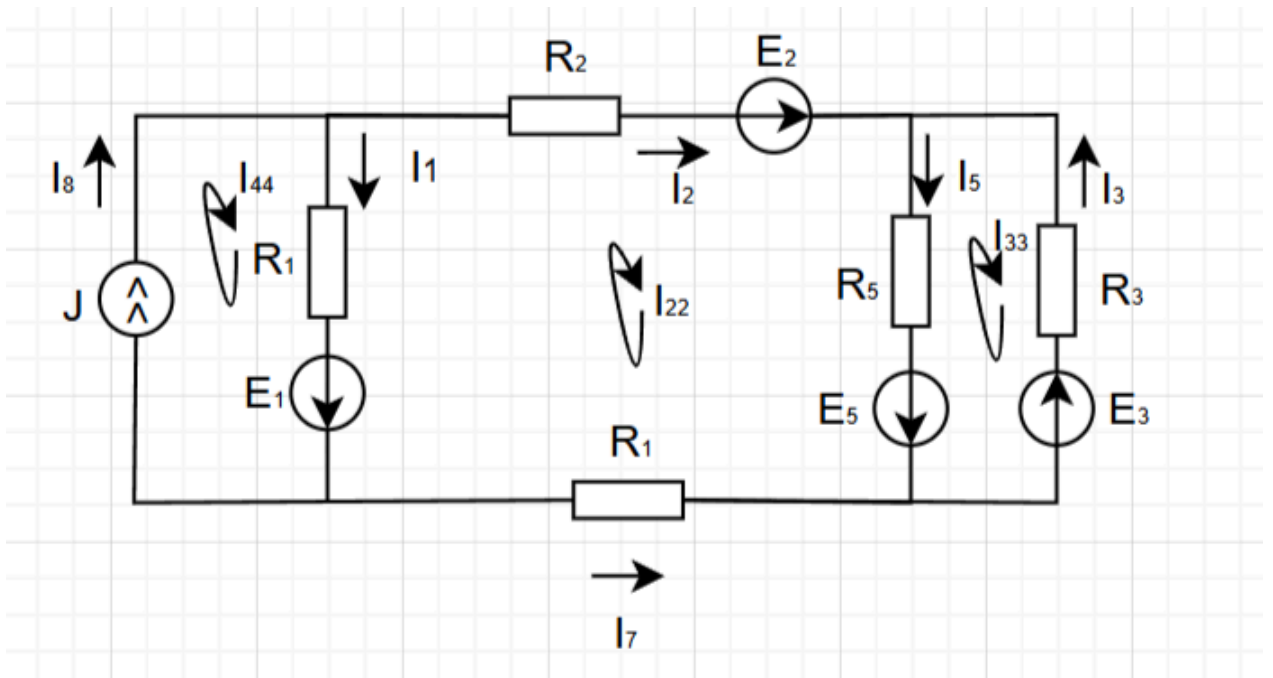


Рисунок 18.

Число уравнений, составляемых по МКТ:  $N = \nu - (n-1) - \sum_k J_k$

$$N = 6 - (4-1) - 1 = 2.$$

Записываем уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$I_2 R_2 + I_5 R_5 + I_6 R_6 = E_2 + E_5$$

$$-I_6 R_6 - I_1 R_1 = -E_1$$

$$-I_3 R_3 - I_5 R_5 = -E_5 - E_3$$

Выражаем токи ветвей через контурные токи. В периферийных ветвях контурные токи равны токам ветвей, в смежных ветвях токи равны алгебраической сумме контурных токов, протекающих в них.

$$J = I_{44}$$

$$I_1 = -I_{22} + I_{44}$$

$$I_7 = -I_{22}$$

Подставляем в уравнения второго закона Кирхгофа вместо токов ветвей их выражения через контурные токи, раскрываем скобки.

$$I_{22}(R_1 + R_2 + R_3 + R_5) - I_{33}R_5 - I_{44}R_1 = E_2 + E_5 - E_1$$

$$I_{33}(R_5 + R_3) - I_{22}R_5 = -E_5 - E_3$$

Решая систему, находим токи  $I_{22}$  и  $I_{33}$ .

$$I_{22} = 2,1419 \text{ A}$$

$$I_{33} = 2,0322 \text{ A}$$

Зная токи  $I_{22}$  и  $I_{33}$ , находим  $I_1$  и  $I_7$ .

$$I_1 = -2,1419 + 6 = 3,8581 \text{ A}$$

$$I_7 = -2,1419 \text{ A}$$

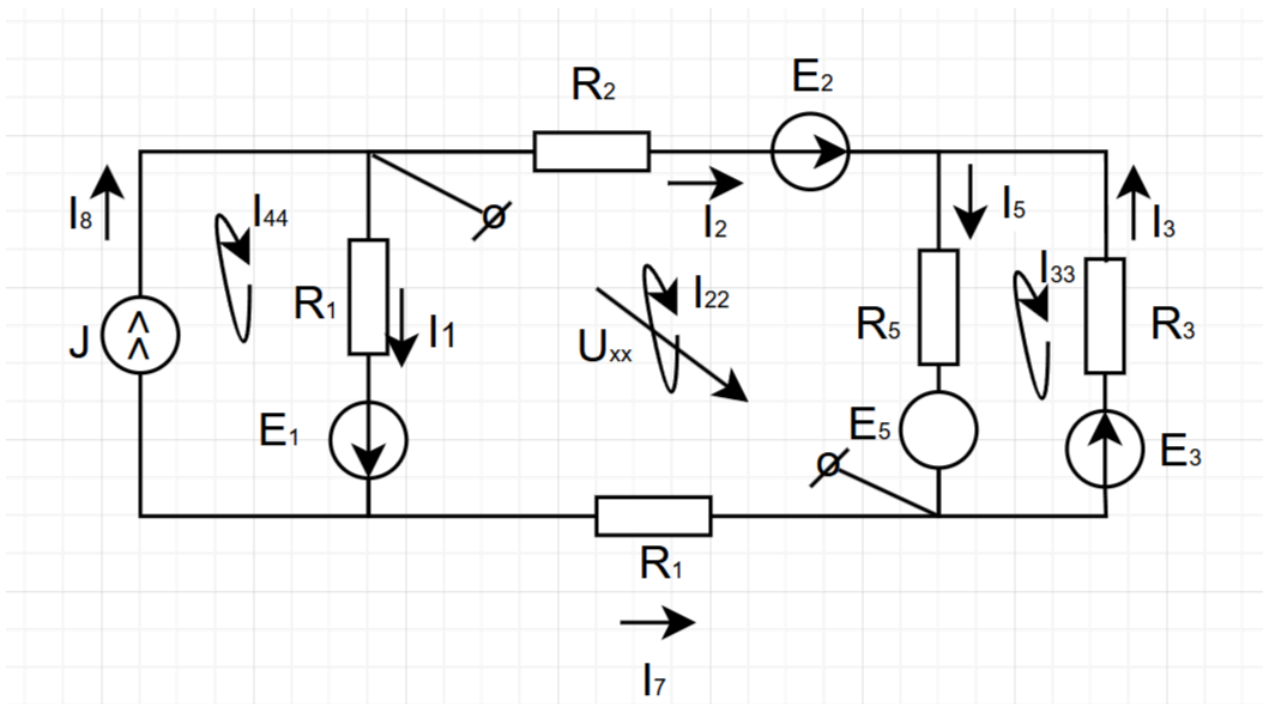


Рисунок 19.

Определяем  $U_{xx}$ ;  $U_{xx} = I_1 R_1 + I_7 R_1 - E_1 = E_{\text{ЭКВ}}$

$$E_{\text{ЭКВ}} = 3,85 \cdot 6 + 6 \cdot (-2,14) - 10 = 0,26 \text{ В}$$

Убираем из схемы все источники ЭДС и определяем внутреннее сопротивление.

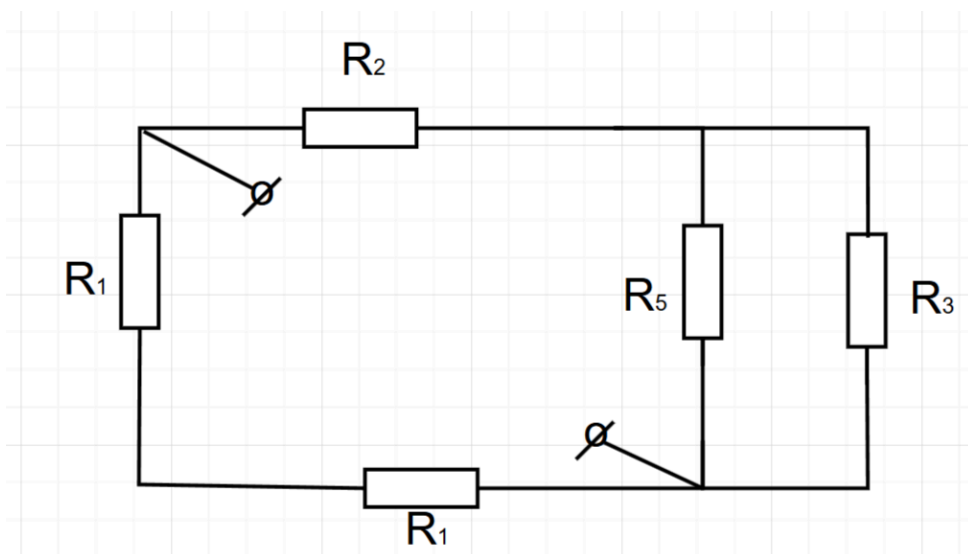


Рисунок 20.

Параллельно соединенные сопротивления  $R_3$  и  $R_5$  заменяем эквивалентным  $R_{53}$ .

$$R_{53} = \frac{R_5 \cdot R_3}{R_5 + R_3} = \frac{5 \cdot 4}{5 + 4} = \frac{20}{9} \text{ Ом}$$

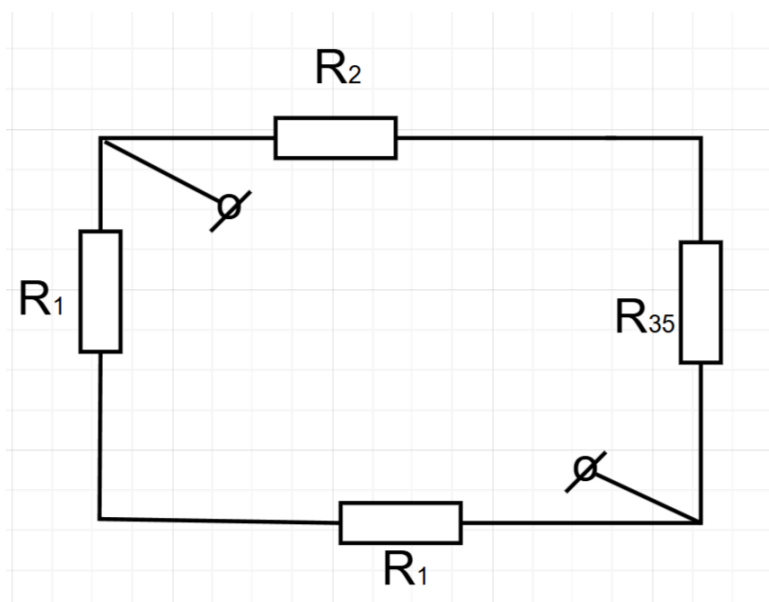


Рисунок 21.

Последовательно соединенные сопротивления  $R_1$  и  $R_1'$ ,  $R_2$  и  $R_{53}$  заменяем эквивалентными  $R_{11}$  и  $R_{235}$ .

$$R_{11} = R_1 + R_1' = 6 + 6 = 12 \text{ Ом}$$

$$R_{235} = R_2 + R_{35} = 3 + \frac{20}{9} = \frac{47}{9} \text{ Ом}$$

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_{11} \cdot R_{235}}{R_{11} + R_{235}} = \frac{12 \cdot \frac{47}{9}}{12 + \frac{47}{9}} = \frac{188}{83} \text{ Ом}$$

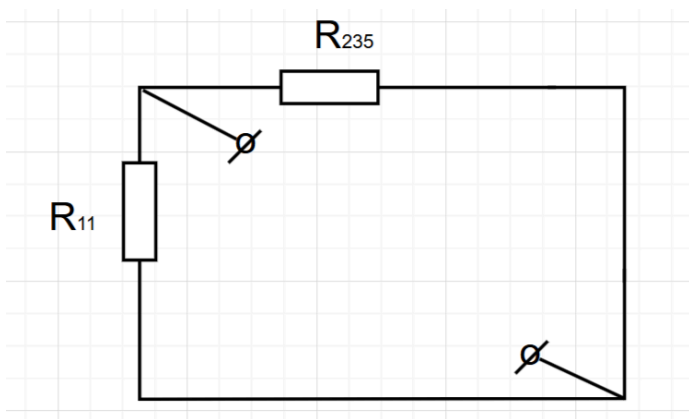


Рисунок 22.

После преобразований сопротивлений, получаем схему:

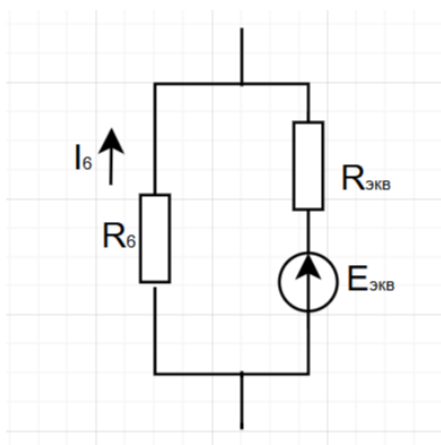


Рисунок 23.

$$I_6 = \frac{-E_{\text{ЭКВ}}}{R_6 + R_{\text{ЭКВ}}} = \frac{-0,26}{10 + \frac{188}{83}} = -0,021 \text{ А}$$

## 6. Схема в Multisim.

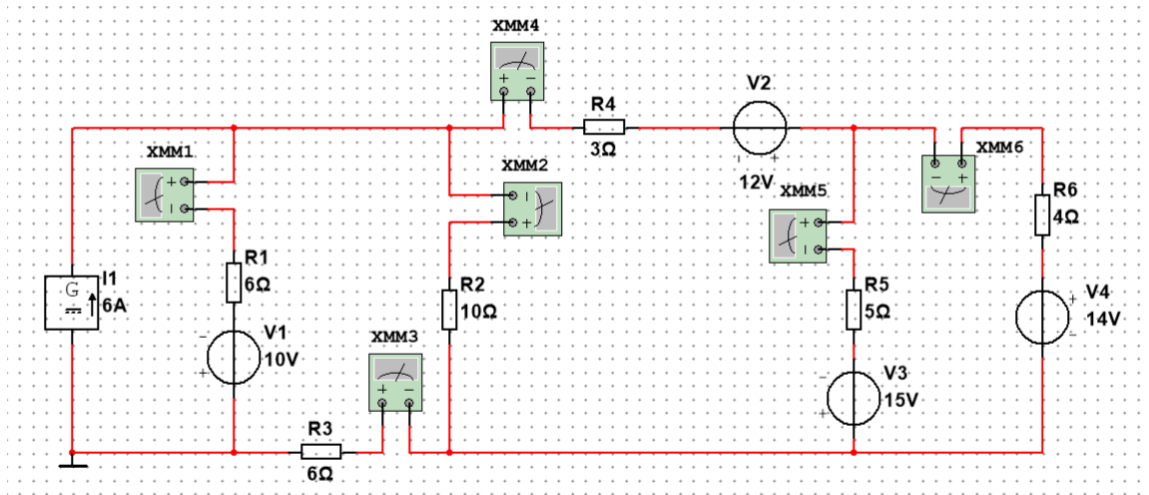


Рисунок 24.

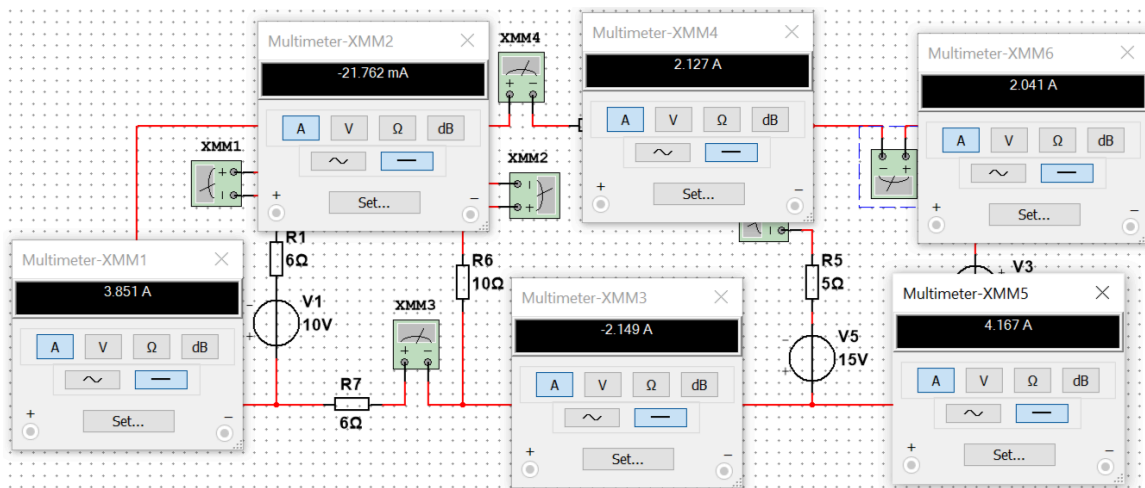


Рисунок 25.

$$I_1 = 3,851 \text{ A}$$

$$I_2 = 2,127 \text{ A}$$

$$I_3 = 2,041 \text{ A}$$

$$I_5 = 4,167 \text{ A}$$

$$I_6 = -0,021762 \text{ A}$$

$$I_7 = -2,149 \text{ A}$$

7. Таблица для сравнения токов, вычисленных разными методами.

	$I_1, \text{ A}$	$I_2, \text{ A}$	$I_3, \text{ A}$	$I_5, \text{ A}$	$I_6, \text{ A}$	$I_7, \text{ A}$
МЭП					-0,0218	
Законы Кирхгофа	3,852	2,127	2,041	4,168	-0,0218	-2,149
МКТ	3,85	2,13	2,04	4,17	-0,02	-2,15
МУП	3,85	2,127	2,04	4,17	-0,0218	-2,149
МЭГ					-0,021	
Multisim	3,851	2,127	2,041	4,167	-0,02176	-2,149

8. Потенциальная диаграмма.

Выбираем один из контуров для создания графика распределения потенциалов на нем. Потенциал  $\varphi_1$  принимаем равным нулю.

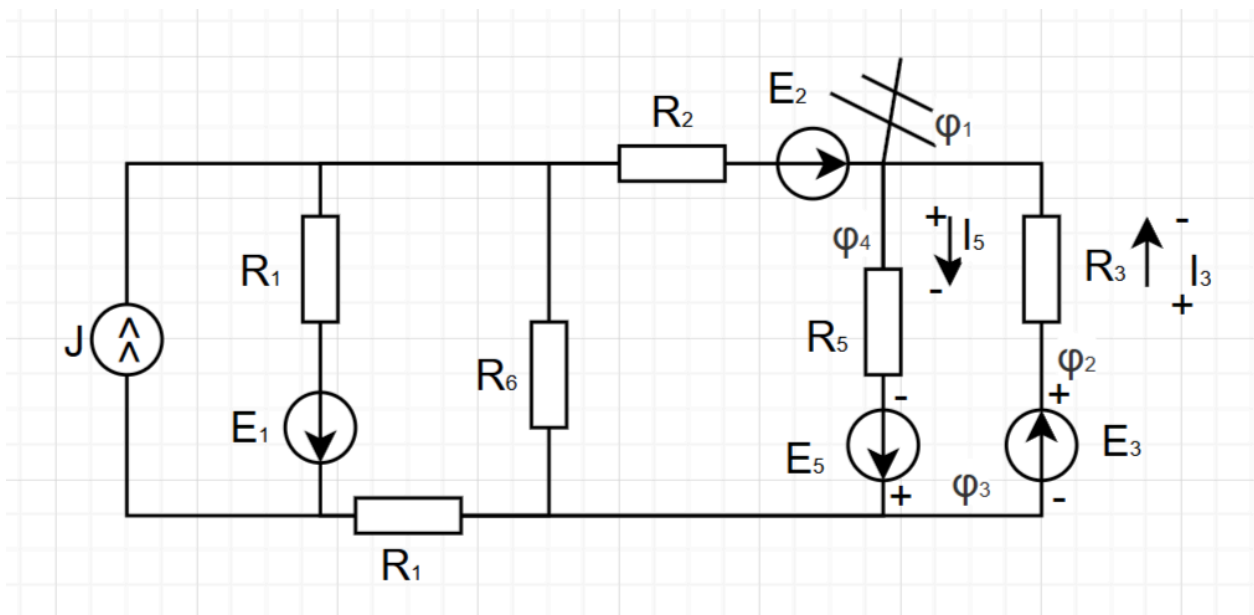


Рисунок 26.

Запишем разность потенциалов между границами каждого участка.

$$\varphi_2 = \varphi_1 - I_3 R_3 = -2,04 \cdot 4 = -8,16 \text{ В}$$

$$\varphi_3 = \varphi_2 + E_3 = -8,16 + 14 = 5,84 \text{ В}$$

$$\varphi_4 = \varphi_3 - I_5 R_5 = 5,84 - 4,16 \cdot 5 = -14,968 \text{ В}$$

$$m_{\varphi} = 5 \frac{\text{В}}{\text{Клетка}}$$

$$m_R = 2 \frac{\text{Ом}}{\text{Клетка}}$$

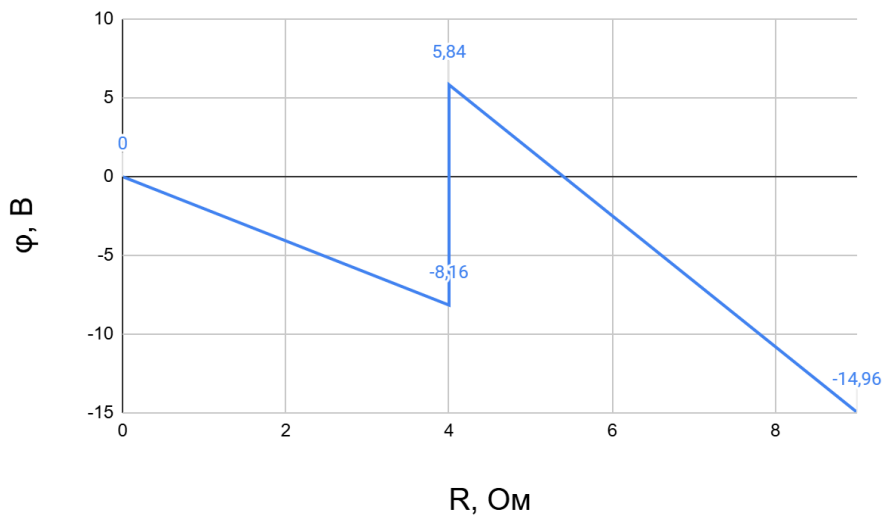


Рисунок 27.

## 9. Баланс мощности.

$$\sum_k E_k I_k + \sum_k U_{J_k} J_k = \sum_k I_k^2 R_k$$

Мощность, производимая источниками электрической энергии, равна мощности, потребляемой нагрузки.

$$P_{\text{ист}} = E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 + E_5 I_5 - U_J J$$

$U_J$  находим из уравнения  $U_J + I_1 R_1 - E_1 = 0$ . Так как напряжение на зажимах источника тока и ток источника сонаправлены, то ставится знак «-».

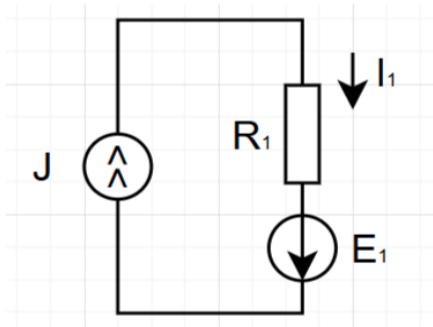


Рисунок 28.

$$U_J = -I_1 R_1 + E_1 = -3,85 \cdot 6 + 10 = -13,1 \text{ В}$$

$$P_{\text{ист}} = 3,85 \cdot 10 + 2,12 \cdot 12 + 4,16 \cdot 15 + 2,04 \cdot 14 + 13,1 \cdot 6 = 233,5 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{н}} = 3,85^2 \cdot 6 + 2,12^2 \cdot 3 + (-0,021)^2 \cdot 10 + 2,14^2 \cdot 6 + 4,16^2 \cdot 5 + 2,04^2 \cdot 4 = 233,07 \text{ Вт}$$

$$\delta = \frac{P_{\text{ист}} - P_{\text{н}}}{P_{\text{ист}}} \cdot 100\% = \frac{233,5 - 233,07}{233,5} \cdot 100\% = 0,18 < 1$$

Так как  $\delta < 1$ , результат точный.

Вывод: В ходе выполнения курсовой работы было установлено, что все примененные методы расчета дали одинаковые значения токов во всех ветвях электрической цепи. Баланс мощностей сошелся с минимальной погрешностью ( $\delta \approx 0,18\%$ ), что свидетельствует о правильности выполненных расчетов и подтверждает закон сохранения энергии в электрической цепи.