

Министерство образования и науки Российской Федерации
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Балаковский инженерно-технологический институт-
филиал НИЯУ МИФИ

Методические указания к выполнению контрольной работы
по дисциплине «Электротехника и промышленная электроника»
для студентов направления «Химическая технология»
всех форм обучения

Балаково 2021

1. ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Контрольное задание

Задача. Для электрической схемы, изображенной на рис. 1.1, а, выполнить следующее:

1. Составить на основании законов Кирхгофа систему уравнений для расчета токов во всех ветвях схемы.
2. Определить токи во всех ветвях схемы методом контурных токов (МКТ).
3. Определить токи во всех ветвях схемы методом узловых потенциалов (МУП).
4. Результаты расчета токов, проведенного двумя методами, свести в таблицу и сравнить между собой.
5. Составить баланс мощностей в исходной схеме (схеме с источником тока), вычислив суммарную мощность источников и суммарную мощность нагрузок (сопротивлений).
6. Определить ток I_1 в заданной схеме с источником тока, используя метод эквивалентного генератора.
7. Начертить потенциальную диаграмму для любого замкнутого контура, включающего обе ЭДС.

Указания: 1. Ответвления к источнику тока, ток которого по условию вашего задания равен нулю, на схемах не показывать.

2. Обозначая на схеме токи в ветвях, необходимо учесть, что ток через сопротивление, параллельное источнику тока, отличается от тока источника тока и тока через источник ЭДС.

3. Перед выполнением п. 4 рекомендуется преобразовать источник тока в источник ЭДС и вести расчет для полученной схемы.

4. В п. 7 для определения входного сопротивления двухполюсника следует преобразовать схему соединения треугольником в эквивалентную схему соединения звездой.

5. Для достижения необходимой точности расчетов при вычислениях с помощью микрокалькулятора следует учитывать три или четыре значащих цифры.

1.2. Методические указания к выполнению задания

Расчет разветвленной цепи с несколькими источниками ЭДС и тока рассмотрим на примере схемы рис. 1.1, табл. 1.1, в которой для упрощения схемы последовательно соединенные R'_6 и R''_6 (рис. 1.1, а) заменим эквивалентным $R_6 = R'_6 + R''_6$ (рис. 1.1, б).

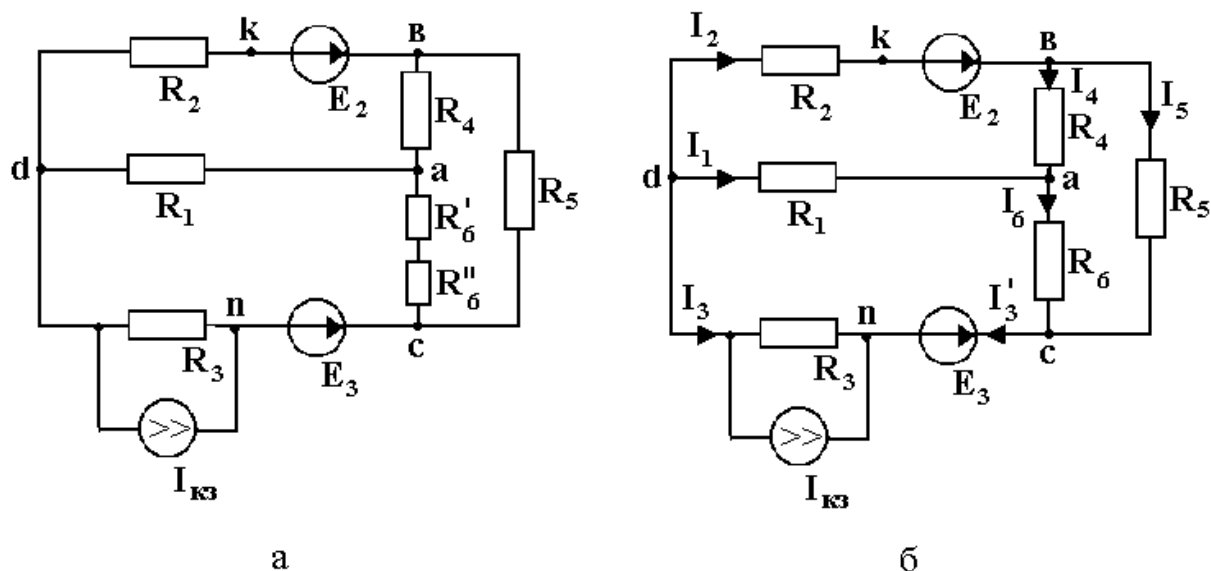


Рис. 1.1. Электрическая схема

Таблица 1.1

Значения элементов схемы

$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_4,$ Ом	$R_5,$ Ом	$R'_6,$ Ом	$R''_6,$ Ом	$E_1,$ В	$E_2,$ В	$E_3,$ В	$I_{кз},$ А
32,5	12,5	5	20	27,5	27,5	10	-	25	50	0,4

1.2.1. Метод уравнений Кирхгофа

1. Выбираем произвольно направления токов во всех ветвях (см. схему рис. 1.1, б).

2. Составляем уравнения по первому закону Кирхгофа. Число их на единицу меньше числа узлов (для схемы рис. 1.1 с пятью узлами нужно составить четыре таких уравнения):

$$\left. \begin{aligned}
 I_1 + I_4 - I_6 &= 0 - \text{для узла } a; \\
 I_2 - I_4 - I_5 &= 0 - \text{для узла } b; \\
 -I_3 + I_5 + I_6 &= 0 - \text{для узла } c; \\
 -I_1 - I_2 - I_3 - I_{кз} &= 0 - \text{для узла } d.
 \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

3. Выбираем произвольно направление обхода каждого контура (например, по часовой стрелке) и составляем уравнения по второму закону Кирхгофа. Контур, для которых составляются уравнения, нужно

выбирать так, чтобы каждый из них включал в себя хотя бы одну новую ветвь. Только при этом условии уравнения будут независимы друг от друга, а контуры – независимыми. Таким образом, число уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа, должно быть равно числу независимых контуров:

$$\left. \begin{aligned} -I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_4 R_4 &= E_2 - \text{для контура } adba; \\ I_1 R_1 - I_3 R_3 + I_6 R_6 &= -E_3 - \text{для контура } acda; \\ I_5 R_5 - I_6 R_6 - I_4 R_4 &= 0 - \text{для контура } abca. \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

В этих уравнениях все ЭДС и токи, совпадающие с направлением обхода контура, записываются со знаком «плюс»; ЭДС и токи, направленные навстречу обходу – со знаком «минус».

Как видно из данного примера, общее число уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа, равно числу неизвестных токов, т.е. числу ветвей за исключением ветвей с источниками тока.

Рассмотренный метод расчета в подавляющем большинстве случаев является достаточно громоздким и потому практически нецелесообразным. Поэтому уравнения (1.1) и (1.2) решать не следует.

Задача значительно упрощается при использовании МКТ и МУП, в основу которых также положены уравнения Кирхгофа.

1.2.2. Метод контурных токов (МКТ)

1. Приписываем каждому независимому контуру свой контурный ток: I_{11} , I_{22} , I_{33} и выбираем произвольное направление каждого из них (см. рис. 1.2). Удобно выбирать направление контурных токов во всех контурах единообразно – по часовой стрелке или против, а направления обхода контуров – по контурным токам.

2. Ток источника тока $I_{кз}$ рассматривается как известный контурный ток, замыкающийся по кратчайшему пути (через R_3).

3. Составляем уравнения по второму закону Кирхгофа для каждого контура, которые для схемы рис. 1.2 имеют вид:

$$\begin{aligned} I_{11} R_{11} + I_{22} R_{12} + I_{33} R_{13} &= E_{11}, \\ I_{11} R_{21} + I_{22} R_{22} + I_{33} R_{23} + I_{кз} R_3 &= E_{22}, \\ I_{11} R_{31} + I_{22} R_{32} + I_{33} R_{33} &= E_{33}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Здесь R_{11} , R_{22} , R_{33} – собственные сопротивления первого, второго и третьего контуров, равные сумме сопротивлений соответствующих контуров.

$$R_{11} = R_1 + R_2 + R_4 = 65 \text{ Ом}; R_{12} = R_{21} = R_1 = -32,5 \text{ Ом};$$

$$R_{22} = R_1 + R_3 + R_6 = 75 \text{ Ом}; R_{23} = R_{32} = -R_6 = -37,5 \text{ Ом};$$

$$R_{33} = R_4 + R_5 + R_6 = 85 \text{ Ом}; R_{13} = R_{31} = -R_4 = -20 \text{ Ом}.$$

R_{12} , R_{23} и R_{31} – взаимные сопротивления контуров, равные взятому со знаком «минус» сопротивлению ветви, смежной между контурами. Знак «минус» у сопротивления берется в случае несовпадения в нем направлений смежных контурных токов, знак «плюс» – в случае их совпадения.

E_{11} , E_{22} , E_{33} – контурные ЭДС, равные алгебраическим суммам ЭДС соответствующих контуров.

$$E_{11} = E_2 = 25 \text{ В}; E_{22} = -E_3 = -50 \text{ В}; E_{33} = 0.$$

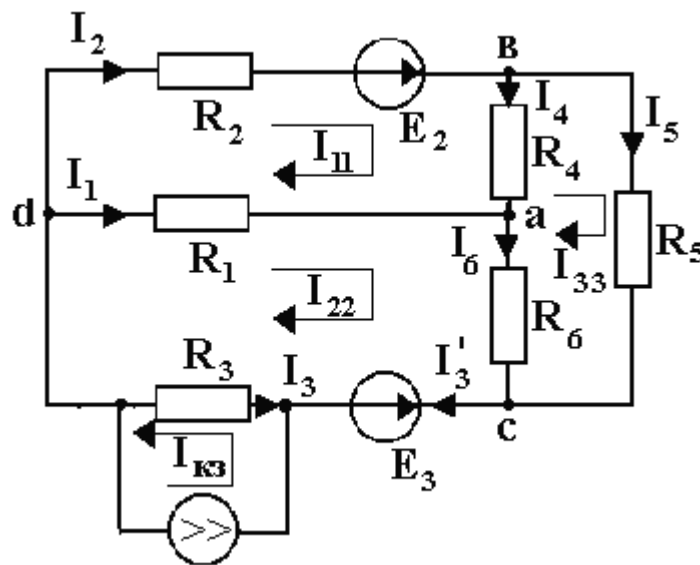


Рис. 1.2. Схема для расчета МКТ

Подставляя численные значения ЭДС, источника тока и сопротивлений, получим:

$$\left. \begin{aligned} I_{11} \cdot 65 - I_{22} \cdot 32,5 - I_{33} \cdot 20 &= 25, \\ -I_{11} \cdot 32,5 + I_{22} \cdot 75 - I_{33} \cdot 37,5 + 0,4 \cdot 5 &= -50, \\ -I_{11} \cdot 20 - I_{22} \cdot 37,5 + I_{33} \cdot 85 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

Полученная система уравнений рассчитывается по методу Крамера:

$$I_{11} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta}; I_{22} = \frac{\Delta_{22}}{\Delta}; I_{33} = \frac{\Delta_{33}}{\Delta},$$

где Δ – определитель системы уравнений (1.4).

$$\Delta = \begin{vmatrix} 65 & 32,5 & -20 \\ -35,5 & 75 & -37,5 \\ -20 & -37,5 & 85 \end{vmatrix}$$

$$= 65 \cdot 75 \cdot 85 + (-32,5)(-37,5) \cdot (-20) + (-20)(-32,5)(-37,5) - (-20)(75)(-20) - (-37,5)(-37,5) \cdot 65 - 85 \cdot (-32,5)(-32,5) = 414375 - 24375 - 24375 - 30000 - 91406,25 - 89781,25 = 154437,5.$$

Соответствующие определители Δ_{11} , Δ_{22} , Δ_{33} , получаемые из Δ путем замены первого, второго и третьего столбцов столбцом свободных членов, равны

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} 25 & -35,5 & -20 \\ -52 & 75 & -37,5 \\ 0 & -37,5 & 85 \end{vmatrix} = -58431,25;$$

$$\Delta_{22} = \begin{vmatrix} 65 & 25 & -20 \\ -32,5 & -52 & -37,5 \\ -20 & 0 & 85 \end{vmatrix} = -178687,5;$$

$$\Delta_{33} = \begin{vmatrix} 65 & -35,5 & 25 \\ -35,5 & 75 & -52 \\ -20 & -37,5 & 0 \end{vmatrix} = -92581,25.$$

Найдем контурные токи:

$$I_{11} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta} = -\frac{58431,25}{154437,5} = -0,378 \text{ A};$$

$$I_{22} = \frac{\Delta_{22}}{\Delta} = -\frac{178687,5}{154437,5} = -1,157 \text{ A};$$

$$I_{33} = \frac{\Delta_{33}}{\Delta} = -\frac{92581,25}{154437,5} = -0,599 \text{ A}.$$

4. Значения токов в ветвях находятся как алгебраическая сумма соответствующих контурных токов. Например, ток I_1 в смежной ветви совпадает по направлению с I_{22} и направлен навстречу I_{11} , поэтому

$$I_1 = I_{22} - I_{11} = -1,157 + 0,378 = -0,779 \approx -0,8 \text{ A}.$$

5. Ток I_2 во внешней ветви (по внешней ветви) равен контурному току I_{11} .

$$I_2 = I_{11} = -0,378 \approx -0,38 \text{ A}; I'_3 = I_{22} = -1,157 \approx -1,16 \text{ A};$$

$$I_3 = -I_{22} - I_{к3} = 1,157 - 0,4 = 0,757 \text{ A};$$

$$I_4 = I_{11} - I_{33} = -0,378 + 0,599 = 0,219 \approx 0,22 \text{ A};$$

$$I_5 = I_{33} = -0,599 \approx -0,6 \text{ A}; I_6 = I_{22} - I_{33} = -1,159 + 0,599 = -0,558 \approx -0,56 \text{ A}.$$

Знак «минус» перед токами показывает, что действительное их направление противоположно выбранному. МКТ позволяет уменьшить число уравнений, необходимых для решения задачи до числа независимых контуров.

1.2.3. Метод узловых потенциалов (МУП)

Перед выполнением этого пункта рекомендуется преобразовать источник тока $I_{к3}$ в источник ЭДС и вести расчет для полученной схемы. В результате такого преобразования получим схему рис. 1.3, где $E_3 = I_{к3} R_3 = 0,4 \cdot 5 = 2 \text{ В}$ и направлена так же, как и $I_{к3}$.

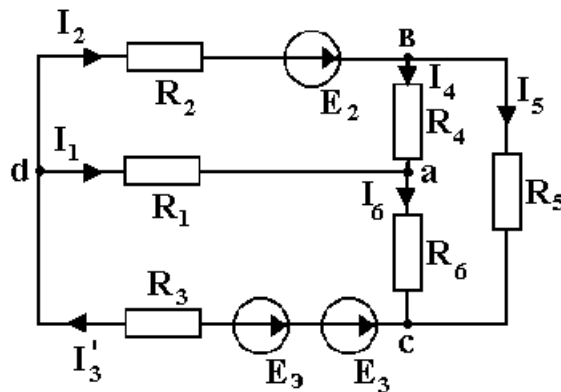


Рис. 1.3. Схема для расчета МУП

1. Полагаем потенциал одного из узлов схемы (например, узла d) равным нулю: $\varphi_d = 0$.

2. Для остальных узлов составляем уравнения вида:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_a G_{aa} + \varphi_b G_{ab} + \varphi_c G_{ac} &= I_{aa} - \text{для узла } a; \\ \varphi_a G_{ba} + \varphi_b G_{bb} + \varphi_c G_{bc} &= I_{bb} - \text{для узла } b; \\ \varphi_a G_{ca} + \varphi_b G_{cb} + \varphi_c G_{cc} &= I_{cc} - \text{для узла } c. \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

Здесь G_{aa} , G_{bb} , G_{cc} – сумма проводимостей ветвей, образующих узлы a , b , c :

$$G_{aa} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6} = \frac{1}{32,5} + \frac{1}{20} + \frac{1}{37,5} = 0,107 \text{ Ом}^{-1};$$

$$G_{bb} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{12,5} + \frac{1}{20} + \frac{1}{27,5} = 0,166 \text{ Ом}^{-1};$$

$$G_{cc} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} = \frac{1}{5} + \frac{1}{27,5} + \frac{1}{37,5} = 0,263 \text{ Ом}^{-1}.$$

G_{ab} , G_{bc} , G_{ca} – взятые со знаком «минус» суммы проводимостей ветвей, соединяющих соответственно узлы: a и b , b и c , c и a :

$$G_{ab} = G_{ba} = -\frac{1}{R_4} = -0,05 \text{ Ом}^{-1}; \quad G_{bc} = G_{cb} = -\frac{1}{R_5} = -0,036 \text{ Ом}^{-1};$$

$$G_{ca} = G_{ac} = -\frac{1}{R_6} = -0,027 \text{ Ом}^{-1}.$$

I_{aa} , I_{bb} , I_{cc} – узловые токи, равные алгебраическим суммам ЭДС ветвей, подходящих к соответствующему узлу, деленному на сопротивление этих ветвей. В эту сумму со знаком «плюс» входят ЭДС, направленные к узлу, и со знаком «минус» ЭДС, направленные от узла:

$$I_{aa} = 0 \text{ A}; \quad I_{bb} = \frac{E_2}{R_2} = \frac{25}{12,5} = 2 \text{ A}; \quad I_{cc} = \frac{E_9 + E_3}{R_3} = \frac{52}{5} = 10,4 \text{ A}.$$

3. В числовых значениях система уравнений (1.5) запишется:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_a \cdot 0,107 - \varphi_b \cdot 0,05 - \varphi_c \cdot 0,027 &= 0; \\ -\varphi_a \cdot 0,05 + \varphi_b \cdot 0,166 - \varphi_c \cdot 0,036 &= 2; \\ -\varphi_a \cdot 0,027 - \varphi_b \cdot 0,036 + \varphi_c \cdot 0,263 &= 10,4. \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

Решение системы уравнений методом Крамера дает следующие значения потенциалов узлов схемы:

$$\varphi_a = \frac{\Delta_a}{\Delta}; \quad \varphi_b = \frac{\Delta_b}{\Delta}; \quad \varphi_c = \frac{\Delta_c}{\Delta}.$$

$$\begin{aligned} \text{Здесь } \Delta &= 0,107 \cdot 0,166 \cdot 0,263 + (-0,05)(-0,036)(-0,027) + \\ &+ (-0,027)(-0,05)(-0,036) - (-0,027) \cdot 0,166 \cdot (-0,027) - \\ &- (-0,036)(-0,036) \cdot 0,107 - 0,263 \cdot (-0,05)(-0,05) = 3,66 \cdot 10^{-3}; \end{aligned}$$

$$\Delta_a = \begin{vmatrix} 0 & -0,05 & -0,027 \\ 2 & 0,166 & -0,036 \\ 10,4 & -0,036 & 0,263 \end{vmatrix} = 93,944 \cdot 10^{-3};$$

$$\Delta_b = \begin{vmatrix} 0,107 & 0 & -0,027 \\ -0,05 & 2 & -0,036 \\ -0,027 & 10,4 & 0,263 \end{vmatrix} = 111,658 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta_c = \begin{vmatrix} 0,107 & -0,05 & 0 \\ -0,05 & 0,166 & 2 \\ -0,027 & -0,036 & 10,4 \end{vmatrix} = 169,4 \cdot 10^{-3};$$

$$\varphi_a = \frac{93,944 \cdot 10^{-3}}{3,66 \cdot 10^{-3}} = 25,69 \text{ В}; \quad \varphi_b = \frac{111,658 \cdot 10^{-3}}{3,66 \cdot 10^{-3}} = 30,543 \text{ В};$$

$$\varphi_c = \frac{169,4 \cdot 10^{-3}}{3,66 \cdot 10^{-3}} = 46,335 \text{ В}.$$

4. Заключительным этапом является расчет токов ветвей по обобщенному закону Ома, где ЭДС и напряжение на зажимах каждой ветви берутся со знаком «плюс», если они совпадают по направлению с током ветви, и со знаком «минус», если не совпадают:

$$I_1 = \frac{\varphi_d - \varphi_a}{R_1} = \frac{-25,69}{32,5} = -0,79 \approx -0,8 \text{ А};$$

$$I_2 = \frac{E_2 + \varphi_d - \varphi_b}{R_2} = \frac{25 - 30,543}{12,5} = -0,4 \text{ А};$$

$$I'_3 = \frac{-E_3 - E_3 + \varphi_c - \varphi_d}{R_3} = \frac{-52 + 46,335}{5} = -1,13 \text{ А};$$

$$I_4 = \frac{\varphi_b - \varphi_a}{R_4} = \frac{30,543 - 25,69}{20} = \frac{4,853}{20} = 0,23 \text{ А};$$

$$I_5 = \frac{\varphi_b - \varphi_c}{R_5} = \frac{30,543 - 46,335}{27,5} = \frac{-15,792}{27,5} = -0,574 \text{ А};$$

$$I_6 = \frac{\varphi_a - \varphi_c}{R_6} = \frac{25,69 - 46,335}{37,5} = \frac{-20,645}{37,5} = -0,55 \text{ А}.$$

Определим ток I_3 в исходной схеме рис. 1.1, б. Для узла n составим уравнение по первому закону Кирхгофа: $I_3 + I_{кз} + I'_3 = 0$, из него следует, что $I_3 = -I'_3 - I_{кз} = 1,13 - 0,4 = 0,73 \text{ А}$.

1.2.4. Сравнение результатов расчетов методами МКТ и МУП

В табл. 1.2 приведено сравнение результатов расчетов МКТ и МУП.

Таблица 1.2

Сравнение результатов расчетов МКТ и МУП

Токи, А	I_1	I_2	I_3	I'_3	I_4	I_5	I_6
МКТ	-0,78	-0,38	0,75	-1,16	0,22	-0,6	-0,56
МУП	-0,79	-0,4	0,73	-1,13	0,23	-0,57	-0,55
Погрешность, δ %	1,28	5,2	2,73	2,65	4,5	5,2	1,8

Относительная погрешность расчета тока δ :

$$\delta = \frac{|\Delta I|}{|I_{\min}|} 100\%,$$

где ΔI – абсолютная погрешность расчета соответствующего тока; I_{\min} – наименьшее из двух значений сравниваемых токов. Например, для тока I_1 :

$$|\Delta I_1| = |0,79 - 0,78| = 0,01 \text{ A}; \quad |I_{1\min}| = 0,78 \text{ A};$$

$$\delta = \frac{|\Delta I_1|}{|I_{1\min}|} = \frac{0,01}{0,78} \cdot 100\% = 1,28\%.$$

Точность расчета может считаться удовлетворительной, если $\delta \leq 2\%$. При расчете на микрокалькуляторе следует учитывать не менее трех или четырех значащих цифр.

1.2.5. Баланс мощностей

Проверим выполнение баланса мощностей в цепи. Он устанавливает равенство (баланс) алгебраической суммы мощностей, развиваемых источниками энергии, сумме мощностей, расходуемых приемниками энергии

$$\sum_{\ell=1}^m E_{\ell} I_{\ell} + \sum_{\ell=1}^m U_{\ell} I_{\kappa\ell} = \sum_{\ell=1}^m I_{\ell}^2 R_{\ell},$$

где $\sum_{\ell=1}^m E_{\ell} I_{\ell}$ – алгебраическая сумма мощностей источников ЭДС, причем мощность положительна, если направления E_{ℓ} и I_{ℓ} совпадают, и отрицательна – если не совпадают;

$\sum_{\ell=1}^m U_{\ell} I_{\kappa\ell}$ – алгебраическая сумма мощностей источников тока I_{κ} ;

мощность положительна, если ток источника тока I_{κ} направлен противоположно току параллельной ему ветви, и отрицательна, если это условие не выполняется;

$\sum_{\ell=1}^m I_{\ell}^2 R_{\ell}$ – сумма мощностей, потребляемых всеми сопротивлениями,

где все слагаемые положительны.

Баланс мощностей по условиям задания следует проверить в исходной схеме рис. 1.1, б, без преобразования источников тока. Поэтому найдем напряжение на зажимах источника тока, воспользовавшись данными предыдущих расчетов:

$$U_{nd} = -I_3 R_3 = -0,73 \cdot 5 = -3,65 \text{ В.}$$

Рассчитаем суммарную мощность источников:

$$\begin{aligned} \sum P_{\text{ист}} &= E_2 I_2 - E_3 I_3' + U_{nd} I_{\kappa 3} = 25 \cdot (-0,4) - 50 \cdot (-1,13) + 0,4 (-3,65) = \\ &= 45,04 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Мощность, потребляемая сопротивлениями цепи:

$$\begin{aligned} \sum P_{np} &= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 = \\ &= 0,79^2 \cdot 32,5 + 0,4^2 \cdot 12,5 + 0,73^2 \cdot 5 + 0,23^2 \cdot 20 + 0,57^2 \cdot 27,5 + 0,55^2 \cdot 37,5 = \\ &= 46,27 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Относительная погрешность баланса мощностей

$$\delta = \frac{|\sum P_{np} - \sum P_{\text{ист}}|}{|\sum P_{np}|} \cdot 100\%.$$

$$\delta = \frac{(46,27 - 45,04)}{46,27} \cdot 100\% = \frac{1,23}{46,27} \cdot 100\% = 2,65\%.$$

1.2.6. Метод эквивалентного генератора (МЭГ)

Этот метод удобно применять для нахождения тока в одной ветви.

1. Разрываем ветвь, ток в которой следует определить, и подсчитываем напряжение между точками разрыва (U_{xx}). Полученная схема изображена на рис. 1.4.

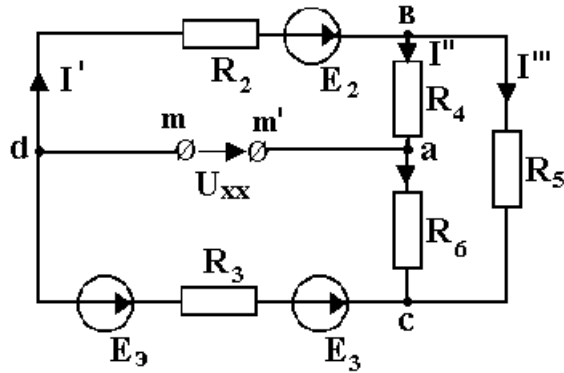


Рис. 1.4. Схема для расчета МЭГ

2. Находим токи в полученной схеме.

Для схемы рис. 1.4 это проще сделать методом узловых потенциалов (МУП). Положим $\varphi_b = 0 \text{ В}$.

$$U_{cb} = \varphi_c - \varphi_b =$$

$$\frac{(E_3 + E_9 - E_2) \cdot \frac{1}{R_2 + R_3}}{\frac{1}{R_2 + R_3} + \frac{1}{R_4 + R_6} + \frac{1}{R_5}} = \frac{(50 + 2 - 25) \cdot \frac{1}{17,5}}{\frac{1}{17,5} + \frac{1}{57,5} + \frac{1}{27,5}} = \frac{27 \cdot 0,057}{0,057 + 0,0174 + 0,036} = \frac{1,539}{0,11} =$$

$$= 13,99 \approx 14 \text{ В}; U_{bc} = -U_{cb} = -14 \text{ В}.$$

$$I' = \frac{E_2 - E_3 - E_9 + U_{cb}}{R_2 + R_3} = \frac{25 - 50 - 2 + 14}{17,5} = \frac{-27 + 14}{17,5} = \frac{-13}{17,5} = -0,743 \text{ А};$$

$$I'' = \frac{U_{bc}}{R_4 + R_6} = \frac{-14}{57,5} = -0,243 \text{ А}.$$

По второму закону Кирхгофа для контура acd (аналогично для abd), обходя его по часовой стрелке, подсчитаем напряжение холостого хода:

$$U_{xx} + I'' R_6 + I' R_3 = -E_3 - E_9; U_{xx} = -E_3 - E_9 - I'' R_6 - I' R_3;$$

$$U_{xx} = -52 + 0,243 \cdot 37,5 + 0,743 \cdot 5 = -39,175 \text{ В.}$$

3. Определим входное сопротивление всей схемы относительно разомкнутых зажимов mm' .

Для этого преобразуем один из треугольников сопротивлений, например $R_4 R_5 R_6$, в эквивалентную звезду сопротивлений $R_a R_b R_c$ (рис. 1.5). В этой схеме:

$$R_a = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{20 \cdot 27,5}{20 + 27,5 + 37,5} = \frac{550}{85} = 6,47 \text{ Ом;}$$

$$R_b = \frac{R_4 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{20 \cdot 37,5}{20 + 27,5 + 37,5} = \frac{750}{85} = 8,823 \text{ Ом;}$$

$$R_c = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{27,5 \cdot 37,5}{20 + 27,5 + 37,5} = \frac{1031,25}{85} = 12,132 \text{ Ом.}$$

В результате этого преобразования схема оказалась приведенной к последовательно-параллельной (рис. 1.5), в которой

$$R_{bx} = \frac{(R_2 + R_a)(R_3 + R_c)}{R_2 + R_a + R_3 + R_c} + R_b = \frac{(12,5 + 6,47) \cdot (5 + 12,132)}{12,5 + 6,47 + 5 + 12,132} + 8,823 = 8,823 + \frac{324,99}{36,102} = 8,823 + 9 = 17,825 \text{ Ом.}$$

Схема рис. 1.6 эквивалентна для ветви R_1 схеме рис. 1.4. Вычислим ток I_1 :

$$I_1 = \frac{U_{xx}}{R_{bx} + R_1} = \frac{-39,175}{17,825 + 32,5} = \frac{-39,175}{50,325} = -0,778 = -0,8 \text{ А.}$$

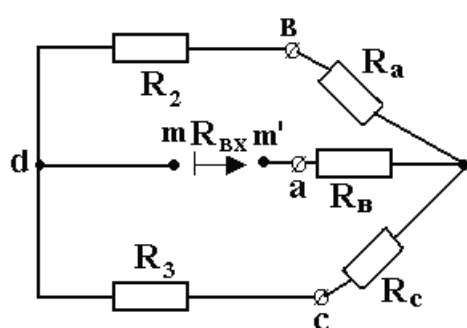


Рис. 1.5. Схема после преобразования треугольника в звезду

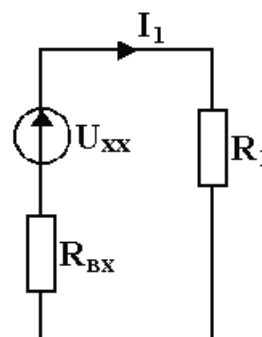


Рис. 1.6. Окончательный вид схемы после преобразований

1.2.7. Потенциальная диаграмма

Так называется график изменения потенциала вдоль замкнутого контура.

Отложим по оси абсцисс (рис. 1.7) все сопротивления контура $dkbacnd$ (рис. 1.1, б), двигаясь от точки d , потенциал которой принят равным нулю. Перемещаясь вдоль этого контура, подсчитаем потенциалы всех точек. Пройдя сопротивление R_2 и двигаясь по току I_2 (от большего потенциала к меньшему), попадаем в точку k , потенциал которой равен:

$$\varphi_k = \varphi_d - I_2 R_2 = -I_2 R_2 = -(-0,4) \cdot 12,5 = 5 \text{ В.}$$

Потенциал следующей точки b будет больше φ_k на величину ЭДС E_2 :

$$\varphi_b = \varphi_k + E_2 = 5 + 25 = 30 \text{ В.}$$

Так как между точками k и b нет сопротивления, то их абсциссы будут одинаковы.

Потенциалы остальных точек определяются аналогично:

$$\varphi_a = \varphi_b - I_4 R_4 = 30 - 0,23 \cdot 20 = 30 - 4,6 = 25,4 \text{ В;}$$

$$\varphi_c = \varphi_a - I_6 R_6 = 25,4 - (-0,55) \cdot 37,5 = 25,4 + 20,625 = 46,025 \text{ В;}$$

$$\varphi_n = \varphi_c - E_3 = 46,025 - 50 = -3,975 \text{ В;}$$

$$\varphi_d = \varphi_n + I_3 R_3 = -3,975 + 0,75 \cdot 5 \approx 0 \text{ В.}$$

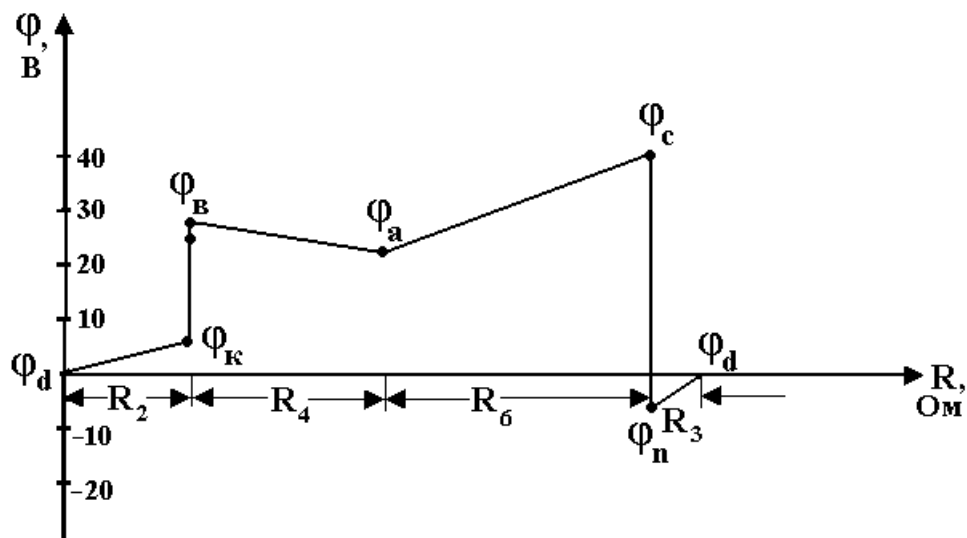


Рис. 1.7. Потенциальная диаграмма

Значения потенциалов узлов с достаточной точностью совпадают со значениями, найденными методом узловых потенциалов (МУП).

Контрольное задание выполнено.

ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

Варианты заданий

№ вар.	Рис.	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	E_1	E_2	E_3	J_1	J_2	J_3
		<i>Ом</i>				<i>B</i>				<i>A</i>			
0	8.5	20	8	3	12	17	30	—	24	30	—	0,8	0
1	8.6	12	15	9	30	32	10	50	—	30	1	—	0
2	8.14	6	200	14	15	8	36	—	32	15	—	0,4	0
3	8.8	18	53	33	10	15	20	—	51	18	—	0,4	0
4	8.9	6	17	7	20	11	15	50	15	—	2	0	—
5	8.15	8	15	18	10	12	24	—	30	38	—	0,5	0
6	8.16	20	60	90	100	165	60	26	38	—	0,1	0	—
7	8.7	83	120	150	60	105	200	—	50	23	—	0,1	0
8	8.19	10	18	6	15	22	20	—	48	15	—	1	0
9	8.20	165	90	68	20	120	100	54	21	—	0,1	0	—
10	8.3	30	120	150	60	225	60	—	210	375	—	0,5	0
11	8.4	23	18	15	12	12	10	24	30	—	0,2	0	—
12	8.12	6	10,5	15	5	30	30	—	51	30	—	2	0
13	8.10	14	30	24	20	45	32	—	75	27	—	1	0
14	8.11	6	3	5	4	5	2	—	6	15	—	0,4	0
15	8.1	6	12	9	5	20	16	—	69	22	—	2	0
16	8.2	15	27	8	16	12	14	—	44	52	—	0,5	0
17	8.17	45	60	33	30	21	20	—	50	20	—	0,3	0
18	8.18	8	10	15	5	224	42	30	—	45	1	—	0
19	8.13	9	7	12	20	10	12	—	45	33	—	2	0
20	8.5	7	3	1	4	6	10	—	7	10	—	0,4	0
21	8.1	2	4	3	2	7	7	—	19	74	—	1	0
22	8.3	10	40	50	40	75	20	—	66	125	—	0,4	0
23	8.16	22	64	96	110	155	68	24	32	—	0,1	0	—
24	8.10	16	34	20	26	47	30	—	70	25	—	1	0
25	8.2	40	26	20	10	12	16	—	50	90	—	0	3
26	8.4	25	20	12	16	18	13	25	32	—	0,2	0	—
27	8.7	28	40	50	12	35	70	—	19	8	—	0,2	0
28	8.20	55	30	22	30	40	50	16	7	—	0,1	0	—
29	8.19	4	6	2	3	8	10	—	13	5	—	0,5	0
30	8.17	15	20	11	5	7	8	—	16	8	—	0,2	0

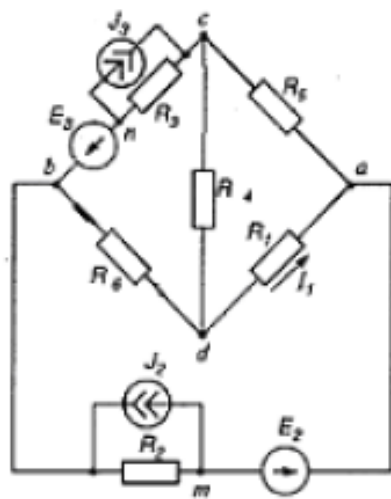


Рис. 8.1

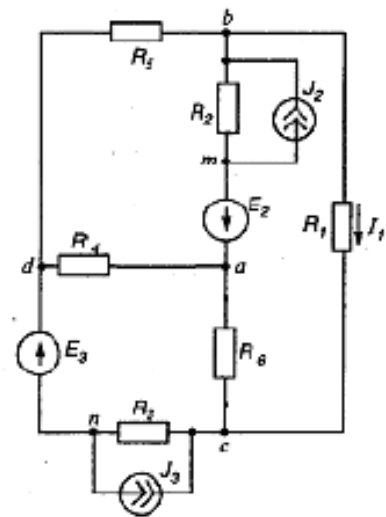


Рис. 8.2

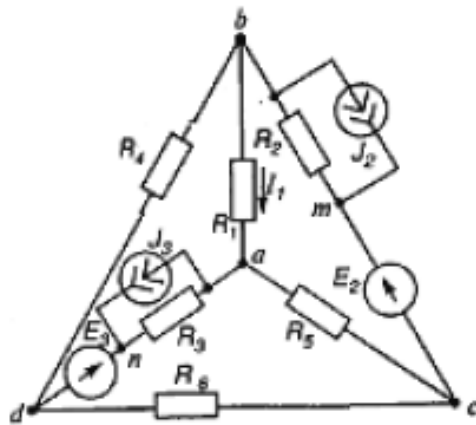


Рис. 8.3

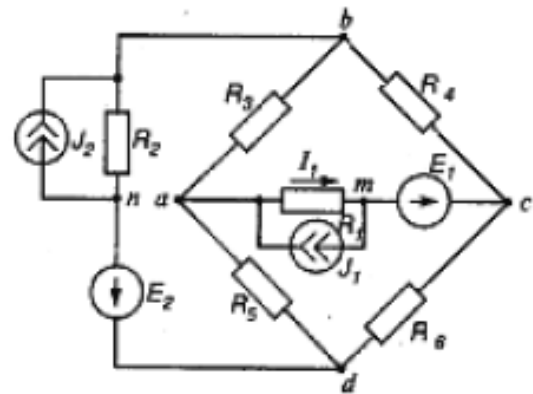


Рис. 8.4

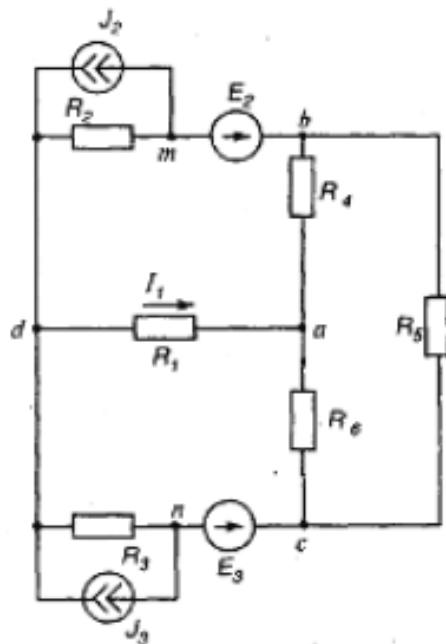


Рис. 8.5

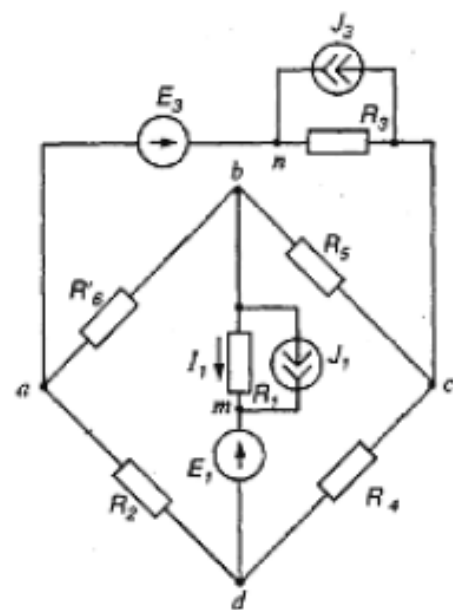


Рис. 8.6

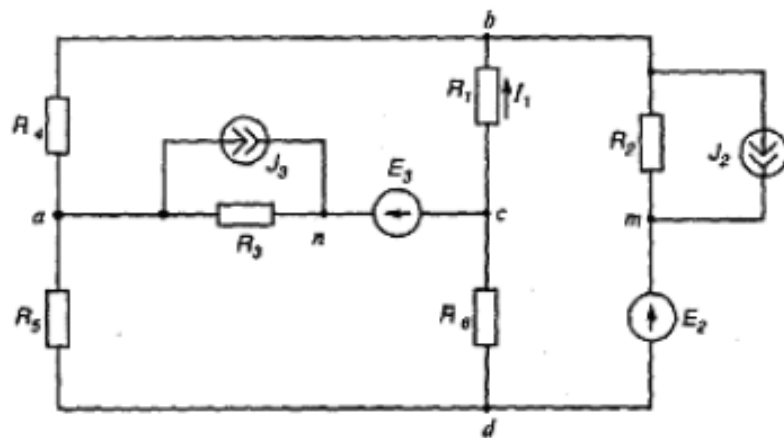


Рис. 8.7

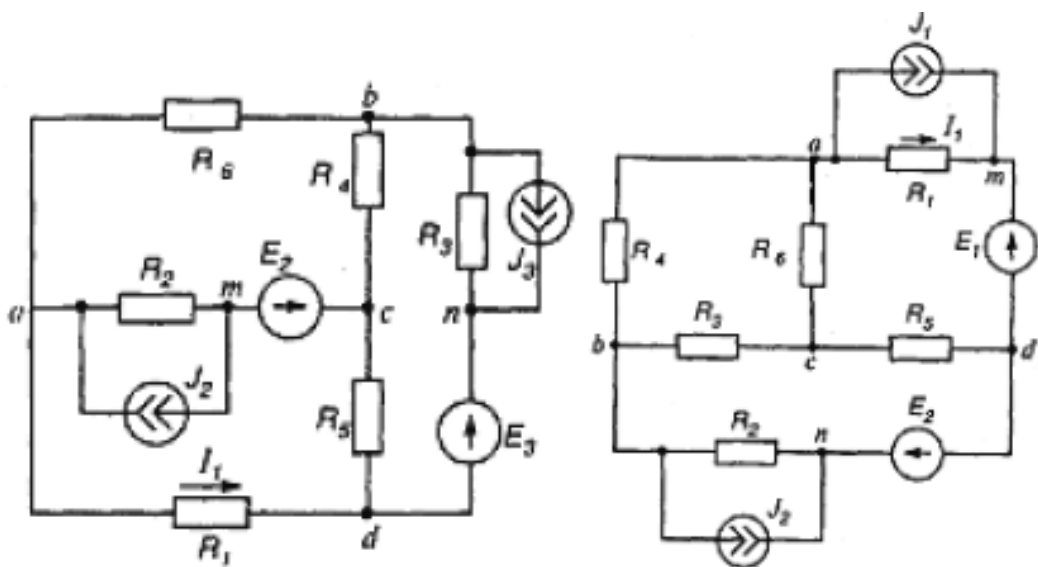


Рис. 8.8

Рис. 8.9

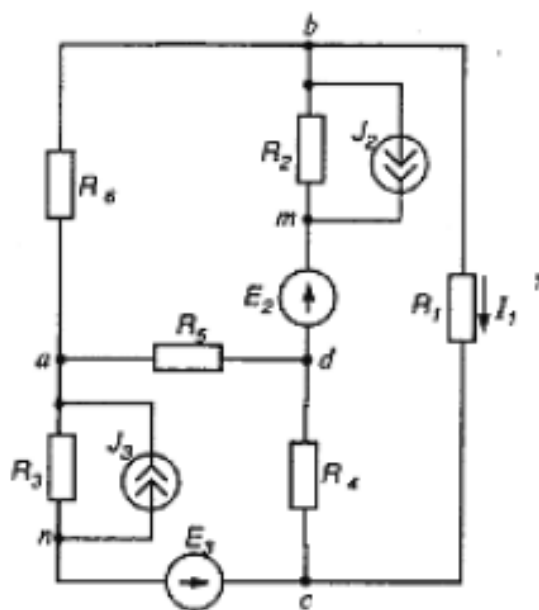


Рис. 8.10

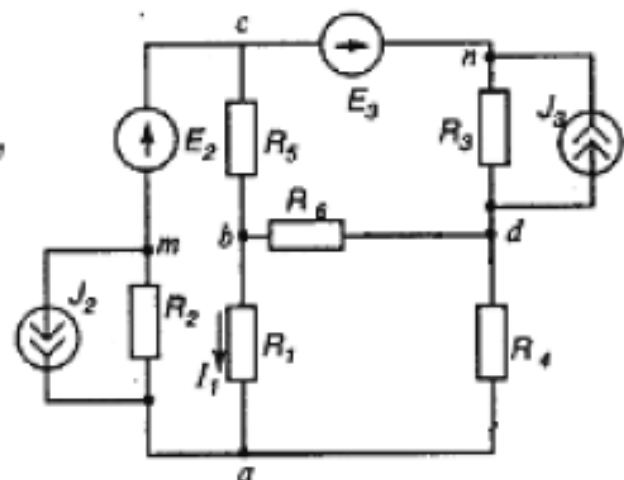


Рис. 8.11

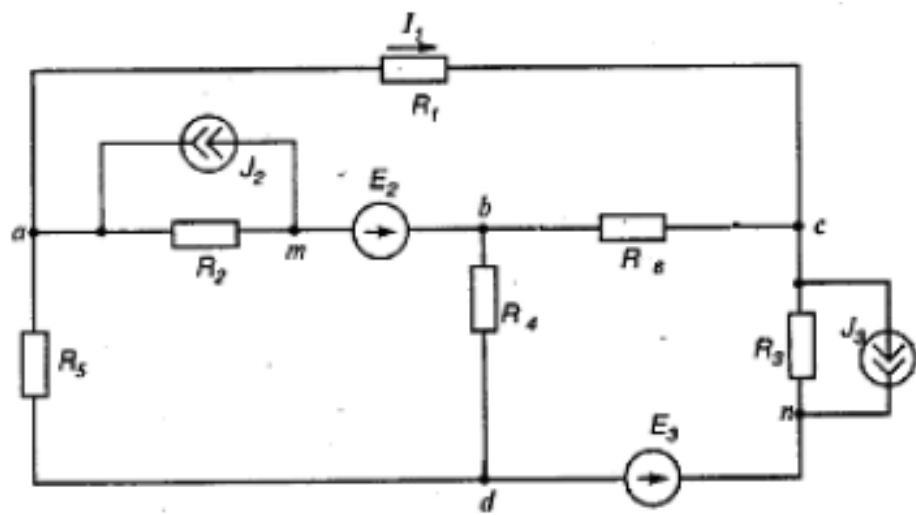


Рис. 8.12

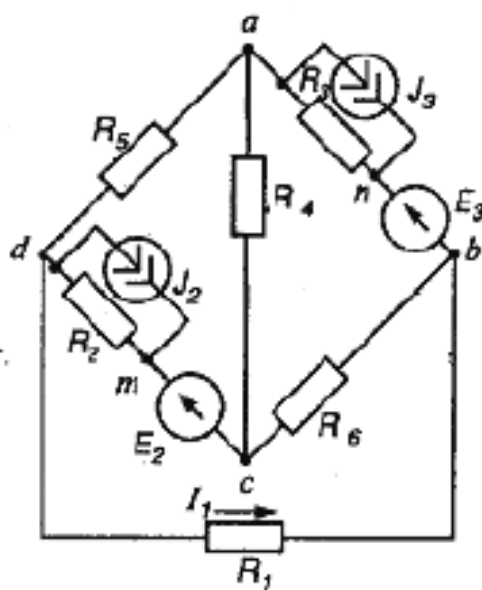


Рис. 8.13

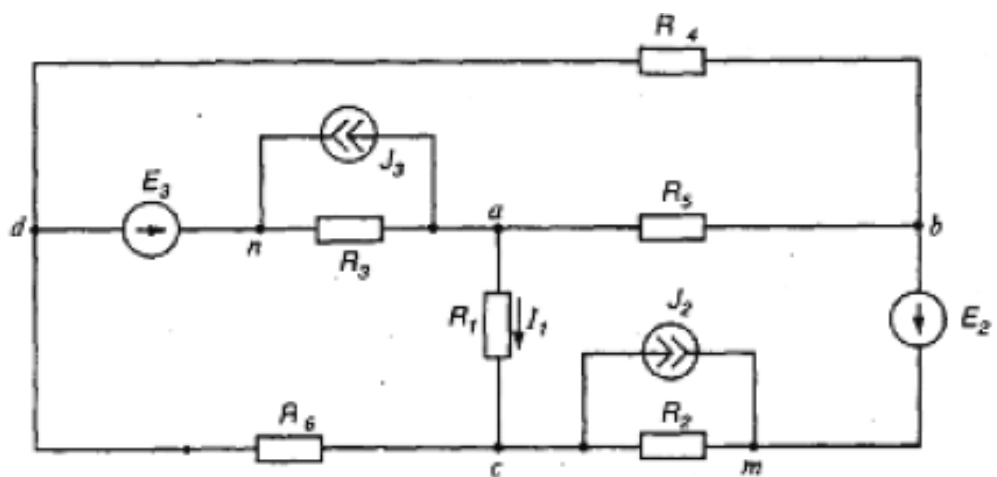


Рис. 8.14

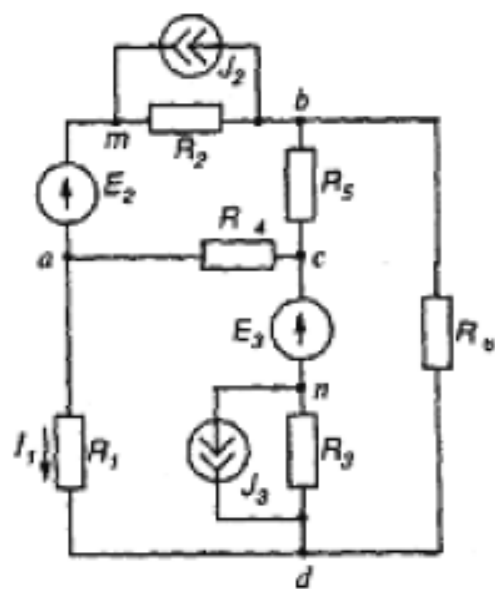


Рис. 8.15

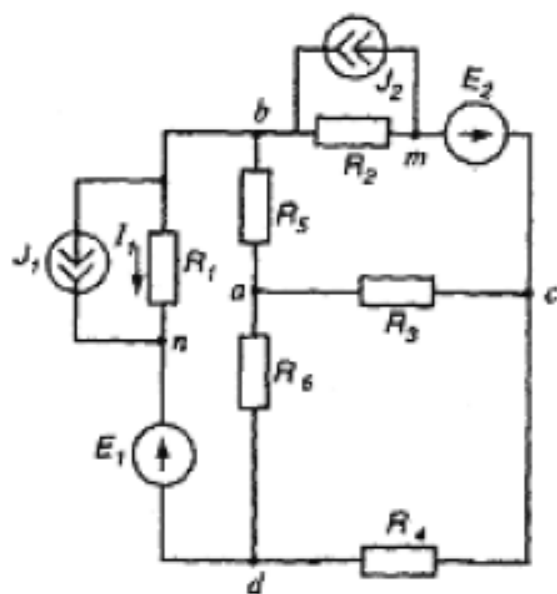


Рис. 8.16

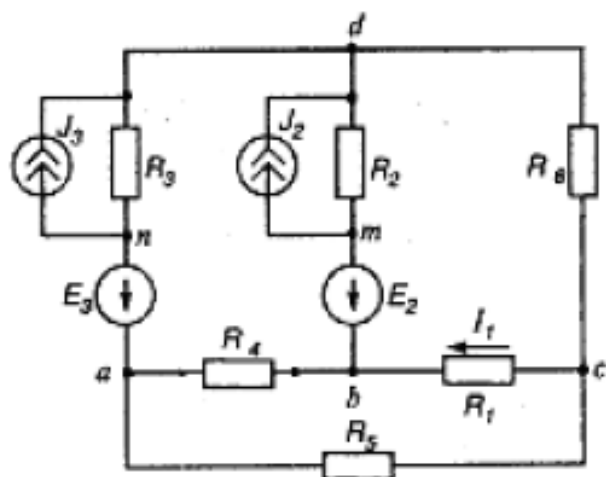


Рис. 8.17

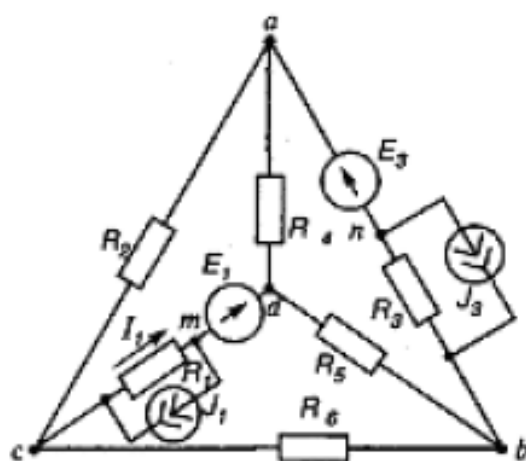


Рис. 8.18

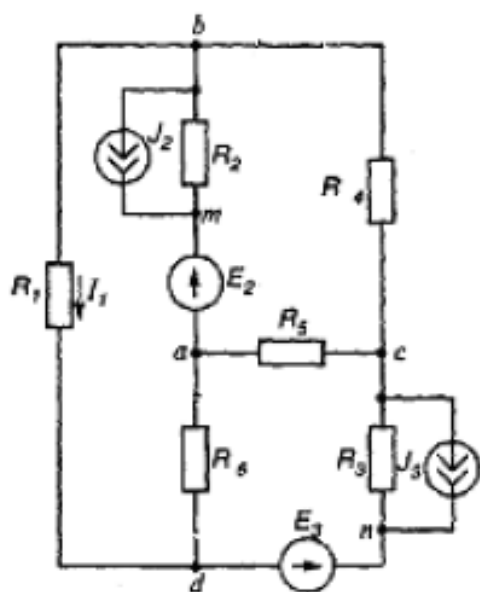


Рис. 8.19

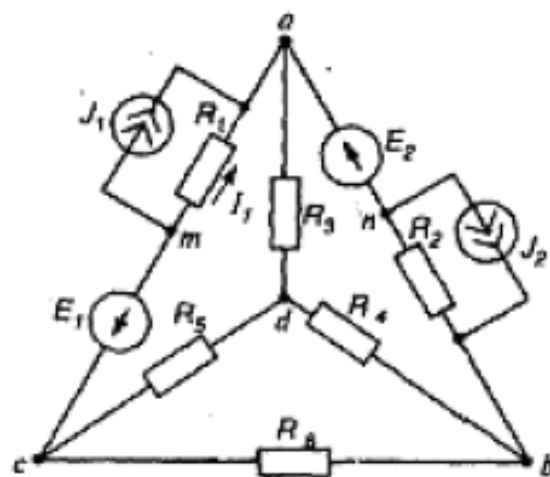


Рис. 8.20