

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

*Методические рекомендации к самостоятельной работе для студентов специальностей 1-53 01 02 «Автоматизированные системы обработки информации», 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы», 1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов», 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств (по направлениям)» и направления подготовки 12.03.01 «Приборостроение» заочной формы обучения*

РАСЧЕТ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА



Могилев 2021

УДК 621.317  
ББК 31.21  
Т45

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «10» марта 2021 г.,  
протокол № 5

Составители: ст. преподаватель Н. В. Герасименко;  
канд. техн. наук, доц. В. Ф. Гоголинский

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

Изложена методика выполнения расчетно-графического задания. Методические рекомендации включают краткие теоретические сведения, необходимые для решения задачи, подробный пример, рекомендации по оформлению и моделированию электрической цепи в программной среде Multisim 11.

Учебно-методическое издание

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.  
ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать 26.05.2021 . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2,09 . Уч.-изд.л. 2,12 . Тираж 26 экз. Заказ № 393.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2021

## Содержание

Введение.....	4
1 Постановка задачи.....	5
2 Краткие теоретические сведения.....	17
2.1 Основные определения.....	17
2.2 Правила Кирхгофа.....	17
2.3 Уравнения в матричной форме.....	19
2.4 Метод контурных токов.....	19
2.5 Метод узловых потенциалов.....	20
2.6 О выборе оптимального метода расчета.....	20
2.7 Баланс мощностей.....	20
2.8 Метод эквивалентного генератора.....	21
2.9 Потенциальная диаграмма.....	21
3 Пример выполнения расчетно-графического задания.....	22
3.1 Исходные данные.....	22
3.2 Построение графа и дерева схемы. Составление уравнений согласно правилам Кирхгофа.....	22
3.3 Выбор оптимального метода расчета.....	24
3.4 Расчет методом контурных токов.....	24
3.5 Расчет методом узловых потенциалов.....	26
3.6 Баланс мощностей.....	28
3.7 Определение показания амперметра методом эквивалентного генератора.....	29
3.8 Построение потенциальной диаграммы.....	31
3.9 Моделирование цепи в Multisim.....	33
Список литературы.....	34

## Введение

Дисциплина «Теоретические основы электротехники» является одной из фундаментальных дисциплин для студентов, обучающихся по специальностям, связанным с электромеханикой, электроникой, автоматизацией и приборостроением. Первым разделом дисциплины, с которым знакомятся студенты, является теория электрических цепей.

Глубокое изучение теории необходимо при анализе и расчете электромагнитных процессов и явлений, на которых базируется принцип действия устройств современной электроэнергетики, электро- и радиотехники, вычислительной и преобразовательной техники, электроники и автоматики. Знания, полученные при изучении курса, используются во многих специальных дисциплинах.

Составители ставили своей целью помочь студентам в самостоятельной работе индивидуальными заданиями, поэтому в методических рекомендациях представлен подробный пример решения задачи, а также советы по оформлению работ и созданию модели в программе Multisim 11. Следует отметить, что рекомендации по оформлению сохраняют свою значимость и при выполнении других расчетно-графических заданий по указанным дисциплинам.

## 1 Постановка задачи

Численные значения элементов цепи представлены в таблицах 1.1–1.6. Выбор таблицы зависит от специальности, по которой обучается студент:

- 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» (см. таблицы 1.1 и 1.2);
- 1-53 01 02 «Автоматизированные системы обработки информации» (см. таблицы 1.3 и 1.4);
- 1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов», 12.03.01 «Приборостроение» (таблица 1.5);
- 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств (по направлениям)» (таблица 1.6).

*Вариант должен соответствовать номеру студента в алфавитном списке группы.*

Работу рекомендуется оформлять на компьютере, в текстовом редакторе Word или LibreOffice Writer. По согласованию с преподавателем, контролирующим выполнение работы, оформление может быть выполнено в тетради. Особое внимание в этом случае следует уделить графической части и аккуратности рукописного текста.

Для создания простейших электрических схем на компьютере можно использовать наборы фигур, имеющиеся в отмеченных выше текстовых редакторах, однако это не всегда удобно. В настоящее время есть большое разнообразие программ, позволяющих решить эту задачу более эффективно.

*Для заданной схемы электрической цепи необходимо.*

1 Изобразить схему электрической цепи *без учета элементов, значения которых в таблице отмечены прочерками*. На схеме стрелками отметить выбранные положительные направления токов и положительные направления обхода контуров.

2 Построить граф схемы, выделить дерево графа. На основе графа схемы составить узловую и контурную матрицы.

3 Составить систему уравнений согласно правилам (законам) Кирхгофа в обычной и матричной формах.

4 Выполнить упрощение схемы путем преобразования источников тока и (или) параллельных/последовательных соединений. Изобразить полученную схему.

5 Анализируя преобразованную схему электрической цепи, выбрать наиболее эффективный с вычислительной точки зрения метод расчета и выполнить расчет токов.

6 Проверить корректность расчета с помощью баланса мощности.

7 Выполнить расчет тока в ветви с амперметром методом эквивалентного генератора (активного двухполюсника). Сравнить полученное значение с результатами расчета из п. 5.

8 Построить потенциальную диаграмму для контура с источником тока.

9 Выполнить моделирование в программе Multisim.

Таблица 1.1 – Исходные данные для специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» (часть 1)

Вариант	Схема на рисунке	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом	$R_6$ , Ом	$E_1$ , В	$E_2$ , В	$E_3$ , В	$J_1$ , А	$J_2$ , А	$J_3$ , А
1	1.1	20	14	17	9	6	15	70	16	59	–	–	3
2	1.2	9	14	21	9	13	17	87	23	22	2	–	–
3	1.3	18	23	19	10	19	24	58	19	66	3	–	–
4	1.4	8	25	22	22	10	23	85	87	30	1	–	–
5	1.5	16	25	12	17	21	9	25	87	85	–	–	3
6	1.6	19	19	12	15	8	12	74	33	41	–	3	–
7	1.7	6	7	11	25	7	18	73	59	39	–	–	2
8	1.8	18	13	9	16	6	22	50	38	79	3	–	–
9	1.9	15	14	16	8	8	6	18	88	28	–	–	1
10	1.10	7	11	11	23	23	15	72	47	–	2	–	–
11	1.11	21	8	21	5	10	17	72	92	25	–	4	–
12	1.12	19	12	15	11	12	24	70	13	84	1	–	–
13	1.13	13	9	15	18	18	11	90	29	63	3	–	–
14	1.14	15	20	15	11	13	8	58	53	25	–	–	1
15	1.15	13	17	13	20	14	22	99	92	53	–	–	3
16	1.16	16	15	7	22	6	8	15	33	–	4	–	–
17	1.17	15	10	12	24	21	9	75	86	22	–	–	1
18	1.18	12	7	18	9	5	13	34	33	77	–	1	–
19	1.19	22	12	20	6	5	25	14	31	68	–	–	3
20	1.20	24	22	12	14	9	20	95	48	53	–	–	4
21	1.21	9	13	15	15	8	7	21	81	19	–	3	–
22	1.22	22	7	22	9	20	6	45	71	36	1	–	–
23	1.23	21	16	23	23	8	18	42	48	24	–	2	–
24	1.24	9	5	9	15	9	5	75	60	88	2	–	–
25	1.25	21	21	8	10	21	17	67	68	–	–	–	1
26	1.26	21	17	20	13	16	14	94	49	93	–	–	2
27	1.27	23	15	21	20	19	17	52	61	40	1	–	–
28	1.28	12	21	8	5	13	20	15	42	43	–	–	2
29	1.29	17	23	10	5	9	5	25	16	12	2	–	–
30	1.30	17	7	6	12	22	21	86	99	21	–	–	1

Таблица 1.2 – Исходные данные для специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» (часть 2)

Вариант	Схема на рисунке	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом	$R_6$ , Ом	$E_1$ , В	$E_2$ , В	$E_3$ , В	$J_1$ , А	$J_2$ , А	$J_3$ , А
1	1.30	25	24	12	13	7	9	45	37	68	–	–	2
2	1.29	18	17	6	20	20	23	79	22	47	3	–	–
3	1.28	23	20	9	7	15	5	37	11	47	–	–	3
4	1.27	10	10	16	16	7	19	21	27	14	2	–	–
5	1.26	16	7	19	16	6	6	8	28	19	–	4	–
6	1.25	20	13	9	7	8	24	34	14	96	–	3	–
7	1.24	20	21	5	17	14	9	42	90	73	–	–	3
8	1.23	14	16	7	23	14	9	36	43	42	3	–	–
9	1.22	8	15	11	8	6	13	72	96	88	–	–	2
10	1.21	16	11	17	10	12	22	32	59	–	4	–	–
11	1.20	8	16	10	25	24	6	61	80	68	–	1	–
12	1.19	7	24	7	12	5	12	77	48	6	3	–	–
13	1.18	9	15	11	17	17	21	6	91	8	2	–	–
14	1.17	23	22	25	23	12	6	89	6	86	–	–	3
15	1.16	6	16	7	9	6	6	83	4	4	–	1	–
16	1.15	13	14	13	12	6	16	67	18	–	2	–	–
17	1.14	17	14	15	9	15	23	28	49	59	–	–	3
18	1.13	21	9	7	17	10	10	15	10	40	–	–	2
19	1.12	5	15	8	23	7	13	54	25	11	–	–	3
20	1.11	15	11	22	14	17	22	15	63	35	2	–	–
21	1.10	8	21	19	17	14	16	81	46	93	2	–	–
22	1.9	5	14	12	12	10	12	65	96	38	–	–	2
23	1.8	21	21	24	5	13	19	42	45	38	–	–	3
24	1.7	5	7	12	18	21	7	94	83	93	2	–	–
25	1.6	12	11	19	14	11	7	20	83	–	3	–	–
26	1.5	14	15	12	20	22	25	31	85	58	–	–	2
27	1.4	13	13	24	5	18	12	80	79	54	3	–	–
28	1.3	23	21	10	21	15	10	14	67	53	–	3	–
29	1.2	9	16	10	16	8	5	73	23	85	2	–	–
30	1.1	16	14	19	22	12	20	81	20	74	–	–	3

Таблица 1.3 – Исходные данные для специальности 1-53 01 02 «Автоматизированные системы обработки информации» (часть 1)

Вариант	Схема на рисунке	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом	$R_6$ , Ом	$E_1$ , В	$E_2$ , В	$E_3$ , В	$J_1$ , А	$J_2$ , А	$J_3$ , А
1	1.1	18	20	18	17	10	24	73	77	2	–	3	–
2	1.2	10	16	19	11	21	5	19	97	82	–	–	2
3	1.3	24	7	19	10	6	14	96	52	48	–	–	3
4	1.4	16	9	19	17	6	13	60	45	68	–	1	–
5	1.5	20	12	20	18	5	21	35	68	60	–	3	–
6	1.6	24	10	16	18	15	13	27	33	85	–	–	1
7	1.7	6	14	11	9	6	17	49	99	33	–	2	–
8	1.8	18	21	22	18	23	9	31	85	37	–	–	1
9	1.9	7	6	9	16	25	15	61	44	23	–	–	1
10	1.10	11	8	8	11	19	8	26	88	–	–	–	2
11	1.11	11	18	21	9	7	9	88	77	7	–	4	–
12	1.12	21	6	16	6	12	20	24	92	37	–	–	1
13	1.13	10	23	24	19	8	25	73	67	15	3	–	–
14	1.14	15	11	7	19	20	12	13	42	52	–	–	1
15	1.15	13	6	24	14	11	21	17	77	9	–	–	3
16	1.16	16	24	6	18	19	6	82	78	–	4	–	–
17	1.17	9	24	19	22	14	25	73	24	23	–	–	1
18	1.18	6	9	11	12	23	13	11	48	80	–	1	–
19	1.19	15	11	18	23	11	8	25	86	45	–	–	3
20	1.20	13	7	11	20	18	9	5	71	12	–	–	4
21	1.21	8	23	20	14	20	18	90	35	55	–	3	–
22	1.22	21	11	22	20	12	17	40	20	41	1	–	–
23	1.23	22	21	8	25	18	12	2	81	56	–	–	2
24	1.24	14	22	11	9	14	7	94	10	36	2	–	1
25	1.25	5	19	12	12	14	16	7	90	–	–	–	1
26	1.26	12	18	13	19	7	10	66	95	64	–	–	2
27	1.27	11	7	22	18	18	23	70	76	82	1	–	–
28	1.28	9	20	22	19	10	8	33	58	72	–	–	2
29	1.29	16	18	23	13	14	24	38	81	40	2	–	–
30	1.30	18	7	23	14	16	13	44	72	6	2	–	–



Таблица 1.4 – Исходные данные для специальности 1-53 01 02 «Автоматизированные системы обработки информации» (часть 2)

Вариант	Схема на рисунке	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом	$R_6$ , Ом	$E_1$ , В	$E_2$ , В	$E_3$ , В	$J_1$ , А	$J_2$ , А	$J_3$ , А
1	1.30	17	16	10	12	8	23	96	12	79	–	–	3
2	1.29	22	9	21	9	20	16	40	29	72	2	–	–
3	1.28	13	18	9	12	5	16	42	83	74	3	–	–
4	1.27	21	19	9	13	14	9	1	89	23	1	–	–
5	1.26	9	18	24	18	22	23	21	66	23	–	–	3
6	1.25	21	25	17	11	16	15	30	92	71	–	3	–
7	1.24	18	12	16	9	15	18	74	2	45	–	–	2
8	1.23	23	17	17	13	14	13	59	27	67	3	–	–
9	1.22	21	16	20	5	7	8	67	50	19	–	–	1
10	1.21	18	10	17	5	8	6	81	50	–8	2	–	–
11	1.20	21	14	18	17	11	6	41	61	54	–	4	–
12	1.19	20	11	17	20	14	14	80	28	46	1	–	–
13	1.18	7	19	18	20	19	15	92	7	72	3	–	–
14	1.17	7	20	20	20	9	17	51	23	5	–	–	1
15	1.16	16	8	9	9	6	13	25	4	46	–	–	3
16	1.15	12	18	19	9	22	22	34	74	–	4	–	–
17	1.14	23	20	5	15	7	19	1	52	92	–	–	1
18	1.13	8	25	22	12	22	9	29	57	66	–	1	–
19	1.12	14	6	15	9	20	22	57	73	99	–	–	3
20	1.11	13	13	19	6	25	12	34	11	89	–	–	4
21	1.10	21	5	11	20	20	13	91	65	10	–	3	–
22	1.9	8	15	15	23	23	14	99	23	20	1	–	–
23	1.8	18	20	17	23	15	13	11	34	58	–	2	–
24	1.7	20	20	7	16	17	23	29	68	36	2	–	–
25	1.6	13	7	15	24	7	11	72	15	–	–	–	1
26	1.5	7	14	20	11	22	7	36	45	89	–	–	2
27	1.4	24	17	24	9	14	18	20	60	73	1	–	–
28	1.3	19	8	8	17	24	25	14	86	41	–	–	2
29	1.2	19	15	24	18	18	9	87	63	19	2	–	–
30	1.1	7	12	14	15	19	10	49	89	34	–	–	1

Таблица 1.5 – Исходные данные для специальности 1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» и направления подготовки 12.03.01 «Приборостроение»

Вариант	Схема на рисунке	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом	$R_6$ , Ом	$E_1$ , В	$E_2$ , В	$E_3$ , В	$J_1$ , А	$J_2$ , А	$J_3$ , А
1	1.1	21	11	21	9	7	20	62	57	2	–	3	–
2	1.2	24	17	15	12	16	19	58	69	42	–	–	2
3	1.3	7	16	17	25	23	9	9	70	47	–	–	3
4	1.4	15	21	6	19	15	13	10	18	30	–	1	–
5	1.5	24	8	20	18	13	17	14	39	15	–	3	–
6	1.6	17	21	24	23	8	23	20	61	3	–	–	1
7	1.7	7	7	8	6	11	18	17	55	22	–	2	–
8	1.8	23	11	9	11	7	21	15	76	5	–	–	1
9	1.9	9	23	17	19	7	7	3	2	62	–	–	1
10	1.10	24	15	8	9	17	16	6	19	–	–	–	2
11	1.11	7	19	20	22	18	16	25	67	17	–	4	–
12	1.12	12	6	24	7	17	14	73	26	14	–	–	1
13	1.13	6	23	17	24	7	24	10	5	18	3	–	–
14	1.14	24	15	8	8	15	19	19	20	40	–	–	1
15	1.15	21	21	13	14	15	19	41	65	48	–	–	3
16	1.16	10	12	7	15	7	14	3	16	–	4	–	–
17	1.17	20	25	9	19	22	5	65	5	7	–	–	1
18	1.18	9	19	15	8	8	24	20	28	17	–	1	–
19	1.19	16	17	13	6	12	25	51	28	8	–	–	3
20	1.20	11	6	9	16	25	17	18	7	33	–	–	4
21	1.21	6	12	9	21	10	19	26	30	53	–	3	–
22	1.22	24	7	19	20	13	10	49	51	64	1	–	–
23	1.23	21	25	9	22	19	13	39	72	43	–	–	2
24	1.24	16	19	13	17	23	14	47	60	1	2	–	1
25	1.25	12	8	5	8	10	18	76	57	–	–	–	1
26	1.26	16	15	7	12	12	14	46	15	8	–	1	–
27	1.27	12	20	22	17	9	14	18	7	37	–	2	–
28	1.28	7	6	21	7	13	21	34	19	7	–	1	–
29	1.29	17	19	9	18	23	6	51	17	22	–	1	–
30	1.30	18	11	21	18	23	11	48	15	28	2	–	–

Таблица 1.6 – Исходные данные для специальности 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств (по направлениям)»

Вариант	Схема на рисунке	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом	$R_6$ , Ом	$E_1$ , В	$E_2$ , В	$E_3$ , В	$J_1$ , А	$J_2$ , А	$J_3$ , А
1	1.1	25	24	12	13	7	9	45	37	68	–	–	2
2	1.2	18	17	6	20	20	23	79	22	47	3	–	–
3	1.3	23	20	9	7	15	5	37	11	47	–	–	3
4	1.4	10	10	16	16	7	19	21	27	14	2	–	–
5	1.5	16	7	19	16	6	6	8	28	19	–	4	–
6	1.6	20	13	9	7	8	24	34	14	96	–	3	–
7	1.7	20	21	5	17	14	9	42	90	73	–	–	3
8	1.8	14	16	7	23	14	9	36	43	42	3	–	–
9	1.9	8	15	11	8	6	13	72	96	88	–	–	2
10	1.10	16	11	17	10	12	22	32	59	–	4	–	–
11	1.11	8	16	10	25	24	6	61	80	68	–	1	–
12	1.12	7	24	7	12	5	12	77	48	6	3	–	–
13	1.13	9	15	11	17	17	21	6	91	8	2	–	–
14	1.14	23	22	25	23	12	6	89	6	86	–	–	3
15	1.15	6	16	7	9	6	6	83	4	4	–	1	–
16	1.16	13	14	13	12	6	16	67	18	–	2	–	–
17	1.17	17	14	15	9	15	23	28	49	59	–	–	3
18	1.18	21	9	7	17	10	10	15	10	40	–	–	2
19	1.19	5	15	8	23	7	13	54	25	11	–	–	3
20	1.20	15	11	22	14	17	22	15	63	35	2	–	–
21	1.21	8	21	19	17	14	16	81	46	93	2	–	–
22	1.22	5	14	12	12	10	12	65	96	38	–	–	2
23	1.23	21	21	24	5	13	19	42	45	38	–	–	3
24	1.24	5	7	12	18	21	7	94	83	93	2	–	–
25	1.25	12	11	19	14	11	7	20	83	–	3	–	–
26	1.26	14	15	12	20	22	25	31	85	58	–	–	2
27	1.27	13	13	24	5	18	12	80	79	54	3	–	–
28	1.28	23	21	10	21	15	10	14	67	53	–	3	–
29	1.29	9	16	10	16	8	5	73	23	85	2	–	–
30	1.30	16	14	19	22	12	20	81	20	74	–	–	3

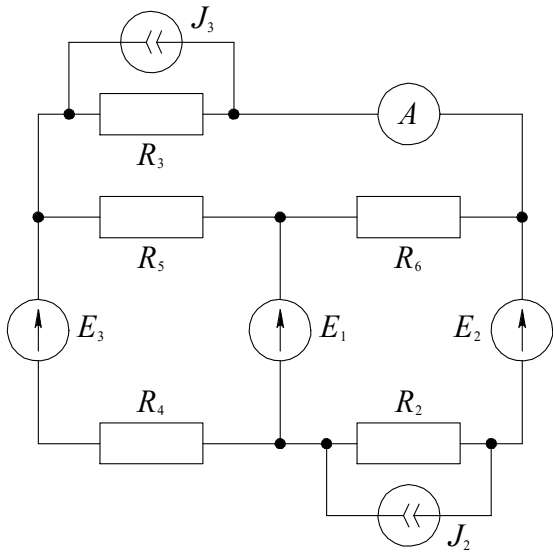


Рисунок 1.1

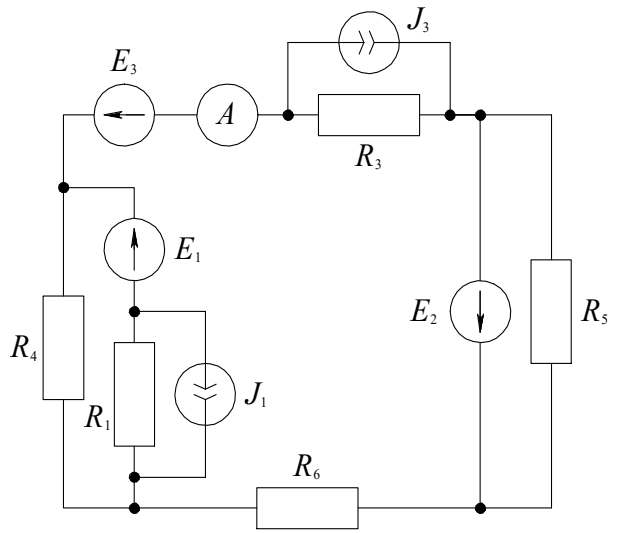


Рисунок 1.2

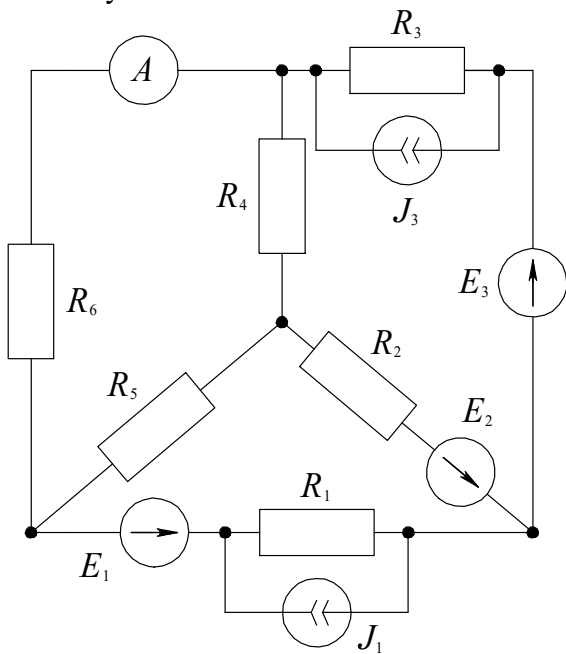


Рисунок 1.3

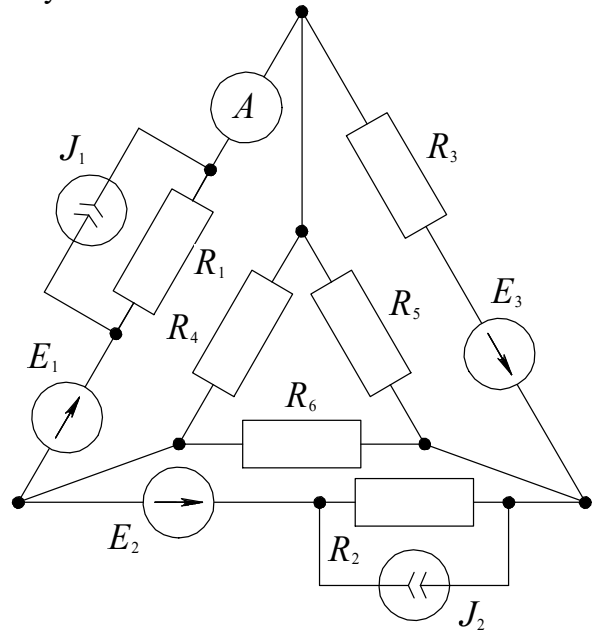


Рисунок 1.4

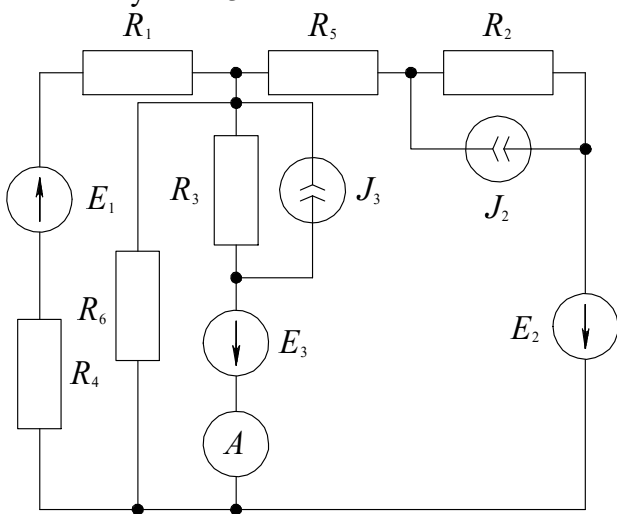


Рисунок 1.5

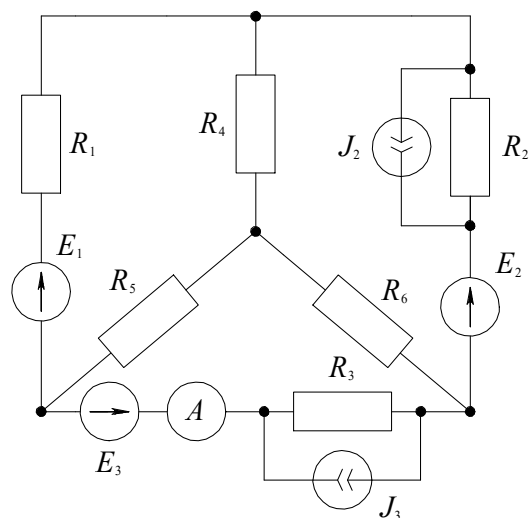


Рисунок 1.6

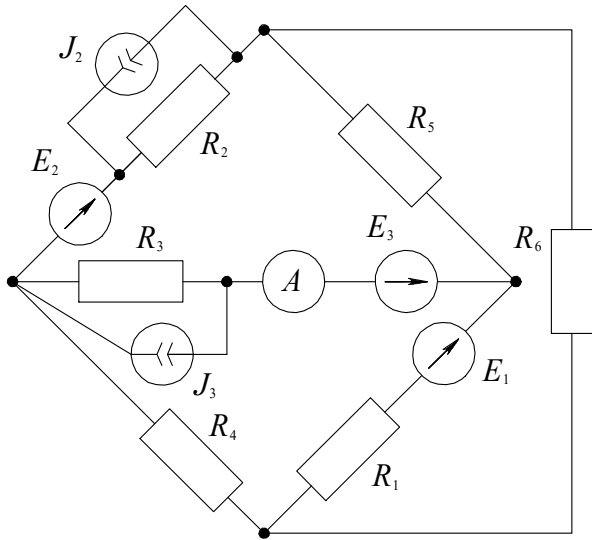


Рисунок 1.7

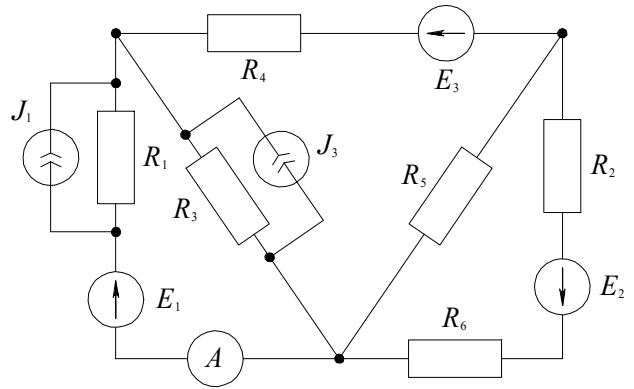


Рисунок 1.8

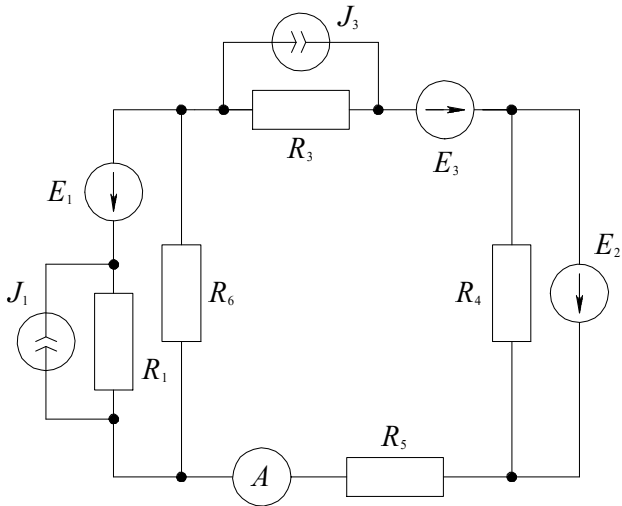


Рисунок 1.9

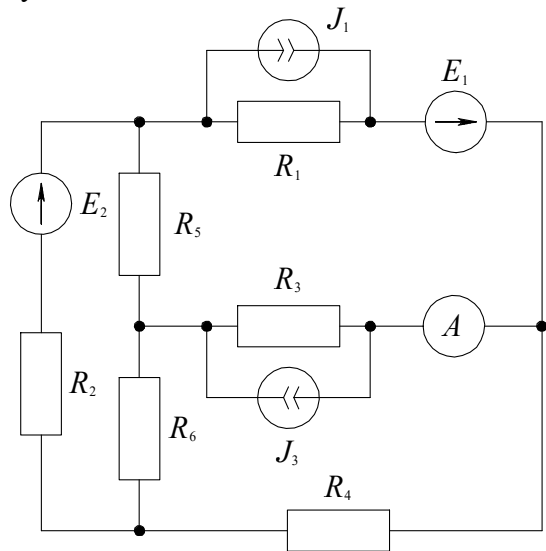


Рисунок 1.10

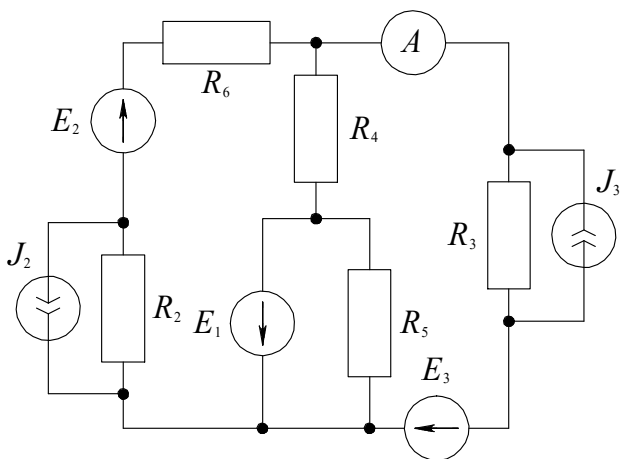


Рисунок 1.11

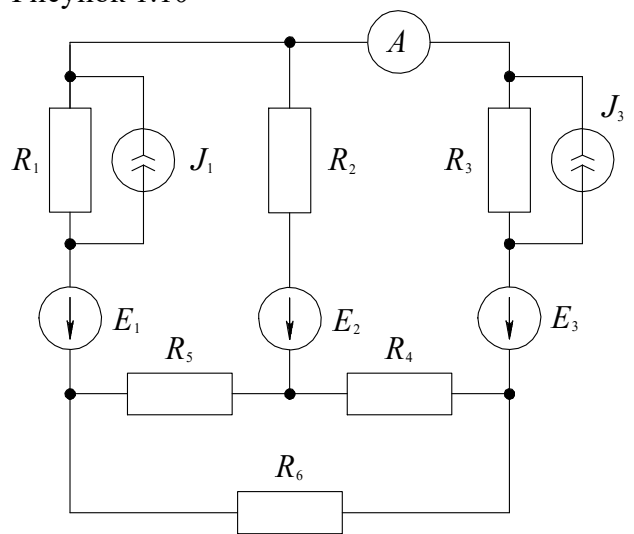


Рисунок 1.12

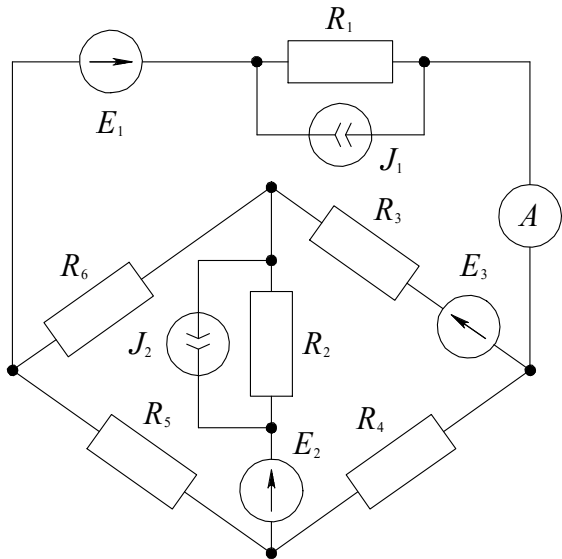


Рисунок 1.13

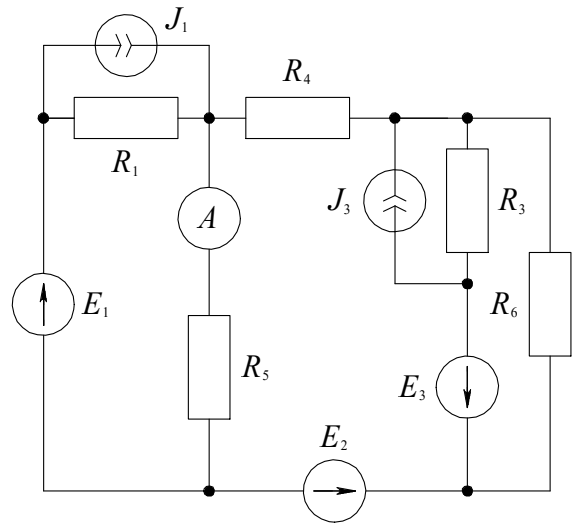


Рисунок 1.14

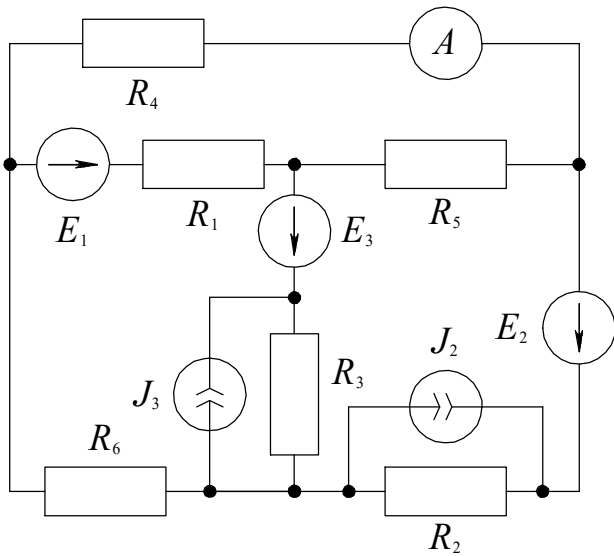


Рисунок 1.15

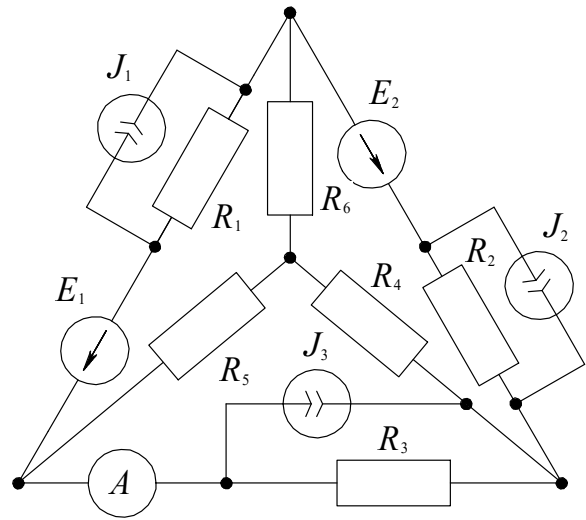


Рисунок 1.16

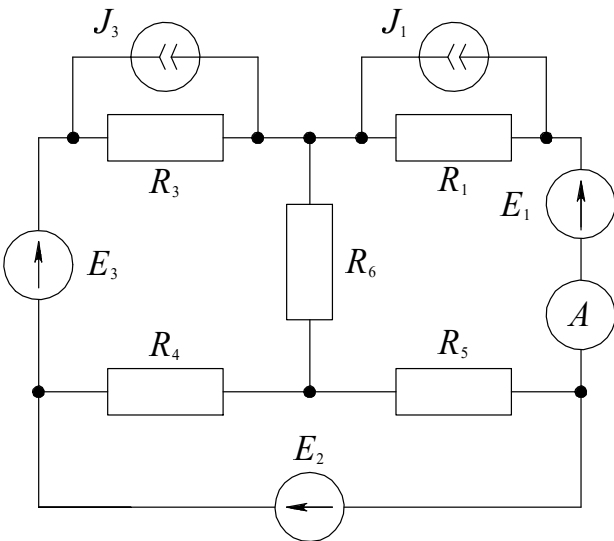


Рисунок 1.17

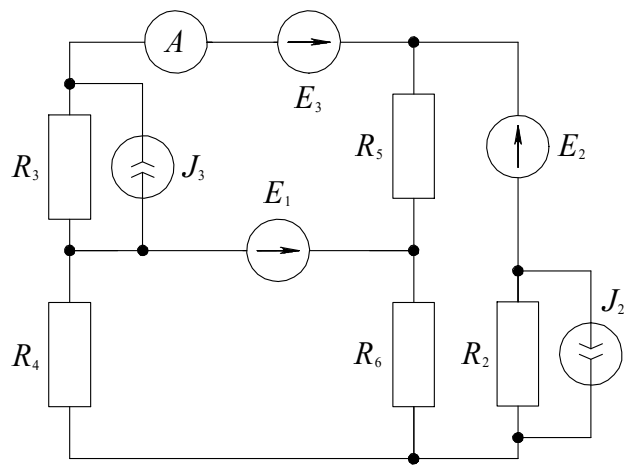


Рисунок 1.18

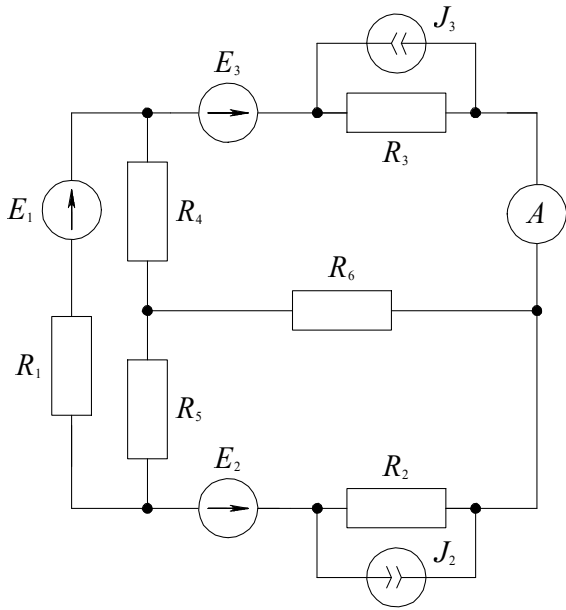


Рисунок 1.19

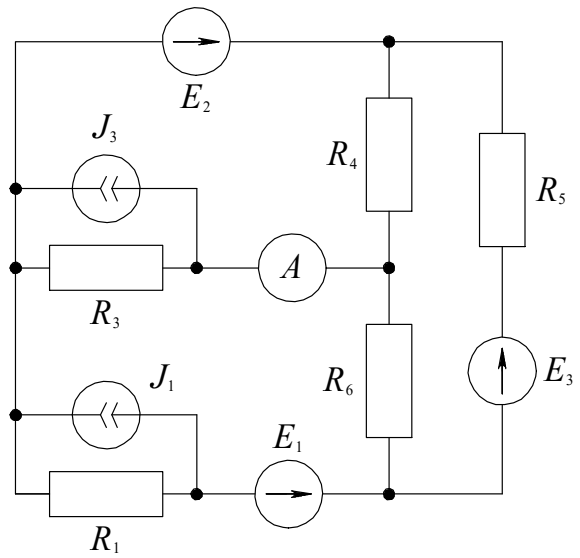


Рисунок 1.20

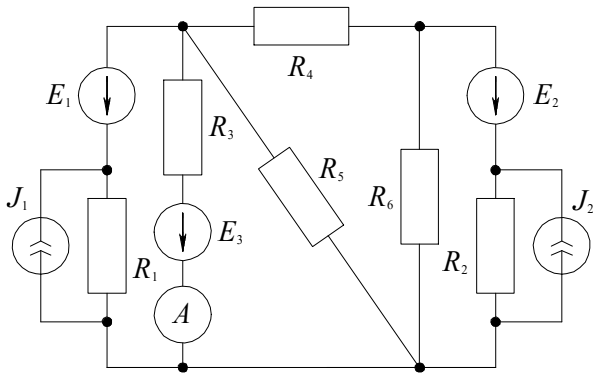


Рисунок 1.21

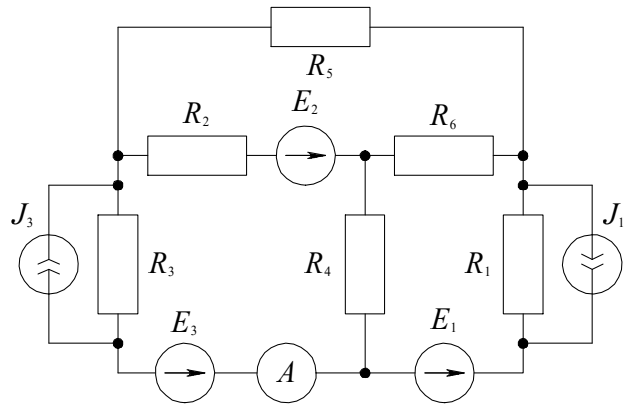


Рисунок 1.22

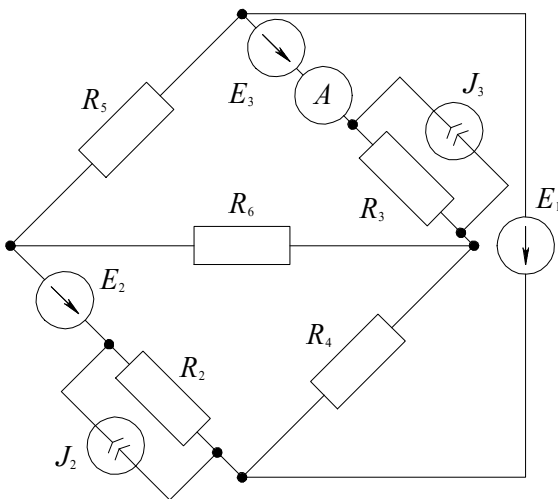


Рисунок 1.23

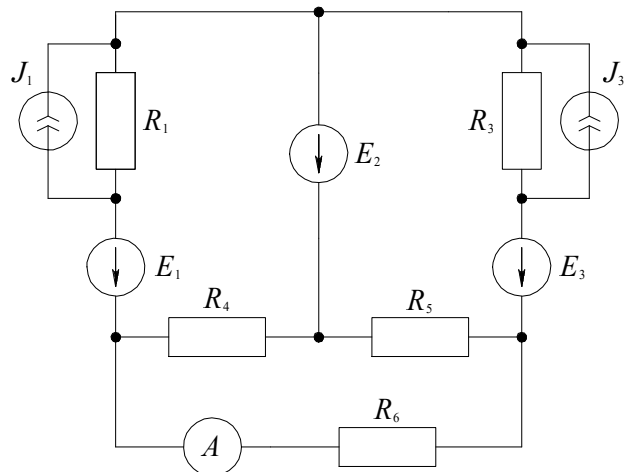


Рисунок 1.24

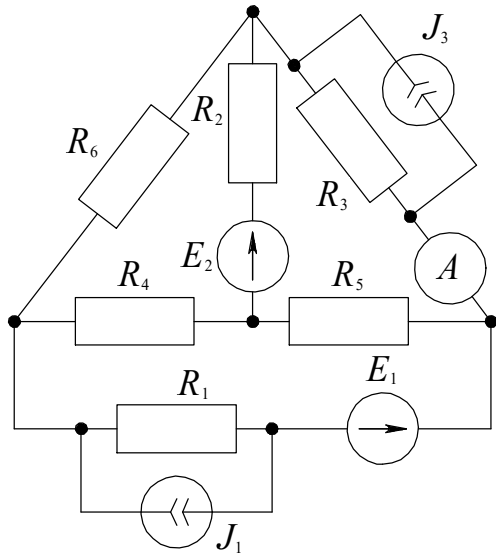


Рисунок 1.25

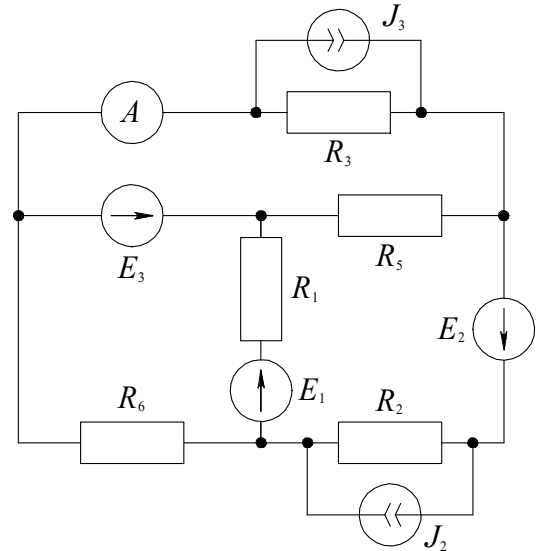


Рисунок 1.26

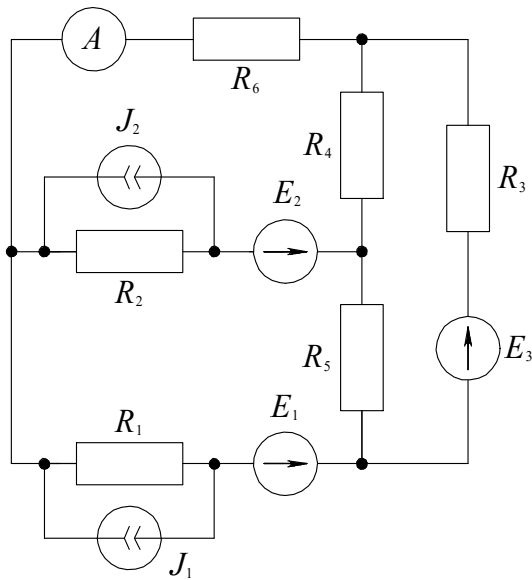


Рисунок 1.27

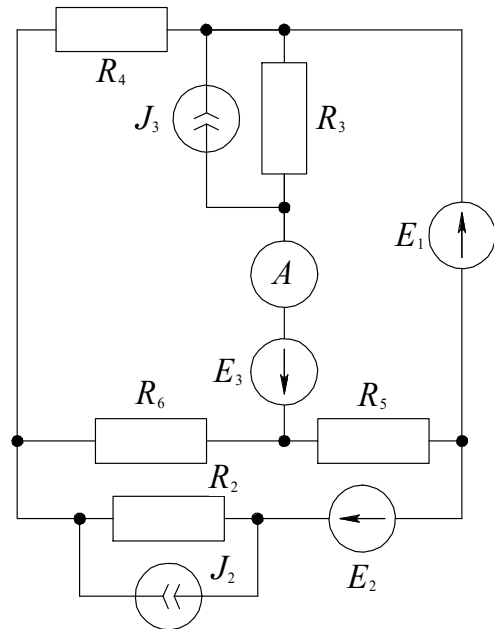


Рисунок 1.28

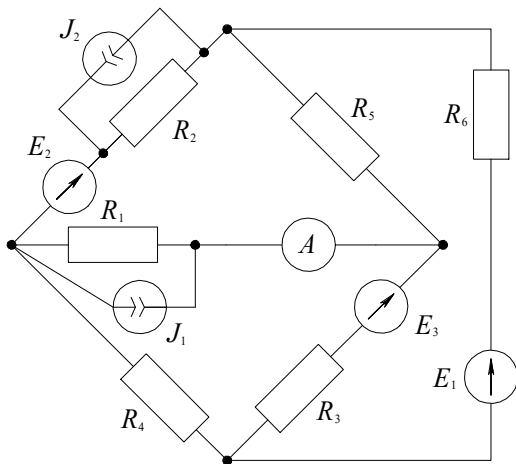


Рисунок 1.29

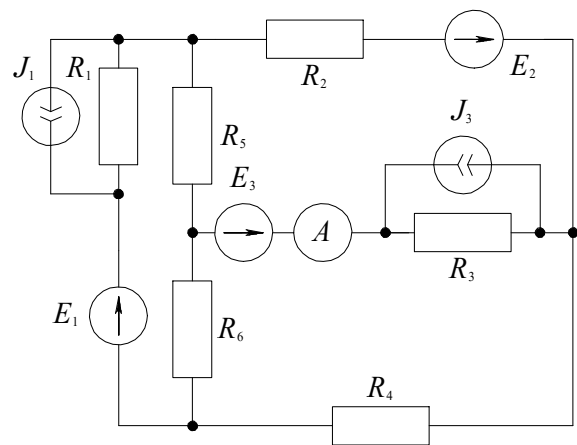


Рисунок 1.30



## 2 Краткие теоретические сведения

### 2.1 Основные определения

*Электрическая цепь* – это совокупность устройств и объектов, образующих путь для протекания электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий электродвижущей силы, силы тока и напряжения.

Составные части электрической цепи можно разделить на две группы: источники электрической энергии и приемники.

*Источники электрической энергии* (гальванические элементы, аккумуляторы, генераторы постоянного тока и т. п.) представляют собой различные устройства, в которых происходит преобразование химической, тепловой, механической и других видов энергии в электрическую.

*Приемники электрической энергии* (реостаты, нагревательные приборы, лампы и др.) – это элементы электрической цепи, в которых происходит преобразование электрической энергии в другие виды энергии (тепловую, механическую, химическую).

Графическое изображение электрической цепи называется *схемой*. Схемы электрических цепей представлены, например, на рисунках 1.1–1.30. Для каждого элемента электрической цепи существует свое условное изображение.

Рассмотрим основные составляющие схемы электрической цепи.

*Ветвью* электрической цепи называется участок, состоящий из одного или нескольких элементов, через которые протекает один и тот же ток. Такое соединение элементов называется *последовательным*.

Если в некоторой точке на схеме электрической цепи сходятся три или более ветвей, такую точку называют *узлом*. При выполнении расчета узлы бывает удобно обозначать латинскими буквами.

*Контур* электрической цепи представляет собой замкнутый путь по нескольким ветвям электрической цепи. Если контур содержит хотя бы одну ветвь, которая не входит ни в один другой, то такой контур является *независимым*.

### 2.2 Правила Кирхгофа<sup>1</sup>

**Первое правило Кирхгофа.** Алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в узле электрической цепи равна нулю (рисунок 2.1).

Математически можно записать это правило следующим образом:

---

<sup>1</sup> Правила Кирхгофа в литературе называют также *законами Кирхгофа*. В рамках теории электричества и электротехники это тождественные понятия. Не следует, однако, путать с законом излучения Кирхгофа и законом Кирхгофа в химии, используемым для исследования тепловых эффектов химических реакций

$$\sum_{j=1}^n I_j = 0. \quad (2.1)$$

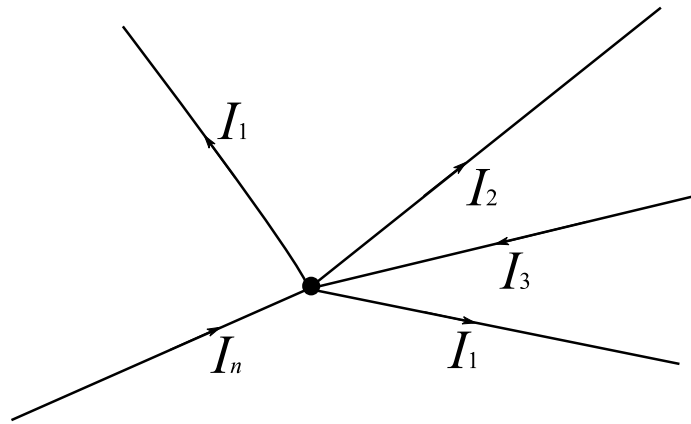


Рисунок 2.1 – Узел схемы электрической цепи

Принято вытекающий из узла ток считать положительным, а втекающий в узел – отрицательным.

**Второе правило Кирхгофа.** Алгебраическая сумма падений напряжений в контуре (под *падением напряжения* понимают произведение силы тока на сопротивление) равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом же контуре.

Для контура, состоящего из  $N$  ветвей, можно записать:

$$\sum_{k=1}^N I_k \cdot R_k = \sum_{k=1}^N E_k. \quad (2.2)$$

Для того чтобы записать уравнение согласно второму правилу Кирхгофа, необходимо сначала задать направление обхода контура, которое считается условно положительным. Если выбранное направление контура не совпадает с направлением тока в ветви или с направлением ЭДС, то такое слагаемое должно быть записано в уравнении со знаком «минус».

### Граф и дерево схемы электрической цепи.

Для характеристики геометрической структуры схемы цепи используют *графы*, части которого, называемые ветвями (ребрами), представляют собой ветви схемы, а точки их соединения, называемые узлами (вершинами), изображают узлы схемы. *Направленным (ориентированным)* топологическим графом называется такой, у которого каждая ветвь имеет определенное направление (ориентацию). Для графов схем электрических цепей направление ветви выбирают совпадающим с положительным направлением тока в ветви.

Граф можно изобразить различными способами, однако он должен сохранять исходную топологию схемы электрической цепи. На графах не изображаются ветви с идеальными источниками тока, поскольку такие ветви обладают бесконечно большим сопротивлением.

*Деревом* называется совокупность ветвей, соединяющих все узлы, но не образующих ни одного контура. Как известно, на  $n$  вершинах (узлах) можно построить  $n^{n-2}$  деревьев. Все они будут эквивалентны между собой.

Число ветвей, входящих в дерево, определяет число уравнений согласно первому правилу Кирхгофа. Ветви, не вошедшие в дерево, называются *ветвями связи*, их число определяет число уравнений согласно второму правилу Кирхгофа.

### 2.3 Уравнения в матричной форме

Для получения уравнений электрической цепи в матричной форме необходимо составить узловую матрицу **A** и контурную матрицу **B**.

Строки *узловой матрицы* соответствуют узлам схемы электрической цепи, а столбцы – ветвям. Ветви принято индексировать аналогично токам в них. Если ветвь  $m$  подключена к узлу  $n$ , в соответствующей позиции ставят «1», если направление тока положительное (от узла) и «-1», если ток направлен к узлу. Если же ветвь не соединена с данным узлом необходимо записать «0».

Строки *контурной матрицы* соответствуют контурам схемы электрической цепи, а ее столбцы – ветвям. Если ветвь  $m$  входит в контур  $k$ , и ток в данной ветви совпадает с принятым направлением обхода контура, в соответствующей позиции матрицы записывают «1», если направления не совпадают запишем «-1». Если же ветвь не входит в рассматриваемый контур, то в данную позицию необходимо записать «0».

Обратим внимание на то, что при записи уравнений, описывающих состояние электрических цепей, в матричной форме ветви схемы не должны состоять только из идеальных элементов, таких как:

- источник тока;
- источник ЭДС;
- перемычка ( $R = 0$ ).

Поэтому на первом этапе работы со схемой она подвергается эквивалентным преобразованиям:

- источники ЭДС ветвей, состоящих только из этих ЭДС, переносятся за узел электрической цепи;
- узлы, соединённые перемычками, объединяются в единый узел.

### 2.4 Метод контурных токов

Метод контурных токов основан на допущении, что в каждом из независимых контуров схемы циркулирует некоторый виртуальный контурный ток. Если некоторая ветвь принадлежит только одному контуру, реальный ток в ней равен контурному. Если же ветвь принадлежит нескольким контурам, ток в ней равен

сумме соответствующих контурных токов (или разности, необходимо учитывать направление реального тока в ветви и принятого направления контурного тока). Поскольку независимые контуры покрывают собой всю схему (действительно, любая ветвь принадлежит хотя бы одному контуру), то ток в любой ветви можно выразить через контурные токи. Размерность системы уравнений, которую требуется решить для расчета методом контурных токов равна числу независимых контуров.

### 2.5 Метод узловых потенциалов

В цепи, состоящей из  $n$  узлов и  $k$  ветвей, возможно выразить токи  $I_k$  через потенциалы узлов и сопротивление ветви. Поскольку электрический потенциал определен с точностью до произвольного постоянного слагаемого, то потенциал в одном из узлов можно принять равным нулю, а потенциалы в остальных узлах определять относительно базового узла. Для этого в систему уравнений, полученную путем применения первого правила Кирхгофа к оставшимся узлам, подставляют выражения для  $I_k$  и, группируя слагаемые, получают систему уравнений относительно неизвестных потенциалов узлов. Токи ветвей определяются путем подстановки рассчитанных потенциалов в исходные выражения для  $I_k$ . Размерность системы уравнений равна числу независимых узлов.

### 2.6 О выборе оптимального метода расчета

Для расчета разветвленной электрической цепи необходимо (если это возможно) привести схему к наиболее простому виду. При этом число неизвестных токов и, соответственно, количество решаемых уравнений уменьшается. После выполнения преобразований выбирается метод расчета (в рамках данной работы выбор осуществляется между методом контурных токов и методом узловых потенциалов), который окажется наиболее эффективным с вычислительной точки зрения, т. е. потребует решения системы алгебраических уравнений наименьшей размерности.

### 2.7 Баланс мощностей

После того как был выполнен расчет токов в ветвях электрической цепи, следует проверить его корректность. В электрической цепи постоянного тока энергия, отдаваемая источниками в единицу времени, должна быть равна энергии, рассеиваемой резисторами в единицу времени, т. е. в цепи должен быть выполнен *баланс мощностей*. Математическая запись баланса мощностей следующая

$$\sum I^2 R = \sum IE + \sum JU. \quad (2.3)$$

В правой части уравнения (2.3) должны учитываться знаки. Если источник ЭДС имеет то же направление, что и ток в ветви, его работа считается положи-

тельной и соответствующее слагаемое принимается со знаком «плюс», в противном случае необходимо учесть знак «минус». Для источников тока знак «плюс» записывают, если направление напряжения на его зажимах противоположно току источника.

### 2.8 Метод эквивалентного генератора

Этот метод также известен как *метод активного двухполюсника* или *метод Тевенена*. Метод применяется в случаях, когда требуется найти ток  $I_k$  только одной ветви схемы электрической цепи.

В соответствии с теоремой об эквивалентном генераторе линейная часть цепи может быть заменена эквивалентной схемой источника питания, представляющей собой последовательное соединение источника ЭДС  $U_{xx}$  и внутреннего его сопротивления  $R_{вн}$  (рисунок 2.2), при этом ток в ветви рассчитывается по формуле Тевенена

$$I_k = \frac{U_{xx} \pm E_k}{R_k + R_{вн}}. \quad (2.4)$$

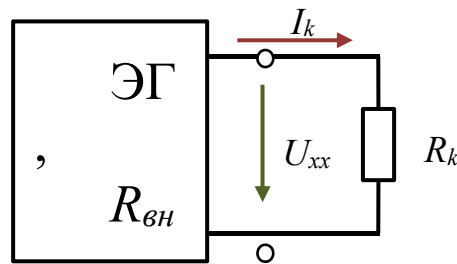


Рисунок 2.2 – Эквивалентный генератор

### 2.9 Потенциальная диаграмма

*Потенциальная диаграмма* – это график распределения потенциалов вдоль какого-либо участка цепи или замкнутого контура. По оси абсцисс на нем откладывают сопротивления вдоль контура, начиная с точки, потенциал которой принимают равным нулю, по оси ординат – потенциалы. Каждой точке рассматриваемого контура соответствует своя точка на потенциальной диаграмме. Следует помнить, что при переходе через источник электрической энергии по направлению ЭДС происходит увеличение потенциала на величину ЭДС источника, а при переходе от положительного к отрицательному полюсу – уменьшается; при переходе через сопротивление по направлению тока происходит уменьшение потенциала на величину, равную произведению данного тока на величину сопротивления.

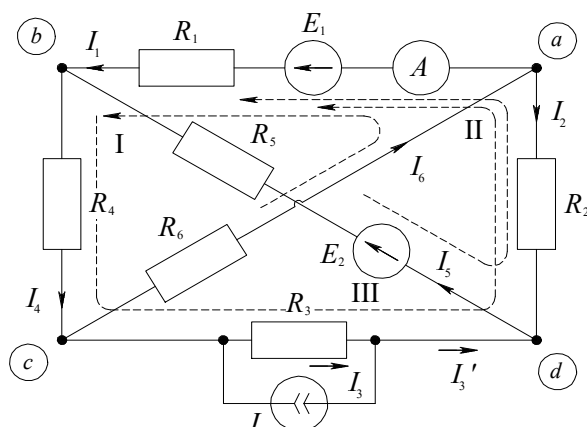
### 3 Пример выполнения расчетно-графического задания

Задача, представленная в этом разделе, является примером расчета и образцом оформления задания. Все математические выкладки в работе следует делать наиболее полно, если в процессе вычислений использовалось программное обеспечение (например, Mathcad, Microsoft Excel или другое), листинг программы или рабочей книги необходимо привести в приложении к работе с соответствующей ссылкой.

Решение задачи выполнено двумя методами: методом узловых потенциалов и методом контурных токов. Это сделано для того, чтобы пример был наиболее полным. Студенту в своей работе необходимо выполнить расчет только одним методом, который является оптимальным для его варианта.

#### 3.1 Исходные данные

Для схемы на рисунке 3.1 необходимо выполнить пункты 1–9 из раздела 1.



$$\begin{aligned} R_1 &= 6 \text{ Ом}; & R_4 &= 25 \text{ Ом}; \\ R_2 &= 12 \text{ Ом}; & R_5 &= 30 \text{ Ом}; \\ R_3 &= 15 \text{ Ом}; & R_6 &= 8 \text{ Ом}. \\ E_1 &= 80 \text{ В}; \\ E_2 &= 150 \text{ В}; \\ J &= 7 \text{ А}; \end{aligned}$$

Рисунок 3.1 – Схема электрической цепи

#### 3.2 Построение графа и дерева схемы. Составление уравнений согласно правилам Кирхгофа

Граф схемы (см. рисунок 3.1) представлен на рисунке 3.2. Жирной линией выделим одно из возможных деревьев.

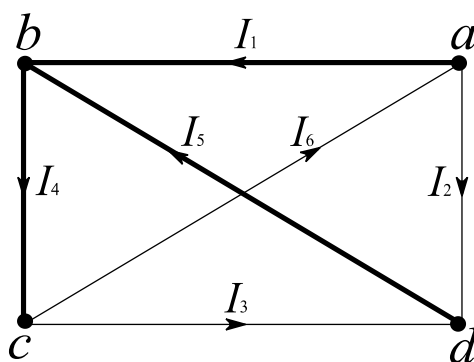


Рисунок 3.2 – Граф схемы электрической цепи (дерево графа выделено жирной линией)

Проанализируем граф и дерево схемы. Дерево состоит из трех ветвей, следовательно, согласно первому правилу Кирхгофа необходимо составить три уравнения. Далее число ветвей, не вошедших в состав дерева (ветвей связи), также равно трем.

Следовательно, согласно второму правилу Кирхгофа необходимо составить три уравнения. В сумме для расчета токов в ветвях цепи, схема которой представлена на рисунке 3.1, требуется решить систему из шести уравнений. Запишем их в матричной форме.

Составим узловую матрицу **A**. Столбцы матрицы соответствуют ветвям схемы, а строки – узлам.

$$\mathbf{A} = \begin{array}{l} \text{a)} \\ \text{b)} \\ \text{c)} \end{array} \begin{array}{c|c|c|c|c|c} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ \hline -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 \end{array}$$

Составим контурную матрицу **B**. Столбцы матрицы также соответствуют ветвям схемы, а строки в данном случае – контурам.

$$\mathbf{B} = \begin{array}{l} \text{I)} \\ \text{II)} \\ \text{III)} \end{array} \begin{array}{c|c|c|c|c|c} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ \hline 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ \hline 1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{array}$$

Дополним узловую и контурную матрицы соответствующими вектор-столбцами источников ЭДС, тока, диагональной матрицей сопротивлений, а также неизвестным вектор-столбцом токов ветвей.

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_2 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \vec{J} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ J \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_1 & & & & & \\ & R_2 & & & & \\ & & R_3 & & & \\ & & & \mathbf{0} & & \\ & & & & R_4 & \\ & & & & & R_5 \\ & & & \mathbf{0} & & \\ & & & & & R_6 \end{bmatrix}; \quad \vec{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}.$$

Теперь уравнения согласно правилам Кирхгофа можно записать в матричной форме

$$\begin{cases} \mathbf{A}\vec{I} = -\mathbf{A}\vec{J}; \\ \mathbf{B}\mathbf{R}\vec{I} = \mathbf{B}\vec{E}. \end{cases}$$

Умножая соответствующие матрицы на вектор-столбцы, получаем систему уравнений согласно правилам Кирхгофа в обычной форме:

$$\begin{aligned} a) \quad & I_1 + I_2 - I_6 = 0; \\ b) \quad & I_4 - I_1 - I_5 = 0; \\ c) \quad & -I_4 + I_3 + I_6 = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I) \quad & I_1 R_1 + I_6 R_6 + I_4 R_4 = E_1; \\ II) \quad & -I_5 R_5 - I_2 R_2 + I_1 R_1 = E_1 - E_2; \\ III) \quad & I_1 R_1 + I_4 R_4 + I_3 R_3 - I_2 R_2 = E_1. \end{aligned}$$

### 3.3 Выбор оптимального метода расчета

Преобразуем схему электрической цепи, заменив источник тока эквивалентной ЭДС величиной  $E' = JR_3 = 7 \cdot 15 = 105 \text{ В}$ .

Для наглядности изобразим ветвь с током  $I_6$  иначе, чтобы избежать пересечения ветвей. Полученная схема представлена на рисунке 3.3.

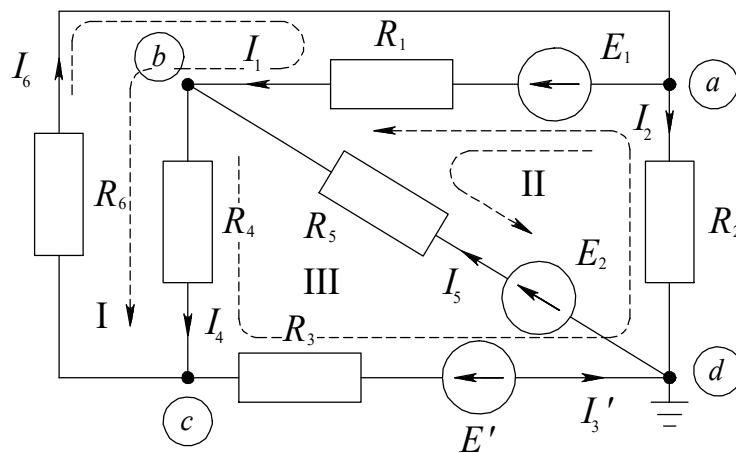


Рисунок 3.3 – Схема электрической цепи после преобразования

Полученная схема имеет три независимых узла и три независимых контура, следовательно, метод контурных токов и метод узловых потенциалов равноценны. Можно выбрать любой из них.

### 3.4 Расчет методом контурных токов

Обозначим  $I_{11}, I_{22}, I_{33}$  – виртуальные контурные токи, циркулирующие в контурах I, II и III соответственно, и выразим через них реальные токи ветвей:



$$\begin{aligned}
I_1 &= I_{11} + I_{22} + I_{33}; & I_4 &= I_{11} + I_{33}; \\
I_2 &= -I_{22} - I_{33}; & I_5 &= -I_{22}; \\
I'_3 &= I_{33}; & I_6 &= I_{11}.
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Теперь запишем систему уравнений согласно второму правилу Кирхгофа:

$$\begin{cases}
-I_1 R_1 - I_6 R_6 - I_4 R_4 = -E_1; \\
-I_5 R_5 - I_2 R_2 + I_1 R_1 = E_1 - E_2; \\
I_1 R_1 + I_4 R_4 + I'_3 R_3 - I_2 R_2 = E_1 - E'.
\end{cases} \tag{3.2}$$

Подставляя выражения в систему, получаем:

$$\begin{cases}
(I_{11} + I_{22} + I_{33})R_1 + I_{11}R_6 + (I_{11} + I_{33})R_4 = E_1; \\
I_{22}R_5 - (-I_{22} - I_{33})R_2 + (I_{11} + I_{22} + I_{33})R_1 = E_1 - E_2; \\
(I_{11} + I_{22} + I_{33})R_1 + (I_{11} + I_{33})R_4 + I_{33}R_3 - (-I_{22} - I_{33})R_2 = E_1 - E'.
\end{cases} \tag{3.3}$$

Группируя слагаемые в системе уравнений, получаем новую систему уравнений относительно неизвестных  $I_{11}, I_{22}, I_{33}$ :

$$\begin{cases}
I_{11}(R_1 + R_4 + R_6) + I_{22}R_1 + I_{33}(R_1 + R_4) = E_1; \\
I_{11}R_1 + I_{22}(R_1 + R_2 + R_5) + I_{33}(R_1 + R_2) = E_1 - E_2; \\
I_{11}(R_1 + R_4) + I_{22}(R_1 + R_2) + I_{33}(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) = E_1 - E'.
\end{cases} \tag{3.4}$$

Подставим в систему численные значения и воспользуемся, например, хорошо известным из курса математики методом Крамера для ее решения:

$$\begin{cases}
I_{11} \cdot 39 + I_{22} \cdot 6 + I_{33} \cdot 31 = 80; \\
I_{11} \cdot 6 + I_{22} \cdot 48 + I_{33} \cdot 18 = -70; \\
I_{11} \cdot 31 + I_{22} \cdot 18 + I_{33} \cdot 58 = -25.
\end{cases}$$

Вычислим определители матриц:

$$\begin{aligned}
\Delta &= \begin{vmatrix} 39 & 6 & 31 \\ 6 & 48 & 18 \\ 31 & 18 & 58 \end{vmatrix} = 39 \cdot 48 \cdot 58 + 6 \cdot 18 \cdot 31 + 31 \cdot 6 \cdot 18 - 31 \cdot 48 \cdot 31 - \\
&\quad - 39 \cdot 18 \cdot 18 - 6 \cdot 6 \cdot 58 = 54420;
\end{aligned}$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 80 & 6 & 31 \\ -70 & 48 & 18 \\ -25 & 18 & 58 \end{vmatrix} = 216600;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 39 & 80 & 31 \\ 6 & -70 & 18 \\ 31 & -25 & 58 \end{vmatrix} = -61370;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 39 & 6 & 80 \\ 6 & 48 & -70 \\ 31 & 18 & -25 \end{vmatrix} = -120180.$$

Откуда находим:  $I_{11} = \Delta_1 / \Delta = 3,980 \text{ А}$ ;  $I_{22} = \Delta_2 / \Delta = -1,128$ ;  $I_{33} = \Delta_3 / \Delta = -2,208 \text{ А}$ .

Подставляя полученные значения контурных токов в выражения, получаем искомые токи ветвей:

$$I_1 = 3,980 - 1,128 - 2,208 = 0,644 \text{ А}; \quad I_4 = 3,980 - 2,208 = 1,772 \text{ А};$$

$$I_2 = 1,128 + 2,208 = 3,336 \text{ А}; \quad I_5 = 1,128 \text{ А};$$

$$I'_3 = -2,208 \text{ А}; \quad I_6 = 3,980 \text{ А}.$$

В исходной схеме (см. рисунок 3.1) с источником тока, ток  $I_3$  отличается от рассчитанного нами выше  $I'_3$ . Найти величину нужного тока можно с помощью первого правила Кирхгофа:  $I_3 = I'_3 + J = -2,208 + 7 = 4,792 \text{ А}$ .

### 3.5 Расчет методом узловых потенциалов

Получим решение при помощи метода узловых потенциалов. Для этого принимаем потенциал одного из узлов равным нулю. Пусть это будет узел  $d$ , ( $\varphi_d = 0 \text{ В}$ ). На схеме электрической цепи такой узел помечают символом заземления (см. рисунок 3.3).

Потенциалы оставшихся узлов:  $\varphi_a$ ,  $\varphi_b$ ,  $\varphi_c$  неизвестны. Чтобы определить их, составим систему уравнений по следующему алгоритму. Запишем для узлов  $a$ ,  $b$  и  $c$  уравнения согласно первому правилу Кирхгофа:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_6 = 0; \\ -I_1 - I_5 + I_4 = 0; \\ -I_4 + I'_3 + I_6 = 0. \end{cases} \quad (3.5)$$

Выразим теперь ток в каждой ветви через разность потенциалов и сопротивление ветви (учитывая, что  $\varphi_d = 0$ ):

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{\varphi_a - \varphi_b + E_1}{R_1}; & I_4 &= \frac{\varphi_b - \varphi_c}{R_4}; \\ I_2 &= \frac{\varphi_a}{R_2}; & I_5 &= \frac{-\varphi_b + E_2}{R_5}; \\ I'_3 &= \frac{\varphi_c - E'}{R_3}; & I_6 &= \frac{\varphi_c - \varphi_a}{R_6}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Подставим выражения в систему и, группируя слагаемые с одинаковыми множителями, получаем систему уравнений относительно неизвестных  $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ :

$$\begin{cases} \varphi_a \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_6} \right) - \varphi_b \frac{1}{R_1} - \varphi_c \frac{1}{R_6} = -\frac{E_1}{R_1}; \\ -\varphi_a \frac{1}{R_1} + \varphi_b \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_4} \right) - \varphi_c \frac{1}{R_4} = \frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_5}; \\ -\varphi_a \frac{1}{R_6} - \varphi_b \frac{1}{R_4} + \varphi_c \left( \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6} \right) = \frac{E'}{R_3}. \end{cases} \quad (3.7)$$

Подставим в численные значения

$$\begin{cases} \varphi_a \frac{3}{8} - \varphi_b \frac{1}{6} - \varphi_c \frac{1}{8} = -\frac{40}{3}; \\ -\varphi_a \frac{1}{6} + \varphi_b \frac{6}{25} - \varphi_c \frac{1}{25} = \frac{55}{3}; \\ -\varphi_a \frac{1}{8} - \varphi_b \frac{1}{25} + \varphi_c \frac{139}{600} = 7. \end{cases}$$

Решение системы алгебраических уравнений можно получить любым известным методом, например, методом Крамера, который был использован при решении системы уравнений в подразделе 3.4.

Получаем

$$\varphi_a = \frac{36310}{907} = 40,033 \text{ В};$$

$$\varphi_b = \frac{105365}{907} = 116,169 \text{ В};$$

$$\varphi_c = \frac{65190}{907} = 71,874 \text{ В}.$$

Используя формулы, находим токи в ветвях исследуемой электрической цепи:

$$I_1 = \frac{40,033 - 116,169 + 80}{6} = 0,644 \text{ А}; \quad I_4 = \frac{116,169 - 71,874}{25} = 1,771 \text{ А};$$

$$I_2 = \frac{40,033}{12} = 3,336 \text{ А}; \quad I_5 = \frac{-116,169 + 150}{30} = 1,128 \text{ А};$$

$$I'_3 = \frac{71,874 - 105}{15} = -2,208 \text{ А}; \quad I_6 = \frac{71,874 - 40,033}{R_6} = 3,980 \text{ А}.$$

Согласно первому правилу Кирхгофа  $I_3 = I'_3 + J = -2,208 + 7 = 4,792 \text{ А}$ .

### 3.6 Баланс мощностей

Проверим корректность расчета, составив баланс мощностей для исходной цепи, представленной на рисунке 3.1.

Вычислим мощность, отдаваемую источниками ЭДС и источником тока

$$P_{ист} = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_5 + I_3 R_3 \cdot J = 80 \cdot 0,644 + 150 \cdot 1,128 + 4,792 \cdot 15 \cdot 7 = 723,88 \text{ Вт},$$

здесь слагаемые  $E_1 I_1$  и  $E_2 I_5$  взяты со знаком «плюс», поскольку направления тока в ветви и соответствующих источников ЭДС совпадают. Слагаемое, выражающее мощность источника тока  $I_3 R_3 \cdot J = U_J \cdot J$  взято со знаком «плюс», поскольку напряжение на зажимах источника тока *противоположно* его направлению.

Рассчитаем теперь мощность, потребляемую нагрузкой

$$P_n = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 = 0,644^2 \cdot 6 + 3,336^2 \cdot 12 + \\ + 4,792^2 \cdot 15 + 1,771^2 \cdot 25 + 1,128^2 \cdot 30 + 3,980^2 \cdot 8 = 723,79 \text{ Вт}.$$

С учетом погрешности округления при расчете токов, можно считать, что мощность, отдаваемая источниками энергии, равна мощности, потребляемой нагрузкой ( $P_{ист} = P_n$ ), следовательно, расчет выполнен корректно.

### 3.7 Определение показания амперметра методом эквивалентного генератора

Определим показание амперметра (ток  $I_1$ ) методом эквивалентного генератора (активного двухполюсника).

Удалим из схемы ветвь с искомым током  $I_1$ , а оставшуюся часть схемы будем рассматривать в качестве эквивалентного генератора с напряжением холостого хода  $U_{xx}$  и внутренним сопротивлением  $R_{вн}$ .

В полученной схеме, представленной на рисунке 3.4, необходимо определить напряжение  $U_{ab} = U_{xx}$  и сопротивление относительно точек  $ab$   $R_{ab} = R_{вн}$ .

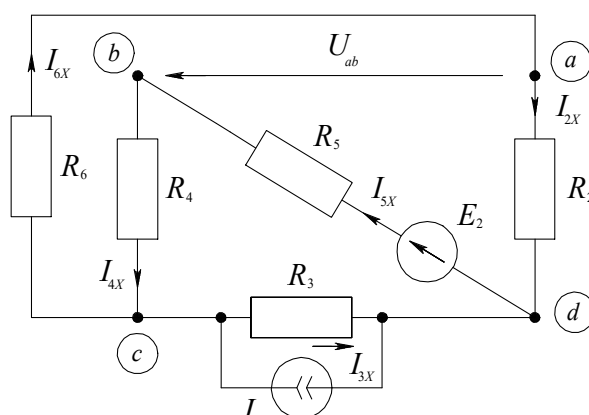


Рисунок 3.4 – Схема к расчету тока  $I_1$  методом эквивалентного генератора

Определим напряжение  $U_{ab}$ . Для этого можно выполнить расчет токов в цепи (см. рисунок 3.4) любым известным методом. Заметим, что после удаления одной из ветвей схема имеет всего два узла, поэтому наиболее простым в данном случае является метод двух узлов.

Действительно,

$$U_{cd} = \frac{J + \frac{E_2}{R_4 + R_5}}{\frac{1}{R_4 + R_5} + \frac{1}{R_6 + R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{7 + \frac{150}{55}}{\frac{1}{20} + \frac{1}{55} + \frac{1}{15}} = \frac{6420}{89} = 72,135 \text{ В.} \quad (3.8)$$

Используя, находим токи  $I_{5x}$  и  $I_{2x}$ :

$$I_{5x} = I_{4x} = \frac{-U_{cd} + E_2}{R_4 + R_5} = \frac{-72,135 + 150}{55} = 1,416 \text{ А};$$

$$I_{2x} = I_{6x} = \frac{U_{cd}}{R_6 + R_2} = \frac{72,135}{20} = 3,607 \text{ А}.$$

Запишем уравнение согласно второму правилу Кирхгофа для контура  $abd$ , в который входит искомое напряжение

$$U_{ab} - I_{5x}R_5 - I_{2x}R_2 = -E_2,$$

откуда следует

$$U_{ab} = I_{5x}R_5 + I_{2x}R_2 - E_2 = 3,607 \cdot 12 + 1,416 \cdot 30 - 150 = -64,236 \text{ В}. \quad (3.9)$$

Вычислим значение сопротивления относительно точек  $ab$ . Чтобы получить расчетную схему, исключаем из нее идеальные источники ЭДС и источники тока (рисунок 3.5).

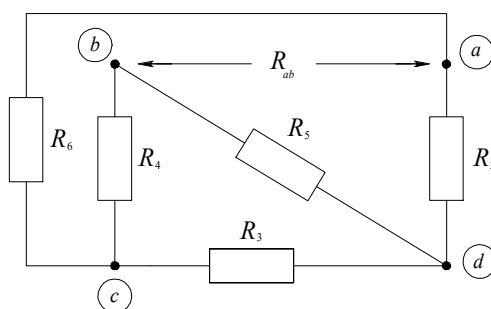


Рисунок 3.5 – Схема к расчету  $R_{ab}$

Преобразуем треугольник сопротивлений  $bdc$  в эквивалентную звезду. В результате получаем схему, изображенную на рисунке 3.6.

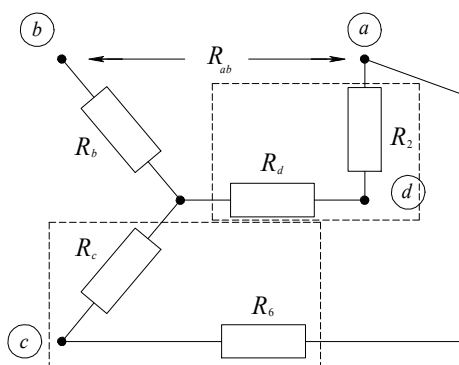


Рисунок 3.6 – Эквивалентная схема для расчета  $R_{ab}$  после замены треугольника сопротивлений  $bdc$  звездой

Вычислим значения сопротивлений в лучах эквивалентной звезды:

$$R_b = \frac{R_4 R_5}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{25 \cdot 30}{12 + 25 + 30} = \frac{75}{7} = 10,714 \text{ Ом};$$

$$R_c = \frac{R_4 R_3}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{15 \cdot 25}{12 + 25 + 30} = \frac{75}{14} = 5,357 \text{ Ом};$$

$$R_b = \frac{R_5 R_3}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{30 \cdot 15}{12 + 25 + 30} = \frac{45}{7} = 6,429 \text{ Ом}.$$

Теперь можно выполнить поэтапную свертку схемы, выполняя преобразования последовательно и параллельно соединенных сопротивлений:

$$\tilde{R} = \frac{(R_c + R_6)(R_d + R_2)}{R_c + R_d + R_6 + R_2} = \frac{(5,357 + 8)(6,429 + 12)}{5,357 + 8 + 6,429 + 12} = 7,744 \text{ Ом}.$$

Далее

$$R_{ab} = \tilde{R} + R_b = 10,714 + 7,744 = 18,458 \text{ Ом}. \quad (3.10)$$

Подставляя в формулу Тевенена (2.4) значения, находим

$$I_1 = \frac{U_{ab} + E_1}{R_{ab} + R_1} = \frac{-64,236 + 80}{18,458 + 6} = 0,644 \text{ А}.$$

Полученный результат совпадает с расчетами методами контурных токов и узловых потенциалов.

### 3.8 Построение потенциальной диаграммы

Рассмотрим внешний контур схемы электрической цепи, содержащий ветвь с источником тока (рисунок 3.7).

Принимая потенциал узла  $d$  равным нулю ( $\varphi_d = 0 \text{ В}$ ), будем обходить контур в положительном направлении против часовой стрелки. Вычислим потенциалы узлов:

$$\text{Узел } a: \varphi_a = \varphi_d + I_2 R_2 = 0 + 3,336 \cdot 12 = 40,032 \text{ В} \mid R_{da} = R_2 = 12 \text{ Ом};$$

$$\text{Узел } a': \varphi_{a'} = \varphi_a + E_1 = 40,032 + 80 = 120,032 \text{ В} \mid R_{aa'} = 0 \text{ Ом};$$

Узел  $b$ :  $\varphi_b = \varphi_{a'} - I_1 R_1 = 120,032 - 0,644 \cdot 6 = 116,168 \text{ В} \mid R_{a'b} = R_1 = 6 \text{ Ом}$ ;

Узел  $c$ :  $\varphi_c = \varphi_b - I_4 R_4 = 116,168 - 1,771 \cdot 25 = 71,893 \text{ В} \mid R_{bc} = R_4 = 25 \text{ Ом}$ ;

Узел  $d$ :  $\varphi_d = \varphi_c - I_3 R_3 = 71,893 - 4,792 \cdot 13 = 0,013 \approx 0 \text{ В} \mid R_{cd} = R_3 = 13 \text{ Ом}$ .

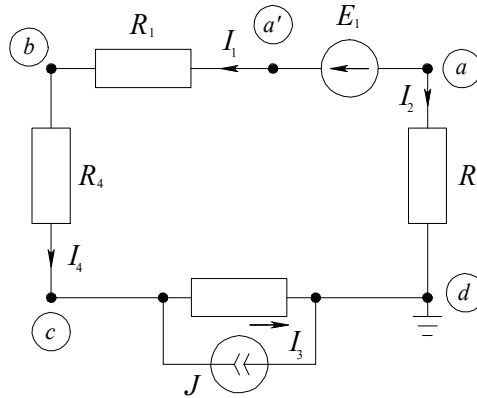


Рисунок 3.7 – Контур для построения потенциальной диаграммы

Потенциальная диаграмма представлена на рисунке 3.8.

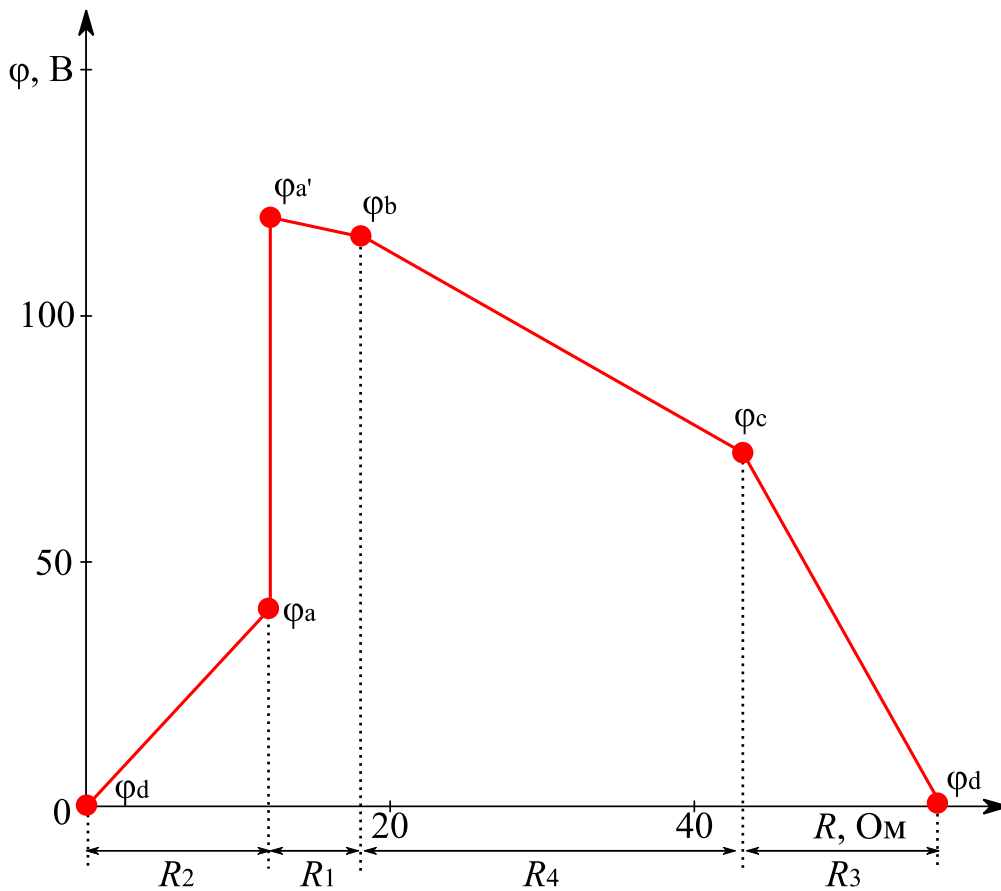


Рисунок 3.8 – Потенциальная диаграмма



### 3.9 Моделирование цепи в Multisim

Программный пакет Multisim позволяет моделировать и анализировать сложные разветвленные электрические цепи, содержащие как линейные, так и нелинейные элементы. Параметры электронных элементов можно варьировать в широком диапазоне значений.

*Построение электрической схемы.* Все электронные элементы находятся в библиотеке программы в соответствующих категориях и могут быть вызваны командой *Place>Component*

Раздел *Sources* содержит источники питания (*powersources*), среди которых наиболее часто применяются *DCPower* (постоянная ЭДС) и *ACPower* (переменная синусоидальная ЭДС), а также обязательный компонент *Ground* (заземление). После того как источник тока был помещен на схему, двойной клик левой клавишей мыши открывает окно свойств, где следует установить значения, соответствующие заданию. Источник тока (DC Current Source) находится в разделе *Signal Current Sources*.

Раздел *Basic* содержит основные элементы электрических цепей: *resistor* (резисторы), *capacitor* (конденсаторы) и *inductor* (катушки индуктивности). В свойствах каждого элемента можно выставить заданное значение величины. Необходимо обратить внимание, что добавление символа *m* соответствует умножению на  $10^{-3}$ , добавление символа *u* соответствует умножению на  $10^{-6}$ .

Модель исследуемой электрической цепи представлена на рисунке 3.9.

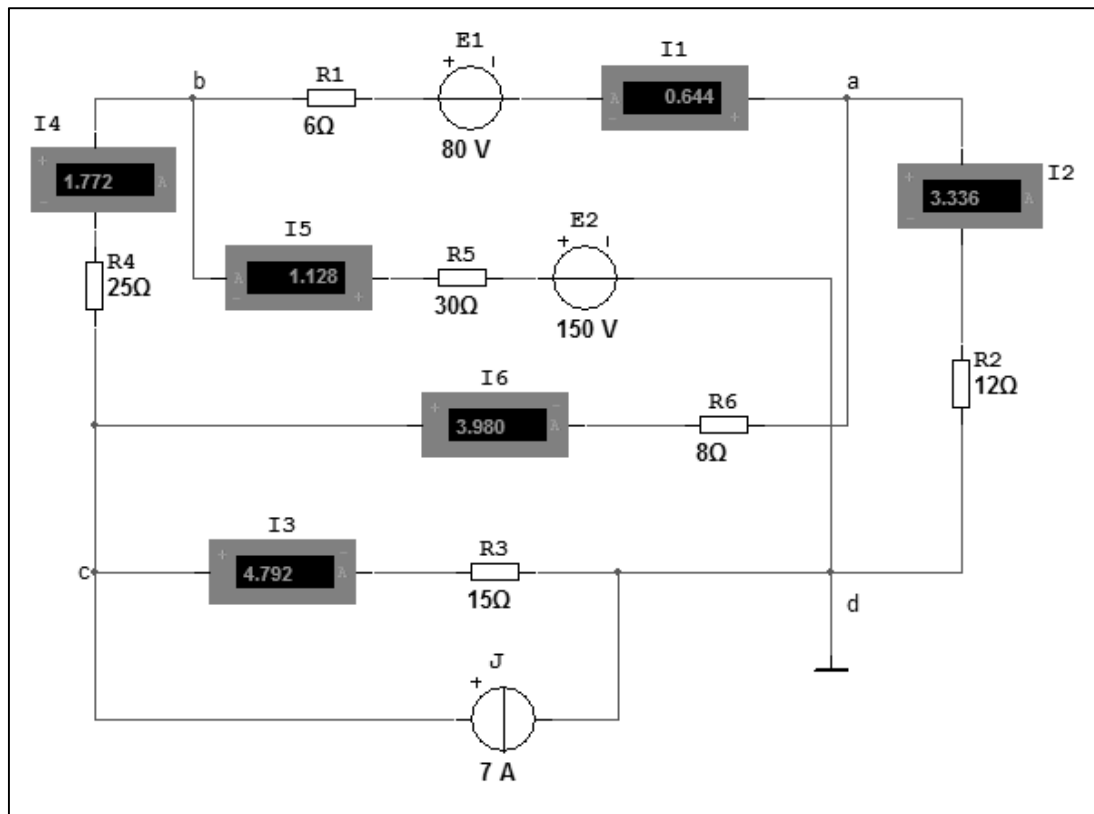


Рисунок 3.9 – Моделирование электрической цепи в Multisim 11

## Список литературы

- 1 **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – Москва: Гардарики, 2002. – 543 с.
- 2 **Гальперин, М. В.** Электротехника и электроника: учебник / М. В. Гальперин. – Москва: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2017. – 480 с.
- 3 **Калашников, С. Г.** Электричество: учебное пособие для вузов / С. Г. Калашников – 6-е изд., стер. – Москва: Физматлит, 2008. – 624 с.
- 4 **Шебес, М. Р.** Задачник по теории линейных электрических цепей / М. Р. Шебес, М. В. Каблукова. – Минск: Вышэйшая школа, 1990. – 544 с.: ил.
- 5 Основы теории цепей / Г. В. Зевеке [и др.]. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.: ил.
- 6 Теоретические основы электротехники. Теория электрических цепей: методические указания к расчетно-графической работе «Расчет разветвленной электрической цепи постоянного тока» для студентов специальностей 1-53 01 02 «Автоматизированные системы обработки информации», 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» и 1-53 01 05 «Методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» / Сост. Г. И. Скрябина, В. Ф. Гоголинский. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – 38 с.
- 7 Теоретические основы электротехники. Теория электрических цепей. Ч. 1: Электрические цепи постоянного тока: методические указания к самостоятельной подготовке для студентов электротехнических специальностей дневной и заочной форм обучения / Сост. Г. И. Скрябина, В. Ф. Гоголинский. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – 32 с.