

### 1 Цели и задачи

Основная задача выполнения – это самостоятельное освоение и закрепление пройденного материала по теме лабораторной работы «Расчет сложной цепи постоянного тока».

Основное направление – изучение методов расчета сложной цепи постоянного тока. Лабораторная работа включает в себя составление системы уравнений по законам Кирхгофа, расчет токов методом контурных токов, составление баланса мощностей, расчета потенциалов всех точек и напряжения на элементах, построения потенциальной диаграммы, моделирование схемы, разработку программы в пакете Mathcad, расчет относительной погрешности токов и напряжений, расчет схемы методом наложений.

ЛР	Лист
20	13
68	

Изн. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Полученные в ходе выполнения работы знания имеют большое значение для дальнейшего освоения дисциплины и могут найти практическое применение в будущей профессии.

ЛР	Лист
20	14
68	

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата

## 2 Задание

Для электрических цепей, схемы которых изображены на рисунке 1, по заданным величинам сопротивлений и ЭДС (таблица А1) выполнить следующее:

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата

ЛР	Лист
20	15
68	

- 1 Составить систему уравнений, необходимых для определения токов по первому и второму законам (правилам) Кирхгофа (для всех узлов и независимых контуров, без расчета);
- 2 Рассчитать токи во всех ветвях заданной схемы методом контурных токов;
- 3 Составить баланс мощностей;
- 4 Рассчитать потенциалы всех точек и напряжения на элементах (резисторы и источники напряжения);
- 5 Построение потенциальной диаграммы одного замкнутого контура, содержащего как минимум два источника ЭДС;

ЛР	Лист
20	16
68	
Инд. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Инд. № дубл.	
Подп. и дата	

6 Провести моделирование схемы в программе схемотехнического моделирования;

7 Разработать программу в пакете MathCad;

8 Рассчитать относительную погрешности токов и напряжений при расчете (п. 2) и моделировании (п.6);

Дополнительное задание:

9 Выполнить расчет схемы методом наложения.

Таблица 1 – Параметры элементов схемы

№ вар.	R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>3</sub> , Ом	R <sub>4</sub> , Ом	R <sub>5</sub> , Ом	R <sub>6</sub> , Ом	E <sub>1</sub> , В	E <sub>2</sub> , В	E <sub>3</sub> , В
39	30	12	10	85	15	50	50	150	120

ЛР	Лист
20	17
68	

Инд. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Инд. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

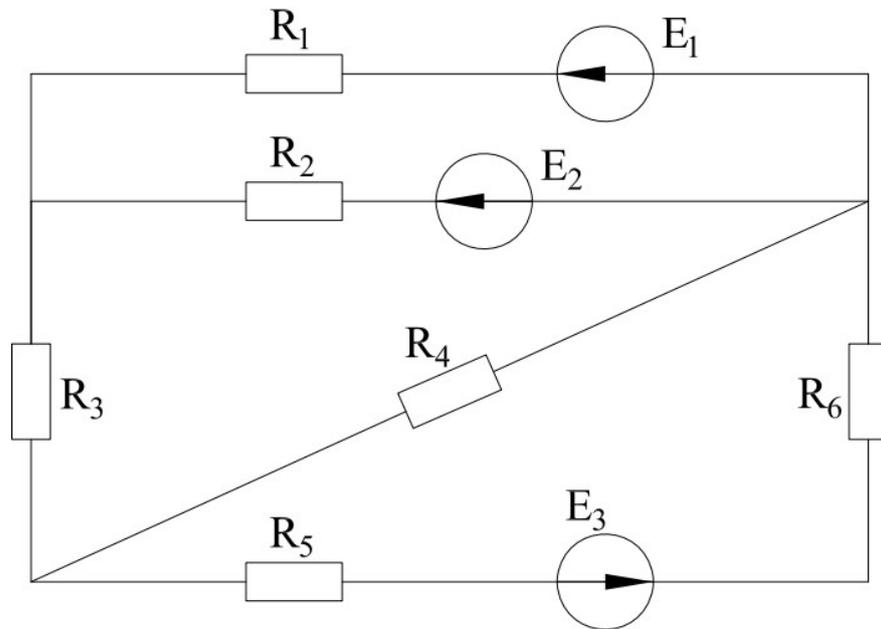


Рисунок 1 – Схема задачи

ЛР	Лист
20	18
68	

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата



### 3 Теоретический расчет

3.1 Составление системы уравнений по первому и второму законам (правилам) Кирхгофа или метод непосредственного применения законов Кирхгофа

ЛР	Лист
20	110
68	

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата

Метод непосредственного применения законов Кирхгофа применяется для расчета сложных цепей постоянного и переменного тока [1].

В общем случае искомые токи (напряжения) ветвей находятся по результатам решения системы уравнений, которые составляются по первому и второму законам Кирхгофа.

Перед составлением уравнений необходимо провести топологический анализ схемы – определить число узлов, ветвей, независимых контуров в схеме

Ветвь (В) – участок электрической цепи, элементы в которой соединены последовательно и по которой протекает один и тот же электрический ток.

Узел (У) – место соединения не менее трех ветвей электрической цепи (место, где соединены две ветви, называется не узлом, а соединением).

ЛР	Лист
20	111
68	
Инд. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Инд. № дубл.	
Подп. и дата	

Контур (к) – последовательность ветвей электрической цепи, образующая замкнутый путь, в которой один из узлов одновременно является началом и концом пути, а остальные встречаются только один раз. Разновидностью контуров в электрической цепи обособленно выделяют независимые контура (к<sub>н</sub>), которые отличаются друг от друга наличием хотя бы одной ветви не входящие в другие контура.

Для любой схемы минимальное число независимых контуров зависит от числа ветвей и числа узлов в цепи и можно определить по формуле:

$$k_H = B - (Y - 1) \tag{1}$$

Для схемы на рисунке 2 принимаем следующее:

а) пять ветвей (бвг, аж, де, икл, мнпр);

ЛР	Лист
20	112
68	
Инд. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Инд. № дубл.	
Подп. и дата	

б) три узла (1, 2, 3);

в) три независимых контура (I - абвгдеж, II - аиклмнпрж, III - мнпред).

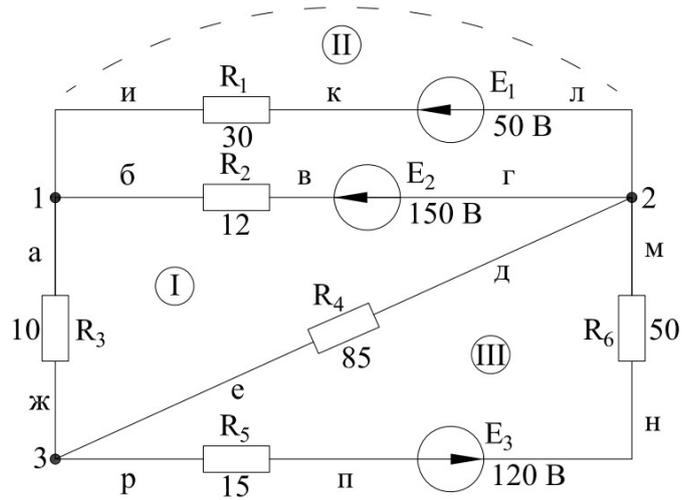


Рисунок 2 – Схема задачи с указанием ветвей, узлов и контуров

ЛР	Лист
20	113
68	

Инд. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Инд. № дубл.
Подп. и дата	

Выбираем, условно, положительные направления токов в ветвях и обозначаем их на схеме пунктирными линиями (рисунок 3).

Выбираем положительные направления обхода (НО) трех независимых контуров. Нумеруем НО в соответствии с выбранными контурами и указываем стрелками направления (рисунок 3).

Составляем систему уравнений по I закону Кирхгофа.

Количество уравнений по I закону Кирхгофа  $n$  определяется по формуле:

$$n = q - 1 = 3 - 1 = 2, \tag{2}$$

где  $q$  – число узлов в схеме.

ЛР	Лист
20	114
68	
Инд. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Инд. № дубл.	
Подп. и дата	

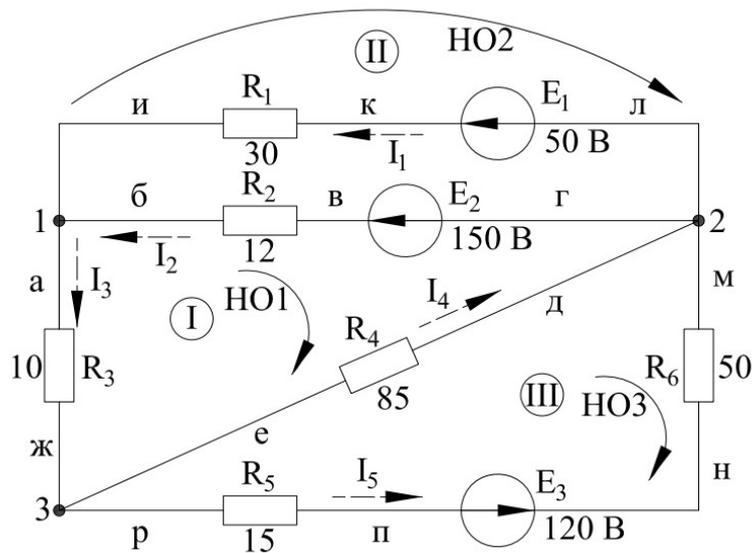


Рисунок 3 – Схема с обозначением НО и токов

ЛР	Лист
20	115
68	

Инов. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подп. и дата

Формулировка I закона Кирхгофа: сумма всех токов, втекающих в узел, равна сумме всех токов, вытекающих из узла.

Или: алгебраическая сумма всех токов в узле равна нулю [2].

Уравнение по I закону Кирхгофа для узла 1 имеет следующий вид:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (3)$$

Уравнение по I закону Кирхгофа для узла 2 имеет следующий вид:

$$-I_1 - I_2 + I_4 + I_5 = 0 \quad (4)$$

Уравнение по I закону Кирхгофа для узла 3 имеет следующий вид:

$$I_3 - I_4 - I_5 = 0 \quad (5)$$

Составим недостающие уравнения по II закону Кирхгофа.

ЛР	Лист
20	116
68	
Инд. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	

Формулировка: Алгебраическая сумма ЭДС, действующих в замкнутом контуре, равна алгебраической сумме падений напряжения на всех резистивных элементах в этом контуре.

Здесь термин «алгебраическая сумма» означает, что как величина ЭДС так и величина падения напряжения на элементах может быть как со знаком «+» так и со знаком «-». При этом определить знак можно по следующему алгоритму:

1. Выбираем направление обхода контура (два варианта либо по часовой, либо против).
2. Произвольно выбираем направление токов через элементы цепи.
3. Расставляем знаки для ЭДС и напряжений, падающих на элементах по правилам:

ЛР	Лист
20	117
68	
Инд. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	

– ЭДС, создающие ток в контуре, направление которого совпадает с направлением обхода контура записываются со знаком «+», в противном случае ЭДС записываются со знаком «-»;

– напряжения, падающие на элементах цепи записываются со знаком «+», если ток, протекающий через эти элементы совпадает по направлению с обходом контура, в противном случае напряжения записываются со знаком «-».

Т.к. общее количество уравнений в системе равно числу неизвестных токов в цепи (для нашей задачи пять неизвестных токов), то по второму закону Кирхгофа составляем три недостающих уравнения для трех независимых контуров.

Уравнение по II закону Кирхгофа для НО<sub>1</sub> имеет следующий вид:

ЛР	Лист
20	118
68	

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата

$$-E_2 = -I_2 \cdot R_2 - I_3 \cdot R_3 - I_4 \cdot R_4. \quad (6)$$

Уравнение по II закону Кирхгофа для НО<sub>2</sub> имеет следующий вид:

$$-E_1 - E_3 = -I_3 \cdot R_3 - I_1 \cdot R_1 - I_5 \cdot (R_5 + R_6). \quad (7)$$

Уравнение по II закону Кирхгофа для НО<sub>3</sub> имеет следующий вид:

$$-E_3 = -I_4 \cdot R_4 - I_5 \cdot (R_5 + R_6). \quad (8)$$

Из формул (3) – (8) составляем систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ -I_1 - I_2 + I_4 + I_5 = 0 \\ -E_2 = -I_2 \cdot R_2 - I_3 \cdot R_3 - I_4 \cdot R_4 \\ -E_1 - E_3 = -I_3 \cdot R_3 - I_1 \cdot R_1 - I_5 \cdot (R_5 + R_6) \\ -E_3 = -I_4 \cdot R_4 - I_5 \cdot (R_5 + R_6) \end{array} \right. \quad (9)$$

ЛР	Лист
20	119
68	

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата

### 3.2 Расчет схемы методом контурных токов

В методе контурных токов, вместо токов ветвей по второму закону Кирхгофа формируют так называемые контурные токи, замыкающиеся в контурах. Контурный ток – условный ток, имеющий одинаковое значение на всех участках выбранного независимого контура. Составив уравнения и решив ее любым способом, можно перейти от контурных токов к токам ветвей на основании простых соотношений.

Минимально необходимое число уравнений для расчета схемы по методу контурных токов равно числу минимальному числу независимых контуров  $K_n$  (формула 1), но не менее двух.

ЛР	Лист
20	120
68	
Инд. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	

Для решения схемы, приведенной в примере достаточно составления всего двух уравнений, по двум независимым контуров, но при этом можно составить и три уравнения. Для учебных целей составим три уравнения по трем независимым контурах.

Выбираем контура абвгдеж, икклгвб, мнпред.

$$-E_3 = -I_4 \cdot R_4 - I_5 \cdot (R_5 + R_6) \quad (10)$$

В этом выражении использованы следующие обозначения:

Равные индексы, относящиеся к сопротивлению, представляют собой суммарную величину для k-го контура электрической цепи.

ЛР	Лист
20	121
68	
Инд. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Инд. № дубл.	
Подп. и дата	

Если для сопротивления использованы индексы  $k$  и  $m$ , то речь идёт об общем сопротивлении, которое входит одновременно в 2 контура с такими номерами.

Нужно обратить внимание, что в последней формуле присутствуют контурные токи в  $k$ -м контуре.

С правой стороны знака равенства указана суммарная электродвижущая сила для  $k$ -го контура.

При определении неизвестной величины слагаемое берётся с плюсом в тех ситуациях, когда направления электротоков в соседних контурах совпадают, и с минусом, когда они противоположны. ЭДС контура может быть положительной или отрицательной. Первый вариант применяется в тех случаях, когда

ЛР	Лист
20	122
68	

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата

направления электродвижущей силы и контурного электротока совпадают. В противном случае ЭДС берётся с минусом.

ЛР	Лист
20	123
68	

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата

ЛР  
20  
68

Лист  
124

ЛР	Лист
20	125
68	

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата