

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Филиал федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Самарский государственный университет путей сообщения» в г. Саратове
Филиал СамГУПС в г. Саратове

Методические указания
по выполнению практических работ по учебной дисциплине
ОП.02 Электротехника

ОДОБРЕНО

на заседании ЦМК «АТМ»

Протокол № _1_ от «31» 08 2023 г.

Председатель

_____ /Глухова И.В./

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора по УР

_____ /Крижановский С.А./

_____ 2023г.

Одобрено методическим советом

Протокол № 29 сентября 2023г.

Преподаватель: Дрожжина Л.И., преподаватель высшей квалификационной категории

Содержание

Введение	4
Практическая работа №1. Расчет линии по допустимой потере напряжения	5-7
Практическая работа №2. Расчет линии по допустимому нагреву	8-10
Практическая работа №3 Расчет сложных электрических цепей методом узловых и контурных уравнений	11-15
Практическая работа №4 Расчет сложных электрических цепей методом контурных токов	16-20
Практическая работа №5 Расчет сложных электрических цепей методом узловых потенциалов	21-24
Практическая работа №6 Расчет сложных электрических цепей методом наложения	25-30
Практическая работа №7 Расчет сложных электрических цепей методом эквивалентного генератора	31-34
Практическая работа №8 Расчет магнитной цепи	35-37
Практическая работа №9 Расчет электрических цепей переменного тока	38-41
Практическая работа №10 Расчет несимметричных трехфазных цепей	42-45
Приложения:	
№1	46
Список используемых источников	47

Введение

Методические указания разработаны в соответствии с требованиями ФГОС и рабочей программы дисциплины ОП.02 Электротехника по специальности 27.02.03 «Автоматика и телемеханика на транспорте (на железнодорожном транспорте)»

Целью практических занятий является систематизация, закрепление теоретических знаний обучающихся, формирование и закрепление определенных практических умений.

Методическое пособие предназначено для выполнения практических работ обучающимися. В целях закрепления теоретических знаний и приобретения практических умений по расчету электрических и магнитных цепей программой дисциплины ОП.02 Электротехника предусмотрено выполнение 10 практических работ, перечень которых приведен в содержании.

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся должен **уметь**:

- собирать электрические схемы и проверять их работу;
- рассчитывать параметры и элементы электрических и электронных устройств.

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся должен **знать**:

- физические процессы в электрических цепях;
- методы расчета электрических цепей;
- методы преобразования электрической энергии.

При выполнении практических работ особое внимание должно быть уделено пониманию физического смысла рассчитываемых цепей и процессов, их практическое применение. Без соблюдения этого требования нельзя развить у обучающихся электротехническое мышление, необходимое как в учебе, так и для работы на производстве.

Перед выполнением каждой практической работы необходима предварительная подготовка, в процессе которой обучающийся повторяет пройденный теоретический материал

Каждое практическое занятие составлено по плану:

- название и номер работы;
- цель работы;
- краткие теоретические сведения;
- порядок выполнения работы;
- содержание отчета;
- контрольные вопросы.

Практическая работа считается выполненной в том случае, если результаты в виде записей, таблиц и расчетов в форме письменного отчета представлены преподавателю и им проверены.

Практическая работа № 1

Расчет линии по допустимой потере напряжения

Цель работы: рассчитать сечение проводов по допустимой потере напряжения

Обеспеченность занятия:

1. Комплект учебно-методической документации.

Исходные данные: вариант задания определяется в соответствии с порядковым номером фамилии обучающегося в учебном журнале (таблица 1).

Краткие теоретические сведения

Значительное отклонение напряжения на приемнике от номинального значения нежелательно, так как нарушается нормальная работа приемников:

- при понижении напряжения на 5 % световой поток ламп накаливания уменьшается на 18 %;
- при повышении напряжения на 5 % длительность горения лампы уменьшается на 50 %;
- у электродвигателей при уменьшении напряжения уменьшаются частота вращения и механическая мощность.

Правила устройства электроустановок (ПУЭ) устанавливают допустимое снижение напряжения в проводах от номинального напряжения приемника в пределах $2,5 \pm 5 \%$ для различных видов нагрузки. Допустимая потеря напряжения $\Delta U_{\text{доп}}$ – это такая потеря напряжения, при которой отклонения напряжения на зажимах электроприемников не выходят за пределы предусмотренных ГОСТ технически допустимых значений.

Сечение является важнейшим параметром линий электропередачи. Методики определения сечений проводов и кабелей основаны на поиске экономического сечения, соответствующего минимальным затратам.

С увеличением сечения вырастают затраты на сооружение линии, отчисления на амортизацию, ремонт и обслуживание, но снижаются потери мощности и электроэнергии и связанные с ними затраты.

Порядок выполнения

Группа потребителей электрической энергии имеет общую мощность P , находится на расстоянии $L_{\text{от}}$ источника и подключена к нему двухпроводной линией электропередачи (рис. 1). Материал проводов – медь (вариант 1 - 15) или алюминий (вариант 16 - 30).

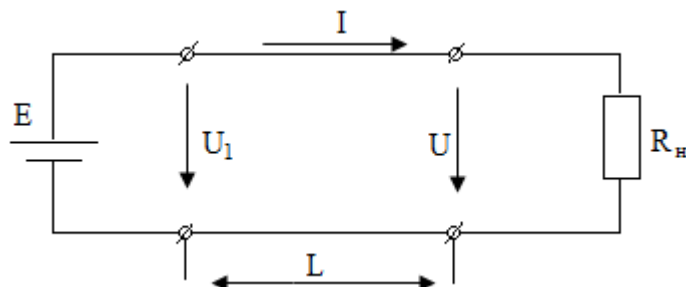


Рис. 1 Схема для определения потери напряжения в проводах

Определить необходимое стандартное сечение проводов S , если допустимая потеря напряжения в проводах e (таблица 1).

Таблица 1– Исходные данные

Вариант	P , кВт	L , м	e , %
1, 11, 21	3	800	2,5
2, 12, 22	3,1	700	2

3, 13, 23	3,2	650	2,5
4, 14, 24	3,3	750	4
5, 15, 25	2	850	2,5
6, 16, 26	2.1	800	2
7, 17, 27	2,2	700	3
8, 18, 28	2,3	650	3,5
9, 19, 29	2,4	750	2,4
10, 20, 30	4	850	3

Номинальные токи проводов с резиновой изоляцией в зависимости от материала и поперечного сечения приведены в таблице 2.

Таблица 2– Номинальные токи проводов

Диаметр жила, мм	Сечение токопроводящей жила, мм ²	Допустимая нагрузка для проводов проложенных открыто, А	
		Медные	Алюминиевые
1,1	1	15	-
1,4	1,5	20	-
1,8	2,5	27	21
2,25	4	36	28
2,75	6	46	35
3,5	10	70	50
4,5	16	90	70
5,6	25	125	95
6,6	35	150	115
8	50	190	145
10,6	70	240	185

Рассмотрим расчет схемы на примере.

Пример. Рассчитать параметры цепи при номинальном напряжении приемника $U = 220$ В, расстояние $L = 1100$ м, $e = 2,5$ %, $P = 2$ кВт.

Решение. Определим сечение проводов, которое обеспечит потерю напряжения в заданных пределах

$$S = \frac{\rho \times 200 \times P \times L}{e \times U^2},$$

где ρ – удельное сопротивление при 20°C, $\rho = 0,0175$ Ом×мм²/м.

$$S = \frac{0,0175 \times 200 \times 2000 \times 1100}{2,5 \times 220^2} = 63,63 \text{ мм}^2$$

Выбираем по таблице стандартных сечений ближайшее большее $S = 70$ мм (провод диаметром 10,6 мм).

Определим ток в линии, питающей потребителя

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2000}{220} = 9,1 \text{ А}$$

Медные провода сечением $S = 70$ мм², проложенные открыто, по нагреву допускают протекание тока 240 А (таблица 2), следовательно, ток $I = 9,1$ А не может вызвать их перегрева.

Определим сопротивление двухпроводной линии электропередачи выбранного сечения

$$R_{\text{л}} = \frac{\rho \times 2 \times L}{S} = \frac{0,0175 \times 2 \times 1100}{70} = 0,55 \text{ Ом}$$

Фактическое падение напряжения в линии

$$\Delta U = R_{\text{л}} \times I = 0,55 \times 9,1 = 5 \text{ В}$$

$$e = \frac{\Delta U}{U} \times 100 = \frac{5}{220} \times 100 = 2,27\%$$

то есть меньше заданного допустимого $e = 2,5\%$

Потери мощности в линии электропередачи

$$\Delta P = I^2 \times R_{\text{л}} = 9,1 \times 0,55 = 45,5 \text{ Вт}$$

$$\text{или } \Delta P = \Delta U \times I = 5 \times 9,1 = 45,5 \text{ Вт}$$

Мощность источника электрической энергии, которая обеспечит работу приемников

$P_{\text{и}} = I \times U_1$, где U – напряжение в начале линии, т. е. на зажимах источника.

$$U_1 = U + \Delta U = 220 + 5 = 225 \text{ В}$$

$$P_{\text{и}} = 9,1 \times 225 = 2045,5 \text{ Вт}$$

$$\text{или } P_{\text{и}} = P + \Delta P = 2000 + 45,5 = 2045,5 \text{ Вт}$$

Рассчитаем при той же мощности потребителей и номинальном напряжении $U = 380$

В.

Сечение проводов линии электропередачи

$$S = \frac{0,0175 \times 200 \times 2000 \times 1100}{2,5 \times 380^2} = 21,32 \text{ мм}^2$$

т. е. требуемое сечение уменьшилось в три раза при увеличении напряжения в линии

Ув раз.

Выбираем ближайшее стандартное сечение $S = 25 \text{ мм}^2$.

Медные провода этого сечения по нагреву допускают протекание тока 125 А, что также значительно больше тока в линии

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2000}{380} = 5,26 \text{ А}$$

Сопротивление проводов

$$R_{\text{л}} = \frac{0,0175 \times 2 \times 1100}{25} = 1,54 \text{ Ом}$$

Падение напряжения в линии

$$\Delta U = 5,26 \times 1,54 = 8,1 \text{ В}$$

$$e = \frac{8,1 \times 100}{380} = 2,13\%$$

Потери мощности в линии

$$\Delta P = \Delta U \times I = 8,1 \times 5,26 = 46,6 \text{ Вт}$$

Мощность источника электрической энергии

$$P_{\text{и}} = P + \Delta P = 2000 + 46,6 = 2046,6 \text{ Вт.}$$

Содержание отчета

1. Схема электрической цепи.
2. Таблица с исходными данными.
3. Расчет сечения проводов по допустимому нагреву и падению напряжения.
4. Ответы на контрольные вопросы
5. Вывод

Контрольные вопросы

1. Поясните, от чего зависит падение напряжения в проводах.
2. Объясните, от чего зависит сопротивление проводов линии.
3. Приведите формулы, по которым можно определить падение напряжения в проводах?
4. Как определить мощность источника энергии?
5. Поясните, почему передавать энергию выгоднее при высоком напряжении.

Практическая работа № 2

Расчет линии по допустимому нагреву

Цель работы: рассчитать сечение проводов линии по допустимому нагреву

Обеспеченность занятия:

1. Комплект учебно-методической документации.

Исходные данные: вариант задания определяется в соответствии с порядковым номером фамилии обучающегося в учебном журнале (таблица 1).

Краткие теоретические сведения

Сечение является важнейшим параметром линий электропередачи. Методики определения сечений проводов и кабелей основаны на поиске экономического сечения, соответствующего минимальным затратам.

С увеличением сечения вырастают затраты на сооружение линии, отчисления на амортизацию, ремонт и обслуживание, но снижаются потери мощности и электроэнергии и связанные с ними затраты.

Порядок выполнения

Группа потребителей электрической энергии имеет общую мощность P , находится на расстоянии L от источника и подключена к нему двухпроводной линией электропередачи (рис. 31). Материал проводов – медь (вариант 1 - 15) или алюминий (вариант 16 - 30).

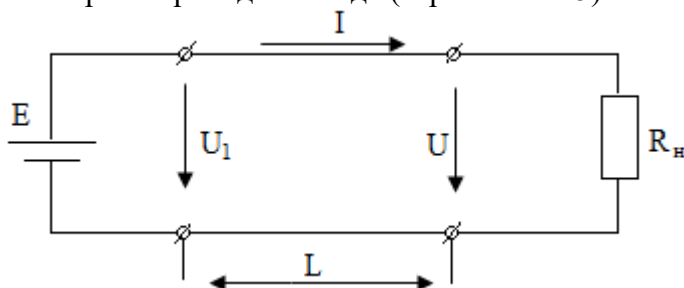


Рис. 1 Схема для определения потери напряжения в проводах

Определить необходимое стандартное сечение проводов S , если допустимая потеря напряжения в проводах e (таблица 5).

Таблица 1– Исходные данные

Вариант	P , кВт	L , м	e , %
1, 11, 21	3	800	2,5
2, 12, 22	3,1	700	2
3, 13, 23	3,2	650	2,5
4, 14, 24	3,3	750	4
5, 15, 25	2	850	2,5
6, 16, 26	2,1	800	2
7, 17, 27	2,2	700	3
8, 18, 28	2,3	650	3,5
9, 19, 29	2,4	750	2,4
10, 20, 30	4	850	3

Номинальные токи проводов с резиновой изоляцией в зависимости от материала и поперечного сечения приведены в таблице 2.

Таблица 2– Номинальные токи

Диаметр жилы, мм	Сечение токопроводящей жилы, мм ²	Допустимая нагрузка для проводов проложенных открыто, А	
		Медные	Алюминиевые
1,1	1	15	-
1,4	1,5	20	-
1,8	2,5	27	21
2,25	4	36	28

2,75	6	46	35
3,5	10	70	50
4,5	16	90	70
5,6	25	125	95
6,6	35	150	115
8	50	190	145
10,6	70	240	185

Рассмотрим расчет схемы на примере.

Пример. Рассчитать параметры цепи при номинальном напряжении приемника $U = 220$ В, расстояние $L = 1100$ м, $e = 2,5$ %, $P = 2$ кВт.

Решение. Определим сечение проводов, которое обеспечит потерю напряжения в заданных пределах

$$S = \frac{\rho \times 200 \times P \times L}{e \times U^2},$$

где ρ – удельное сопротивление при 20°C , $\rho = 0,0175$ Ом $\times$ мм²/м.

$$S = \frac{0,0175 \times 200 \times 2000 \times 1100}{2,5 \times 220^2} = 63,63 \text{ мм}^2$$

Выбираем по таблице стандартных сечений ближайшее большее $S = 70$ мм (провод диаметром 10,6 мм).

Определим ток в линии, питающей потребителя

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2000}{220} = 9,1 \text{ А}$$

Медные провода сечением $S = 70$ мм², проложенные открыто, по нагреву допускают протекание тока 240 А (таблица 2), следовательно, ток $I = 9,1$ А не может вызвать их перегрева.

Определим сопротивление двухпроводной линии электропередачи выбранного сечения

$$R_{\text{л}} = \frac{\rho \times 2 \times L}{S} = \frac{0,0175 \times 2 \times 1100}{70} = 0,55 \text{ Ом}$$

Фактическое падение напряжения в линии

$$\Delta U = R_{\text{л}} \times I = 0,55 \times 9,1 = 5 \text{ В}$$

$$e = \frac{\Delta U}{U} \times 100 = \frac{5}{220} \times 100 = 2,27 \%$$

то есть меньше заданного допустимого $e = 2,5$ %

Потери мощности в линии электропередачи

$$\Delta P = I^2 \times R_{\text{л}} = 9,1 \times 0,55 = 45,5 \text{ Вт}$$

$$\text{или } \Delta P = \Delta U \times I = 5 \times 9,1 = 45,5 \text{ Вт}$$

Мощность источника электрической энергии, которая обеспечит работу приемников

$P_{\text{и}} = I \times U_1$, где U_1 – напряжение в начале линии, т. е. на зажимах источника.

$$U_1 = U + \Delta U = 220 + 5 = 225 \text{ В}$$

$$P_{\text{и}} = 9,1 \times 225 = 2045,5 \text{ Вт}$$

$$\text{или } P_{\text{и}} = P + \Delta P = 2000 + 45,5 = 2045,5 \text{ Вт}$$

Рассчитаем при той же мощности потребителей и номинальном напряжении $U = 380$

В.

Сечение проводов линии электропередачи

$$S = \frac{0,0175 \times 200 \times 2000 \times 1100}{2,5 \times 380^2} = 21,32 \text{ мм}^2$$

т. е. требуемое сечение уменьшилось в три раза при увеличении напряжения в линии

Uв раз.

Выбираем ближайшее стандартное сечение $S = 25 \text{ мм}^2$.

Медные провода этого сечения по нагреву допускают протекание тока 125 А, что также значительно больше тока в линии

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2000}{380} = 5,26 \text{ А}$$

Сопротивление проводов

$$R_{\text{л}} = \frac{0,0175 \times 2 \times 1100}{25} = 1,54 \text{ Ом}$$

Падение напряжения в линии

$$\Delta U = 5,26 \times 1,54 = 8,1 \text{ В}$$

$$e = \frac{8,1 \times 100}{380} = 2,13 \%$$

Потери мощности в линии

$$\Delta P = \Delta U \times I = 8,1 \times 5,26 = 46,6 \text{ Вт}$$

Мощность источника электрической энергии

$$P_{\text{и}} = P + \Delta P = 2000 + 46,6 = 2046,6 \text{ Вт.}$$

Содержание отчета

1. Схема электрической цепи.
2. Таблица с исходными данными.
3. Расчет сечения проводов по допустимому нагреву
4. Ответы на контрольные вопросы
5. Вывод

Контрольные вопросы

1. Объясните, от чего зависит сопротивление проводов линии.
2. Как определить мощность источника энергии?
3. Поясните, почему передавать энергию выгоднее при высоком напряжении.

Практическая работа № 3

Расчет сложных электрических цепей методом узловых и контурных уравнений

Цель работы: рассчитать заданную сложную цепь с помощью метода узловых и контурных уравнений

Обеспеченность занятия:

1. Комплект учебно-методической документации.

Исходные данные: вариант задания определяется в соответствии с порядковым номером фамилии обучающегося в учебном журнале (таблица 1).

Краткие теоретические сведения

Ветвью электрической цепи называется участок электрической цепи, состоящий из последовательно соединенных элементов и по которому проходит одинаковый ток.

Узлом электрической цепи называется место соединения трех и более ветвей.

Контуром называется замкнутый участок электрической цепи, состоящий из нескольких ветвей.

Сложные электрические цепи состоят из нескольких ветвей и контуров.

Сложной называется электрическая цепь, которая содержит два и более контура. Второй закон Кирхгофа – алгебраическая сумма падений напряжений, действующих в замкнутом контуре равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом же контуре. Существует несколько методов расчета сложных электрических цепей.

Порядок выполнения

1. Для схемы, изображенных на рисунках ниже, рассчитать токи с помощью метода узловых и контурных токов. Сравнить результат расчета и составить баланс мощности. Данные для своего варианта взять из таблицы 1.

Таблица 1– Исходные данные

вариант	№ рисунок	E_1 , В	E_2 , В	r_{01} , Ом	r_{02} , Ом	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , ом
1,11,21	1	50	260	1	1	20	24	4	3	2	25
2,12,22	2	110	120	1	1	10	14	8	14	26	15
3,13,23	3	120	140	1	1	17	12	9	13	21	16
4,14,24	4	85	100	1	1	14	11	9	8	16	22
5,15,25	5	56	90	1	1	24	21	19	18	14	19
6,16,26	6	58	48	1	1	4	5	3	6	7	4,5
7,17,27	7	73	43	1	1	12	16	10	15	9	13
8,18,28	8	48	24	1	1	3	6	2,5	5	3	8
9,19,29	9	200	140	1	1	30	60	25	35	30	18
10,20,30	10	160	120	1	1	26	30	18	28	19	34

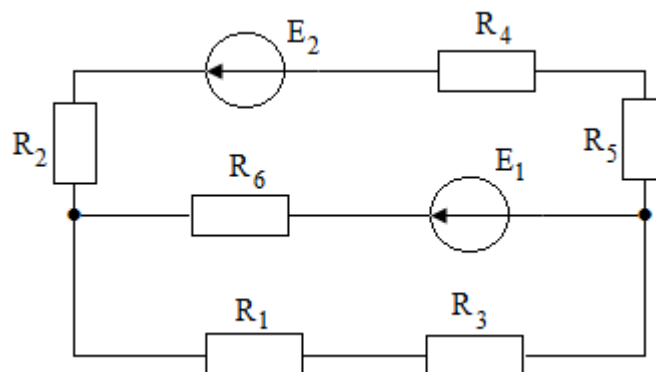


Рис. 1 Сложная электрическая цепь

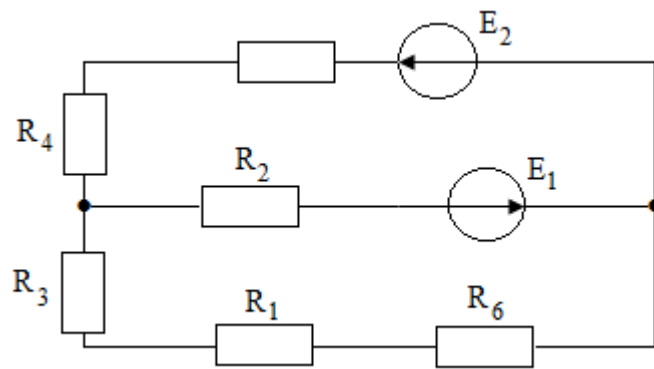


Рис. 2 Сложная электрическая цепь

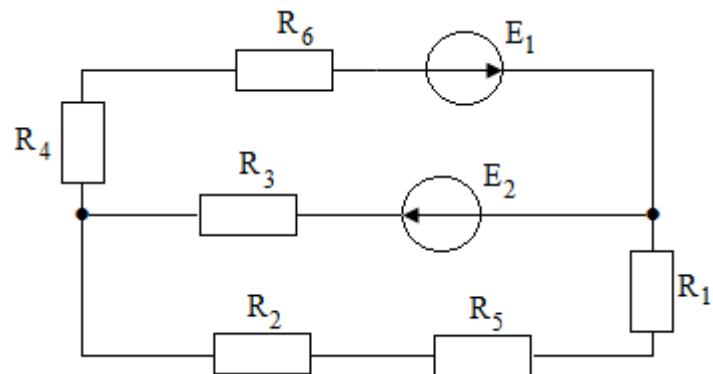


Рис. 3 Сложная электрическая цепь

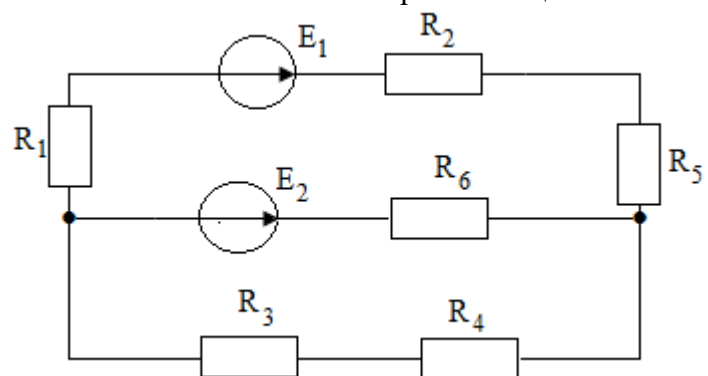


Рис. 4 Сложная электрическая цепь

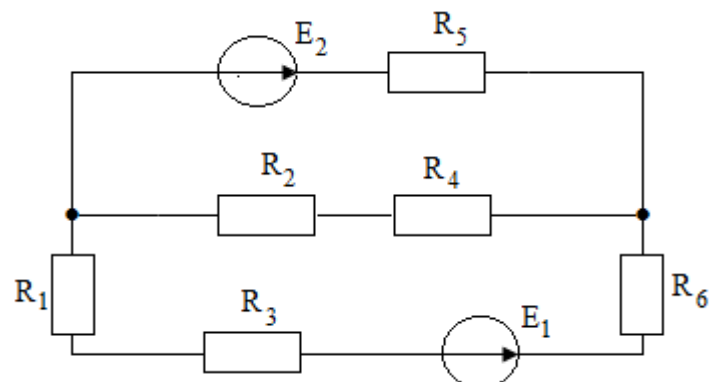


Рис. 5 Сложная электрическая цепь

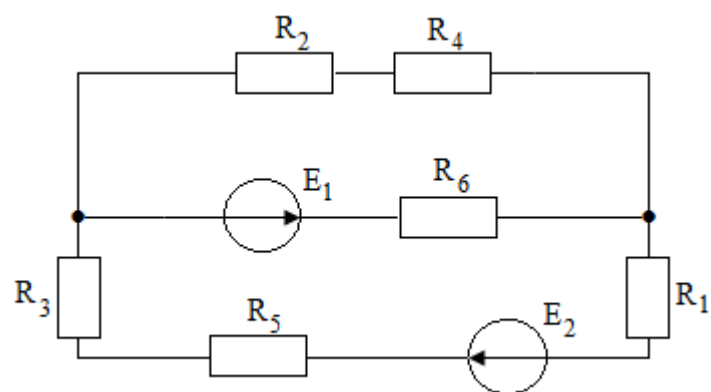


Рис. 6. Сложная электрическая цепь

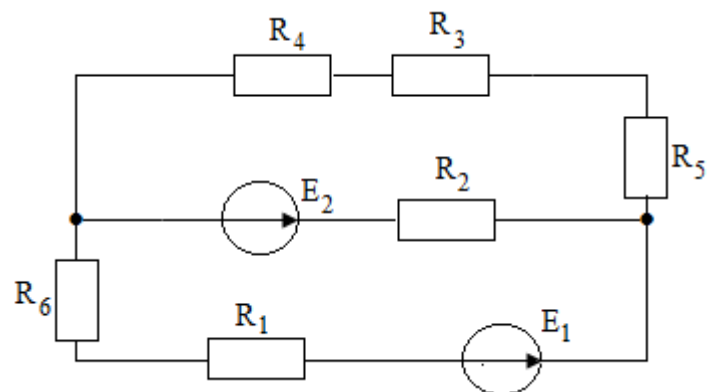


Рис. 7 Сложная электрическая цепь

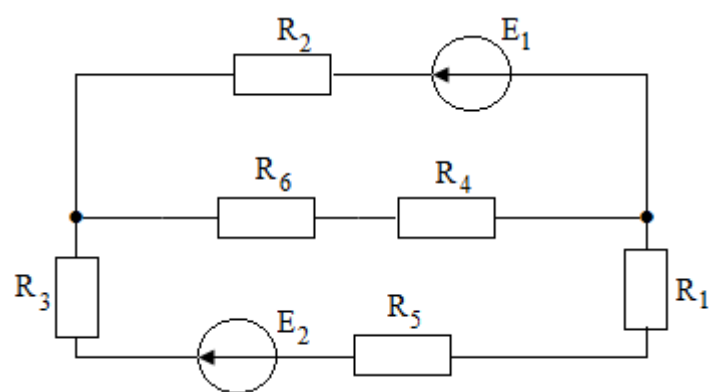


Рис. 8 Сложная электрическая цепь

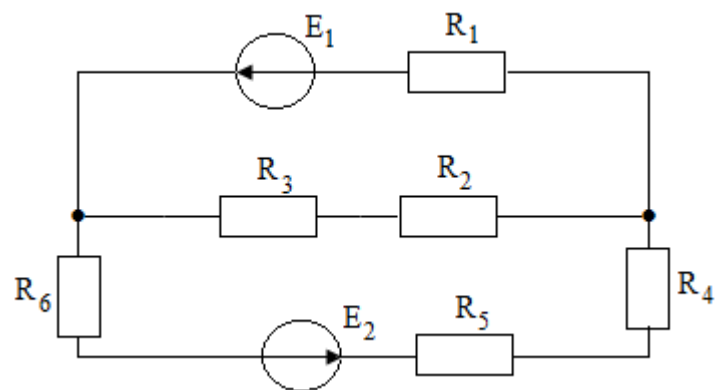


Рис. 9 Сложная электрическая цепь

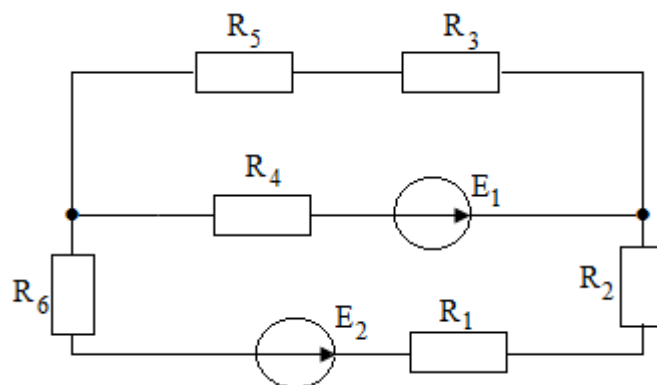


Рис. 10 Сложная электрическая цепь

При расчете сложной электрической цепи с помощью метода узловых и контурных уравнений выбирают произвольно направление токов в ветвях и направление обхода контуров. Затем составляют уравнения. Число независимых узловых уравнений, составленных с помощью первого закона Кирхгофа должно быть на единицу меньше количества узлов в схеме. Число независимых уравнений, составленных с помощью второго закона Кирхгофа должно равняться числу независимых контуров. Общая система уравнений должна состоять из числа уравнений равных числу искомых неизвестных.

Первый закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма токов, сходящихся в одном узле равна нулю

$$\sum I = 0$$

Второй закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма падений напряжений, действующих в замкнутом контуре, равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом же контуре

$$\sum I \times R = \sum E$$

Рассмотрим расчет схемы на примере.

Пример. Для схемы, изображенной на рисунке 11, определить токи с помощью метода узловых и контурных уравнений, контурных токов, узловых напряжений, наложения. Сравнить результаты расчета.

Дано:

$R_1 = 15 \text{ Ом}$, $R_2 = 3 \text{ Ом}$, $R_3 = 10 \text{ Ом}$, $R_4 = 4 \text{ Ом}$, $R_5 = 11 \text{ Ом}$, $R_6 = 100 \text{ Ом}$, $r_{01} = 1 \text{ Ом}$, $r_{02} = 1 \text{ Ом}$, $E_1 = 80 \text{ В}$, $E_2 = 60 \text{ В}$.

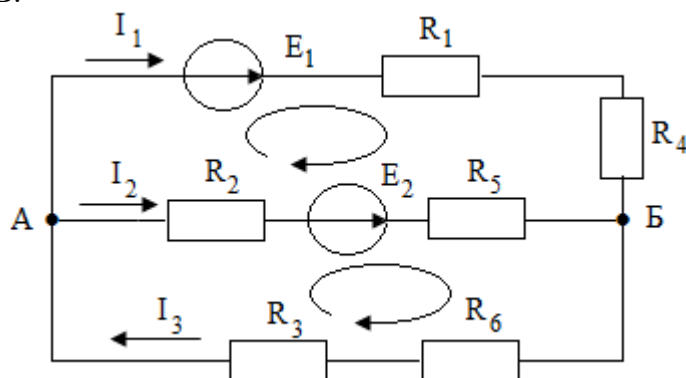


Рис. 11 Электрическая цепь для расчета методом узловых и контурных уравнений

Решение

1. При расчете сложной электрической цепи с помощью законов Кирхгофа выбирают произвольно направление токов в ветвях и направление обхода контуров. Затем составляют уравнения. Число независимых узловых уравнений, составленных с помощью первого

закона Кирхгофа должно быть на единицу меньше количества узлов в схеме. Число независимых уравнений, составленных с помощью второго закона Кирхгофа должно равняться числу независимых контуров. Общая система уравнений должна состоять из числа уравнений равных числу искомых неизвестных.

В начале проанализируем схему: в цепи 2 узла, 3 ветви и 2 независимых контура. Так как схема содержит 3 ветви, то в схеме протекает 3 тока, следовательно, наша система уравнений будет содержать 3 уравнения. По первому закону Кирхгофа составляем $n - 1 = 1$ (где n – число узлов) уравнений.

$$I_1 + I_2 = I_3$$

Оставшиеся 2 уравнения составляем с помощью второго закона Кирхгофа, задавшись направлением обхода контура (по часовой стрелке):

$$I_1 \times (R_1 + R_4 + r_{01}) - I_2 \times (R_5 + R_2 + r_{02}) = E_1 - E_2$$

$$I_2 \times (R_2 + R_5 + r_{02}) + I_3 \times (R_3 + R_6) = E_2$$

Таким образом, имеем систему уравнений:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 \\ I_1 \times (R_1 + R_4 + r_{01}) - I_2 \times (R_5 + R_2 + r_{02}) = E_1 - E_2 \\ I_2 \times (R_2 + R_5 + r_{02}) + I_3 \times (R_3 + R_6) = E_2 \end{cases}$$

Подставляем в систему уравнений заданные значения ЭДС и сопротивлений и определяем действительные токи в ветвях.

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 \\ I_1 \times (15 + 4 + 1) - I_2 \times (11 + 3 + 1) = 80 - 60 \\ I_2 \times (3 + 11 + 1) + I_3 \times (10 + 10) = 60 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 \\ I_1 \times 20 - I_2 \times 15 = 20 \\ I_2 \times 15 + I_3 \times 20 = 60 \end{cases}$$

Решая данную систему методом подстановки, токи будут равны:

$$I_1 = 1,6 \text{ A}; I_2 = 0,8 \text{ A}; I_3 = 2,4 \text{ A}$$

Содержание отчета

1. Схема сложной электрической цепи.
2. Таблица с исходными данными.
3. Расчет сложной электрической цепи.
4. Ответы на контрольные вопросы
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Что называется узлом, ветвью и контуром электрической цепи?
2. Сформулируйте первый закон Кирхгофа?
3. Сформулируйте второй закон Кирхгофа?
4. Поясните, в чем заключается метод расчета с помощью узловых и контурных уравнений.

Практическая работа № 4

Расчет сложных электрических цепей методом контурных токов

Цель работы: рассчитать заданную сложную цепь с помощью метода контурных токов.

Обеспеченность занятия:

1. Комплект учебно-методической документации.

Исходные данные: вариант задания определяется в соответствии с порядковым номером фамилии обучающегося в учебном журнале (таблица 1).

Краткие теоретические сведения

Ветвью электрической цепи называется участок электрической цепи, состоящий из последовательно соединенных элементов и по которому проходит одинаковый ток.

Узлом электрической цепи называется место соединения трех и более ветвей.

Контуром называется замкнутый участок электрической цепи, состоящий из нескольких ветвей.

Сложные электрические цепи состоят из нескольких ветвей и контуров.

Сложной называется электрическая цепь, которая содержит два и более контура. Второй закон Кирхгофа – алгебраическая сумма падений напряжений, действующих в замкнутом контуре равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом же контуре.

Порядок выполнения

1. Для схемы, изображенных на рисунках ниже, рассчитать токи с помощью метода узловых и контурных токов, узловых напряжений, метода наложения и эквивалентного преобразования «треугольника» в «звезду». Сравнить результат расчета и составить баланс мощности. Данные для своего варианта взять из таблицы 1.

Таблица 1– Исходные данные

вариант	№ рисунка	E_1 , В	E_2 , В	r_{01} , Ом	r_{02} , Ом	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , ом
1,11,21	1	50	260	1	1	20	24	4	3	2	25
2,12,22	2	110	120	1	1	10	14	8	14	26	15
3,13,23	3	120	140	1	1	17	12	9	13	21	16
4,14,24	4	85	100	1	1	14	11	9	8	16	22
5,15,25	5	56	90	1	1	24	21	19	18	14	19
6,16,26	6	58	48	1	1	4	5	3	6	7	4,5
7,17,27	7	73	43	1	1	12	16	10	15	9	13
8,18,28	8	48	24	1	1	3	6	2,5	5	3	8
9,19,29	9	200	140	1	1	30	60	25	35	30	18
10,20,30	10	160	120	1	1	26	30	18	28	19	34

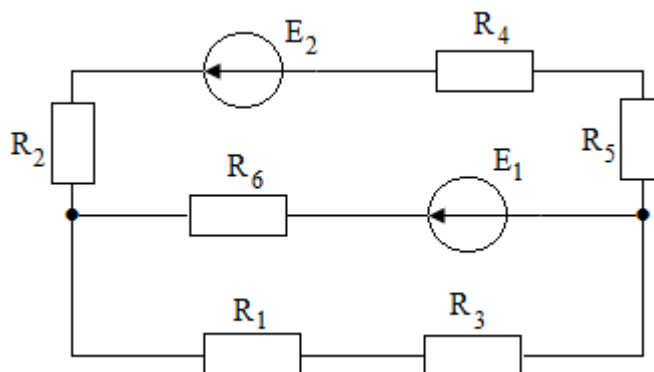


Рис. 1 Сложная электрическая цепь

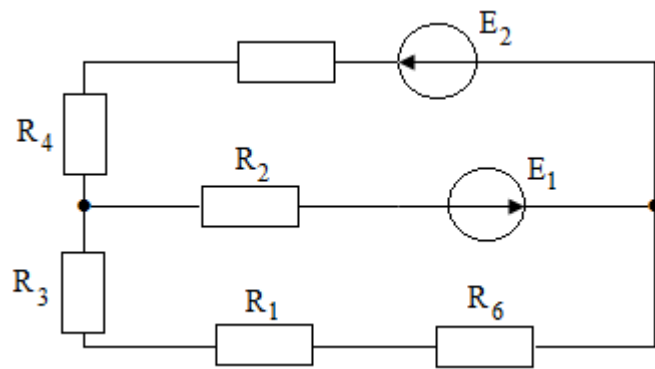


Рис. 2 Сложная электрическая цепь

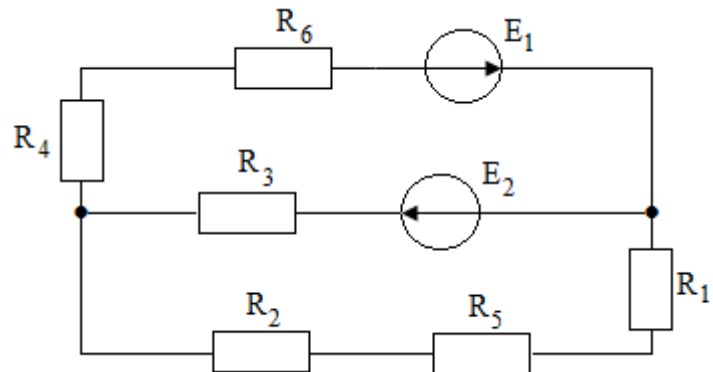


Рис. 3 Сложная электрическая цепь

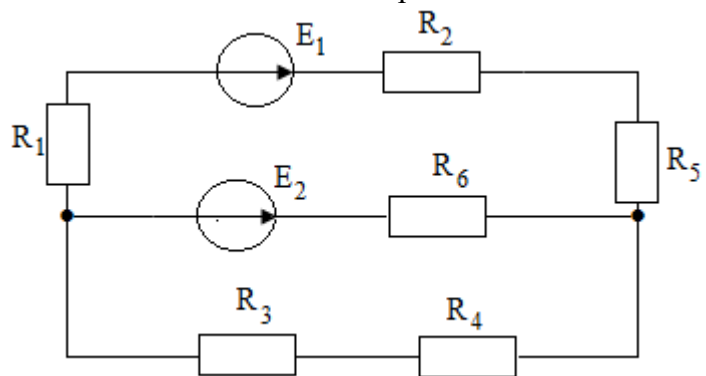


Рис. 4 Сложная электрическая цепь

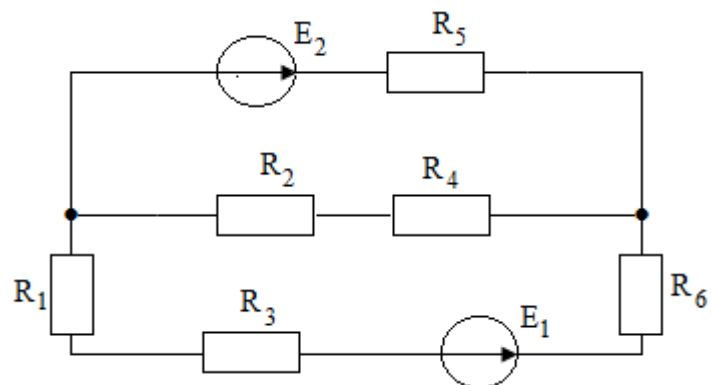


Рис. 5 Сложная электрическая цепь

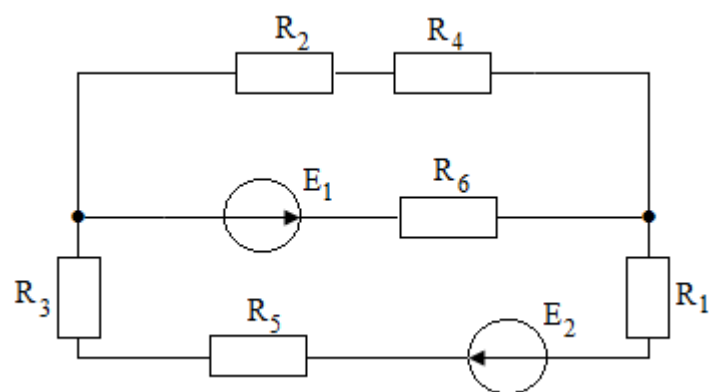


Рис. 6. Сложная электрическая цепь

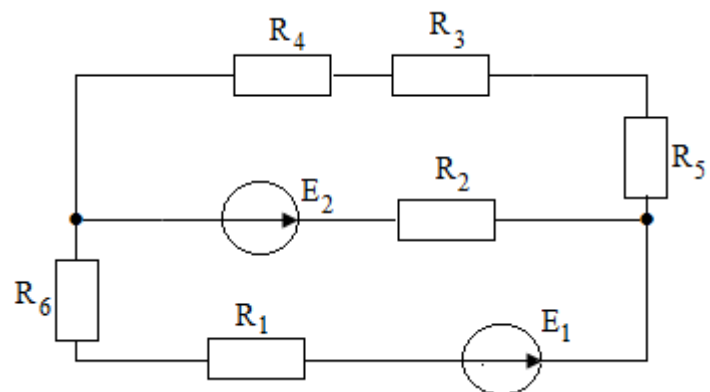


Рис. 7 Сложная электрическая цепь

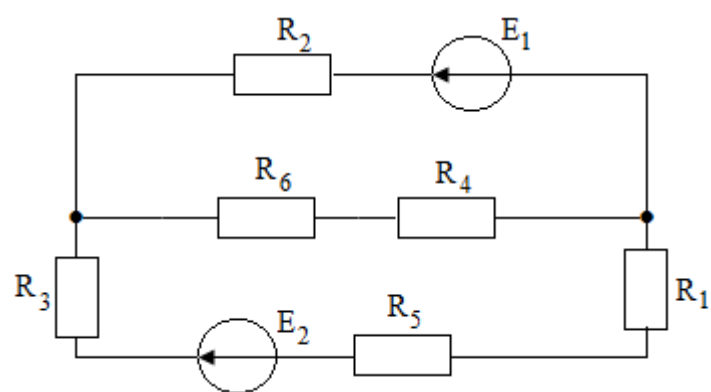


Рис. 8 Сложная электрическая цепь

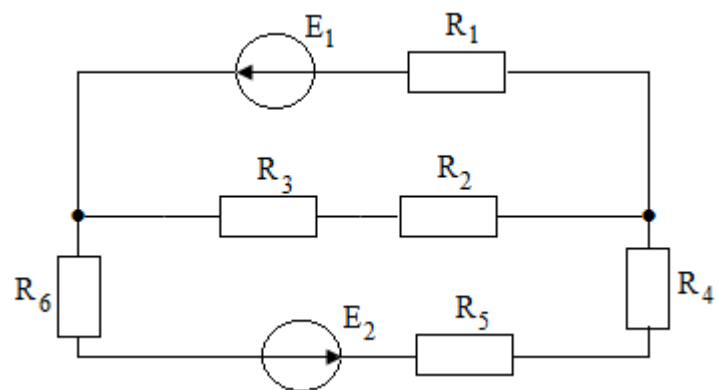


Рис. 9 Сложная электрическая цепь

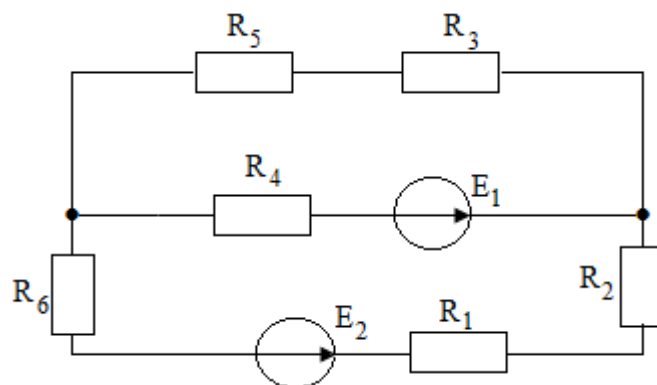


Рис. 10 Сложная электрическая цепь

Пример. Для схемы, изображенной на рисунке 11, определить токи

Дано:

$R_1 = 15 \text{ Ом}$, $R_2 = 3 \text{ Ом}$, $R_3 = 10 \text{ Ом}$, $R_4 = 4 \text{ Ом}$, $R_5 = 11 \text{ Ом}$, $R_6 = 100 \text{ Ом}$, $r_{01} = 1 \text{ Ом}$, $r_{02} = 1 \text{ Ом}$, $E_1 = 80 \text{ В}$, $E_2 = 60 \text{ В}$.

Электрическую цепь рис. 11 рассчитаем методом контурных токов.

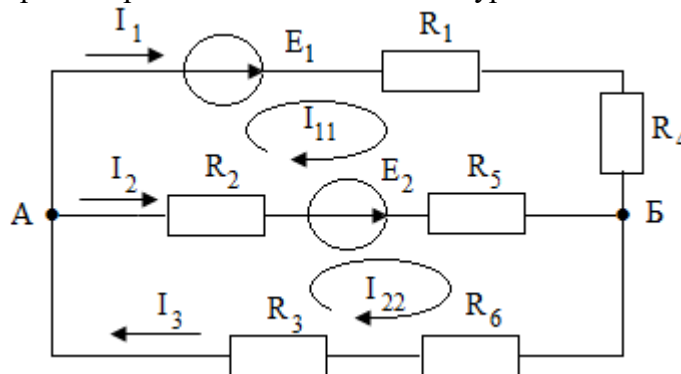


Рис. 11 Электрическая цепь для расчета методом контурных токов

При расчете электрических цепей с помощью метода контурных токов определяют в заданной цепи независимые замкнутые контуры и задаются условным положительным направлением контурных токов в них. Контурный ток – величина расчетная и ее измерить невозможно.

Для определения контурных токов составляем уравнения по второму закону Кирхгофа. При этом число уравнений равняется числу контурных токов. В каждое уравнение входит алгебраическая сумма ЭДС, входящих в данный контур и общее падение напряжений в данном контуре.

Таким образом, для данной схемы необходимо составить 2 уравнения:

$$\begin{cases} I_{11} \times (R_1 + r_{01} + R_4 + R_5 + r_{02} + R_2) - I_{22} \times (R_2 + r_{02} + R_5) = E_1 - E_2 \\ I_{22} \times (R_2 + r_{02} + R_5 + R_6 + R_3) - I_{11} \times (R_2 + r_{02} + R_5) = E_2 \end{cases}$$

Подставляем заданные значения ЭДС и сопротивлений решаем данную систему уравнений.

$$\begin{cases} I_{11} \times (15 + 1 + 4 + 1 + 1 + 3) - I_{22} \times (3 + 1 + 11) = 80 - 60 \\ I_{22} \times (3 + 1 + 11 + 10 + 10) - I_{11} \times (3 + 1 + 11) = 60 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{11} \times 35 - I_{22} \times 15 = 20 \\ I_{22} \times 35 - I_{11} \times 15 = 60 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{11} \times 35 - 20 = I_{22} \times 15 \\ I_{22} \times 35 - I_{11} \times 15 = 60 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{11} \times 2,33 - 1,33 = I_{22} \\ I_{22} \times 35 - I_{11} \times 15 = 60 \end{cases}$$

$$(I_{11} \times 2,33 - 1,33) \times 35 - I_{11} \times 15 = 60$$

$$I_{11} \times 81,55 - 46,55 - I_{11} \times 15 = 60$$

$$I_{11} \times 66,55 = 106,55$$

$$I_{11} = 1,6 \text{ A}$$

$$I_{22} = 1,6 \times 2,33 - 1,33 = 2,4 \text{ A}$$

Определим реальные токи в каждой ветви

$$I_1 = I_{11} = 1,6 \text{ A}$$

$$I_3 = I_{22} = 2,4 \text{ A}$$

$$I_2 = I_{22} - I_{11} = 0,8 \text{ A}$$

Содержание отчета

1. Схема сложной электрической цепи.
2. Таблица с исходными данными.
3. Расчет сложной электрической цепи.
4. Ответы на контрольные вопросы
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Что называется узлом, ветвью и контуром электрической цепи.
2. Сформулируйте первый закон Кирхгофа.
3. Сформулируйте второй закон Кирхгофа.
4. Поясните, в чем заключается метод контурных токов.

Практическая работа № 5

Расчет сложных электрических цепей методом узловых потенциалов

Цель работы: рассчитать заданную сложную цепь с помощью метода узловых потенциалов.

Обеспеченность занятия:

1. Комплект учебно-методической документации.

Исходные данные: вариант задания определяется в соответствии с порядковым номером фамилии обучающегося в учебном журнале (таблица 1).

Краткие теоретические сведения

Ветвью электрической цепи называется участок электрической цепи, состоящий из последовательно соединенных элементов и по которому проходит одинаковый ток.

Узлом электрической цепи называется место соединения трех и более ветвей.

Контуром называется замкнутый участок электрической цепи, состоящий из нескольких ветвей.

Сложные электрические цепи состоят из нескольких ветвей и контуров.

Сложной называется электрическая цепь, которая содержит два и более контура. Второй закон Кирхгофа – алгебраическая сумма падений напряжений, действующих в замкнутом контуре равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом же контуре. Существует несколько методов расчета сложных электрических цепей при решении с помощью метода узлового напряжения определяют узловое напряжение и проводимость каждой ветви.

Порядок выполнения

1. Для схемы, изображенных на рисунках ниже, рассчитать токи с помощью узловых напряжений сравнить результат расчета и составить баланс мощности. Данные для своего варианта взять из таблицы 1.

Таблица 1– Исходные данные

вариант	№ рисунок	E_1 , В	E_2 , В	r_{01} , Ом	r_{02} , Ом	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , ом
1,11,21	1	50	260	1	1	20	24	4	3	2	25
2,12,22	2	110	120	1	1	10	14	8	14	26	15
3,13,23	3	120	140	1	1	17	12	9	13	21	16
4,14,24	4	85	100	1	1	14	11	9	8	16	22
5,15,25	5	56	90	1	1	24	21	19	18	14	19
6,16,26	6	58	48	1	1	4	5	3	6	7	4,5
7,17,27	7	73	43	1	1	12	16	10	15	9	13
8,18,28	8	48	24	1	1	3	6	2,5	5	3	8
9,19,29	9	200	140	1	1	30	60	25	35	30	18
10,20,30	10	160	120	1	1	26	30	18	28	19	34

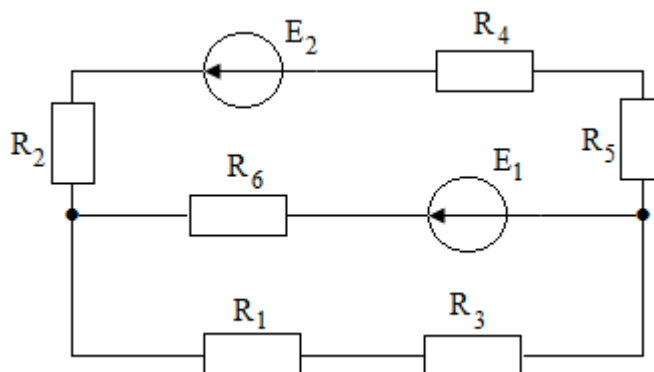


Рис. 1 Сложная электрическая цепь

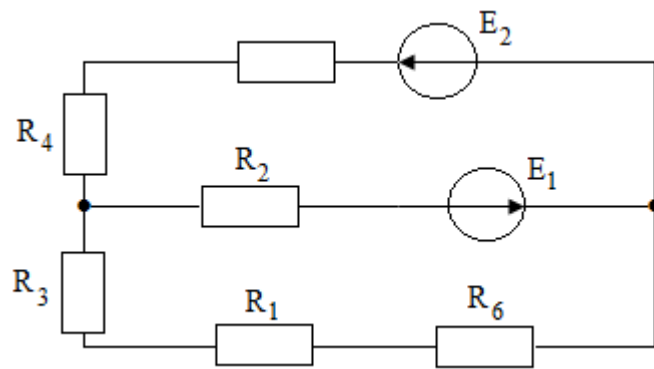


Рис. 2 Сложная электрическая цепь

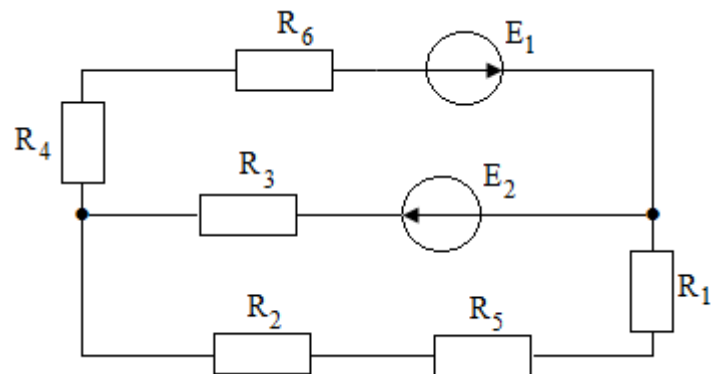


Рис. 3 Сложная электрическая цепь

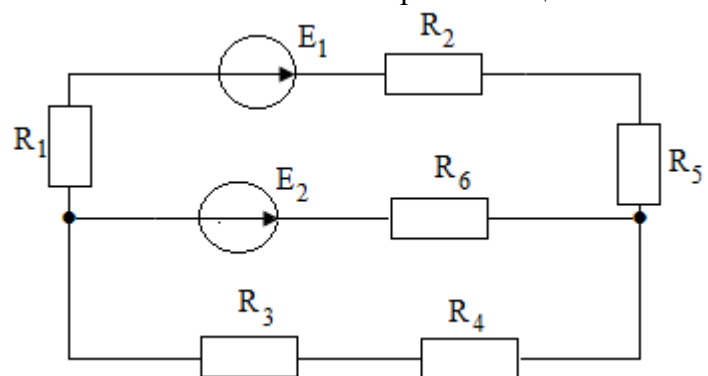


Рис. 4 Сложная электрическая цепь

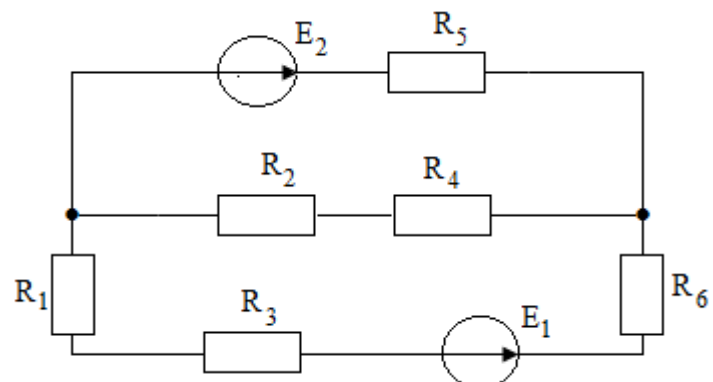


Рис. 5 Сложная электрическая цепь

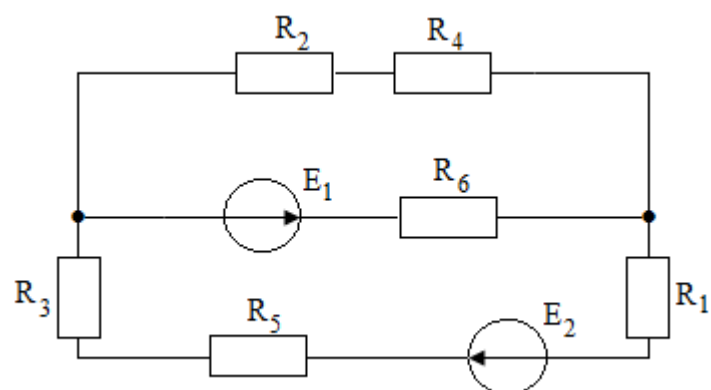


Рис. 6. Сложная электрическая цепь

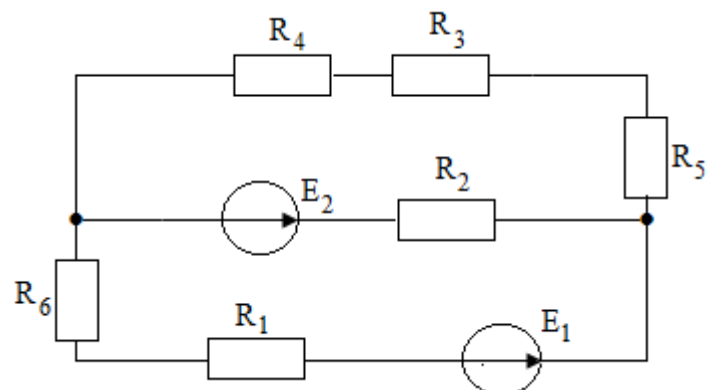


Рис. 7 Сложная электрическая цепь

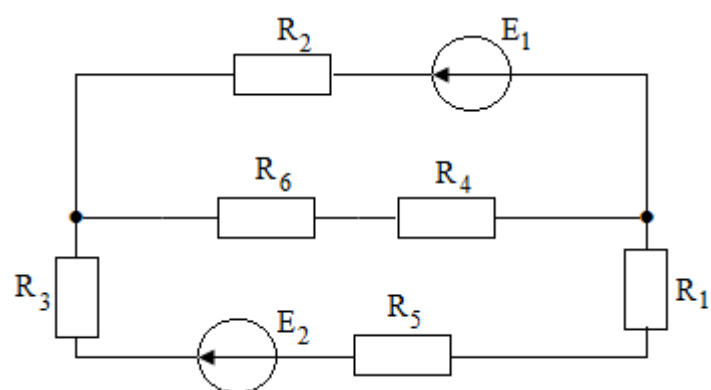


Рис. 8 Сложная электрическая цепь

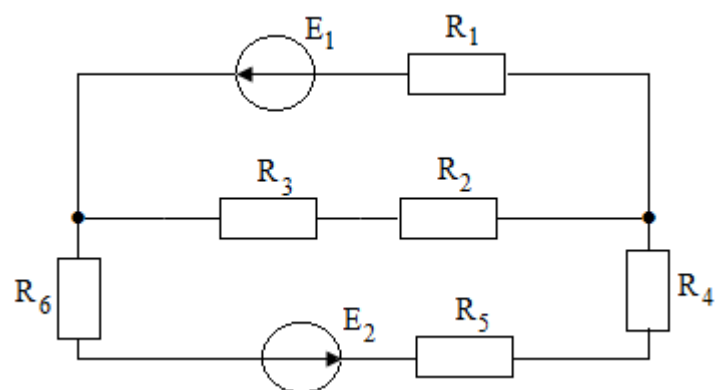


Рис. 9 Сложная электрическая цепь

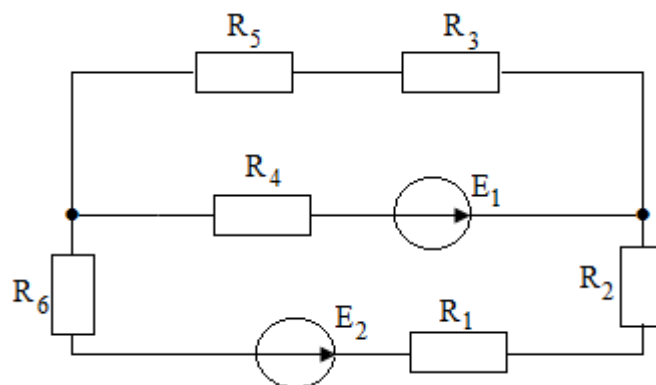


Рис. 10 Сложная электрическая цепь

Цепь, рассчитанную в двух предыдущих методах, рассчитать методом узлового напряжения.

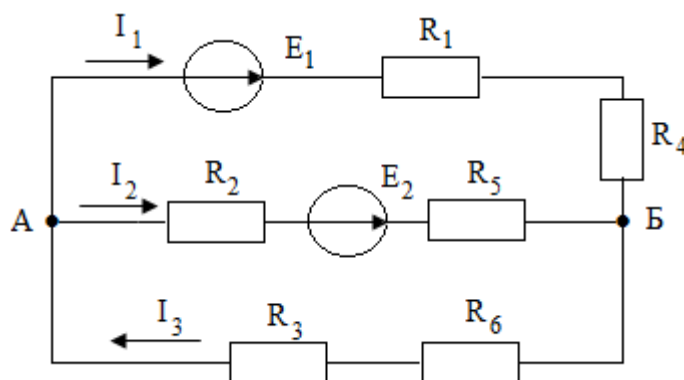


Рис. 11 Электрическая цепь для расчета методом узлового напряжения

Определим проводимость каждой ветви:

$$g_1 = \frac{1}{R_1 + r_{01} + R_4} = \frac{1}{15 + 1 + 4} = 0,05 \text{ См}$$

$$g_2 = \frac{1}{R_2 + r_{02} + R_5} = \frac{1}{3 + 1 + 11} = 0,0667 \text{ См}$$

$$g_3 = \frac{1}{R_3 + R_6} = \frac{1}{10 + 10} = 0,05 \text{ См}$$

Определим узловое напряжение:

$$U_{AB} = \frac{E_1 \times g_1 + E_2 \times g_2}{g_1 + g_2 + g_3} = \frac{80 \times 0,05 + 60 \times 0,0667}{0,05 + 0,0667 + 0,05} = 48 \text{ В}$$

Определим токи во всех ветвях:

$$I_1 = (E_1 - U_{AB}) \times g_1 = (80 - 48) \times 0,05 = 1,6 \text{ А}$$

$$I_2 = (E_2 - U_{AB}) \times g_2 = (60 - 48) \times 0,0667 = 0,8 \text{ А}$$

$$I_3 = (U_{AB}) \times g_3 = 48 \times 0,05 = 2,4 \text{ А}$$

Содержание отчета

1. Схема сложной электрической цепи.
2. Таблица с исходными данными.
3. Расчет сложной электрической цепи.
4. Ответы на контрольные вопросы
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Что называется узлом, ветвью и контуром электрической цепи
2. Сформулируйте первый закон Кирхгофа
3. Поясните, в чем заключается метод узлового напряжения?

Практическая работа № 6

Расчет сложных электрических цепей методом наложения

Цель работы: рассчитать заданную сложную цепь с помощью метода наложения

Обеспеченность занятия:

1. Комплект учебно-методической документации.

Исходные данные: вариант задания определяется в соответствии с порядковым номером фамилии обучающегося в учебном журнале (таблица 1).

Краткие теоретические сведения

Ветвью электрической цепи называется участок электрической цепи, состоящий из последовательно соединенных элементов и по которому проходит одинаковый ток.

Узлом электрической цепи называется место соединения трех и более ветвей.

Контуром называется замкнутый участок электрической цепи, состоящий из нескольких ветвей.

Сложные электрические цепи состоят из нескольких ветвей и контуров.

Сложной называется электрическая цепь, которая содержит два и более контура. Второй закон Кирхгофа – алгебраическая сумма падений напряжений, действующих в замкнутом контуре равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом же контуре. В методе наложения заменяют одну схему с n источниками ЭДС и (или) тока n такими же схемами, с одним источником в каждой.

Порядок выполнения

1. Для схемы, изображенных на рисунках ниже, рассчитать токи с помощью метода узловых и контурных токов, узловых напряжений, метода наложения и эквивалентного преобразования «треугольника» в «звезду». Сравнить результат расчета и составить баланс мощности. Данные для своего варианта взять из таблицы 1.

Таблица 1– Исходные данные

вариант	№ рисунок	E_1 , В	E_2 , В	r_{01} , Ом	r_{02} , Ом	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , ом
1,11,21	1	50	260	1	1	20	24	4	3	2	25
2,12,22	2	110	120	1	1	10	14	8	14	26	15
3,13,23	3	120	140	1	1	17	12	9	13	21	16
4,14,24	4	85	100	1	1	14	11	9	8	16	22
5,15,25	5	56	90	1	1	24	21	19	18	14	19
6,16,26	6	58	48	1	1	4	5	3	6	7	4,5
7,17,27	7	73	43	1	1	12	16	10	15	9	13
8,18,28	8	48	24	1	1	3	6	2,5	5	3	8
9,19,29	9	200	140	1	1	30	60	25	35	30	18
10,20,30	10	160	120	1	1	26	30	18	28	19	34

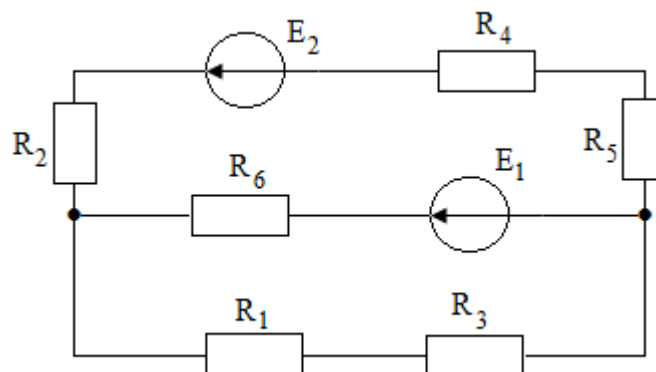


Рис. 1 Сложная электрическая цепь

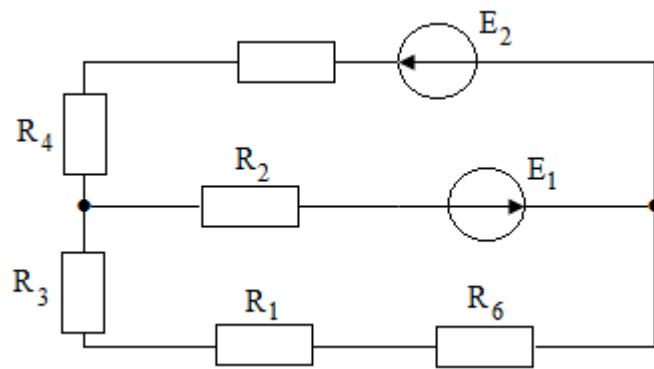


Рис. 2 Сложная электрическая цепь

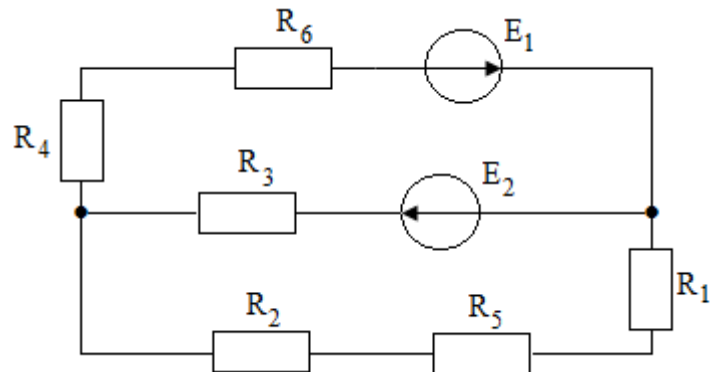


Рис. 3 Сложная электрическая цепь

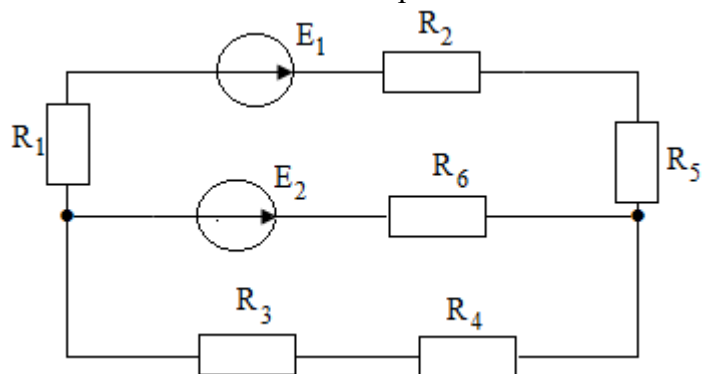


Рис. 4 Сложная электрическая цепь

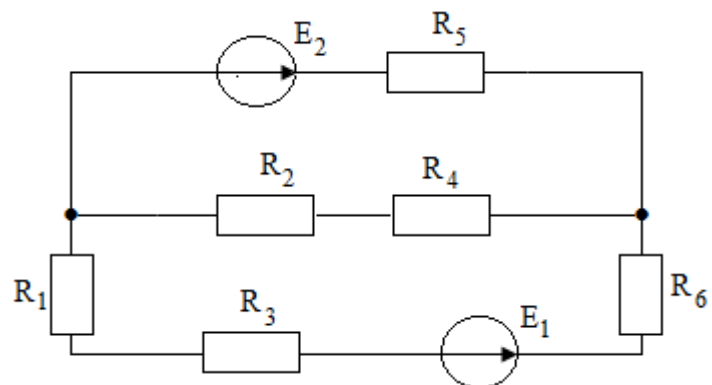


Рис. 5 Сложная электрическая цепь

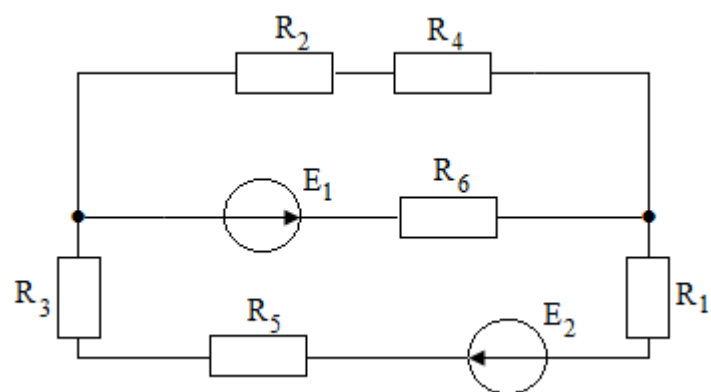


Рис. 6. Сложная электрическая цепь

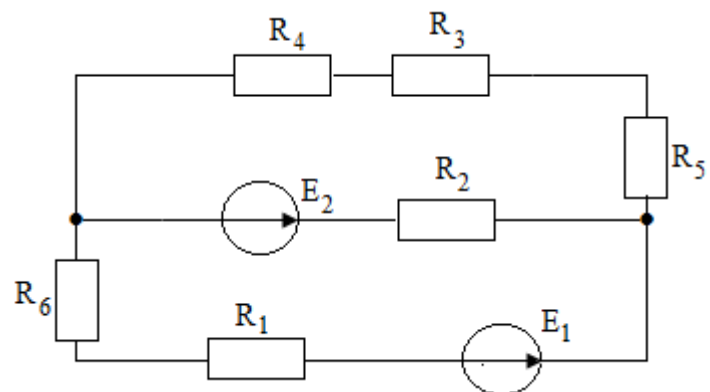


Рис. 7 Сложная электрическая цепь

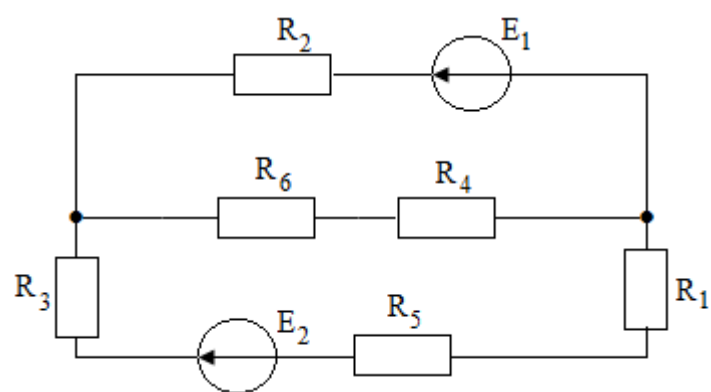


Рис. 8 Сложная электрическая цепь

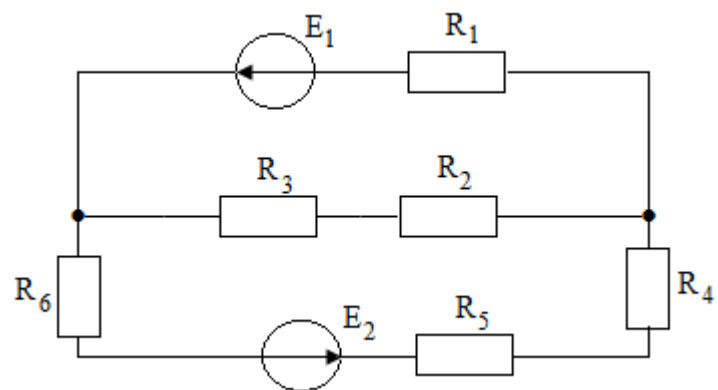


Рис. 9 Сложная электрическая цепь

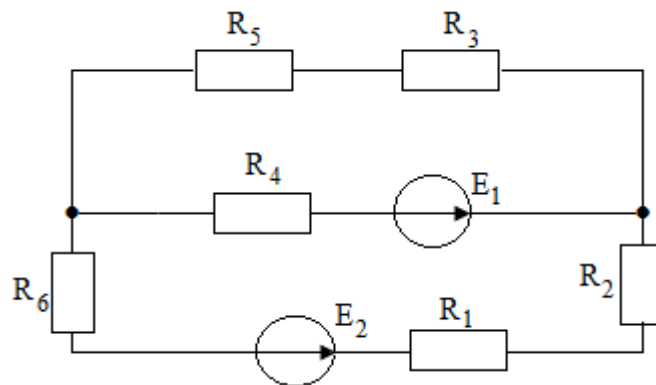


Рис. 10 Сложная электрическая цепь

Пример. Для схемы, изображенной на рисунке 11, определить токи с помощью метода наложения. Сравнить результаты расчета.

Дано:

$R_1 = 15 \text{ Ом}$, $R_2 = 3 \text{ Ом}$, $R_3 = 10 \text{ Ом}$, $R_4 = 4 \text{ Ом}$, $R_5 = 11 \text{ Ом}$, $R_6 = 100 \text{ Ом}$, $r_{01} = 1 \text{ Ом}$, $r_{02} = 1 \text{ Ом}$, $E_1 = 80 \text{ В}$, $E_2 = 60 \text{ В}$.

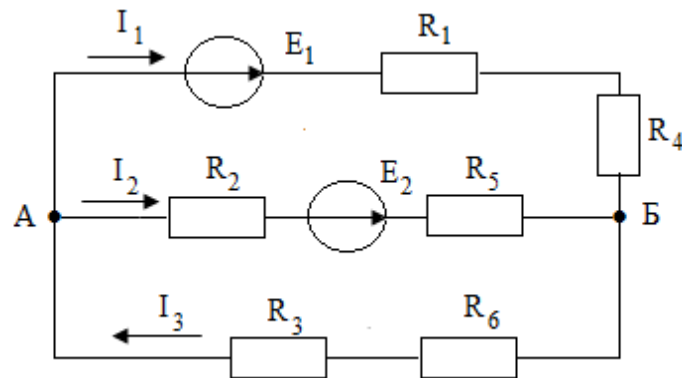


Рис. 11 Электрическая цепь для расчета методом наложения

Удалим источник E_2 , но оставим его внутреннее сопротивление в ветви r_{02}

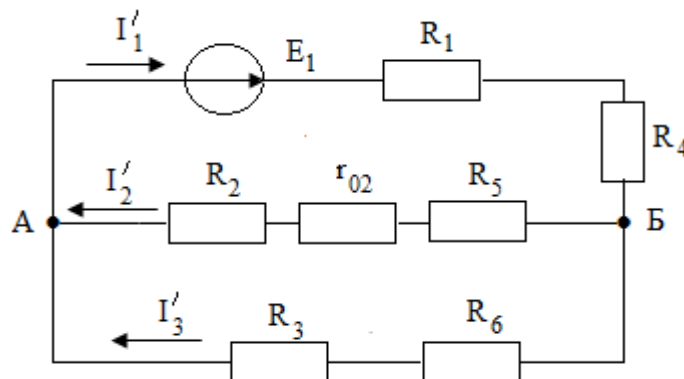


Рис. 12 Электрическая цепь для расчета методом наложения

Определим эквивалентное сопротивление для цепи рис. 12

$$R_{\Sigma}^I = R_4 + R_1 + \frac{(R_6 + R_3) \times (R_2 + r_{02} + R_5)}{R_6 + R_3 + R_2 + r_{02} + R_5} = 4 + 15 + \frac{(10 + 10) \times (3 + 1 + 11)}{10 + 10 + 3 + 1 + 11} = 27,57 \text{ Ом}$$

Определим частичные токи, создаваемые источником E_1

$$I_1^I = \frac{E_1}{R_{\Sigma}^I + r_{01}} = \frac{80}{27,57 + 1} = 2,8 \text{ А}$$

$$U_{AB}^I = I_1^I \times R_{AB}^I = 2,8 \times 8,75 = 24В$$

$$I_2^I = \frac{U_{AB}^I}{R_5 + r_{01} + R_2} = \frac{24}{11+1+3} = 1,6А$$

$$I_3^I = \frac{U_{AB}^I}{R_6 + R_3} = \frac{24}{10+10} = 1,2А$$

Определим частичные токи, создаваемые в ветвях источником E_2 , удалив из цепи источник E_1 . Внутреннее сопротивление источника оставим (рис. 13).

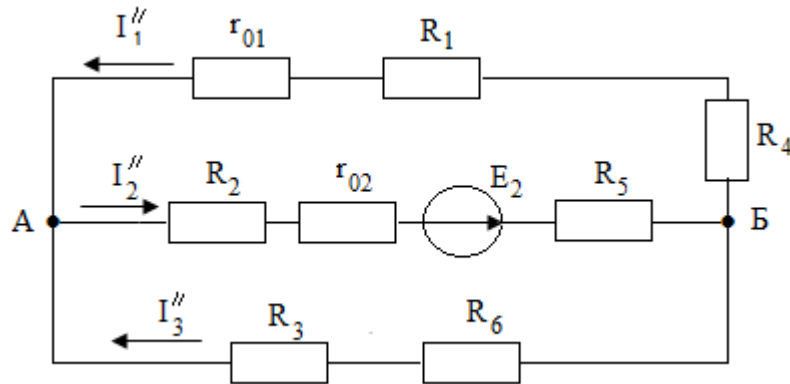


Рис. 13 Электрическая цепь для расчета методом наложения
Определим эквивалентное сопротивление для цепи рис. 13

$$R_{Э}^{II} = R_5 + R_2 + \frac{(R_6 + R_3) \times (R_4 + r_{01} + R_1)}{R_6 + R_3 + R_4 + r_{01} + R_1} = 11 + 3 + \frac{(10+10) \times (4+1+15)}{10+10+4+1+15} = 24\text{Ом}$$

Определим частичные токи, создаваемые источником E_2

$$I_2^{II} = \frac{E_2}{R_{Э}^{II} + r_{02}} = \frac{60}{24+1} = 2,4А$$

$$U_{AB}^{II} = I_2^{II} \times R_{AB}^{II} = 2,4 \times 10 = 24В$$

$$I_1^{II} = \frac{U_{AB}^{II}}{R_4 + r_{01} + R_1} = \frac{24}{4+1+15} = 1,2А$$

$$I_3^{II} = \frac{U_{AB}^{II}}{R_6 + R_3} = \frac{24}{10+10} = 1,2А$$

Определим реальные токи в каждой ветви

$$I_1 = I_1^I - I_1^{II} = 2,8 - 1,2 = 1,6А$$

$$I_2 = I_2^I - I_2^{II} = 2,4 - 1,6 = 0,8А$$

$$I_3 = I_3^I + I_3^{II} = 1,2 + 1,2 = 2,4А$$

Вывод: при расчете электрической цепи всеми методами токи совпадают, следовательно, расчет выполнен правильно.

Выполним баланс мощности.

Уравнение энергетического баланса мощности цепи записывается следующим образом

$$\sum P_{ист} = \sum P_{пр}$$

Если через источник ЭДС протекает ток, направление которого совпадает с направлением ЭДС, то источник ЭДС отдает энергию и его мощность равна произведению $E I$. Если же ток направлен навстречу ЭДС, то источник работает как потребитель энергии.

$$\sum P_{ист} = E_1 \times I_1 + E_2 \times I_2 = 80 \times 1,6 + 60 \times 0,8 = 176 \text{ Вт}$$

$$\begin{aligned}\sum P_{\text{пр}} &= I_1^2 \times (R_1 + R_4 + r_{01}) + I_2^2 \times (R_5 + R_2 + r_{02}) + I_3^2 \times (R_6 + R_3) \\ &= 1,6^2 \times (15 + 4 + 1) + 0,8^2 \times (11 + 3 + 1) + 2,4^2 \times (10 + 10) = 176 \text{ Вт} \\ 176 \text{ Вт} &= 176 \text{ Вт}\end{aligned}$$

Баланс мощности показывает, что цепь рассчитана правильно.

Направление токов I_1 и I_2 совпадает с выбранным направлением, следовательно, источник E_1 и источник E_2 работают в режиме генератора.

Содержание отчета

1. Схема сложной электрической цепи.
2. Таблица с исходными данными.
3. Расчет сложной электрической цепи.
4. Ответы на контрольные вопросы
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Что называется узлом, ветвью и контуром электрической цепи
2. Сформулируйте первый закон Кирхгофа
3. Сформулируйте второй закон Кирхгофа
4. Поясните, в чем заключается метод наложения.

Практическая работа № 7

Расчет сложных электрических цепей методом эквивалентного генератора

Цель работы: рассчитать заданную сложную цепь с помощью метода эквивалентного генератора

Обеспеченность занятия:

1. Комплект учебно-методической документации.

Исходные данные: вариант задания определяется в соответствии с порядковым номером фамилии обучающегося в учебном журнале (таблица 1).

Порядок выполнения

1. Для схемы, изображенных на рисунках ниже, рассчитать токи с помощью метода узловых и контурных токов, узловых напряжений, метода наложения и эквивалентного преобразования «треугольника» в «звезду». Сравнить результат расчета и составить баланс мощности. Данные для своего варианта взять из таблицы 1.

Таблица 1– Исходные данные

вариант	№ рисунок	E_1 , В	E_2 , В	r_{01} , Ом	r_{02} , Ом	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , ом
1,11,21	1	50	260	1	1	20	24	4	3	2	25
2,12,22	2	110	120	1	1	10	14	8	14	26	15
3,13,23	3	120	140	1	1	17	12	9	13	21	16
4,14,24	4	85	100	1	1	14	11	9	8	16	22
5,15,25	5	56	90	1	1	24	21	19	18	14	19
6,16,26	6	58	48	1	1	4	5	3	6	7	4,5
7,17,27	7	73	43	1	1	12	16	10	15	9	13
8,18,28	8	48	24	1	1	3	6	2,5	5	3	8
9,19,29	9	200	140	1	1	30	60	25	35	30	18
10,20,30	10	160	120	1	1	26	30	18	28	19	34

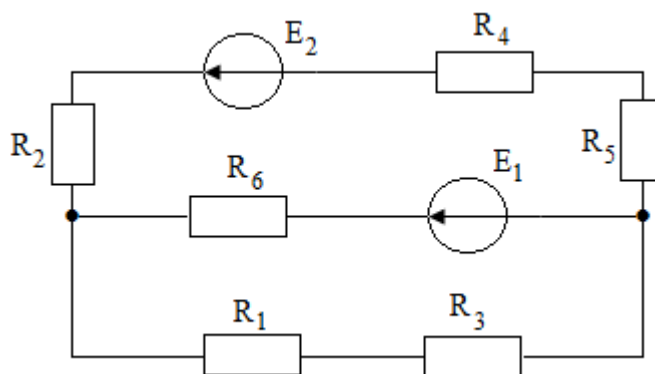


Рис. 1 Сложная электрическая цепь

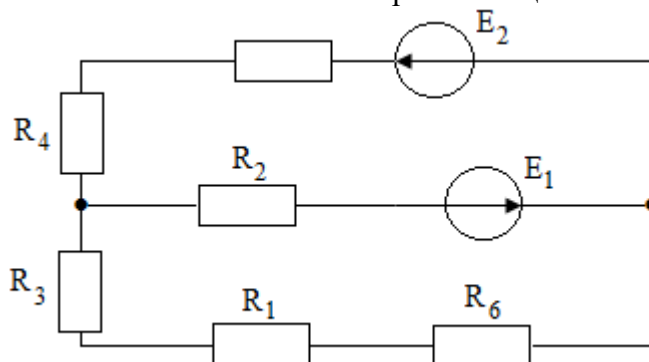


Рис. 2 Сложная электрическая цепь

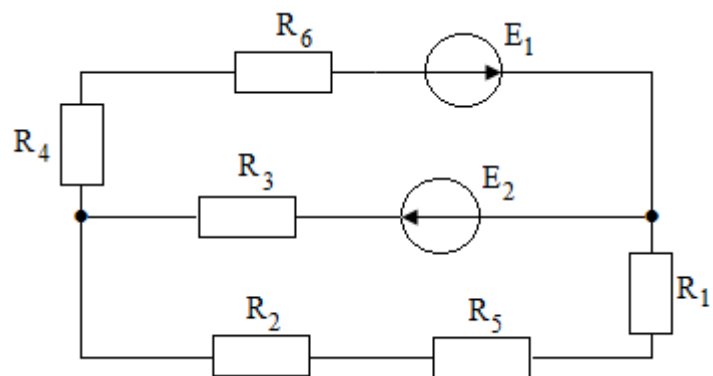


Рис. 3 Сложная электрическая цепь

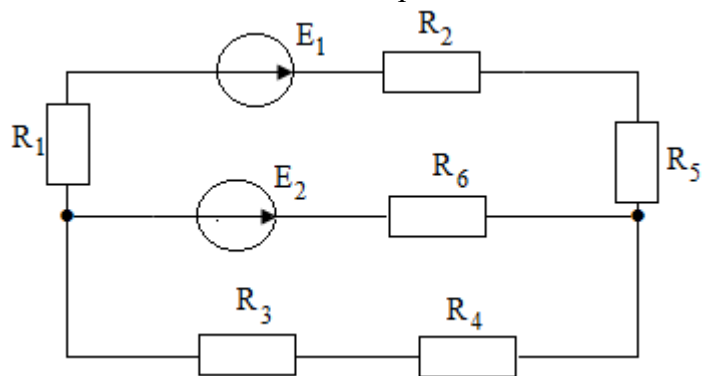


Рис. 4 Сложная электрическая цепь

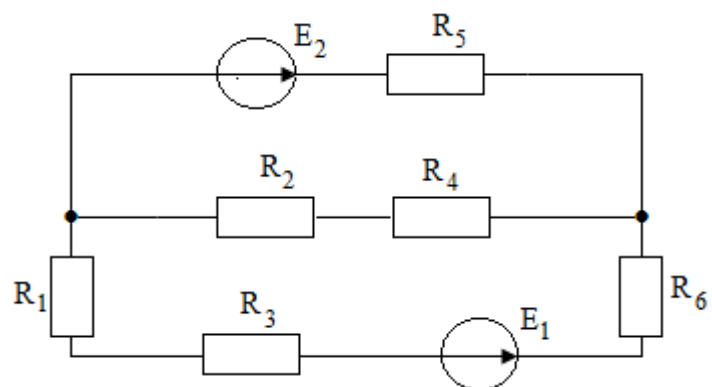


Рис. 5 Сложная электрическая цепь

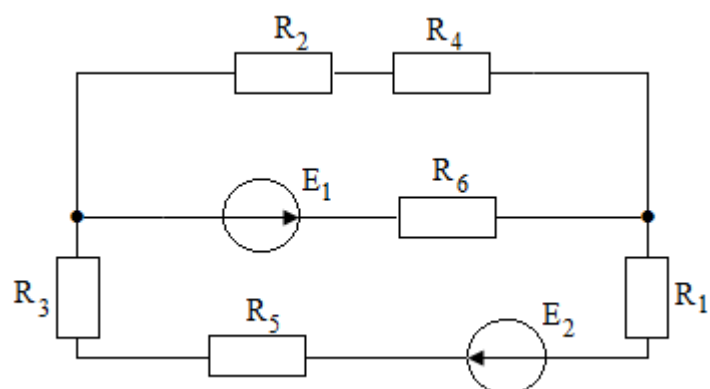


Рис. 6. Сложная электрическая цепь

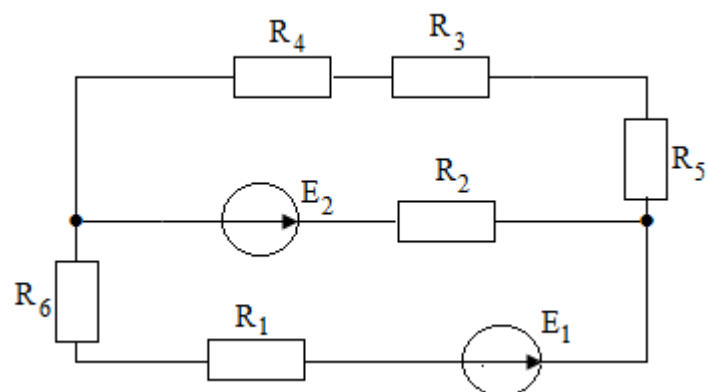


Рис. 7 Сложная электрическая цепь

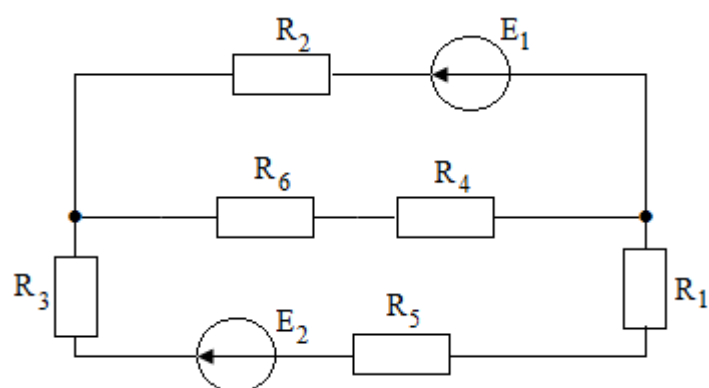


Рис. 8 Сложная электрическая цепь

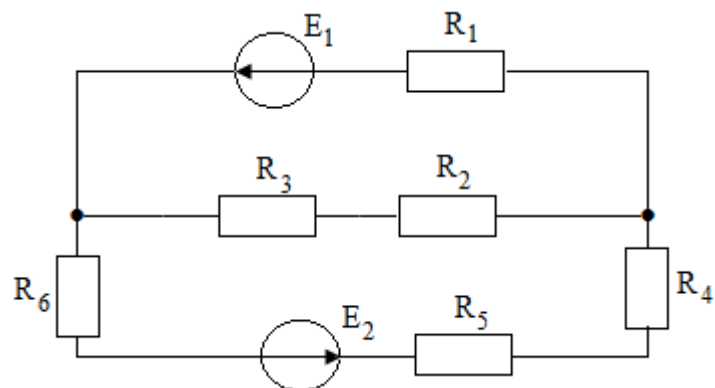


Рис. 9 Сложная электрическая цепь

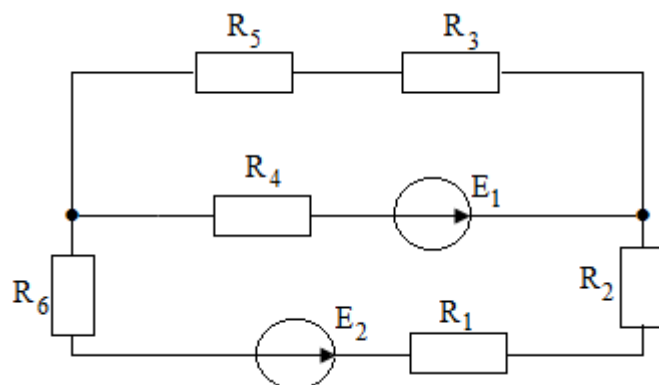


Рис. 10 Сложная электрическая цепь

Рассмотрим расчет схемы на примере.

Пример. Для схемы, изображенной на рисунке 11, определить токи с помощью метода эквивалентного генератора. Сравнить результаты расчета.

Дано:

$R_1 = 15 \text{ Ом}$, $R_2 = 3 \text{ Ом}$, $R_3 = 10 \text{ Ом}$, $R_4 = 4 \text{ Ом}$, $R_5 = 11 \text{ Ом}$, $R_6 = 100 \text{ Ом}$, $r_{01} = 1 \text{ Ом}$, $r_{02} = 1 \text{ Ом}$, $E_1 = 80 \text{ В}$, $E_2 = 60 \text{ В}$.

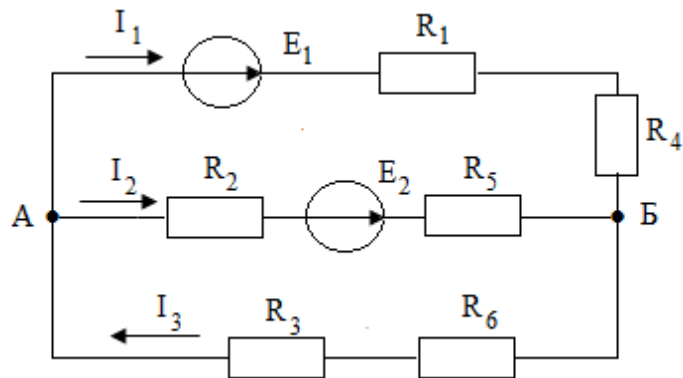


Рис. 11 Электрическая цепь для расчета методом эквивалентного генератора

Первый закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма токов, сходящихся в одном узле равна нулю

$$\sum I = 0$$

Второй закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма падений напряжений, действующих в замкнутом контуре, равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом же контуре

$$\sum I \times R = \sum E$$

Содержание отчета

1. Схема сложной электрической цепи.
2. Таблица с исходными данными.
3. Расчет сложной электрической цепи.
4. Ответы на контрольные вопросы
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Что называется узлом, ветвью и контуром электрической цепи
2. Сформулируйте первый закон Кирхгофа
3. Сформулируйте второй закон Кирхгофа
4. Поясните, в чем заключается метод эквивалентного генератора.

Практическая работа № 8

Расчет магнитной цепи

Цель занятия: рассчитать неразветвленную магнитную цепь, сравнить ток при воздушном зазоре и ток без воздушного зазора.

Обеспеченность занятия:

1. Комплект учебно-методической документации.

Исходные данные: вариант задания определяется в соответствии с порядковым номером фамилии обучающегося в учебном журнале (таблица 1).

Краткие теоретические сведения

В основу работы различного рода электромагнитных устройств – электрических машин, реле, магнитных пускателей, датчиков и т.д. – положено преобразование электрической энергии в механическую. Наряду с электрической цепью такие устройства содержат магнитную цепь, которая характеризуется магнитным потоком Φ , магнитным сопротивлением R_m и магнитодвижущей силой F .

Источником магнитного потока в цепях постоянного тока могут служить - *постоянный магнит* – специальный сплав железа с кобальтом или барием, характеризующийся значительной остаточной намагничивающей силой и *индуктивная катушка* с числом витков W , питаемая постоянным током I и создающая намагничивающую силу IW .

Закон электромагнитной индукции устанавливает количественное выражение для индуцированной ЭДС.

Электродвижущая сила, индуцируемая в замкнутом контуре при изменении сцепленного с ним магнитного потока, равна скорости изменения потокосцепления, взятой с отрицательным знаком

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Порядок выполнения

Магнитопровод электромагнита изготовлен из электротехнической стали (рис. 1). Состоит из сердечника длиной L_1 , якоря длиной L_2 и двух воздушных зазоров L_{01} и L_{02} . Ширина участков магнитопровода равна соответственно a_1 и a_2 , толщина b . Число витков обмотки равно w , сила притяжения якоря F . Определить силу тока в катушке и установить зависимость силы тока в катушке, необходимого для создания заданной подъемной силы электромагнита от величины воздушного зазора. Данные для своего варианта взять из таблицы 1

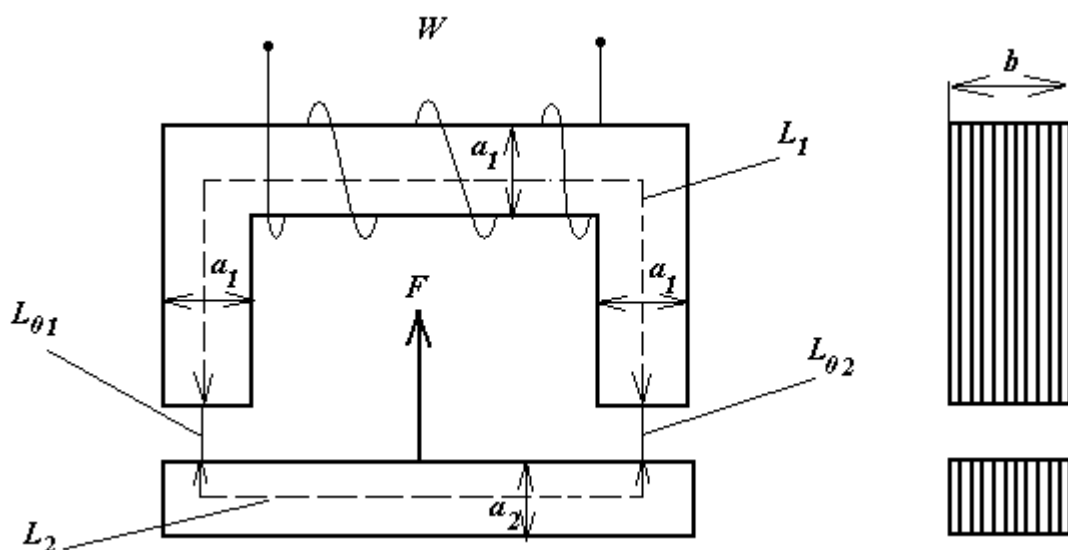


Рис. 1 Неразветвленная магнитная цепь

Таблица 1– Исходные данные

вариант	L_1 , см	L_2 , см	a_1 , см	a_2 , см	b , см	$L_{01}=L_{02}$, мм	W	F , Н
1, 11, 21	150	40	4	3	5	1	180	2000
2, 12, 22	210	50	5	4	4	1	200	3000
3, 13, 23	120	30	3	2	5	1,5	190	2700
4, 14, 24	140	60	4	3	4	1,5	210	2600
5, 15, 25	150	50	3	2	5	2	220	2500
6, 16, 26	140	30	5	4	4	2	200	2400
7, 17, 27	130	50	4	3	5	1	160	2300
8, 18, 28	170	30	3	2	4	1	170	2200
9, 19, 29	180	40	5	4	5	1,5	180	2100
10, 20, 39	200	25	4	3	4	2	190	2000

Рассмотрим расчет магнитной цепи на примере.

Пример. Магнитопровод электромагнита изготовлен из электротехнической стали (рис.1). Состоит из сердечника длиной $L_1 = 160$ см, якоря длиной $L_2 = 60$ см и двух воздушных зазоров $L_{01} = L_{02} = 1,5$ мм. Ширина участков магнитопровода равна соответственно $a_1 = 5$ см и $a_2 = 4$ см, толщина $b = 6$ см. Число витков обмотки равно $w = 270$ витков, сила притяжения якоря $F = 3900$ Н. Определить силу тока в катушке и установить зависимость силы тока в катушке, необходимого для создания заданной подъемной силы электромагнита от величины воздушного зазора

Решение

1. Разобьем магнитную цепь на участки, каждый из которых имеет по всей длине одинаковое сечение и одинаковый материал.

На рисунке 1 четыре участка: два участка из электротехнической стали и два воздушных зазора.

Определим длину и сечение каждого участка магнитной цепи:

$$L_1 = 160 \text{ см} = 1,6 \text{ м}$$

$$S_1 = a_1 \cdot b = 5 \cdot 6 = 30 \text{ см} = 30 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$L_2 = 60 \text{ см} = 0,6 \text{ м}$$

$$S_2 = a_2 \cdot b = 4 \cdot 6 = 24 \text{ см} = 24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$L_{01} = L_{02} = 1,5 \text{ мм} = 0,0015 \text{ м}$$

$$S_3 = S_1 = 30 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

2. Определим магнитную индукцию в сердечнике:

$$B_1 = \sqrt{F/(8 \cdot 10^5 \cdot S_1)} = \sqrt{3900/(8 \cdot 10^5 \cdot 30 \cdot 10^{-4})} = 1,27 \text{ Тл.}$$

3. Определим магнитный поток в магнитной цепи:

$$\Phi_1 = B_1 \cdot S_1 = 1,27 \cdot 30 \cdot 10^{-4} = 38,1 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

4. В неразветвленной магнитной цепи магнитный поток на всех участках одинаковый, поэтому:

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = 38,1 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Определим магнитную индукцию в якоре:

$$B_2 = \Phi_2/S_2 = 38,1 \cdot 10^{-4} / 24 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

В воздушном зазоре:

$$B_3 = B_1 = 1,27 \text{ Тл.}$$

5. Определим напряженность магнитного поля на всех участках магнитной цепи.

В воздушном зазоре напряженность равна:

$$H_3 = B_3/\mu_0 = 1,27/4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 9,873 \cdot 10^5 \text{ А/м.}$$

Для сердечника и якоря напряженность находим по кривой намагничивания электротехнической стали (приложение 1):

$$\text{— при } B_1 = 1,27 \text{ Тл} \quad H_1 = 1000 \text{ А/м}$$

$$\text{— при } B_2 = 1,58 \text{ Тл} \quad H_2 = 3500 \text{ А/м.}$$

6. Магнитодвижущую силу катушки, необходимую для создания требуемой интенсивности магнитного поля и заданной подъемной силы электромагнита определяем по второму закону Кирхгофа:

$$I \cdot w = H_1 \cdot L_1 + H_2 \cdot L_2 + H_3 \cdot L_3 \cdot 2 = 1000 \cdot 1,6 + 3500 \cdot 0,6 + 9,873 \cdot 10^5 \cdot 0,0015 \cdot 2 = 1600 + 2100 + 2961,9 = 6661,9 \text{ А.}$$

7. Для данного количества витков катушки определяем силу тока в катушке, необходимую для создания заданной подъемной силы электромагнита:

$$I = I \cdot w/w = 6661,9/270 = 24,67 \text{ А.}$$

8. Определим ток в катушке, необходимый для удержания якоря в притянутом состоянии ($L_{01} = L_{02} = 0$):

$$I \cdot w = H_1 \cdot L_1 + H_2 \cdot L_2 = 1000 \cdot 1,6 + 3500 \cdot 0,6 = 1600 + 2100 = 3700 \text{ А}$$

$$I = (I \cdot w)/w = 3700/270 = 13,7 \text{ А.}$$

Содержание отчета

1. Схема магнитной цепи.
2. Таблица с исходными данными.
3. Расчет магнитной цепи.
4. Ответы на контрольные вопросы
5. Вывод

Контрольные вопросы

1. Дайте определение однородной магнитной цепи
2. Поясните, какая магнитная цепь считается разветвленной и неразветвленной
3. Что является источником магнитного потока в магнитных цепях

Практическая работа № 9

Расчет электрических цепей переменного тока

Цель работы: научиться рассчитывать неразветвленную цепь переменного тока.

Обеспеченность занятия:

1. Комплект учебно-методической документации.

Исходные данные: вариант задания определяется в соответствии с порядковым номером фамилии обучающегося в учебном журнале (таблица 1)

Краткие теоретические сведения

Порядок расчета, установленный для цепи при последовательном соединении катушки и конденсатора, можно применить и для цепи, содержащей произвольное число катушек и конденсаторов, соединенных последовательно.

Полное сопротивление цепи переменного тока состоящей из последовательного соединения нескольких элементов определяется с помощью формулы

$$Z = \sqrt{(\Sigma R)^2 + (\Sigma X_L - \Sigma X_C)^2}.$$

Сила тока в цепи определяется с помощью закона Ома

$$I = U/Z$$

Порядок выполнения

Выписать из таблицы 8 данные согласно своему варианту. Вычертить схему, определить реактивные сопротивления, силу тока в цепи, активную, реактивную и полную мощность, коэффициент мощности. Записать мгновенное значение напряжения цепи, определить характер цепи. Построить в масштабе векторную диаграмму тока и напряжений.

Таблица 1– Исходные данные

Вариант	1, 11, 21	2, 12, 22	3, 13, 23	4, 14, 24	5, 15, 25	6, 16, 26	7, 17, 37	8, 18, 28	9, 19, 29	10, 20, 30
схема	А	Б	В	Г	Д	А	Б	В	Г	Д
U, В	127	180	210	190	140	135	150	160	100	90
R ₁ , Ом	15	4	4	18	3	12	5	4	2	12
R ₂ , Ом	20	3	6	10	4	14	8	6	3	14
R ₃ , Ом	30	3	10	40	5	15	7	10	5	16
R ₄ , Ом	10	6	4	8	7	10	6	4	4	13
L ₁ , мГн	31,85	16	9,6	254,77	95,54	159,23	82,8	9,6	12,74	63,69
L ₂ , мГн	38	38	15,9	95,54	31,847	222,93	31,85	15,9	15,92	127,38
L ₃ , мГн	19,1	19,1	12,7	318,47	19,11	79,6	57,3	12,7	31,85	50,95
L ₄ , мГн	37,6	28,5	39	100	47,5	141	60	26,5	72,8	67,1
C ₁ , мкФ	53	796	796	63,69	159,23	159,23	127,4	796	530,78	265,4
C ₂ , мкФ	106	531	319	79,62	106,15	53	318,47	319	454,9	187,3
C ₃ , мкФ	150	400	531	53,078	212,3	91	159,23	531	159,23	144,76
C ₄ , мкФ	200	170	160	210	220	159	250	170	120	299

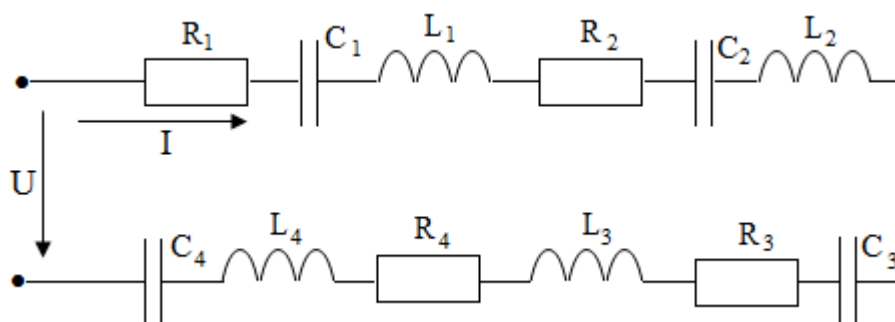


Схема А

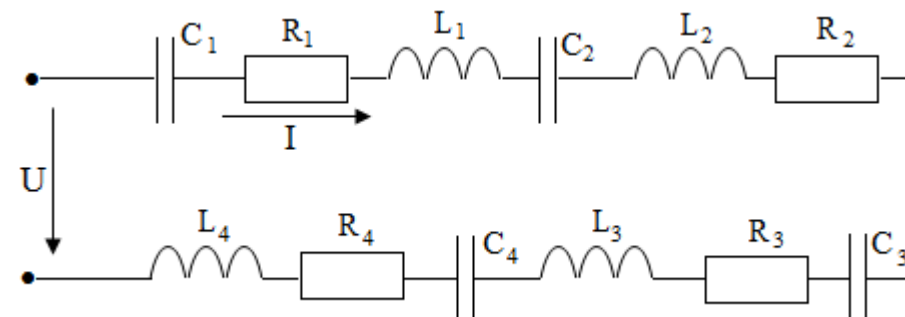


Схема Б

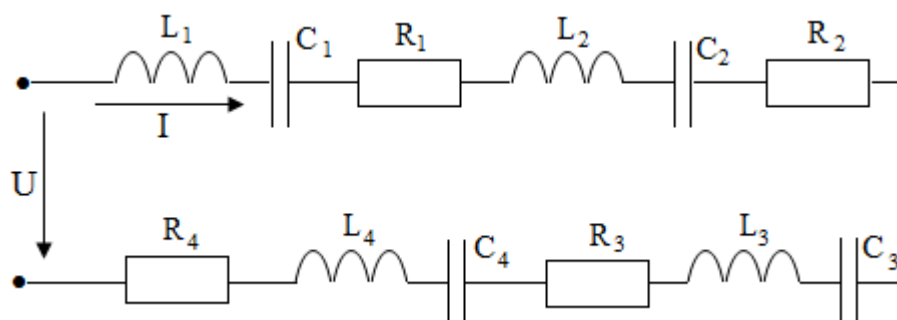


Схема В

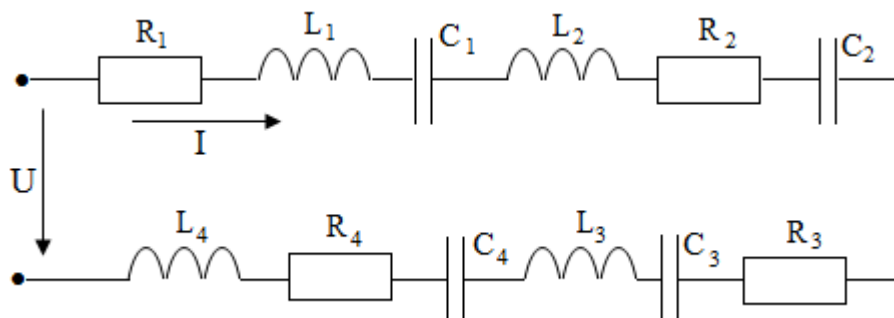


Схема Г

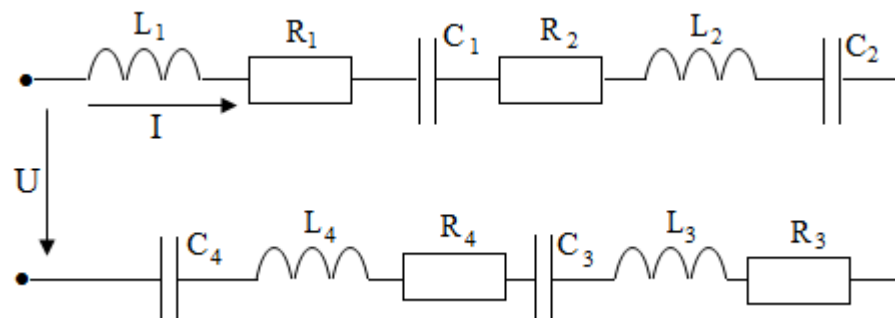


Схема Д

Рассмотрим решение практического задания на примере.

Пример. Электрическая цепь переменного тока состоит из последовательного соединения активных и реактивных элементов (рисунок 1). Параметры элементов: $R_1 = 12 \text{ Ом}$, $R_2 = 8 \text{ Ом}$, $R_3 = 7 \text{ Ом}$, $L_1 = 50,95 \text{ мГн}$, $L_2 = 44,58 \text{ мГн}$, $L_3 = 31,87 \text{ мГн}$, $C_1 = 454,69 \text{ мкФ}$, $C_2 = 353,86 \text{ мкФ}$. Напряжение источника энергии 140 В при частоте тока 50 Гц . Определить силу тока в цепи, активную, реактивную и полную мощности, коэффициент мощности, построить в масштабе векторную диаграмму тока и напряжений.

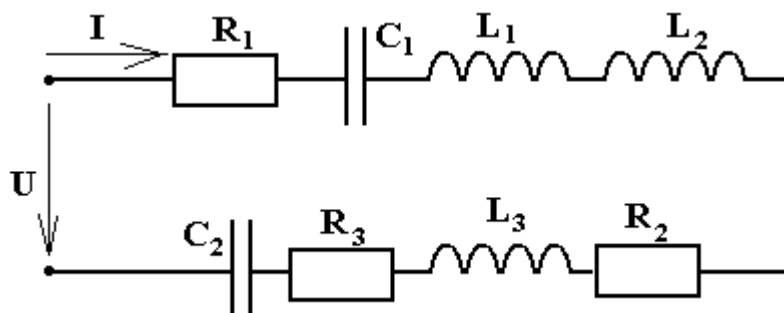


Рисунок 1 Электрическая цепь переменного тока последовательного соединения активных и реактивных элементов

Решение.

Вначале определим сопротивления на каждом участке электрической цепи:

$$X_{L1} = 2 \times \pi \times f \times L_1 = 2 \times 3,14 \times 50 \times 50,95 \times 10^{-3} = 16 \text{ Ом};$$

$$X_{L2} = 2 \times \pi \times f \times L_2 = 2 \times 3,14 \times 50 \times 44,58 \times 10^{-3} = 14 \text{ Ом};$$

$$X_{L3} = 2 \times \pi \times f \times L_3 = 2 \times 3,14 \times 50 \times 31,87 \times 10^{-3} = 10 \text{ Ом};$$

$$X_{C1} = 1/(2 \times \pi \times f \times C_1) = 1/(2 \times 3,14 \times 50 \times 454,69 \times 10^{-6}) = 7 \text{ Ом};$$

$$X_{C2} = 1/(2 \times \pi \times f \times C_2) = 1/(2 \times 3,14 \times 50 \times 353,86 \times 10^{-6}) = 9 \text{ Ом};$$

$$\Sigma R = R_1 + R_2 + R_3 = 12 + 8 + 7 = 27 \text{ Ом};$$

$$\Sigma X_L = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} = 16 + 14 + 10 = 40 \text{ Ом};$$

$$\Sigma X_C = X_{C1} + X_{C2} = 7 + 9 = 16 \text{ Ом}.$$

Определим полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{(\Sigma R)^2 + (\Sigma X_L - \Sigma X_C)^2} = \sqrt{27^2 + (40 - 16)^2} = 36,12 \text{ Ом}.$$

Определим силу тока в цепи:

$$I = U/Z = 140/36,12 = 3,875 \text{ А}.$$

Определим активную мощность цепи:

$$P = I^2 \times \Sigma R = 3,875^2 \times 27 = 405,4 \text{ Вт}.$$

Определим реактивную мощность цепи:

$$Q = I^2 \times (\Sigma X_L - \Sigma X_C) = 3,875^2 \times (40 - 16) = 360,4 \text{ вар}.$$

Определим полную мощность цепи:

$$S = I^2 \times Z = 3,875^2 \times 36,12 = 542,4 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Определим коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = P/S = 405,4/542,4 = 0,747.$$

Определим угол сдвига фаз и характер цепи через $\tan \varphi$:

$$\tan \varphi = X/Z = (X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} - X_{C1} - X_{C2})/(R_1 + R_2 + R_3) = (16 + 14 + 10 - 7 - 9)/(12 + 8 + 7) = 0,88.$$

таким образом, угол $\varphi = 41,63^\circ$, характер цепи - индуктивный (+ φ)

Мгновенное значение напряжения цепи:

$$u = U_m \times \sin(\omega t + \varphi)$$

$$U_m = \sqrt{2} \times U = \sqrt{2} \times 140 = 198 \text{ В};$$

$$u = 198 \times \sin(\omega t + 41,63^\circ).$$

Для построения векторной диаграммы необходимо определить напряжение на отдельных участках цепи:

$$U_{R1} = I \times R_1 = 3,875 \times 12 = 46,5 \text{ В};$$

$$U_{C1} = I \times X_{C1} = 3,875 \times 7 = 27 \text{ В};$$

$$U_{L1} = I \times X_{L1} = 3,875 \times 16 = 62 \text{ В};$$

$$U_{L2} = I \times X_{L2} = 3,875 \times 14 = 54,2 \text{ В};$$

$$U_{R2} = I \times R_2 = 3,875 \times 8 = 31 \text{ В};$$

$$U_{L3} = I \times X_{L3} = 3,875 \times 10 = 38,7 \text{ В};$$

$$U_{R3} = I \times R_3 = 3,875 \times 7 = 27 \text{ В};$$

$$U_{C2} = I \times X_{C2} = 3,875 \times 9 = 34,8 \text{ В}.$$

Примем масштаб 1 см = 20 В

Векторная диаграмма изображена на рис. 70

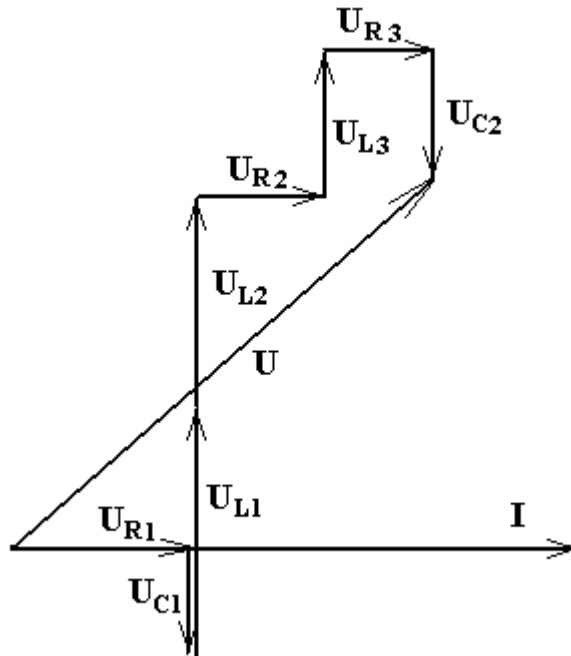


Рис. 2 Векторная диаграмма электрической цепи переменного тока последовательного соединения активных и реактивных элементов

Вектор тока на векторной диаграмме отложен произвольно, так как ток на всех элементах данной электрической цепи одинаковый. Векторы напряжений отложены в той последовательности, в которой соединены между собой элементы цепи. Каждый последующий вектор отложен от конца предыдущего. Векторы напряжений на активных сопротивлениях U_{R1} , U_{R2} , U_{R3} совпадают по фазе с током, поэтому их откладываем горизонтально. Векторы напряжения на индуктивности U_{L1} , U_{L2} и U_{L3} опережают ток на 90° и направлены вертикально вверх. Векторы напряжений на емкостях U_{C1} и U_{C2} отстают по фазе от тока на 90° и направлены вертикально вниз.

Содержание отчета

1. Схема электрической цепи переменного тока.
2. Таблица с исходными данными.
3. Расчет электрической цепи, векторная диаграмма
4. Ответы на контрольные вопросы.
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Что называется частотой переменного тока?
2. Какие элементы входят в состав цепи переменного тока?
3. Что называется активной мощностью?
4. Запишите закон Ома для цепи переменного тока?
5. Что называется коэффициентом мощности.

Практическое занятие № 10

Расчет несимметричных трехфазных цепей

Цель занятия: рассчитать электрическую цепь трехфазного переменного тока при соединении приемников электроэнергии «звездой» при несимметричной нагрузке.

Обеспеченность занятия:

1. Комплект учебно-методической документации.

Исходные данные: вариант задания определяется в соответствии с порядковым номером фамилии обучающегося в учебном журнале (таблица 1).

Краткие теоретические сведения

Трехфазные системы переменного синусоидального тока являются наиболее распространенными системами электроснабжения.

При соединении приемника энергии звездой с нейтральным проводом к нему подводятся фазные и линейные напряжения.

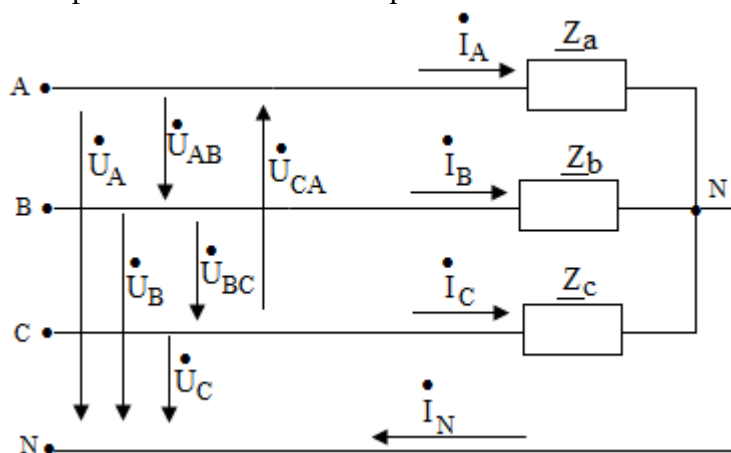


Рис. 1 Трехфазная система при соединении приемников
электроэнергии «звездой»

Фазные напряжения приемников равны соответствующим фазным напряжениям источника и в комплексной форме имеют вид:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A = U_\phi e^{j0^\circ}; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B = U_\phi e^{-j120^\circ}; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C = U_\phi e^{+j120^\circ}$$

где U_ϕ = действующее значение фазного напряжения источника, определяется: $U_\phi = \frac{U_\text{л}}{\sqrt{3}}$

Фазные токи в приемнике определяются по закону Ома:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a}; \quad \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b}; \quad \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c}$$

где Z_a, Z_b, Z_c – комплексы сопротивлений фаз приемника.

Линейные токи при соединении приемников энергии звездой равны фазным токам:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_a; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_b; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_c$$

Ток в нейтральном проводе определяется по первому закону Кирхгофа и равен сумме фазных токов:

$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$ Комплексы линейных напряжений определяем по комплексам фазных напряжений:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = U_\text{л} e^{j30^\circ}$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C = U_{\text{л}} e^{-j90^\circ}$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A = U_{\text{л}} e^{j150^\circ}$$

Порядок выполнения

Рассчитать трехфазную (рис. 1) цепь при несимметричной нагрузке символическим методом. Схему трехфазной цепи вычертить в соответствии с заданными нагрузками, имея в виду, что сопротивления, отмеченные в таблице 1 прочерками, в цепи отсутствуют.

Таблица 1– Исходные данные

Вариант	U, В	Сопротивления, Ом								
		R ₁	X _{L1}	X _{C1}	R ₂	X _{L2}	X _{C2}	R ₃	X _{L3}	X _{C3}
1, 11, 21	80	4	-	12	12	12	6	-	-	14
2, 12, 22	100	3	5	8	7	-	9	-	9	-
3, 13, 23	75	10	7	-	-	12	-	12	6	24
4, 14, 24	60	-	-	14	12	20	14	8	14	-
5, 15, 25	90	6	10	-	14	-	17	4	17	12
6, 16, 26	120	8	8	20	7	9	-	9	-	-
7, 17, 27	140	-	9	10	-	14	-	14	8	1
8, 18, 28	150	5	-	8	6	8	14	-	9	-
9, 19, 29	85	6	4	-	12	10	21	-	17	-
10, 20, 30	145	-	7	-	8	6	-	8	17	6

Рассмотрим расчет схемы на примере.

Пример. К трехфазному источнику подключен несимметричный трехфазный приемник (рис.2). Линейное напряжение равно 220В. Сопротивления резисторов и реактивных элементов равны: R₁ = 3Ом, X_{C1} = 4Ом, R₂ = 8Ом, X_{L2} = 6Ом, R₃ = 7Ом.

Определить:

1. Фазные и линейные токи для заданной схемы соединения, а также ток в нейтральном проводе.
2. Активную, реактивную и полную мощности приемника.
3. Построить в масштабе векторную диаграмму напряжений и токов.

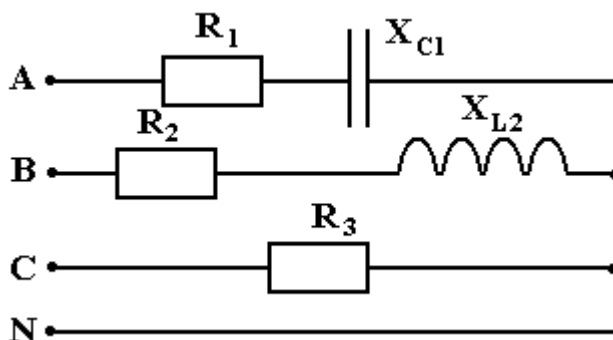


Рис. 2 Электрическая цепь при соединении приемников электроэнергии «звездой»

Решение.

1. Определим напряжение, приложенное к каждой фазе потребителя:

$$U_{\text{ф}} = U_{\text{л}} / \sqrt{3} = 220 / \sqrt{3} = 127 \text{ В.}$$

Определим комплексы напряжений в каждой фазе:

$$A = 127e^{j0^\circ}; \quad B = 127e^{-j120^\circ}; \quad C = 127e^{j120^\circ}.$$

Запишем комплексы сопротивлений фаз:

$$A = R_1 - jX_{C1} = 3 - j4 = 5e^{-j53,1^\circ};$$

$$B = R_2 + jX_{L2} = 8 + j6 = 10e^{j36,5^\circ};$$

$$C = R_3 = 7\Omega.$$

Определим комплексы токов в фазах потребителя:

$$A = U / Z_A = 127e^{j0^\circ} / 5e^{-j53,1^\circ} = 25,4e^{j53,1^\circ} = 15,25 + j20,3;$$

$$B = U / Z_B = 127e^{-j120^\circ} / 10e^{j36,5^\circ} = 12,7e^{-j156,5^\circ} = -11,65 - j5,06;$$

$$C = U / Z_C = 127e^{j120^\circ} / 7 = 18,14e^{j120^\circ} = -9,07 + j15,7.$$

Определим ток в нейтральном проводе:

$$N = A + B + C = 15,25 + j20,3 - 11,65 - j5,06 - 9,07 + j15,7 = -5,47 + j30,94 = 31,42e^{j80^\circ}.$$

2. Комплекс полной мощности в фазе А:

$$S_A = U \cdot I_A^* = 127e^{j0^\circ} \cdot 25,4e^{-j53,1^\circ} = 3225,8e^{-j53,1^\circ} = 1936,8 - j2580.$$

Полная мощность фазы А равна: $S_A = 3225,8 \text{ В} \cdot \text{А}.$

Активная мощность фазы А равна: $P_A = 1936,8 \text{ Вт}.$

Реактивная мощность фазы А равна: $Q_A = -2580 \text{ вар}.$

Комплекс полной мощности в фазе В:

$$S_B = U \cdot I_B^* = 127e^{-j120^\circ} \cdot 12,7e^{j156,5^\circ} = 1613e^{j36,5^\circ} = 1296,6 + j959,4.$$

Полная мощность фазы В равна: $S_B = 1613 \text{ В} \cdot \text{А}.$

Активная мощность фазы В равна: $P_B = 1296,6 \text{ Вт}.$

Реактивная мощность фазы В равна: $Q_B = 959,4 \text{ вар}.$

Комплекс полной мощности в фазе С:

$$S_C = U \cdot I_C^* = 127e^{j120^\circ} \cdot 18,14e^{-j120^\circ} = 2303,8e^{j0^\circ} = 2303,8.$$

Полная мощность фазы С равна: $S_C = 2303,8 \text{ В} \cdot \text{А}.$

Активная мощность фазы С равна: $P_C = 2303,8 \text{ Вт}.$

Реактивная мощность фазы С равна: $Q_C = 0.$

Активная мощность трехфазного приемника равна:

$$P = P_A + P_B + P_C = 1936,8 + 1296,6 + 2303,8 = 5537,2 \text{ Вт}.$$

Реактивная мощность трехфазного приемника равна:

$$Q = Q_A + Q_B = -2580 + 959,4 = -1620,6 \text{ вар}.$$

Полная мощность трехфазного приемника равна:

$$S = S_A + S_B + S_C = 3225,8 + 1613 + 2303,8 = 7142,6 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

3. Построим векторную диаграмму (рис. 3):

Примем масштаб:

$$1 \text{ см} = 30 \text{ В}$$

$$1 \text{ см} = 5 \text{ А}$$

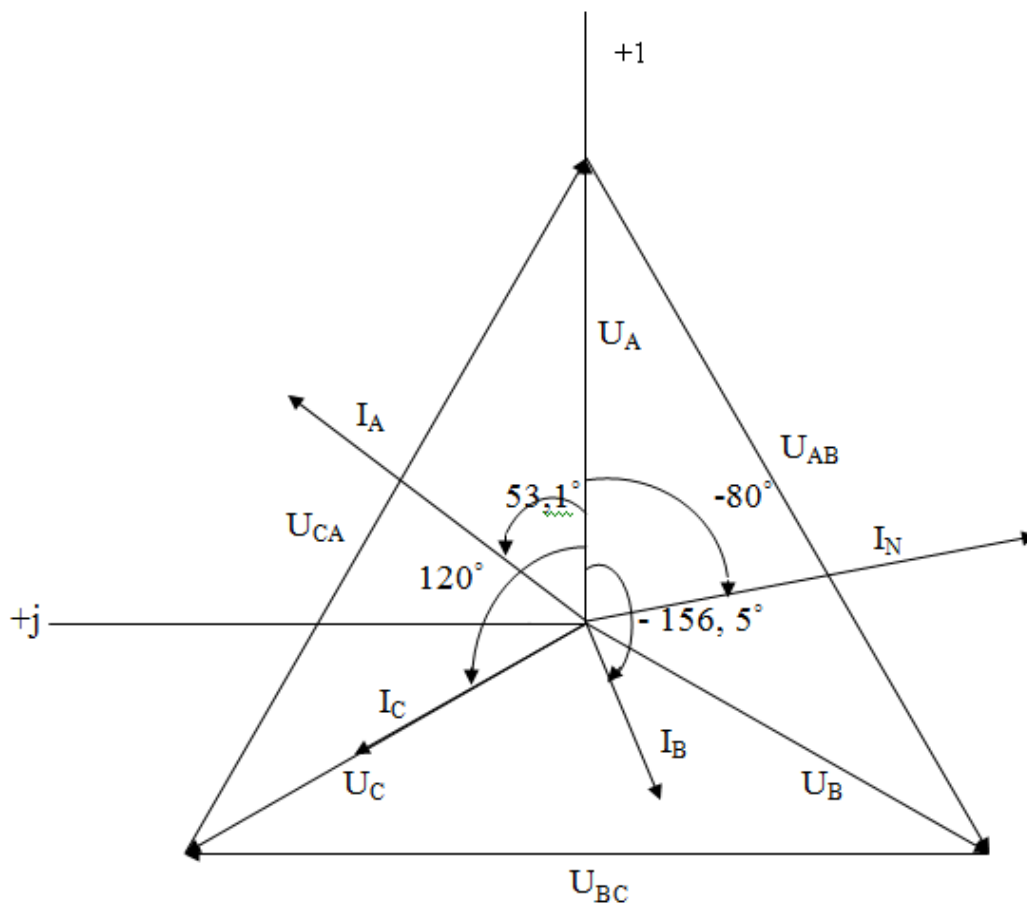


Рис. 3 Векторная диаграмма
при соединении приемников электроэнергии «звездой»

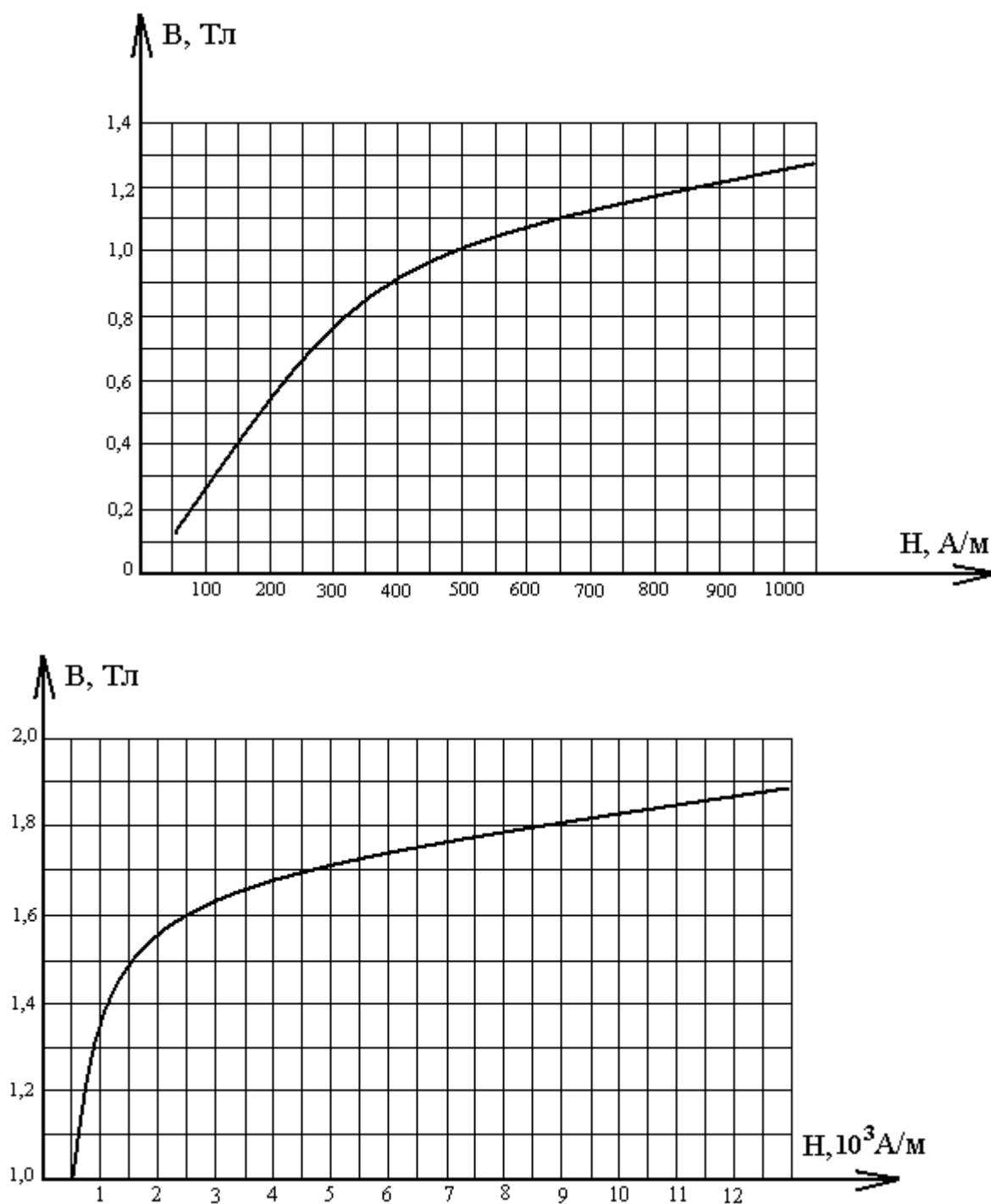
Содержание отчета

1. Схема трехфазной цепи при соединении приемников электроэнергии звездой.
2. Таблица с исходными данными.
3. Расчет электрической цепи, векторная диаграмма.
4. Ответы на контрольные вопросы
5. Вывод.

Контрольные вопросы

1. Что называется трехфазной цепью
2. Какие соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями при соединении «звездой».
3. Какова роль нулевого провода при соединении «звездой».
4. Начертите векторную диаграмму при обрыве фазы А при соединении «звезда» и при отсутствии нулевого провода.
5. Начертите векторную диаграмму для случая короткого замыкания в фазе В при соединении «звезда» и при отсутствии нулевого провода.

Кривая намагничивания электротехнической стали



Список используемых источников

1 Печатные издания

1. Мартынова И.О. Электротехника [Текст]: Учебник / И.О. Мартынова. – М.: КНОРУС, 2015. – 304 с.

Дополнительно:

1. Жирнова В.М. ОП 02 Электротехника [Текст]: Методическое пособие по проведению лабораторных и практических занятий / В.М. Жирнова. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. – 97 с.
2. Евдокимов Ф.Е. Теоретические основы электротехники [Текст]: Учебник / Ф.Е. Евдокимов. – 9-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2004. – 560 с. (Среднее профессиональное образование).
3. Немцов М.В. Электротехника: Учебное пособие. / М.В Немцов., И.И.-Светлакова.-2-е изд. – М: Феникс, 2007-571 с..

2. Электронные издания (электронные ресурсы)

1. Гукова Н.С. Электротехника и электроника: учеб. пособие. — М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2018. — 119 с.
2. Мартынова, И.О. Электротехника: учебник / И.О. Мартынова. — М. : КНОРУС, 2019. — 304 с.
3. Мартынова, И.О. Электротехника. Лабораторно-практические работы / И.О. Мартынова.— М.: КНОРУС,2019 — 136 с.
4. Аполлонский, С.М. Электротехника : учебник / С.М. Аполлонский— М.: : КНОРУС, 2018. — 292 с.
5. Аполлонский, С.М. Электротехника : Практикум / С.М. Аполлонский— М. : КНОРУС, 2018. — 318 с.
6. <http://electricalschool.info/> - Школа для электрика: устройство, монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт электрооборудования
7. <http://www.elektroceh.ru/> - Электроцех – сайт для электрика

