



кафедра электротехники, электроснабжения,
автоматики и информационных технологий

Методические указания по дисциплине

«Теоретические основы электротехники»
для выполнения лабораторно-практических занятий
студентов, обучающихся по направлениям подготовки
бакалавров 140400.62 «Электроэнергетика и
электротехника», 110800.62 «Агроинженерия»

Модуль 1. Линейные электрические цепи постоянного тока

Авторы:
Профессор Ф.Д. Косоухов,
доценты С.А. Кулагин, В.Ф. Петров

Санкт-Петербург, 2007

Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией энергетического факультета (протокол № от 2007 г.)

Для студентов студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника», 110800.62 «Агроинженерия».

Введение

Теоретические основы электротехники (ТОЭ) является базовой дисциплиной на Энергетическом факультете по специальности 110302 – электрификация и автоматизация сельского хозяйства. Серьезное освоение этой дисциплины необходимо для успешного изучения специальных дисциплин на 3, 4 и 5 курсах обучения.

Обучение по Теоретическим основам электротехники на кафедре *Электротехники и электроснабжения* проводится *модульным методом*.

Сущность модульного метода обучения заключается в том, что весь курс разделяется на ряд частей – модулей, по каждому из которых читаются студентам лекции и проводятся другие виды занятий. Так, курс «Теоретические основы электротехники», который изучается студентами Энергетического факультета в течение трех семестров, содержит 10 модулей, например, модуль 1 – Линейные электрические цепи постоянного тока; модуль 2 – Нелинейные электрические цепи постоянного тока; модуль 3 – Электрические цепи однофазного синусоидального тока и др. По каждому модулю кафедрой разработаны и изданы методические указания, в которых изложены вопросы теоретической части модуля, приведены типовые задачи и примеры их решения, индивидуальные задания, лабораторные работы, темы исследовательской работы студентов и вопросы для самоконтроля. На первом занятии по ТОЭ преподаватель дает пояснения студентам о порядке работы модульным методом, выдает каждому студенту методическое пособие по модулю и шифр, по которому студент выбирает исходные данные по каждому индивидуальному заданию. Модуль содержит 2-3 индивидуальных задания и 2-3 лабораторных работы.

По каждому модулю проводятся следующие виды учебных занятий: лекции; практические занятия, на которых студенты выполняют индивидуальные расчетно-графические работы; лабораторные занятия; письменные контрольные работы; *зачет по модулю с оценкой*.

Теоретические вопросы модуля изучаются студентами на основе прочитанных лекций и по учебной литературе.

Прежде чем приступить к выполнению индивидуального задания, студент изучает по Методическим указаниям алгоритмы решения типовых задач. Все вопросы, которые могут возникнуть у студента по методике решения задач, он может разрешить во время практического занятия с преподавателем. Таким образом, основная роль

преподавателя на занятиях модульным методом состоит в проведении индивидуальных консультаций студентов.

После выполнения студентами индивидуального задания, как правило, следует лабораторное занятие. Обязательным организационно-методическим элементом модульного метода является выполнение лабораторных работ фронтальным способом, при котором все студенты должны делать работу по данному модулю, т. е. на одну и ту же тему.

Для выполнения лабораторных работ по ТОЭ фронтальным способом преподавательским и лаборантским составом кафедры были разработаны и введены в эксплуатацию восемь универсальных лабораторных стендов. Каждый стенд имеет:

- 1) набор сопротивлений (резисторов) линейных и нелинейных;
- 2) набор катушек индуктивностей линейных и нелинейных;
- 3) набор конденсаторов переменной емкости;
- 4) источники постоянного и однофазного синусоидального регулируемого напряжения; источник синусоидального напряжения переменной частоты; источник несинусоидального напряжения; источник трехфазного тока; источник прямоугольных импульсов;
- 5) фильтры симметричных составляющих;
- 6) набор измерительных приборов: амперметры, вольтметры, ваттметры, фазометры;
- 7) электронно-лучевой осциллограф;
- 8) коммутационная аппаратура.

На лабораторных стендах, как правило, выполняется физическое моделирование электромагнитных процессов, теоретически просчитанных в индивидуальных заданиях. На одном стенде работают 2-3 студента. Выбрав измерительные приборы, студенты собирают электрическую цепь, схема которой является одинаковой для всех студентов данного стенда, а параметры цепи для каждого студента различные. Студенты данной бригады, поочередно набирая параметры своей расчетной схемы, снимают показания приборов, сравнивая, таким образом, результаты расчета с опытными данными. В тех случаях, когда опытные данные не подтверждают результатов расчета, студенту возвращается индивидуальное задание для исправления ошибок. Если результаты опыта и расчета совпали, индивидуальное задание и отчет по лабораторной работе сдаются преподавателю для проверки и оценки.

После выполнения всех индивидуальных заданий и лабораторных работ по данному модулю проводится письменная контрольная работа.

На основании оценок по индивидуальным заданиям и контрольной работе выставляется общая оценка по модулю. А в конце семестра при выполнении студентом всех модулей выставляется общая оценка за семестр, дающая право студенту на получение зачета по курсу. Экзамен по курсу проводится в экзаменационную сессию традиционным способом по экзаменационным билетам. В билете имеется два теоретических вопроса и задача.

Основным достоинством модульного метода обучения студентов является максимальное обеспечение самостоятельной работы студента по изучению курса. Он вынужден в течение всего семестра выполнять самостоятельно индивидуальные задания, т.к. двух одинаковых вариантов заданий на всем потоке студентов нет; он вынужден самостоятельно выполнять лабораторные работы, т.к. ксерокопия отчета не годится по той же причине, и, наконец, он самостоятельно выполняет контрольную работу, показывая наличие или отсутствие знаний по теоретической части данного модуля и умение решать конкретные задачи по этому модулю.

Модульный метод стимулирует четкую организацию всех видов учебных занятий: для проведения практических занятий по выполнению индивидуальных заданий должны быть начитаны лекции по данному модулю; для выполнения лабораторных работ должны быть рассчитаны и оформлены индивидуальные задания, и завершающим этапом по модулю является контрольная работа, которая будет иметь положительный результат только в том случае, если успешно выполнены все предыдущие этапы обучения модульным методом. Уже после первого семестра второго курса, на котором начинается изучение ТОЭ, становится очевидным для кафедры и деканата, какие студенты могут и хотят учиться, а какие студенты не имеют достаточной физико-математической подготовки и не могут освоить курс ТОЭ или не хотят осваивать основы своей специальности.

Далее приведены «Правила оформления индивидуальных заданий по ТОЭ» и «Правила проведения лабораторных занятий и выполнения отчетов по ТОЭ», которые утверждены на заседании кафедры.

Правила оформления индивидуальных заданий по Теоретическим основам электротехники

1. Исходные данные для расчета электрической цепи должны соответствовать шифру студента. В случае нарушения этого пункта правил задание возвращается студенту без проверки его содержания для полной переделки.

2. Устанавливается следующий порядок оформления индивидуального задания:
 - 2.1. вначале указывается название рассчитываемой величины;
 - 2.2. записывается аналитическое выражение (формула);
 - 2.3. подставляются в формулу числовые значения;
 - 2.4. производится вычисление искомой величины; при этом в задании должны быть записаны все промежуточные преобразования и расчеты;
 - 2.5. записывается окончательный результат и единица измерения.
3. В тех случаях, когда расчет связан с эквивалентными преобразованиями схемы электрической цепи, в задании должны быть изображены все промежуточные эквивалентные схемы.
4. При построении графиков изменения физических величин, на осях должны быть нанесены масштабная сетка для каждой величины, буквенные обозначения всех величин и их единицы измерения, а кривые, если их на графике две и более, должны иметь соответствующие обозначения.
5. Векторные диаграммы токов и напряжений строятся в определенных масштабах, которые указываются рядом с диаграммой.
6. Схемы, графики, диаграммы строятся с помощью чертежных инструментов.
7. Индивидуальные задания, выполненные с ошибками или с нарушением данных правил, возвращаются студенту для исправления ошибок или для полной переделки.
8. Индивидуальные задания выполняются на отдельных сброшюрованных листах формата А4 или тетрадных листах.
9. После проверки задания преподаватель проставляет оценку, если работа не возвращается студенту для исправления, подпись и дату.
10. Зачтённые индивидуальные задания преподаватели хранят на кафедре до срока сдачи студентами экзамена по данной дисциплине.

Правила проведения лабораторных занятий и выполнения отчетов по Теоретическим основам электротехники

1. Лабораторные работы по ТОЭ выполняются на универсальных лабораторных стендах фронтальным способом в 640 лаборатории под руководством двух преподавателей кафедры ЭТЭС.

2. К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, выполнившие предварительно индивидуальное задание по теме этой

для амперметра $C_A = \frac{I_{ном}}{\alpha_{max}}$ А/дел;

для вольтметра $C_U = \frac{U_{ном}}{\alpha_{max}}$ В/дел;

для ваттметра $C_W = \frac{I_{ном}U_{ном}}{\alpha_{max}}$ Вт/дел.

По показанию прибора α определяется измеряемая величина по формуле:

$$I = C_A \cdot \alpha ; \quad U = C_U \cdot \alpha ; \quad P = C_W \cdot \alpha .$$

Из таблицы измерений полученные результаты переносятся в отчёт.

5. Собранную схему лабораторной установки студенты представляют для проверки преподавателю. Преподаватель после проверки схемы включает установку под напряжение, и, убедившись, что все приборы работают нормально, передаёт стенд под ответственность бригады студентов. С этого момента и до окончания работы студенты отвечают за сохранность всех приборов лабораторного стенда.

6. После выполнения лабораторной работы всеми членами бригады отчеты по работе вместе с таблицами измерений представляются на подпись преподавателю.

7. Разборка схемы электроустановки разрешается преподавателем после подписания всех отчетов по лабораторной работе.

8. После разборки схемы и приведения рабочего места в порядок бригадир сдает лабораторный стенд преподавателю.

9. Содержание отчета по каждой лабораторной работе приведено в методических указаниях.

Полностью оформленный отчет по лабораторной работе сдается вместе с индивидуальным заданием на проверку преподавателю.

На следующем занятии преподаватель сообщает общую оценку по индивидуальному заданию и отчету по работе или возвращает задание и отчет для доработки.

Вопросы теоретической части модуля

1. Основные физические понятия: электрический ток, виды тока, поверхностная плотность тока, принцип непрерывности тока. Электрический потенциал, разность потенциалов, напряжение. Электрическая энергия, мощность.

2. Электрическая цепь постоянного тока; физические элементы цепи – линейные и нелинейные (источники ЭДС и тока, приемники электрической энергии), схема и геометрические элементы цепи (узел, ветвь, контур). Особенности энергетических процессов, происходящих в цепях постоянного тока. Параметры цепей (омическое сопротивление, проводимость). Закон Ома для участка цепи.

3. Первый закон Кирхгофа, как следствие принципа непрерывности тока.

4. Определение потенциалов точек цепи, потенциальная диаграмма. Второй закон Кирхгофа.

5. Эквивалентные преобразования пассивных электрических цепей: последовательное, параллельное, смешанное соединение приемников. Пассивный двухполюсник. Входное сопротивление.

6. Эквивалентное преобразование соединения приемников треугольником в соединение звездой и обратно.

7. Расчет разветвленных электрических цепей с одним источником энергии методом эквивалентных пассивных схем. Баланс мощности.

8. Расчет разветвленных электрических цепей с несколькими источниками энергии методами:

- уравнений Кирхгофа,
- контурных токов,
- узловых потенциалов,
- наложения.

9. Эквивалентные преобразования активных электрических цепей. Теорема об активном двухполюснике.

10. Расчет цепей методом эквивалентного генератора,

11. Теорема компенсации. Принцип взаимности.

1. Типовые задачи и примеры решения

1.1. Эквивалентные преобразования пассивных цепей

Задача 1.

Дано: Резисторы соединены по схеме рис. 1.1. $R_1 = 10 \text{ Ом}$;
 $R_2 = R_6 = 25 \text{ Ом}$; $R_3 = 60 \text{ Ом}$; $R_4 = R_5 = 15 \text{ Ом}$.

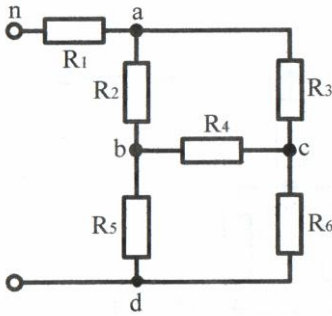


Рис. 1.1

Определить: входное сопротивление цепи относительно зажимов n-d ($R_{ex(nd)}$).

В схеме рис. 1.1 нет последовательно или параллельно соединенных резисторов. Резисторы R_2 , R_3 , R_4 , а также R_4 , R_5 , R_6 соединены треугольником. Преобразуем любой из этих треугольников, например, R_4 , R_5 , R_6 в эквивалентную звезду.

После преобразования схема (рис. 1.2).

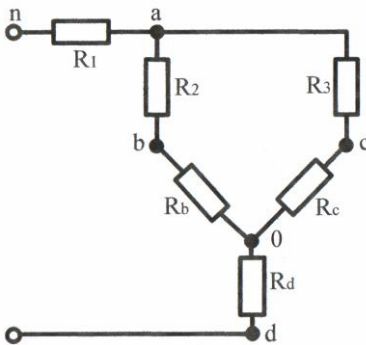


Рис. 1.2

$$R_b = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{15 \cdot 15}{15 + 15 + 25} = 4,09 \text{ Ом};$$

$$R_c = \frac{R_4 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{15 \cdot 25}{55} = 6,82 \text{ Ом};$$

$$R_d = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{15 \cdot 25}{55} = 6,82 \text{ Ом}.$$

Резисторы $R_2 - R_b$ и $R_3 - R_c$ соединены последовательно, следовательно:

$$R_{2b} = R_2 + R_b = 25 + 4,09 = 29,09 \text{ Ом};$$

$$R_{3c} = R_3 + R_c = 60 + 6,82 = 66,82 \text{ Ом}.$$

После сложения сопротивлений получим схему (рис. 1.3).

Сопротивления R_{2b} и R_{3c} соединены параллельно. Заменим их одним эквивалентным сопротивлением:

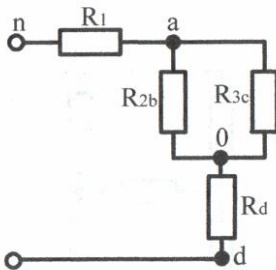


Рис. 1.3

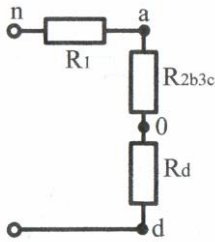


Рис. 1.4

$$R_{2b3c} = \frac{R_{2b} \cdot R_{3c}}{R_{2b} + R_{3c}} = \frac{29,09 \cdot 66,82}{29,09 + 66,82} = 20,27 \text{ Ом.}$$

Получим схему рис. 1.4. В этой схеме сопротивления R_1 , R_{2b3c} , R_d соединены последовательно. Тогда входное сопротивление будет равно

$$R_{ex(nd)} = R_1 + R_{2b3c} + R_d = 10 + 20,27 + 6,82 = 37,09 \text{ Ом.}$$

1.2. Расчет электрических цепей с одним источником ЭДС

Задача 2.

Дано: Электрическая цепь рис. 1.5; $E = 80 \text{ В}$; $R_1 = 10 \text{ Ом}$; $R_2 = R_6 = 25 \text{ Ом}$; $R_3 = 60 \text{ Ом}$; $R_4 = R_5 = 15 \text{ Ом}$.

Определить: токи во всех ветвях, напряжения между узлами. Проверить наличие баланса мощности.

Решение произведем методом эквивалентных преобразований. Схемы преобразований на различных этапах представлены на рис. 1.6 -1.9.

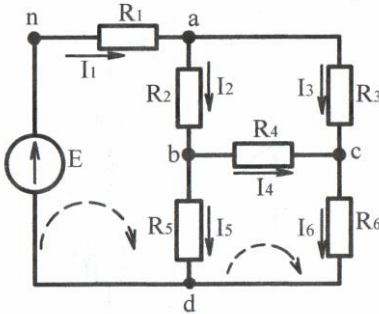


Рис. 1.5

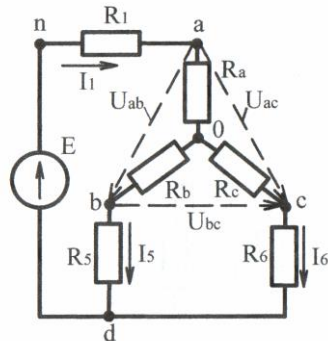


Рис. 1.6

I этап – преобразование треугольника R_2 , R_3 , R_4 в эквивалентную звезду:

$$R_a = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3 + R_4} = \frac{25 \cdot 60}{25 + 60 + 15} = 15 \text{ Ом;}$$

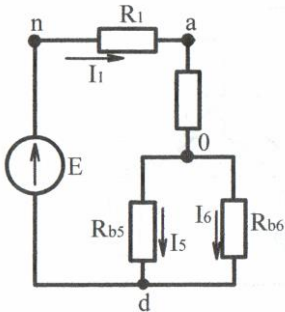


Рис. 1.7

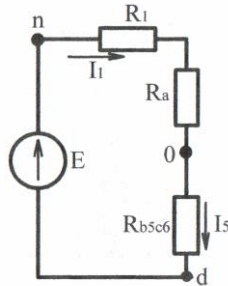


Рис. 1.8

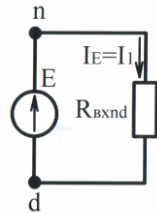


Рис. 1.9

$$R_b = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_2 + R_3 + R_4} = \frac{25 \cdot 15}{100} = 3,75 \text{ Ом};$$

$$R_c = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_2 + R_3 + R_4} = \frac{60 \cdot 15}{100} = 9 \text{ Ом}.$$

2 этап – суммируем сопротивления R_b с R_5 и R_c с R_6 (рис. 1.6):

$$R_{b5} = R_b + R_5 = 3,75 + 15 = 18,75 \text{ Ом};$$

$$R_{c6} = R_c + R_6 = 9 + 25 = 34 \text{ Ом}.$$

3 этап – заменяем сопротивления R_{b5} и R_{c6} (рис. 1.7) – эквивалентным сопротивлением:

$$R_{b5c6} = \frac{R_{b5} \cdot R_{c6}}{R_{b5} + R_{c6}} = \frac{18,75 \cdot 34}{18,75 + 34} \approx 12,09 \text{ Ом}.$$

4 этап – находим входное сопротивление относительно зажимов n-d (рис. 1.8):

$$R_{\text{вх}(nd)} = R_1 + R_a + R_{b5c6} = 10 + 15 + 12,09 = 37,09 \text{ Ом}.$$

Определив $R_{\text{вх}(nd)}$, находим ток $I_1 = I_E$ (рис. 1.9):

$$I_1 = \frac{E}{R_{\text{вх}(nd)}} = \frac{80}{37,09} = 2,157 \text{ А}.$$

Определим напряжение между точками o-d (U_{od}) для схемы (рис. 1.8):

$$U_{od} = I_1 \cdot R_{b5c6} = 2,157 \cdot 12,09 = 26,08 \text{ В}.$$

Зная напряжение U_{od} определим токи I_5 , I_6 (рис. 1.7):

$$I_5 = \frac{U_{od}}{R_{b5}} = \frac{26,08}{18,75} = 1,391 \text{ А};$$

$$I_6 = \frac{U_{od}}{R_{c6}} = \frac{26,08}{34} = 0,767 \text{ А.}$$

Проверка по первому закону Кирхгофа:

$$I_5 + I_6 = I_1; 1,391 + 0,767 = 2,158 \text{ А.}$$

Для определения токов I_2 , I_3 , I_4 необходимо предварительно найти напряжения U_{ab} , U_{ac} , U_{bc} ; эти напряжения указаны на схеме рис. 1.6. Их направления задают произвольно (указаны пунктирными линиями).

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа для контура $aoba$:

$$I_1 R_a + I_5 R_b - U_{ab} = 0;$$

$$U_{ab} = I_1 R_a + I_5 R_b = 2,157 \cdot 15 + 1,391 \cdot 3,75 = 37,57 \text{ В.}$$

Для контура $aoca$:

$$I_1 R_a + I_6 R_c - U_{ac} = 0;$$

$$U_{ac} = I_1 R_a + I_6 R_c = 2,157 \cdot 15 + 0,767 \cdot 9 = 39,258 \text{ В.}$$

Для контура $bcob$:

$$I_5 R_b + U_{bc} - I_6 R_c = 0;$$

$$U_{bc} = I_6 R_c - I_5 R_b = 0,767 \cdot 9 - 1,391 \cdot 3,75 = 1,687 \text{ В.}$$

Определим токи I_2 , I_3 , I_4 для схемы (рис. 1.5):

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2} = \frac{37,57}{25} = 1,503 \text{ А;}$$

$$I_3 = \frac{U_{ac}}{R_3} = \frac{39,258}{60} = 0,654 \text{ А;}$$

$$I_4 = \frac{U_{bc}}{R_4} = \frac{1,687}{15} = 0,112 \text{ А.}$$

Проверка по первому закону Кирхгофа:

узел a : $I_1 = I_2 + I_3; 2,157 = 1,503 + 0,654 = 2,157;$

узел b : $I_2 = I_4 + I_5; 1,503 = 1,391 + 0,112 = 1,503;$

узел d : $I_1 = I_5 + I_6; 2,157 \cong 1,391 + 0,767 = 2,158.$

Проверка по второму закону Кирхгофа:

Для контура $nabdn$ (направление обхода контура по часовой стрелке):

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_5 R_5 = E;$$

$$2,157 \cdot 10 + 1,503 \cdot 25 + 1,391 \cdot 15 = 80,01; \quad 80,01 \cong 80 \text{ В.}$$

Для контура $bcd b$ (направление обхода контура по часовой стрелке):

$$I_4 R_4 + I_6 R_6 - I_5 R_5 = 0;$$

$$0,112 \cdot 15 + 0,767 \cdot 25 + 1,391 \cdot 15 = 0,01; \quad 0,01 \cong 0.$$

Баланс мощности:

$$EI_1 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6;$$

$$172,56 \cong 172,582 \text{ Вт.}$$

1.3. Расчет электрических цепей с несколькими источниками ЭДС

Задача 3.

Дано: Электрическая цепь (рис. 1.10 В); $E_1 = 100 \text{ В}$; $E_2 = 40 \text{ В}$;
 $R_1 = R_4 = 20 \text{ Ом}$; $R_2 = 50 \text{ Ом}$; $R_3 = 30 \text{ Ом}$; $R_5 = 10 \text{ Ом}$; $R_6 = 25 \text{ Ом}$.

Требуется:

1. Составить систему уравнений для расчета цепи методом двух законов Кирхгофа.
2. Определить токи во всех ветвях цепи методами контурных токов и узловых потенциалов.
3. Построить потенциальную диаграмму для контура с двумя источниками ЭДС.
4. Проверить баланс мощности.

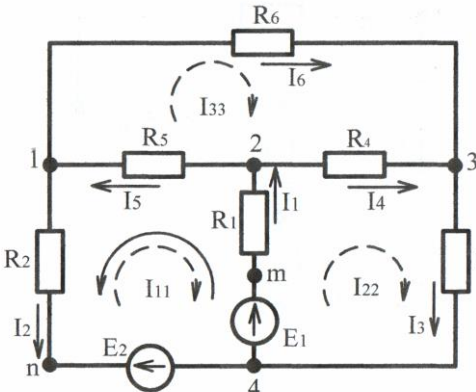


Рис. 1.10

1.3.1. Метод двух законов Кирхгофа

Так как в цепи 4 узла, то по первому закону Кирхгофа надо составить $4 - 1 = 3$ уравнения.

Число уравнений, составляемых по второму закону Кирхгофа, равно числу ветвей (т.е. неизвестных) минус число уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа: $6 - 3 = 3$ уравнения.

При составлении уравнений по первому закону Кирхгофа, предварительно задаемся направлениями токов в ветвях (произвольно); эти направления указаны стрелками на рис. 1.10. Причем, токи,

входящие в узел, будем записывать со знаком «+» и выходящие из узла – со знаком «-».

$$\text{Узел 1:} \quad -I_2 + I_5 - I_6 = 0; \quad (1)$$

$$\text{Узел 2:} \quad I_1 - I_4 - I_5 = 0; \quad (2)$$

$$\text{Узел 3:} \quad -I_3 + I_4 + I_6 = 0. \quad (3)$$

Перед составлением уравнений по второму закону Кирхгофа необходимо предварительно задаться направлением обхода по контурам. На схеме рис. 1.10 направления обхода показаны пунктирными линиями.

$$\text{Контур 1241:} \quad -I_1R_1 - I_2R_2 - I_5R_5 = -E_1 + E_2; \quad (4)$$

$$\text{Контур 2342:} \quad I_1R_1 + I_4R_4 + I_3R_3 = E_1; \quad (5)$$

$$\text{Контур 1321:} \quad I_5R_5 + I_6R_6 - I_4R_4 = 0. \quad (6)$$

Если направление тока в ветви совпадает с направлением обхода контура, то напряжение (IR) берется со знаком «+», если нет, то «-». Аналогично определяется знак ЭДС (E).

1.3.2. Расчет цепи методом контурных токов

При расчете данным методом предварительно задаются направлением контурных токов (произвольно). Целесообразно задавать направление контурных токов в одну сторону.

Для цепи с тремя независимыми контурами уравнения контурных токов в общем виде имеют вид:

$$I_{11}R_{11} + I_{22}R_{12} + I_{33}R_{13} = E_{11}; \quad (7)$$

$$I_{11}R_{21} + I_{22}R_{22} + I_{33}R_{23} = E_{22}; \quad (8)$$

$$I_{11}R_{31} + I_{22}R_{32} + I_{33}R_{33} = E_{33}. \quad (9)$$

Применительно к цепи рис. 1.10 – собственные сопротивления контуров:

$$R_{11} = R_1 + R_2 + R_5 = 20 + 50 + 10 = 80 \text{ Ом};$$

$$R_{22} = R_1 + R_3 + R_4 = 20 + 20 + 30 = 70 \text{ Ом};$$

$$R_{33} = R_4 + R_5 + R_6 = 20 + 10 + 25 = 55 \text{ Ом};$$

взаимные сопротивления контуров:

$$R_{12} = R_{21} = -R_1 = -20 \text{ Ом};$$

$$R_{13} = R_{31} = -R_5 = -10 \text{ Ом};$$

$$R_{23} = R_{32} = -R_4 = -20 \text{ Ом};$$

контурные ЭДС:

$$E_{11} = -E_1 + E_2 = -100 + 40 = -60 \text{ В};$$

$$E_{22} = E_1 = 100 \text{ В}; \quad E_{33} = 0.$$

После подстановки числовых значений в уравнения (7) - (9), получим:

$$80I_{11} - 20I_{22} - 10I_{33} = -60; \quad (10)$$

$$-20I_{11} + 70I_{22} - 20I_{33} = 100; \quad (11)$$

$$-10I_{11} - 20I_{22} + 50I_{33} = 0. \quad (12)$$

С целью упрощения вычислений правую и левую части уравнений (10) и (11) делим на 10, а уравнение (12) на 5. Тогда получим:

$$8I_{11} - 2I_{22} - I_{33} = -6; \quad (13)$$

$$-2I_{11} + 7I_{22} - 2I_{33} = 10; \quad (14)$$

$$-2I_{11} - 4I_{22} + 11I_{33} = 0. \quad (15)$$

Главный определитель системы уравнений (13), (14), (15):

$$\Delta = \begin{vmatrix} 8 & -2 & -1 \\ -2 & 7 & -2 \\ -2 & -4 & 11 \end{vmatrix} = 8 \cdot 7 \cdot 11 - 2 \cdot 2 \cdot 2 - 1 \cdot 2 \cdot 4 - 2 \cdot 7 \cdot 1 - 4 \cdot 2 \cdot 8 - 11 \cdot 2 \cdot 2 =$$

$$= 478 \text{ Ом}^3.$$

Дополнительные определители:

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} 6 & -2 & -1 \\ 10 & 7 & -2 \\ 0 & -4 & 11 \end{vmatrix} = -6 \cdot 7 \cdot 11 + 10 \cdot 4 \cdot 1 + 4 \cdot 2 \cdot 6 + 11 \cdot 10 \cdot 2 =$$

$$= -154 \text{ Ом}^2 \cdot \text{В};$$

$$\Delta_{22} = \begin{vmatrix} 8 & -6 & -1 \\ -2 & 10 & -2 \\ -2 & 0 & 11 \end{vmatrix} = 704 \text{ Ом}^2 \cdot \text{В};$$

$$\Delta_{33} = \begin{vmatrix} 8 & -2 & -6 \\ -2 & 7 & 10 \\ -2 & -4 & 0 \end{vmatrix} = 228 \text{ Ом}^2 \cdot \text{В}.$$

Определяем контурные токи:

$$I_{11} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta} = \frac{-154}{478} = -0,322 \text{ А};$$

$$I_{22} = \frac{\Delta_{22}}{\Delta} = \frac{704}{478} = 1,472 \text{ А};$$

$$I_{33} = \frac{\Delta_{33}}{\Delta} = \frac{228}{478} = 0,477 \text{ А}.$$

Знак «-» у контурного тока I_{11} указывает на то, что в действительности он направлен в противоположную сторону, т. е. против часовой стрелки (на схеме рис. 1.10 указано сплошной линией).

Токи в ветвях определяем алгебраическим суммированием соответствующих контурных токов. При этом, если контурные токи направлены в разные стороны, то от большего отнимаем меньший, а направление тока в ветви будет в сторону большего контурного тока:

$$I_1 = I_{11} + I_{22} = 0,322 + 1,472 = 1,794 \text{ А};$$

$$I_2 = I_{11} = 0,322 \text{ А}; \quad I_3 = I_{22} = 1,472 \text{ А};$$

$$I_4 = I_{22} - I_{33} = 1,472 - 0,477 = 0,995 \text{ А};$$

$$I_5 = I_{11} + I_{33} = 0,322 + 0,477 = 0,799 \text{ А};$$

$$I_6 = I_{33} = 0,477 \text{ А}.$$

Проверка выполняется по второму закону Кирхгофа:
контур $4m21n4$:

$$I_1 R_1 + I_5 R_5 + I_2 R_2 = E_1 - E_2;$$

$$1,794 \cdot 20 + 0,799 \cdot 10 + 0,322 \cdot 50 = 59,97 \approx 60;$$

контур $4m234$:

$$I_1 R_1 + I_4 R_4 + I_3 R_3 = E_1;$$

$$1,794 \cdot 20 + 0,995 \cdot 20 + 1,472 \cdot 30 = 99,94 \approx 100;$$

контур 1231 :

$$I_5 R_5 + I_6 R_6 - I_4 R_4 = 0;$$

$$0,799 \cdot 10 + 0,477 \cdot 25 - 0,995 \cdot 20 = 0,015 \approx 0.$$

При расчете методом контурных токов проверку результатов решения по первому закону Кирхгофа использовать нельзя.

1.3.3. Построение потенциальной диаграммы

Для контура $4n132m4$ (рис. 1.11). Принимаем потенциал узла 4 равным нулю, т. е. $\varphi_4 = 0$ и определяем потенциалы остальных узлов контура. Направление обхода контура принимаем по часовой стрелке.

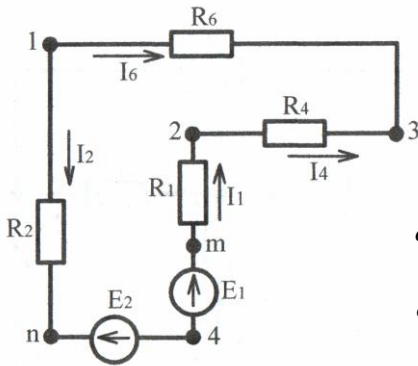


Рис. 1.11

$$\begin{aligned} \varphi_4 &= 0; \\ \varphi_n &= E_2 = 40 \text{ В}; \\ \varphi_1 &= E_2 + I_2 R_2 = 40 + 16,1 = 56,1 \text{ В}; \\ \varphi_3 &= \varphi_1 - I_6 R_6 = 56,1 - 0,477 \cdot 25 = \\ &= 44,175 \text{ В}; \\ \varphi_2 &= \varphi_3 + I_4 R_4 = 44,175 + 0,995 \cdot 20 = \\ &= 64,075 \text{ В}; \\ \varphi_m &= \varphi_2 + I_1 R_1 = 64,075 + 1,794 \cdot 20 = \\ &= 99,955 \text{ В}; \\ \varphi_4 &= \varphi_m - E_1 = 99,955 - 100 \approx 0. \end{aligned}$$

Потенциальная диаграмма строится в координатах φ, R (рис. 1.12).

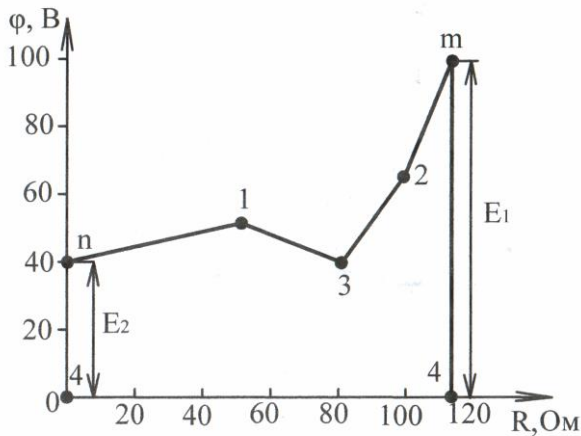


Рис. 1.12

1.3.4. Баланс мощности

Уравнение баланса мощности:

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6.$$

Определяем мощность источников электрической энергии:

$$P_u = E_1 I_1 - E_2 I_2 = 100 \cdot 1,794 - 40 \cdot 0,322 = 179,4 - 12,88 = 166,52 \text{ Вт.}$$

Здесь мощность второго источника $E_2 I_2$ взята со знаком «-», так как ток I_2 и ЭДС E_2 направлены встречно (этот источник работает в режиме приемника).

Мощность всех приемников электрической энергии:

$$P_n = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 = 1,794^2 \cdot 20 + 0,322^2 \cdot 50 + 1,472^2 \cdot 30 + 0,995^2 \cdot 20 + 0,799^2 \cdot 10 + 0,477^2 \cdot 25 = 64,37 + 5,18 + 65 + 19,8 + 6,38 + 5,69 = 166,42 \text{ Вт.}$$

Таким образом, баланс мощности имеет место, так как

$$P_u = 166,52 \approx P_n = 166,42 \text{ Вт.}$$

1.3.5. Расчет цепи методом узловых потенциалов

Принимаем потенциал узла 4 (рис. 1.10) равным нулю. Для определения потенциала узлов 1, 2, 3 составим систему из трех уравнений, которая в общем виде имеет вид:

$$\varphi_1 G_{11} - \varphi_2 G_{12} - \varphi_3 G_{13} = \sum_1 EG; \quad (16)$$

$$-\varphi_1 G_{21} + \varphi_2 G_{22} - \varphi_3 G_{23} = \sum_2 EG; \quad (17)$$

$$-\varphi_1 G_{31} - \varphi_2 G_{32} + \varphi_3 G_{33} = \sum_3 EG; \quad (18)$$

где узловые проводимости:

$$G_{11} = G_2 + G_5 + G_6 = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} = \frac{1}{50} + \frac{1}{10} + \frac{1}{25} = 0,16 \text{ См;}$$

$$G_{22} = G_1 + G_5 + G_4 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{20} + \frac{1}{10} + \frac{1}{20} = 0,2 \text{ См;}$$

$$G_{33} = G_3 + G_4 + G_6 = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6} = \frac{1}{30} + \frac{1}{20} + \frac{1}{25} = 0,123 \text{ См;}$$

междуузловые проводимости:

$$G_{12} = G_{21} = G_5 = \frac{1}{R_5} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ См;}$$

$$G_{13} = G_{31} = G_6 = \frac{1}{R_6} = \frac{1}{25} = 0,04 \text{ См;}$$

$$G_{23} = G_{32} = G_4 = \frac{1}{R_4} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ См;}$$

узловые токи:

$$\sum_1 EG = E_2 G_2 = E_2 \frac{1}{R_2} = 40 \cdot 0,02 = 0,8 \text{ A};$$

$$\sum_2 EG = E_1 G_1 = E_1 \frac{1}{R_1} = 100 \cdot 0,05 = 5 \text{ A};$$

$$\sum_3 EG = 0 \text{ A};$$

$$0,16\varphi_1 - 0,1\varphi_2 - 0,04\varphi_3 = 0,8; \quad (19)$$

$$-0,1\varphi_1 + 0,2\varphi_2 - 0,05\varphi_3 = 5; \quad (20)$$

$$-0,046\varphi_1 - 0,05\varphi_2 + 0,123\varphi_3 = 0; \quad (21)$$

С целью упрощения вычислений уравнение (19) умножим на 50, уравнение (20) на 20, а уравнение (21) на 300. В результате получим:

$$8\varphi_1 - 5\varphi_2 - 2\varphi_3 = 40; \quad (22)$$

$$-2\varphi_1 + 4\varphi_2 - 1\varphi_3 = 100; \quad (23)$$

$$-12\varphi_1 - 15\varphi_2 + 37\varphi_3 = 0. \quad (24)$$

Решая систему уравнений (22), (23) и (24), получим:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 8 & -5 & -2 \\ -2 & 4 & -1 \\ -12 & -15 & 37 \end{vmatrix} = 478 \text{ См}^3; \quad \Delta_{11} = \begin{vmatrix} 40 & -5 & -2 \\ 100 & 4 & -1 \\ 0 & -15 & 37 \end{vmatrix} = 26820 \text{ См}^2 \cdot \text{A};$$

$$\Delta_{22} = \begin{vmatrix} 8 & 40 & -2 \\ -2 & 100 & -1 \\ -12 & 0 & 37 \end{vmatrix} = 30640 \text{ См}^2 \cdot \text{A}; \quad \Delta_{33} = \begin{vmatrix} 8 & -5 & 40 \\ -2 & 4 & 100 \\ -12 & -15 & 0 \end{vmatrix} = 21120 \text{ См}^2 \cdot \text{A}.$$

Потенциалы узлов:

$$\varphi_1 = \frac{\Delta_{11}}{\Delta} = 56,1 \text{ В}; \quad \varphi_2 = \frac{\Delta_{22}}{\Delta} = 64,1 \text{ В}; \quad \varphi_3 = \frac{\Delta_{33}}{\Delta} = 44,18 \text{ В}.$$

Определив потенциалы узлов, по закону Ома находим токи в ветвях, предварительно задав их направления:

$$I_1 = \frac{\varphi_4 - \varphi_2 + E_1}{R_1} = \frac{0 - 64,1 + 100}{20} = 1,795 \text{ A};$$

$$I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_4 - E_2}{R_2} = \frac{56,1 - 0 - 40}{50} = 0,322 \text{ A};$$

$$I_3 = \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{R_3} = \frac{44,18 - 0}{30} = 1,473 \text{ А};$$

$$I_4 = \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{R_4} = \frac{64,1 - 44,18}{20} = 0,996 \text{ А};$$

$$I_5 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{R_5} = \frac{64,1 - 56,1}{10} = 0,8 \text{ А};$$

$$I_6 = \frac{\varphi_1 - \varphi_3}{R_6} = \frac{56,1 - 44,18}{25} = 0,477 \text{ А}.$$

Сравнивая полученные токи с токами, определенными методом контурных токов, видим, что их значения совпадают.

1.3.6. Метод эквивалентного генератора

Задача 4.

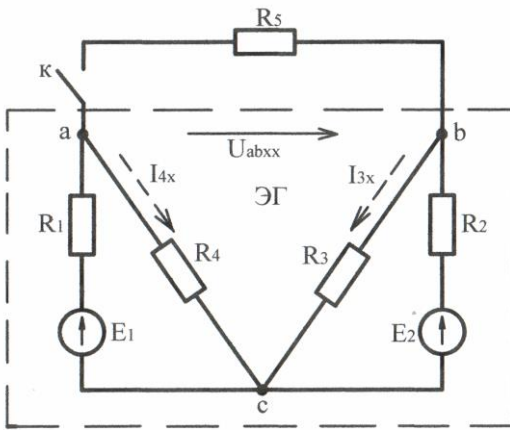


Рис. 1.13

Дано: Электрическая цепь (рис. 1.13);
 $E_1 = 100 \text{ В}; \quad E_2 = 50 \text{ В};$
 $R_1 = R_3 = 10 \text{ Ом}; R_2 = 6 \text{ Ом};$
 $R_4 = 15 \text{ Ом}; R_5 = 2,25 \text{ Ом}.$

Определить ток I_5 методом эквивалентного генератора.

Определяем ЭДС эквивалентного генератора $E_{ЭГ}$, которая будет равна напряжению холостого хода между точками $a - b$,
 $E_{ЭГ} = U_{ab(xx)}$. Для этого

размыкаем ветвь с сопротивлением R_5 , тогда:

$$I_{4x} = \frac{E_1}{R_1 + R_4} = \frac{100}{10 + 15} = 4 \text{ А};$$

$$I_{3x} = \frac{E_2}{R_2 + R_3} = \frac{50}{6 + 10} = 3,125 \text{ А}.$$

По второму закону Кирхгофа

$$I_{4x}R_4 - I_{3x}R_3 - U_{ab(xx)} = 0;$$

$$U_{ab(xx)} = I_{4x}R_4 - I_{3x}R_3 = 4 \cdot 15 - 3,125 \cdot 10 = 28,75 \text{ В.}$$

Для определения входного сопротивления пассивного двухполюсника $R_{ex(ab)}$ исключаем все ЭДС:

$$R_{14} = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_4} = \frac{10 \cdot 15}{10 + 15} = \frac{150}{25} = 6 \text{ Ом};$$

$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{6 \cdot 10}{6 + 10} = \frac{60}{16} = 3,75 \text{ Ом};$$

$$R_{ex(ab)} = R_{14} + R_{23} = 6 + 3,75 = 9,75 \text{ Ом.}$$

Определяем ток I_5 при замкнутом ключе К:

$$I_5 = \frac{U_{ab(xx)}}{R_{ex(ab)} + R_5} = \frac{28,75}{9,75 + 2,25} = \frac{28,75}{12} = 2,396 \text{ А.}$$

1.4. Задачи для самостоятельного решения студентами

Задача 5.

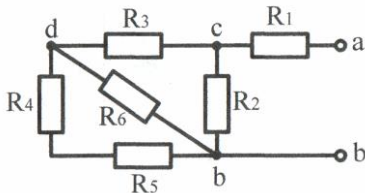


Рис. 1.14

Дано: Резисторы соединены по схеме рис. 1.14; $R_1 = R_3 = 5 \text{ Ом}$; $R_2 = R_6 = 10 \text{ Ом}$; $R_4 = 6 \text{ Ом}$; $R_5 = 4 \text{ Ом}$.

Определить входное сопротивление цепи относительно зажимов $a-b$ ($R_{ex(ab)}$).

Задача 6.

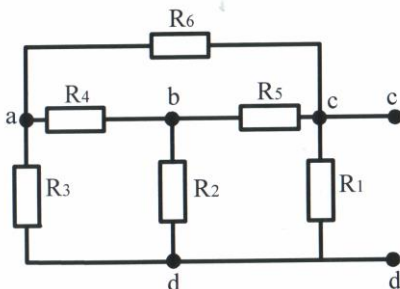


Рис. 1.15

Дано: Резисторы соединены по схеме рис. 1.15; $R_1 = 5 \text{ Ом}$; $R_2 = 8 \text{ Ом}$; $R_3 = 7 \text{ Ом}$; $R_4 = 25 \text{ Ом}$; $R_5 = 10 \text{ Ом}$; $R_6 = 20 \text{ Ом}$.

Определить входное сопротивление относительно зажимов $c-d$ ($R_{ex(cd)}$).

Задача 7.

Дано: Электрическая цепь рис. 1.16; $R_1 = 5 \text{ Ом}$; $R_2 = 8 \text{ Ом}$; $R_3 = 7 \text{ Ом}$; $R_4 = 25 \text{ Ом}$; $R_5 = 10 \text{ Ом}$; $R_6 = 20 \text{ Ом}$; $E = 60 \text{ В}$.

Определить токи во всех ветвях. Сделать проверку по законам Кирхгофа; проверить наличие баланса мощности.

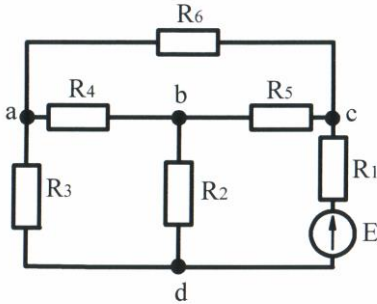


Рис. 1.16

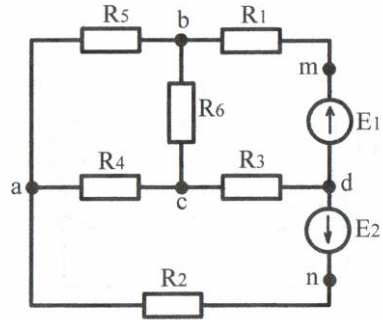


Рис. 1.17

Задача 8.

Дано: Электрическая цепь рис. 1.17; $E_1 = 100 \text{ В}$; $E_2 = 60 \text{ В}$; $R_1 = 50 \text{ Ом}$; $R_2 = 20 \text{ Ом}$; $R_3 = 60 \text{ Ом}$; $R_4 = 15 \text{ Ом}$; $R_5 = 10 \text{ Ом}$; $R_6 = 40 \text{ Ом}$.

Определить токи во всех ветвях методами контурных токов и узловых потенциалов; составить систему уравнений для расчета цепи методом двух законов Кирхгофа (без расчета); построить потенциальную диаграмму для любого контура с двумя источниками ЭДС; проверить наличие баланса мощности.

2. Индивидуальные задания
2.1. Индивидуальное задание 1.1.
Расчет разветвленной электрической цепи
с одним источником ЭДС

Дано: Электрическая цепь рис. 2.(1...8).

E	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом

Номер электрической цепи, сопротивления цепей и ЭДС выбираются по табл. 1 в соответствии с присвоенным шифром.

Определить: электрический ток во всех ветвях, напряжения между узлами a, b, c, d . Построить потенциальную диаграмму для любого контура, содержащего ЭДС E . Проверить наличие баланса мощности.

Таблица 1.

Первая цифра шифра	E	R_2	R_6	Вторая цифра шифра	Электр. цепь рис.	R_1	Третья цифра шифра	R_3	R_4	R_5
	В	Ом	Ом			Ом		Ом	Ом	Ом
1	100	30	25	1	2.1	30	1	50	5	10
2	90	40	10	2	2.2	50	2	20	10	10
3	80	50	20	3	2.3	20	3	40	10	15
4	70	60	15	4	2.4	20	4	60	5	15
5	60	70	10	5	2.5	40				
6	100	30	15	6	2.6	40				
7	90	40	20	7	2.7	50				
8	80	50	10	8	2.8	30				

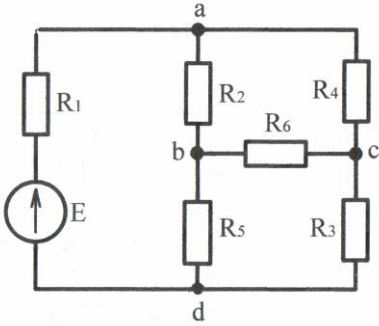


Рис. 2.1

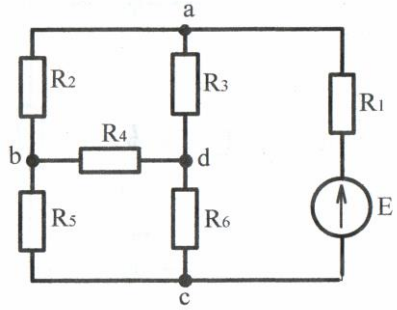


Рис. 2.2

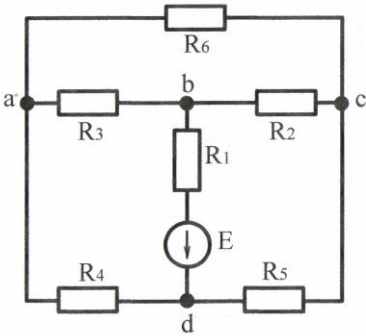


Рис. 2.3

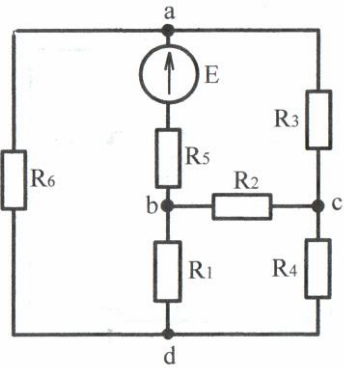


Рис. 2.4

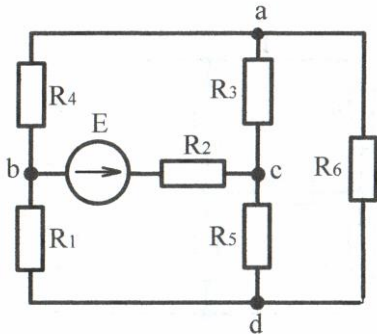


Рис. 2.5

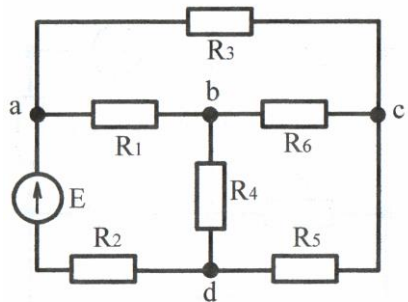


Рис. 2.6

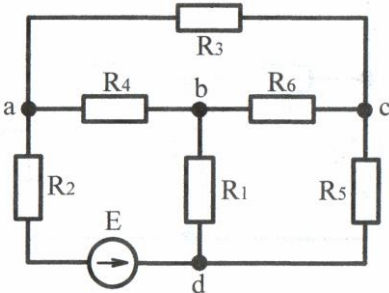


Рис. 2.7

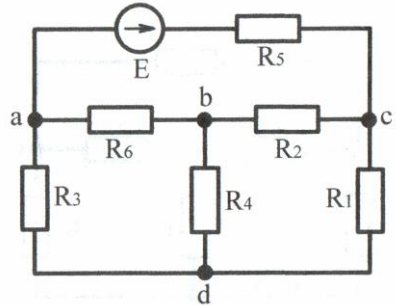


Рис. 2.8

2.2. Индивидуальное задание 1.2. Расчет разветвленной электрической цепи с двумя источниками ЭДС

Дано: Электрическая цепь рис. 3.(1...8).

E_1	E_2	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом

Номер электрической цепи, сопротивления цепей и ЭДС выбираются по табл. 2 в соответствии с присвоенным шифром.

Требуется:

1. Составить систему уравнений по законам Кирхгофа для определения токов в ветвях цепи.
2. Определить токи во всех ветвях методами:
 - контурных токов;
 - узловых потенциалов.
3. Построить потенциальную диаграмму для любого контура, включающего обе ЭДС.
4. Проверить наличие баланса мощности.
5. Определить ток во второй ветви методом эквивалентного генератора.

Таблица 2.

Первая цифра шифра	E_1	E_2	R_1	R_6	Вторая цифра шифра	Электр. цепь рис.	R_2	R_5	Третья цифра шифра	R_3	R_4
	В	В	Ом	Ом			Ом	Ом		Ом	Ом
1	100	60	30	10	1	3.1	20	5	1	20	15
2	100	50	40	15	2	3.2	30	10	2	30	10
3	100	40	50	20	3	3.3	40	15	3	40	5
4	90	40	60	25	4	3.4	50	5	4	50	10
5	90	50	50	5	5	3.5	50	15			
6	90	60	40	10	6	3.6	40	10			
7	80	40	30	20	7	3.7	30	5			
8	100	50	60	15	8	3.8	20	15			

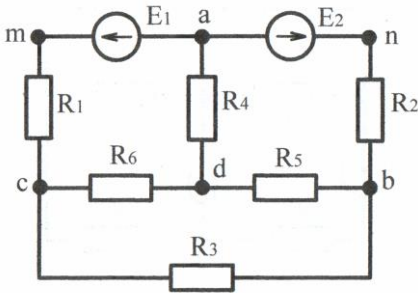


Рис. 3.1

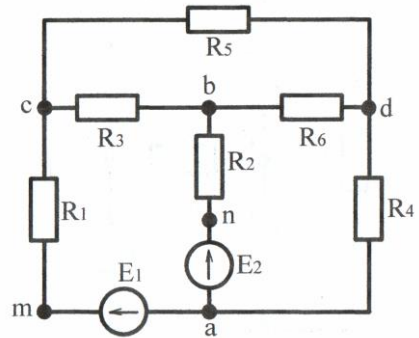


Рис. 3.2

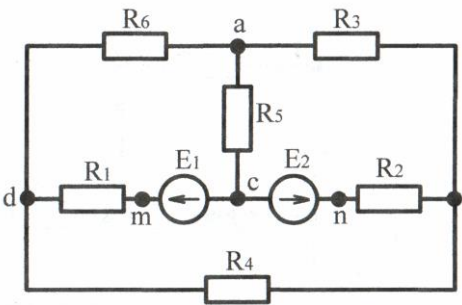


Рис. 3.3

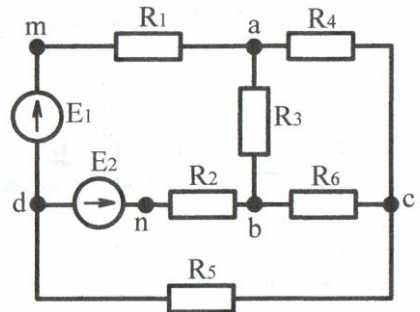


Рис. 3.4

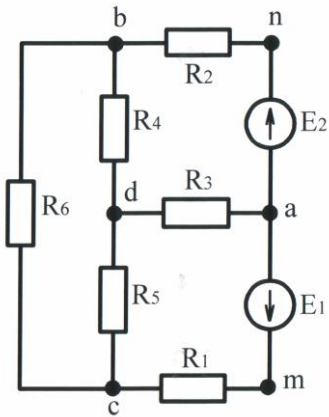


Рис. 3.5

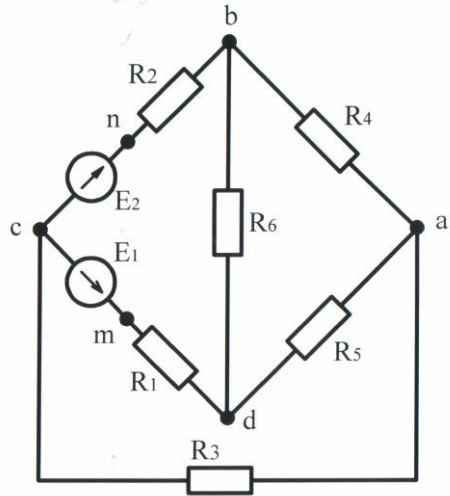


Рис. 3.6

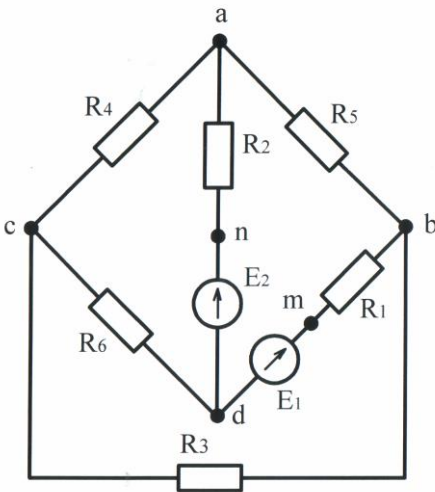


Рис. 3.7

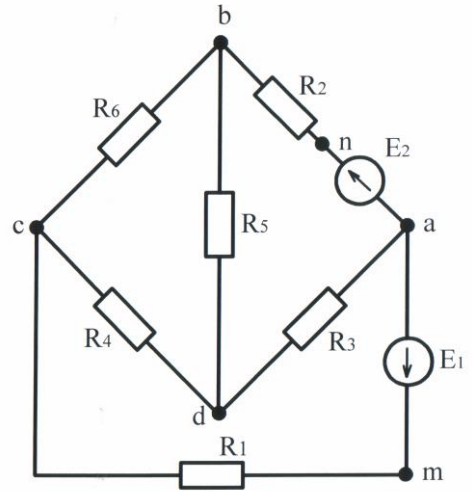


Рис. 3.8

3. Лабораторные работы
Лабораторная работа 1.1.
Исследование разветвленной электрической цепи
с одним источником ЭДС

Ц е л ь р а б о т ы: Приобретение навыков физического моделирования процессов в линейных электрических цепях постоянного тока и экспериментальная проверка результатов расчета индивидуального задания 1.1.

Программа работы.

Измерение тока во всех ветвях разветвленной электрической цепи постоянного тока и напряжений между узлами этой цепи.

Указания по подготовке к лабораторной работе.

1. Выполнить индивидуальное задание 1.1.
2. Изучить содержание лабораторной работы 1.1.
3. В отчете к лабораторной работе 1.1:
 - 3.1. Начертить схему электрической цепи, которую рассчитывали в индивидуальном задании 1.1, включив в каждую ветвь по одному амперметру (в качестве примера на рис. 4.1 приведена аналогичная схема);
 - 3.2. Начертить таблицы 3 и 4, в которые занести расчетные данные токов и напряжений.

Таблица 3.

Способ определения	I_E	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
	А	А	А	А	А	А	А
Расчет							
Опыт							
Номер амперметра							

Методические указания к выполнению работы.

1. Из комплекта измерительных приборов и резисторов, имеющихся на лабораторном стенде, выбрать необходимые (одного из членов бригады) для сборки электрической цепи. Номера выбранных амперметров занести в табл. 3 и обозначить на схеме (рис. 4.1).

Амперметры следует выбирать так, чтобы максимальная величина

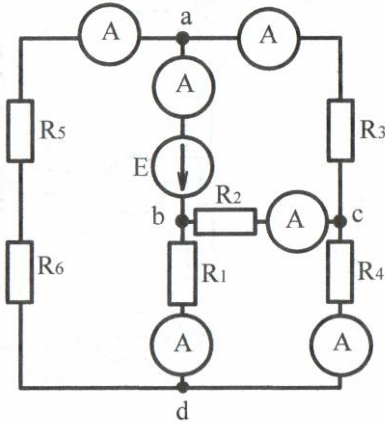


Рис. 4.1

тока в данной ветви из всех токов, вычисленных членами бригады, не превышала *предела измерения амперметра*.

2. Собрать цепь (рис. 4.1) с параметрами одного из членов бригады. При сборке цепи необходимо использовать узлы *a, b, c, d*, имеющиеся на лабораторном стенде.

3. После проверки преподавателем или лаборантом собранной цепи включить источник ЭДС и произвести измерения токов во всех ветвях, записав показания амперметров в

графу «опыт» табл. 3.

4. Измерить напряжения между любыми двумя узлами, указанные в табл. 4. Для измерения напряжений используют один вольтметр, поочередно включая его к двум узлам (клеммам), между которыми предполагается измерить напряжение. Результаты измерения напряжений заносятся в табл. 4.

Таблица 4.

Способ определения	U_{ab}	U_{ac}	U_{ad}	U_{bc}	U_{bd}	U_{cd}
	В	В	В	В	В	В
Расчет						
Опыт						

5. Отключить источник ЭДС, установить сопротивление резисторов, соответствующие заданным значениям в индивидуальном задании 1.1 следующего члена бригады, и в указанной выше последовательности произвести измерения.

6. Предоставить результаты выполнения лабораторной работы преподавателю для проверки.

После подписания преподавателем всех отчетов бригады, разобрать цепь, аккуратно собрать все проводники, используемые для сборки цепи.

Содержание отчета.

1. Схема исследуемой электрической цепи с измерительными приборами.

2. Таблицы вычислений и измерений.
3. Выводы по работе.

Лабораторная работа 1.2.
Исследование разветвленной электрической цепи
с двумя источниками ЭДС

Ц е л ь р а б о т ы: Приобретение навыков физического моделирования процессов в линейных электрических цепях постоянного тока и экспериментальная проверка результатов расчета индивидуального задания 1.2.

П р о г р а м м а р а б о т ы.

Измерение тока во всех ветвях разветвленной электрической цепи постоянного тока и потенциалов узлов этой цепи.

У к а з а н и я п о п о д г о т о в к е к л а б о р а т о р н о й р а б о т е.

1. Выполнить индивидуальное задание 1.2.
2. Изучить содержание лабораторной работы 1.2.
3. В отчете к лабораторной работе 1.2:
 - 3.1. Начертить схему электрической цепи, которую рассчитывали в индивидуальном задании 1.2, включив в каждую ветвь по одному амперметру (в качестве примера на рис. 4.2 приведена аналогичная схема);
 - 3.2. Начертить таблицы 5 и 6, в которые занести расчетные данные токов и потенциалов узлов.

М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я к в ы п о л н е н и ю р а б о т ы.

1. Из комплекта измерительных приборов и резисторов, имеющихся на лабораторном стенде, выбрать необходимые по данным

Таблица 5.

Способ определения	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
	А	А	А	А	А	А
Расчет методом контурных токов						
Расчет методом узловых потенциалов						
Опыт						
Номер амперметра						

Таблица 6.

Способ определения	φ_a	φ_b	φ_c	φ_d	φ_m	φ_n
	В	В	В	В	В	В
Расчет						
Опыт						

индивидуального задания одного из членов бригады для сборки электрической цепи. Номера выбранных амперметров занести в табл. 5 и обозначить на схеме (рис. 4.2).

Амперметры следует выбирать так, чтобы максимальная величина

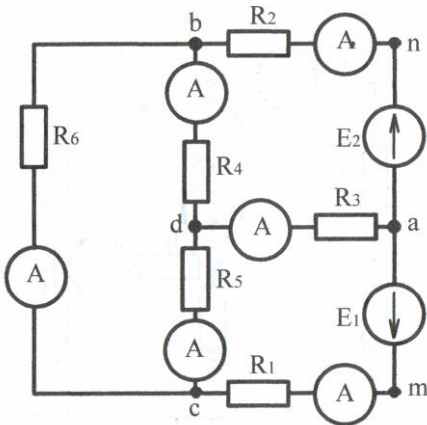


Рис. 4.2

тока в данной ветви из всех токов, вычисленных членами бригады, не превышала *предела измерения амперметра*.

2. Собрать цепь (рис. 4.2) с параметрами одного из членов бригады. При сборке цепи необходимо использовать узлы a , b , c , d , имеющиеся на лабораторном стенде.

3. После проверки преподавателем или лаборантом собранной цепи включить источники ЭДС E_1 и E_2 и произвести измерения токов во всех ветвях, записав показания

амперметров в графу «опыт» табл. 5.

4. Измерить потенциалы точек цепи, указанные в табл. 6. Для этого, клемму (-) вольтметра надо подключить к узлу, потенциал которого в расчете был принят равным нулю, и поочередно подключая клемму (+) вольтметра к другим точкам цепи, измерить их потенциалы. Показания вольтметра записать в табл. 6.

5. Отключить источники ЭДС E_1 и E_2 , установить сопротивление резисторов, соответствующие заданным значениям в индивидуальном задании 1.2 следующего члена бригады, и в указанной выше последовательности произвести измерения.

6. Предоставить результаты выполнения лабораторной работы преподавателю для проверки.

После подписания преподавателем всех отчетов бригады,

разобрать цепь и привести в порядок рабочее место.

С о д е р ж а н и е о т ч е т а.

1. Схема исследуемой электрической цепи с измерительными приборами.
2. Таблицы с расчетными и опытными данными.
3. Выводы по работе.

4. Темы исследовательской работы студентов (УИРС, НИРС)

1. Физическое обоснование принципа непрерывности электрического тока. Первый закон Кирхгофа.
2. Второй закон Кирхгофа и его связь со вторым уравнением Максвелла.
3. Направленные графы и их применение в расчете электрических цепей.
4. Матричный метод расчета электрических цепей с использованием вычислительной техники.
5. Оптимизация расчета электрических цепей на основе комплексного использования известных в литературе методов.
6. История развития теории электромагнетизма.
7. Сверхпроводимость.

5. Вопросы для самоконтроля

1. Какое общее физическое явление связано с любым видом электрического тока?
2. Тождественны ли в общем случае понятия: разность потенциалов и напряжение?
3. Сформулируйте основные законы электрических цепей.
4. Какие из основных законов электрических цепей имеют общую физическую основу?
5. В общем случае параметрами электрических цепей являются: активное сопротивление, индуктивность и емкость. Почему цепи постоянного тока характеризуются только одним параметром – активным сопротивлением?
6. Почему в цепях постоянного тока понятия активное и омическое сопротивления тождественны?
7. Как по геометрической структуре цепи определить: сколько необходимо составить уравнений по законам Кирхгофа для определения токов в ветвях?
8. Приведите пример электрической цепи, для определения токов

которой методом контурных токов необходимо составить пять уравнений, а методом узловых потенциалов – одно.

9. Как по вольтамперной характеристике источника ЭДС определить его ЭДС и внутреннее сопротивление?

10. Сформулируйте условия эквивалентности источников ЭДС и тока.

11. Сформулируйте условия эквивалентности соединения резисторов «треугольником» и «звездой» и составьте формулы перехода.

12. Общий принцип определения входного сопротивления сложных разветвленных цепей.

13. Сформулируйте теорему об активном двухполюснике.

14. В каком случае нельзя рассчитывать цепь методами наложения, эквивалентного генератора и узловых потенциалов?

15. Электрическая цепь содержит 3 узла и 6 ветвей. Сколько уравнений необходимо составить для расчета токов во всех ветвях методами уравнений Кирхгофа, контурных токов, узловых потенциалов?

16. Докажите, что при параллельном соединении приемников суммируются их проводимости, а при последовательном – сопротивления.

17. Приведите пример разветвленной цепи, не содержащей параллельно и последовательно соединенных резисторов. Как в этом случае определить входное сопротивление?

18. В чем состоит преимущество расчета цепей методами контурных токов и узловых потенциалов перед методом уравнений Кирхгофа?

19. Вы рассчитали цепь методом контурных токов. Можно ли проверить расчет, применяя первый закон Кирхгофа?

20. Докажите, что потенциальная диаграмма контура является графической интерпретацией уравнения, составленного для этого контура по второму закону Кирхгофа.

21. На каком принципе основан расчет цепей методом наложения?

22. Сформулируйте и докажите теорему о компенсации.

23. Цепь имеет 3 узла, 5 ветвей и 2 источника ЭДС, включенные в разные ветви. Изобразите схему цепи и составьте алгоритмы расчета этой цепи методами уравнений Кирхгофа, контурных токов, узловых потенциалов, наложения, а также алгоритм расчета тока в одной из ветвей методом эквивалентного генератора ЭДС.

24. Баланс мощности.

Л и т е р а т у р а

1. Ф.Д. Косоухов. Конспект лекций по Теоретическим основам электротехники: часть 1. – СПб.: СПбГАУ, 2007.
2. Теоретические основы электротехники: учеб. Для общеобразоват. учеб. заведений / А.Н. Горбунов и др.; Под ред. А.Н. Горбунова. – М.: УМЦ «ТРИАДА», 2003. – 304 с.