

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

***ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И
АППАРАТЫ***

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению расчетно-графических работ для студентов специальностей
1-316 01 01 «Технология машиностроения», 1-36 01 03 «Технологическое
оборудование машиностроительного производства», 1-36 01 04 «Оборудование и
технологии высокоэффективных процессов обработки материалов»

ВИТЕБСК
2016

УДК 621.3(07)

Электротехника, электрические машины и аппараты: методические указания к выполнению расчетно-графических работ для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения», 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства», 1-36 01 04 «Оборудование и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов»

Витебск: Министерство образования Республики Беларусь, УО «ВГТУ», 2011

Составители: к.т.н., доц. Новиков Ю.В.,
асс. Шаркова М.Ф.

В методических указаниях приведено краткое содержание курса «Электротехника, электрические машины и аппараты», его цель, задачи, структура и объем дисциплины; теоретический материал, необходимый для изучения курса, а также указания к выполнению расчетно-графических работ с заданиями и примерами выполнения. Предложенные для изучения материалы соответствуют всем разделам дисциплины. Методические указания составлены в соответствии с предъявляемыми требованиями.

Одобрено кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» УО «ВГТУ» 25.09.2014 г., протокол № 2.

Рецензент: доц. Попов Ю.В.
Редактор: ст.преп. Куксевич В.Ф.

Рекомендовано к опубликованию редакционно-издательским советом
УО «ВГТУ» 27.11.2014 г., протокол № 8.

Ответственный за выпуск: Букин Ю.А.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»

Подписано к печати 04.01.16. Формат 60x90 1/16. Уч.-изд. лист. 1.8.
Печать ризографическая. Тираж 99 экз. Заказ № 2.

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий N 1 / 172 от 12 февраля 2014 г.

210035, г. Витебск, Московский пр-т, 72.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение.....	4
1	Содержание курса	4
2	Методические указания к изучению теоретических вопросов курса.	7
	2.1 Электрические цепи постоянного тока.....	7
	2.2 Электрические цепи синусоидального тока.....	8
	2.3 Цепи трехфазного тока.....	9
	2.4 Трансформаторы и электродвигатели.....	9
3	Методические указания к выполнению расчетно-графических работ	13
4	Задание к расчетно-графической работе № 1. Расчет цепи постоянного тока.....	14
	4.1 Условие задачи.	14
	4.2 Схемы электрических цепей постоянного тока.....	17
5	Методические указания для анализа сложной электрической цепи постоянного тока	22
6	Пример расчета цепи постоянного тока.....	24
7	Литература	27

ВВЕДЕНИЕ

Курс «Электротехника, электрические машины и аппараты» относится к числу общепрофессиональных дисциплин и базируется на теоретическом и практическом материале, излагаемом в курсах физики и высшей математики. Знание дисциплины даст возможность будущим специалистам свободно разбираться в устройстве и принципе действия разнообразной электротехнической аппаратуры, электрических машин и оборудования, грамотно использовать их на практике. Целью изучения дисциплины является формирование знаний у инженеров в области электротехники для эффективного выбора необходимых электротехнических и электроизмерительных устройств, умения их правильно эксплуатировать и составлять совместно с инженерами-электриками технические задания на разработку автоматизированных систем управления производственными процессами. В результате освоения курса "Электротехника, электрические машины и аппараты" студент должен:

– **знать:** электротехнические законы; методы анализа электрических, магнитных и электронных цепей; принципы действия, конструкции, свойства, области применения и возможности основных электротехнических устройств и электроизмерительных приборов; проблемы энергосбережения при производстве, передаче, распределении и потреблении электроэнергии;

– **уметь:** читать структурные и электрические схемы; производить измерения электрических и некоторых неэлектрических величин;

– **приобрести навыки:** экспериментально определять параметры и характеристики типовых элементов и устройств; включать электротехнические приборы, аппараты и машины, управлять ими и контролировать их эффективную и безопасную работу.

1 СОДЕРЖАНИЕ КУРСА

Цель, задачи, структура и объем дисциплины. Значение и роль электротехники и электроники в развитии технологического оборудования машиностроительного производства, оборудования и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов.

ТЕМА 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Структура электрической цепи. Элементы электрических цепей и их характеристики. Основные соотношения в линейных цепях постоянного тока. Режимы работы электрической цепи. Методы расчета простых и сложных

электрических цепей постоянного тока. Энергетический баланс в электрических цепях. Понятие о цепях с нелинейными элементами и их расчете.

ТЕМА 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Получение переменного синусоидального тока. Основные параметры и соотношения в цепях переменного синусоидального тока. Векторные диаграммы. Представление электрических величин в комплексной форме. Активный, индуктивный и емкостной элементы в цепи синусоидального тока. Методы расчета неразветвленной и разветвленной цепей переменного тока. Явления резонанса токов и напряжений. Простейшие электрические фильтры.

ТЕМА 3. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Основные понятия и схемы трехфазных цепей. Соотношения между токами и напряжениями в трехфазных цепях при соединении звездой и треугольником. Симметричный и несимметричный режимы работы трехфазной цепи. Мощность трехфазных цепей.

ТЕМА 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Виды и методы измерений электрических величин. Принцип действия и устройство основных типов электроизмерительных приборов.

ТЕМА 5. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Назначение, устройство, принцип действия и области применения трансформаторов. Режимы работы. Уравнения электромагнитного состояния трансформатора. Понятие о трехфазных и измерительных трансформаторах. Энергетический баланс и КПД трансформатора.

ТЕМА 6. ДВИГАТЕЛИ АСИНХРОННЫЕ И ПОСТОЯННОГО ТОКА

Устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя (АД). Механическая характеристика АД. Пуск, торможение и регулирование частоты вращения двигателя. КПД АД.

Устройство и принцип действия машин постоянного тока. Способы возбуждения машин постоянного тока. Механические характеристики двигателя постоянного тока. Пуск, торможение и регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока.

ТЕМА 7. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ

Аппаратура управления и защиты технологических устройств. Контактторы, конечные выключатели и реле. Условные графические обозначения аппаратуры на схемах. Общие принципы релейно-контакторного управления электротехническими устройствами. Простейшие схемы управления асинхронными двигателями. Устройство и принцип действия перспективных разработок оборудования. Значение и роль современных электрических машин и устройств в развитии автоматизированных систем управления производственными процессами.

Темы лабораторных занятий

Таблица 1.1 – Краткое содержание лабораторных занятий

№№	Тема	К-во часов	Цели и задачи темы	Формы контроля
1	Исследование основных режимов работы электрической цепи	2	Анализ распределения напряжений и мощностей на элементах цепи в различных режимах	Опрос Защита
2	Исследование цепи синусоидального тока с последовательным соединением элементов	2	Исследование процессов в цепи. Анализ условий возникновения резонанса напряжений	Опрос Защита
3	Исследование трехфазной цепи при соединении звездой	2	Изучение свойств трехфазной цепи при соединении звездой	Опрос Защита
4	Исследование асинхронного трехфазного двигателя	2	Экспериментальное снятие рабочих характеристик	Опрос Защита

Темы расчетных работ

1. Расчет электрических цепей постоянного тока.
2. Расчет электрических цепей синусоидального тока.
3. Расчет электрических цепей трехфазного тока.

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ВОПРОСОВ КУРСА

2.1 Электрические цепи постоянного тока

После изучения данного раздела студенты должны:

- знать виды источников постоянного тока, их внешние характеристики, области применения электротехнических устройств постоянного тока, способы соединения электрических устройств, методику составления уравнений электрического состояния линейных цепей, примеры нелинейных элементов и их вольт – амперные характеристики;
- понимать эквивалентность схем источников Э.Д.С. и тока, возможность эквивалентных преобразований схем соединений пассивных элементов, проведения анализа линейных электрических цепей методами пропорциональных величин, суперпозиции и контурных токов;
- уметь проводить анализ линейных электрических цепей методом свертывания, непосредственного применения законов Кирхгофа и узлового напряжения, составлять уравнения баланса электрической мощности, применять метод пересечения характеристик для определения тока в нелинейной цепи.

Пояснения к изучению раздела

Приступая к расчету цепи, необходимо иметь в виду, что цепи бывают простые и сложные. При этом цепь называется простой, если, не производя ее расчета, можно указать действительные направления всех токов. В противном случае цепь считается сложной. К простым цепям относятся цепи с одним источником, в которых пассивные элементы соединены последовательно, параллельно и смешанно. К сложным цепям относятся цепи с несколькими источниками, а также цепь с одним источником, где пассивные элементы соединены в схему треугольника и звезды.

Расчет простых цепей обычно производят методом свертывания схемы, по которому постепенным преобразованием с использованием формул для последовательного и параллельного соединений приводят схему к одному эквивалентному пассивному элементу с сопротивлением $R_{э\text{кв}}$. Определяют ток в

ветви, содержащей источник, а затем, поэтапно возвращаясь к исходной схеме, находят все остальные токи.

Расчет сложных цепей постоянного тока производится следующими методами:

- 1) метод непосредственного применения законов Кирхгофа;
- 2) метод наложения (суперпозиции);
- 3) метод двух узлов и другие.

Особое внимание уделить на метод двух узлов, т. к. аналогичный метод широко используется при расчете трехфазных цепей синусоидального тока.

2.2 Электрические цепи синусоидального тока

В результате изучения данной темы студенты должны:

- знать содержание терминов: резистор, резистивный элемент, активное сопротивление, индуктивная катушка, индуктивный элемент, индуктивность, индуктивное сопротивление, конденсатор, емкостной элемент, емкость, емкостное сопротивление; фаза, начальная фаза, угол сдвига по фазе, период, частота, круговая частота, мгновенное, амплитудное, действующее и среднее значения синусоидальных величин; полное, активное, реактивное, комплексные сопротивления и проводимости, мгновенная, полная, активная, реактивная, комплексная мощности; параметры элементов схем замещения цепей однофазного тока; условия и способы получения резонансов напряжений и токов;
- понять особенности электромагнитных процессов и энергетические состояния в простейших цепях синусоидального тока, экономическое значение коэффициента мощности;
- уметь составлять дифференциальные и комплексные уравнения электрического состояния линейных цепей; представлять синусоидально изменяющиеся величины тригонометрическими функциями, графиками, вращающимися векторами и комплексными числами; строить векторные диаграммы простейших цепей; используя символический метод, рассчитывать простые и сложные цепи синусоидального тока.

Пояснения к изучению раздела

Расчет цепей синусоидального тока при использовании символического метода (метода комплексных чисел) производится аналогично расчету цепей постоянного тока. Отличие состоит в том, что э.д.с., напряжения, токи, сопротивления и мощности выражаются в комплексной форме. Зная комплексные значения величин, легко определить действующие значения, начальные фазы и все необходимые мощности. Пример расчета такой цепи рассмотрен в разделе 3 (контрольные работы).

2.3 Электрические цепи трехфазного переменного тока

В результате изучения данной темы студенты должны:

- знать основные элементы трехфазных цепей, способы соединения фаз обмотки генератора и включения в трехфазную цепь приемников; способы изображения трехфазной симметричной системы э.д.с.;
- понимать роль нейтрального провода; принципы построения векторных диаграмм; влияние рода и схемы включения нагрузки на величину тока в нейтральном проводе;
- уметь анализировать различные режимы симметричных и несимметричных цепей; читать схемы соединения трехфазных однофазных приемников.

Пояснения к изучению раздела

При изучении этой темы особое внимание необходимо обратить на преимущества, которые дает трехфазная система по сравнению с однофазной. Рассматривая схемы соединения, нужно уяснить связь между фазными и линейными напряжениями в схеме соединения звездой, а также связь между фазными и линейными токами в схеме соединения треугольником.

Необходимо четко представлять, что в трехфазной цепи могут быть два режима: симметричный и несимметричный. Расчет трехфазной цепи в симметричном режиме сводится к расчету для одной фазы (т. к. действующие значения токов во всех фазах будут равны) и производится аналогично расчету однофазной цепи с одним источником. Трехфазная цепь является частным случаем сложной цепи синусоидального тока. Поэтому в несимметричном режиме при отсутствии нулевого провода, когда не обеспечивается независимая работа фаз, для расчета трехфазной цепи можно применить метод узлового напряжения в комплексной форме. Примеры расчета трехфазных цепей приведены в разделе 3 (контрольные работы).

2.4 Трансформаторы и электродвигатели

После изучения настоящего раздела студенты должны:

знать основные элементы конструкции трансформатора, выражение для коэффициента трансформации; знать значения терминов для асинхронного двигателя: скольжение, синхронная скорость, круговое вращающееся магнитное поле, короткозамкнутый ротор, фазный ротор; способы изменения направления вращения магнитного поля; устройство и области применения двух типов трехфазных асинхронных двигателей, их условные обозначения на схемах; вид

механических характеристик и способы регулирования частоты вращения двигателя; знать основные конструктивные элементы машин постоянного тока: статор (станину), обмотку возбуждения, якорь, обмотку якоря, щеточно-коллекторный узел; классификацию двигателей по способу возбуждения; механические характеристики двигателей постоянного тока, способы пуска и регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока; понимать принцип действия трансформатора; причины, вызывающие изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора; понимать принцип действия трехфазного асинхронного двигателя; факторы, влияющие на частоту вращения ротора трехфазного асинхронного двигателя; понимать назначение основных конструктивных элементов двигателя постоянного тока; принцип действия и уравнения электрического состояния двигателя; назначение пусковых и регулировочных реостатов; уметь анализировать различные режимы работы трансформатора; включать приемники и электроизмерительные приборы для определения напряжений, токов и мощностей; уметь осуществлять пуск и реверс асинхронного двигателя; измерять скольжение и частоту вращения; оценивать величины номинального, пускового и максимального моментов пускового тока и номинальной скорости по данным каталога; уметь включать в сеть, регулировать скорость и реверсировать двигатель постоянного тока; ориентироваться в паспортных данных машин и определять номинальные моменты и ток; выбирать двигатель к заданным техническим условиям.

Пояснения к изучению раздела

Рассматривая физические процессы, возникающие в трансформаторе, необходимо обратить особое внимание на то положение, что при изменении нагрузки трансформатора в широком диапазоне (от холостого до номинального режима) магнитный ток может считаться практически постоянным и равным магнитному потоку в режиме холостого хода. Исключения представляют трансформаторы тока, у которых ток в первичной обмотке определяется нагрузкой, включенной последовательно. Поэтому при размыкании цепи вторичной обмотки магнитный поток сильно возрастает, возникает повышенная э.д.с., которая представляет опасность для обслуживающего персонала и изоляции трансформатора.

При изучении асинхронного двигателя необходимо обратить внимание на электромагнитные процессы, возникающие в двигателе, как при его пуске, так и в процессе работы. Эксплуатационные параметры асинхронного двигателя демонстрируются механическими и рабочими характеристиками. Механическая характеристика двигателя $\omega = f(M)$ может быть построена по данным каталога с использованием следующих формул:

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{S_{кр}}{S} + \frac{S}{S_{кр}}},$$

$$M_{кр} = \lambda_m M_n,$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n},$$

$$\omega_n = \frac{2\pi f_1}{p} (1 - S_n),$$

где M , $M_{кр}$, M_n – текущее, максимальное (критическое) и номинальное значения вращающегося момента двигателя соответственно,

$S_{кр}$, S , S_n – критическое, текущее и номинальное значения скольжения,

f_1 , p – частота напряжения питания обмотки статора и число пар полюсов двигателя,

λ_m – отношение критического момента к номинальному.

Значения P_n , λ_m , f_1 , p , S_n , $S_{кр}$ приводятся в каталоге.

Построенная по этим данным зависимость $\omega(M)$ представлена на рисунке 2.1.

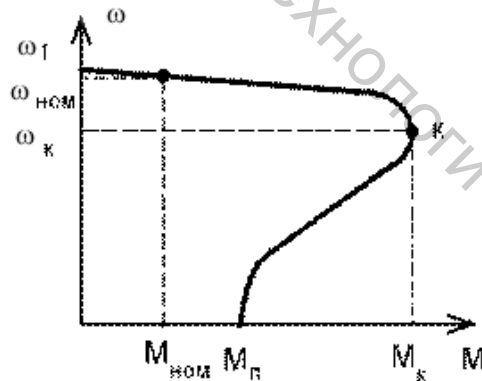


Рисунок 2.1 – Механическая характеристика асинхронного двигателя

Механическая характеристика двигателей определяет свойства двигателя в системе электропривода: пусковые свойства (M_n – пусковой момент), перегрузочную способность (M_k), устойчивость работы.

Изучение двигателей постоянного тока надо начинать с их принципа работы и устройства. Необходимо обратить особое внимание на режим работы, пуск,

регулирование скорости вращения и торможение двигателя. Процессы в двигателе в установившемся режиме описываются уравнениями :

$$U_{я} = R_{яц} I_{я} + E$$

$$E = K\Phi\omega \tag{2.1}$$

$$M = K\Phi I_{я}$$

где $U_{я}$, $I_{я}$, E – напряжение, ток и противо э.д.с. двигателя;

Φ , ω , M – магнитный поток двигателя, вращающий момент и угловая скорость;

$R_{яц}$, K – сопротивление якорной цепи двигателя и конструктивная постоянная.

Вид статических характеристик для наиболее часто применяемого двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при разных значениях напряжения показан на рисунке 2.2.

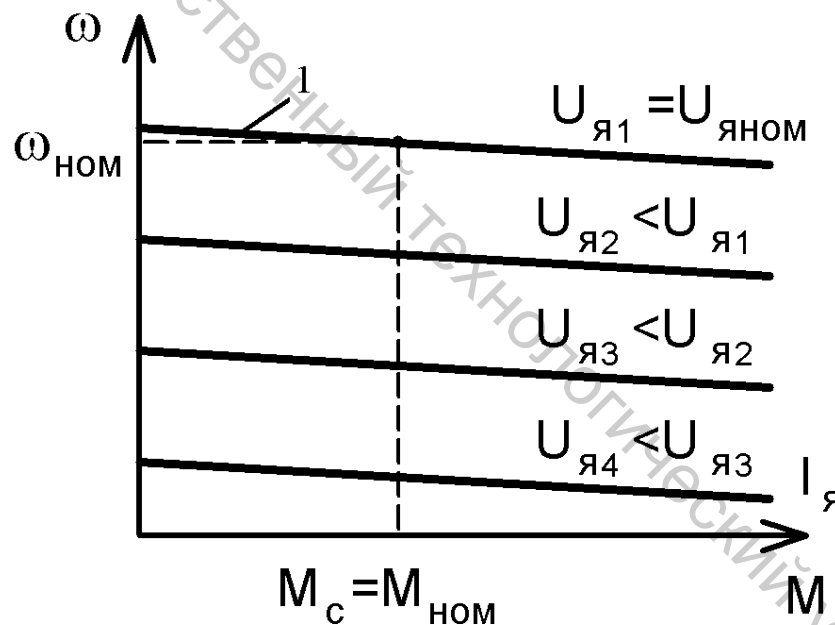


Рисунок 2.2 – Статические характеристики двигателя постоянного тока

Получить выражения для механической $\omega = f(M)$ и электромеханической $\omega = f(I_{я})$ характеристик двигателя можно на основании формулы (2.1):

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi} - \frac{R_{яц}}{(K\Phi)^2} M, \tag{2.2}$$

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi} - \frac{R_{яy}}{K\Phi} I_{я}. \quad (2.3)$$

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ

Рабочей программой курса предусмотрено выполнение трех расчетно-графических работ. Приступить к выполнению очередной работы следует после изучения необходимого учебного материала. При оформлении каждой задачи следует приводить исходную схему с принятыми буквенными обозначениями и числами заданных значений. Схемы и графики должны быть выполнены аккуратно с помощью чертежных инструментов и с использованием стандартных графических обозначений элементов и буквенных обозначений величин, на осях координат должны быть указаны откладываемые значения и единицы их измерения. Решения необходимо сопроводить краткими пояснениями. При использовании справочных материалов необходимо назвать источник, делая ссылку на перечень литературы, приведенный в конце работы. Перечень литературы должен быть оформлен в полном соответствии с требованиями библиографического описания документов.

Все расчеты производятся в абсолютных единицах с использованием системы СИ. Решения следует выполнять сначала в общем виде, затем подставлять числовые величины. При наличии значительных однотипных вычислений, приводя два-три расчета в качестве примера, результаты внести в таблицу. Результаты вычислений записывать с точностью до третьей значащей цифры. Арифметическая правильность вычислений и указание размерности является обязательным.

Графики и схемы необходимо приводить в работе по ходу расчета. Выводы формул и уравнений, имеющих в литературе, приводить в тексте работ не следует. Текстовая часть работы должна быть написана аккуратно, четким почерком (или отпечатана). Листы должны быть пронумерованы, слова не сокращать.

Если преподаватель предложит переписать какой-то раздел работы, то в этом случае исправления вносятся в текст с тем расчетом, чтобы исправленная работа представляла единое целое. Листы с большим числом исправлений следует переписать. Замечания преподавателя не разрешается ни стирать, ни заклеивать.

Целью расчетно-графических работ является окончательная проверка усвоения студентами соответствующих разделов курса. Приступить к выполнению очередной работы следует после изучения необходимого материала и решения достаточного количества задач из рекомендуемой литературы. При оформлении каждой задачи следует приводить исходную схему с принятыми буквенными

обозначениями и числами заданных значений. Рисунки, схемы и графики должны быть выполнены аккуратно в масштабе $1:10^{10}$ или $5:10^n$ единиц измерения физической величины, где n – целое число. Графики следует чертить на миллиметровой бумаге с помощью чертежных инструментов. На осях координаты должны быть указаны откладываемые значения и единиц их измерения. При оформлении контрольной работы нужно указать необходимые расчетные формулы. Конечный результат должен быть выделен из общего текста. Решение задач не следует перегружать приведением всех алгебраических преобразований. Каждый этап решения должен иметь пояснение. Результат вычислений записывать с точностью до третьей значащей цифры. В начале каждой задачи следует привести краткое условие, расчетную схему и исходные данные для своего варианта. В ходе решения давать краткие словесные пояснения. Обязательно приводить размерность всех найденных при расчете значений. Вывод формул и уравнений, имеющих в литературе, приводить в тексте контрольных работ не следует. На титульном листе контрольной работы должно быть указано наименование института и факультета, фамилия, инициалы и шифр студента. В конце работы необходимо привести список использованной литературы, затем поставить дату окончания работы и свою подпись

Работы по курсу представлены пятидесяти-вариантами. Вариант определяется двумя последними цифрами шифра-номера зачетной книжки студента. Если две последние цифры более 50, то для определения номера варианта необходимо вычесть 50. Если предпоследняя цифра нуль, то студент должен выполнить вариант, определяемый последней цифрой своего шифра. На последней странице расчетно-графической работы студент указывает дату и ставит свою подпись.

Объем контрольного задания устанавливается кафедрой. Контрольные задачи, включенные в методические указания, не охватывают всех разделов программы, поэтому для лучшего усвоения материала студентам кроме обязательных контрольных задач рекомендуется решать задачи на все разделы.

4 ЗАДАНИЕ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ № 1. РАСЧЕТ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.1 Условие задачи

Для электрической цепи, схема которой изображена на рисунках 1.1 – 1.50 (схему и соответствующие значения параметров выбрать в соответствии с вариантом и п. 3.1 настоящих методических указаний), по заданным в таблице 4.1 значениям параметров пассивных элементов и э.д.с. источников, выполнить:

1. Решить задачу методом применения **законов Кирхгофа**.
2. Решить задачу применением метода **контурных токов**.

3. Решить задачу применением метода **узлового напряжения**.
4. Предварительно упростить схему, заменив треугольник с сопротивлением R_4 , R_5 и R_6 эквивалентной звездой. **Начертить расчетную схему с эквивалентной звездой и показать на ней токи.**
5. Определить **ток в резисторе R_6** методом эквивалентного генератора.
6. Определить **показания вольтметра**.
7. **Составить баланс мощностей** для заданной схемы.
8. Построить в масштабе **потенциальную диаграмму** для внешнего контура.

Таблица 4.1 - Значения параметров пассивных элементов и э.д.с. источников

№ варианта	№ рисунка	$R1$, Ом	$R2$, Ом	$R3$, Ом	$R4$, Ом	$R5$, Ом	$R6$, Ом	$E1$, В	$E2$, В	$E3$, В
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	4-1	1	1	1	6	6	4	12	5	10
1	4-2	1	1	1	6	6	4	15	10	5
2	4-2	1	1	1	6	6	4	40	10	10
3	4-2	1	1	1	6	6	4	20	10	15
4	4-22	1	1	1	6	6	4	5	10	15
5	4-3	2	2	4	4	6	6	12	24	-
6	4-3	2	2	4	4	6	6	10	10	-
7	4-3	2	2	4	4	6	6	20	10	-
8	4-3	2	2	4	4	6	6	15	10	-
9	4-23	2	2	4	4	6	6	10	15	-
10	4-4	2	2	6	10	-	-	20	10	-
11	4-4	2	2	6	10	-	-	10	20	-
12	4-4	2	2	6	10	-	-	15	5	-
13	4-4	2	2	6	10	-	-	10	5	-
14	4-24	2	6	6	10	-	-	15	20	-
15	4-5	6	6	2	6	-	-	30	10	30
16	4-5	6	6	2	6	-	-	20	20	20
17	4-5	6	6	2	6	-	-	20	15	10
18	4-5	6	6	2	6	-	-	10	15	20
19	4-25	6	6	2	6	-	-	15	10	15
20	4-6	2	2	3	3	4	4	12	12	20
21	4-6	2	2	3	3	4	4	10	15	20
22	4-6	2	2	3	3	4	4	25	20	15
23	4-6	2	2	3	3	4	4	15	10	10
24	4-26	2	2	3	3	4	4	12	12	12
25	4-7	2	2	6	6	4	4	24	12	-
26	4-7	2	2	6	6	4	4	12	24	-
27	4-7	2	2	6	6	4	4	15	15	-
28	4-7	2	2	6	6	4	4	25	15	-
29	4-22	2	2	6	6	4	4	10	20	-
30	4-8	2	2	2	4	6	-	24	12	24
31	4-8	2	2	2	4	6	-	12	24	12
32	4-8	2	2	2	4	6	-	20	10	15
33	4-8	2	2	2	4	6	-	15	15	10
34	4-23	2	2	2	4	6	-	8	12	8

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
35	4-9	2	2	2	6	6	6	12	6	12
36	4-9	2	2	2	6	6	6	6	12	6
37	4-9	2	2	2	6	6	6	12	6	24
38	4-9	2	2	2	6	6	6	10	20	15
39	4-24	2	2	2	6	6	6	18	9	24
40	4-10	1	1	4	4	10	-	12	12	-
41	4-10	1	1	4	4	10	-	24	24	-
42	4-10	1	1	4	4	10	-	6	6	-
43	4-10	1	1	4	4	10	-	12	24	-
44	4-25	1	1	4	4	10	-	24	12	-
45	4-11	2	2	4	10	10	-	24	12	24
46	4-11	2	2	4	10	10	-	12	24	12
47	4-11	2	2	4	10	10	-	6	12	6
48	4-11	2	2	4	10	10	-	12	6	12
49	4-26	2	2	4	10	10	-	20	24	12
50	4-12	2	1	6	8	4	10	12	20	30
51	4-12	2	1	6	8	4	10	30	20	12
52	4-12	2	1	6	8	4	10	20	12	30
53	4-12	2	1	6	8	4	10	8	12	20
54	4-22	2	1	6	8	4	10	20	8	12
55	4-13	5	2	1	10	4	2	10	20	30
56	4-13	5	2	1	10	4	2	30	20	10
57	4-13	5	2	1	10	4	2	20	30	10
58	4-13	5	2	1	10	4	2	20	10	30
59	4-23	5	2	1	10	4	2	30	10	20
60	4-14	2	4	6	8	6	10	8	12	8
61	4-14	2	4	6	8	6	10	12	8	8
62	4-14	2	4	6	8	6	10	8	8	12
63	4-14	2	4	6	8	6	10	15	10	20
64	4-24	2	4	6	8	6	10	20	15	10
65	4-15	1	2	4	6	8	10	10	15	25
67	4-15	1	2	4	6	8	10	15	10	25
68	4-15	1	2	4	6	8	10	20	12	8
69	4-25	1	2	4	6	8	10	8	12	8
70	4-16	1	4	1	6	10	8	30	20	10
71	4-16	2	4	1	6	10	8	10	20	30
72	4-16	2	4	1	6	10	8	20	10	30
73	4-16	2	4	1	6	10	8	5	10	15
74	4-26	2	4	1	6	10	8	15	10	15
75	4-17	4	2	1	10	6	3	15	20	30
76	4-17	4	2	1	10	6	3	30	20	15
77	4-17	4	2	1	10	6	3	20	15	30
78	4-17	4	2	1	10	6	3	8	12	20
79	4-22	4	2	1	10	6	3	20	12	8
80	4-18	2	2	6	4	4	8	24	12	24
81	4-18	2	2	6	4	4	8	12	24	24
82	4-18	2	2	6	4	4	8	24	24	12
83	4-18	2	2	6	4	4	8	6	12	8

Окончание таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
84	4-23	2	2	6	4	4	8	8	12	8
85	4-19	4	2	6	10	1	2	12	18	24
86	4-19	4	2	6	10	1	2	24	18	12
87	4-19	4	2	6	10	1	2	18	12	24
88	4-19	4	2	6	10	1	2	10	15	20
89	4-24	4	2	6	10	1	2	20	15	10
90	4-25	2	4	8	10	2	4	24	12	24
91	4-20	2	4	8	10	2	4	12	24	24
92	4-20	2	4	8	10	2	4	24	24	12
93	4-25	2	4	8	10	2	4	10	20	30
94	4-26	2	4	8	10	2	4	20	10	30
95	4-21	1	2	4	10	5	1	12	12	20
96	4-21	1	2	4	10	5	1	12	20	12
97	4-21	1	2	4	10	5	1	20	12	12
98	4-26	1	2	4	10	5	1	15	20	30
99	4-26	1	2	4	10	5	1	30	20	15

4.2 Схемы электрических цепей постоянного тока

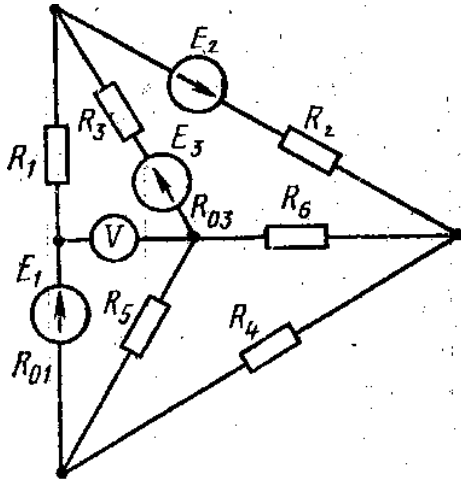


Рисунок 4.1

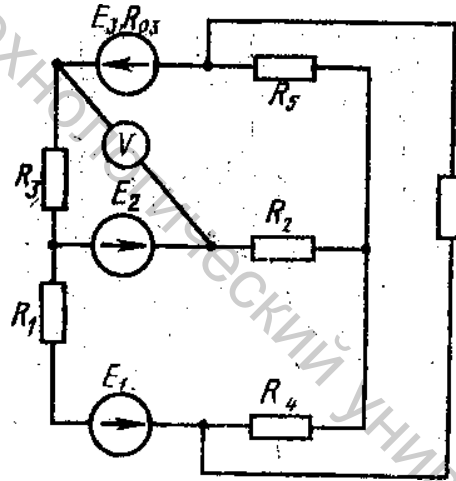


Рисунок 4.2

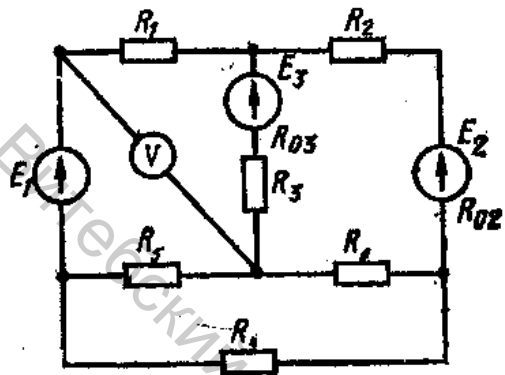


Рисунок 4.3

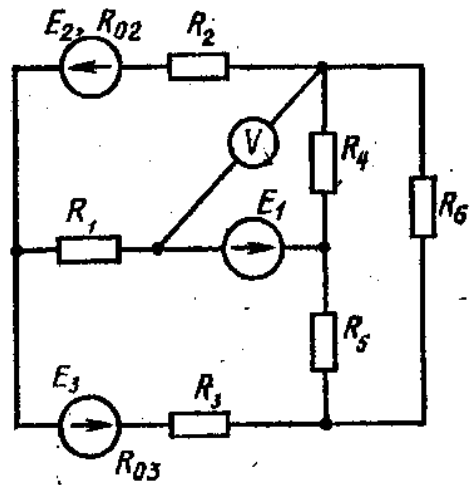


Рисунок 4.4

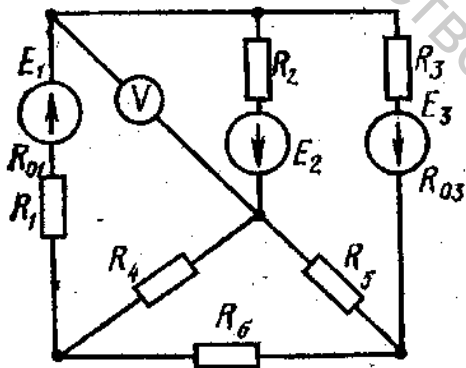


Рисунок 4.5

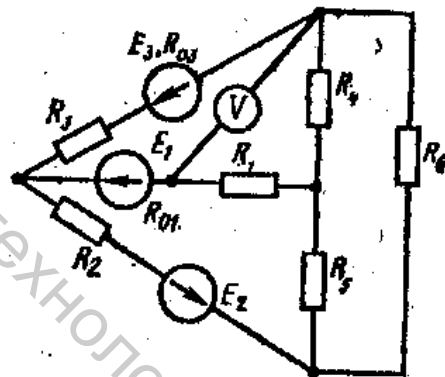


Рисунок 4.6

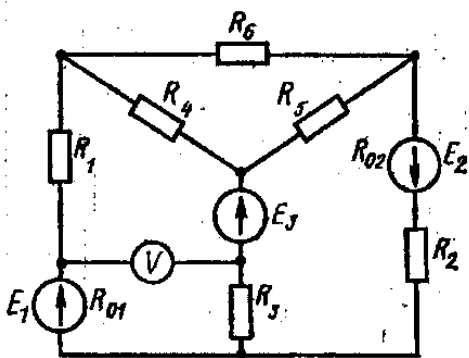


Рисунок 4.7

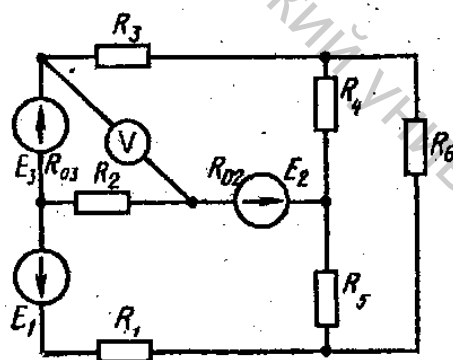


Рисунок 4.8

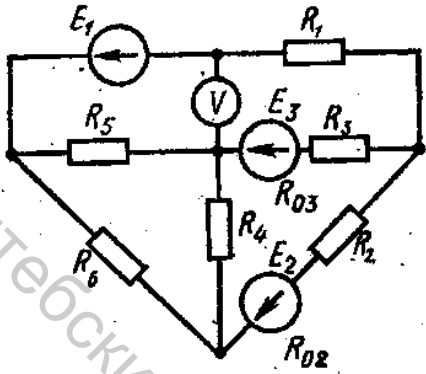


Рисунок 4.9

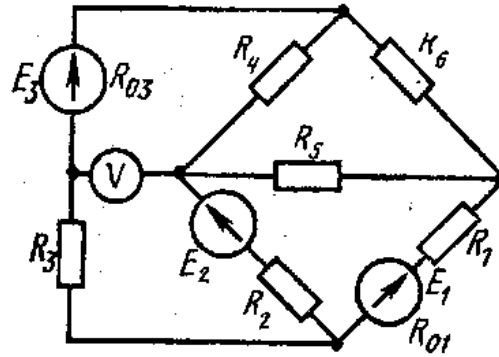


Рисунок 4.10

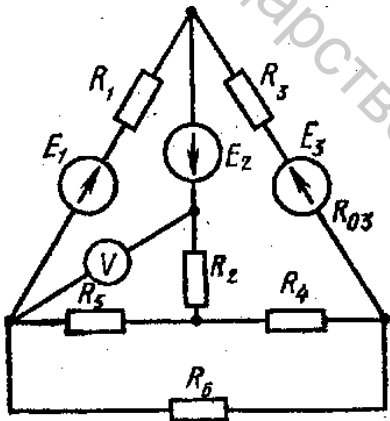


Рисунок 4.11

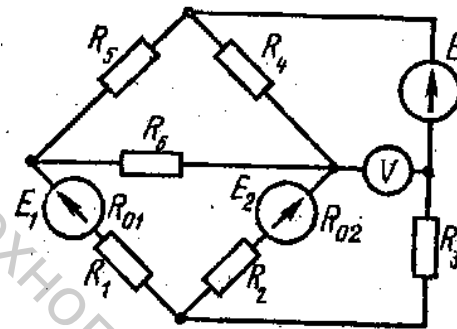


Рисунок 4.12

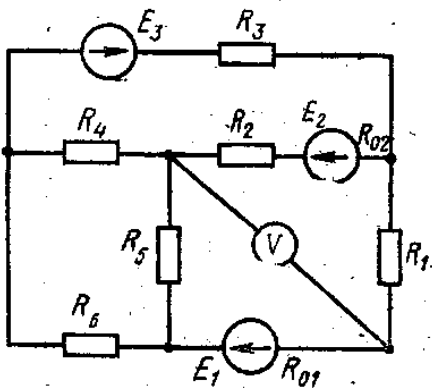


Рисунок 4.13

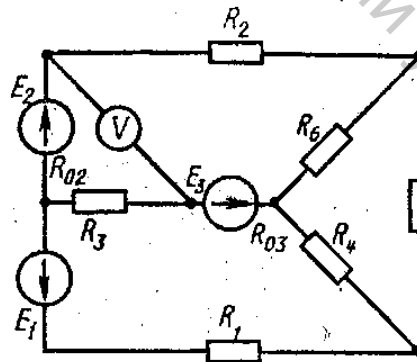


Рисунок 4.14

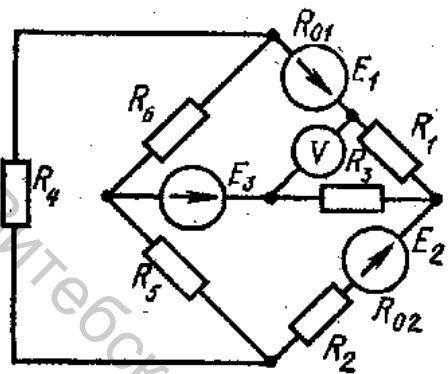


Рисунок 4.15

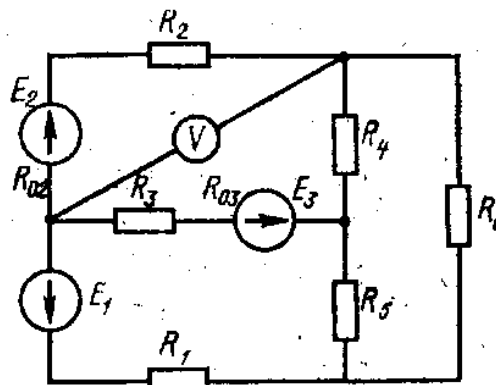


Рисунок 4.16

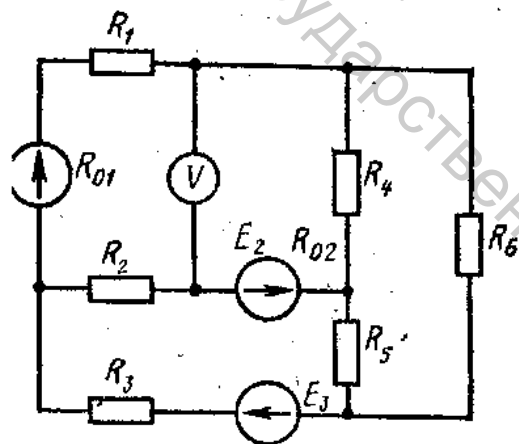


Рисунок 4.17

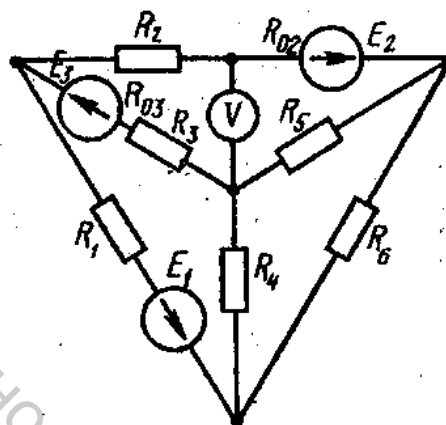


Рисунок 4.18

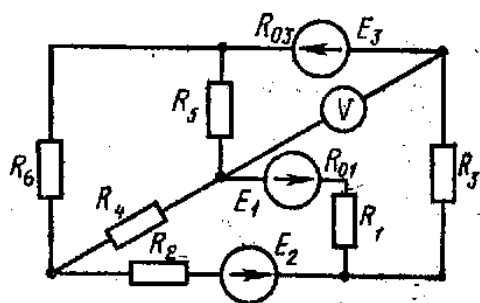


Рисунок 4.19

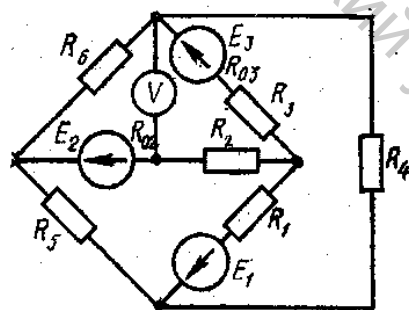


Рисунок 4.20

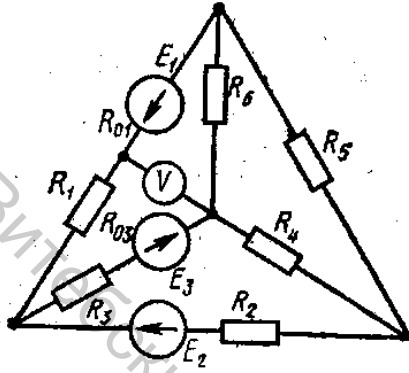


Рисунок 4.21

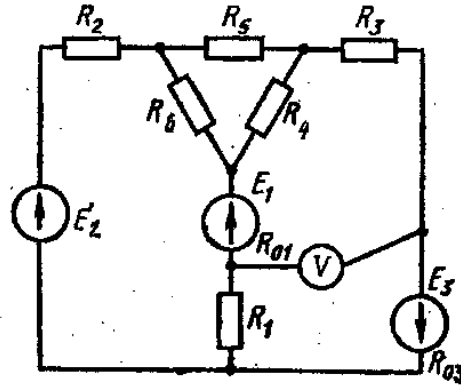


Рисунок 4.22

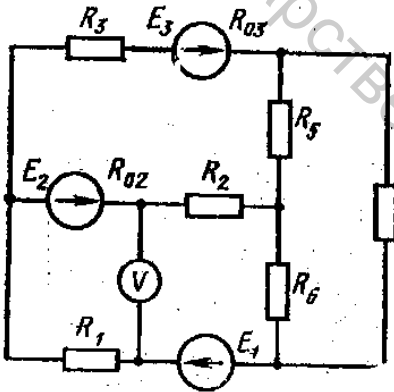


Рисунок 4.23

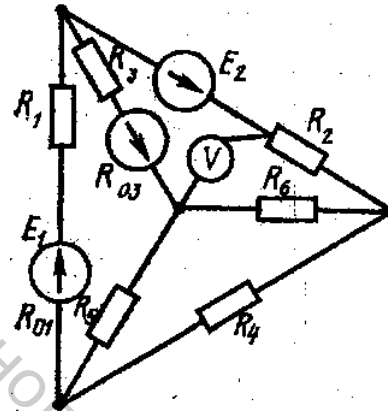


Рисунок 4.24

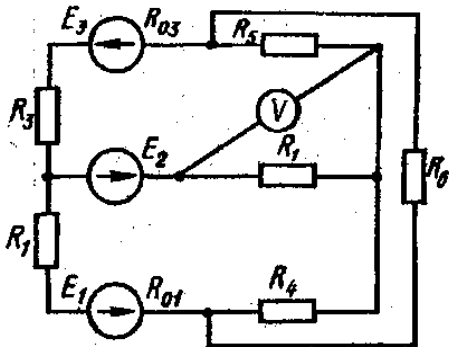


Рисунок 4.25

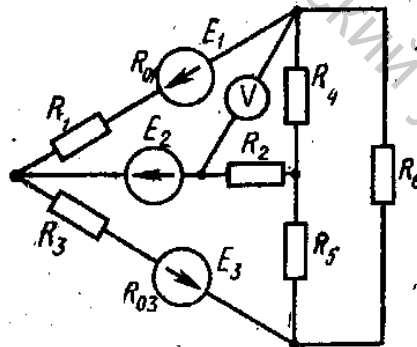


Рисунок 4.26

5 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Анализ сложной электрической цепи, при известной конфигурации цепи и параметрах составляющих ее элементов, сводится к нахождению токов во всех ветвях, а также расчета баланса мощностей, при котором алгебраическая сумма мощностей всех источников равна алгебраической сумме мощностей всех приемников. Анализ цепи может быть произведен экспериментально или аналитически – составлением и решением уравнений. Проверка правильности анализа электрической цепи проводится несколькими методами: экспериментальным подтверждением полученных в результате вычислений величин; применением другого метода анализа цепи (например, решение задачи методом непосредственного применения законов Кирхгофа можно проверить методом наложения или другими методами, применяемыми в электротехнике); проверкой сходимости баланса мощностей. Проверка является необходимым шагом для оценки правильности решения задачи.

При решении задачи любым из предложенных методов необходимо сначала упростить схему и рассчитать получившиеся в процессе преобразования значения электротехнических величин.

После преобразования рекомендуется найти все узлы схемы (узел – место электрического соединения трех и более ветвей). Необходимо помнить, что если между двумя соединениями электрических ветвей (между двумя узлами) нет никаких элементов или источников, то такие узлы являются одним узлом, так как обладают одним и тем же электрическим потенциалом. Узел на схеме может не обозначаться точкой, если соединяются три ветви, при большем количестве электрических ветвей, сходящихся в узле, изображение узла необходимо (в месте соединения необходимо ставить точку). Для пояснения решений в процессе решения задачи рекомендуется называть узлы буквами английского алфавита.

Следующим шагом является нахождение всех ветвей электрической схемы. Ветвь – это участок электрической цепи между двумя узлами, по которому протекает один и тот же ток. Следовательно, количество токов в схеме будет равно количеству ветвей.

Примечание: все элементы, находящиеся в пределах одной ветви, соединены последовательно независимо от их места в пределах этой ветви. При переходе через узел начинается другая ветвь, и последовательность соединения элементов теряется. Участок цепи между двумя узлами, на котором отсутствуют элементы, ветвью не является!

При наличии в схеме **одного** источника направление токов в ветвях указывают в соответствии с полярностью источника (для источников постоянного напряжения или тока), начиная с ветви, содержащей источник. Далее, двигаясь по направлению тока до ближайшего узла, ток разветвляют во все ветви, сходящиеся

в данном узле с сохранением его направления. Затем, двигаясь поочередно по каждой из других ветвей, разветвляются в следующем узле и так далее. Все направления токов должны стремиться к отрицательному потенциалу источника.

При наличии в схеме **двух и более** источников, направление токов указывается произвольно.

Примечание: ток, как и ветвь, начинается в одном узле и заканчивается другим узлом, ограничивающим данную ветвь. Через все элементы данной ветви протекает один и тот же ток, но на его величину оказывают влияние все элементы схемы. На схеме ток должен обозначаться стрелкой и названием тока, например, I_1 или I_a . В пределах одной ветви обозначение тока должно быть указано единожды! **Наличие последующих обозначений токов в пределах одной ветви считается ошибкой.**

При описании решения рекомендуется использовать названия ветвей или контуров в соответствии с названиями узлов, их содержащих. Например: «в ветви ab (AB)» или «в контуре abc (ABC)».

После выполнения решения и получения знаков в вычисленных значениях токов, необходимо **указать истинные направления токов в схеме**, имея в виду, что знак «минус» в вычислении тока указывает на его направление, противоположное изначально выбранному.

Параллельным является такое соединение элементов, при котором один из выводов одного элемента соединяется с выводом другого элемента в **одном узле**, и другой вывод элемента соединяется с выводом другого элемента в **другом узле**, т. е. происходит соединение между собой в **обоих узлах**. Это же правило применимо и к ветвям.

$$R_{\text{эквивалентная}} = \frac{I}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots}$$

Последовательное соединение – соединение элементов, при котором конец предыдущего элемента цепи связан с началом последующего. Ветви не могут быть соединены последовательно!

$$R_{\text{эквивалентная}} = R_1 + R_2 + \dots$$

Соединение треугольником подразумевает наличие трех узлов при соединении элементов (ветвей), где каждый элемент (ветвь) включает два узла из трех.

При соединении элементов звездой имеется общий узел (общая точка) для всех элементов (ветвей), входящих в «звезду».

Все элементы схемы и используемые в расчете электротехнические величины должны иметь читабельные надписи (названия), например, R_1 , E_1 , I_2 , U_{ab} , а также должны быть указаны необходимые в расчете направления:

направления всех токов в ветвях (в контурах), направление обхода контуров, направления напряжений (э.д.с.) в источниках. Схема должна быть читабельна и понятна (должна иметь однозначную трактовку), в соответствии с этим, а также учитывая количество элементов схемы, выбирают ее компоновку и масштаб.

6 ПРИМЕР РАСЧЕТА ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассмотрим пример анализа цепи постоянного тока электрической схемы, изображенной на рисунке 6.1.

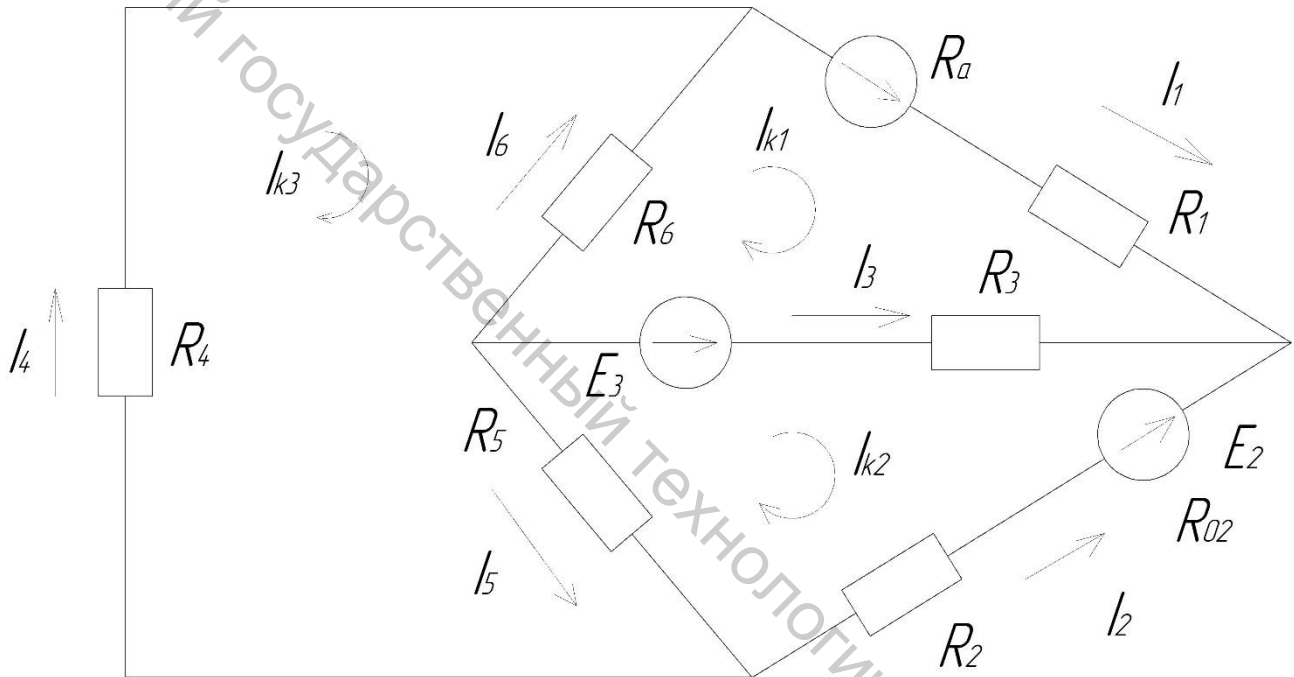


Рисунок 6.1 – Электрическая схема к примеру анализа цепи

Исходные данные:

$$E_1 = 12 \text{ В}$$

$$E_2 = 6 \text{ В}$$

$$E_3 = 40 \text{ В}$$

$$R_{01} = 1,2 \text{ Ом}$$

$$R_{02} = 0,6 \text{ Ом}$$

$$R_1 = 2 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 3 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 8 \text{ Ом}$$

$$R_4 = 5 \text{ Ом}$$

$$R_5 = 7 \text{ Ом}$$

$$R_6 = 8 \text{ Ом}$$

1. I и II закон Кирхгофа :

$$A: I_3 + I_1 + I_2 = 0$$

$$B: -I_6 - I_5 - I_3 = 0$$

$$C: I_4 + I_6 - I_1 = 0$$

$$D: I_5 - I_2 - I_4 = 0$$

II закон Кирхгофа :

$$-I_5 \cdot R_5 + I_3 \cdot R_3 + I_2(R_2 + R_{02}) = E_3 - E_2$$

$$I_6 \cdot R_6 + I_1(R_{01} + R_1) - I_3 \cdot R_3 = E_1 - E_3$$

$$I_4 \cdot R_4 - I_6 \cdot R_6 + I_5 \cdot R_5 = 0$$

2. Выразим токи через контурные токи :

$$I_1 = I_{k1}$$

$$I_2 = -I_{k2}$$

$$I_3 = I_{k2} - I_{k1}$$

$$I_4 = I_{k3}$$

$$I_5 = I_{k3} - I_{k2}$$

$$I_6 = I_{k1} - I_{k3}$$

3. Подставляем заданные значения в уравнения :

$$I_{k1}(R_6 + R_{01} + R_1 + R_3) - I_{k2} \cdot R_3 - I_{k3} \cdot R_6 = E_1 - E_3$$

$$I_{k2}(R_5 + R_2 + R_{02} + R_3) - I_{k1} \cdot R_3 - I_{k3} \cdot R_5 = E_3 - E_2$$

$$I_{k3}(R_4 + R_5 + R_6) - I_{k1} \cdot R_6 - I_{k2} \cdot R_5 = 0$$

$$r_{11} = 8 + 1,2 + 2 + 8 = 19,2$$

$$r_{12} = 8$$

$$r_{13} = 8$$

$$e_{11} = -28$$

$$r_{21} = 8$$

$$r_{22} = 7 + 3 + 0,6 + 8 = 18,6$$

$$r_{23} = 7$$

$$e_{22} = 34$$

$$r_{31} = 8; r_{32} = 7; r_{33} = 5 + 7 + 8 = 20; e_{33} = 0$$

4. Составляем матрицу :

$$\Delta = \begin{bmatrix} 19,2 & -8 & -8 \\ -8 & 18,6 & -7 \\ -8 & -7 & 20 \end{bmatrix} = \frac{14176}{5} = 2835,2$$

$$\Delta_1 = \begin{bmatrix} -28 & -8 & -8 \\ 34 & 18,6 & -7 \\ 0 & -7 & 20 \end{bmatrix} = -1700$$

$$\Delta_2 = \begin{bmatrix} 19,2 & -28 & -8 \\ -8 & 34 & -7 \\ -8 & 0 & 20 \end{bmatrix} = 4832$$

$$\Delta_3 = \begin{bmatrix} 19,2 & 8 & -28 \\ -8 & 18,6 & 34 \\ -8 & -7 & 0 \end{bmatrix} = \frac{5056}{5} = 1011,2$$

$$I_{k1} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = -\frac{1700}{2835,2} = -0,6$$

$$I_{k2} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = 1,7$$

$$I_{k3} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{1011,2}{2835,2} = 0,36$$

$$I_1 = -0,6; I_2 = -1,7; I_3 = 1,7 + 0,6 = 2,3;$$

$$I_4 = 0,36; I_5 = 0,36 - 1,7 = 1,34; I_6 = -0,6 - 0,36 = -0,96$$

5. Составим баланс мощностей :

$$P_{\text{ист}} = P_{\text{потр}}$$

$$P_{\text{ист}} = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + E_3 \cdot I_3 = 12 \cdot (-0,6) + 6 \cdot (-1,7) + 40 \cdot 2,3 = 74,6$$

$$P_{\text{потр}} = I_1^2(R_1 + R_{01}) + I_2^2(R_2 + R_{02}) + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5 + I_6^2 \cdot R_6 = \\ = 0,6^2(1,2 + 2) + 1,7^2(0,6 + 3) + 2,3^2 \cdot 8 + 0,36^2 \cdot 5 + 1,34^2 \cdot 7 + 0,96^2 \cdot 8 = \\ = 74,465$$

$$\frac{74,6 - 74,465}{74,6} \cdot 100\% = 0,1\%$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин, А. С. Электротехника / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – Москва : Высшая школа, 2003. – 542 с.
2. Электротехника / В. Г. Герасимов [и др.] ; под ред. В. Г. Герасимова. – Москва : Высшая школа, 1985. – 768 с.
3. Рыбаков, Н. С. Электротехника / Н. С. Рыбаков. – Москва : РИОР, 2007. – 160 с.
4. Борисов, Ю. М. Электротехника / Ю. М. Борисов [и др.]. – Москва : Энергоиздат, 1985. – 559 с.
5. Бутырин, П. А. Электротехника / П. А. Бутырин. – Москва : Академия, 2007. – 272 с.
6. Москаленко, В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко. – Москва : Высшая школа, 2000. – 368 с.
7. Ильинский, Н. Ф. Основы электропривода / Н. Ф. Ильинский. – Москва : МЭИ, 2007. – 224 с.
8. Справочник по электрическим машинам / Том 1 / под ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.