

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И  
ОБРАЗОВАНИЯ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ А.А. ЕЖЕВСКОГО

Факультет энергетический

Кафедра электроснабжения и электротехники

## УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Б1.Б.Б14. электротехника и электроника

Направление подготовки: 13.03.01.Теплотехника и теплоэнергетика

Профиль: «Энергообеспечение предприятий»

(уровень: бакалавриат)

Форма обучения: заочная 3 курс



Молодежный, 2019

УДК 621.38.

Составители: доцент, к.т.н. Епифанов А.Д., ст преподаватель Шпак О.Н.

Рецензенты:

Электротехника: методические указания по изучению дисциплины и выполнению контрольной работы. Предназначены для студентов 3 курса заочного отделения. Специальность –13.03.02..Электроснабжение В учебном пособии приведены методические указания по изучению дисциплины и выполнению контрольной работы. Учебное пособие соответствует требованиям государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования при реализации основной образовательной программы для подготовки бакалавров по направлению 13.03.02.Электроснабжение (Профиль «Электроэнергетика и электротехника»). Предназначено для студентов заочной и дистанционной формы обучения.

Одобрены и рекомендованы к изданию кафедрой ЭиЭ – протокол № от \_\_\_\_\_.2019 года.

Литературный редактор Тесля В.И.

@ Иркутский государственный  
аграрный университет  
имени А.А.Ежевского  
Епифанов А.Д. Шпак О.Н.  
Иркутск – 2019 г.

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина «Электротехника» в образовательной программе подготовке бакалавров по направлению 13.03.02 – «Электроснабжение» включена в базовую часть цикла дисциплин. Её освоение позволит приобрести как ряд общекультурных, общепрофессиональных, так и профессиональных компетенций: оценивать состояние электрооборудования для животноводства и растениеводства, его адаптационный потенциал и выявлять факторы улучшения условий эксплуатации, обоснованно подходить к выбору оборудования для конкретных условий повышения производства продукции.

Дисциплина состоит из тесно взаимосвязанных разделов, представляющих структурно-функциональную связь теории электрических цепей, электромагнитных и электромеханических устройств, основ электропривода и электроснабжения, а также основ электроники и импульсных устройств. Последовательное и систематическое изучение дисциплины обеспечит знание основных законов электротехники, электромеханики и электропривода, их взаимосвязь с принципами построения низковольтного электрооборудования и его использования в промышленных, сельскохозяйственных и коммунально-бытовых системах электроснабжения.

**Целями** освоения дисциплины «Электротехника» являются:

1.1. Теоретическая и практическая подготовка бакалавров в области электротехника в такой степени, чтобы они могли выбирать необходимые электротехнические, электромеханические устройства, уметь их правильно эксплуатировать.

1.2. Формирование у студентов необходимых знаний основных электротехнических законов и методов анализа электрических, магнитных и электронных цепей и электромеханических устройств.

1.3. Усвоение принципов действия, свойств, областей применения и потенциальных возможностей основных электротехнических, электромеханических, электронных и импульсных устройств.

1.4. Приобретение студентами навыков экспериментальным способом и на основе паспортных и каталожных данных определять параметры и характеристики типовых электротехнических, электромеханических, электронных и импульсных устройств.

**Задачами** освоения дисциплины «Электротехника» являются:

1.1. Формирование у студентов знаний законов электротехники; основ теории электрических цепей постоянного и переменного токов; магнитных цепей и электромагнитных устройств;; конструкций принципов действия и основных свойств важнейших электротехнических аппаратов (электрических машин, трансформаторов измерительных приборов и управления электроустановками); основ электропривода; основ электроснабжения и электробезопасности; электрооборудования при производстве электрической энергии и электротехнологии в электроэнергетике.

1.2. формирование у студентов умения читать электротехническую литературу (описания, инструкции, схемы); сформулировать требования к электротехническому оборудованию при составлении технического задания бакалавру-теплотехнику; производить электрические измерения; выбирать стандартное и вспомогательное электротехническое оборудование; научить применять теорию при решении практических задач по расчету электрических цепей, аппаратов, электрических машин электронных устройств и анализу и диагностике; привить экспериментальные навыки, необходимые для работы в сфере ТЭК.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Общая электротехника и электроника входит в базовую часть блока 1 учебного плана (Б1.Б.10).

2.1 *Перечень разделов дисциплин, усвоение которых необходимо для изучения общей электротехники и электроники:*

Математика: линейная алгебра, теория функций комплексного переменного, дифференциальное и интегральное исчисление, дифференциальные уравнения, интегральные преобразования Фурье и Лапласа.

Физика: механика (вращательное движение), электричество и магнетизм.

Информатика: Вычислительные методы решения: систем линейных уравнений с вещественными и комплексными коэффициентами; дифференциальных уравнений 1-го и 2-го порядков; операций с матрицами; простейшие навыки работы на компьютере и в сети Интернет, умение использовать прикладное программное обеспечение, в частности: пакеты универсальных математических программ, текстовый процессор и редактор формул (для оформления отчетов).

2.2 *Минимальные требования к «входным» знаниям, необходимым для успешного усвоения данной дисциплины:*

Усвоение программ по указанным ниже разделам математики, физики и информатики, в том числе:

2.2.1. Высшая математика – дифференциальные и интегральные исчисления, теория функций комплексного переменного;

2.2.2. Физика – электрический ток, электромагнетизм, физика твердого тела;

2.2.3. Информатика – умения пользоваться перечисленными программами.

2.3 *Дисциплины, для которых освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее:*

Знания и умения, полученные в результате освоения дисциплины «Электротехника и электроника», являются необходимыми для изучения следующих дисциплин: «Методы электрических измерений», «Электроснабжение предприятий и электрические сети», «Электрические машины и аппараты», «Эксплуатация энергооборудования и систем энергообеспечения».

Дисциплина изучается на 3 курсе.

### 3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

В результате освоения дисциплины обучающийся должен овладеть знаниями, умениями и навыками в целях приобретения следующих компетенций:

Трудовое действие <sup>1</sup>	Наименование компетенции, необходимой для выполнения трудового действия (планируемые результаты освоения ОП)	Планируемые результаты обучения по дисциплине, характеризующие этапы формирования компетенции
<b>Общекультурные компетенции</b>		
	ОК – 7 - способностью к самоорганизации и саморазвитию	<b>В области знания и понимания (А)</b>
		<b>Знать:</b> устройство, принцип работы, характеристики трансформаторов, электрических машин, электроизмерительных приборов и электронных устройств
		<b>В области интеллектуальных навыков (В)</b>
		<b>Уметь:</b> использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности.
		<b>В области практических умений (С)</b>
	<b>Владеть:</b> навыками самостоятельной работы с литературой для поиска информации об отдельных определениях, понятиях и терминах, объяснение их применения в практических ситуациях; решения теоретических и практических типовых и системных задач, связанных с профессиональной деятельностью	
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>		

	<p><b>ОПК – 2</b> - способностью способностью демонстрировать базовые знания в области естественнонаучных дисциплин, готовностью выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности; применять для их разрешения основные законы естествознания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования</p>	<p><b>В области знания и понимания (А)</b></p>
--	---	--

		<p><b>Знать:</b> электротехническую терминологию и символику; основные явления и законы электротехники; методы анализа электрических цепей; перспективы развития современных электронных устройств; буквенные обозначения и единицы измерения электрических и магнитных величин; основы электропривода; основы электроснабжения;</p> <p><b>В области интеллектуальных навыков (В)</b></p> <p><b>Уметь:</b> оценить состояние электрооборудования, электронных приборов и устройств и определить факторы улучшения качества его эксплуатации и повышения уровня производства энергии; обеспечить оптимальный выбор электрооборудования, электронных приборов и устройств, применяемых на объектах энергоснабжения.</p> <p><b>В области практических умений (С)</b></p> <p><b>Владеть:</b> навыками практического применения методов расчёта режимов работы электродвигателей, электрических аппаратов и</p>
--	--	--

		электронных устройств; определения их параметров и характеристик по справочным данным и простейшим экспериментальным способам; произведения измерений основных электрических и неэлектрических величин;
<b>Профессиональные компетенции</b>		
	<b>ПК – 4</b> - способностью к проведению экспериментов по заданной методике, обработке и анализу полученных результатов с привлечением соответствующего математического аппарата	<b>В области знания и понимания (А)</b>

		<b>Знать:</b> основное электрооборудование при производстве электрической энергии и электротехнологии в электроэнергетике;
		<b>В области интеллектуальных навыков (В)</b>
		<b>Уметь:</b> выбирать типовые схемные решения систем электроснабжения зданий и сооружений бытового и с/х назначения, а также низковольтного электрооборудования в распределительных сетях
		<b>В области практических умений (С)</b>
		<b>Владеть:</b> навыками включения электрических приборов, аппаратов, электродвигателей, управления ими и контроля их эффективной и безопасной работы; планирования и практического выполнения действий, составляющих указанные умения в отведенное на выполнение контрольного задания время; моделирования объектов и электромагнитных процессов с использованием современных средств вычислительной техники.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 216 часов – 6 з.е.

#### 4. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. Изучение электротехники связано с некоторыми трудностями, поскольку о процессах, происходящих в различных электрических цепях и устройствах, можно судить по наблюдениям за показаниями приборов. Теория таких процессов излагается на математической основе; следовательно, изучение электротехники требует от студента умения свободно пользоваться математическим аппаратом.

2. Изучение курса должно вестись систематически и сопровождаться составлением подробного конспекта. В конспект рекомендуется включать все виды учебной работы: лекции, самостоятельную проработку учебника, упражнения, решение задач, лабораторный практикум, ответы на вопросы самопроверки.

3. После изучения какого-либо раздела по учебнику или конспекту лекции рекомендуется по памяти записать в тетрадь определения, выводы формул, начертить схемы, графики и ответить на вопросы для самопроверки. Такой метод дает возможность проверить усвоение материала.

4. После усвоения теории по одной теме нужно разобрать (по задачку, указанному в списке литературы) решения задач, относящихся к этой теме, и самостоятельно решить несколько задач. Решение задач способствует лучшему пониманию и закреплению теоретических знаний. Контрольные работы служат для этой же цели. Их следует рассматривать не как дополнительную нагрузку, а как одну из форм изучения и повторения курса.

5. Такую же цель, но в ином плане, преследуют лабораторные занятия. Проводимые в электротехнической лаборатории несложные исследования дают возможность непосредственно наблюдать явления и процессы, теория которых излагается в учебниках и на лекциях. Поэтому студент должен активно участвовать в выполнении всех лабораторных работ.

6. При изучении теории электротехнических цепей и машин, а также методов решения задач главное внимание следует уделять разбору происходящих в них физических процессов. Простое запоминание формул, характеристик, уравнений недостаточно для понимания происходящих в цепях и устройствах явлений.

7. Многие законы и определения электротехники являются следствием более общих законов и определений материалистической философии. Ряд таких примеров и иллюстраций приводится на лекциях, практических и лабораторных занятиях. Их следует включать в свой конспект и при самостоятельной работе в них нужно разобраться, понять и усвоить.

8. Следует иметь в виду, что все темы программы являются в равной мере важными. Как и в любой другой науке, нельзя приступать к изучению последующих глав, не усвоив предыдущих. Теоретический материал каждой темы имеет существенное практическое назначение.

#### 4.1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

Задачи по общей электротехнике весьма разнообразны и не представляется возможным предложить единую методику их решения. Ниже приводятся лишь общие рекомендации.

1. Уяснить содержание задачи, изобразить ее электрическую схему (если она не задана), выписать заданные и искомые величины.

2. Проанализировать схему электрической цепи: выяснить возможности ее упрощения и наглядного изображения, уяснить, сколько ветвей  $N_B$  узлов  $N_Y$  и независимых контуров  $N_K$  она содержит.



3. Разметить схему, т.е. обозначить все ее узлы, показать заданные и принятые направления ЭДС, напряжений и токов. Индексы токов в ветвях рекомендуется выбирать такими же, как индексы у элементов данной ветви.

4. Составить план решения задачи. При этом полезно изучить рекомендованную методику решения задач данного типа, приведенных в настоящем пособии, просмотреть задачи, решенные в упражнениях или решение которых дано в задачниках.

5. Обязательно сопровождать решение задачи пояснительным текстом, т.е. указывать законы, на основании которых составлены уравнения, смысл преобразований в схемах и формулах, последовательность действий, комментировать полученные результаты.

6. Во избежание ошибок при числовых расчетах все значения величин подставлять в формулы в основных единицах СИ (В, А, Ом, Ф, Гн и т.д.), для чего все производные единицы следует перевести в основные, например:  $1 \text{ кВ} = 10^3 \text{ В}$ ,  $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ ,  $1 \text{ мГн} = 10^{-3} \text{ Гн}$  и т.д.

7. Проанализировать в процессе решения задачи полученные результаты: реальны ли найденные значения величин (КПД меньше единицы, сопротивление положительно), возможны ли подобные режимы, правильны ли единицы полученных физических величин.

8. Проверить правильность полученных результатов каким-либо методом, например, решив задачу другим способом, составив баланс мощностей и т.п.

## 5. Содержание дисциплины

### 5.1. Основные законы и методы расчета линейных и нелинейных электрических цепей постоянного тока.

5.1.1. Основные понятия, определения и законы электрических цепей.

Элементы цепи и её топологические параметры. Схемы замещения источников питания и их взаимное преобразование. Законы Ома. Законы Кирхгофа. Классификация цепей. Баланс мощностей.

5.1.2. Методы анализа линейных цепей постоянного тока. Эквивалентные преобразования участков цепи (последовательное, параллельное, смешанное, звезда-треугольник, треугольник-звезда). Метод законов Кирхгофа. Потенциальная диаграмма. Метод контурных токов. Метод узловых напряжений.

5.1.3. Графический метод анализа простейших цепей постоянного тока с нелинейными элементами.

### 5.2. Электрические цепи синусоидального тока.

5.2.1. Основные параметры синусоидально изменяющихся величин. Представление (в виде временных диаграмм, векторов, комплексных чисел) синусоидальных функций. Среднее и действующее значение синусоидальных величин. Метод расчета с использованием векторных диаграмм. Анализ электрических процессов в цепях с резистивным, индуктивным и емкостным элементами. Треугольники сопротивлений и проводимостей цепи. Мощности цепей синусоидального тока. Коэффициент мощности цепи.

5.2.2. Комплексный метод анализа цепей синусоидального тока.

5.2.3. Резонансные явления в цепях синусоидального тока.

5.2.4. Основные определения и классификация четырехполюсников.

5.2.5. Причины возникновения и основные принципы анализа переходных процессов. Переходные процессы в  $RL$  и  $RC$  цепях.

### 5.3. Трехфазные цепи.

5.3.1. Способы изображения и соединения фаз трехфазного источника. Фазные и линейные напряжения. Трехпроводные и четырехпроводные схемы соединения приемников звездой. Трехпроводные схемы соединения приемников треугольником.

5.3.2. Мощности трехфазной цепи.

### 5.4. Магнитные цепи.

- 5.4.1. Основные магнитные величины и свойства ферромагнитных материалов. 4.2.
- 5.4.2. Основные законы магнитных цепей.
- 5.4.3. Методы расчета магнитных цепей.
- 5.5. Трансформаторы.**
- 5.5.1. Устройство и принцип работы однофазного трансформатора.
- 5.5.2. Анализ электромагнитных процессов в однофазном трансформаторе. Схема замещения трансформатора.
- 5.5.3. Рабочие характеристики трансформатора. Трехфазные трансформаторы. Сварочные трансформаторы. Автотрансформаторы.
- 5.6. Электрические машины.**
- 5.6.1. Машины постоянного тока (МПТ). Устройство и принцип действия МПТ.
- 5.6.2. Схемы возбуждения МПТ. Работа МПТ в режиме генератора и двигателя. Эксплуатационные характеристики МПТ. Стартерные двигатели.
- 5.6.3. Асинхронные двигатели (АД). Устройство и принцип действия трехфазного АД.
- 5.6.4. Механические и рабочие характеристики АД. Пуск и регулирование скорости АД.
- 5.6.5. Синхронные машины (СМ). Устройство СМ. Работа СМ в режиме генератора и двигателя. Трехфазные и многофазные синхронные генераторы.

## 6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕМ КУРСА

### 6.1. Основные законы и методы расчета линейных и нелинейных электрических цепей постоянного тока.

6.1.1. Прежде чем приступить к изучению темы, необходимо повторить по учебнику физики определения основных электрических величин: ЭДС, напряжения, потенциала, разности потенциалов, тока.

6.1.2. Следует выписать и усвоить основные законы цепей постоянного тока: Ома, Кирхгофа, Джоуля-Ленца. При этом важно уяснить разницу закона Ома для пассивного и активного участков цепи. При использовании закона Ома нужно иметь в виду, что если направление величины  $U$  или  $E$  не совпадает с выбранным направлением тока, то в формулах закона Ома знак этих величин изменяется на отрицательный.

6.1.3. Законы Кирхгофа - основные законы электротехники.

Первый закон Кирхгофа применяется к узлам электрической цепи: алгебраическая сумма токов в узле равна нулю, т.е.

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0;$$

где  $n$  - число ветвей, соединенных в данном узле. Токи одного направления, например притекающие к узлу, записываются со знаком плюс, токи противоположного направления, например оттекающие от узла, - со знаком минус.

Второй закон Кирхгофа применяется к контурам электрической цепи: алгебраическая сумма ЭДС в контуре электрической цепи равна алгебраической сумме напряжений в этом контуре, т.е.

$$\sum_{k=1}^m E_k = \sum_{k=1}^p R_k I_k$$

где  $t$  - число ЭДС в контуре;  $p$  - число напряжений в контуре. ЭДС и напряжения берут со знаком плюс, если их направление совпадает с принятым направлением обхода контура.

6.1.4. Закон Джоуля-Ленца: для пассивных участков цепи постоянного тока

$$W = U I t:$$

где  $W$  - потребляемая энергия;  $U$  - напряжение на пассивном участке;  $I$  - ток;  $t$  - время. Мощность  $P = W/t = UI = I^2R = U^2/R$ . Мощность, вырабатываемая источником ЭДС,  $P_{WСД} = EI$ . Если ЭДС  $E$  и ток  $I$  имеют разные знаки, то мощность источника отрицательна. Это означает, что данный источник не генерирует, а потребляет энергию.

6.1.5. Следует понять принципиальное отличие между источниками напряжения и тока. Если внутреннее сопротивление источника  $R_{вт}$  намного меньше сопротивления приемника  $R_{п}$ , то  $E = R_{вт}I + R_{п}I$ . В этом случае  $E = U = R_{п}I = \text{const}$ , т.е. напряжение практически - величина постоянная. Такой источник называется источником напряжения. Если внутреннее сопротивление  $R_{вт}$  намного больше сопротивления приемника  $R_{п}$ , то  $E = R_{вт}I + R_{п}I$ , т.е.  $I = G_{вт}E$ . В этом случае ток источника практически не зависит от сопротивления  $R_{п}$  и  $I = \text{const}$ . Такой источник называется источником тока.

6.1.6. Потенциальной диаграммой называется график  $V(R)$  распределения потенциала в цепи в функции сопротивления участков цепи. Для построения потенциальной диаграммы задаются положительными направлениями тока, потенциал одной из точек цепи принимают равным нулю, рассчитывают потенциалы всех остальных точек цепи и строят график  $V(R)$ .

Контрольные вопросы.

1. Чем отличаются между собой источники напряжения и тока? Изобразите для них схемы питания двух параллельных приемников.
2. Начертите схему электрической цепи, состоящей из источников питания, потребителя (не содержащего ЭДС) и соединительных проводов. Обозначьте сегменты схемы и напишите выражение закона Ома для всей цепи.
3. Напишите закон Ома для участка цепи.
4. Напишите закон Ома для участка цепи через проводимости.
5. Напишите обобщенный закон Ома (для активного участка цепи).
6. Сформулируйте законы Кирхгофа и напишите их математические выражения.
7. Выведите выражение для эквивалентного сопротивления участка цепи, состоящего из  $n$  последовательно соединенных сопротивлений.
8. Выведите выражение для эквивалентного сопротивления участка цепи, состоящего из  $n$  параллельно соединенных сопротивлений.
9. Сформулируйте определения понятий линейной и нелинейной цепей постоянного тока.
10. Напишите выражение баланса мощности для цепи с несколькими источниками питания и несколькими резисторами.
11. Изложите сущность методов расчета разветвленных цепей с несколькими источниками ЭДС; методы непосредственного применения законов Кирхгофа, контурных токов и узлового напряжения.
12. Почему при расчете цепи, содержащей  $n$  узлов, по первому закону Кирхгофа можно составить только  $n - 1$  уравнений?
13. Можно ли для контура, содержащего только пассивные элементы, составить уравнение по второму закону Кирхгофа? Какой вид оно будет иметь?
14. На чем основывается метод наложения? Как производится расчет цепи по этому методу?
15. Что называется двухполюсником (активным и пассивным)?
16. Изложите на примере расчета простейшей нелинейной цепи сущность графоаналитического метода.

## 6.2. Электрические цепи синусоидального тока.

6.2.1. В однофазных электрических цепях в большинстве случаев действуют ЭДС, изменяющиеся по синусоидальному закону, поэтому в линейных однофазных цепях токи и напряжения также синусоидальны.

6.2.2. Мгновенное значение синусоидально изменяющейся величины  $a$  можно выразить аналитически:  $a = A_m \sin(\omega t + \Psi_a)$ , где  $A_m$  — амплитудное значение;  $\omega$  - угловая частота;  $\Psi_a$  - начальная фаза. Аналогично записываются выражения для мгновенных значений ЭДС  $e = E_m \sin(\omega t + \Psi_e)$ , напряжения  $u = U_m \sin(\omega t + \Psi_u)$ , тока  $i = I_m \sin(\omega t + \Psi_i)$ .

Известно, что синусоидально изменяющаяся величина может быть условно (символически) представлена в виде комплексного числа  $A$  ( $E, U, I$ ), которое записывается в трех формах: показательной  $\underline{A} = Ae^{i\psi_a} = A(\cos\psi_a + i\sin\psi_a) = A' + iA''$ , тригонометрической  $\underline{A} = A(\cos\psi_a + i\sin\psi_a)$  и алгебраической  $\underline{A} = A' + iA''$ . Здесь  $A = A_m/\sqrt{2}$  - действующее значение синусоидальной величины;  $\psi_a$  - начальная фаза;  $A'$ ,  $A''$  - действительная и мнимая составляющие комплексного числа. Такие же выражения можно записать для амплитудных величин. Переход от показательной к алгебраической форме записи выполняется по формулам  $A' = A\cos\psi_a$ ,  $A'' = A\sin\psi_a$  обратный переход — по формулам

$$A = \sqrt{(A')^2 + (A'')^2} \quad \psi_a = \arctg \frac{A''}{A'} \text{ при } A' > 0 \quad \psi_b = \arctg \frac{A''}{A'} + 180^\circ \text{ при } A' < 0$$

Комплексные числа можно также представить как векторы на комплексной плоскости. Алгебраические действия над синусоидальными величинами можно заменить действиями над комплексными величинами или над векторами. Поэтому алгебра комплексных чисел является основным математическим аппаратом при расчете цепей однофазного синусоидального тока, а векторная алгебра - наглядным средством изображения синусоидально изменяющихся величин.

6.2.3. При расчете цепей синусоидального тока, в отличие от расчета цепей постоянного тока, необходимо учитывать не один, а три пассивных элемента: резистивный, индуктивный и емкостный, которые характеризуются соответственно активным сопротивлением  $R$ , индуктивностью  $L$  (индуктивным сопротивлением  $X_L = \omega L$ ) и емкостью  $C$  (емкостным сопротивлением  $X_C = 1/\omega C$ ). где  $\omega$ ; - угловая частота. Индуктивное  $X_L$  и емкостное  $X_C$  сопротивления определяют не только значения токов в цепи, но также сдвиг фаз между напряжениями и токами. При включении в цепь индуктивности  $L$ , часто говорят об индуктивном сопротивлении, индуктивном падении напряжения или индуктивной составляющей напряжения. Однако в действительности в этих понятиях есть условность. При включении в цепь катушки, обладающей активным сопротивлением  $R$  и индуктивностью  $L$ , на переменное синусоидальное напряжение уравнение по второму закону Кирхгофа записывается в виде  $u = RI + (-e_L)$ . Это объясняется следующим образом: часть напряжения и падает в сопротивлении  $R$  (т.е.  $RI$ ), а остальная часть расходуется на компенсацию возникающей ЭДС самоиндукции ( $e_L$ ). Численно же величина действующей ЭДС  $E_L = -\omega LI$ . Так как  $\omega I$ , выражается в омах, то  $X_L = \omega L$  называют реактивным индуктивным сопротивлением, а произведение  $X_L I$  - индуктивным падением напряжения (по аналогии с произведением  $RI$ ). Аналогично  $X_C = 1/\omega C$  называют емкостным сопротивлением, а  $X_C I$  — емкостным падением напряжения.

6.2.4. При расчете цепей синусоидального тока все законы и методы расчета цепей постоянного тока действительны в комплексной форме. Так, первый закон Кирхгофа в

комплексной форме имеет вид  $\sum_{k=1}^n \underline{I}_k = \underline{0}$ ; второй закон Кирхгофа  $\sum_{k=1}^m \underline{E}_k = \sum_{k=1}^p \underline{U}_k$ ;

эквивалентное комплексное сопротивление  $Z_{\text{ЭК}}$  при последовательном соединении элементов  $R, L$  и  $C$

$$\underline{Z}_{\text{ЭК}} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_n = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) + j(X_1 + X_2 + \dots + X_n),$$

где  $n$  - число последовательно соединенных элементов;

Эквивалентная комплексная проводимость

$$\underline{Y}_{\text{ЭК}} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \dots + \underline{Y}_n = (G_1 + G_2 + \dots + G_n) + j(B_1 + B_2 + \dots + B_n)$$

где  $n$  - число параллельно соединенных ветвей.

При смешанном соединении используют расчетные формулы последовательного и параллельного соединений активных и реактивных сопротивлений. Следует обратить внимание на то, что понятия активной и реактивной проводимости имеют условно-расчетный характер. Например, для параллельно включенной катушки с сопротивлением  $R$

и индуктивностью  $L$ , активная проводимость, определяемая по формуле  $G = R/(R^2 + X_L^2)$  включает в себя не только активное сопротивление  $R$ , но и индуктивное сопротивление  $X_L$ .

6.2.5. Изучая явление резонанса, необходимо усвоить следующее. При резонансе напряжение и ток на зажимах цепи всегда совпадают по фазе. Настройка же цепи на резонанс зависит от схемы соединений катушки индуктивности и конденсатора. Для последовательной цепи условием резонанса является равенство индуктивного и емкостного сопротивлений:  $X_L = X_C$ . Для цепи, содержащей параллельный контур, в одной из ветвей которого включена индуктивность, а в другой - емкость, условием резонанса является равенство реактивных проводимостей ветвей:  $B_L = B_C$ . При резонансе напряжений (последовательное соединение элементов). резонансная частота  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  нет, носит активный характер ( $\phi=0$ ), полное сопротивление  $Z = \sqrt{R^2 + (X_{L1} - X_C)^2}$  равно активному сопротивлению и минимально, ток в цепи  $I = U/R$  максимальный, напряжение на реактивных элементах цепи при  $R < X_L = X_C$  больше, чем напряжение, подведенное к зажимам цепи, потребляемая цепью активная мощность  $P = RI^2$  максимальна.

При резонансе токов (параллельное соединение элементов  $R_1, L$  и  $R_2, C$ ) резонансная частота  $\omega' = \omega_0 \sqrt{\frac{L/C - R_1^2}{L/C - R_2^2}}$  зависит как от параметров  $L, C$ , так и от активных

сопротивлений  $R_1, R_2$ . Цепь носит активный характер ( $\phi=0$ ), полная проводимость  $Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = G = G_1 + G_2$  равна сумме активных проводимостей ветвей и минимальна, ток в общей части цепи  $I = YU = GU = I_a$  минимален и равен активной составляющей тока, реактивные составляющие тока в ветвях равны  $U_L = U_C$ , при  $G < B_L = B_C$  они больше, чем ток в общей части цепи, реактивные мощности элементов  $L$  и  $C$  равны  $Q_L = Q_C = B_L U^2 = B_C U^2$

6.2.6. Нужно понять и усвоить, что резонанс напряжений можно получить либо изменением частоты питания  $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$  либо подбором значения величины  $L = 1/\omega_0^2 C$ , либо подбором значения величины  $C = 1/\omega_0^2 L$ . При неизменных  $L$  и  $C$  зависят от частоты, т.е.

$$X_L = 2\pi fL = k_1 f \quad X_C = 2/\pi fC = k_2 / f$$

Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте определение понятия действующего значения синусоидального тока.
2. Как определяется среднее значение синусоидального тока?
3. Мгновенное значение тока  $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ . Запишите действующее значение тока в комплексной форме.
4. Как осуществить переход от алгебраической формы записи комплексного тока к мгновенному значению?
5. Как зависят индуктивное и емкостное сопротивления от частоты?
6. От чего зависит угол сдвига фаз в электрической цепи однофазного синусоидального тока?
7. Почему при постоянном токе включение в цепь конденсатора равносильно разрыву в цепи, а при переменном токе цепь остается замкнутой (ток через емкость проходит)?
8. Определите условия наступления в цепи резонанса напряжений и начертите для этого режима векторную диаграмму.
9. Напишите закон Ома и законы Кирхгофа в комплексной форме, а также выражение эквивалентного комплексного сопротивления для смешанного соединения сопротивлений.
10. Начертите треугольники сопротивлений и проводимостей и выведите формулы перехода от сопротивлений к проводимостям и обратно.

11. Напишите условие наступления в цепи резонанса токов, выраженное через сопротивления параллельных ветвей.
12. Начертите треугольник мощностей и напишите формулы для расчета мощностей.

### 6.3. Трехфазные цепи.

6.3.1. Трехфазные электрические сети в зависимости от числа проводов, соединяющих источник и приемник, бывают четырехпроводными и трехпроводными. Все величины, относящиеся к источникам, записываются с индексами, обозначенными прописными буквами ( $A, B, C, N$ ), а величины, относящиеся к приемникам, с индексами, обозначенными строчными буквами ( $a, b, c, n$  для схемы "звезда" и  $ab, bc, ca$  для схемы "треугольник").

6.3.2. В четырехпроводных сетях к приемникам подводятся два напряжения: линейное  $U_l$  (напряжение между линейными проводами) и фазное  $U_\phi$  (напряжение между линейными и нейтральным проводом), которые связаны между собой соотношением  $U_l = \sqrt{3} U_\phi$   
 $\underline{U}_A = U_\phi e^{j0^\circ}$ ,  $\underline{U}_B = U_\phi e^{-j120^\circ}$ ,  $\underline{U}_C = U_\phi e^{j120^\circ}$  (здесь начальная фаза напряжения  $U_A$  принята равной нулю).

Комплексные линейные напряжения

$$\underline{U}_{AB} = U_l e^{j30^\circ}, \underline{U}_{BC} = U_l e^{-j90^\circ}, \underline{U}_{CA} = U_l e^{j150^\circ}.$$

. Для токов в четырехпроводной системе справедливо уравнение первого закона Кирхгофа:  $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = \underline{I}_N$ .

6.3.3. В трехпроводных сетях к приемникам подводятся только линейные напряжения:  $\underline{U}_{AB}$ ,  $\underline{U}_{BC}$ ,  $\underline{U}_{CA}$ .

Токи в трехпроводной системе связаны уравнением первого закона Кирхгофа:  $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$ .

Положительные направления токов  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$  в линейных проводах приняты от источника к приемнику, а в нейтральном проводе  $\underline{I}_N$  - от приемника к источнику. В схеме "звезда" фазные  $\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$  совпадают по направлению с линейными, а в схеме "треугольник" токи  $\underline{I}_{ab}, \underline{I}_{bc}, \underline{I}_{ca}$  приняты направленными по часовой стрелке.

6.3.4. Приемник электрической энергии могут быть соединены по схеме "звезда" с нейтральным проводом, "звезда" без нейтрального провода и "треугольник". В каждой схеме соединений различают симметричный и несимметричный режимы. При симметричном режиме комплексные соединения всех фаз одинаковы, при несимметричном - разные.

6.3.5. При решении задач необходимо, прежде всего, установить схему соединений приемников и выяснить, симметрична или несимметрична нагрузка. Расчет трехфазной цепи в симметричном режиме сводится к расчету одной фазы и выполняется аналогично расчету цепи симметричного тока.

Так, ток в фазе при соединении приемника звездой или звездой с нейтральным проводом, например в фазе  $a$ ,  $\underline{I}_a = \underline{U}_a / \underline{Z}_a$ , а при соединении приемника треугольником, например в фазе  $ab$ ,  $\underline{I}_{ab} = \underline{U}_{ab} / \underline{Z}_{ab}$ . В остальных фазах значения токов (их модули) те же, а начальные фазы сдвинуты на  $120^\circ$ .

В схеме "звезда" с нейтральным проводом при несимметричной нагрузке режим работы каждой фазы независим от работы других фаз и потенциал нейтральной точки приемника при любой нагрузке равен нулю ( $U_N = 0$ ), поэтому токи в фазах

$$\underline{I}_a = \underline{U}_a / \underline{Z}_a, \underline{I}_b = \underline{U}_b / \underline{Z}_b, \underline{I}_c = \underline{U}_c / \underline{Z}_c.$$

Ток в нейтральном проводе  $\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = \underline{I}_N$ . Он также может быть найден из векторной диаграммы.

Полная мощность:  $S = 3U_\phi I_\phi = \sqrt{3} U_l I_l$  и  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ ;

При несимметричной нагрузке активная мощность:  $P = P_a + P_b + P_c$  - для схемы "звезда" и  $P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}$  - для схемы "треугольник";

Реактивная мощность:  $Q = Q_a + Q_b + Q_c$  - для схемы "звезда"  $Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca}$  - для схемы "треугольник";

полная мощность:

$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ , но  $S \neq S_a + S_b + S_c$ , или  $S \neq S_{ab} + S_{bc} + S_{ca}$ ;

комплексная мощность:

$\underline{S} = P + jQ = \underline{S}_a + \underline{S}_b + \underline{S}_c = \underline{U}_a \underline{I}_a^* + \underline{U}_b \underline{I}_b^* + \underline{U}_c \underline{I}_c^*$ , или

$\underline{S} = P + jQ = \underline{S}_{ab} + \underline{S}_{bc} + \underline{S}_{ca} = \underline{U}_{ab} \underline{I}_{ab}^* + \underline{U}_{bc} \underline{I}_{bc}^* + \underline{U}_{ca} \underline{I}_{ca}^*$ .

Вопросы для самопроверки

1. В трех фазную линию включены два приемника по схеме "треугольник". Начертите соответствующую схему и введите в нее измерительные приборы для измерения линейных и фазных токов и напряжений.
2. Начертите такую же схему для приемников, соединенных по схеме "звезда" с нейтральным проводом.
3. Напишите выражения для мгновенных значений напряжений, образующих трехфазную симметричную систему (для фазы  $A$  начальную фазу напряжения принять равной нулю).
4. Напишите выражения для мгновенных значений токов, образующих симметричную трехфазную систему, если начальная фаза тока в фазе  $A$  равна  $\psi_{iA}$ .
5. Приемник соединен треугольником. В фазу  $A$  включен реостат, в фазу  $B$  - катушка ( $L, R$ ), в фазу  $C$  - конденсатор. Начертите топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов.
6. Действующее значение линейного тока в симметричном приемнике, соединенном по схеме "звезда" без нейтрального провода, равно  $I$ . В одном из линейных проводов произошел обрыв. Чему равны токи в двух других линейных проводах?
7. Напишите выражения для активной, реактивной и полной мощностей трехфазной системы.
8. К трехфазной линии подключен электродвигатель. Для повышения коэффициента мощности цепи подключены статические конденсаторы, соединенные треугольником. Начертите соответствующую схему.
9. Трехфазный приемник соединен по схеме "звезда" с нейтральным проводом. Фазные токи в приемнике равны соответственно 50, 80 и 20 А и сдвинуты относительно фазных напряжений соответственно на углы - 30, -60 и +60°. Начертите топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов.
10. Докажите, что в симметричной трехфазной системе токов сумма их мгновенных значений всегда равна нулю.
11. Изобразите топографическую векторную диаграмму напряжений и покажите на ней векторы токов для трехфазной системы, соединенной по схеме "звезда" с нейтральным проводом, если в одну фазу включен резистор с сопротивлением  $R$ , а в две другие - катушки с индуктивностями  $L_1$  и  $L_2$ .
12. Изобразите топографическую векторную диаграмму напряжений и покажите на ней векторы токов для трехфазной системы, соединенной треугольником, если в одну фазу включен элемент с параметром  $R$ , во вторую - с параметром  $L$  и в третью - с параметром  $C$ .
13. Изобразите схему компенсации реактивной мощности для повышения коэффициента мощности трехфазной системы.

#### 6.4. Магнитные цепи.

6.4.1. Прежде всего необходимо понять физическую природу и единицы основных магнитных величин ( $B, H, \Phi, \mu_a, \mu_r, \mu_0, I_w$ ).

6.4.2. Различие свойств неферромагнитного и ферромагнитного материалов наглядно иллюстрируется зависимостью  $B(H)$  — основной характеристикой ферромагнитного материала. Для неферромагнитного материала эта зависимость линейна, а для ферромагнитного - нелинейная. В последнем случае она изображается кривой намагничивания или дается в табличной форме.

Различные ферромагнитные материалы обладают неодинаковыми свойствами. Так, например, при одном и том же значении напряженности магнитного поля  $H$  значение магнитной индукции  $B$  для электротехнической стали будет во много раз больше, чем для чугуна.

6.4.3. Основной закон, используемый при расчете магнитных цепей, — закон полного тока (второй закон Кирхгофа для магнитной цепи) :

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{i=1}^m I_i w_i,$$

где  $H_k$  — напряженность магнитного поля на участке магнитной цепи длиной  $l_k$  ( $H_k = \text{const}$ );  $I_i w_i$  — МДС. Суммирование  $H_k l_k$  и  $I_i w_i$  проводят вдоль контура, совпадающего со средней магнитной линией.

6.4.4. Задача определения  $I_w$  по заданному магнитному потоку  $\Phi$  или индукции  $B$  называется прямой задачей расчета магнитной цепи.

6.4.5. Задача определения  $\Phi$  (или  $B$ ) по заданному значению  $I_w$  называется обратной задачей расчета магнитной цепи.

6.4.6. Катушка без ферромагнитного сердечника обладает постоянной индуктивностью  $L$ , т.е. значение индуктивности не зависит от тока  $I$  катушки. В этом случае характеристика  $\Phi(I)$  линейная. Если такая катушка питается синусоидальным напряжением, то кривые тока и магнитного потока также синусоидальны.

6.4.7. Если катушка имеет ферромагнитный сердечник, то характеристика  $\Phi(I)$  нелинейная и индуктивность  $L$  зависит от тока.

6.4.8. Если напряжение на зажимах катушки синусоидально, то при  $f = \text{const}$  напряжение и магнитный поток пропорциональны ( $U \approx 4,44 f w \Phi_m$ ),

6.4.9. В цепи с линейными индуктивностью и емкостью можно добиться наступления резонанса, варьируя параметры  $L$ ,  $C$  и  $f$ . Введение в цепь нелинейной индуктивности, какой является катушка со стальным сердечником, также дает возможность осуществить резонанс, называемый в этом случае феррорезонансом.

6.4.10. Широкое практическое применение получили четырехполюсники, в которых существенные изменения напряжения на входе почти не вызывают изменения напряжения на выходе. Такие четырехполюсники называются стабилизаторами напряжения. В цепи феррорезонанса напряжений, состоящей из соединенных последовательно линейной емкости и нелинейной индуктивности, в области токов, превышающих резонансное значение, напряжение на индуктивности  $U_L$  остается почти неизменным при значительных колебаниях напряжения на входе.

6.4.11. Принцип работы магнитного усилителя также основан на использовании нелинейной индуктивности. Большое усиление можно получить лишь при условии магнитного насыщения сердечника. При отсутствии тока в управляющей обмотке ток в рабочей обмотке невелик и можно считать, что приложенное синусоидальное напряжение и уравновешивается ЭДС самоиндукции ( $u \approx -e_L$ ). Поэтому практически мощность в сопротивлении нагрузки  $R_n$  близка к нулю. При большом токе в управляющей обмотке магнитная цепь приходит в

состояние насыщения и тогда значение  $u_L = w \frac{d\Phi}{dt}$  мало. В результате все приложенное к рабочей обмотке напряжение оказывается равным напряжению на нагрузке  $R_n$ ; при этом мощность, выделяемая в  $R_n$ , велика.

#### Вопросы для самопроверки

1. Какой зависимостью характеризуются свойства ферромагнитных материалов? В какой форме она задается?
2. Чему практически равна магнитная проницаемость неферромагнитных материалов?



3. Начертите петлю гистерезиса ферромагнитных материалов и покажите на ней характерные точки остаточной магнитной индукции, коэрцитивной силы.
4. Начертите основную кривую намагничивания для какого-либо ферромагнитного материала (чугун, сталь, электротехническая сталь).
5. Напишите закон полного тока для магнитной цепи и объясните его физическую сущность.
6. Определите, основываясь на законе полного тока для магнитной цепи, напряженность магнитного поля в ферромагнитном кольцевом сердечнике с равномерной обмоткой, число которой равно  $w$ .
7. Начертите схему неразветвленной магнитной цепи с воздушным зазором в ферромагнитном сердечнике. Напишите для нее закон полного тока.
8. Изложите метод расчета указанной выше магнитной цепи, если задано значение магнитного потока в воздушном зазоре и требуется определить МДС катушки.
9. Изложите метод расчета той же магнитной цепи, если задана МДС катушки и требуется определить значение магнитной индукции в сердечнике.
10. Выведите закон Ома для магнитной цепи. Почему это выражение не может быть непосредственно использовано для расчета магнитной цепи?
11. Изложите метод расчета разветвленной симметричной магнитной цепи.
12. Начертите вольтамперную характеристику катушки с ферромагнитным сердечником и постройте на том же графике кривую индуктивности.
13. Постройте кривую тока  $i(t)$  в катушке с ферромагнитным сердечником, если напряжение на ее зажимах синусоидально.
14. В чем заключается отличие феррорезонанса напряжений от резонанса напряжений в линейной электрической цепи?
15. Объясните принцип работы стабилизатора напряжения.
16. Объясните принцип регулирования напряжения, подводимого к приемнику посредством дросселя насыщения.
17. Объясните принцип работы магнитного усилителя.

## 6.5. Трансформаторы.

6.5.1. Прежде чем приступить к изучению раздела о трансформаторах, необходимо повторить основной закон электромагнетизма - закон электромагнитной индукции - и явления самоиндукции и взаимной индукции, которые лежат в основе принципа работы трансформатора.

6.5.2. Режим холостого хода для первичной обмотки трансформатора аналогичен режиму работы катушки с ферромагнитным сердечником, поэтому этот раздел курса также следует повторить перед изучением темы.

6.5.3. В электротехнике коэффициентом трансформации  $n$  называется отношение номинального высшего напряжения трансформатора к номинальному низшему напряжению, т.е.  $n = U_{ВН}/U_{НН} = \frac{w_{ВН}}{w_{НН}}$ , причем под номинальными понимают напряжения на обмотках трансформатора, работающего в режиме холостого хода.

6.5.4. Под номинальной мощностью трансформатора понимают его полную мощность  $S_H$  в номинальном режиме:  $S_H = U_{1H} I_{1H} = U_{2H} I_{2H}$

6.5.5. Для удобства и упрощения расчетов величины вторичной цепи приводят к числу витков первичной обмотки:

$$U_2' = nU_2, I_2' = I_2/n, R_2' = n^2R_2, X_2' = n^2X_2, Z_2' = n^2Z_2.$$

Трансформатор в этом случае называется приведенным.

6.5.6. В работе трансформатора важное значение имеет то положение, что при изменении его нагрузки при постоянном первичном напряжении магнитный поток можно считать практически постоянным, поскольку  $U_1 \approx E_1 = 4,44fw_1 \Phi_m$ .

6.5.7. Так как  $\Phi \approx \text{const}$ , то алгебраическая сумма МДС, создающих этот поток, в любом режиме одинакова, т.е.  $I_{1X}w_1 = I_1w_1 - I_2w_2$ , где  $I_{1X}$  - ток холостого хода трансформатора;  $I_1$  и  $I_2$  — соответственно токи первичной и вторичной обмоток при нагрузке.

Всякое изменение тока  $I_2$  приводит к такому изменению тока  $I_1$ , при котором общая МДС обмоток остается неизменной. Положение о неизменности магнитного потока относится не только к трансформаторам, но также к машинам переменного тока - асинхронным и синхронным.

6.5.8. Работа приведенного трансформатора во всех режимах описывается тремя уравнениями:

уравнением электрического состояния первичной цепи:

$$U_1 = E_1 + R_1 I_1 + jX_1 I_1$$

уравнением электрического состояния вторичной цепи:

$$E_2 = U_2 + R_2 I_2 + jX_2 I_2 \text{ и уравнением МДС: } I_1 - I_2 = I_{1X}$$

6.5.9. Векторная диаграмма трансформатора позволяет наглядно представить соотношения и углы сдвига фаз между различными величинами. Ее строят на основании уравнений трансформатора, приведенных в п. 8.

При построении векторных диаграмм трансформатора следует иметь в виду, что лишь первый шаг является произвольным. Пусть, например, из произвольно выбранной точки в произвольном направлении проведен вектор тока  $I_2$  остальные построения будут обусловлены, с одной стороны, заданными значениями угла  $\varphi_2$  и напряжения  $U_2$ , с другой — уравнениями напряжений и токов для вторичной и первичной обмоток трансформатора.

В рассматриваемом случае после проведения вектора  $I_2$  под заданным углом  $\varphi_2$  к нему строят вектор  $U_2$ . Далее к вектору напряжения  $U_2$  прибавляют векторы  $R_2' I_2$ ,  $jX_2' I_2$  получается результирующий вектор  $E_2$ . Затем под углом  $90^\circ$  в сторону отставания проводят вектор магнитного потока  $\Phi_m$  вектор тока холостого хода  $I_{1X}$ . Сумма векторов токов  $I_2 + I_{1X} = I_1$ . К вектору  $E_1$ , совпадающему по фазе с вектором  $E_2$ , прибавляют векторы  $R_1 I_1$  и  $jX_1 I_1$  в результате получается вектор  $U_1$ .

6.5.10. Схему замещения трансформатора строят для приведенного трансформатора также на основании его уравнений. Возможность представления трансформатора его схемой замещения вытекает из теории четырехполюсника, поскольку трансформатор можно рассматривать как четырехполюсник.

Подобная же схема замещения используется и в теории асинхронных машин вследствие существования некоторой аналогии между процессами в асинхронной машине и трансформаторе. Использование схемы замещения означает, что вместо реального объекта - электрической машины - рассматривается электрическая схема, замещающая его. Соотношения в реальном объекте (электрической машине) и аналоге (схеме замещения) описываются уравнениями одинакового вида. В то же время схема замещения значительно проще и нагляднее, чем сама электрическая машина. Кроме полной схемы замещения пользуются Г-образной и упрощенной схемами замещения.

6.5.11. Опыты холостого хода и короткого замыкания позволяют найти потери в трансформаторе, его КПД и параметры схемы замещения.

Так, из опыта холостого хода находят коэффициент трансформации  $n = U_{1H}/U_{2H}$  - для понижающего трансформатора и  $n = U_{2H}/U_{1H}$  для повышающего трансформатора, мощность потерь холостого хода  $P_x$ , равную мощности потерь в магнитопроводе (магнитным потерям  $\Delta P_M$ ), параметры ветви холостого хода  $I_X = I_{1X}$ ,  $Z_0 = U_{1H}/I_{1X}$ ,  $R_0 = P_x/I_{1X}^2$ ,

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \cdot$$

Из опыта короткого замыкания находят мощность электрических потерь в номинальном режиме ( $P_{к.н} = \Delta P_\Theta$ ) полное сопротивление упрощенной схемы

замещения  $Z_K = U_{1K}/I_{1H}$ , активное  $R_K = R_1 + R_2' = P_K/I_{1H}^2$  и реактивное  $X_K = X_1 + X_2' = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$

сопротивления обмоток трансформатора, напряжение короткого замыкания  $u_K\% = (Z_K/I_H/I_H)100$ ; активную  $u_{K.A}\% = (R_K I_H/U_{1H})^{xx}100$  и реактивную  $u_{K.P}\% = (X_K I_H/U_{1H})100$

составляющие напряжения короткого замыкания:  $u_K\% = \sqrt{(u_{K.A}\%)^2 + (u_{K.P}\%)^2}$

6.5.12. Изменение вторичного напряжения рассчитывают по формуле

$$\Delta u = \beta(u_{K.A} \cos\varphi_1 + u_{K.P} \sin\varphi_2) = \beta u_{K.C} \cos(\varphi_2 - \varphi_K)$$

где  $\beta = I_2/I_{2H} = I_1/I_{1H}$  коэффициент нагрузки;  $\varphi_2$  - Угол сдвига фаз между напряжением и током в нагрузке;  $\varphi_K$  - угол сдвига фаз в опыте короткого замыкания.

6.5.13. КПД трансформатора определяют по формуле

$$\eta = \frac{\beta S_H \cos\varphi_2}{\beta S_H \cos\varphi_2 + \beta^2 P_{K.H} + P_X}$$

где  $S_H$  — номинальная мощность трансформатора.

6.5.14. В трехфазных трансформаторах алгебраическая сумма мгновенных синусоидальных магнитных потоков в сердечнике равна нулю, поэтому необходимость в "нейтральном" стержне отпадает и трехфазный трансформатор выполняют в виде трехстержневого.

Под номинальными данными трехфазных трансформаторов понимают полную номинальную

мощность трех фаз:  $S_H = \sqrt{3} U_{1H} I_{1H} = U_{2H} I_{2H}$  где  $U_{1H}$ ,  $U_{2H}$  - номинальные линейные напряжения;  $I_{1H}$ ,  $I_{2H}$  - номинальные линейные токи; мощность потерь холостого хода и короткого замыкания на три фазы  $P_X$ ,  $P_K$ ; номинальный КПД  $\eta_2$ , который задается при активной нагрузке ( $\cos\varphi_1 = 1$ ) и при коэффициентах нагрузки  $\beta = 1$ ,  $\beta = 0,5$ ; группы соединений обмоток трансформатора  $Y/Y_0-12$  или  $Y/\Delta-11$  (звезда - звезда с нейтральным проводом, группа 6.5.12; звезда - треугольник, группа 11).

15. Теория трансформаторов полностью распространяется на автотрансформаторы и измерительные трансформаторы. При изучении последних следует обратить внимание на область применения, особенности и возникающие дополнительные погрешности.

#### Вопросы для самопроверки

1. Изобразите (схематически) однофазный трансформатор и объясните принцип его работы.
2. Выведите выражения для действующих ЭДС, наводимых в первичной и вторичной обмотках трансформатора основным магнитным потоком.
3. В чем состоит режим холостого хода трансформатора? Начертите векторную диаграмму режима холостого хода.
4. Что называют коэффициентом трансформации трансформатора?
5. Почему на сердечнике трансформатора обмотки высшего и низшего напряжений размещают на общем стержне?
6. Напишите уравнение МДС трансформатора.
7. Напишите уравнение токов трансформатора и объясните физический смысл составляющих первичного тока.
8. В чем состоит явление рассеяния в трансформаторе? Как выражается ЭДС рассеяния обмоток?
9. Напишите уравнения напряжений (уравнения электрического состояния) для первичной и вторичной обмоток и объясните смысл каждого из членов этих уравнений.
10. Что называют приведенными величинами вторичной обмотки?
11. Начертите схему замещения трансформатора.
12. Начертите векторные диаграммы трансформатора для случаев нагрузки его чисто активным и активно-индуктивным сопротивлениями.
13. Начертите схему опыта холостого хода трансформатора и объясните, какие величины определяются в этом опыте.
14. Почему в опыте холостого хода мощность потерь в меди настолько мала, что ею можно пренебречь?

15. Начертите схему опыта короткого замыкания трансформатора и объясните, какие величины определяются в этом опыте.
16. Почему в опыте короткого замыкания мощность потерь в стали настолько мала, что ею можно пренебречь?
17. Сформулируйте определение напряжения короткого замыкания; назовите его примерное значение.
18. Выведите выражение для процентного Изменения напряжения трансформатора.
19. Напишите общее выражение для КПД трансформатора с учетом относительного значения вторичного тока (с учетом коэффициента нагрузки) .
20. Как осуществляется трансформирование трехфазной цепи?
21. Начертите схему автотрансформатора - однофазного и трехфазного. Каковы преимущества и недостатки автотрансформатора?
22. Начертите принципиальную схему трансформаторов напряжения и тока.
23. Какие ошибки возникают при использовании трансформаторов напряжения и тока для измерения напряжения и тока?

## 6.6. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

6.6.1. При изучении темы прежде всего необходимо усвоить принцип действия генератора и двигателя постоянного тока, предварительно повторив из курса физики закон электромагнитной индукции (ЭМИ) и закон электромагнитной силы (ЭМС) - закон Ампера. Следует уяснить принцип обратимости применительно к машине постоянного тока, обратив внимание на роль противодействующего и вращающего моментов, напряжения и ЭДС машины.

6.6.2. Принцип работы генератора постоянного тока можно рассмотреть в следующей последовательности: первичный двигатель  $D$  развивает вращающий момент  $M_{вр}$ , вращая ротор генератора с частотой  $n$ . Если к обмотке возбуждения подведено напряжение  $U_B$ , то в ней возникнет ток  $I_B$ , создающий МДС  $I_B w_B$ . МДС  $I_B w_B$  возбуждает в машине магнитный поток возбуждения  $\Phi_B$ . При вращении проводников якоря в магнитном поле машины в них по закону электромагнитной индукции (ЭМИ) наводится ЭДС  $E$ , под действием которой по цепи якоря и нагрузке, если она замкнута, начнет проходить ток, создающий в якоре падение напряжения  $R_{я}I_{я}$ . Величины  $E$ ,  $U_T$  и  $R_{я}I_{я}$  связаны соотношением  $U_T = E - R_{я}I_{я}$  - Ток якоря создает МДС  $I_{я}w_{я}$  которая вызывает появление в генераторе магнитного потока реакции якоря  $\Phi_{я}$ . Результирующий магнитный поток  $\Phi_P = \Phi_B + \Phi_{я}$ . В соответствии с законом электромагнитной силы (ЭМС) взаимодействие тока  $I_{я}$  и магнитного потока  $\Phi_P$  создает силу и противодействующий момент  $M_{пр}$ . В установившемся режиме  $M_{вр} = M_{пр}$ .

6.6.3. Основными величинами, характеризующими работу генератора постоянного тока, являются: вырабатываемая мощность  $P = U_T I_{я}$ , напряжение на зажимах  $U_T$ , ток возбуждения  $I_B$ , ток якоря  $I_{я}$  или ток нагрузки  $I$ , частота вращения  $n$  (обычно  $n = const$ ). Зависимость между этими величинами описывается двумя уравнениями:

уравнением ЭДС:  $E = c_E n \Phi$ ; и уравнением электрического состояния цепи якоря  $U_T = E - R_{я}I_{я}$ .

Последнее уравнение, определяющее напряжение на зажимах генератора, предполагает, что направления ЭДС и тока в якоре генератора совпадают.

6.6.4. Важно знать электрические схемы генераторов при различных способах включения обмотки возбуждения и влияния способа включения на характеристики генератора.

6.6.5. Принцип работы двигателя постоянного тока удобно пояснять в следующей последовательности: если к двигателю подведено напряжение  $U_C$ , то в цепи возбуждения возникнет ток  $I_B$ , а в цепи якоря - ток  $I_{я}$ . Ток возбуждения создает МДС  $I_B w_B$ , которая возбуждает в машине магнитный поток  $\Phi_B$ . Ток якоря, в свою очередь, возбуждает магнитный поток реакции якоря  $\Phi_{я}$ . Результирующий магнитный поток  $\Phi_P = \Phi_B + \Phi_{я}$ . В цепи якоря ток  $I_{я}$  создает падение напряжения  $R_{я}I_{я}$ . В соответствии с законом

электромагнитной силы (ЭМС) при взаимодействии тока  $I_{\text{я}}$  и магнитного потока  $\Phi$  создается вращающий момент  $M_{\text{в}} p$ . В установившемся режиме  $M_{\text{в}} = M_{\text{пр}}$ . Когда проводники якоря пересекают магнитное поле  $\Phi$ , в них в соответствии с законом электромагнитной индукции (ЭМИ) наводится ЭДС, которая направлена против напряжения сети. Величины  $E$ ,  $U_c$  и  $R_{\text{я}}I_{\text{я}}$  связаны соотношением

$$U_c = E + R_{\text{я}}I_{\text{я}}$$

6.6.6. Основные величины, характеризующие двигатели: механическая мощность на валу  $P_2$ ; напряжение  $U$ ; потребляемый ток  $I$ ; ток якоря  $I_{\text{я}}$ ; ток возбуждения  $I_{\text{в}}$ ; частота вращения  $n$ , электромагнитный момент  $M_{\text{эм}}$ . Зависимости между этими величинами описываются равенствами:

- электромагнитного момента  $M_{\text{эм}} = c_M I_{\text{я}} \Phi$ ;
- электрического состояния цепи якоря  $U = E + R_{\text{я}}I_{\text{я}}$ ;
- противо-ЭДС  $E_{\text{пр}} = c_E n \Phi$ ;
- моментов  $M_{\text{эм}} = M_{\text{пр}} + M_{\text{пот}} + M_{\text{дин}}$ , где  $M_{\text{пр}}$  - тормозной момент на валу, создаваемый нагрузкой;  $M_{\text{пот}}$  - момент потерь, создаваемый всеми видами потерь в двигателе;  $M_{\text{дин}}$  - динамический момент, создаваемый инерционными силами.

6.6.7. Важнейшей для двигателя является механическая характеристика  $n(M)$  — зависимость частоты вращения  $n$  от момента на валу. Она показывает влияние механической нагрузки на валу двигателя на частоту вращения, что особенно важно знать при выборе и эксплуатации двигателей.

Механические характеристики могут быть естественными и искусственными. Под естественными понимают характеристики, снятые при отсутствии в схеме каких-либо дополнительных сопротивлений, под искусственными - при наличии таких сопротивлений.

6.6.8. К пуску двигателя предъявляются два основных требования: обеспечить необходимый для трогания и разгона якоря вращающий момент; не допускать при пуске протекания через якорь чрезмерно большого тока, опасного для двигателя. Практически возможны три способа пуска: прямой пуск, пуск при включении реостата в цепь якоря и пуск при пониженном напряжении в цепи якоря.

При прямом пуске цепь якоря включается сразу на полное напряжение. Так как в первый момент пуска якорь неподвижен ( $n = 0$ ), то противо-ЭДС отсутствует ( $E_{\text{пр}} = c_E n \Phi$ ). Тогда пусковой ток якоря  $I_{\text{я.п}} = U/R_{\text{я}}$ . Так как  $R_{\text{я}} = 0,02 + 1,10$  Ом, то  $I_{\text{я.п}} = (50 \div 100) I_{\text{н}}$ , что недопустимо. Поэтому прямой пуск возможен у двигателей малой мощности, где ток якоря  $I_{\text{я.п}} \leq (4 \div 6) I_{\text{н}}$  и разгон двигателя длится менее 1с.

При пуске двигателя с пусковым реостатом последний ограничивает пусковой ток якоря. Ту же цель преследует пуск при пониженном напряжении, но для его осуществления требуется независимый регулируемый источник питания.

6.6.9. Характеристики двигателей постоянного тока зависят от схемы включения обмотки возбуждения по отношению к обмотке якоря. Различают двигатели с независимым, параллельным, последовательным и смешанным включением обмотки возбуждения. Все эти схемы надо знать на память.

6.6.10. Особое внимание следует обратить на механические свойства двигателей постоянного тока. Только зная эти свойства, можно решить вопрос о пригодности того или иного двигателя постоянного тока для привода определенного механизма. Лишь на основе этих свойств понятно, почему для привода металлорежущего станка применяется двигатель параллельного возбуждения, а для привода подъемного механизма - двигатель последовательного возбуждения.

Механические свойства двигателя определяются его механической характеристикой, которая описывается формулой:

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{c_E c_M \Phi^2} M$$

В зависимости от схемы включения обмотки возбуждения эта формула приобретает тот или иной вид.

6.6.11. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением обладает жесткой механической характеристикой, описываемой уравнением  $n = n_x - bM$ , где  $b$  - постоянная величина. Это уравнение соответствует допущению, что магнитный поток остается неизменным при разных нагрузках. Однако при увеличении нагрузки вследствие реакции якоря магнитный поток уменьшается. Поэтому механическую характеристику этого двигателя можно считать прямолинейной, если реакцией якоря можно пренебречь ввиду ее малости или если реакция якоря компенсируется.

6.6.12. Двигатель последовательного возбуждения обладает мягкой механической характеристикой. Если сделать допущение что магнитный поток пропорционален току, то уравнение механической характеристики будет иметь вид  $n = A/\sqrt{M - D}$ , где  $A, D$  - постоянные величины, не зависящие от нагрузки.

6.6.13. Поскольку двигатель постоянного тока допускает плавное регулирование частоты вращения, возникает вопрос о диапазоне регулирования. Широкий диапазон позволил бы использовать двигатель без применения редуктора, что не только упростило бы передачу, но и улучшило бы работу приводимого механизма. Однако возможность расширения диапазона регулирования ограничена, потому что увеличение частоты вращения приводит к ухудшению условий коммутации, а ее уменьшение вызывает увеличение размеров двигателя и, как следствие, — удорожание. Поэтому обычно  $n_{\max}/n_{\min} = (2 \div 3)$

#### Вопросы для самопроверки

1. Изобразите схематически устройство машины постоянного тока.
2. Объясните принцип работы машины постоянного тока в качестве генератора и двигателя.
3. Объясните устройство и назначение коллектора.
4. Выведите формулу для ЭДС, наводимой в обмотке якоря.
5. Начертите характеристику холостого хода. Объясните, почему при токе возбуждения, равном нулю, ЭДС якоря не равна нулю.
6. Изобразите картину магнитного поля в машине постоянного тока для трех случаев: а) при холостом ходе (ток в обмотке якоря отсутствует); б) при наличии тока только в обмотке якоря; в) при наличии тока в обеих обмотках (возбуждения и якоря).
7. Объясните сущность явления реакции якоря. Как она влияет на работу машины?
8. Что называется коммутацией в машине постоянного тока? Какие процессы с ней связаны?
9. Какие существуют средства ослабления влияния реакции якоря? Какие существуют способы улучшения коммутации?
10. В чем состоит самовозбуждение генератора? В каком случае в генераторе с параллельным возбуждением самовозбуждения не наступает?
11. Изобразите внешнюю и регулировочную характеристики для генераторов с независимым и параллельным возбуждением.
12. Выведите формулу для электромагнитного вращающего момента двигателя.
13. Напишите уравнения по второму закону Кирхгофа для цепи якоря машины, работающей в режимах генератора и двигателя.
14. Начертите электрическую схему машины постоянного тока с параллельным и последовательным возбуждением.
15. Напишите уравнения по первому закону Кирхгофа для машины с параллельным возбуждением, работающей в режимах генератора и двигателя.
16. Изобразите графически зависимости  $n(M)$  для машин с параллельным и последовательным возбуждением.
17. Какие двигатели (с какой системой возбуждения) применяются в станках и подъемно-транспортных механизмах?
18. Напишите формулы механических характеристик двигателей с параллельным и последовательным возбуждением.

19. Перечислите способы регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока и укажите их преимущества и недостатки.
20. Начертите в общей системе координатных осей три механические характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением - естественную и две искусственные : а) при включении реостата в цепь якоря; б) при включении регулировочного реостата в цепь обмотки возбуждения.
21. Изобразите схему включения двигателя с параллельным возбуждением, позволяющую реверсировать двигатель.

## 9. Методические указания для выполнения контрольной работы

Контрольная работа закрепляет методические и практические навыки решения задач по расчёту цепей постоянного и переменного тока, типовых электротехнических устройств и выбору электронных приборов, используемых в этих устройствах. Это достигается тогда, когда студент в контрольной работе последовательно и аргументированно излагает порядок принятия решений поставленных задач. Работа выполняется с использованием учебного пособия по индивидуальному заданию.

### 9.1 Указания к выполнению работы

1. Работа состоит из расчётно - пояснительной записки, выполненной машинописным текстом формата А4 (297×210 мм).. В расчётно-пояснительную записку входят: оглавление, введение, содержание (расчёты), выводы, список используемой литературы. В оглавлении перечисляются названия разделов и подразделов пояснительной записки и указываются страницы, на которых они помещены. Разделы должны иметь порядковые номера. Подразделы должны иметь порядковые номера в пределах каждого раздела. Формулы помещают в виде отдельных строк и нумеруют в пределах раздела. Под формулой приводится перечень символов с расшифровкой их значений и указанием размерностей. В конце записки приводятся выводы и библиографический список.

2. В данном пособии к каждой задаче даны методические указания по ее выполнению и пример решения аналогичной задачи. Пример разъясняет ход решения задачи, но воспроизводит его полностью. Студент же при выполнении работы должен привести полное решение задачи со всеми подробными пояснениями (указать какие положения, теоремы, формулы, уравнения и т.д. применяются при решении данной задачи).

3. Расчёты рекомендуется проводить с использованием Excel, так как непосредственно по проведению расчетов и получении таблиц вычислений в Excel с помощью мастера диаграмм можно сделать требуемые графики. Графики вычерчивают аккуратно, с помощью чертежных инструментов, желательна на миллиметровой бумаге. Оси координат вычерчивают сплошными линиями со стрелками на конце, масштабы шкал по осям выбирают равномерными, начиная с нуля, с использованием всей площади графика. Цифры шкал наносят слева от оси ординат и под осью абсцисс. Буквенное обозначение шкалы и единицу измерения пишут над числами шкалы ординат и под осью абсцисс, справа вместо последнего числа шкалы.

4. Векторные диаграммы строят в масштабе, который указывается таким образом:

$$m_U = \dots \text{ В/мм}, m_I = \dots \text{ А/мм}.$$

5. Работы должны выполняться на компьютере в редакторе WORD (текст, формулы, рисунки, графики). Рукописное исполнение не допускается. Представляются на листах формата А4, шрифт – Times New Roman, размер – 14 кегль, межстрочный интервал 1,5, поля – левое 2,5 – 3 см, все остальные 2 см, абзацный отступ – 1,25 см, автоматическая расстановка переносов. Для набора формул применяется редактор формул MS-Equation, формулы размещаются по центру, между формулами и текстом межстрочный интервал 1.

6. На титульном листе указывается: название учебного заведения; название кафедры; название работы; фамилия, имя и отчество студента; факультет, курс, специальность; должность, фамилия, имя, отчество преподавателя, принявшего работу.

7. Если контрольная работа не зачтена или зачтена при условии внесения исправлений, то все необходимые поправки делают в конце работы в разделе "Работа над ошибками". Нельзя вносить какие-либо исправления в текст, расчеты или графики, просмотренные преподавателем.

8. Буквенные обозначения и единицы физических величин, условно-графические обозначения должны соответствовать ГОСТу, выдержки из которого приводятся в Приложении.

### Рекомендуемая литература

#### *Основная:*

1. Касаткин А.С. Электротехника: Учебник для вузов / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 544 с.
2. Немцов М. В. Электротехника и электроника. Учебник для вузов. М.: Изд. МЭИ, 2008. – 460 с.
3. Горбунов А.Н. и др. Электротехника: Учебник для с.-х. вузов / А.Н. Горбунов, И.Д. Кабанов, А.В. Кравцов, Петров В.А., И.Я. Редько / Под ред. А.В. Кравцова. – М., 2007. – 271 с.

#### *Дополнительная:*

1. Петленко Б.И. Электротехника и электроника: учеб. для сред. проф. образования / Петленко Б.И. [и др.]. под ред. Б.И. Петленко. - М.: Academia, 2004. – 348 с.
  2. Беневоленский С.Б., Марченко А.Л. Основы электротехники / учебное пособие для вузов. – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2007. – 568.
  3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Высшая школа, 2003. – 542 с.
  4. Рекус Г.Г., Белоусов А.И. Сборник задач и упражнений по электротехнике и электронике. – М.: Высшая школа, 2002. – 416 с.
  5. Электротехника и основы электроники. / Под ред. О.П. Глудкина и Б.П. Соколова. – М.: Высшая школа, 1993.
- <http://www.kodges.ru/> (тексты книг по электротехническим дисциплинам, в основном, в формате. pdf для бесплатного перекачивания)
- <http://www.electrolibrary.info> (электронная электротехническая библиотека).
- <http://ktf.krkr.ru/courses/foet/> (Сайт содержит информацию по разделу «Электроника»)
- <http://www.college.ru/enportal/physics/content/chapter4/section/paragraph8/theory.html> (Сайт содержит информацию по теме «Электрические цепи постоянного тока»)
- <http://elib.ispu.ru/library/electro1/index.htm> (Сайт содержит электронный учебник по курсу «Общая Электротехника»)
- <http://www.toe.stf.mrsu.ru/demoversia/book/index.htm> (Сайт содержит электронный учебник по курсу «Электроника и схемотехника»)
- Электротехника. – Режим доступа: <http://ktf.krkr.ru/foet/>;
- Электрические цепи постоянного тока. – Режим доступа: – <http://www.college.ru/enportal/physics/content/chapter4/paragraph8/theory.html>;
- Общая электротехника [Электронный учебник]. – Режим доступа: <http://elib.ispu.ru/library/elektrol/index.htm>;
- [http://fn.bmstu.ru/electro/new\\_site/lectures/lec%201/konspect.htm](http://fn.bmstu.ru/electro/new_site/lectures/lec%201/konspect.htm) (Электротехника и промышленная электроника: конспекты лекций);



[http://window.edu.ru/window/library?p\\_rid=40524](http://window.edu.ru/window/library?p_rid=40524) (Электрические машины: лекции и примеры решения задач);


[http://window.edu.ru/window/library?p\\_rid=24979](http://window.edu.ru/window/library?p_rid=24979) (Электротехника и электроника. Трёхфазные электрические цепи: учебное пособие);

[http://toe.stf.mrsu.ru/demo\\_verzia/](http://toe.stf.mrsu.ru/demo_verzia/) (Общая электротехника и электроника: электронный учебник);

## ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

### Расчетно – графическая работа № 1

ЗАДАЧА 1. Для электрической цепи (рис. 1.1) с параметрами, заданными в табл. 1 определить эквивалентное (входное) сопротивление относительно зажимов источника питания и ток в ветви источника питания.

ПРИМЕЧАНИЯ: 1. Если  $R=0$ , сопротивление закорочено   
(резистор убрать).

2. Если  $R=\infty$ , в цепи разрыв,  $I=0$  (ветвь из схемы убрать).

Выбор своего варианта производится по двум последним цифрам номера зачётной книжки студента.

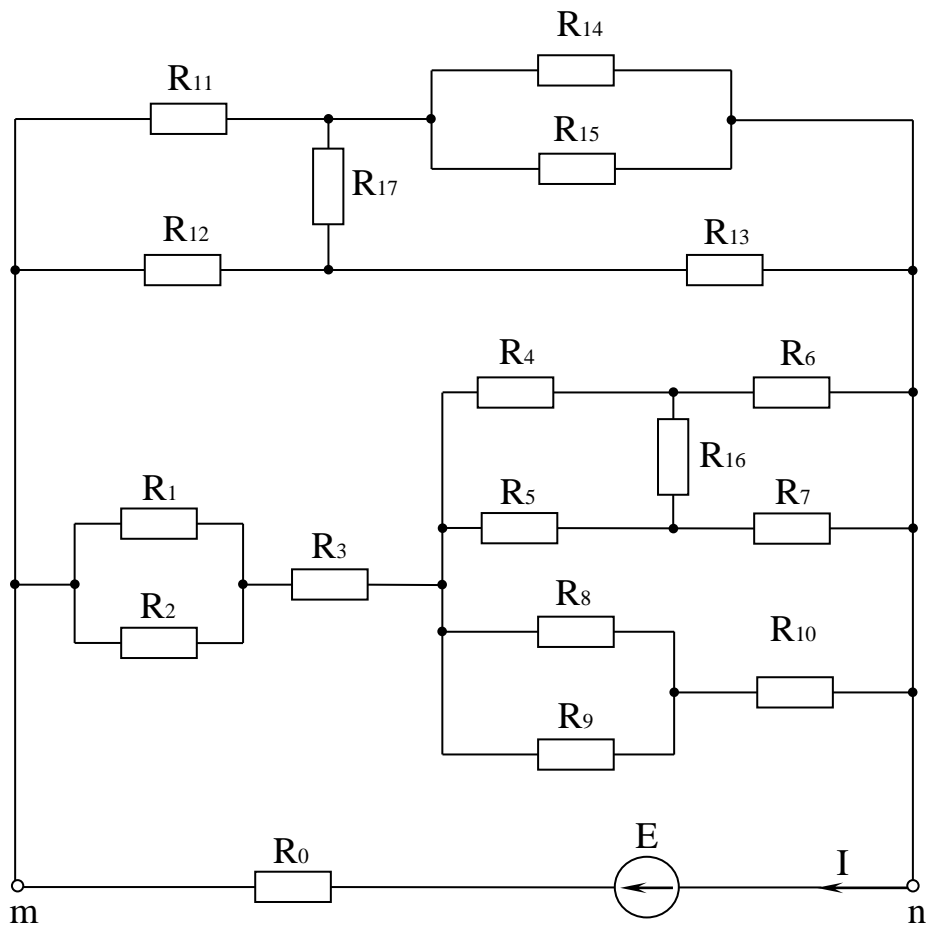


Рис. 1.1

Таблица 1

Вариант	Данные для расчета																		
	E, В	R <sub>0</sub> , Ом	R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>3</sub> , Ом	R <sub>4</sub> , Ом	R <sub>5</sub> , Ом	R <sub>6</sub> , Ом	R <sub>7</sub> , Ом	R <sub>8</sub> , Ом	R <sub>9</sub> , Ом	R <sub>10</sub> , Ом	R <sub>11</sub> , Ом	R <sub>12</sub> , Ом	R <sub>13</sub> , Ом	R <sub>14</sub> , Ом	R <sub>15</sub> , Ом	R <sub>16</sub> , Ом	R <sub>17</sub> , Ом
01	50	0,2	2	3	6	2	∞	2	4	∞	6	0,6	3	0	5	2	8	∞	6
02	50	0,2	2	6	3	2	0	3	6	4	∞	0,6	5,2	∞	1	8	2	0	0,6
03	100	0,1	2	0	3	2	6	2	0	6	4	0,6	1,4	2	8	8	2	2	∞
04	100	0,2	3	6	3	2	2	2	6	4	4	0,6	3	2	∞	2	8	2	4
05	100	0,3	3	3	6	2	0	3	2	6	4	0,6	4	4	0	8	2	4	1,6
06	100	0,1	2	6	3	2	8	∞	2	4	6	0,6	∞	4	2	2	8	2	0,4
07	50	0,2	2	3	6	4	2	2	∞	6	4	0,6	6	1	3	0	2	4	6
08	50	0,3	2	6	3	2	∞	0	0	4	6	0,6	3	3	2	∞	∞	10	3
09	50	0,4	3	3	6	2	1	6	3	6	4	0,6	0	0	6	8	8	0	10
10	60	0,2	3	2	6	2	2	2	4	∞	5	1	3	0	6	2	8	∞	6
11	60	0,4	2	6	3	5	4	3	6	4	∞	0,8	1	8	2	8	3	0	3
<b>12</b>	60	0,2	3	∞	5	5	4	8	∞	2	6	0,6	6	3	1,6	2	8	2	0
<b>13</b>	80	0,2	2	0	3	5	2	2	4	5	0	6	7	5	∞	2	3	4	5
<b>14</b>	80	0,1	8	5	2	3	4	4	1	2	5	0	∞	2	3	4	4	5	5
<b>15</b>	80	0,2	6	5	3	∞	3	1	4	4	2	2	5	0	6	6	∞	3	2
<b>16</b>	80	0,3	6	5	3	∞	55	0	5	5	4	4	∞	2	1	6	4	4	2

<b>17</b>	100	0,4	5	5	0	2	5	3	4	5	$\infty$	2	3	4	5	0	2	3	2
<b>18</b>	100	0,4	6	6	8	8	7	3	4	6	6	2	$\infty$	5	5	2	2	6	0
<b>19</b>	100	0,2	3	4	5	$\infty$	2	0	3	3	4	4	5	$\infty$	6	6	2	3	2
<b>20</b>	100	0,2	3	5	4	2	$\infty$	$\infty$	6	7	0	8	8	3	$\infty$	4	4	5	6

**Продолжение таблицы 1**

Вариант	Данные для расчета																		
	E, В	R <sub>0</sub> , ОМ	R <sub>1</sub> , ОМ	R <sub>2</sub> , ОМ	R <sub>3</sub> , ОМ	R <sub>4</sub> , ОМ	R <sub>5</sub> , ОМ	R <sub>6</sub> , ОМ	R <sub>7</sub> , ОМ	R <sub>8</sub> , ОМ	R <sub>9</sub> , ОМ	R <sub>10</sub> , ОМ	R <sub>11</sub> , ОМ	R <sub>12</sub> , ОМ	R <sub>13</sub> , ОМ	R <sub>14</sub> , ОМ	R <sub>15</sub> , ОМ	R <sub>16</sub> , ОМ	R <sub>17</sub> , ОМ
<b>21</b>	100	0,2	4	5	1,6	2	$\infty$	3	3	2	$\infty$	2	5	6	0	3	4	5	5
<b>22</b>	100	0,2	3	4	5	8	0	2	2	1	4	5	$\infty$	3	3	0	2	4	6
<b>23</b>	100	0,2	3	6	6	6	6	$\infty$	8	0	2	4	5	6	$\infty$	7	8	8	8
<b>24</b>	20	0,2	3	6	5	$\infty$	2	4	5	5	5	6	6	$\infty$	2	3	3	0	2
<b>25</b>	120	0,3	0,3	6	6	$\infty$	0	3	3	4	5	6	7	8	$\infty$	2	3	4	5
<b>26</b>	120	0,3	3	5	6	7	8	8	7	6	$\infty$	5	5	4	0	3	3	$\infty$	2
<b>27</b>	120	0,5	6	7	8	$\infty$	2	0	3	4	5	5	6	6	6	7	7	8	8
<b>28</b>	140	0,4	8	6	7	5	$\infty$	4	3	2	1	0	3	2	$\infty$	1	2	3	4
<b>29</b>	140	0,3	8	5	3	2	1	$\infty$	2	2	6	6	5	5	4	$\infty$	3	3	$\infty$
<b>30</b>	140	0,4	5	6	7	$\infty$	2	3	4	5	5	6	6	$\infty$	3	2	0	1	1
<b>31</b>	140	0,7	3	2	2	4	4	$\infty$	5	5	5	6	$\infty$	7	7	0	8	8	6

32	150	0,5	2	1	3	∞	4	5	5	6	8	8	9	0,6	0	3	∞	2	1
33	150	0,4	2	∞	0	1	2	3	3	3	4	4	∞	5	5	6	8	3	4
34	150	0,5	1	2	3	4	4	∞	5	5	5	6	0	7	7	∞	3	4	5
35	150	0,5	2	2	0	3	3	0	4	4	4	5	5	∞	6	6	1,4	1,4	1,4
36	150	0,5	3	3	4	∞	5	5	6	6	2	2	0	7	7	∞	8	8	8
37	150	0,2	6	6	10	5	5	∞	4	4	3	3	1	2	0	5	5	6	6
38	150	0,4	8	8	6	5	5	5	∞	4	4	2	2	0	3	3	∞	5	4
39	120	0,3	9	9	8	∞	7	7	7	6	5	4	3	∞	2	1	0	5	5
40	120	0,3	2	4	5	∞	2	3	4	5	5	5	6	∞	2	2	1	0	5

Продолжение таблицы 1

Вариант	Данные для расчета																		
	E, В	R <sub>0</sub> , Ом	R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>3</sub> , Ом	R <sub>4</sub> , Ом	R <sub>5</sub> , Ом	R <sub>6</sub> , Ом	R <sub>7</sub> , Ом	R <sub>8</sub> , Ом	R <sub>9</sub> , Ом	R <sub>10</sub> , Ом	R <sub>11</sub> , Ом	R <sub>12</sub> , Ом	R <sub>13</sub> , Ом	R <sub>14</sub> , Ом	R <sub>15</sub> , Ом	R <sub>16</sub> , Ом	R <sub>17</sub> , Ом
41	120	0,4	3	5	6	0	∞	2	2	1	1	5	5	6	6	∞	7	7	7
42	120	0,3	2	2	5	5	5	6	6	2	3	4	0	5	5	6	∞	2	2
43	120	0,4	3	3	3	∞	4	4	6	6	6	6	8	∞	0	58	5	5	6
44	120	0,2	4	4	4	4	10	5	5	5	6	6	0	7	8	∞	5	3	3
45	120	0,3	2	2	3	3	∞	5	0	6	6	6	7	7	7	∞	8	2	2
46	100	0,2	5	5	5	∞	2	0	∞	5	5	6	6	8	8	9	9	3	3

47	100	0,4	3	3	3	6	0	∞	5	5	6	6	4	4	6	6	∞	2	2
48	100	0,2	3	2	4	∞	5	6	7	∞	8	8	5	0	4	4	1	1	6
49	100	0,3	5	5	5	0	2	2	3	3	3	3	4	4	∞	5	5	5	5
50	100	0,4	8	8	0	6	6	∞	5	5	3	3	4	4	5	5	∞	2	8
51	90	0,4	5	4	3	1	∞	2	2	1	1	5	0	6	∞	3	3	4	4
52	90	0,4	6	6	3	2	2	5	∞	0	6	6	7	7	8	8	6	6	6
53	90	0,4	6	3	2	∞	4	4	5	6	0	7	7	∞	8	8	3	3	5
54	90	0,3	5	4	2	2	∞	3	3	5	5	0	6	7	8	∞	9	9	0,8
55	90	0,3	6	∞	7	7	0	8	8	8	6	6	∞	5	5	5	4	4	4
56	80	0,4	8	3	10	2	2	0	3	3	3	4	4	∞	5	5	6	8	7
57	80	0,3	5	5	6	6	0	∞	3	3	4	4	2	2	5	∞	6	6	6
58	80	0,5	6	7	7	∞	8	6	5	∞	4	4	3	3	0	2	1	5	5
<b>59</b>	80	0,6	4	5	3	3	∞	2	2	0	2	2	4	4	5	∞	1	2	4
<b>60</b>	60	0,3	8	4	4	5	0	6	∞	2	2	4	4	∞	5	5	6	6	10

Продолжение таблицы 1

Вариант	Данные для расчета																		
	E, В	R <sub>0</sub> , Ом	R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>3</sub> , Ом	R <sub>4</sub> , Ом	R <sub>5</sub> , Ом	R <sub>6</sub> , Ом	R <sub>7</sub> , Ом	R <sub>8</sub> , Ом	R <sub>9</sub> , Ом	R <sub>10</sub> , Ом	R <sub>11</sub> , Ом	R <sub>12</sub> , Ом	R <sub>13</sub> , Ом	R <sub>14</sub> , Ом	R <sub>15</sub> , Ом	R <sub>16</sub> , Ом	R <sub>17</sub> , Ом
61	60	0,2	8	3	3	4	5	6	0	7	7	8	8	∞	9	9	3	3	∞
62	60	0,2	5	5	0	∞	2	2	∞	6	6	7	7	5	4	4	2	2	8
63	60	0,5	3	4	5	5	6	0	4	∞	3	5	6	∞	7	7	3	4	5
64	60	0,3	6	5	8	4	2	1	1	2	0	5	5	6	∞	3	3	3	3
65	60	0,4	8	3	0	5	5	5	∞	6	6	6	4	4	4	∞	2	2	5
66	50	0,4	5	3	3	0	2	2	2	∞	5	5	6	6	∞	4	4	8	6
67	50	0,5	8	4	4	5	0	∞	3	2	1	1	6	7	8	∞	5	5	5
68	50	0,4	3	2	10	0	5	4	3	3	2	2	1	∞	2	2	1	3	5
69	50	0,3	7	6	5	4	∞	3	3	2	2	2	0	1	2	∞	2	2	2
70	50	0,3	6	3	4	5	0	2	∞	3	3	3	4	4	4	4	∞	5	5
71	60	0,6	8	3	5	2	2	1	1	1	5	5	5	0	4	4	7	∞	5
72	60	0,7	5	5	0	4	4	4	3	3	2	2	1	∞	10	10	∞	2	2
73	60	0,6	3	4	5	8	2	0	1	2	3	4	5	∞	3	∞	1	2	6
74	60	0,2	8	3	3	0	5	5	∞	6	6	6	7	7	7	6	6	∞	6

75	60	0,4	6	6	6	$\infty$	5	5	5	0	4	4	4	4	3	3	$\infty$	2	2
76	40	0,2	5	5	12	4	4	0	3	3	3	2	2	2	$\infty$	5	5	6	6
77	40	0,2	8	3	3	0	4	4	4	4	4	$\infty$	5	5	6	8	$\infty$	7	7
78	40	0,2	7	4	4	5	$\infty$	6	6	0	3	3	4	5	5	$\infty$	6	6	6
79	40	0,3	4	2	2	5	5	0	6	6	6	$\infty$	7	7	7	8	$\infty$	2	2
80	40	0,4	5	5	6	6	7	7	0	8	8	3	$\infty$	6	6	5	4	$\infty$	2

Окончание таблицы 1

Вариант	Данные для расчета																		
	E, В	R <sub>0</sub> , Ом	R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>3</sub> , Ом	R <sub>4</sub> , Ом	R <sub>5</sub> , Ом	R <sub>6</sub> , Ом	R <sub>7</sub> , Ом	R <sub>8</sub> , Ом	R <sub>9</sub> , Ом	R <sub>10</sub> , Ом	R <sub>11</sub> , Ом	R <sub>12</sub> , Ом	R <sub>13</sub> , Ом	R <sub>14</sub> , Ом	R <sub>15</sub> , Ом	R <sub>16</sub> , Ом	R <sub>17</sub> , Ом
81	30	0,3	3	4	5	5	6	6	0	7	$\infty$	5	5	4	$\infty$	3	3	3	3
82	30	0,2	7	7	0	5	5	5	$\infty$	4	4	4	3	3	3	2	$\infty$	5	5
83	30	0,5	5	5	4	$\infty$	3	3	2	0	1	2	3	3	4	$\infty$	5	5	6
84	30	0,4	6	6	7	7	3	3	0	2	2	1	1	$\infty$	2	3	4	5	$\infty$
85	30	0,5	6	6	8	8	0	7	7	3	3	$\infty$	4	4	5	5	$\infty$	2	2
86	20	0,2	3	4	5	5	0	6	6	$\infty$	3	4	5	5	$\infty$	6	6	7	8
87	20	0,2	5	5	4	4	$\infty$	3	3	8	8	6	6	0	2	2	$\infty$	5	5
88	20	0,4	6	6	5	0	6	6	$\infty$	3	3	4	4	$\infty$	5	5	5	6	6



89	20	0,5	3	3	0	4	4	5	5	6	6	6	$\infty$	2	2	2	$\infty$	3	3
90	20	0,2	7	7	6	6	5	5	0	4	4	4	3	3	$\infty$	5	5	5	$\infty$
91	150	0,5	3	3	4	4	0	5	5	5	$\infty$	6	6	7	7	8	8	9	$\infty$
92	150	0,5	5	5	0	4	4	$\infty$	3	3	2	2	$\infty$	1	1	5	5	4	4
93	150	0,5	6	6	15	2	2	4	4	5	0	6	6	6	7	7	7	$\infty$	5
94	150	0,6	3	4	5	$\infty$	2	2	0	1	1	5	5	5	6	6	$\infty$	3	3
95	150	0,5	5	4	3	6	0	5	5	4	4	4	3	$\infty$	2	2	1	$\infty$	8
96	140	0,4	3	4	4	5	5	0	6	6	6	7	7	7	$\infty$	5	5	4	$\infty$
<b>97</b>	140	0,4	4	4	5	5	6	$\infty$	8	0	3	3	4	5	6	6	$\infty$	2	5
98	140	0,4	5	5	5	6	6	6	0	7	7	7	$\infty$	9	3	3	2	$\infty$	4
99	140	0,6	3	3	4	$\infty$	5	0	6	6	6	8	8	8	6	6	6	$\infty$	5
100	120	0,2	4	4	4	3	4	5	0	6	$\infty$	5	5	5	$\infty$	6	9	8	6

### Пример расчета задачи 1.

Для электрической цепи, схема которой изображена на рис. 1.1, определить эквивалентное (входное) сопротивление относительно зажимов источника питания и ток в ветви источника питания.

*Заданы параметры электрической цепи рис. 1.1, в соответствии с которыми показана электрическая рабочая схема рис. 1.2:*

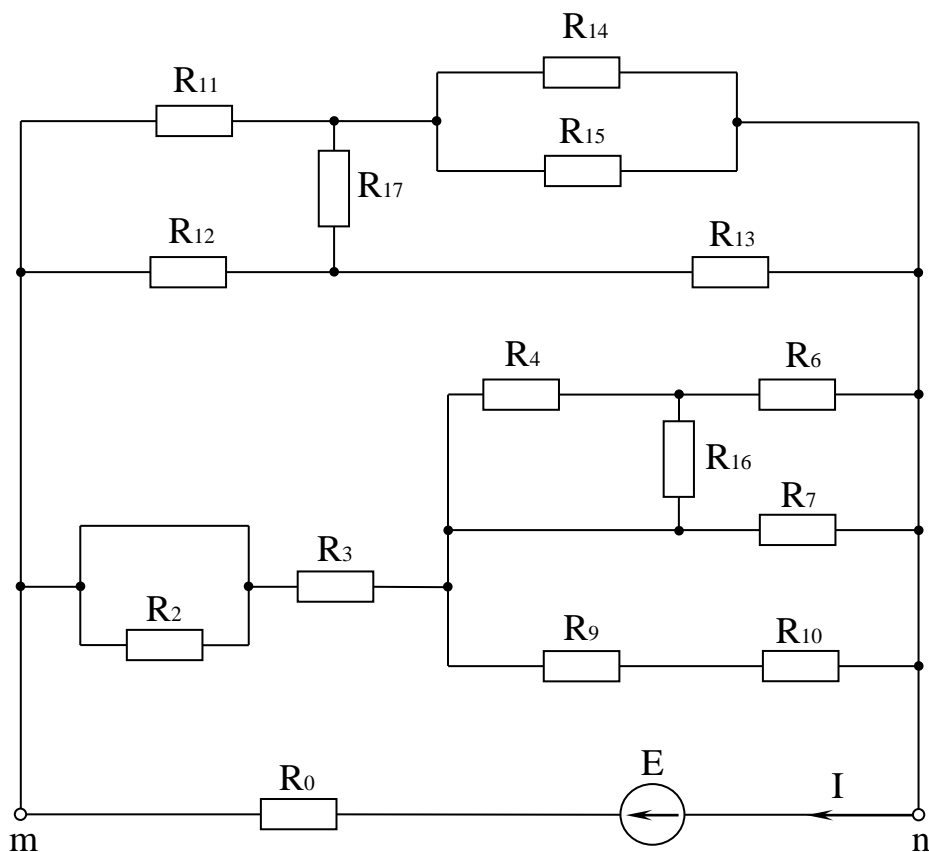


Рис. 1.2

- $R_0 = 0,5 \text{ Ом}$
- $R_1 = 0$
- $R_2 = 4 \text{ Ом}$
- $R_3 = 4 \text{ Ом}$
- $R_4 = 4 \text{ Ом}$
- $R_5 = 0$
- $R_6 = 4 \text{ Ом}$
- $R_7 = 5 \text{ Ом}$
- $R_8 = \infty$
- $R_9 = 8 \text{ Ом}$
- $R_{10} = 8 \text{ Ом}$
- $R_{11} = 15 \text{ Ом}$
- $R_{12} = 15 \text{ Ом}$
- $R_{13} = 7 \text{ Ом}$
- $R_{14} = 8 \text{ Ом}$
- $R_{15} = 8 \text{ Ом}$
- $R_{16} = 6 \text{ Ом}$
- $R_{17} = 15 \text{ Ом}$
- $E = 128 \text{ В}$

Решение:

Для определения  $R_{\text{экв}}$  данную цепь разбиваем на участки. В каждом участке, заменив последовательно и параллельно соединенные резисторы эквивалентными сопротивлениями, упрощаем схему.

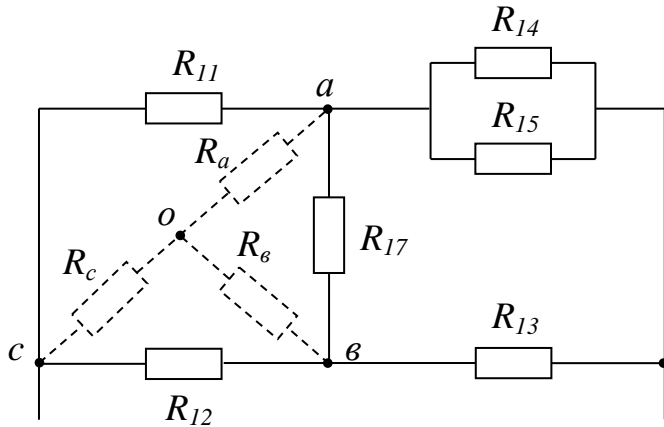


Рис. 1.3

Для участка схемы (рис. 1.3) преобразуем треугольник  $abc$  в эквивалентную звезду (11):

$$R_a = \frac{R_{11} \cdot R_{17}}{R_{11} + R_{12} + R_{17}} = \frac{15 \cdot 15}{15 + 15 + 15} = 5 \text{ Ом}$$

$$R_b = \frac{R_{12} \cdot R_{17}}{R_{11} + R_{12} + R_{17}} = \frac{15 \cdot 15}{15 + 15 + 15} = 5 \text{ Ом}$$

$$R_c = \frac{R_{11} \cdot R_{12}}{R_{11} + R_{12} + R_{17}} = \frac{15 \cdot 15}{15 + 15 + 15} = 5 \text{ Ом}$$

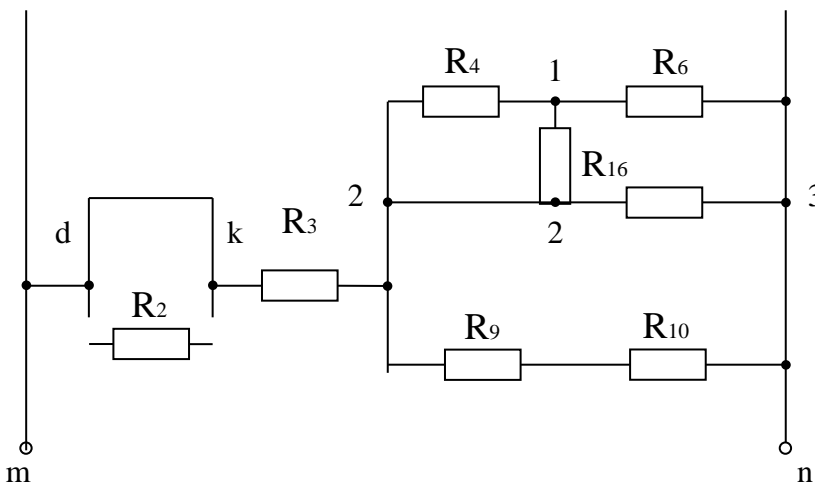
Определяем эквивалентное сопротивление  $R_a$  упрощенного участка схемы (рис. 1.3).

$$R_I = \frac{R_{14} \cdot R_{15}}{R_{14} + R_{15}} = \frac{8 \cdot 8}{8 + 8} = 4 \text{ Ом}$$

$$R_{II} = R_a + R_I = 5 + 4 = 9 \text{ Ом}$$

$$R_{III} = R_b + R_{13} = 5 + 7 = 12 \text{ Ом}$$

$$R_{\alpha} = R_c + \frac{R_{II} \cdot R_{III}}{R_{II} + R_{III}} = 5 + \frac{9 \cdot 12}{9 + 12} = 10,4 \text{ Ом}$$



Ри. 1.4 с

На рис. 1.4 сопротивление  $R_2$  закорочено нулевым сопротивлением  $R_1=0$ .

$$R_{dk} = \frac{R_2 \cdot 0}{R_2 + 0} = 0$$

Ток потечет по наименьшему сопротивлению, т. е. по закоротке. Если вместо  $R_2$  будет несколько параллельных сопротивлений, они все будут закорочены.

$$R_{IV} = R_3 = 4 \text{ Ом}$$

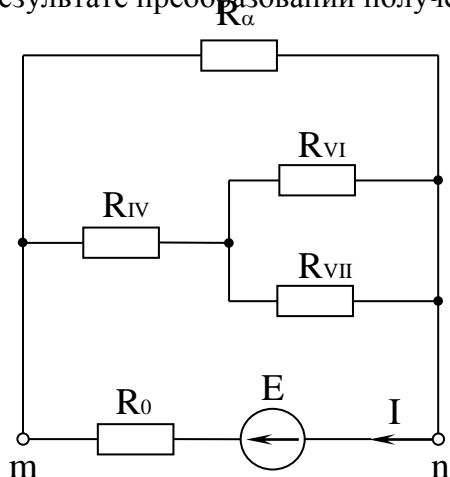
Ветви  $R_4$  и  $R_{16}$  присоединены к одной паре узлов 1 и 2, следовательно они соединены параллельно.

$$R_V = \frac{R_4 \cdot R_{16}}{R_4 + R_{16}} + R_6 = \frac{4 \cdot 6}{4 + 6} + 4 = 6,4 \text{ Ом}$$

$$R_{VI} = \frac{R_V \cdot R_7}{R_V + R_7} = \frac{6,4 \cdot 5}{6,4 + 5} = 2,8 \text{ Ом}$$

$$R_{VII} = R_9 + R_{10} = 8 + 3 = 11 \text{ Ом}$$

В результате преобразований получена схема рис. 1.5.



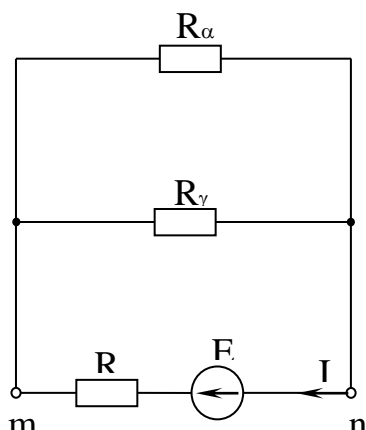
$$R_\beta = \frac{R_{VI} \cdot R_{VII}}{R_{VI} + R_{VII}} = \frac{2,8 \cdot 11}{2,8 + 11} = 2,23 \text{ Ом}$$

$$R_\gamma = R_{IV} + R_\beta = 4 + 2,23 = 6,23 \text{ Ом}$$

Рис. 1.5

Эквивалентное сопротивление относительно зажимов источника питания (рис. 1.6).

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_\alpha \cdot R_\gamma}{R_\alpha + R_\gamma} = \frac{10,14 \cdot 6,23}{10,14 + 6,23} = 3,86 \text{ Ом}$$



Ток в ветви источника питания определяют по закону Ома

$$I = \frac{E}{R_{\text{экв}} + R_0} = \frac{128}{3,86 + 0,5} = 29,36 \text{ А}$$

Рис. 1.6

**ЗАДАЧА 2:** Для электрической цепи, схема которой соответствует номеру варианта в табл. 2 и изображенной на рис. 2.1 – 2.20, выполнить следующее:

1. Составить систему уравнений для расчета токов во всех ветвях схемы методом законов Кирхгофа, не решая её.
2. Упростить схему, преобразовав её в эквивалентную схему с двумя узлами путем замены пассивного «треугольника» сопротивлений в эквивалентную «звезду».
3. Определить токи в упрощенной схеме методом узлового напряжения.

4. Возвратиться к **исходной** схеме и из уравнений, составленных по законам Кирхгофа определить остальные токи.
5. Проверить баланс мощностей.

Таблица 2

Вариант	Рисунок	Данные для расчета								
		R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>3</sub> , Ом	R <sub>4</sub> , Ом	R <sub>5</sub> , Ом	R <sub>6</sub> , Ом	E <sub>1</sub> , В	E <sub>2</sub> , В	E <sub>3</sub> , В
1	2.1	1	1	1	6	6	4	12	5	10
2	2.14	1	2	4	6	8	10	10	15	26
3	2.13	2	4	6	8	6	10	8	12	8
4	2.16	2	1	2	4	2,5	1,5	120	114	100
5	2.4	5	6	1,5	1,5	3	2	110	104	100
6	2.15	1	1,5	2	5	3	2	100	90	105
7	2.2	1,75	2,5	4	1,5	6	6	12	24	0
8	2.17	2	1	2	4	4	8	24	24	40
9	2.18	3,2	6	9	10	2	8	24	40	20
10	2.5	2	2	3	3	4	4	12	16	20
11	2.6	2	2	6	6	4	4	24	12	0
12	2.7	2	2	2	4	6	0	12	24	12
13	2.10	2	2	4	10	10	10	24	12	24
14	2.11	2	1	6	8	4	10	12	20	30
15	2.12	5	2	1	10	4	2	10	20	30
16	2.3	2	2	3	10	4	5	20	10	0
17	2.8	2	2	2	6	6	6	12	6	12
18	2.9	2	2	2	6	6	0	12	6	0
19	2.19	2	4	8	10	2	4	24	12	24
20	2.20	1	2	4	10	5	1	12	12	20
21	2.1	1	1	1	6	6	4	10	12	18
22	2.14	1	2	4	6	8	10	25	15	10
23	2.13	2	4	6	8	6	10	8	8	12
24	2.16	3	1	2	4	1,5	2,5	115	116	110

25	2.4	5	6	1,8	1,8	2,5	3	115	109	110
26	2.15	1,5	1	2	5	3	3	105	95	110
27	2.2	3	2	4	2	4	8	12	15	0
28	2.17	1,5	3	7	2	4	2	12	16	32
29	2.18	8	9	3	4	8	4	40	30	25
30	2.5	2	2	3	3	4	4	10	15	20
31	2.6	2	2	6	6	4	4	12	24	0
32	2.7	2	2	2	4	6	0	12	24	12
33	2.10	2	2	4	10	10	10	12	24	12
34	2.11	2	1	6	8	4	10	30	20	12

Продолжение таблицы 2

Вариант	Рисунок	Данные для расчета								
		R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>3</sub> , Ом	R <sub>4</sub> , Ом	R <sub>5</sub> , Ом	R <sub>6</sub> , Ом	E <sub>1</sub> , В	E <sub>2</sub> , В	E <sub>3</sub> , В
35	2.12	5	2	1	10	4	2	30	20	10
36	2.3	2	2	4	10	5	3	10	20	0
37	2.19	2	4	8	10	2	4	20	30	30
38	2.8	2	2	2	6	6	6	6	12	6
39	2.9	2	2	4	6	6	0	6	12	0
40	2.20	1	2	4	10	5	1	15	20	30
41	2.1	1	1	1	6	6	4	15	10	5
42	2.14	1	2	4	6	8	10	20	12	8
43	2.13	2	4	6	8	6	10	15	10	20
44	2.16	5	4	2	2	2	1,5	125	119	120
45	2.4	5	4	2,4	2,4	1,5	3	125	118	130
46	2.15	2	1,5	1	5	3	4	110	100	115
47	2.2	3,5	3	4	4	2	2	16	24	8
48	2.17	2	4	3	8	4	4	20	25	24
49	2.18	2,5	2	3	6	3	9	16	15	24
50	2.5	2	2	3	3	4	4	15	10	18
51	2.6	2	2	6	6	4	4	25	15	0
52	2.7	2	2	2	4	6	0	15	25	10
53	2.10	2	2	4	10	10	10	12	6	12
54	2.11	2	1	6	8	4	10	8	12	20
55	2.12	5	2	1	10	4	2	20	10	30
56	2.3	2	2	3	10	4	5	15	5	0
57	2.19	2	4	8	10	2	4	10	20	30
58	2.8	2	2	2	6	6	6	12	6	24
59	2.9	2	2	2	6	6	0	12	6	0
60	2.20	1	2	4	10	5	1	30	20	15

61	2.1	1	1	1	6	6	4	20	10	15
62	2.14	1	2	4	6	8	10	8	120	8
63	2.13	2	4	6	8	6	10	20	15	10
64	2.16	1	2	7	2	2	1,5	120	115	125
65	2.4	5	4	2,7	2,7	2,7	2	130	122	100
66	2.15	0,5	1	1,5	5	3	5	115	105	120
67	2.2	4	1	6	3,25	8	2	20	12	0
68	2.17	1,2	1,6	2,6	6	8	6	30	20	25



## Окончание таблицы 2

Вариант	Рисунок	Данные для расчета								
		R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>3</sub> , Ом	R <sub>4</sub> , Ом	R <sub>5</sub> , Ом	R <sub>6</sub> , Ом	E <sub>1</sub> , В	E <sub>2</sub> , В	E <sub>3</sub> , В
69	2.18	6	4	4,2	2	8	10	40	30	25
70	2.5	2	2	3	3	4	4	12	14	16
71	2.6	2	2	6	6	4	4	10	20	0
72	2.7	2	2	2	4	6	0	8	12	8
73	2.10	2	2	4	10	10	10	20	24	12
74	2.11	2	1	6	8	4	10	20	8	12
75	2.12	5	2	1	10	4	2	20	30	10
76	2.3	2	2	5	10	4	2	10	5	0
77	2.19	2	4	8	10	2	4	12	24	25
78	2.8	2	2	2	6	6	6	10	20	25
79	2.9	2	2	2	6	6	0	10	20	0
80	2.20	1	2	4	10	5	1	12	20	13
81	2.1	1	1	1	6	6	4	5	10	15
82	2.14	1	2	4	6	8	10	15	10	25
83	2.13	2	4	6	8	6	10	12	8	8
84	2.16	4	1	2	4	2	1,5	112	126	115
85	2.4	5	6	2,1	2,1	2	2	120	113	109
86	2.15	1	0,5	1,5	5	5	4	4	110	125
87	2.2	3,5	3,25	3	2,5	3	6	25	20	0
88	2.17	2,8	3,8	3,1	4	3	3	32	10	24
89	2.18	8	2	3	4	4	8	20	16	30
90	2.5	2	2	3	3	4	4	25	20	15
91	2.6	2	2	6	6	4	4	15	18	0
92	2.7	2	2	2	4	6	0	20	10	15
93	2.10	2	2	4	10	10	10	6	12	6
94	2.11	2	1	6	8	4	10	20	12	30

95	2.12	5	2	1	10	4	2	30	10	20
96	2.3	2	2	3	10	4	5	5	20	0
97	2.19	2	4	8	10	2	4	24	24	12
98	2.8	2	2	2	6	6	6	18	9	24
99	2.9	2	2	2	6	6	0	18	9	0
100	2.20	1	2	4	10	5	1	20	12	12
101	2.1	3	3	3	6	6	4	12	5	10
102	2.14	1	2	7	9	9	9	20	12	18

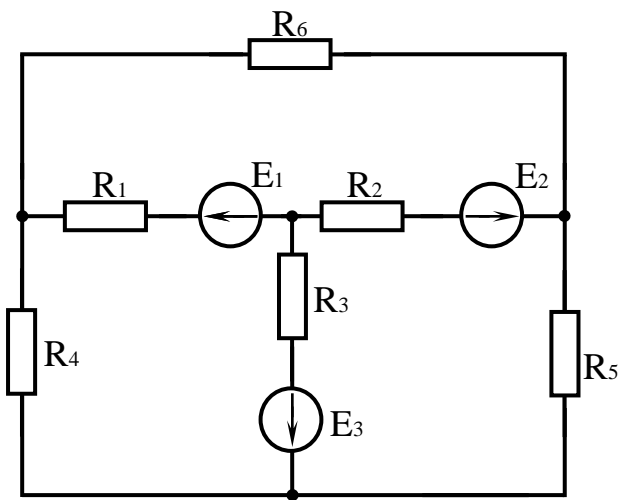


Рис2.1

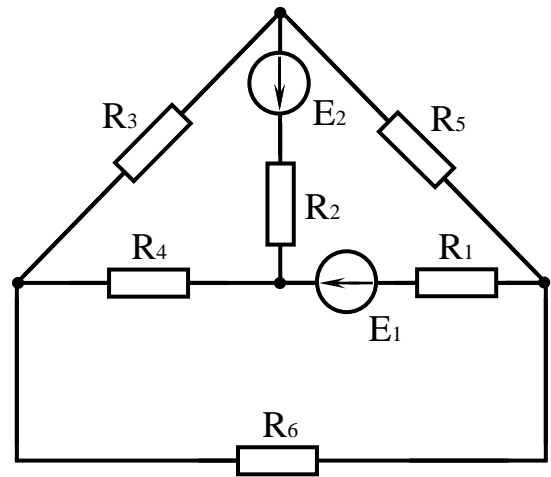


Рис. 2.2

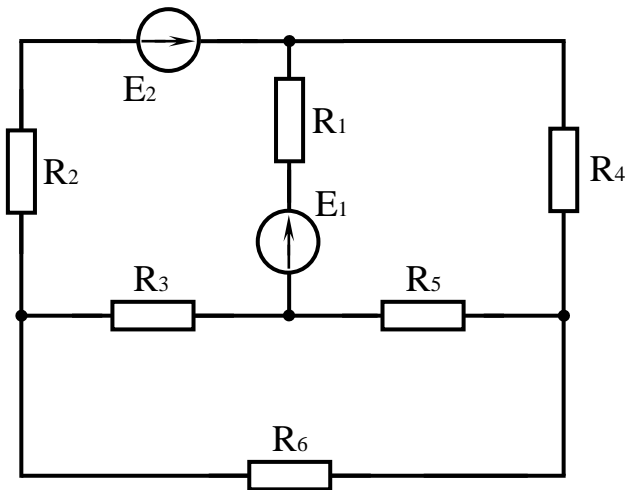


Рис. 2.3

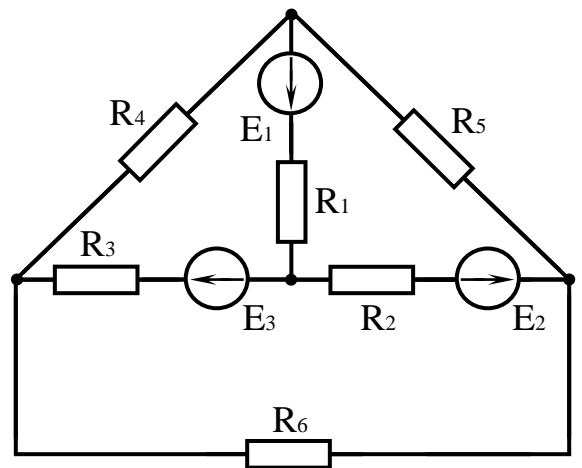


Рис. 2.4

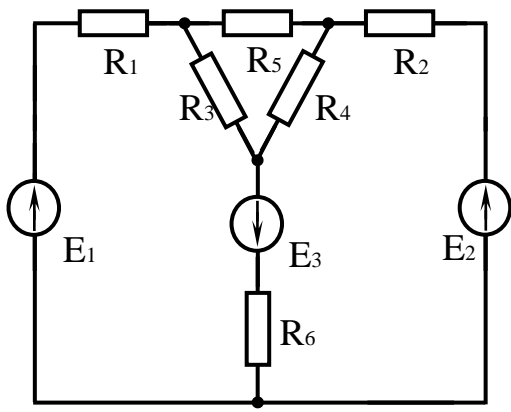


Рис.2.5

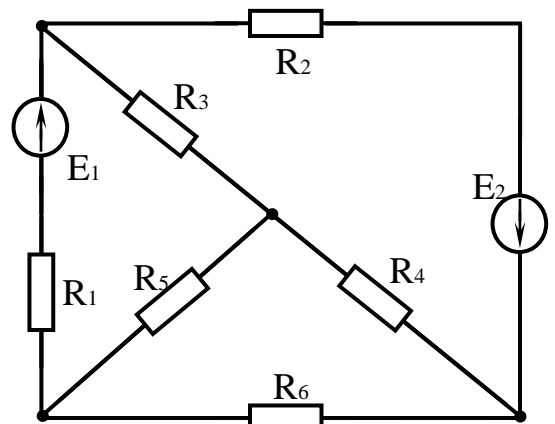


Рис.2.6

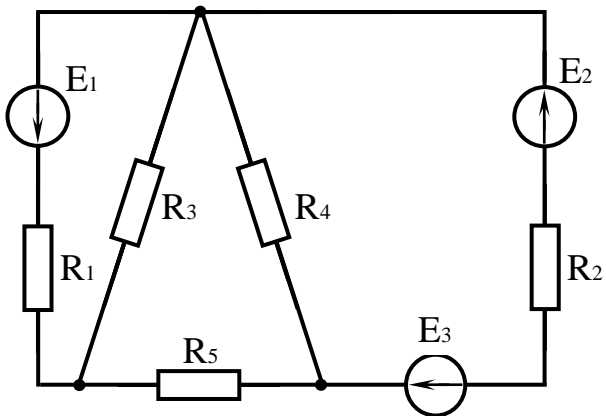


Рис. 2.7

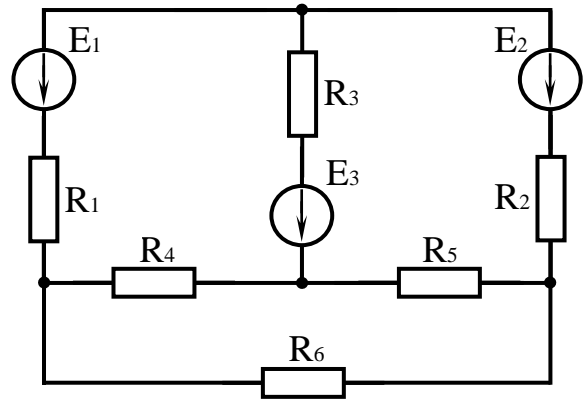


Рис. 2.8

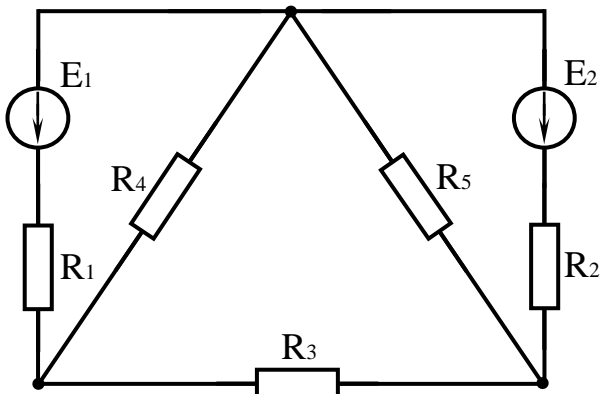


Рис. 2.9

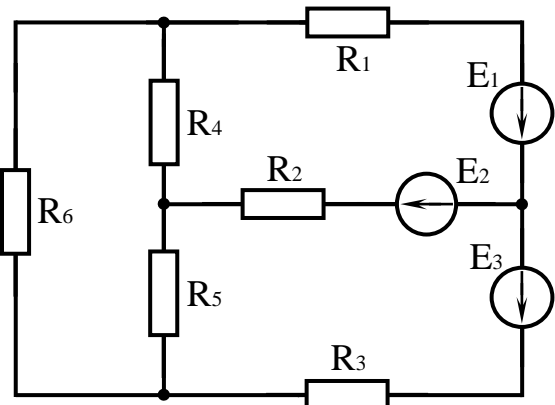


Рис. 2.10

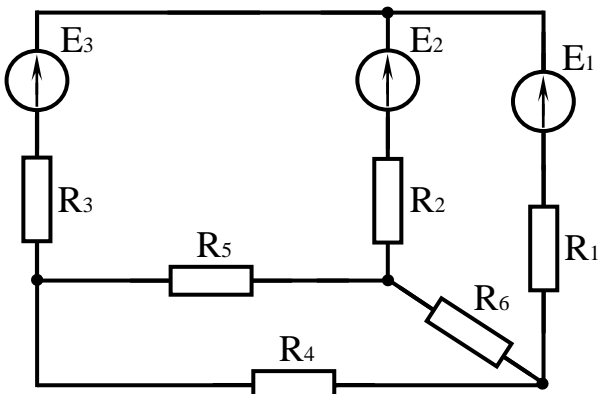


Рис. 2.11

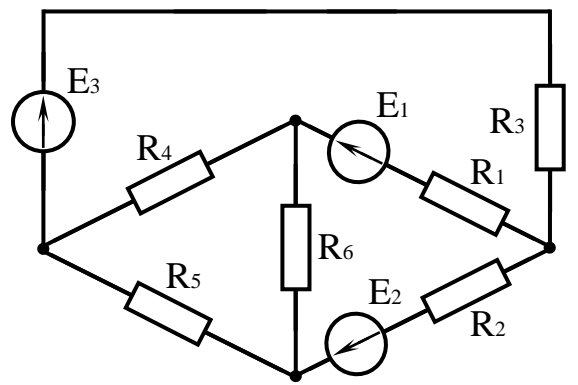


Рис. 2.12

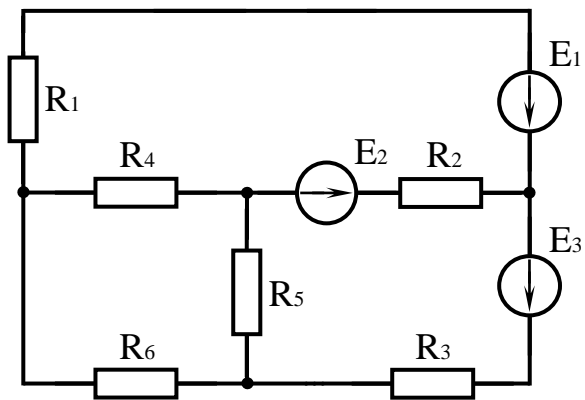


Рис. 2.13

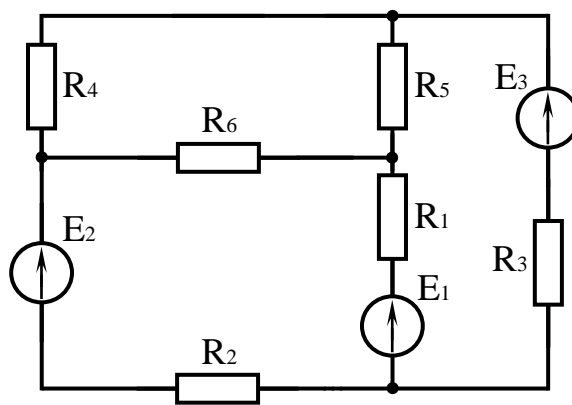


Рис. 2.14

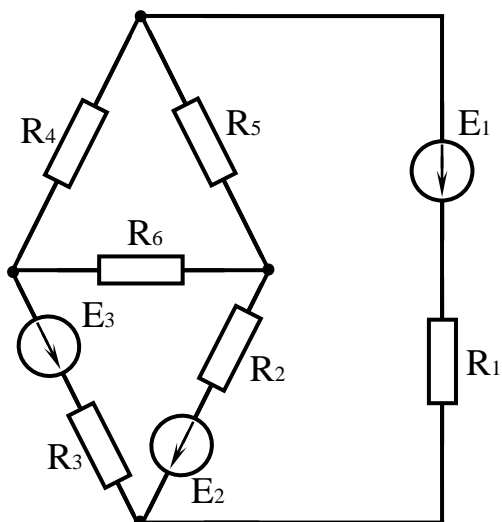


Рис. 2.15

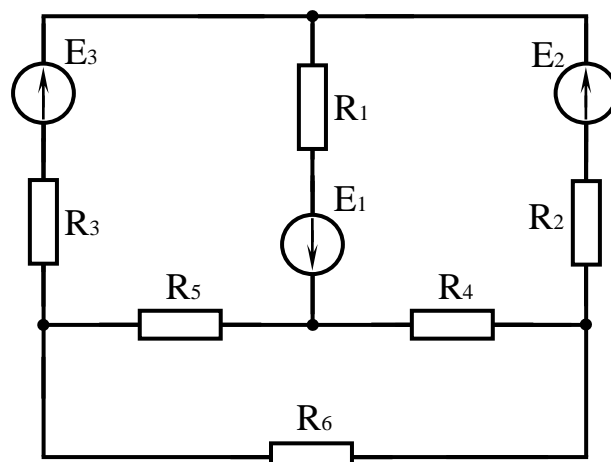


Рис. 2.16

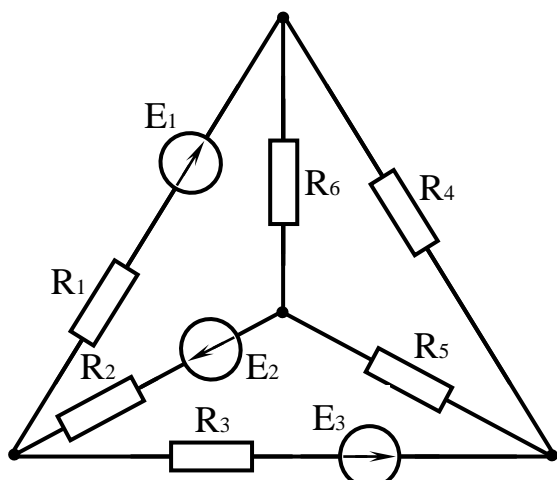


Рис. 2.17

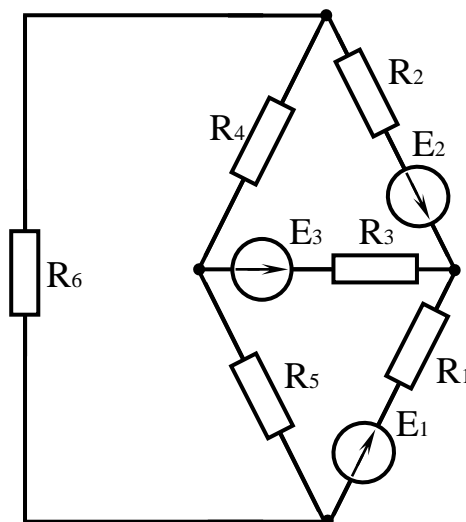


Рис. 2.18

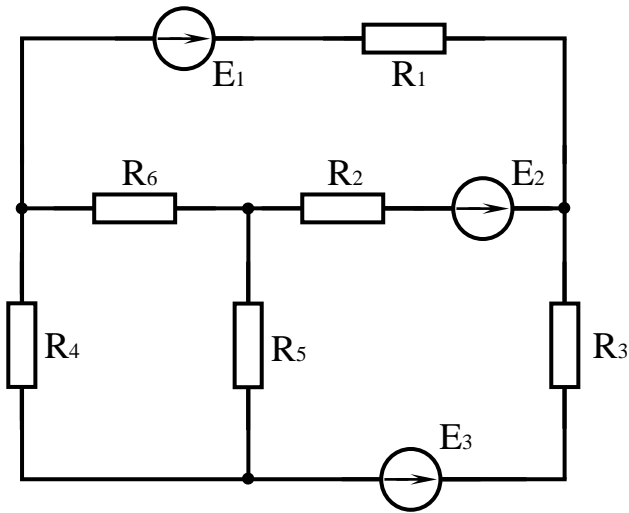


Рис.  
2.19

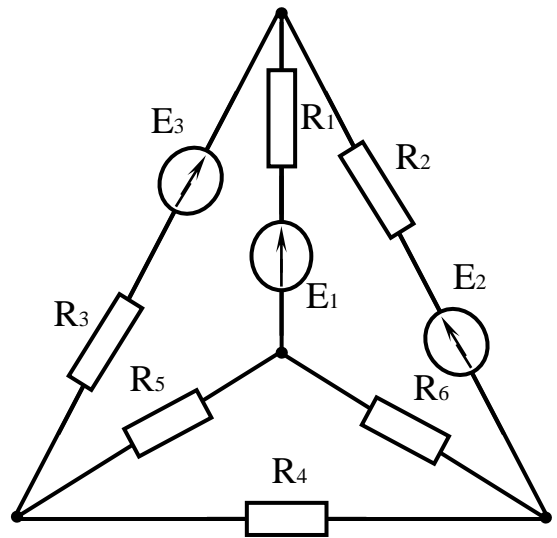
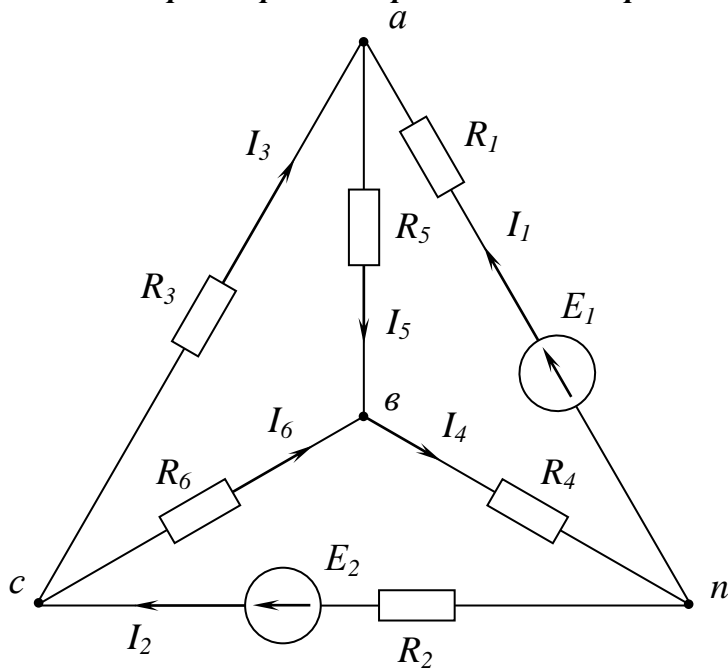


Рис.  
2.20

### Пример расчета задачи 2.

Заданы параметры электрической схемы рис. 12:



$R_1 = 10 \text{ Ом}$   
 $R_2 = 10 \text{ Ом}$   
 $R_3 = 10 \text{ Ом}$   
 $R_4 = 5 \text{ Ом}$   
 $R_5 = 5 \text{ Ом}$   
 $R_6 = 5 \text{ Ом}$   
 $E_1 = 100 \text{ В}$   
 $E_2 = 50 \text{ В}$

Рис. 12

Решение:

1. В приведенной электрической цепи (рис. 12) четыре узла, шесть ветвей, следовательно, для определения токов в ветвях методом законов Кирхгофа необходимо составить систему из шести уравнений для неизвестных токов. Решать не надо.

$$\text{Узел } a \quad I_1 + I_3 - I_5 = 0$$

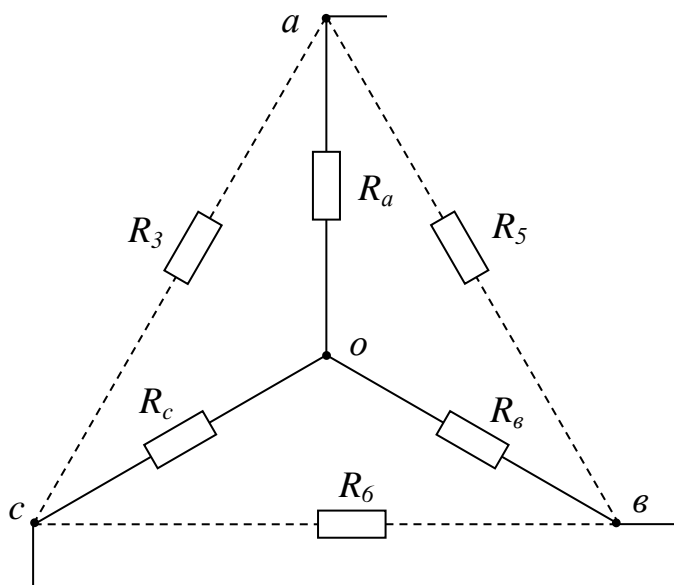
$$\text{Узел } b \quad I_6 + I_5 - I_4 = 0$$

Узел $n$	$I_4 - I_1 - I_2 = 0$
Контур $can$	$I_3 \cdot R_3 - I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 = -E_1 + E_2$
Контур $cvn$	$I_6 \cdot R_6 + I_4 \cdot R_4 + I_2 \cdot R_2 = E_2$
Контур $avn$	$I_5 \cdot R_5 + I_4 \cdot R_4 + I_1 \cdot R_1 = E_1$

Решив систему уравнений относительно токов в ветвях, можно определить все неизвестные токи.

2. Метод узлового напряжения эффективен при расчете электрических цепей с двумя узлами и большим количеством параллельных ветвей или более сложных схем, которые легко могут быть приведены к двухузловым. Изображенная схема на рис. 12 – четырехузловая. Выделим треугольник  $abc$  пассивных элементов и преобразуем его в эквивалентную звезду (рис. 13).

Сопротивления лучей «звезды» определяются по формулам (11):



$$R_a = \frac{R_5 \cdot R_3}{R_5 + R_6 + R_3} = \frac{5 \cdot 10}{5 + 5 + 10} = \frac{50}{20} = 2,5 \text{ Ом}$$

$$R_b = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6 + R_3} = \frac{5 \cdot 5}{5 + 5 + 10} = \frac{25}{20} = 1,25 \text{ Ом}$$

$$R_c = \frac{R_3 \cdot R_6}{R_5 + R_6 + R_3} = \frac{10 \cdot 5}{5 + 5 + 10} = \frac{50}{20} = 2,5 \text{ Ом}$$

Рис. 13

В результате преобразований получена двухузловая схема рис. 14

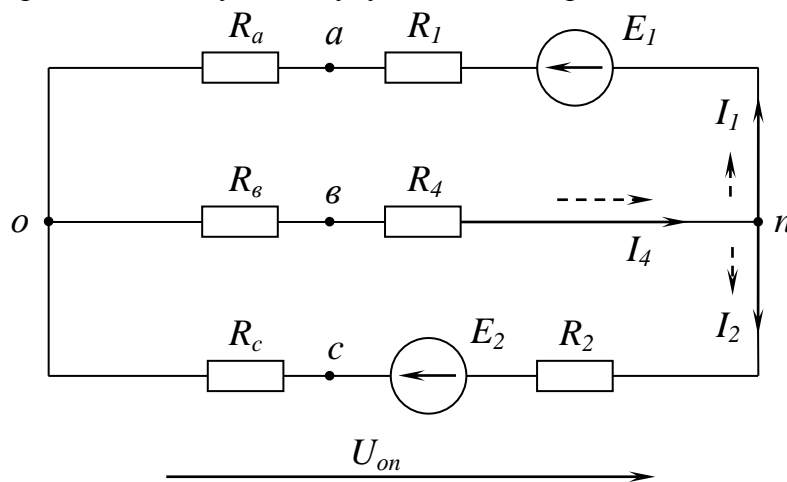


Рис. 14

3. Сущность **метода узлового напряжения** заключается в том, что сначала определяют:

3.1. Величину напряжения, которое возникает между двумя узлами «*o*» и «*n*» по

формуле:

$$U_{on} = \frac{\sum_{k=1}^m E_k \cdot G_k}{\sum_{k=1}^n G_k}, \quad (12)$$

Где:  $n$  – число параллельных ветвей цепи;

$m$  – число ветвей, содержащих источники ЭДС;

$G_k$  – проводимости ветвей.

Рассчитываем проводимости ветвей схемы рис. 14:

$$G_1 = \frac{1}{R_a + R_1} = \frac{1}{12,5} = 0,08 \text{ См} \quad G_2 = \frac{1}{R_c + R_2} = \frac{1}{12,5} = 0,08 \text{ См}$$

$$G_4 = \frac{1}{R_g + R_4} = \frac{1}{6,25} = 0,16 \text{ См}$$

Направление узлового напряжения указывается произвольно, положительный знак ответа подтверждает правильность выбора. Отрицательный знак ответа указывает на то, что истинное направление – противоположно.

Произведение  $E_k \cdot G_k$  (12) берут со знаком «-», когда  $E_k$  совпадает с выбранным напряжением  $U_{on}$ .

Возвращаясь к схеме (рис. 14)

$$U_{on} = \frac{E_1 \cdot G_1 + E_2 \cdot G_2}{G_1 + G_2 + G_3} = \frac{100 \cdot 0,08 + 50 \cdot 0,08}{0,16 + 0,08 + 0,08} = 37,5 \text{ В}$$

3.2. Токи в ветвях схемы (рис. 14) определяют по *обобщенному закону Ома*:

$$I_k = (\pm E_k \pm U_{on}) \cdot G_k \quad (13)$$

Правило знаков к формуле (13).

Если  $E_k$  и узловое напряжение  $U_{on}$  направлены к тому же узлу, что и ток, то их берут с «+», а если к другому узлу – то с «-».

$$I_1 = (E_1 - U_{on}) \cdot G_1 = (100 - 37,5) \cdot 0,08 = 5 \text{ А}$$

$$I_2 = (E_2 - U_{on}) \cdot G_2 = (50 - 37,5) \cdot 0,08 = 1 \text{ А}$$

$$I_4 = U_{on} \cdot G_4 = 37,5 \cdot 0,16 = 6 \text{ А}$$

3.3. Выполняем проверку правильности расчета по первому закону Кирхгофа:

$$I_1 + I_2 = I_4$$

3.4. Переносим токи на исходную схему (рис. 15) с учетом их истинного направления.

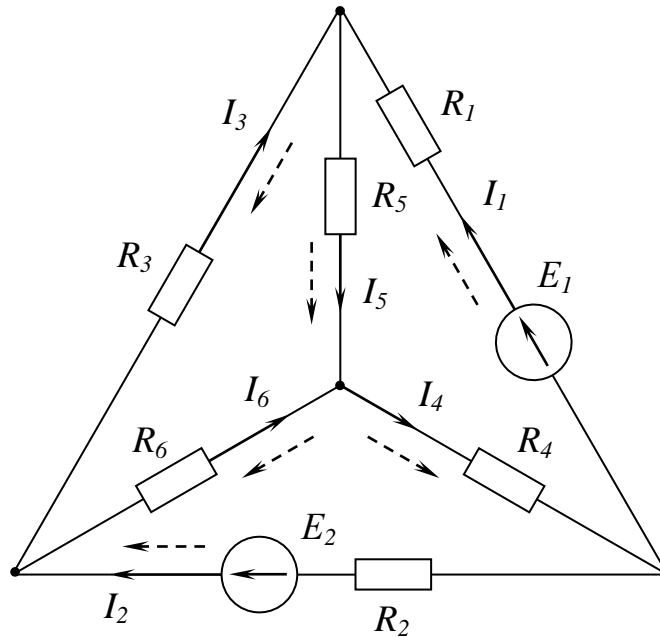


Рис. 15

Произвольно показываем направления токов  $I_3$ ,  $I_5$ ,  $I_6$  и определяем их величины, используя второй закон Кирхгофа.

Для контура *авп*

$$I_5 \cdot R_5 + I_4 \cdot R_4 + I_1 \cdot R_1 = E_1$$

$$I_5 = \frac{E_1 - I_4 \cdot R_4 - I_1 \cdot R_1}{R_5} = \frac{100 - 6 \cdot 5 - 5 \cdot 10}{5} = 4 \text{ А}$$

Для контура *свп*

$$I_6 \cdot R_6 + I_4 \cdot R_4 + I_2 \cdot R_2 = E_2$$

$$I_6 = \frac{E_2 - I_4 \cdot R_4 - I_2 \cdot R_2}{R_6} = \frac{50 - 6 \cdot 5 - 1 \cdot 10}{5} = 2 \text{ А}$$

Для контура *сап*

$$I_3 \cdot R_3 - I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 = -E_1 + E_2$$

$$I_3 = \frac{-E_1 + E_2 + I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2}{R_3} = \frac{-100 + 50 + 5 \cdot 10 - 1 \cdot 10}{10} = -1 \text{ А}$$

Показываем на схеме рис. 15 истинное направление токов  $I_3$ ,  $I_5$ ,  $I_6$ .

Проверка правильности расчета задачи осуществляется по уравнению баланса мощностей. Сумма мощностей источников равна сумме мощностей приемников.

$$\sum P_{ист} = \sum P_{пр}$$

где  $P_{ист} = E_k \cdot I_k$  - мощность источника, Вт, кВт;



$P_{np} = E_k \cdot I_k$  - мощность активного приемника, Вт, кВт;

$P_{np} = I_k^2 \cdot R_k$  - мощность пассивного приемника, Вт, кВт.

**Уравнение баланса мощностей**

$$\sum_{k=1}^n E_k \cdot I_k = \sum_{k=1}^n I_k^2 \cdot R_k$$

При составлении баланса мощностей необходимо учитывать следующее:

Если направление ЭДС и тока совпадают, ЭДС является источником электрической энергии;

Если направление ЭДС и тока разные, то ЭДС – активный приемник электрической энергии, например, электродвигатель.

Баланс мощностей для схемы рис. 15.

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

$$100 \cdot 5 + 50 \cdot 1 = 25 \cdot 10 + 1 \cdot 10 + 1 \cdot 10 + 36 \cdot 5 + 16 \cdot 5 + 4 \cdot 5$$

$$550 \text{ Вт} = 550 \text{ Вт}$$

**ЗАДАЧА 3:** Провести анализ электрического состояния цепи, схема которой соответствует номеру варианта в таблице 3 и изображенной на рис. 3.1 – 3.72.

Таблица 3

Вариант	Рисунок	Условие	Задание
1	3.1	$U = \text{const}$	Как изменятся токи и напряжение $U_{ab}$ при замыкании ключа?
2	3.2	$E_1 = 10\text{В}$ $E_2 = 5\text{В}$ $R_1 = R_2 = 1\text{Ом}$	Как изменится напряжение $U_{ab}$ , если ЭДС $E_2$ возрастет в 2 раза?
3	3.3	$E_2 > E_1$	Как изменятся показания вольтметров при перемещении движка реостата вверх?
4	3.4	$U = \text{const}$	Как изменится ток $I_1$ , если сопротивление $R_2$ увеличится в 2 раза?
5	3.5	$U = \text{const}$	Как изменится показание амперметра при размыкании ключа?
6	3.6	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра при замыкании ключа?
7	3.7	$U = \text{const}$	Как изменятся показания амперметров после замыкания ключа?
8	3.8	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра после замыкания ключа?
9	3.9	$U = \text{const}$	Как изменятся показания амперметров после замыкания ключа?
10	3.10	$E = \text{const}$	Как изменятся показания амперметров при замыкании ключа?
11	3.11	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра при размыкании ключа?

12	3.12	$E = \text{const}$	Как изменятся показания приборов, если движок реостата сдвинуть вправо?
13	3.13	$E = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после замыкания ключа?
14	3.14	$E = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после размыкания ключа?
15	3.15	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов, если две одинаковые лампочки включить последовательно?
16	3.16	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после замыкания ключа?

Продолжение таблицы 3

Вариант	Рисунок	Условие	Задание
17	3.17	$U = \text{const}$ До нагревания $R_1 = R_2 = R_3 = R$	Как изменятся показания приборов при нагревании катушки из медного провода, сопротивление которой $R_3$ ?
18	3.18	$U = \text{const}$ $R_1 = R_3$	В какую сторону нужно перемещать движок реостата $R_2$ , чтобы при нагревании металлического сопротивления $R_3$ показание вольтметра оставалось неизменным?
19	3.19	$U = \text{const}$	В какую сторону нужно перемещать движок реостата $R_1$ , чтобы при нагревании катушки из медной проволоки, сопротивление которой $R_3$ , показание вольтметра не изменилось?
20	3.20	$U = \text{const}$ $R_2 = R_3$	В какую сторону нужно перемещать движок реостата $R_1$ , чтобы при нагревании металлического сопротивления $R_3$ мощность $P_1$ не изменилась?
21	3.21	$U = \text{const}$	В какую сторону нужно перемещать движок реостата $R_1$ , чтобы показание амперметра не изменилось при включении лампочек в цепь последовательно?
22	3.22	$U = \text{const}$	В какую сторону нужно перемещать движок реостата $R_5$ , чтобы после замыкания рубильника мощность источника $P$ не изменилась?
23	3.23	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов при нагревании катушки из медной проволоки, сопротивление которой $R_3$ ?
24	3.24	$U = \text{const}$ $R_1 = R_2$	Как изменится показание вольтметра, если сопротивление $R_1$ увеличить в 3 раза?
25	3.25	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов при замыкании ключа?
26	3.26	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов при перемещении движка реостата вниз?
27	3.27	$E = 204 \text{ В}$	Как изменится показание амперметра, если замкнуть ключ?

		$R_1 = 1 \text{ Ом}$ $R_2 = 50 \text{ Ом}$	
--	--	---	--

Продолжение таблицы 3

Вариант	Рисунок	Условие	Задание
28	3.28	$U = \text{const}$	Как изменятся мощности $P_1$ и $P_2$ , а также мощность $P$ , потребляемая из сети, при нагревании катушки из медного провода, сопротивление которой $R_3$ ?
29	3.29	$U = \text{const}$	Как изменится показание амперметра после замыкания рубильника?
30	3.30	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после замыкания ключа?
31	3.31	$E = \text{const}$	Как изменится показание амперметра, если сопротивление $R_1$ увеличится?
32	3.32	$E = \text{const}$	Как изменятся показания вольтметров, если сопротивление $R_1$ увеличится?
33	3.33	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после замыкания ключа?
34	3.34	$U = \text{const}$	Как будет изменяться показание амперметра, если движок реостата перемещать вверх?
35	3.35	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после замыкания ключа?
36	3.36	$U = \text{const}$ До нагревания $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$	Как изменится показание амперметра при нагревании катушки из медного провода, сопротивление которой $R_4$ ?
37	3.37	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после замыкания ключа?
38	3.38	$U = \text{const}$ До нагревания $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$	Как изменится показание амперметра при нагревании катушки из медного провода, сопротивление которой $R_4$ ?
39	3.39	$U = \text{const}; I = 12 \text{ А}$ $U_V = 120 \text{ В}$ $R_V = 1200 \text{ Ом}$	Как изменится показание амперметра, если вольтметр включить ошибочно в цепь последовательно?

Продолжение таблицы 3

Вариант	Рисунок	Условие	Задание
40	3.40	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов, если зажимы $a$ и $b$ замкнуть?
41	3.41	$U = \text{const}$	Как изменится показание амперметра после замыкания ключа?
42	3.42	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после замыкания ключа?
43	3.43	$E = \text{const}$	При разомкнутом рубильнике амперметр показывает 5 А, а при замкнутом – 50 А. Во сколько раз $R_2 > R_1$ ?
44	3.44	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра после замыкания ключа?
45	3.45	$U = \text{const}$ $R_1 = 3 \text{ Ом}$ $R_2 = 6 \text{ Ом}$ $I = 5 \text{ А}$	Как изменится показание амперметра, если замкнуть ключ?
46	3.46	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов, если ветвь $ab$ разомкнуть?
47	3.47	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра после размыкания ключа?
48	3.48	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после замыкания ключа?
49	3.49	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра после замыкания ключа?
50	3.50	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после замыкания ключа?
51	3.51	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после замыкания ключа?
52	3.52	$U = \text{const}$	Как изменится показание амперметра при перемещении движка реостата вверх?
53	3.53	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра после замыкания ключа?
54	3.54	$U = \text{const}$	Как изменится показание амперметра после замыкания ключа?
55	3.55	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после замыкания ключа?

Продолжение таблицы 3

Вариант	Рисунок	Условие	Задание
56	3.56	$E = \text{const}$	Как изменится показание амперметра, если сопротивление $R_2$ увеличится?
57	3.57	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после размыкания ключа?

58	3.58	$U = \text{const}$	Как будет изменяться показание амперметра, если движок реостата перемещать вверх?
59	3.59	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после замыкания ключа?
60	3.60	$U = \text{const}$ До нагревания $R_1 = R_2 = R_3 =$ $R_4 = R_5 = R$	Как изменится показание амперметра при нагревании катушки из медного провода, сопротивление которой $R_4$ ?
61	3.61	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра после размыкания ключа?
62	3.62	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра при перемещении движка реостата вверх?
63	3.63	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после замыкания ключа?
64	3.64	$U = \text{const}$ До нагревания $R_1 = R_2 = R_3 =$ $R_4 = R_5 = R$	Как изменится показание вольтметра при нагревании катушки из медного провода, сопротивление которой $R_4$ ?
65	3.65	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра при замыкании ключа?
66	3.66	$U = \text{const}$	Как изменится показание амперметра, если изменить входные зажимы с <i>ав</i> на <i>вс</i> ?
67	3.67	$U = \text{const}$ $I = 6\text{A}$ $R_1 = R_2 = R_3 =$ $R$	Что покажет амперметр после замыкания ключа?
68	3.68	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра после замыкания ключа?

Продолжение таблицы 3

Вариант	Рисунок	Условие	Задание
69	3.69	$U = \text{const}$ $R_1 = R_2 =$ $R_3 = R_4 =$ $R$	Как изменится показание амперметра после замыкания ключа?
70	3.70	$U = \text{const}$ $R_1 = R_2 =$ $R$	Как изменится показание вольтметра, если сопротивление $R_1$ увеличить в 3 раза?
71	3.71	$U = \text{const}$ $R_1 = R_2 =$ $R_3 = R_4 =$ $R_5 = R$ До	Как изменится показание амперметра при нагревании катушки из медного провода, сопротивление которой $R_4$ ?

		нагревания	
72	3.72	$U = \text{const}$ $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$	Как изменятся показания приборов, если сопротивление $R_1$ увеличится в 2 раза?
73	3.73	$E = 100 \text{ В}$ $R_0 = 0,4 \text{ Ом}$	В каких пределах и как будут изменяться ток в цепи и напряжение на зажимах источника, ЭДС которого $E$ и внутреннее сопротивление $R_0$ при изменении внешнего сопротивления от режима холостого хода до режима короткого замыкания?
74	3.74	$E = 1,2 \text{ В}$ $I_{\text{кз}} = 4 \text{ А}$ $I = 1 \text{ А}$	При замыкании накоротко аккумулятора с ЭДС $E$ ток составил значение $I_{\text{кз}}$ . При каком значении внешнего сопротивления можно получить в цепи этого аккумулятора ток $I$ ?
75	3.75	$U = \text{const}$	Как изменится эквивалентное сопротивление трех одинаковых параллельно включенных ламп в неразветвленной части цепи, если к ним подключить параллельно еще 6 таких же ламп?

Окончание таблицы 3

Вариант	Рисунок	Условие	Задание
76	3.1	$U = \text{const}$	Как изменятся токи и напряжение $U_{ab}$ при замыкании ключа?
77	3.2	$E_1 = 10 \text{ В}$ $E_2 = 5 \text{ В}$ $R_1 = R_2 = 1 \text{ Ом}$	Как изменится напряжение $U_{ab}$ , если ЭДС $E_2$ возрастет в 2 раза?
78	3.3	$E_2 > E_1$	Как изменятся показания вольтметров при перемещении движка реостата вверх?
79	3.4	$U = \text{const}$	Как изменится ток $I_1$ , если сопротивление $R_2$ увеличится в 2 раза?
80	3.5	$U = \text{const}$	Как изменится показание амперметра при размыкании ключа?
81	3.6	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра при замыкании ключа?
82	3.7	$U = \text{const}$	Как изменятся показания амперметров после замыкания ключа?
83	3.8	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра после замыкания ключа?
84	3.9	$U = \text{const}$	Как изменятся показания амперметров после замыкания ключа?
85	3.10	$E = \text{const}$	Как изменятся показания амперметров при замыкании ключа?

86	3.11	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра при размыкании ключа?
87	3.12	$E = \text{const}$	Как изменятся показания приборов, если движок реостата сдвинуть вправо?
88	3.13	$E = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после замыкания ключа?
89	3.14	$E = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после размыкания ключа?
90	3.15	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов, если две одинаковые лампочки включить последовательно?
91	3.16	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после замыкания ключа?
92	3-72	$U = \text{const}$ $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$	Как изменятся показания приборов, если сопротивление $R_1$ увеличится в 2 раза?
93	3-10	$U = \text{const}$	Как изменятся показания амперметров при замыкании ключа?
94	3-65	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра при замыкании ключа?
95	3-62	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра при перемещении движка реостата вверх?
96	3-52	$U = \text{const}$	Как изменится показание амперметра при перемещении движка реостата вверх?
97	3-41	$U = \text{const}$	Как изменится показание амперметра после замыкания ключа?
98	3-5	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра при замыкании ключа?
99	3-6	$U = \text{const}$	Как изменится показание вольтметра при замыкании ключа?
100	3-48	$U = \text{const}$	Как изменятся показания приборов после замыкания ключа?

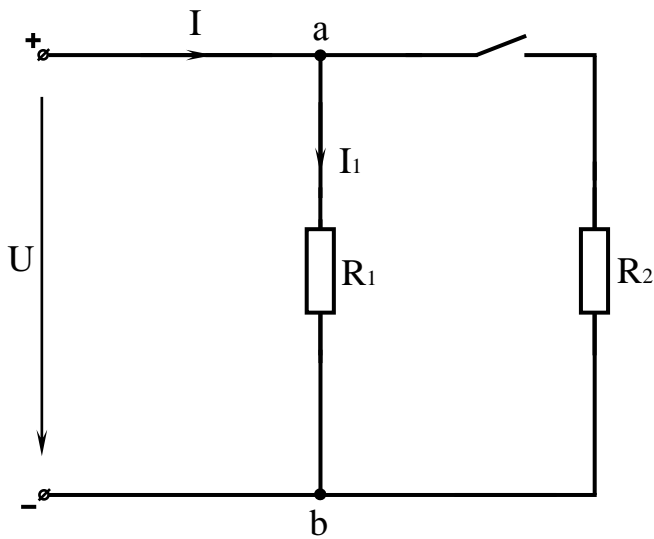


Рис. 3.1

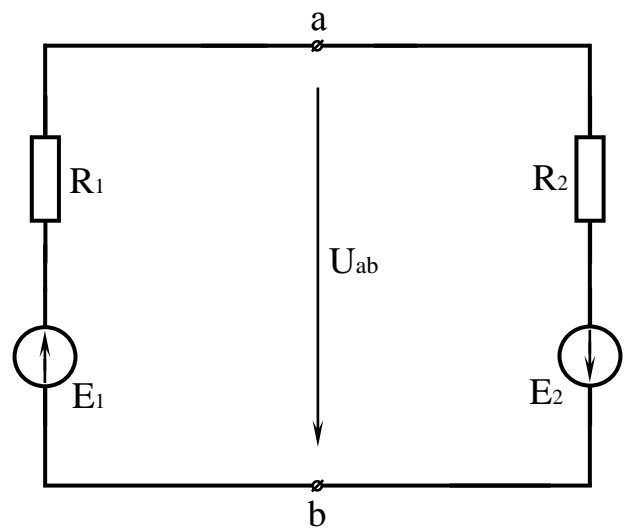


Рис. 3.2

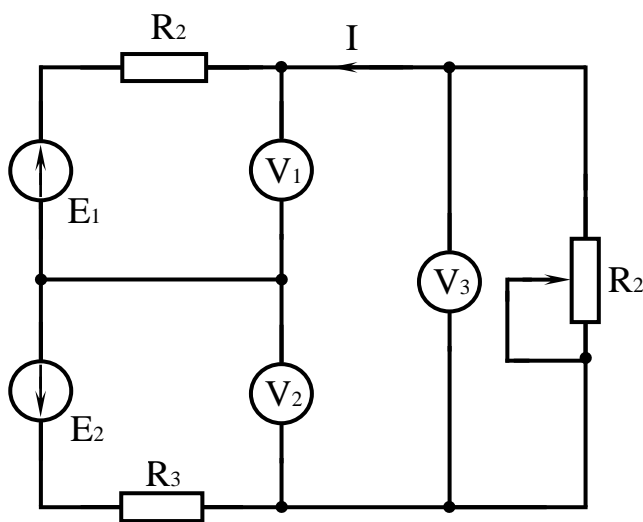


Рис. 3.3

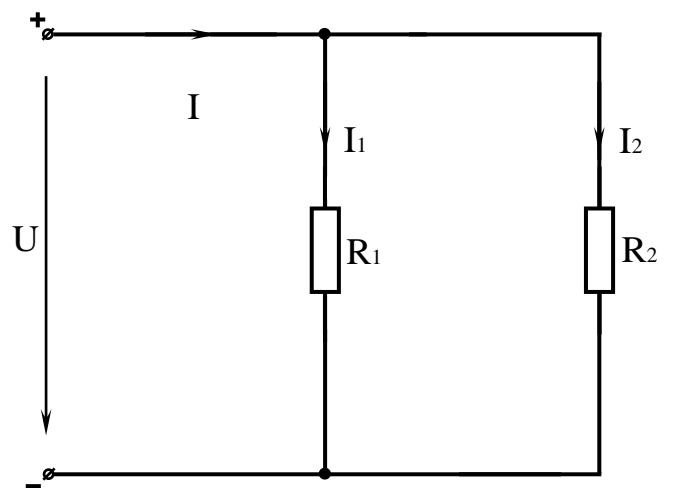


Рис. 3.4

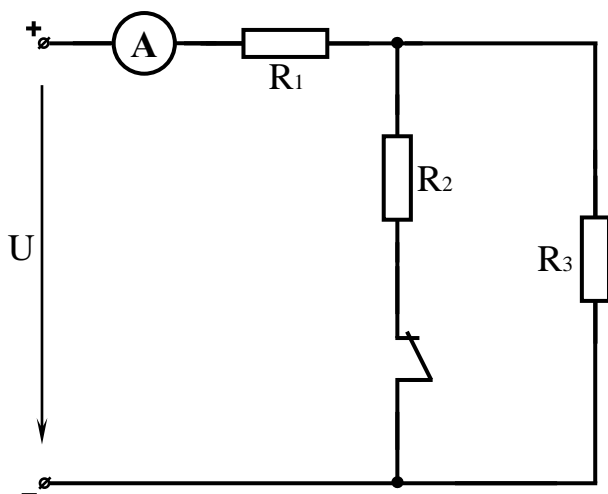


Рис. 3.5

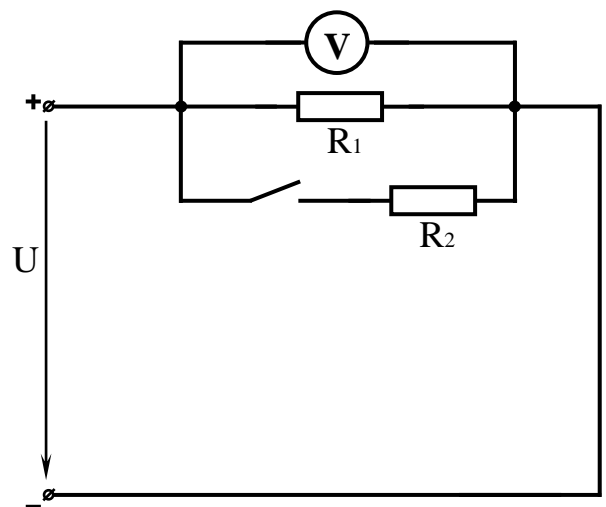


Рис. 3.6



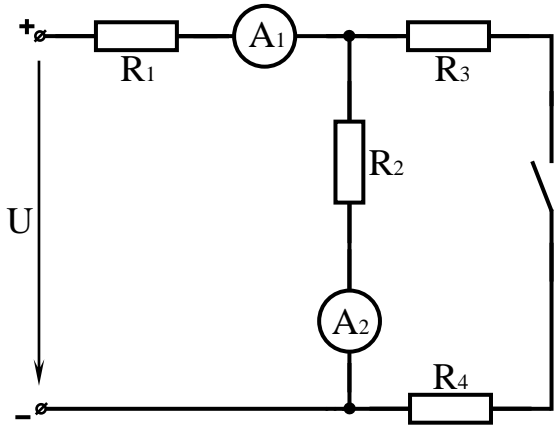


Рис. 3.7

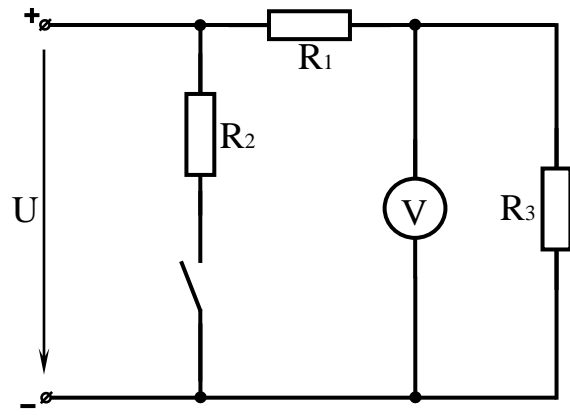


Рис. 3.8

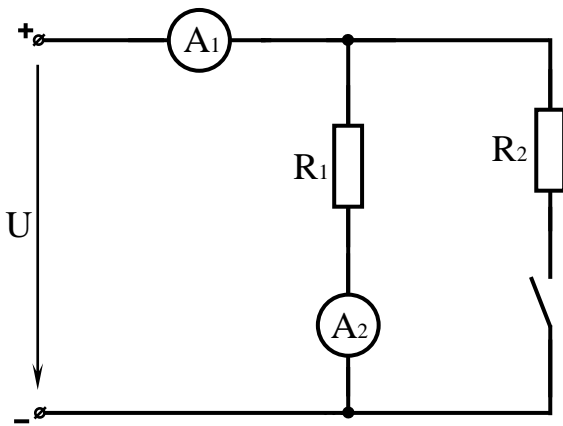


Рис. 3.9

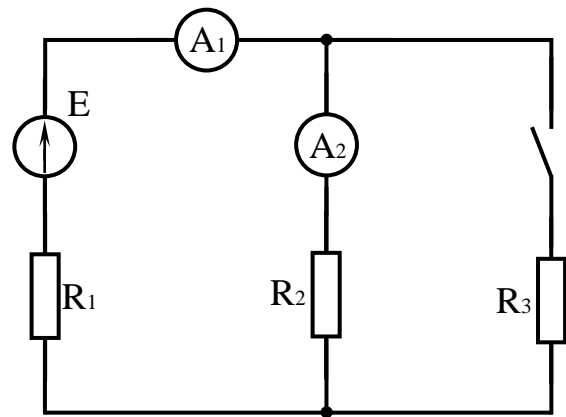


Рис. 3.10

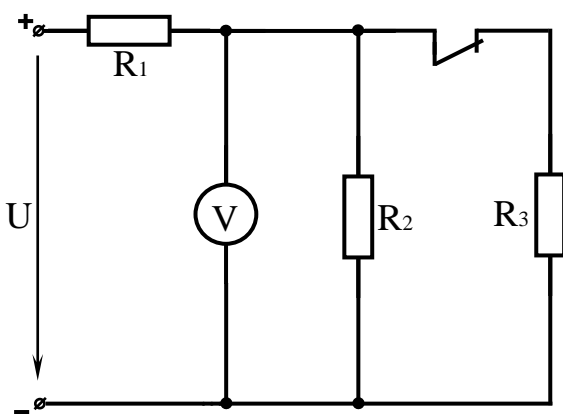


Рис. 3.11

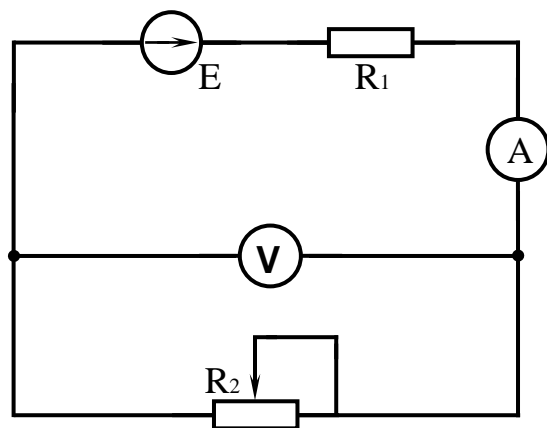


Рис. 3.12

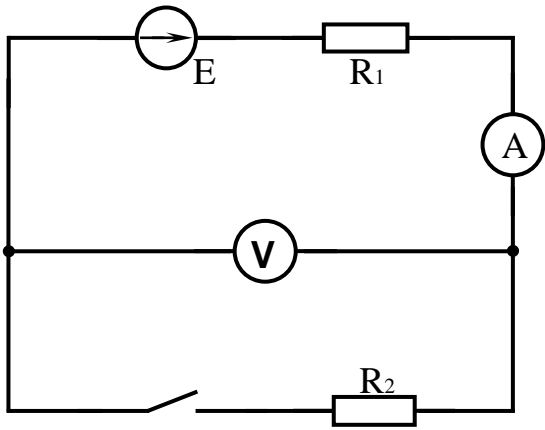


Рис. 3.13

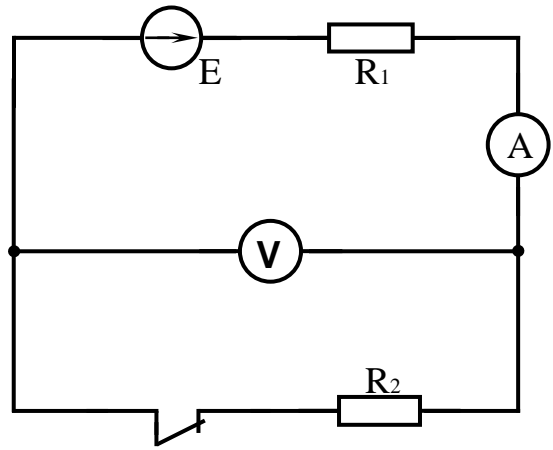


Рис. 3.14

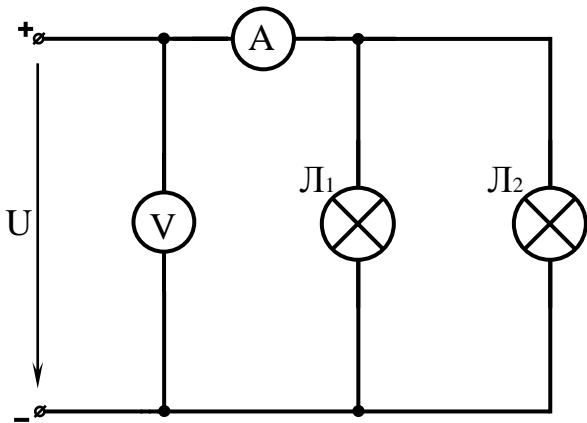


Рис. 3.15

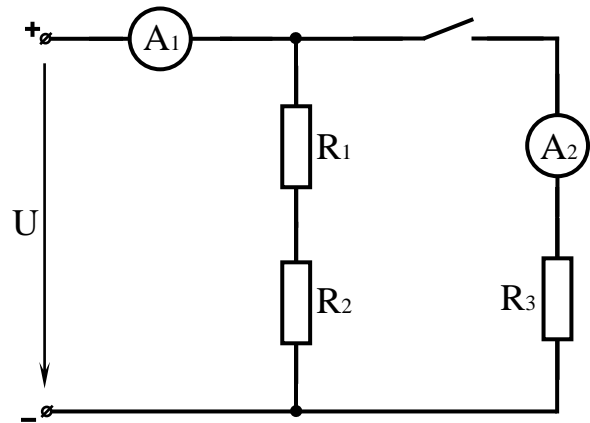


Рис. 3.16

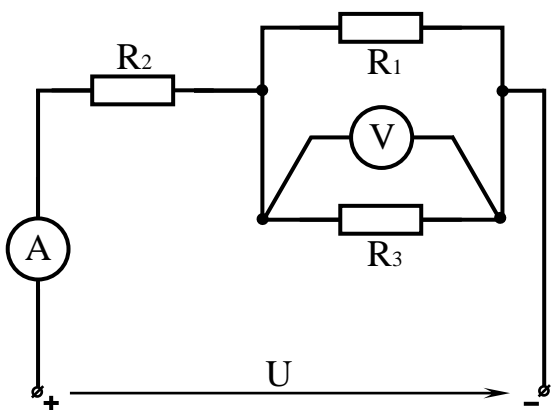


Рис. 3.17

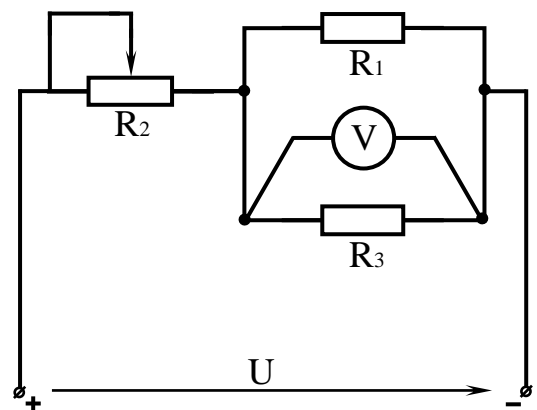


Рис. 3.18

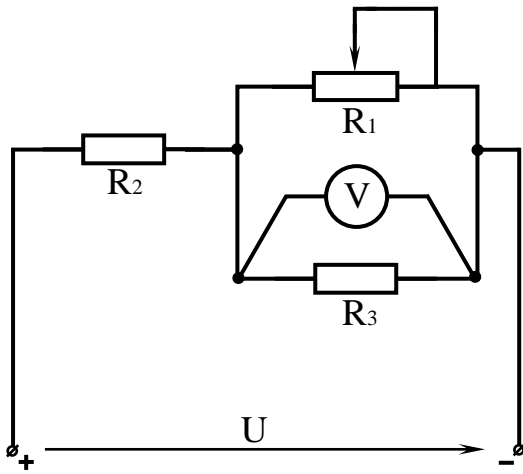


Рис. 3.19

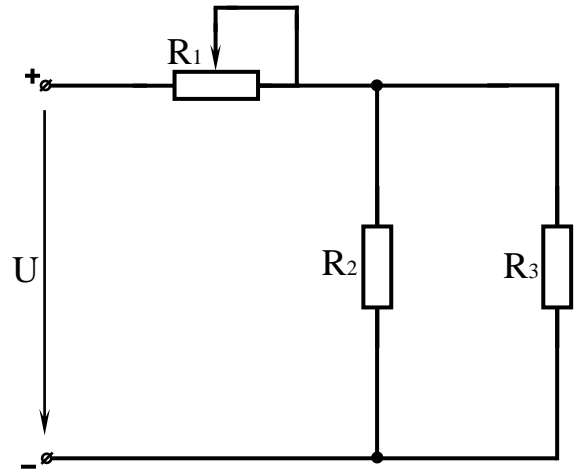


Рис. 3.20

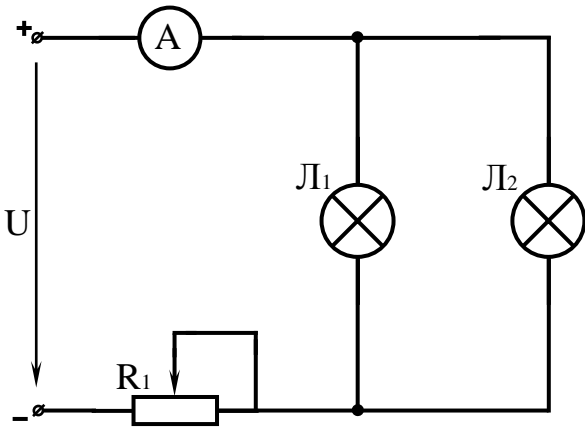


Рис. 3.21

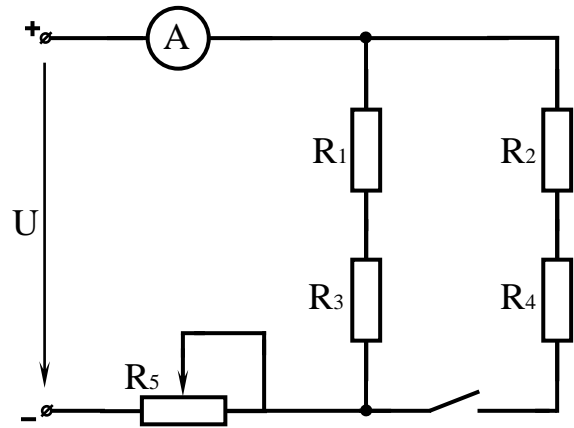


Рис. 3.22

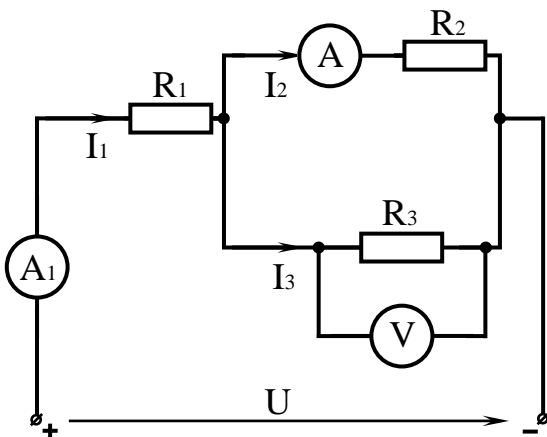


Рис. 3.23

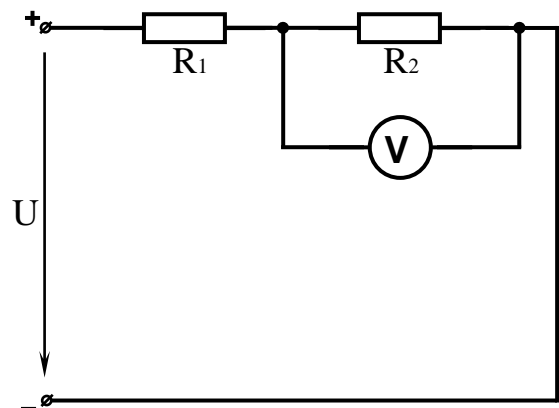


Рис. 3.24

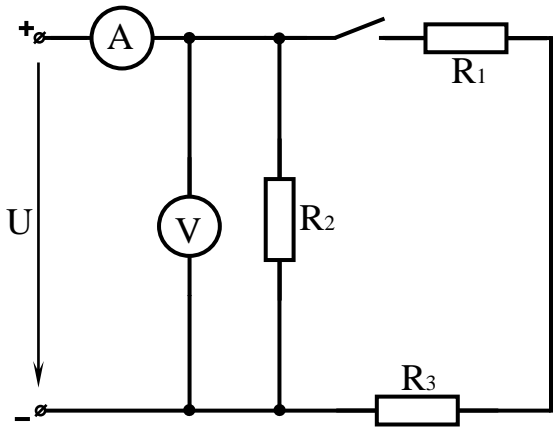


Рис. 3.25

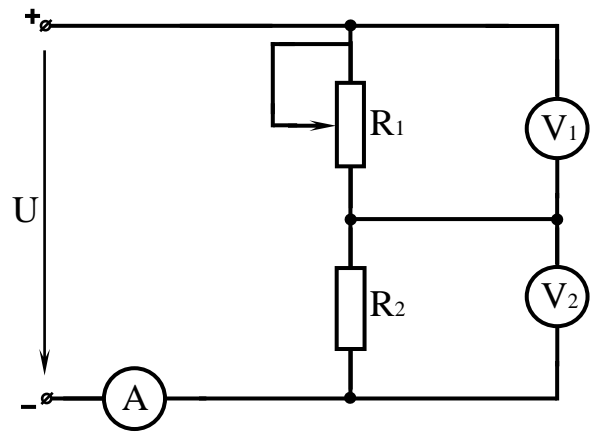


Рис. 3.26

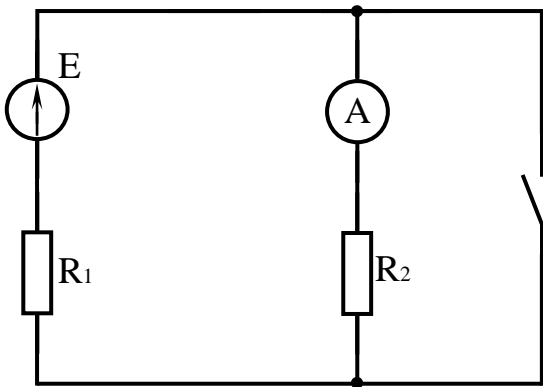


Рис. 3.27

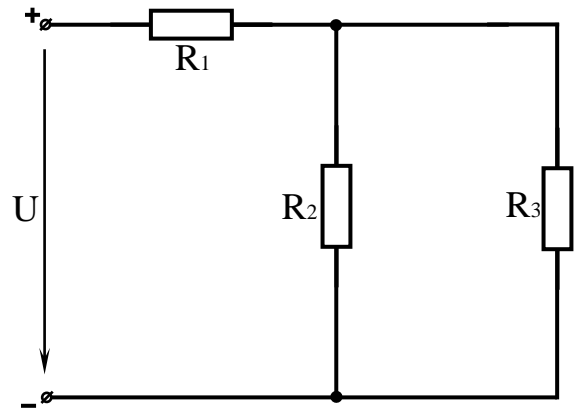


Рис. 3.28

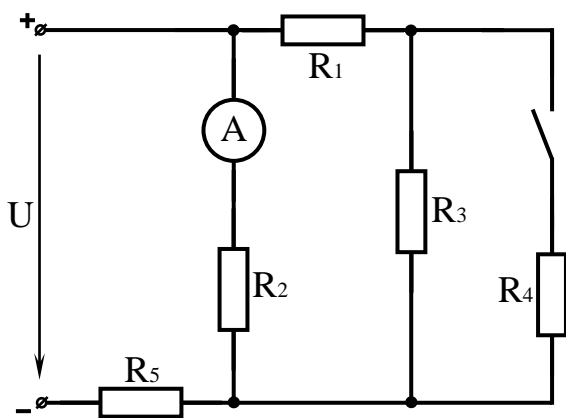


Рис. 3.29

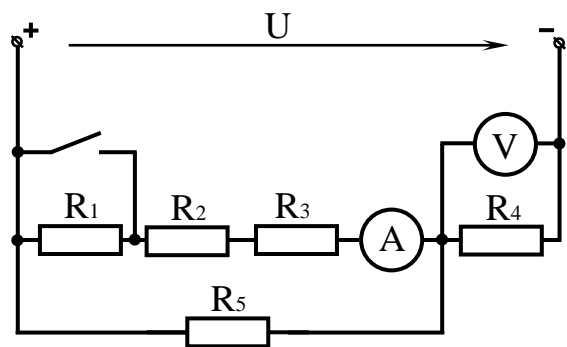


Рис. 3.30

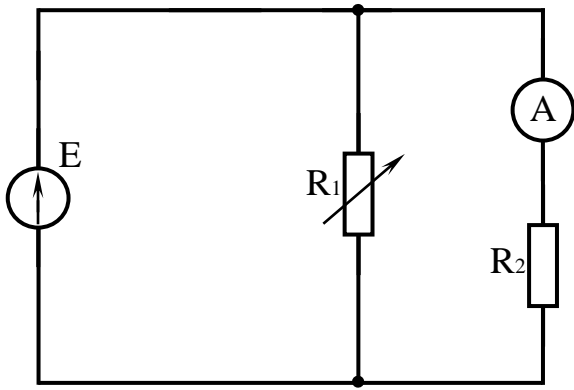


Рис. 3.31

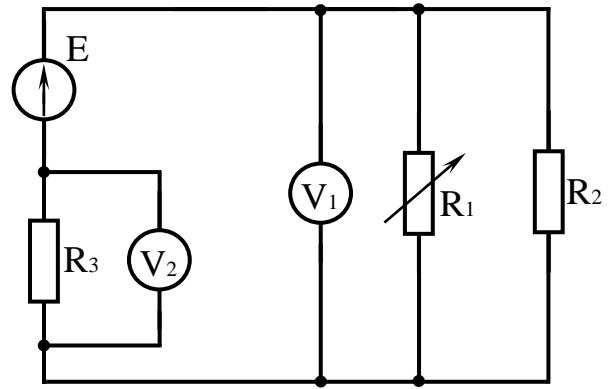


Рис. 3.32

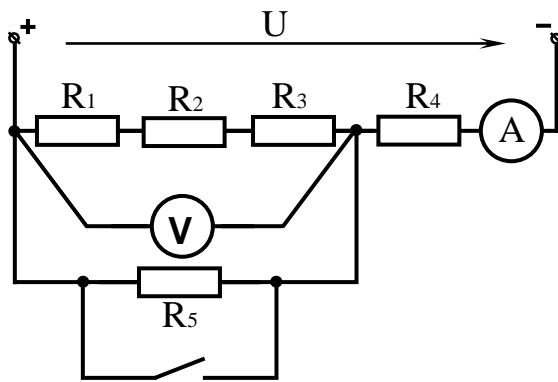


Рис. 3.33

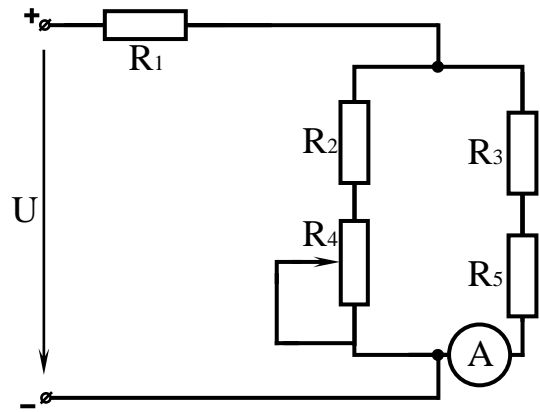


Рис. 3.34

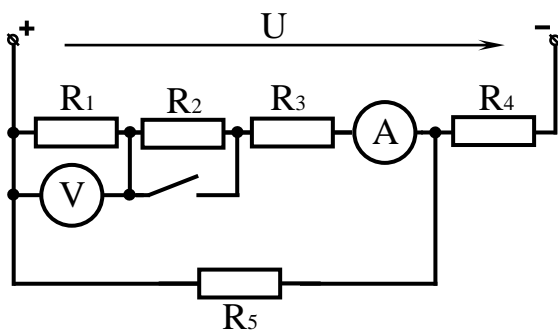


Рис.  
3.35

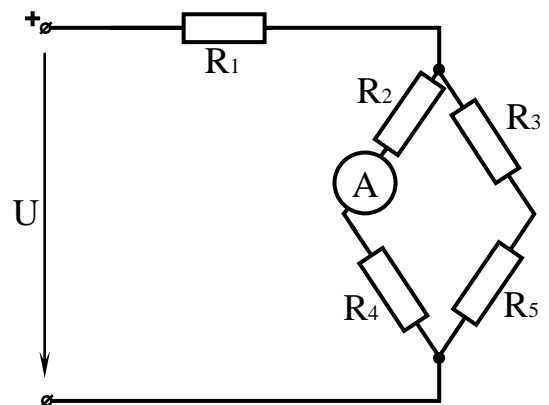


Рис.  
3.36

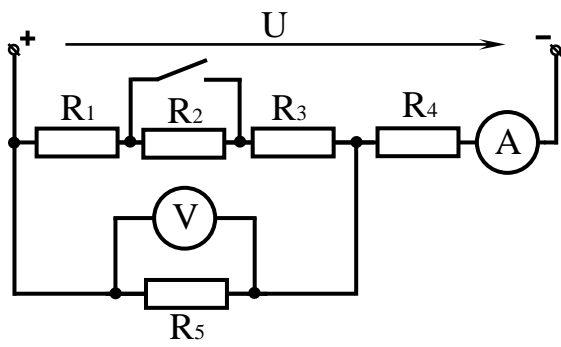


Рис. 3.37

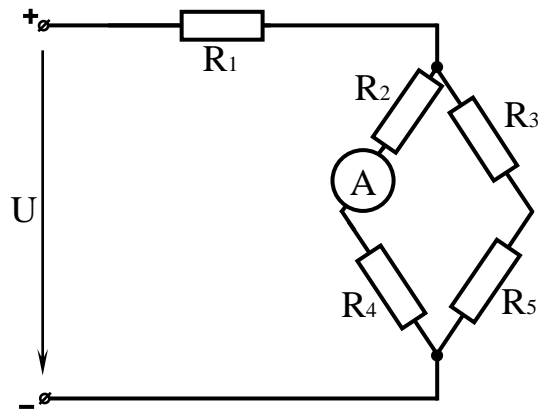


Рис. 3.38

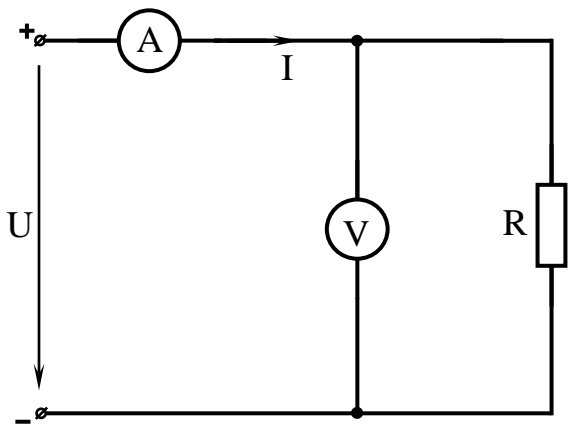


Рис. 3.39

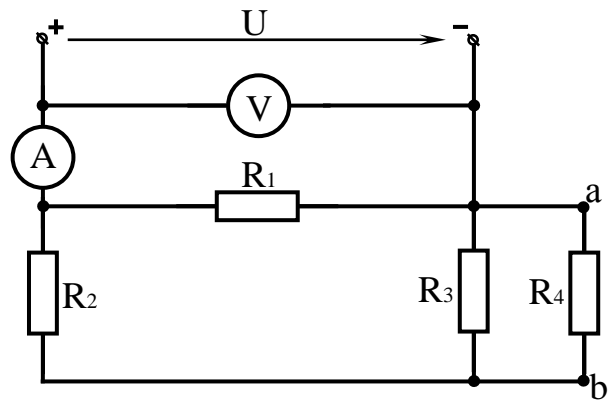


Рис. 3.40

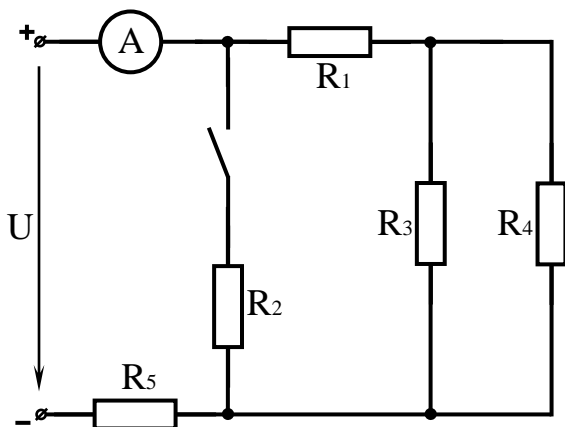


Рис. 3.41

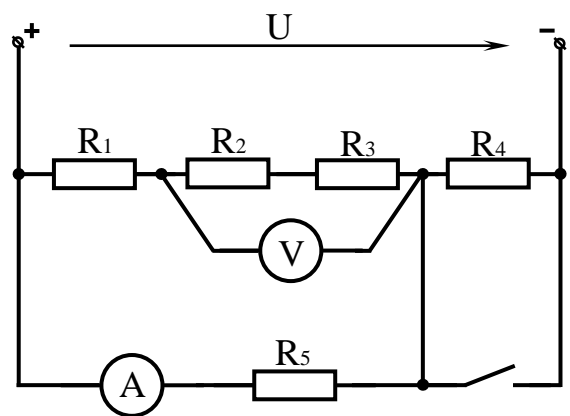


Рис. 3.42

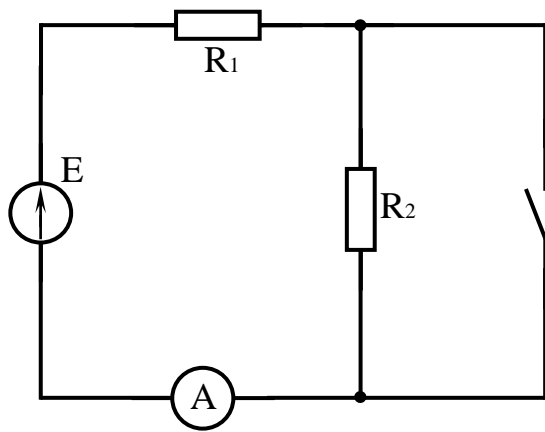


Рис. 3.43

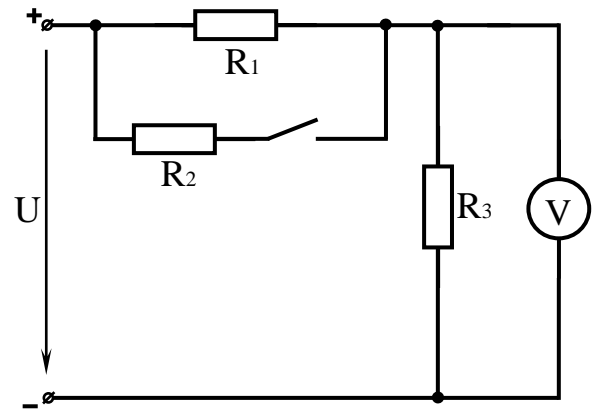


Рис. 3.44

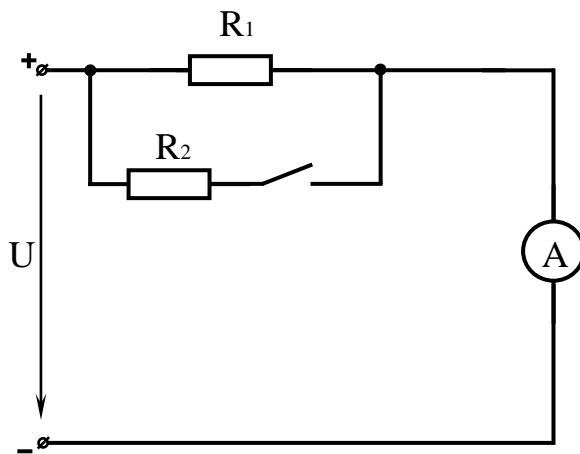


Рис. 3.45

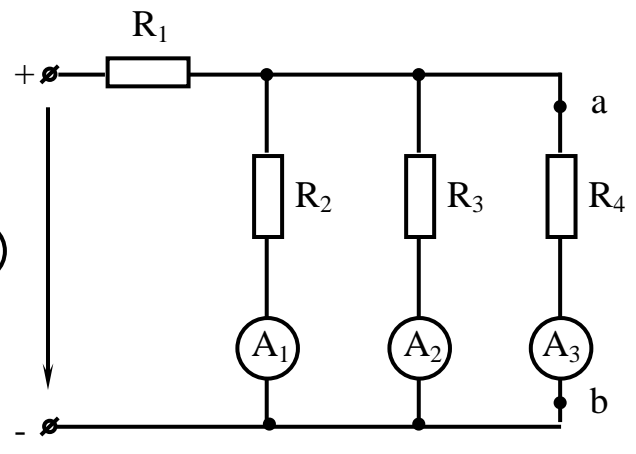


Рис. 3.46

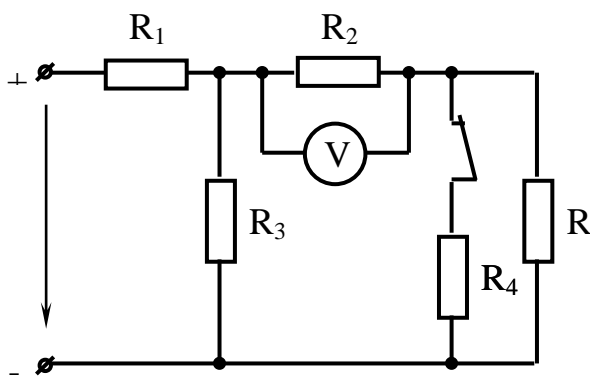


Рис. 3.47

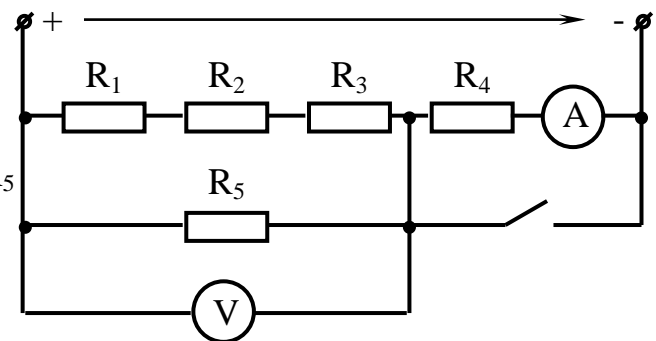


Рис. 3.48

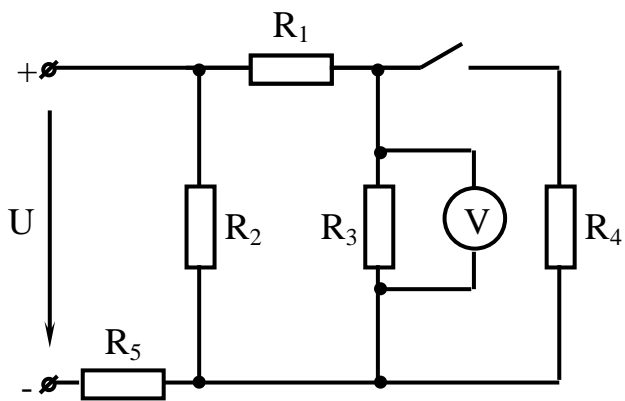


Рис. 3.49

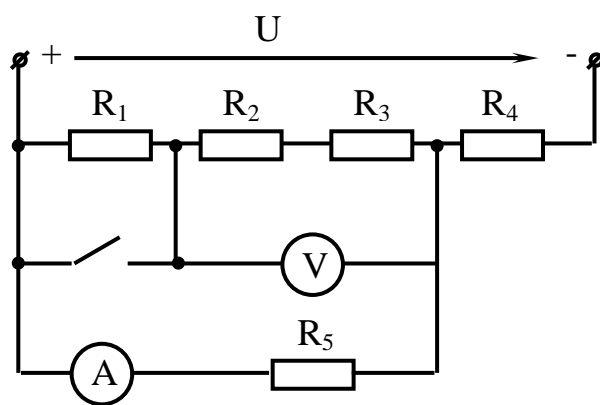


Рис. 3.50

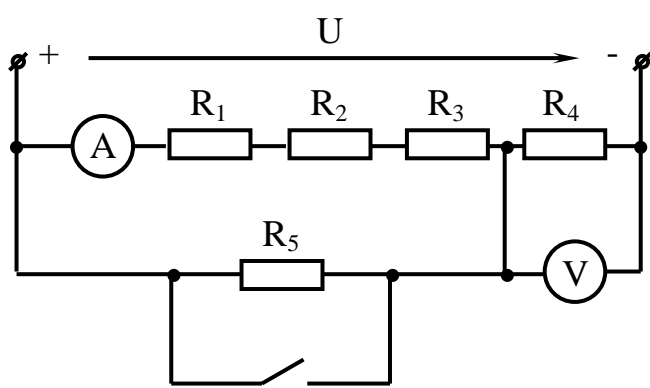


Рис. 3.51

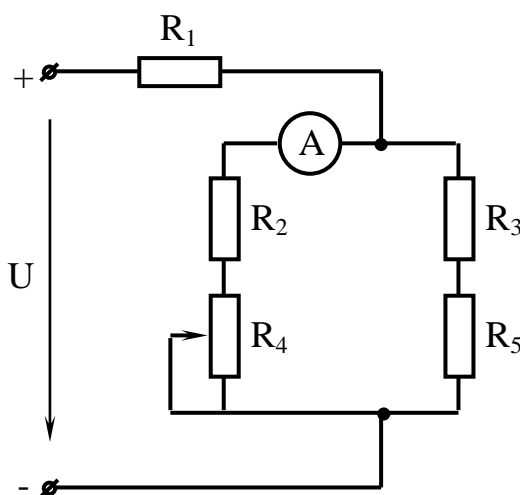


Рис. 3.52

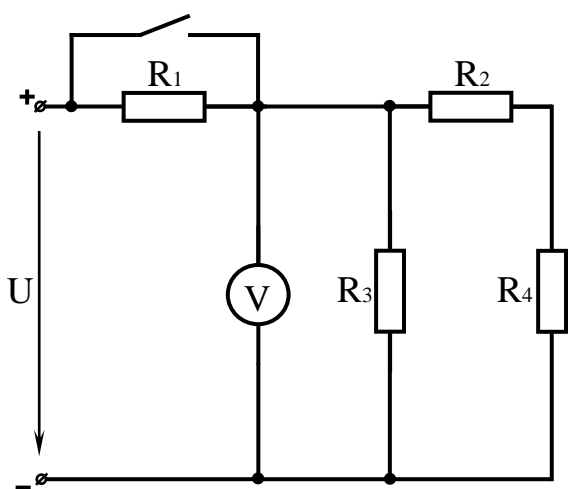


Рис. 3.53

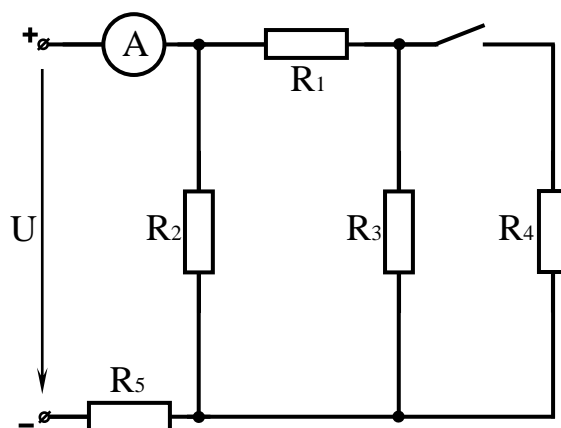


Рис. 3.54



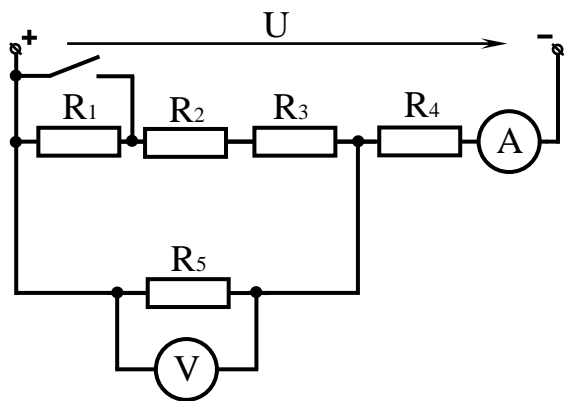


Рис. 3.55

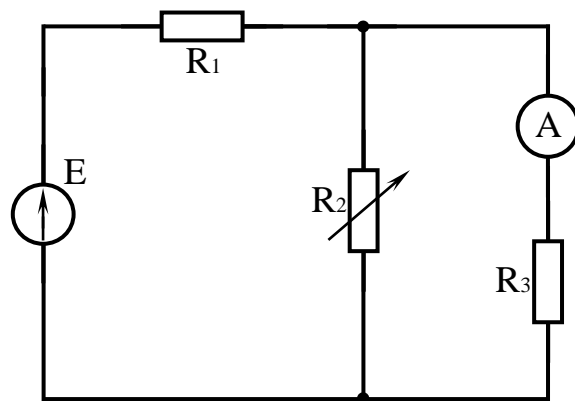


Рис. 3.56

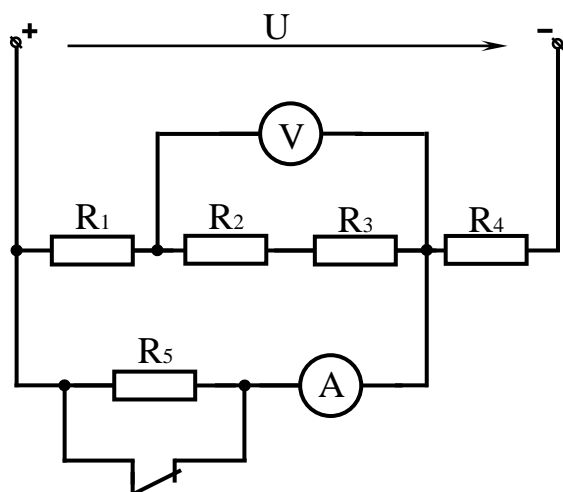


Рис. 3.57

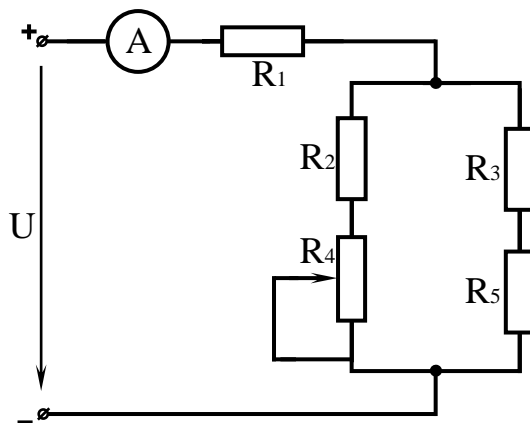


Рис. 3.58

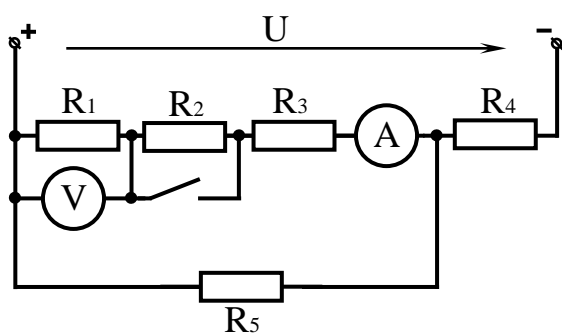


Рис. 3.59

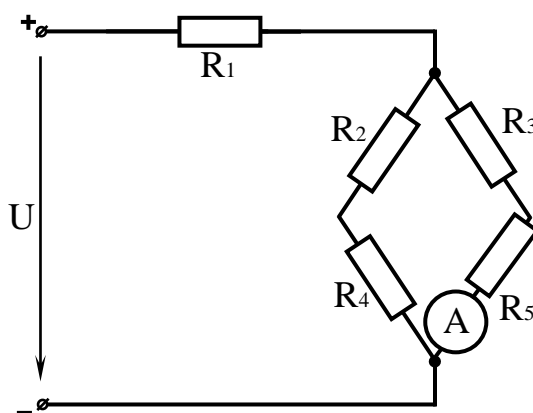


Рис. 3.60

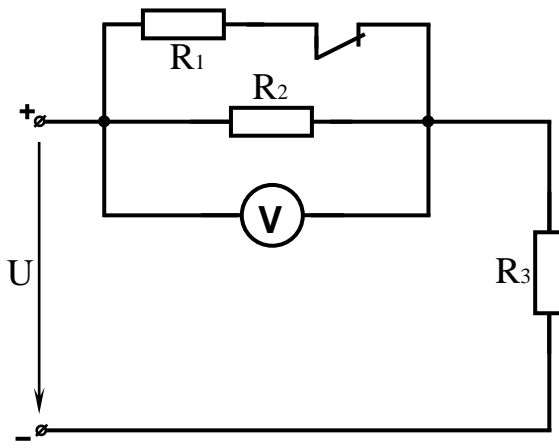


Рис. 3.61

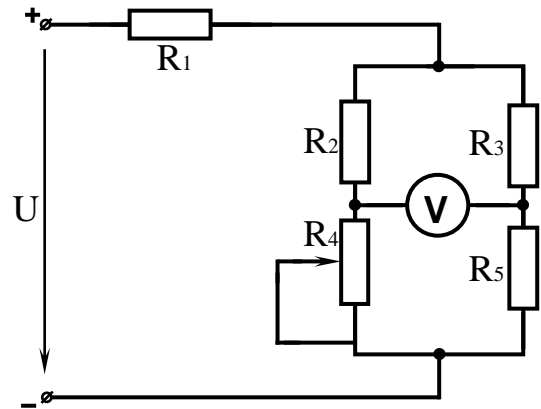


Рис. 3.62

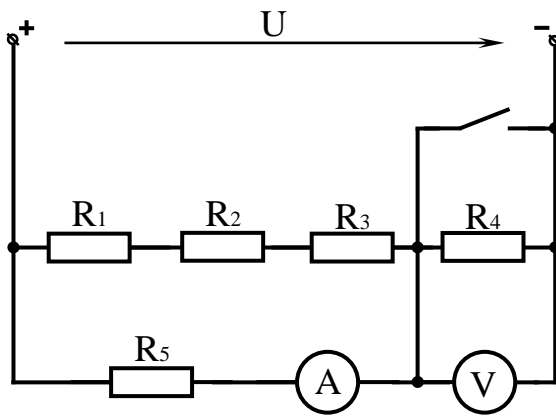


Рис. 3.63

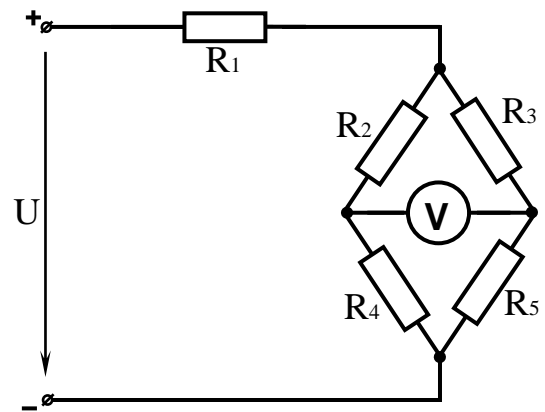


Рис. 3.64

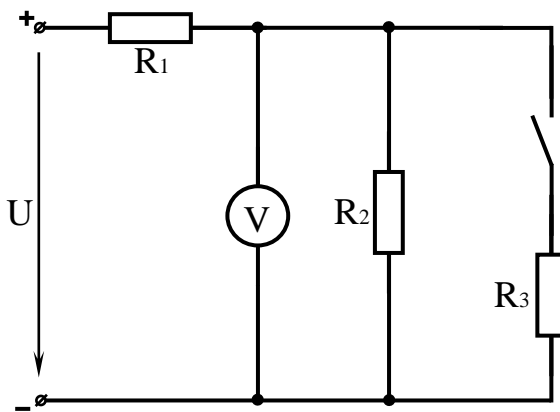


Рис. 3.65

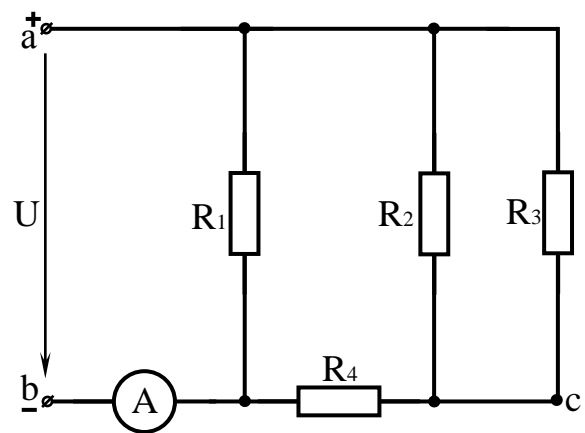


Рис. 3.66

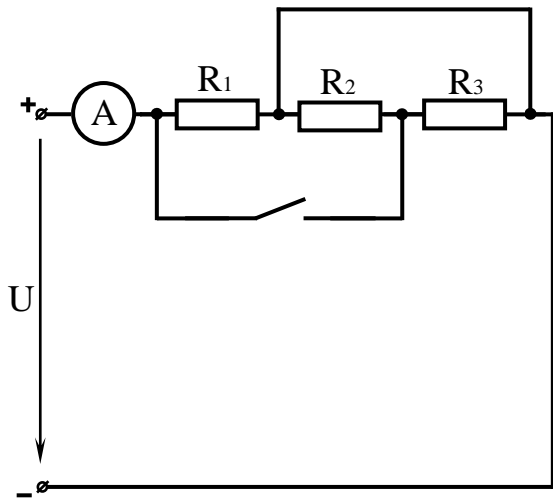


Рис. 3.67

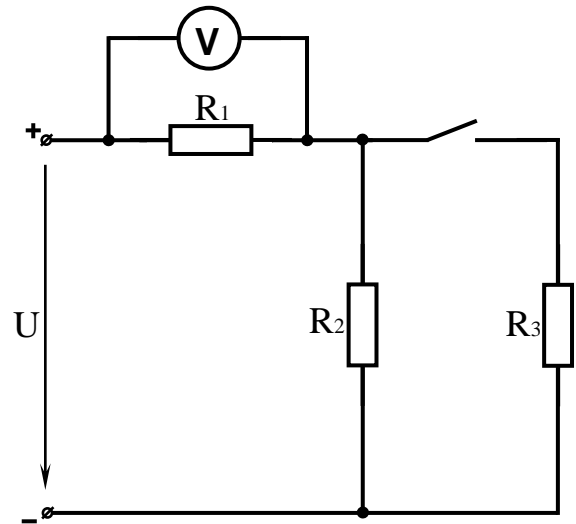


Рис. 3.68

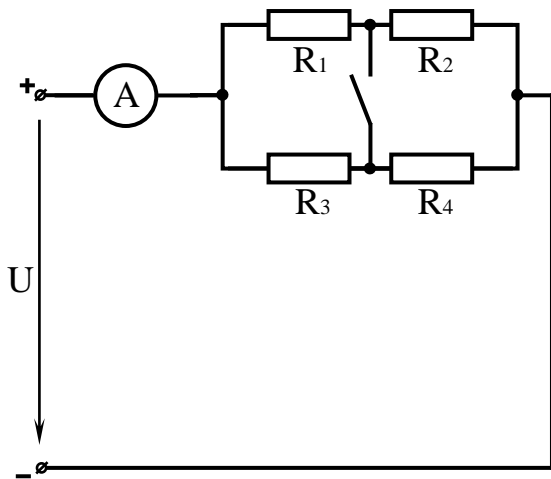


Рис. 3.69

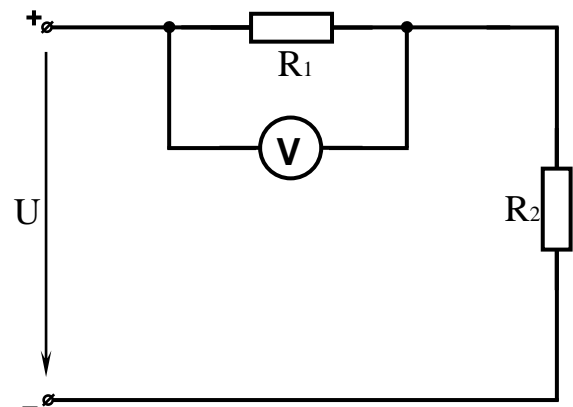


Рис. 3.70

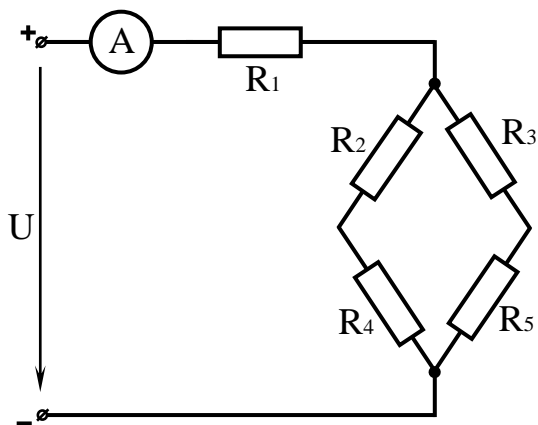


Рис. 3.71

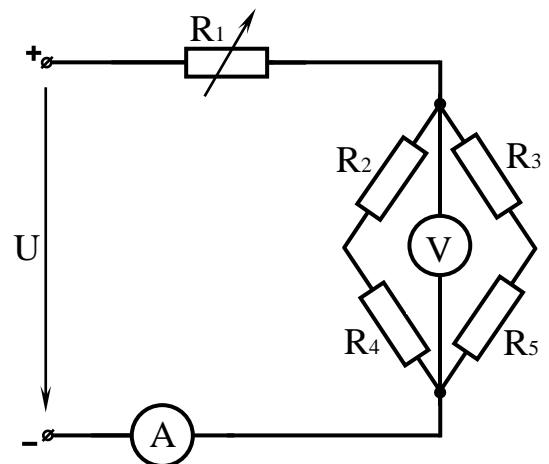


Рис. 3.72

## ПРИЛОЖЕНИЯ

(Образец оформления титульного листа контрольной работы)

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И  
ОБРАЗОВАНИЯ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ИМЕНИ А.А. ЕЖЕВСКОГО**

**Факультет энергетический**

**Кафедра Электроснабжения и электротехники**

**Контрольная работа**

**(ЭЛЕКТРОТЕХНИКА)**

Выполнил:

Студент 3 курса з/о  
Специальность 13.03.02.

\_\_\_\_\_  
ФИО

№зачётной книжки:

Проверил:

\_\_\_\_\_  
ФИО

## Приложение 2

### Название и обозначение основных электрических величин в электротехнике

Сопротивление электрическое активное  $R$ , Ом (ом).  
Сопротивление электрическое реактивное  $X$ , Ом.  
Сопротивление электрическое полное  $Z$ , Ом.  
Проводимость электрическая активная  $G$ , См (сименс).  
Проводимость электрическая реактивная  $B$ , См.  
Проводимость электрическая полная  $Y$ , См.  
Емкость  $C$ , Ф (фарад).  
Индуктивность  $L$ , Гн (генри).  
Электродвижущая сила (ЭДС)  $E$ , В (вольт).  
Напряжение  $U$ , В.  
Потенциал  $V$ , В.  
Ток  $I$ , А (ампер).  
Мощность активная  $P$ , Вт (ватт).  
Мощность реактивная  $Q$  вар (вольт-ампер реактивный).  
Мощность полная  $S$ , ВА (вольтампер).  
Магнитодвижущая сила (МДС)  $F$ , А.  
Магнитная индукция  $B$ , Тл.  
Напряженность магнитного поля  $H$ , А/м (ампер на метр).  
Магнитный поток  $\Phi$ , Вб (вебер).  
Потокосцепление  $\psi$ , Вб.  
Магнитная проницаемость абсолютная  $\mu_a$ , Гн/м (генри на метр).  
Магнитная проницаемость относительная  $\mu_r$  (безразмерная величина).  
Магнитная постоянная  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.  
Частота  $f$ , Гц (герц).  
Угловая частота  $\omega$ , рад/с (радиан на секунду).  
Длина  $L$ , м (метр).  
Площадь  $S$ , м<sup>2</sup> (метр квадратный).  
Все комплексные величины подчеркивают чертой снизу:  
 $U$ ,  $I$ ,  $S$ ,  $Z$ ,  $Y$

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Мно- житель	Пристав- ка	Обозначение приставки		Множи- тель	Пристав- ка	Обозначение приставки	
		Междуна- родное	Русское			Междуна- родное	русское
$10^{18}$	Экса	E	Э	$10^{-1}$	Деци	d	д
$10^{15}$	Пета	P	П	$10^{-2}$	Сантис	c	с
$10^{12}$	Тера	T	Т	$10^{-3}$	Миллис	m	м
$10^9$	Гига	G	Г	$10^{-6}$	Микрос	$\mu$	мк
$10^6$	Мега	M	М	$10^{-9}$	Нанос	n	н
$10^3$	Кило	k	К	$10^{-12}$	Пикос	p	п
$10^2$	Гекто	h	Г	$10^{-15}$	Фемтос	f	ф
$10^1$	Дека	da	да	$10^{-18}$	Атто	a	а

Епифанов Александр Дмитриевич  
Шпак Оксана Николаевна

## **Электротехника**

**Методические указания и контрольные задания  
для студентов-заочников энергетического факультета**

Формат 60x84 1/16 .  
ИрГАУ, 664038, г. Иркутск, пос. Молодежный