

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

*А.В. ПАРШИНА, Д.М. ЖИВОНОСНОВСКАЯ*

## РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 15.03.01 Машиностроение, 15.03.03 Прикладная механика, 22.03.02 Metallургия, 23.03.01 Технология транспортных процессов

САМАРА  
Издательство Самарского университета  
2020

УДК 621.3.011.7(075)

ББК 31.211.5я7

П180

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. С. А. А к у л о в,  
д-р техн. наук, проф. П. К. К у з н е ц о в

*Паршина, Александра Валерьевна*

П180 **Расчет электрических цепей постоянного тока:** учебное пособие / *А.В. Паршина, Д.М. Живоносная.* – Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 68 с.: ил.

**ISBN 978-5-7883-1492-1**

В данном учебном пособии рассмотрены вопросы общей электротехники. Дается описание цепей постоянного тока, а также методов их расчетов.

Учебное пособие предназначено для обучающихся по основным образовательным программам направлений подготовки 23.03.01 Технология транспортных процессов, 15.03.03 Прикладная механика, 22.03.02 Металлургия, 15.03.01 Машиностроение.

Подготовлено на кафедре электротехники Самарского университета.

УДК 621.3.011.7 (075)

ББК 31.211.5я7

ISBN 978-5-7883-1492-1

© Самарский университет, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>4</b>
1. Предмет изучения электротехники.....	5
2. Этапы развития электротехники как науки .....	6
3. Основные понятия электротехники .....	10
4. Элементы электрической цепи, электрические схемы .....	16
5. Источники электрической энергии .....	20
6. Закон Ома для участка цепи .....	27
7. Законы Кирхгофа.....	29
8. Последовательное и параллельное соединение элементов электрической цепи .....	30
9. Преобразование соединения «звезда» в соединение «тре- угольник» и «треугольник» в «звезда».....	32
10. Последовательное и параллельное соединение источников ЭДС .....	36
11. Применение законов Ома и Кирхгофа для расчетов элек- трических цепей.....	37
12. Метод узловых потенциалов .....	38
13. Метод контурных токов.....	41
14. Работа и мощность электрического тока.....	44
15. Баланс мощностей .....	47
16. Режимы работы электрической цепи. Согласованный ре- жим работы .....	48
17. Коэффициент полезного действия (КПД) .....	53
18. Передача энергии по линии передачи .....	54
19. Пример расчета цепи постоянного тока .....	55
20. Задания для самостоятельной подготовки .....	61
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>67</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	<b>67</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

Электротехника является общетехнической дисциплиной и служит базой для изучения специальных дисциплин, связанных с автоматизацией технологических процессов, электроснабжением и электрооборудованием соответствующих отраслей.

Настоящее пособие составлено в соответствии с типовой программой и предназначено для помощи обучающимся неэлектрических специальностей и направлений подготовки в самостоятельном изучении материала.

Курс общей электротехники служит для создания теоретической базы при изучении специальных дисциплин, связанных с автоматизацией технологических процессов и производств, электроснабжением, использованием электрооборудования различного назначения.

Пособие включает материалы, описывающие цепи постоянного тока, методики их расчета, а также примеры схем, которые могут использовать обучающиеся для совершенствования умений.

В ходе освоения курса общей электротехники студенты должны приобрести способность применять систему фундаментальных знаний для идентификации, формулирования и решения технических и технологических проблем в соответствующих отраслях.

## 1. Предмет изучения электротехники

*Электротехника* – область техники, связанная с получением, распределением, преобразованием и использованием электрической энергии. А также – с разработкой, эксплуатацией и оптимизацией электронных компонентов, электронных схем и устройств, оборудования и технических систем.

Под электротехникой также понимают техническую науку, которая изучает применение электрических и магнитных явлений для практического использования. Электротехника выделилась в самостоятельную науку из физики в конце XIX века. В настоящее время электротехника как наука включает в себя следующие направления разделы:

– *Электромеханика*, рассматривающая общие принципы электромеханического преобразования энергии и их практическое применение для проектирования и эксплуатации электрических машин.

– *Теоретические основы электротехники (ТОЭ)* – техническая дисциплина, связанная с изучением теории электричества и электромагнетизма.

– *Светотехника*, предметом которой являются исследование принципов и разработка способов генерирования, пространственного перераспределения и измерения характеристик оптического излучения, а также преобразование его энергии в другие виды энергии и использование в различных целях.

– *Силовая электроника* – наука о взаимодействии электронов и других заряженных частиц, квантов излучения с электромагнитными полями в вакууме, в различных средах и на границах их раздела, а также изучающая методы создания электронных приборов и устройств в которых это взаимодействие используется для обработки и хранения информации и преобразования энергии.

Также некоторые классификации относят к областям электротехники *энергетику* или ее отрасль – *электроэнергетику*, занимающуюся вопросами производства, передачи и сбыта электроэнергии. Электроэнергетика является наиболее важной отраслью

энергетики, что объясняется, в основном, относительной лёгкостью передачи электроэнергии на большие расстояния по сравнению с энергией других видов.

Основное отличие электротехники от слаботочной электроники заключается в том, что электротехника изучает проблемы, связанные с силовыми крупногабаритными электронными компонентами: линии электропередачи, электрические приводы, в то время как в электронике основными компонентами являются компьютеры и другие устройства на базе интегральных схем, а также сами интегральные схемы. В другом смысле, в электротехнике основной задачей является передача электрической энергии, а в слаботочной электронике – информации.

### *Электротехническое устройство постоянного тока*

Термином *электротехническое устройство* принято называть промышленное изделие, предназначенное для определенной функции при решении комплексной проблемы производства, распределения, контроля, преобразования и использования электрической энергии. Электротехнические устройства постоянного тока весьма разнообразны, например, аккумулятор, линия передачи энергии, амперметр, реостат. Постоянный ток применяется при электрохимическом получении алюминия, на городском и железнодорожном электротранспорте, в электронике, медицине и других областях техники.

## **2. Этапы развития электротехники как науки**

К основным областям, в которых используются электрические и магнитные явления, можно в общем плане отнести: преобразование энергии природы (энергетическая); превращение вещества природы (технологическая); получение и передача сигналов или информации (информационная). Поэтому более полно *электротехнику* можно определить, как область науки и техники, использующую электрические и магнитные явления для осуществления процессов преобразования энергии и превращения вещества, а также для передачи сигналов и информации.

В последние десятилетия из электротехники выделилась промышленная электроника с тремя ее направлениями: информационное, энергетическое и технологическое, которые с каждым годом приобретают все большее значение в ускорении научно-технического прогресса.

В развитии электротехники условно можно выделить следующие шесть этапов:

1. *Становление электростатики* (до 1800 г.). К этому периоду относятся первые наблюдения электрических и магнитных явлений, создание первых электростатических машин и приборов, исследования атмосферного электричества, разработка первых теорий электричества, установление закона Кулона, зарождение электромедицины.

2. *Закладка фундамента электротехники, ее научных основ* (1800-1830 гг.). Начало этого периода ознаменовано созданием «вольтова столба» – первого электрохимического генератора, а вслед за ним «огромной наипаче батареи» В. В. Петрова, с помощью которой им была получена электрическая дуга и совершено множество новых открытий. Важнейшими достижениями этого периода является открытие основных свойств электрического тока, законов Ампера, Био и Савара, Ома, создание прообраза электродвигателя, первого индикатора электрического тока (мультипликатора), установление связей между электрическими и магнитными явлениями.

3. *Зарождение электротехники* (1830-1870 гг.). Самым знаменательным событием этого периода явилось открытие Майклом Фарадеем явления электромагнитной индукции, создание первого электромашинного генератора. Разрабатываются разнообразные конструкции электрических машин и приборов, формулируются законы Ленца и Кирхгофа, создаются первые источники электрического освещения, первые электроавтоматические приборы, зарождается электроизмерительная техника. Однако широкое практическое применение электрической энергии было невозможно из-за отсутствия экономичного электрического генератора.

4. *Становление электротехники как самостоятельной отрасли техники* (1870-1890 гг.). Создание первого промышленного

электромашинного генератора с самовозбуждением (динамомашинны) открывает новый этап в развитии электротехники, которая становится самостоятельной отраслью техники. В связи с развитием промышленности, ростом городов возникает острая потребность в электрическом освещении, начинается строительство «домовых» электрических станций, вырабатывающих постоянный ток. Электрическая энергия становится товаром, и все более остро ощущается необходимость централизованного производства и экономичной передачи электроэнергии на значительные расстояния. Решить эту проблему на базе постоянного тока было нельзя из-за невозможности трансформации постоянного тока. Значительным стимулом к внедрению переменного тока является изобретение «электрической свечи» П. Н. Яблочковым и разработка им схемы дробления электрической энергии посредством индукционных катушек, представлявших собой трансформатор с разомкнутой магнитной системой.

Одновременно разрабатываются способы передачи электрической энергии на большие расстояния посредством значительного повышения напряжения линий электропередач. Дальнейшее развитие электрического освещения способствовало совершенствованию электрических машин и трансформаторов; в середине 80-х гг. началось серийное производство однофазных трансформаторов с замкнутой магнитной системой. Идея П. Н. Яблочкова о централизованном производстве и распределении электроэнергии претворяется в жизнь, начинается строительство центральных электростанций переменного тока.

Однако однофазные двигатели были непригодны для целей промышленного электропривода. Развивающееся производство требовало комплексного решения сложнейшей научно-технической проблемы: экономичной передачи электроэнергии на дальние расстояния и создания экономичного и надежного электрического двигателя, удовлетворяющего требованиям промышленного электропривода. Эта проблема была успешно решена на основе многофазных, в частности трехфазных систем.

5. *Становление и развитие электрификации* (с 1891 г.). Важнейшей предпосылкой разработки трехфазных систем явилось



открытие в 1888 г. явления вращающегося магнитного поля. Первые многофазные двигатели были двухфазными. Трехфазная система оказалась наиболее рациональной, так как имела ряд преимуществ как перед однофазными цепями, так и перед другими многофазными системами.

В разработку трехфазных систем большой вклад сделали ученые и инженеры разных стран. Наибольшая заслуга принадлежит М. О. Доливо-Добровольскому, придавшему своим работам практический характер путем создания трехфазных синхронных генераторов, асинхронных двигателей и трансформаторов. Убедительной иллюстрацией преимуществ трехфазных цепей была знаменитая Лауфен-Франкфуртская электропередача (1891 г.).

С этого времени начинается бурное развитие электрификации: строятся мощные электростанции, возрастает напряжение электропередач, разрабатываются новые конструкции электрических машин, аппаратов и приборов. Электрический двигатель занимает господствующее положение в системе промышленного привода.

Процесс электрификации постепенно охватывает все новые области производства: развивается электрометаллургия, электротермия, электрохимия. Электрическая энергия начинает все более широко использоваться в самых разнообразных отраслях промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и в быту.

Широкое применение переменного тока потребовало теоретического осмысления и математического описания физических процессов, происходящих в электрических машинах, линиях электропередач, трансформаторах. Расширяются исследования явлений в цепях переменного тока с помощью векторных и круговых диаграмм. Огромную прогрессивную роль в анализе процессов в цепях сыграл комплексный метод, предложенный в 1893-1897 гг. Ч. П. Штейнмецом. С развитием крупных энергосистем и увеличением дальности электропередач возникла серьезная научно-техническая проблема обеспечения устойчивости параллельной работы генераторов электростанций, которая была решена отечественными и зарубежными учеными. Теоретические основы элек-

тротехники становятся базой учебных дисциплин в вузах и фундаментом научных исследований в области электротехники.

б. *Зарождение и развитие электроники* (первая четверть XX в.) Рост потребности в постоянном токе (электрохимия, электротранспорт и др.) вызвал необходимость в развитии преобразовательной техники, что привело к зарождению, а затем бурному развитию промышленной электроники.

Электротехника становится базой для разработки автоматизированных систем управления энергетическими и производственными процессами. Создание разнообразных электронных, в особенности микроэлектронных устройств позволяет коренным образом повысить эффективность автоматизации процессов вычислений, обработки информации, осуществлять моделирование сложных физических явлений, решение логических задач и др. при значительном снижении габаритов, устройств, повышении их надежности и экономичности. Значительный прогресс в электронике наметился после создания больших интегральных схем (БИС), быстродействие их измеряется миллиардными долями секунды, а минимальные размеры составляют 2-3 мкм. Внедрение БИС привело к созданию микропроцессоров, осуществляющих цифровую обработку информации по программе, и микро электронно-вычислительных машин (ЭВМ). Быстрое развитие микроэлектроники обусловило возникновение и заметный прогресс новой области науки и техники – информатики.

Уже в начале 80-х гг. как в нашей стране, так и за рубежом стали изготавливать микропроцессоры и микро-ЭВМ в одном кристалле. Все это дает огромный эффект в повышении надежности, снижении габаритов и потребляемой энергии микроэлектронных устройств, используемых в различных производственных процессах, автоматизированных систем управления, на транспорте, в бытовых устройствах.

### **3. Основные понятия электротехники**

*Электричество* – совокупность явлений, обусловленных существованием, взаимодействием и движением электрических зарядов.

**Электрический заряд** – это свойство тел, проявляющееся, прежде всего, в способности создавать вокруг себя электрическое поле и посредством него оказывать воздействие на другие обладающие электрическим зарядом тела.

Единица измерения заряда  $q$  в Международной системе единиц (СИ) – кулон [Кл]. Электрический заряд любой системы тел состоит из целого числа элементарных зарядов, равных примерно  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Носителями электрического заряда являются электрически заряженные элементарные частицы – *электрон* (отрицательно заряженная частица) и *протон* (положительно заряженная частица).

**Электрический ток** – направленное (упорядоченное) движение частиц – носителей электрического заряда.

Таковыми носителями могут быть электроны (в металлах), катионы и анионы (в электролитах), ионы и электроны (в газах), электроны или дырки (в полупроводниках).

**Электропроводность** (электрическая проводимость) – способность тела (среды) проводить электрический ток, свойство тела или среды, определяющее возникновение в них электрического тока под воздействием электрического поля. В Международной системе единиц (СИ) единицей измерения электрической проводимости является сименс [См]=[1/Ом], в электротехнике обозначается  $g$ .

**Электрическое сопротивление** – физическая величина, характеризующая свойства проводника препятствовать прохождению электрического тока. В Международной системе единиц (СИ) единицей сопротивления является [Ом], обозначается  $R$ .

По способности проводить электрический ток вещества можно разделить на три типа: проводники, полупроводники, диэлектрики.

Эта способность обусловлена особенностью строения веществ.

В *проводниках* присутствуют свободные носители заряда – это часть электронов сравнительно слабо связанных с ядром, которые могут перемещаться с орбиты одного ядра на орбиту

другого под воздействием внешнего электрического поля. Такие электроны называются *свободными*. К проводникам относятся растворы солей, расплавы, вода (кроме дистиллированной), влажная почва, тело человека, металлы и некоторые неметаллы, например, углерод.

В отличие от проводников, в *диэлектриках* при низких температурах нет свободных электрических зарядов. Они состоят из нейтральных атомов или молекул. Заряженные частицы в нейтральном атоме связаны друг с другом и не могут перемещаться под действием электрического поля по всему объему диэлектрика. К диэлектрикам относятся, в первую очередь, газы, которые проводят электрические заряды очень плохо, а также стекло, фарфор, керамика, резина, картон, сухая древесина, различные пластмассы и смолы.

*Полупроводники* занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками, поскольку проводят электрический ток, но не так как металлы, а при соблюдении определенных условий. Это связано с тем, что свободных носителей (дырок и электронов) зарядов слишком мало или их вовсе нет, но, если приложить какое-то количество энергии – они появятся. Энергия может быть различных форм – электрической, тепловой. К полупроводникам относятся элементы IV группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева, которые на внешней оболочке имеют четыре валентных электрона. Типичные полупроводники – германий Ge и кремний Si.

В отличие от металлических проводников, у которых с ростом температуры проводимость уменьшается, у полупроводников проводимость растёт с увеличением температуры, а сопротивление, как величина обратная проводимости – уменьшается (см. рис. 1).

При низких температурах сопротивление полупроводников, как видно из рис. 1, стремится к бесконечности. Это значит, что при температуре абсолютного нуля полупроводник не имеет свободных носителей в зоне проводимости и в отличие от проводников ведёт себя как диэлектрик. При увеличении

температуры, а также при добавлении примесей (легировании) проводимость полупроводника растет и он приобретает свойства проводника.

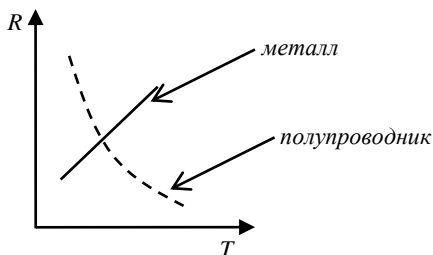


Рис. 1. Зависимость сопротивления металлических проводников и полупроводников от температуры

Исторически принято, что *направление тока* совпадает с направлением движения положительных зарядов в проводнике. При этом, если единственными носителями тока являются отрицательно заряженные частицы (например, электроны в металле), то направление тока противоположно направлению движения заряженных частиц.

Электрический ток имеет *следующие проявления*:

- нагревание проводников;
- изменение химического состава проводников (наблюдается преимущественно в электролитах);
- создание магнитного поля (проявляется у всех без исключения проводников).

Различают постоянный и переменный электрический ток.

**Постоянный ток** – ток, направление и величина которого не меняются во времени.

**Переменный ток** – электрический ток, изменяющийся во времени.

**Сила тока** – скалярная физическая величина  $I$ , равная отношению количества заряда  $q$ , прошедшего через некоторую поверхность за время  $t$ , к величине этого промежутка времени:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

обычно обозначается символом  $I$ , в Международной системе единиц (СИ) измеряется в Амперах [А].

**Плотность тока** – векторная физическая величина, имеющая смысл силы электрического тока  $I$ , протекающего через элемент поверхности единичной площади  $S$ .

$$J = \frac{I}{S}$$

Единицы измерения плотности тока в СИ – А/м<sup>2</sup>. Направление вектора плотности тока совпадает с направлением вектора скорости упорядоченного движения положительно заряженных частиц. Плотность постоянного тока постоянна по всему поперечному сечению проводника.

**Условиями возникновения электрического тока** являются:

- 1) наличие источника электрической энергии;
- 2) замкнутость пути, по которому перемещаются заряды.

Движение носителей зарядов в электрической цепи, как всякое движение требует передачи энергии движущимся объектам. Если на некотором участке цепи заряженные частицы получают энергию, то принято говорить, что на этом участке действует сила, приводящая их в движение, т.е. **электродвижущая сила (ЭДС)**. Участок цепи, на котором действует ЭДС, является источником электрической энергии (энергии движущихся носителей электрических зарядов). Источником энергии для получения ЭДС могут быть различные физические явления, при которых возникает воздействие на заряженные частицы – химические, тепловые, электромагнитные и др. процессы. Численно ЭДС равна работе по перемещению единичного заряда на участке её действия. Отсюда единицу ЭДС можно получить как  $[E] = [A]/[q] = \text{Дж/Кл} = \text{В}$  (Вольт).

На участках электрической цепи, где отсутствует ЭДС, движение носителей зарядов сопровождается расходом полученной

ранее энергии путём преобразования её в другие виды. Этот процесс можно назвать *падением напряжения* или просто *напряжением*  $U$ . Оно численно равно работе, затраченной на перемещение заряжённых частиц по участку электрической цепи к величине перемещённого заряда

$$U = \frac{A}{q}.$$

В случае движения зарядов в безвихревом электрическом поле – это определение идентично понятию разности потенциалов (в системе СИ измеряется в вольтах [В]) участка электрической цепи, т.е.

$$U = \varphi_a - \varphi_b,$$

где  $\varphi_a$ ,  $\varphi_b$  – потенциалы границ участка. Следует заметить, что потенциал отдельной точки определить невозможно, т.к. он равен работе по перемещению единичного заряда из бесконечности в данную точку. Однако разность потенциалов между двумя точками всегда можно определить, если потенциал одной из них принять за точку отсчёта, т.е. ноль.

Единица измерения напряжения и разности потенциалов такая же, как и ЭДС:  $[U] = [A]/[q] = \text{Дж/Кл} = \text{В}$  (вольт).

За положительное направление напряжения на участке цепи принимают направление от точки с большим потенциалом к точке с меньшим, а т.к. на участках, где отсутствует ЭДС, положительные заряды также перемещаются от точки с более высоким потенциалом к точке с более низким, то положительное направление напряжения на этих участках совпадает с положительным направлением протекающего тока. За положительное направление ЭДС принимают направление от точки с меньшим потенциалом к точке с большим. Это направление указывают стрелкой в условном изображении источника на схеме (рис. 2).

## 4. Элементы электрической цепи, электрические схемы

*Электрическая цепь* – совокупность устройств, элементов, предназначенных для протекания электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий «сила тока» и «напряжение».

Изображение электрической цепи с помощью условных знаков называют *электрической схемой*.

Электрическая цепь содержит источники и приемники электрической энергии, устройства коммутации (провода и переключатели) и измерительные приборы (вольтметры, амперметры, ваттметры и др.). Схема простейшей электрической цепи представлена на рис. 2. Она включает один источник (обозначается кругом с стрелкой), один приемник – сопротивление  $R$  и провода для коммутации.

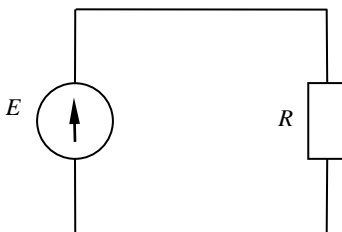


Рис. 2. Электрическая схема простейшей электрической цепи

В источниках электрической энергии осуществляется преобразование в электрическую энергию каких-либо других видов энергии. В приемниках электрической энергии электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии, например, в механическую, тепловую, световую. В электрической цепи различают два участка: *внутренний* и *внешний*. Источник является внутренним участком цепи. Все остальные элементы относятся к внешним участкам электрической цепи.

Электрическая схема представляет собой документ, в котором по правилам ГОСТ обозначаются связи между составными частями устройств, работающих за счет протекания электроэнергии. Согласно требованиям ГОСТ 2.701-84 различают следующие виды схем: пневматические (П), гидравлические (Г), электриче-



ские (Э), газовые (Г), вакуумные (В), деления (Д), комбинированные (К), оптические (О), кинематические (К), энергетические (Р).

В данном пособии будут рассматриваться электрические схемы, поэтому выделим основные типы электрических схем:

- структурные,
- функциональные,
- принципиальные,
- соединений,
- подключения,
- общие,
- расположения,
- объединенные.

Схема электрическая *структурная* согласно ГОСТ 2.701-2008 представляет собой документ, определяющий основные функциональные части изделия, их назначение и взаимосвязи. Основная цель составления структурной схемы – ознакомительная. По ней возможно не углубляясь в подробности технических решений определить основные функциональные части изделия, изучить назначение изделия в целом.

Схема электрическая *функциональная* – документ, разъясняющий процессы, протекающие в отдельных функциональных цепях изделия или изделия в целом. Зачастую составление функциональной схемы опускают, используют только структурную схему. Функциональные схемы составляются тогда, когда изделие состоит из набора более простых изделий для каждого из которых и составляется отдельная структурная схема.

Схема электрическая *принципиальная* – документ, определяющий полный состав элементов и взаимосвязи между ними и дающий полное детальное представление о принципах работы изделия. Принципиальная схема, кроме того, что даёт полное представление о принципах работы изделия, служит для расчёта режимов работы изделия.

Схема *соединений* (монтажная) – документ, показывающий соединения составных частей изделия (установки) и определяющий провода, жгуты, кабели или трубопроводы, которыми осу-

ществляются эти соединения, а также места их присоединений и ввода (разъемы, платы, зажимы).

Схема *подключения* – документ, показывающий внешние подключения изделия.

Схема *общая* – документ, определяющий составные части комплекса и соединения их между собой на месте эксплуатации.

Схема *расположения* – документ, определяющий относительное расположение составных частей изделия (установки), а при необходимости, также жгутов (проводов, кабелей), трубопроводов, световодов.

Схема *объединенная* – документ, содержащий элементы различных типов схем одного вида.

*Простыми электрическими цепями* называют цепи, содержащие один источник энергии. Цепь, содержащая два и более источника, называется *сложной*.

*Активным участком* цепи называется участок, содержащий источник электрической энергии, не содержащий источника участка – *пассивным*.

*Вольтамперная характеристика (ВАХ)* – это зависимость напряжения на зажимах элемента или участка цепи от тока, протекающего через него.

Сопротивления, ВАХ которых являются прямыми линиями (рис. 3, а), называются *линейными*, электрические цепи только с линейными сопротивлениями – *линейными электрическими цепями*.

Сопротивления, ВАХ которых не являются прямыми линиями (рис. 3, б), то есть они *нелинейны*, а электрические цепи только с нелинейными сопротивлениями – *нелинейными электрическими цепями*.

Электрические цепи подразделяются на разветвленные и неразветвленные. На рис. 2 представлена схема простейшей неразветвленной цепи, во всех элементах ее течет один тот же ток. Простейшая разветвленная цепь изображена на рис. 4.

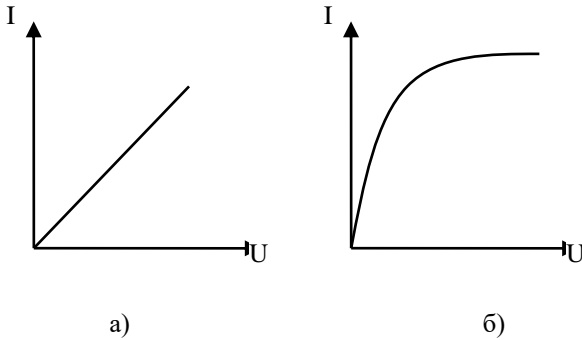


Рис. 3. Вольтамперные характеристики линейных и нелинейных сопротивлений

**Узел** называется место (точка) соединения трех и более ветвей. Узел электрической цепи на схеме отмечают жирной точкой (при соединении на схеме трех узлов по ГОСТ точку ставить необязательно). Если на схеме место скрещивания ветвей точкой не отмечено, это означает, что электрического соединения между ними в точке пересечения нет.

**Ветвью** называется участок электрической цепи, по которому проходит ток одного и того же значения и направления.

**Контур** – любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям. Контур, внутри которого не лежат другие ветви, связывающие между собой его узлы, называют *простым*.

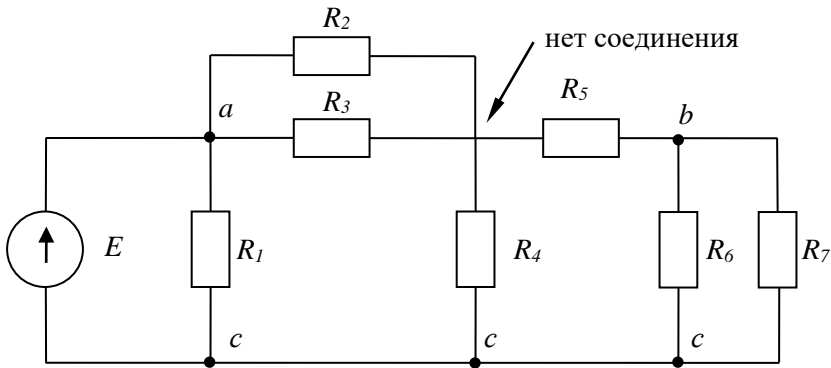


Рис. 4. Пример электрической принципиальной схемы

На рис. 4 показана электрическая принципиальная схема, состоящая из одного источника ЭДС и семи резисторов. Каждый вид элементов имеет свое графическое и символическое обозначение, а также порядковый номер при необходимости. На схемах источники ЭДС обозначаются буквой  $E$ , источники тока –  $I$ , резисторы –  $R$ . В случае, если элемент встречается на схеме один раз (например, источник  $E$  на рис. 4), то порядковый номер можно не использовать. Буквами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  обозначены узлы схемы. При подключении четырех ветвей и более в один узел на схеме обязательна жирная точка (узел  $a$ ), в противном случае, это будет просто простое пересечение проводников без соединения. Для удобства отображения разрешается разбивать узел на несколько отдельных соединений (узел  $c$  в примере разделен на три части).

В схеме на рис. 4: узлы  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – шесть ветвей: ветвь с источником  $E$ , с резистором  $R_1$ , с резисторами  $R_3$ - $R_5$ , с резисторами  $R_2$ - $R_4$ , с резистором  $R_6$ , с резистором  $R_7$ . Контур может включать в себя источники и приёмники, например,  $E$ - $R_1$ , либо только приемники, например,  $R_2$ - $R_4$ - $R_7$ - $R_5$ - $R_3$ .

*Заземление одной точки схемы.*

Заземление любой точки схемы свидетельствует о том, что потенциал этой точки принят равным нулю. При этом токораспределение в схеме не изменяется, так как никаких новых ветвей, по которым могли бы протекать токи, не образуется. Иначе будет, если заземлить две или большее число точек схемы, имеющих различные потенциалы. В этом случае через землю (любую проводящую среду) образуются дополнительные ветви, сама схема становится отличной от исходной и токораспределение в ней меняется.

## 5. Источники электрической энергии

На данный момент основные источники электрической энергии подразделяются на традиционные и альтернативные.

К *традиционным источникам* относятся широко используемые:

*Тепловые электростанции (ТЭС).* Работают на органическом топливе – мазут, уголь, торф, газ, сланцы. Размещаются ТЭС,

главным образом, в том регионе, где присутствуют природные ресурсы и вблизи крупных нефтеперерабатывающих предприятий.

*Гидроэлектростанции (ГЭС).* Возводятся в местах, где большие реки перекрываются плотиной, и благодаря энергии падающей воды вращаются турбины электрогенератора. Получение электроэнергии таким методом считается самым экологичным за счет того, что не происходит сжигание различных видов топлива, следовательно, отсутствуют вредные отходы.

*Атомные электростанции (АЭС).* Принцип работы схож с тепловой электростанцией, главное отличие в том, что для нагрева воды требуется энергия тепла, которая выделяется в результате ядерной реакции.

*Альтернативная энергетика* представляет собой совокупность перспективных способов получения, передачи и использования энергии, которые распространены не так широко, как традиционные, однако представляют интерес из-за выгоды их использования при низком риске причинения вреда окружающей среде.

*Солнечные электростанции (СЭС).* Наиболее распространены СЭС с использованием фотоэлектрических модулей – солнечные батареи. При фотоэлектрическом преобразовании солнечной энергии используется явление фотоэффекта. Фотоэффект возникает в результате воздействия солнечного излучения на поверхностные слои полупроводника толщиной примерно 2-3 мкм, высвобождая при этом некоторое количество электронов. С появлением в теле полупроводника свободных электронов и при наличии разности электрических потенциалов в нем возникает электрический ток. Разность потенциалов образуется между облучаемой поверхностью полупроводника и его «теневой» стороной. Строительство мощных СЭС требует большой площади, что может привести к изменению микроклимата в прилегающих территориях, высокая стоимость преобразователей, загрязнение рабочей поверхности (сложность очистки), особые требования по утилизации отработанных содержащих кадмий преобразователей.

*Ветряные электростанции.* Принцип работы любой ветроэнергетической установки (ВЭУ) состоит в преобразовании кинетической энергии ветра в электрическую.

тической энергии воздушного потока, движущегося через плоскость лопастей или турбин в энергию электрическую – посредством использования электрогенераторов. Ветроэлектрогенератор конструктивно состоит из основания (мачты), поворотного устройства с вращающимися на нем лопастями или ветровой турбиной, генератора, вырабатывающего электроэнергию, и блока аккумуляторных батарей. К основным недостаткам такой технологии относятся ветряная зависимость, создание помех для радиосвязи и телекоммуникации, изменение естественного ландшафта, большая площадь, требуемая для установки целого блока генераторов.

*Приливные электростанции (альтернативная гидроэнергетика).* Для производства электрической энергии используется энергия прилива. Для того, чтобы построить простейшую приливную электростанцию потребуются бассейн, перекрытое плотиной устье реки или залив. Плотина оснащена гидротурбинами и водопропускными отверстиями. Вода во время прилива поступает в бассейн и когда происходит сравнение уровней воды в бассейне и в море, водопропускные отверстия закрываются. С приближением отлива водный уровень уменьшается, напор становится достаточной силы, турбины и электрогенераторы начинают свою работу, постепенно вода из бассейна уходит. Новые источники энергии в виде приливных электростанций имеют некоторые минусы – нарушение нормального обмена пресной и соленой воды; влияние на климат, так в результате их работы меняется энергетический потенциал, скорость и площадь перемещения вод.

*Геотермальная энергетика.* Направление энергетике, основанное на производстве тепловой и электрической энергии за счёт энергии, содержащейся в недрах земли, на геотермальных станциях. На геотермальных электростанциях вырабатывают немалую часть электроэнергии в странах Центральной Америки, на Филиппинах, в Исландии; Исландия также являет собой пример страны, где термальные воды широко используются для обогрева, отопления.

*Использование биотоплива* – топлива из растительного или животного сырья, из продуктов жизнедеятельности организмов или органических промышленных отходов. Различается жидкое биотопливо (для двигателей внутреннего сгорания, например, эта-

нол, метанол, биодизель), твёрдое биотопливо (дрова, брикеты, топливные гранулы, щепы, солома, лузга) и газообразное (синтез-газ, биогаз, водород). На данный момент разрабатываются технологии получения энергии за счет преобразования накопившихся отходов жизнедеятельности человека – переработка мусора.

Еще один альтернативный способ – использование энергии, получаемой от электролита, расположенного в магнитном поле. Такой эффект называется *магнитогидродинамический*, а установка, в которой эту энергию получают, *МГД генератор*.

Принцип действия магнитогидродинамического генератора заключается в том, что при движении ионизированного газа (низкотемпературной плазмы) через сильное магнитное поле в нем индуцируется электрический ток. Низкотемпературная плазма возникает при нагревании газа до температуры 2300-3000 К, когда от его молекул или атомов отрываются внешние электроны, вследствие чего газ ионизируется и становится проводником электрического тока. Электроэнергия (постоянный ток) отбирается из плазмы керамическими электродами и выдается в цепь и далее в инверторы, где преобразуется в переменный ток, поступающий в сеть. Для увеличения электропроводности газа в него дополнительно вводят легкоионизируемые вещества – щелочные металлы: калий, натрий и др.

В МГД-генераторах отсутствуют громоздкие вращающиеся части, отпадает необходимость применения турбомашин для привода генератора. МГД-генераторы разрабатываются двух типов: открытого цикла, в которых рабочим телом являются продукты сгорания органического топлива, и закрытого цикла, в которых непрерывный поток инертных газов (аргона, водорода) нагревается в теплообменниках продуктами сгорания.

Главное достоинство МГД-генераторов состоит в том, что они, повышая на 10-20 % коэффициент полезного действия по сравнению с тепловыми электростанциями, могут вырабатывать электроэнергию в промышленных масштабах.

Преимущество МГД-генератора состоит в том, что в нём не используются вращающиеся детали, следовательно, отсутствуют потери на трение. Вместе с тем он вырабатывает только постоянный ток и требует очень высоких температур, при которых газ

ионизируется, а значит, и соответствующих материалов, способных без серьезных повреждений выдерживать такие температуры. Для создания МГД-генераторов нужны мощные источники проточных газов. Реальными устройствами, удовлетворяющими строгим требованиям, предъявляемым к таким источникам, являются ракетные двигатели.

Основной минус такой технологии состоит в угрозе расплавления, что приводит к необходимости применения сверх жаропрочных материалов. Также МГД-генератор вырабатывает только постоянный ток, соответственно необходимо создание эффективного электрического инвертора для преобразования постоянного тока в переменный.

В электротехнике природу электричества связывают со строением вещества и объясняют его движением свободных заряженных частиц под воздействием энергетического поля.

Для того чтобы электрический ток протекал по цепи и совершал работу, необходимо иметь источник энергии, совершающий преобразование в электричество. Чтобы классифицировать и описать параметры источников, преобразующих различные виды энергии в электрическую, принято условное теоретическое разделение на:

- источники тока;
- источники ЭДС.

Важно отметить, что существуют идеализированные и реальные источники тока и ЭДС.

### ***Идеализированный источник ЭДС***

Если напряжение на выходе источника постоянно и не зависит от тока в нагрузке, то такой источник называется *идеализированным источником ЭДС* или *источником напряжения* (рис. 5). Его вольтамперная или внешняя характеристика представляет собой горизонтальную линию (рис. 5, б), а поскольку тангенс угла наклона ВАХ соответствует сопротивлению элемента электрической цепи, то это означает, что сопротивление источника ЭДС  $R_{вн}$  равно нулю. На схемах направление действия ЭДС, т. е. направление возрастания электрического потенциала (рис. 5, а) показывают стрелкой.



### ***Идеализированный источник тока***

Можно создать также источник электрической энергии, формирующий в нагрузке неизменный ток. Вольтамперная характеристика такого источника будет вертикальной прямой линией (рис. 6, б), а сам источник будет называться *идеализированным источником тока*.

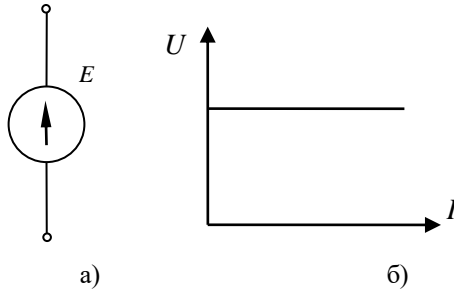


Рис. 5. Схемы обозначения и вольтамперная характеристика идеализированного источника ЭДС

В соответствии с внешней характеристикой сопротивление  $R_{вн}$  элемента электрической цепи, обладающего свойствами источника тока, будет равно бесконечности. На электрических схемах источник тока изображается окружностью с двойной стрелкой внутри, направление которой указывает направление протекания тока (рис. 6, а)

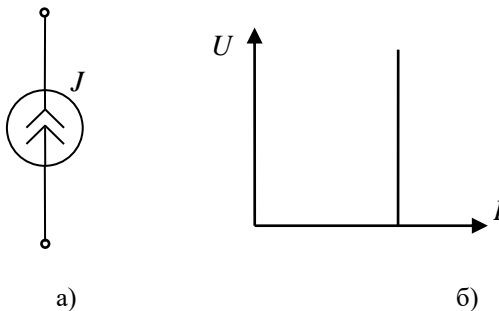


Рис. 6. Схемы обозначения и вольтамперная характеристика идеализированного источника тока

Описанные источники ЭДС и тока называются идеализированными поскольку в них нет потерь энергии, т.к. их проводимость и сопротивление бесконечны. На самом деле не существует технических устройств, в которых в той или иной форме не происходили бы необратимые преобразования энергии. Однако эти потери можно компенсировать за счёт источников энергии внешних по отношению к рассматриваемой электрической цепи и тогда реальное техническое устройство будет обладать свойствами идеального источника по отношению к нагрузке. Простейшим примером такого устройства является стабилизированный источник питания, в котором с помощью внутренней обратной связи обеспечивается компенсация потерь внутри источника за счёт энергии питающей сети. Тем самым обеспечивается постоянство выходного напряжения до определенного значения тока нагрузки, после чего он переключается в режим работы с постоянным током, реализуя в этих двух режимах работы оба идеализированных источника.

### ***Реальные источники ЭДС и тока***

Если потери электрической энергии внутри источника не компенсируются, то он имеет наклонную внешнюю характеристику. Такие источники часто называют *реальными источниками*.

Реальный источник электрической энергии с конечным значением  $R_{вн}$  заменяют расчетным эквивалентом. В качестве эквивалента может быть взят:

а) источник ЭДС  $E$  с последовательно включенным сопротивлением  $R_{вн}$ , равным внутреннему сопротивлению реального источника (рис. 7, а);

б) источник тока с током  $J=E/R_{вн}$  и параллельно с ним включенным сопротивлением  $R_{вн}$  (рис. 7, б).

Ток в нагрузке (в сопротивлении  $R$ ) для двух схем, представленных на рис. 7 одинаков:  $I = E/(R + R_{вн})$ , так как при последовательном соединении значения сопротивлений  $R$  и  $R_{вн}$  складываются (рис. 7, а), а в схеме на рис. 7, б ток  $J = E/R_{вн}$  распределяется обратно пропорционально значениям сопротивлений  $R$  и  $R_{вн}$  двух параллельных ветвей. Тогда ток в нагрузке  $R$  можно определить по формуле:

$$I = J \frac{R_{вн}}{R + R_{вн}} = \frac{E}{R_{вн}} \frac{R_{вн}}{R + R_{вн}} = \frac{E}{R + R_{вн}}.$$

Каким из двух расчетных эквивалентов пользоваться, не имеет особого значения. В большинстве случаев используется первый эквивалент – источник ЭДС.

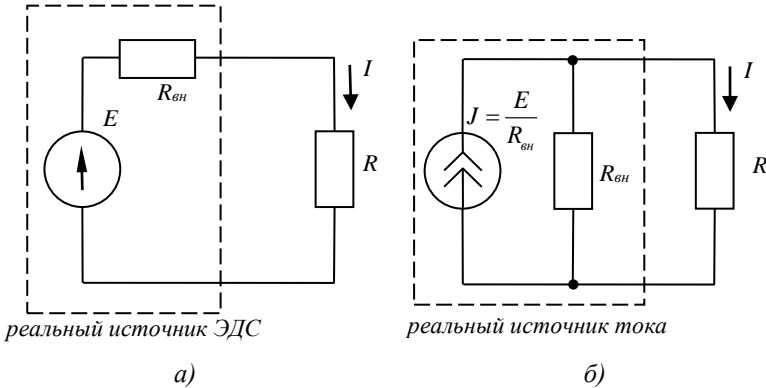


Рис. 7. Схема подключения реального источника и нагрузки

Следует отметить:

а) источник ЭДС и источник тока – идеализированные источники, физически изготовить которые, строго говоря, невозможно;

б) схема на рис. 7, б эквивалентна схеме на рис. 7, а в отношении энергии, выделяющейся в сопротивлении нагрузки  $R$ , и не эквивалентна ей в отношении энергии, выделяющейся во внутреннем сопротивлении источника питания  $R_{вн}$ ;

в) идеальный источник ЭДС без последовательно соединенного с ним  $R_{вн}$  нельзя заменить идеальным источником тока.

## 6. Закон Ома для участка цепи

### *Закон Ома для участка цепи, не содержащего источник ЭДС*

Закон Ома для участка цепи, в котором содержится только приемник энергии, без источника, устанавливает связь между то-

ком, протекающим по этому участку цепи и напряжением на этом участке. Применительно участку схемы, представленному на рис. 8:

$$U_{ab} = IR, \quad I = \frac{U_{ab}}{R} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R}.$$

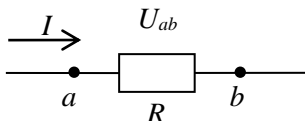


Рис. 8. Участок электрической цепи без источника ЭДС

### **Закон Ома для участка цепи, содержащего источник ЭДС**

Если рассматриваемый участок цепи включает в себя источник ЭДС и приемник, то закон Ома для такого участка позволяет найти ток по разности потенциалов ( $\varphi_a - \varphi_c$ ) на концах участка цепи и имеющейся ЭДС  $E$  (рис.9).

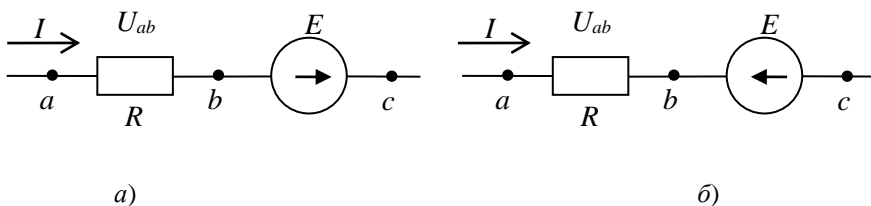


Рис. 9. Участки электрической цепи

Для участка схемы на рис. 9, а:

$$I = \frac{U_{ac} + E}{R} = \frac{(\varphi_a - \varphi_c) + E}{R},$$

для участка схемы на рис. 9, б):

$$I = \frac{U_{ac} - E}{R} = \frac{(\varphi_a - \varphi_c) - E}{R}.$$

## 7. Законы Кирхгофа

Расчет и анализ электрических цепей производится с использованием закона Ома, а также первого и второго законов Кирхгофа. На основе этих законов устанавливается взаимосвязь между значениями токов, напряжений, ЭДС всей электрической цепи и отдельных ее участков и параметрами элементов, входящих в состав этой цепи.

### *I Закон Кирхгофа*

Первый закон Кирхгофа может быть сформулирован двояко:

- 1) алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю;
- 2) сумма притекающих токов в узел равна сумме токов, вытекающих из узла:

$$\sum I = 0.$$

Иными словами, в любой момент времени количество электрических зарядов, направленных к узлу, равно количеству зарядов, направленных от узла, откуда следует, что электрический заряд в узле не накапливается.

До написания уравнения по первому закону Кирхгофа необходимо задать условные положительные направления токов в ветвях, обозначив эти направления на схеме стрелками. Токи, направленные к узлу, записывают с одним знаком (например, с плюсом), а токи, направленные от узла, с противоположным знаком (с минусом).

### *II Закон Кирхгофа*

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

$$\sum IR = \sum E.$$

В данном выражении со знаком плюс записываются падения напряжения, положительные направления обхода которых совпадают с предварительно выбранным направлением обхода контура, а со знаком минус – противоположно направленные.

## 8. Последовательное и параллельное соединение элементов электрической цепи

Если несколько элементов электрической цепи соединены один за другим без разветвлений и по ним протекает один и тот же ток, такое соединение называется *последовательным*. Схема последовательного соединения сопротивлений представлена на рис. 10.

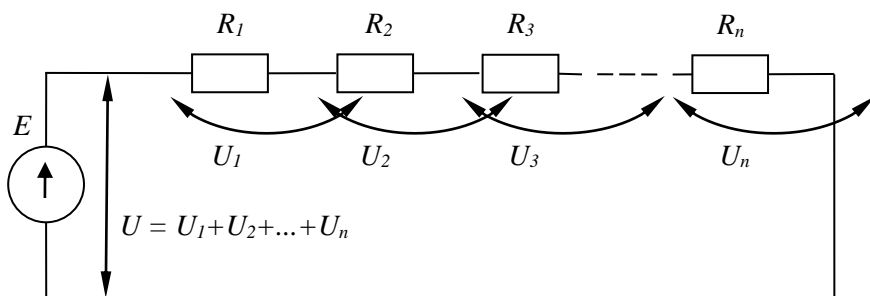


Рис. 10. Последовательное соединение резисторов

При таком соединении ток во всех элементах цепи одинаковый, а напряжения на резисторах и общее сопротивление цепи складывается:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{k=1}^n R_k, \quad U = U_1 + U_2 + \dots + U_n = \sum_{k=1}^n U_k$$

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{или} \quad I = \frac{U_k}{R_k}$$

*Параллельным* соединением приемников называется такое соединение, при котором к одним и тем же двум узлам электрической цепи присоединяется несколько ветвей (рис. 11).

При таком соединении складываются токи и проводимости:

$$U = const, \quad I = I_1 + I_2 + \dots + I_n = \sum_{k=1}^n I_k,$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}.$$

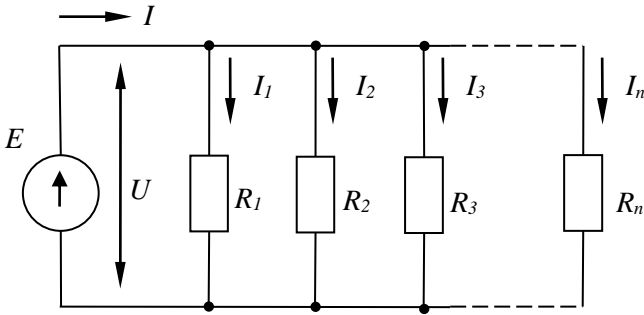


Рис. 11. Параллельное соединение резисторов

При *комбинированном соединении* элементов можно воспользоваться *методом эквивалентного преобразования схем*. Суть метода заключается в том, что группу резистивных элементов можно заменить одним или группой резистивных элементов, включенных другим способом (рис. 12).

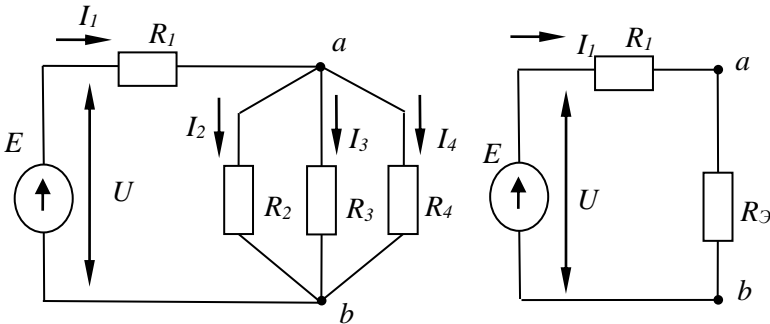


Рис. 12. Эквивалентная замена группы резисторов

Группа резисторов  $R_2, R_3, R_4$  заменяется резистором с эквивалентным сопротивлением  $R_9$

$$\frac{1}{R_9} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \text{ или } R_9 = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}},$$

что не изменяет общего тока в цепи. Общее сопротивление цепи может быть найдено как

$$R = R_1 + R_9 = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}.$$

Напряжение и токи для данной схемы определяться следующим образом:

$$U_{ab} = I_1 R_9$$
$$I_1 = \frac{E}{R}, I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2}, I_3 = \frac{U_{ab}}{R_3}, I_4 = \frac{U_{ab}}{R_4}.$$

## 9. Преобразование соединения «звезда» в соединение «треугольник» и «треугольник» в «звезда»

Соединение трех сопротивлений, имеющее вид трехлучевой звезды (рис. 13), называется соединением «*звезда*», а соединение трех сопротивлений так, что они образуют собой стороны треугольника (рис. 14) – соединением «*треугольник*».



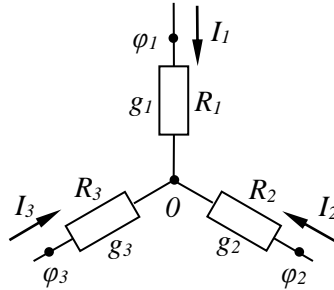


Рис. 13. Соединение «звезда»

В точках 1, 2, 3 (их потенциалы, соответственно,  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ ) и треугольник, и звезда соединяются с остальной частью схемы (не показанной на рис. 13, 14). Обозначим токи, притекающие к точкам 1, 2, 3 через  $I_1, I_2, I_3$ . Очень часто при расчете электрических цепей оказывается полезно преобразовать «треугольник» в «звезду» или «звезду» в «треугольник». Практически чаще бывает необходимо преобразовать «треугольник» в «звезду», чем «звезду» в «треугольник». Если преобразование выполнить таким образом, что при одинаковых значениях потенциалов одноименных точек «треугольника» и «звезды» притекающие к этим точкам токи будут одинаковы, то вся внешняя схема «не заметит» произведённой замены. Для проведения преобразования выразим токи  $I_1, I_2, I_3$  через разности потенциалов точек и соответствующие проводимости  $g$ .

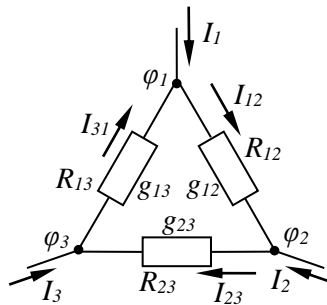


Рис.14. Соединение «треугольник»

Для соединения «звезда»:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0,$$

при этом

$$I_1 = (\varphi_1 - \varphi_0)g_1, I_2 = (\varphi_2 - \varphi_0)g_2, I_3 = (\varphi_3 - \varphi_0)g_3.$$

Из этого выражения потенциал нулевой точки  $\varphi_0$  будет равен:

$$\begin{aligned} \varphi_1 g_1 + \varphi_2 g_2 + \varphi_3 g_3 - \varphi_0 (g_1 + g_2 + g_3) &= 0, \\ \varphi_0 &= \frac{\varphi_1 g_1 + \varphi_2 g_2 + \varphi_3 g_3}{g_1 + g_2 + g_3}. \end{aligned}$$

Отсюда выражение для тока  $I_1$ :

$$I_1 = (\varphi_1 - \varphi_0)g_1 = \frac{[\varphi_1(g_1 + g_3) - \varphi_2 g_2 + \varphi_3 g_3]g_1}{g_1 + g_2 + g_3}. \quad (1)$$

Для соединения «треугольник» в соответствии с обозначениями на рис. 14, ток  $I_1$  определится как:

$$\begin{aligned} I_1 = I_{12} - I_{31} &= (\varphi_1 - \varphi_2)g_{12} - (\varphi_3 - \varphi_1)g_{13} = \\ &= \varphi_1(g_{12} + g_{13}) - \varphi_3 g_{13} + \varphi_2 g_{12}. \end{aligned} \quad (2)$$

Так как ток  $I_1$  в схеме на рис. 13 должен равняться току  $I_1$  в схеме на рис.14 при любых значениях потенциалов  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , то коэффициент при  $\varphi_2$  в правой части выражения (1) должен равняться коэффициенту при  $\varphi_2$  в правой части выражения (2), а коэффициент при  $\varphi_3$  в правой части выражения (1) должен равняться коэффициенту при  $\varphi_3$  в правой части выражения (2). Отсюда следует, что:

$$\begin{aligned} g_{12} &= \frac{g_1 g_2}{g_1 + g_2 + g_3}, \\ g_{13} &= \frac{g_1 g_3}{g_1 + g_2 + g_3}. \end{aligned}$$

Аналогично:

$$g_{23} = \frac{g_2 g_3}{g_1 + g_2 + g_3}.$$

Полученные три формулы дают возможность найти проводимости сторон «треугольника» через проводимости лучей «звезды». Они имеют легко запоминающуюся структуру: индексы у проводимостей в числителе правой части соответствуют индексам проводимости в левой части, а в знаменателе – сумма проводимостей лучей «звезды».

Сопротивления лучей звезды по определению:

$$R_1 = \frac{1}{g_1}; R_2 = \frac{1}{g_2}; R_3 = \frac{1}{g_3}.$$

Преобразовав полученные выражения для проводимостей, получим выражения для сопротивлений лучей «звезды» через сопротивления сторон «треугольника»:

$$R_1 = \frac{R_{12} R_{13}}{R_{12} + R_{23} + R_{13}},$$
$$R_2 = \frac{R_{23} R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{13}},$$
$$R_3 = \frac{R_{13} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{13}}.$$

Полезность преобразования соединения «треугольник» в соединение «звезда» можно пояснить, например, схемами на рис. 15. На рис.15, а изображена схема до преобразования, пунктиром обведен преобразуемый «треугольник». На рис. 15, б представлена та же схема после преобразования. Расчет токов, протекающих через  $R_4, R_5, R_6$  для такой преобразованной схемы выполнять значительно проще.

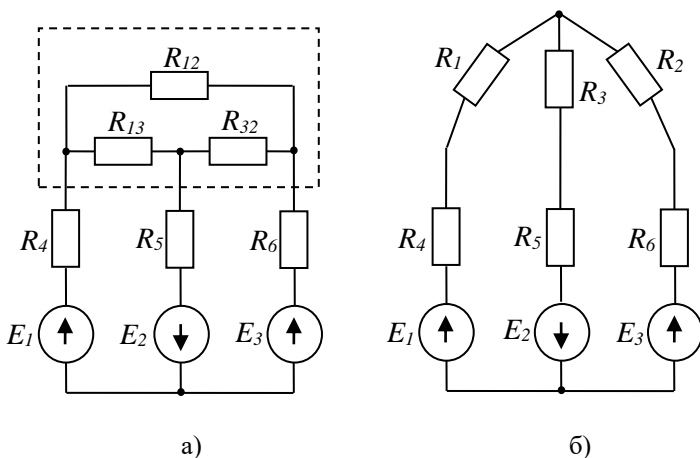


Рис. 15. Схемы с преобразованием соединения «треугольник» в соединение «звезда»

## 10. Последовательное и параллельное соединение источников ЭДС

На практике достаточно часто встречается последовательное соединение источников ЭДС. Последовательно включенные источники можно рассматривать как один эквивалентный источник с ЭДС, равной сумме ЭДС отдельных источников и внутренним сопротивлением, равным сумме внутренних сопротивлений отдельных источников. При этом, если источники включены согласованно, то напряжение складывается, если встречно – то вычитается.

Последовательное включение источников используется для увеличения напряжения питания схем. Например, один элемент химического источника питания (батареи) имеет  $E=1.5\text{ В}$ , что в большинстве случаев недостаточно для питания электронных схем. Применение нескольких батарей позволяет увеличить напряжение до необходимых значений.

Параллельное включение источников ЭДС на практике встречается реже, чем последовательное. Оно применяется, как

правило, для уменьшения внутреннего сопротивления, и как следствие – увеличения максимального тока в нагрузке.

Кроме того, на такой схеме включения реализуется так называемая, *буферная схема питания электрических цепей*. При буферной системе питания параллельно к нагрузке устройства подключается аккумуляторная батарея. Основное питание осуществляется от сети с использованием системы стабилизированных выпрямителей и фильтров, за счет чего также производится непрерывная подзарядка используемых аккумуляторных батарей. Когда напряжение сети отключается по каким-либо причинам, питание аппаратуры осуществляется от аккумуляторных батарей. Но так как по мере разряда аккумуляторных батарей напряжение их уменьшается, то для его поддержания на требуемом уровне применяют регулирующие и стабилизирующие устройства.

## 11. Применение законов Ома и Кирхгофа для расчетов электрических цепей

Рассмотрим схему, приведенную на рис. 16. Расчет такой схемы сводится к нахождению токов в ее ветвях. Обозначим количество узлов схемы  $U$ , количество ветвей  $B$ .

Для нахождения токов, протекающих по ветвям схемы, необходимо составить определенное количество уравнений по I и II законам Кирхгофа. Необходимо составить систему уравнений, в которой будет  $(U-1)$  независимых уравнений по I закону Кирхгофа и  $(B-U+1)$  независимых уравнений по II закону Кирхгофа.

Для схемы на рис. 16 количество узлов  $U=2$  и количество ветвей  $B=3$  ветви, т.е. необходимо составить  $U-1=2-1=1$  уравнение по первому закону Кирхгофа,  $B-U+1=3-2+1=2$  уравнение по второму закону Кирхгофа.

Произвольно выбираем положительные направления токов ветвей  $I_1, I_2, I_3$ . Одно необходимое уравнение по первому закону Кирхгофа составим, например, для узла  $a$ :

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

По второму закону Кирхгофа нужно составить уравнения для двух независимых контуров, например, для контуров 1 и 2.

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = E_1 + E_3$$

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 = E_2 + E_3$$

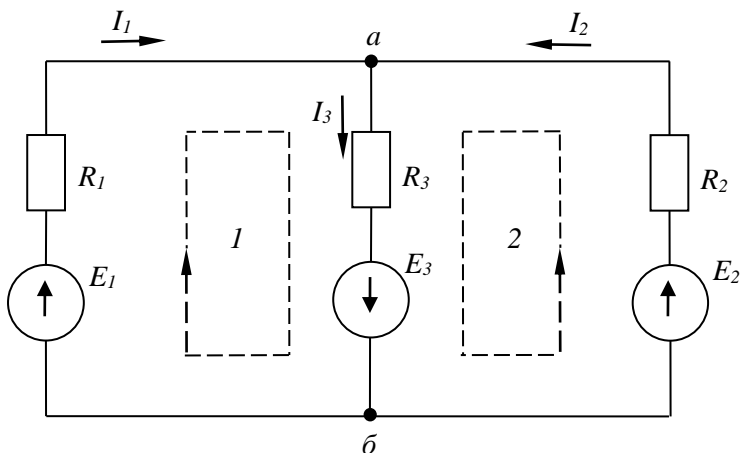


Рис. 16. Расчет цепей с помощью законов Кирхгофа

Решение системы полученных трех уравнений с тремя неизвестными определяет токи всех трех ветвях.

Систему алгебраических уравнений сложной цепи, составленную на основе законов Ома и Кирхгофа, целесообразно решать в матричной форме, либо с помощью математических пакетов.

## 12. Метод узловых потенциалов

Расчет сложных схем, состоящих из большого количества ветвей, может быть затруднителен, поскольку система уравнений, необходимая для нахождения неизвестных токов, будет содержать большое количество уравнений. Если в схеме более десятка элементов или она содержит много взаимосвязанных

контуров, то для записи, определяющей схему системы уравнений, требуются специальные методики. К таким методикам относятся *метод узловых потенциалов*.

Метод узловых потенциалов основывается на применении законов Кирхгофа, но позволяет сократить количество уравнений в составляемой системе. Суть метода состоит в нахождении потенциалов узлов схемы, что дает возможность расчета напряжения каждой ветви. При заданных условиями значениях сопротивлений и ЭДС в ветвях, знание напряжений позволяет рассчитать все необходимые токи.

#### *Алгоритм расчета цепи по методу узловых потенциалов*

Перед началом расчёта выбирается один из узлов (базовый узел), потенциал которого считается равным 0. Затем узлы нумеруются, после чего составляется система уравнений. Уравнения составляются для каждого узла, кроме базового.

Слева от знака равенства записывается:

- потенциал рассматриваемого узла, умноженный на сумму проводимостей ветвей, примыкающих к нему;
- минус потенциалы узлов, примыкающих к рассматриваемому узлу, умноженные на проводимости ветвей, соединяющих их с данным узлом.

Справа от знака равенства записывается:

- сумма всех источников токов, примыкающих к рассматриваемому узлу;
- сумма произведений всех ЭДС, примыкающих к рассматриваемому узлу, на проводимость соответствующего звена.

Если источник направлен в сторону рассматриваемого узла, то он записывается со знаком «+», в противном случае – со знаком «-».

Применим метод узловых потенциалов для расчета цепи, схема которой представлена на рис. 17.

Выбираем базовый узел, потенциал которого принимаем равным нулю  $\varphi_0=0$ . Нумеруем оставшиеся три узла, их потенциалы  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ .

Составляем систему из уравнений для каждого из пронумерованных узлов.

$$\begin{cases} \varphi_1 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4} \right) - \varphi_2 \frac{1}{R_2} - \varphi_3 \frac{1}{R_3 + R_4} = E_1 \frac{1}{R_1} - E_2 \frac{1}{R_2} + E_3 \frac{1}{R_3 + R_4}, \\ \varphi_2 \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} \right) - \varphi_1 \frac{1}{R_2} - \varphi_3 \frac{1}{R_5} = E_2 \frac{1}{R_2} - E_5 \frac{1}{R_5}, \\ \varphi_3 \left( \frac{1}{R_3 + R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_7} \right) - \varphi_1 \frac{1}{R_3 + R_4} - \varphi_2 \frac{1}{R_5} = -J + E_5 \frac{1}{R_5} - E_3 \frac{1}{R_3 + R_4}. \end{cases}$$

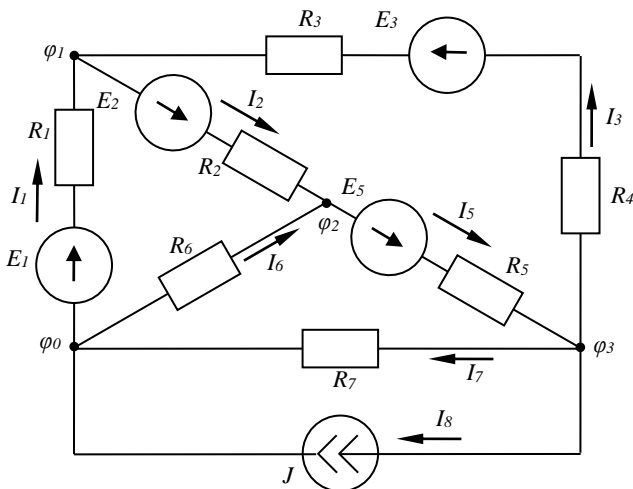


Рис. 17. Пример схемы для расчета токов методом узловых потенциалов

Решая полученную систему уравнений, находим потенциалы пронумерованных узлов.

Величины токов в ветвях находим с помощью закона Ома. Таким образом, получим следующие выражения для токов в ветвях:



$$I_1 = \frac{\varphi_0 - \varphi_1 + E_1}{R_1}, \quad I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + E_1}{R_2}, \quad I_3 = \frac{\varphi_3 - \varphi_1 + E_3}{R_3 + R_4},$$

$$I_5 = \frac{\varphi_2 - \varphi_3 + E_5}{R_5}, \quad I_6 = \frac{\varphi_0 - \varphi_2}{R_6}, \quad I_7 = \frac{\varphi_3 - \varphi_0}{R_7}, \quad I_8 = J.$$

Ток в ветви с включенным источником тока  $J$  определяется номиналом данного источника.

### 13. Метод контурных токов

Метод контурных токов позволяет уменьшить число совместно-решаемых уравнений и основан на применении второго закона Кирхгофа. Суть метода заключается в следующем.

1) Выбирается  $K=B-U+1$  (где  $K$  – количество контуров,  $B$  – количество ветвей схемы,  $U$  – количество узлов схемы) независимых контуров и положительных направлений так называемых **контурных токов**, каждый из которых протекает по всем элементам соответствующего выбранного контура.

2) Для  $K$  независимых контуров составляем уравнения по второму закону Кирхгофа, совместное решение которых определяет все контурные токи.

3) Ток каждой ветви определяем по первому закону Кирхгофа как алгебраическую сумму контурных токов в соответствующей ветви.

Пример расчета схемы (рис. 18) с помощью метода контурных токов приведен ниже.

По методу контурных токов составляется система уравнений, в которую для схемы на рис. 18, будут входить три уравнения ( $K=B-U+1=6-4+1=3$ ). Система будет иметь вид:

$$\begin{cases} I_{11}(R_1 + R_4 + R_6) - I_{22}R_6 + I_{33}R_4 = E_1 - E_4, \\ I_{22}(R_2 + R_5 + R_6) - I_{11}R_6 + I_{33}R_5 = E_2, \\ I_{33}(R_3 + R_4 + R_5) + I_{11}R_4 + I_{22}R_5 = E_3 - E_4. \end{cases}$$

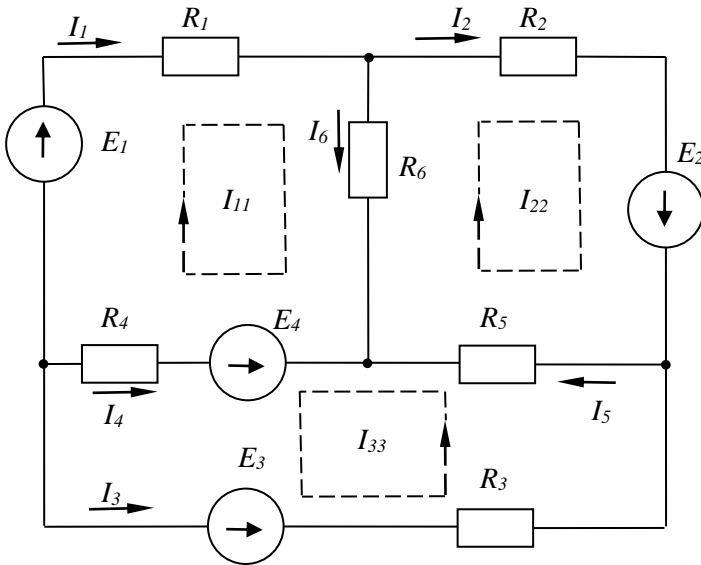


Рис. 18. Расчет цепей методом контурных токов

Решение полученной системы уравнений позволяет определить контурные токи  $I_{11}$ ,  $I_{22}$ ,  $I_{33}$ . Токи ветвей находим с использованием первого закона Кирхгофа:

$$I_1 = I_{11}, \quad I_2 = I_{22}, \quad I_3 = I_{33},$$

$$I_4 = -I_{11} - I_{33}, \quad I_5 = I_{22} + I_{33}, \quad I_6 = I_{11} - I_{22}.$$

Следует отдельно отметить специфику расчета методом контурных токов в случае, если в схеме присутствует источник тока. Для примера рассмотрим схему, приведенную на рис. 17, в одной из ветвей которой включен источник тока  $J$ . Для удобства представим ее на рис. 19 с обозначением контурных токов.

Для расчета токов в заданной схеме необходимо составление уравнений для 4 независимых контуров, обозначим протекающие

в них токи:  $I_{11}$ ,  $I_{22}$ ,  $I_{33}$ ,  $I_{44}$ . Система уравнений составляется по вышеописанному правилу и будет иметь вид:

$$\begin{cases} I_{11}(R_3 + R_4 + R_2 + R_5) - I_{22}R_2 + I_{33}R_5 = E_3 + E_2 + E_5, \\ I_{22}(R_1 + R_6 + R_2) - I_{11}R_2 + I_{33}R_6 = -E_2 - E_1, \\ I_{33}(R_5 + R_7 + R_6) + I_{22}R_6 + I_{11}R_5 + I_{44}R_7 = E_5, \\ I_{44} = -J. \end{cases}$$

Отметим, что четвертое уравнение системы составляется не по общему правилу метода. Это происходит в силу того, что в четвертый контур входит ветвь с включенным идеальным источником тока, который служит для создания силы тока, не зависящей от напряжения на его концах ветви, в которую включен источник. Поскольку ветвь с включенным источником  $J$  входит в состав только контура с контурным током  $I_{44}$ , мы можем сразу записать уравнение  $I_{44} = -J$  в силу принципа действия идеального источника тока. Знак «минус» в уравнении появляется в виду того, что ток  $I_{44}$  и  $J$  противоположные стороны.

Решая полученную систему, находим значения контурных токов  $I_{11} \dots I_{44}$  и составляем уравнения для нахождения токов, протекающих по ветвям схемы:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{22}, \quad I_2 = -I_{22} + I_{11}, \quad I_3 = I_{11}, \\ I_5 &= I_{33} + I_{11}, \quad I_6 = I_{22} + I_{33}, \\ I_7 &= I_{33} + I_{44}, \quad I_8 = -J. \end{aligned}$$

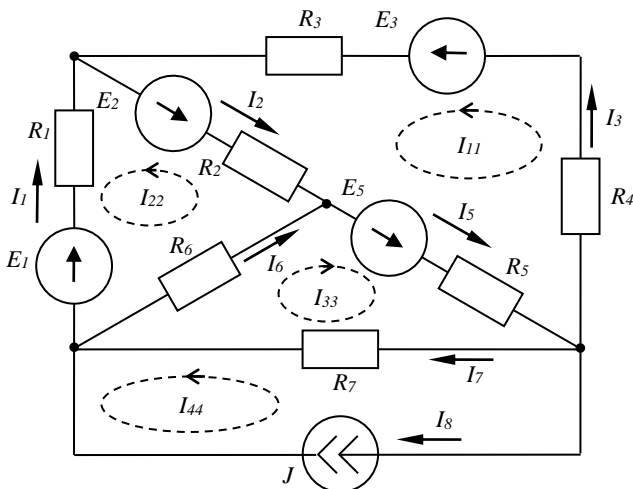


Рис. 19. Пример схемы для расчета токов методом контурных токов

## 14. Работа и мощность электрического тока

Электрический ток, проходя по проводникам, совершает работу, превращая электрическую энергию в другой вид энергии: тепловую, световую, механическую, химическую и т.д.

Если к потребителю электрической энергии приложено напряжение один вольт, то это значит, что источник электрической энергии, перенося один кулон электричества через потребитель, расходует в нем один джоуль электрической энергии. При превращении электрической энергии в другой вид энергии электрический ток, проходя через потребителя, совершает *работу*. Величина этой работы равна величине электрической энергии, израсходованной источником.

В источнике ЭДС под действием химических (в первичных элементах и аккумуляторах) или электромагнитных (в электрических генераторах) сил происходит разделение зарядов.

Работа, которая совершается сторонними силами в источнике при перемещении заряда  $q$  или, как принято говорить, «выработанная» в источнике электрическая энергия, находится по формуле:

$$A = qE$$

Если источник замкнут на внешнюю цепь, то в нем непрерывно происходит разделение зарядов, причем сторонние силы по-прежнему совершают работу  $A = qE$ , или, имея в виду, что  $q = It$ , получим  $A = EIt$ , где  $t$  – время.

По закону сохранения энергии электрическая энергия, выработанная в источнике ЭДС, за то же время «расходуется» (т. е. преобразуется) в другие виды энергии в участках электрической цепи.

Часть энергии затрачивается во внешнем участке (на нагрузке):

$$A_H = Uq = UIt,$$

где  $U$  – напряжение на зажимах реального источника, которое при замкнутой внешней цепи уже не равно ЭДС.

Другая часть энергии «расходуется» (преобразуется в тепло) внутри самого источника:

$$A_0 = A - A_H = (E - U)It = U_0It,$$

где  $U_0$  – это разность между ЭДС источника и напряжением на зажимах этого источника, которая называется **внутренним падением напряжения** ( $U_{\text{вн}}$ ), и зависит от величины его внутреннего сопротивления. Таким образом,

$$U_{\text{вн}} = E - U, \quad E = U + U_0.$$

То есть ЭДС источника равна сумме напряжения на зажимах и внутреннего падения напряжения.

Пример. Электрический чайник подключен к сети с напряжением 220 Вольт. Необходимо определить энергию, израсходованную в чайнике за время 12 минут, если ток в нагревательном элементе чайника был равен 2,5 А.

$$A=220 \cdot 2,5 \cdot 60 \cdot 12=396000 \text{ Дж.}$$

Величина, характеризующая скорость, с которой происходит преобразование энергии, или скорость, с которой совершается работа, называется **мощностью** (обозначение  $P$ ):

$$P = \frac{A}{t}.$$

Мощностью электрического тока называется его работа, отнесенная к единице времени.

Величина, характеризующая скорость, с которой механическая или другая энергия преобразуется в источнике в электрическую, называется **мощностью генератора**:

$$P_G = \frac{A}{t} = \frac{EIt}{t} = EI.$$

Величина, характеризующая скорость, с которой происходит преобразование электрической энергии во внешних участках цепи в другие виды энергии, называется **мощностью потребителя или мощностью на нагрузке**:

$$P_H = \frac{A_H}{t} = \frac{UIt}{t} = UI = I^2 R.$$

Мощность, характеризующая непроизводительный расход электрической энергии, например, на тепловые потери внутри генератора, называется **мощностью потерь**:

$$P_0 = \frac{(A - A_0)}{t} = \frac{U_0 It}{t} = U_0 I$$

По закону сохранения энергии мощность генератора равна сумме мощностей потребителей и потерь:

$$P_G = P_H + P_0.$$

Единица измерения мощности находится из формулы  $P=A/t=\text{Дж/сек}$  называется ватт (обозначение Вт). Электрический

ток развивает мощность в 1 Вт, если он каждую секунду совершает работу, равную 1 Дж.

С другой стороны, из выражения  $A=QE$  следует, что  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ К} \cdot 1 \text{ В}$ , откуда  $1 \text{ Вт} = (1 \text{ В} \times 1 \text{ К}) / 1 \text{ с} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А} = 1 \text{ ВА}$ , т. е. 1 ватт есть мощность электрического тока в 1 А при напряжении 1 В.

Более крупными единицами мощности являются гектоватт  $1 \text{ гВт} = 100 \text{ Вт}$  и киловатт –  $1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ Вт}$ .

*Электрическая энергия* подсчитывается обыкновенно в: ватт-часах (Вт·ч) или кратных единицах: гектоватт-часах (гВт·ч) и, наиболее часто применяемых, киловатт-часах (кВт·ч).

То есть при подсчете электрической энергии оценивается работа, совершаемая при неизменной мощности 1 кВт в течение 1 ч. Так как  $1 \text{ Вт} \cdot 1 \text{ с} = 1 \text{ Дж}$ , то  $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3\,600\,000 \text{ Дж}$ .

## 15. Баланс мощностей

Для промышленного предприятия существует такое понятие, как «энергетический баланс». Энергетический баланс – это баланс добычи, переработки, транспортировки, преобразования, распределения и потребления всех видов энергетических ресурсов и энергии в производстве, он является отражением закона сохранения энергии в условиях конкретного производства.

Применительно к электрической энергии главной целью такого баланса является определение степени полезного использования электроэнергии и поиск путей снижения потерь, рационализации электропотребления.

Энергетический баланс состоит из приходной и расходной частей. Приходная часть энергобаланса содержит количественный перечень энергии, поступающей посредством различных энергоносителей (ископаемое топливо и ядерное горючее, газ, пар, вода, воздух, электрическая энергия). Расходная часть энергобаланса определяет расход энергии всех видов во всевозможных ее проявлениях, потери при преобразовании энергии одного вида в другой при ее транспортировке, а также энергию, накапливаемую (аккумулируемую) в специальных устройствах (например, гидроаккумулирующих установках).

Применительно к рассмотрению электрических цепей соблюдение энергетического баланса сводится к удовлетворению правила **баланса мощностей**:

*Алгебраическая сумма мощностей всех источников энергии (в частности, источников тока и источников ЭДС) равна арифметической сумме мощностей всех приемников энергии (в частности, резистивных элементов):*

$$\begin{aligned}\sum P_{ист} &= \sum P_{прим} \\ \sum EI &= \sum UI = \sum I^2 R\end{aligned}$$

В качестве примера составим баланс мощностей цепи, представленной на рис. 18:

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 + E_4 I_4 = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2 + R_6 I_6^2$$

## 16. Режимы работы электрической цепи. Согласованный режим работы

Электрическая цепь в зависимости от значения сопротивления нагрузки  $R_H$  может работать в различных характерных режимах:

- номинальном;
- согласованном;
- холостого хода;
- короткого замыкания.

**Номинальный режим** – это расчетный режим, при котором элементы цепи (источники, приемники, линия электропередачи) работают в условиях, соответствующих проектным данным и параметрам.

Изоляция источника, линии электропередачи, приемников рассчитана на определенное напряжение, называемое *номинальным*. Превышение этого напряжения приводит к пробое изоляции, увеличению токов в цепи и другим аварийным последствиям.

Номинальное значение мощности для источника электрической энергии – это наибольшая мощность, которую источник при



нормальных условиях работы может отдать во внешнюю цепь без опасности пробоя изоляции и превышения допустимой температуры нагрева.

Для приемников электрической энергии типа двигателей – это мощность, которая может развиваться на валу при нормальных условиях работы. Для остальных приемников электрической энергии (нагревательные и осветительные приборы) – это их мощность при номинальном режиме. Номинальные значения напряжений, токов и мощностей указывают в паспортах изделий.

**Согласованным режимом**, в общем смысле, называется такой режим работы электрической цепи, когда на нагрузке, подключенной к данному источнику, выделяется максимальная мощность, которую способен дать этот источник в текущем его состоянии.

Для схемы, приведенной на рис. 20, ток в цепи будет зависеть не только от величины, подключаемой к источнику нагрузки, но и от величины внутреннего сопротивления источника  $R_{вн}$ :

$$I = \frac{E}{R + R_{вн}}.$$

Мощность, выделяемая на нагрузке, в такой цепи будет равна:

$$P_H = UI = I^2 R = \frac{E^2}{(R + R_{вн})^2} R.$$

При двух предельных значениях сопротивления:  $R=0$  и  $R \rightarrow \infty$ , мощность приемника равна нулю, так как в первом случае равно нулю напряжение между выводами приемника (режим короткого замыкания – отсутствие подключенной нагрузки), а во втором случае – ток в цепи (режим холостого хода – разомкнутая цепь).

Для реальных источников электроэнергии (рис. 20), обладающих определенным конечным внутренним сопротивлением  $R_{вн}$ , справедливо утверждение, что с увеличением сопротивления нагрузки начиная от нуля, выделяемая на ней мощность сначала нелинейно возрастает, затем достигается пик выделяемой на

нагрузке мощности (для данного источника), и с дальнейшим увеличением сопротивления нагрузки, выделяемая на ней мощность нелинейно снижается, приближаясь к нулю.

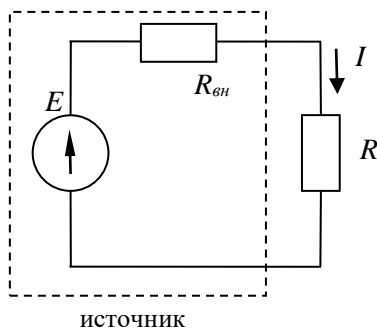


Рис. 20. Схема подключения реального источника и нагрузки

Следовательно, некоторому определенному значению  $R_H$  соответствует наибольшее возможное (при данных  $E$  и  $R_{вн}$ ) значение мощности приемника. Чтобы определить это значение сопротивления, достаточно приравнять нулю первую производную от мощности  $P$  по  $R$ . При этом получается, что максимум мощности передается в нагрузку при  $R=R_{вн}$  (рис. 21, а).

Таким образом, *источник ЭДС развивает максимальную полезную мощность (мощность на нагрузке), когда внешнее подключаемое сопротивление равно внутреннему сопротивлению источника*, при этом мощность будет равна:

$$P_{\max} = \frac{E^2}{4R_{вн}} \text{ при } R_H = R_{вн}.$$

При выполнении данного условия равенства сопротивления нагрузки и внутреннего сопротивления источника реализуется так называемый режим *согласования нагрузки и источника по мощности (согласованный режим или режим согласованной нагрузки)*.

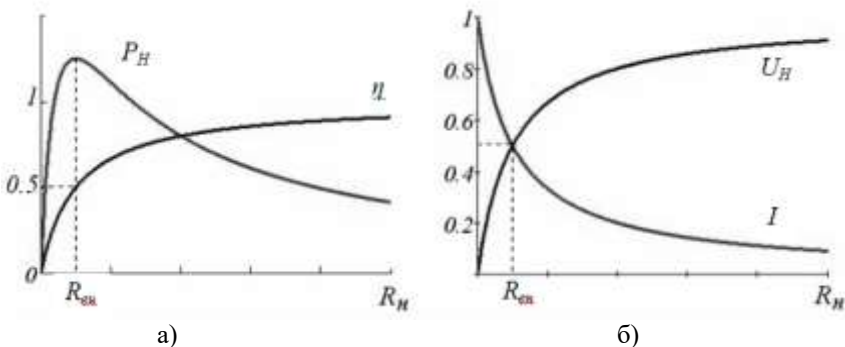


Рис. 21. Иллюстрация в условие передачи максимальной мощности в нагрузку

При проектировании электрических схем не всегда необходимо, чтобы выполнялось именно условие передачи максимальной мощности на нагрузку. Согласование в системах производят и иным образом с целью получения лучших параметров схемы для конкретной задачи. По этой причине существует несколько вариантов согласования нагрузки и источника: по напряжению, по току, по мощности.

*Режим холостого хода. Согласование нагрузки и источника по напряжению*

В режиме холостого хода внешняя цепь разомкнута и ток равен нулю. Так как ток равен нулю, то падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника так же равно нулю и напряжение на выводах источника равно ЭДС.

С целью получения на нагрузке максимального напряжения, ее сопротивление  $R_H$  подбирают таким, чтобы оно оказалось много больше внутреннего сопротивления источника  $R_{вн}$  (рис. 21, б). То есть источник должен работать под нагрузкой, но при этом в режиме холостого хода, тогда напряжение на нагрузке будет равно ЭДС источника:

$$U_{H \max} = E \text{ при } R_H \gg R_{вн}$$

Такой тип согласования применяют, в частности, в электронных системах, в которых напряжение служит носителем информации, носителем сигнала, и необходимо чтобы при передаче этого сигнала потери были бы минимальными.

*Режим короткого замыкания. Согласование нагрузки и источника по току*

В режиме короткого замыкания выводы источника соединены между собой, например, сопротивление нагрузки замкнуто проводником с нулевым сопротивлением. Напряжение на приемнике при этом равно нулю. Сопротивление всей цепи равно внутреннему сопротивлению источника. Ток достигает максимально возможного значения для данного источника и может вызывать перегрев источника и даже его повреждение. Для защиты источников электрической энергии и питающих цепей от токов короткого замыкания в маломощных цепях устанавливают плавкие предохранители, в более мощных цепях – отключающие автоматические выключатели, а высоковольтных цепях – специальные высоковольтные выключатели.

Для реализации режима согласования нагрузки и источника по току, то есть когда на нагрузке требуется получить максимальный ток, сопротивление нагрузки  $R_H$  подбирают как можно меньшим, много меньшим чем внутреннее сопротивление источника  $R_{\text{вн}}$  (рис. 21, б). То есть источник работает в режиме короткого замыкания, и при этом через нагрузку течет ток, равный току короткого замыкания:

$$I_{\text{max}} = \frac{E}{R + R_{\text{вн}}} \text{ при } R_H \ll R_{\text{вн}}$$

Такое решение применяется, в частности, в электронных схемах, где носителем сигнала является ток. К примеру, быстродействующий фотодиод передает сигнал именно током, который затем преобразуется в напряжение необходимого уровня.

Применительно к альтернативной энергетике ближайшего будущего, когда источник электроэнергии обладает индивидуальными характеристиками, сильно отличающимися от традиционных, необходимо в первую очередь обеспечить согласованный ре-

жим работы источника и приемника, путем изготовления приемника, который будет подходить своими характеристиками к данному источнику, а лишь затем преобразовывать полученную энергию в приемлемый для нагрузки вид.

## 17. Коэффициент полезного действия (КПД)

Мощность, выделяемой на нагрузке (у конечного потребителя) в цепи постоянного тока называется *полезной мощностью*.

Отношение мощности приемника (нагрузки) к мощности источника энергии  $P_{ист}$  называется его коэффициентом полезного действия (КПД). Для цепи, приведенной на рис. 20, выражение для КПД можно записать следующим образом:

$$\eta = \frac{P_H}{P_{ист}} = \frac{U_H I}{EI} = \frac{U_H}{E} = \frac{IR_H}{I(R_H + R_{вн})} = \frac{R_H}{R_H + R_{вн}}.$$

Режим согласованной нагрузки в точки зрения КПД является невыгодным, поскольку при  $R=R_H$  (рис. 21, а):

$$\eta = \frac{R_H}{R_H + R_{вн}} = \frac{R_H}{2R_H} = 0,5.$$

В таком случае половина энергии источника теряется на его внутреннем сопротивлении.

При работе в режиме короткого замыкания, когда  $R_H \ll R_{вн}$  КПД приобретает минимальное значение  $\eta = 0$ .

При значительном увеличении сопротивления нагрузки и переходе к режиму холостого хода  $R_H \gg R_{вн}$  величина КПД увеличивается и при  $R_H \rightarrow \infty$  достигает значения  $\eta = 1$ .

Таким образом, для обеспечения высокого показателя коэффициента полезного действия системы необходимо подбирать нагрузку значительно превосходящую внутреннее сопротивление источника по значению.

## 18. Передача энергии по линии передачи

Схема линии передачи электрической энергии изображена на рис. 22, где  $U_1$  – напряжение генератора в начале линии;  $U_2$  – напряжение на нагрузке в конце линии;  $R_L$  – сопротивление проводов линии;  $R_2$  – сопротивление нагрузки. Напряжение  $U_1=U_{ab}$  направлено противоположно ЭДС  $E$ . Объясняется это тем, что напряжение имеет направление от точки с более высоким потенциалом к точке с более низким, тогда как ЭДС направлена от точки с более низким потенциалом к точке с более высоким, т.е. стрелка внутри источника ЭДС указывает направление возрастания потенциала внутри источника.

При передаче больших мощностей (например, нескольких десятков мегаватт) в реальных цепях передач КПД  $\eta=0,94 - 0,99$ , а напряжение  $U_2$  лишь на несколько процентов меньше  $U_1$ . Ясно, что каждый процент повышения КПД при передаче больших мощностей имеет существенное экономическое значение.

Характер изменения мощности в начале линии  $P_1$ , мощности в нагрузке  $P_2$ , КПД  $\eta$  и напряжения на нагрузке  $U_2$  в функции от тока по линии при  $U_1=\text{const}$ ,  $R_L=\text{const}$  иллюстрируется кривыми на рис. 23. По оси абсцисс отложен ток  $I$ , по оси ординат –  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $U_2$ ,  $\eta$ .

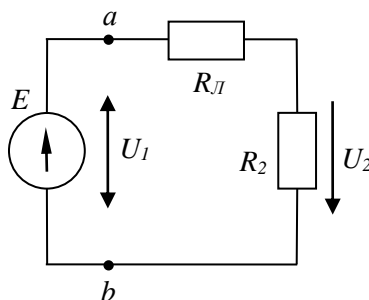


Рис. 22. Схема линии передачи электрической энергии

Максимальное значение тока  $I_{\max} = U_1/R_L$  имеет место при коротком замыкании нагрузки. Кривые построены по уравнениям:

$$P_1 = U_1 I; P_2 = U_1 I - I^2 R_L;$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{R_L I}{U_1} = \frac{R_2}{R_L + R_2}; U_2 = U_1 - R_L I.$$

Если по линии передачи с сопротивлением  $R_L$  и сопротивлением нагрузки  $R_2$  должна быть передача мощности:

$$P_2 = I^2 R_2,$$

то КПД передачи тем выше, чем выше напряжение  $U_1$  в начале линии.

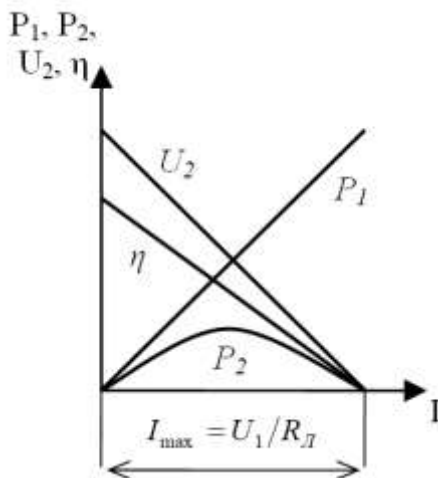


Рис. 23. Иллюстрация к изменению мощности в начале линии  $P_1$ , мощности на нагрузке  $P_2$ , КПД  $\eta$  и напряжения на нагрузке  $U_2$  от тока

## 19. Пример расчета цепи постоянного тока

Рассмотрим схему цепи постоянного тока, приведенную на рис. 24. Данная цепь является сложной цепью постоянного тока с тремя включенными источниками ЭДС, среди них один источник

ЭДС  $E_1$  идеальный (обладает внутренним сопротивлением  $R_{01}=0$ ) и два источника  $E_2$  и  $E_3$  с внутренними сопротивлениями  $R_{02}$  и  $R_{03}$ . Также в схему включены шесть приемников – резисторы  $R_1...R_6$ .

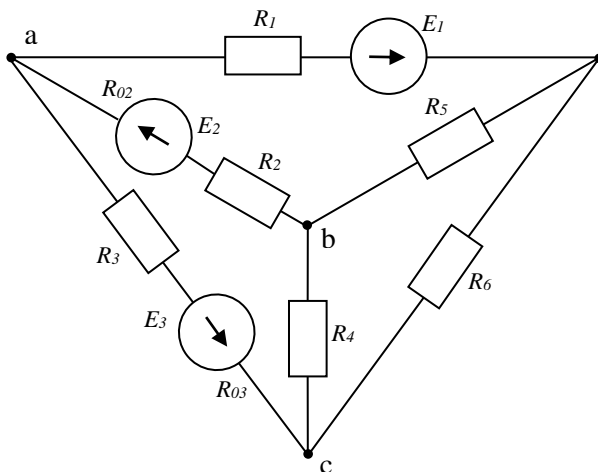


Рис. 24. Схема цепи постоянного тока

Необходимо рассчитать токи, протекающие по ветвям цепи, тремя способами: с использованием законов Кирхгофа, методов узловых потенциалов, методом контурных токов, а также составить уравнение баланса мощностей.

Заданные номиналы:  $E_1=12$  В,  $E_2=48$  В,  $E_3=6$  В,  $R_{02}=0.4$  Ом,  $R_{03}=0.4$  Ом,  $R_1=2,5$  Ом,  $R_2=1$  Ом,  $R_3=4$  Ом,  $R_4=15$  Ом,  $R_5=2$  Ом,  $R_6=2$  Ом.

#### *Расчет токов в цепи с применением законов Кирхгофа*

Использование законов Кирхгофа предполагает составлением системы уравнений:  $U-1=3$  уравнения по I закону и  $B-U+1=6-4+1=3$  уравнения по II закону Кирхгофа. Обозначим



наименования и направления токов в ветвях, а также названия узлов и положительные направления обхода контуров для составления уравнений (см. рис. 25).

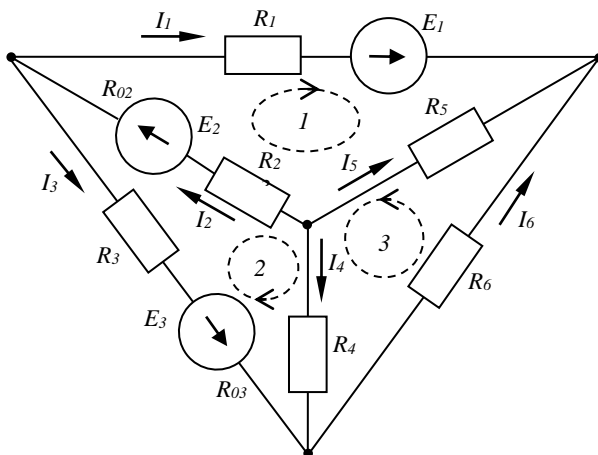


Рис. 25 Иллюстрация к расчету цепи с использованием законов Кирхгофа

Тогда система уравнений для узлов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  (рис. 24) и контуров 1, 2, 3 будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} I_2 = I_1 + I_3, \\ I_5 = I_2 + I_4, \\ I_3 + I_4 = I_6, \\ I_1 R_1 + I_5 R_5 + I_2 (R_2 + R_{02}) = E_1 + E_2, \\ I_4 R_4 - I_3 (R_3 + R_{03}) - I_2 (R_2 + R_{02}) = -E_3 - E_2, \\ I_4 R_4 + I_6 R_6 + I_5 R_5 = 0. \end{cases}$$

Подставляя значения  $E_1 - E_3$  и  $R_{02}$ ,  $R_{03}$ ,  $R_1 - R_6$ , находим величины искомых токов:

$$I_1 = 8.947 \text{ A}, I_2 = 12 \text{ A}, I_3 = 3.053 \text{ A}, I_4 = -1.585 \text{ A}, I_5 = 10.416 \text{ A}, I_6 = 1.468 \text{ A}.$$

*Расчет токов в цепи методом узловых потенциалов*

Согласно методу узловых потенциалов выбираем базовый узел, потенциал которого принимаем равным нулю  $\varphi_0=0$  В. Нумеруем остальные узлы:  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  (см. рис. 26).

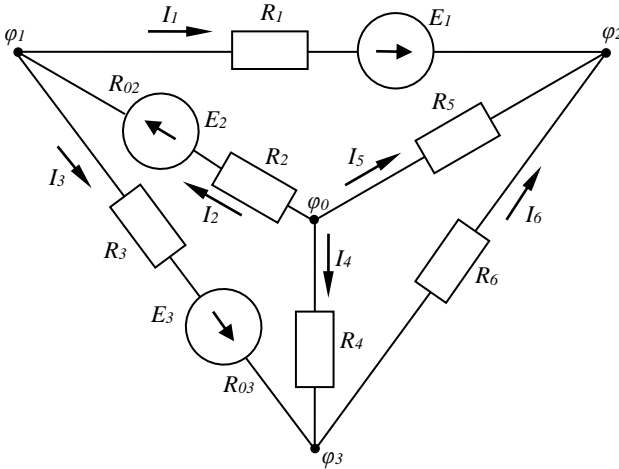


Рис. 26. Иллюстрация к расчету цепи методом узловых потенциалов

Составляем уравнения для каждого из пронумерованных узлов, получаем систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + R_{02}} + \frac{1}{R_3 + R_{03}} \right) - \varphi_2 \frac{1}{R_1} - \varphi_3 \frac{1}{R_3 + R_{03}} = \\ = E_2 \frac{1}{R_2 + R_{02}} - E_1 \frac{1}{R_1} - E_3 \frac{1}{R_3 + R_{03}}, \\ \varphi_2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} \right) - \varphi_1 \frac{1}{R_1} - \varphi_3 \frac{1}{R_6} = E_1 \frac{1}{R_1}, \\ \varphi_3 \left( \frac{1}{R_3 + R_{03}} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6} \right) - \varphi_1 \frac{1}{R_3 + R_{03}} - \varphi_2 \frac{1}{R_6} = E_3 \frac{1}{R_3 + R_{03}}. \end{array} \right.$$

Решая полученную систему уравнений, рассчитываем значения потенциалов узлов цепи:  $\varphi_1=31,2$  В,  $\varphi_2=20,831$  В,  $\varphi_3=23,768$  В.

Зная величины потенциалов трех узлов и  $\varphi_0=0$  В, составим уравнения для токов ветвей, пользуясь законом Ома:

$$I_1 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + E_1}{R_1} = 8.947 \text{ A}, \quad I_2 = \frac{\varphi_0 - \varphi_1 + E_2}{R_2 + R_{02}} = 12 \text{ A},$$

$$I_3 = \frac{\varphi_1 - \varphi_3 + E_3}{R_3 + R_{03}} = 3.053 \text{ A}, \quad I_4 = \frac{\varphi_0 - \varphi_3}{R_4} = -1.585 \text{ A},$$

$$I_5 = \frac{\varphi_2 - \varphi_0}{R_5} = 10.416 \text{ A}, \quad I_6 = \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{R_6} = 1.468 \text{ A}.$$

*Расчет токов в цепи методом контурных токов*

По методу контурных токов необходимо составить уравнения для  $K=B-V+1=6-4-1=3$  независимых контуров, обозначим наименование и положительное направление протекающих в них контурных токов:  $I_{11}$ ,  $I_{22}$ ,  $I_{33}$  (см. рис. 27). Составляем уравнение для каждого из обозначенных контурных токов и получаем систему:

$$\begin{cases} I_{11} (R_1 + R_5 + R_2 + R_{02}) - I_{22} (R_2 + R_{02}) + I_{33} R_5 = E_1 + E_2, \\ I_{22} (R_4 + R_3 + R_{03} + R_2 + R_{02}) - I_{11} (R_2 + R_{02}) + I_{33} R_4 = -E_2 - E_3, \\ I_{33} (R_4 + R_5 + R_6) + I_{11} R_5 + I_{22} R_4 = 0. \end{cases}$$

Решим систему уравнений и получим значения контурных токов:  $I_{11}=8,947$  А,  $I_{22}=-3,053$  А,  $I_{33}=1,468$  А.

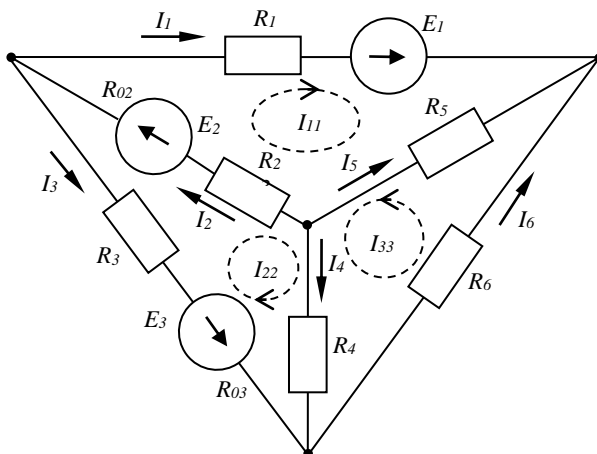


Рис. 27. Иллюстрация к расчету цепи методом контурных токов

Выражения для токов, протекающих по ветвям цепи будут иметь вид:

$$I_1 = I_{11} = 8,947 \text{ A}, \quad I_2 = I_{11} - I_{22} = 12 \text{ A}, \quad I_3 = -I_{22} = 3.053 \text{ A},$$

$$I_4 = I_{22} + I_{33} = -1.585 \text{ A}, \quad I_5 = I_{11} + I_{33} = 10.416 \text{ A}, \quad I_6 = I_{33} = 1.468 \text{ A}.$$

#### *Баланс мощностей*

Составляем уравнение для баланса мощностей, учитывая все источники и приемники энергии.

Суммарная мощность источников энергии рассчитывается как:

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 = 701.693 \text{ Вт}.$$

Суммарная мощность приемников энергии:

$$I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 = 701.693 \text{ Вт}.$$

Значение мощности источников совпадает со значением мощности приемников в цепи, значит условие баланса мощностей соблюдается. Отсюда можно сделать вывод, что расчет токов в цепи произведен верно.

## 20. Задания для самостоятельной подготовки

Рассчитайте приведенные ниже схемы цепей постоянного тока. Необходимо найти токи в ветвях:

- 1) с применением законов Кирхгофа;
- 2) методом контурных токов;
- 3) методом узловых потенциалов.

После расчета схемы указанными методами составить уравнение согласно правилу баланса мощностей.

### Задание № 1

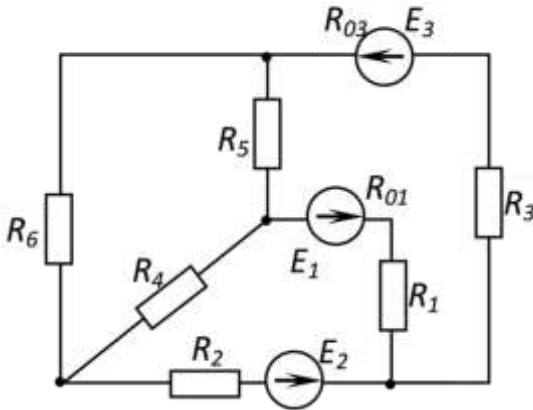


Рис. 28. Схема для задания № 1

Номиналы источников и приемников для схемы задания № 1:

$E_1=12 \text{ В}$	$E_2=30\text{В}$	$E_3=9\text{В}$
$R_{01}=0.5 \text{ Ом}$	$R_{02}=0 \text{ Ом}$	$R_{03}=0.5 \text{ Ом}$
$R_1=3.5 \text{ Ом}$	$R_2=2\text{Ом}$	$R_3=3\text{Ом}$
$R_4=3 \text{ Ом}$	$R_5=1 \text{ Ом}$	$R_6=3 \text{ Ом}$

## Задание № 2

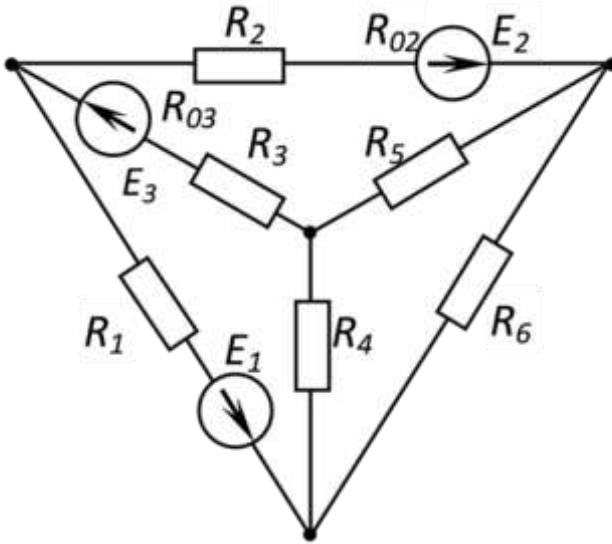


Рис. 29. Схема для задания № 2

Номиналы источников и приемников для схемы задания № 2:

$E_1=12\text{ В}$	$E_2=48\text{В}$	$E_3=6\text{В}$
$R_{01}=0\text{ Ом}$	$R_{02}=0.4\text{ Ом}$	$R_{03}=0.4\text{ Ом}$
$R_1=2.5\text{ Ом}$	$R_2=1\text{ Ом}$	$R_3=4\text{ Ом}$
$R_4=15\text{ Ом}$	$R_5=2\text{ Ом}$	$R_6=2\text{ Ом}$

### Задание № 3

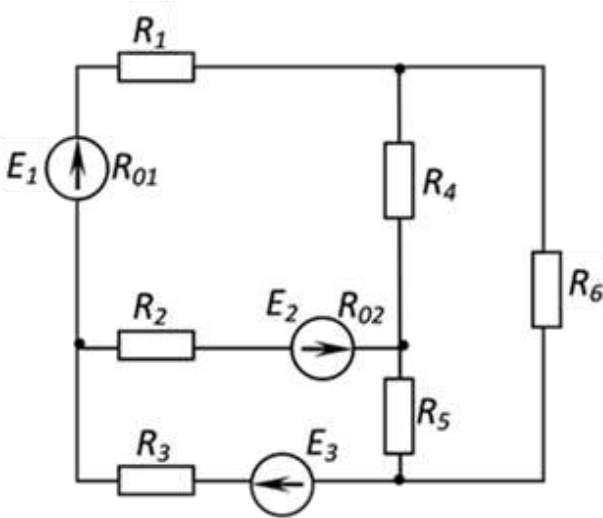


Рис. 30. Схема для задания № 3

Номиналы источников и приемников для схемы задания № 3:

$E_1=72 \text{ В}$	$E_2=12\text{В}$	$E_3=4\text{В}$
$R_{01}=0.7 \text{ Ом}$	$R_{02}=1.5 \text{ Ом}$	$R_{03}=0 \text{ Ом}$
$R_1=6 \text{ Ом}$	$R_2=1 \text{ Ом}$	$R_3=10 \text{ Ом}$
$R_4=4 \text{ Ом}$	$R_5=12 \text{ Ом}$	$R_6=4 \text{ Ом}$

### Задание № 4

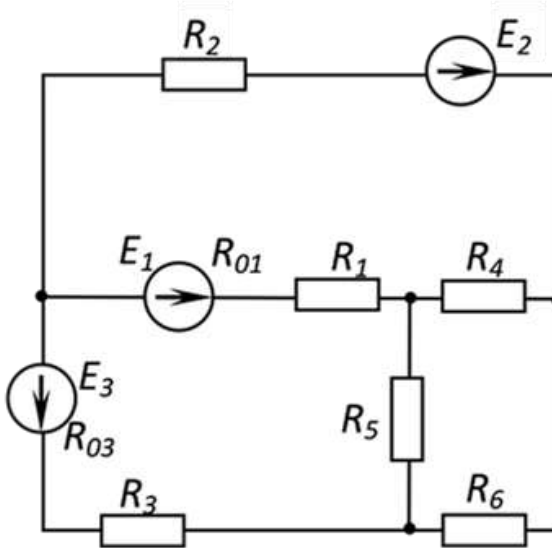


Рис. 31. Схема для задания № 4

Номиналы источников и приемников для схемы задания № 4:

$E_1=8\text{В}$	$E_2=6\text{В}$	$E_3=36\text{В}$
$R_{01}=1.3\ \text{Ом}$	$R_{02}=0\ \text{Ом}$	$R_{03}=1.2\ \text{Ом}$
$R_1=3\ \text{Ом}$	$R_2=2\ \text{Ом}$	$R_3=1\ \text{Ом}$
$R_4=6\ \text{Ом}$	$R_5=8\ \text{Ом}$	$R_6=6\ \text{Ом}$



### Задание № 5

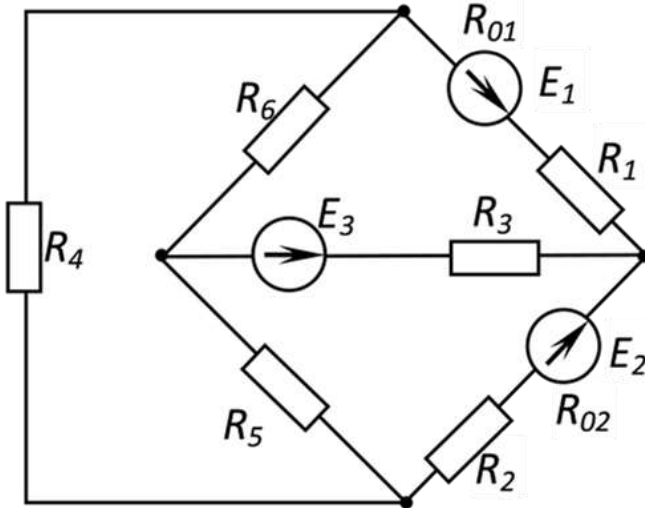


Рис. 32. Схема для задания № 5

Номиналы источников и приемников для схемы задания № 5:

$E_1=12\text{В}$	$E_2=6\text{В}$	$E_3=40\text{В}$
$R_{01}=1.2\ \text{Ом}$	$R_{02}=0.6\ \text{Ом}$	$R_{03}=0\ \text{Ом}$
$R_1=2\ \text{Ом}$	$R_2=3\ \text{Ом}$	$R_3=8\ \text{Ом}$
$R_4=5\ \text{Ом}$	$R_5=7\ \text{Ом}$	$R_6=8\ \text{Ом}$

### Задание № 6

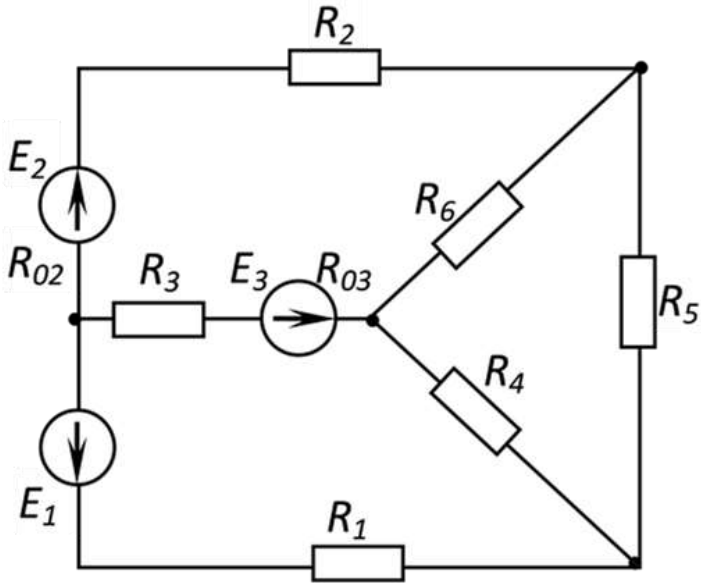


Рис. 33. Схема для задания № 6

Номиналы источников и приемников для схемы задания № 6:

$E_1=12\text{В}$	$E_2=36\text{В}$	$E_3=12\text{В}$
$R_{01}=0\text{ Ом}$	$R_{02}=0.4\text{ Ом}$	$R_{03}=1.2\text{ Ом}$
$R_1=3.5\text{ Ом}$	$R_2=5\text{ Ом}$	$R_3=1\text{ Ом}$
$R_4=5\text{ Ом}$	$R_5=6\text{ Ом}$	$R_6=9\text{ Ом}$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материалы данного учебного пособия предназначены для того, чтобы дать обучающимся неэлектрических специальностей и направлений подготовки возможность дополнительного самостоятельного изучения материала для получения навыков практического применения основных законов общей электротехники.

В пособии дано теоретическое описание методов расчета цепей постоянного тока, приведены примеры проведения подобных расчетов указанными методами. А также даны материалы, с использованием которых студенты могут проводить самостоятельные расчеты.

Умение рассчитывать цепи постоянного тока, то есть находить значения токов, напряжений, мощностей на участках цепи, является навыком, необходимым при проектировании и использовании электрооборудования различного назначения, в частности для выбора допустимых режимов его работы и условий безопасной эксплуатации.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник / Л.А. Бессонов. – 11-е изд., перераб. и доп. – М.: Гардарики, 2006. – 701 с.
2. Усольцев, А.А. Общая электротехника: учеб. пособие / А.А. Усольцев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 301 с.
3. Касаткин, А.С. Электротехника / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – М.: Вышш. шк., 2005. – 542 с.
4. Борминский, С. А. Электротехника и электроника [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / С. А. Борминский. – Самара: Минобрнауки России, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (Национальный исследовательский университет). – Электронные текстовые и графические данные (3,5 Мбайт), 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Учебное издание

*Паршина Александра Валерьевна,  
Живоносновская Дарья Михайловна*

## **РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

*Учебное пособие*

Редактор И.П. Ведмидская  
Компьютерная вёрстка И.П. Ведмидской

Подписано в печать 01.06.2020. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 4,25.

Тираж 25 экз. Заказ . Арт. - 38/2020.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»  
443086 САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

---

Изд-во Самарского университета.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.