

Московский государственный строительный
университет

Кафедра электротехники и электропривода

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

**Часть 1. Электрические и магнитные цепи.
Электрические измерения**









Лекция 1. Электрические цепи постоянного тока

Электронные лекции

⋮



Оглавление

-  Лекция 1. Электрические цепи постоянного тока
-  Лекция 2. Отдельные электроприемники в однофазной цепи переменного тока
-  Лекция 3. Однофазная цепь с последовательным соединением электроприемников
-  Лекция 4. Однофазная цепь с параллельным соединением электроприемников
-  Лекция 5. Трехфазные цепи при соединении нагрузки звездой
-  Лекция 6. Трехфазные цепи при соединении нагрузки треугольником
-  Лекция 7. Электромагнетизм и магнитные цепи
-  Лекция 8. Электрические измерения

Электрические цепи постоянного тока



Общие сведения об электрических цепях и их элементах

Электрическим током в электропроводных материалах называется направленное движение электрических зарядов под действием электрического поля.

Электрическая цепь представляет собой совокупность устройств – *источников* и *электроприемников*, соединенных электрическими проводами в *замкнутую цепь* и обеспечивающих генерирование, передачу и использование (преобразование) электрической энергии.

По виду тока цепи разделяются на цепи постоянного тока, изменяющегося во времени тока и переменного тока.

Постоянный ток – это ток, не изменяющийся по величине в достаточно большом промежутке времени.

Под переменным током в электротехнике понимают периодический во времени ток, изменяющийся в пределах каждого периода по синусоидальному закону.

Электрические цепи постоянного тока



Общие сведения об электрических цепях и их элементах

В источниках (генераторах) различные виды энергии преобразуются в электрическую энергию. Например, электромашинные генераторы преобразуют механическую энергию, поступающую от первичного двигателя (турбины), в электрическую энергию. Гальванические элементы (электрические батареи) и аккумуляторы преобразуют химическую энергию в электрическую, термогенераторы (термопары) тепловую энергию – в электрическую, фотоэлементы (солнечные батареи) энергию излучения – в электрическую и др. Источники электроэнергии являются **активными элементами** электрической цепи.

Электроприемники (нагрузка), наоборот, преобразуют электрическую энергию в другие виды энергии, а именно: электродвигатели – в механическую, лампы накаливания и газоразрядные – в световую, аккумуляторы – в химическую, электронагреватели – в тепловую и др. Приемники электроэнергии являются **пассивными элементами** электрической цепи.

Ниже. представлена схема-диаграмма прямого и обратного преобразования электроэнергии в различные виды энергии и различные устройства – преобразователи, связанные с преобразованием энергии.

Электрические цепи постоянного тока



Общие сведения об электрических цепях и их элементах

Преобразование энергии в источниках и приемниках



Электрические цепи постоянного тока



Общие сведения об электрических цепях и их элементах

К основным элементами цепи относятся источники, электроприемники и соединительные провода, образующие замкнутую цепь.

Реальные электрические цепи содержат различные *вспомогательные элементы*:

- *коммутационную аппаратуру*, служащую для включения и отключения отдельных участков цепи;
- *электроизмерительные приборы* – для контроля различных параметров в цепи;
- *защитные устройства* в виде различных предохранителей, автоматических выключателей и др.

Вспомогательными элементами электрических цепей также являются *преобразующие устройства* в виде трансформаторов, выпрямителей и инверторов, которые позволяют рационально и надежно передавать электроэнергию на дальние расстояния и распределять ее между потребителями.

Электрические цепи постоянного тока

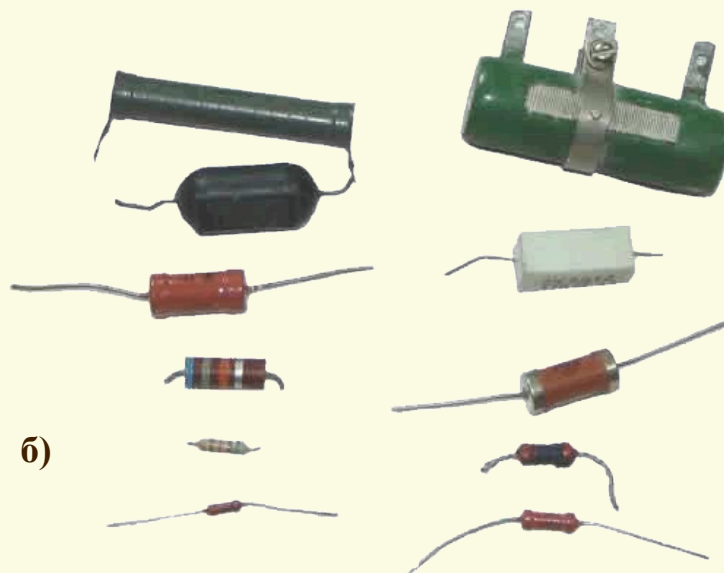


Общие сведения об электрических цепях и их элементах

Свойство элемента электрической цепи – *резистора* поглощать энергию из электрической цепи и однонаправленно и необратимо преобразовывать ее в тепловую энергию характеризует параметр этого элемента – *активное электрическое сопротивление*, или просто – *активное сопротивление*. Активное сопротивление обозначается буквой **R**, и имеет единицу измерения – **Ом**.



а)



б)

Рис.2. Условное обозначение (а) и образцы (б) различных резисторов

Электрические цепи постоянного тока



Схемы электрических цепей постоянного тока

Графическое изображение электрической цепи называется *электрической схемой* (или просто – *схемой*). Электрические цепи принято изображать в виде различного рода *схем*, на которых показывают основные и вспомогательные элементы и их соединения. Чаще всего пользуются тремя видами схем: электромонтажными схемами, принципиальными схемами и идеализированными схемами замещения.

На *электромонтажных схемах* (или просто – *монтажных схемах*) изображают чертежи (эскизы) элементов цепи, соединительные провода и места соединений. В большинстве случаев монтажными схемами пользуются при изготовлении, монтаже и ремонте электрических устройств и цепей.

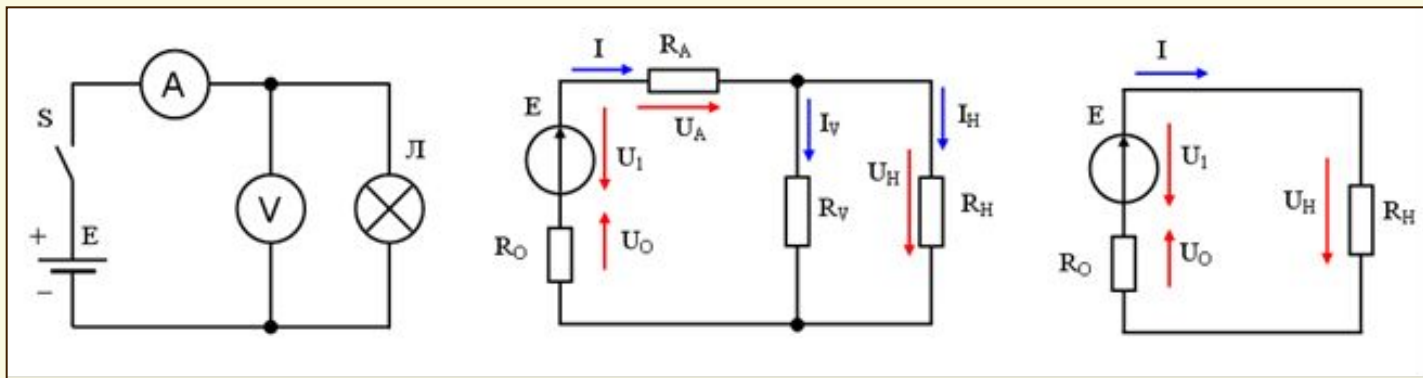
На *принципиальных схемах* (см. рис. 3а) показывают условные графические изображения основных и вспомогательных элементов (выключатели, устройства коммутации, электроизмерительные приборы и др.), а также схему их соединения, дающую представление о принципах работы цепи, и установки при измерении, наладке и ремонте электрических цепей и электротехнических устройств.

Электрические цепи постоянного тока



Схемы электрических цепей постоянного тока

Электрическая схема замещения – это расчетная модель, предназначенная для исследования реальных электрических цепей и устройств. Ниже на рисунке приведен пример выполнения различных схем простейшей электрической цепи. На схемах замещения реальные элементы цепи замещаются эквивалентными расчетными моделями (идеализированными элементами) и из схемы исключаются все вспомогательные элементы, мало влияющие на результаты расчета.



а)

б)

в)

Рис. 3. Простейшая цепь постоянного тока
а – принципиальная схема; б – схема замещения;
в – упрощенная одноконтурная схема замещения

Электрические цепи постоянного тока



Схемы электрических цепей постоянного тока

При анализе сложных электрических цепей пользуются следующими геометрическими (топологическими) понятиями: ветвь, узел и контур.

Ветвь – это участок электрической цепи с последовательно соединенными элементами, через которые протекает один и тот же ток. Ветвь называется **активной**, если она содержит источник электроэнергии, и **пассивной** – если не содержит источника электроэнергии (рис. 4).

Узел электрической цепи – место соединения трех и более ветвей. Узел электрической цепи на схеме отмечается жирной точкой. Если на схеме место пересечения ветвей точкой не отмечено, это означает, что электрического соединения ветвей в этом месте нет.

Контур – любой замкнутый путь обхода вдоль ветвей электрической цепи, начинающийся и заканчивающийся в одной и той же точке.

Независимый контур – замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям и включающий одну новую ветвь при каждом обходе контура. За положительное направление обхода в контуре условно принят обход по часовой стрелке. Контуры обозначаются буквами K_1, K_2, \dots внутри незамкнутых кольцевых стрелок (см. рис. 4).

Электрические цепи постоянного тока



Схемы электрических цепей постоянного тока

Простейшая электрическая цепь, когда во всех элементах замкнутой цепи проходит один и тот же ток, называется **одноконтурной** (см. рис. 5). Схема электрической цепи, содержащей параллельное или смешанное соединение ветвей, называется **разветвленной** или **многоконтурной** (см. рис. ниже). Электрические цепи могут питаться от одного источника энергии или от нескольких.

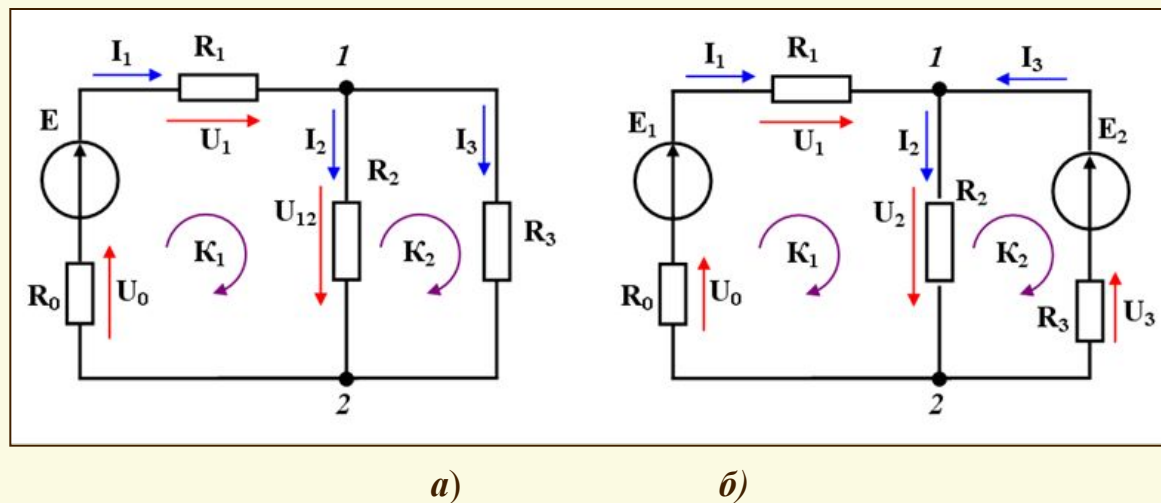


Рис. 4. Схемы замещения разветвленной цепи постоянного тока
а) – с одним источником питания; б) – с двумя источниками питания

Электрические цепи постоянного тока



Закон Ома

Закон Ома для участка цепи

Напряжение U (падение напряжения), ток I и сопротивление R участка цепи связаны соотношением, которое называется *законом Ома для участка цепи*:

Ток на участке электрической цепи прямо пропорционален напряжению и обратно пропорционален сопротивлению этого участка:

$$I = \frac{U}{R} .$$

Из этой формулы следуют две другие формулы для расчета напряжения U и сопротивления R участка цепи:

$$U = IR ; \quad R = \frac{U}{I} .$$

Обобщенный закон Ома для участка цепи (ветви lq , содержащей n источников ЭДС E_j и m сопротивлений R_f):

$$I = \frac{U_{lq} + \sum_{j=1}^n E_j}{\sum_{f=1}^m R_f}$$

Электрические цепи постоянного тока



Закон Ома

Обобщенный закон Ома для неразветвленной цепи (содержащей n ЭДС E_j и m сопротивлений R_f):

$$I = \frac{\sum_{j=1}^n E_j}{\sum_{f=1}^m R_f}.$$

Закон Ома для одноконтурной цепи (содержащей одну ЭДС E с внутренним сопротивлением R_0 , сопротивление двухпроводной линии $R_{л}$ и сопротивление нагрузки R):

$$I = \frac{E}{R_{л} + R + R_0}.$$

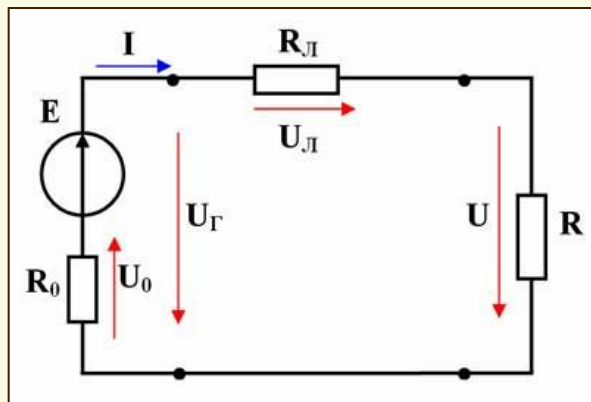


Рис.5. Схема замещения одноконтурной цепи (двухпроводная линия электропередачи)

Электрические цепи постоянного тока



Электрическое сопротивление проводника

Расчет сопротивления проводника

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S},$$

где l – длина проводника (м); S – поперечное сечение проводника (мм^2),

ρ – *удельное сопротивление* материала проводника ($\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$).

Удельные сопротивления электропроводных материалов (приблизительно):

медного провода: $\rho_{\text{М}} \approx 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$; алюминиевого провода: $\rho_{\text{АЛ}} \approx 0,028 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

Электрическая проводимость G – величина обратная сопротивлению R :

$$G = \frac{1}{R}.$$

Единица измерения электрической проводимости – *сименс* (См).

Удельная электрическая проводимость γ :

$$\gamma = \frac{1}{\rho}, \frac{\text{М}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}.$$

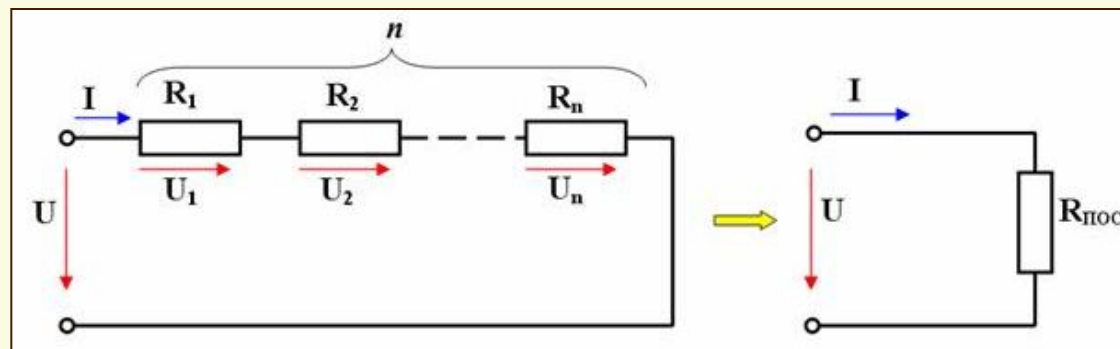
Электрические цепи постоянного тока

Последовательное, параллельное и смешанное соединение сопротивлений



Последовательное соединение сопротивлений

Последовательное соединение n резисторов, каждый из которых имеет определенное активное сопротивление R_k (где $k = 1, 2, \dots, n$) в схеме замещения можно заменить одним эквивалентным сопротивлением $R_{\text{пос}}$,



Эквивалентное сопротивление $R_{\text{пос}}$ последовательной цепи из n активных сопротивлений R_k равно арифметической сумме этих сопротивлений:

$$R_{\text{пос}} = \sum_{k=1}^n R_k.$$

В случае равных по величине всех n сопротивлений R_k соединенных последовательно ($R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$): $R_{\text{пос}} = n \cdot R$.

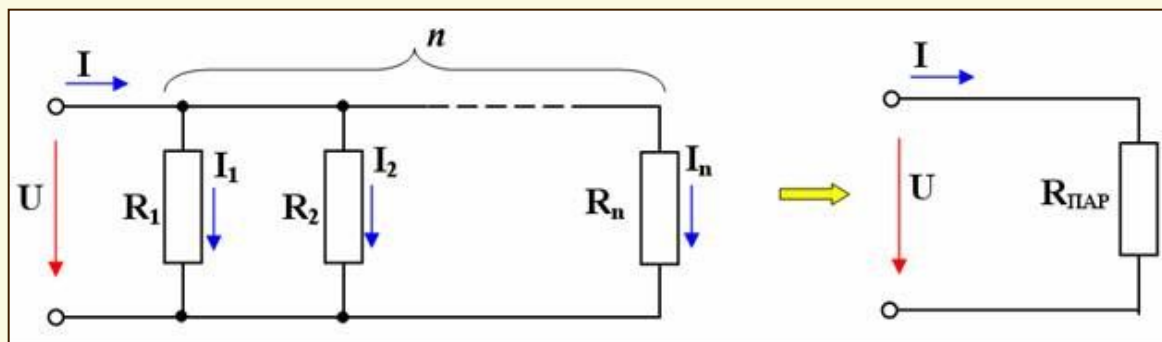
Электрические цепи постоянного тока

Последовательное, параллельное и смешанное соединение сопротивлений



Параллельное соединение сопротивлений

При *параллельном соединении электроприемников* они все находятся под одним и тем же напряжением U :



Эквивалентная замена параллельно соединенных участков цепи с сопротивлениями R_K приводит к сложению их проводимостей G_K и определению эквивалентной суммарной проводимости по формуле:

$$G_{\text{пар}} = \sum_{K=1}^n G_K = \sum_{K=1}^n \frac{1}{R_K}.$$

Эквивалентное сопротивление $R_{\text{пар}}$ группы параллельно соединенных сопротивлений R_i будет обратно эквивалентной проводимости $G_{\text{пар}}$:

Электрические цепи постоянного тока

Последовательное, параллельное и смешанное соединение сопротивлений



$$R_{\text{пар}} = \frac{1}{G_{\text{пар}}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}}.$$

Для случая двух параллельно соединенных сопротивлений R_1 и R_2 эквивалентное сопротивление этой группы R_{12} :

$$R_{12} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

В случае равных по величине всех n сопротивлений R_i соединенных параллельно ($R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$): $G_{\text{пар}} = n/R$; $R_{\text{пар}} = 1/G_{\text{пар}} = R/n$.
То есть эквивалентное сопротивление $R_{\text{пар}}$ для группы из n параллельно соединенных и одинаковых сопротивлений R меньше в n раз каждого из сопротивлений этой группы. При пересоединении группы из n последовательно соединенных и одинаковых сопротивлений R в группу из этих же n сопротивлений, соединенных параллельно, эквивалентное сопротивление уменьшится в квадрате числа n сопротивлений:

$$\frac{R_{\text{пос}}}{R_{\text{пар}}} = \frac{nR}{R/n} = n^2.$$

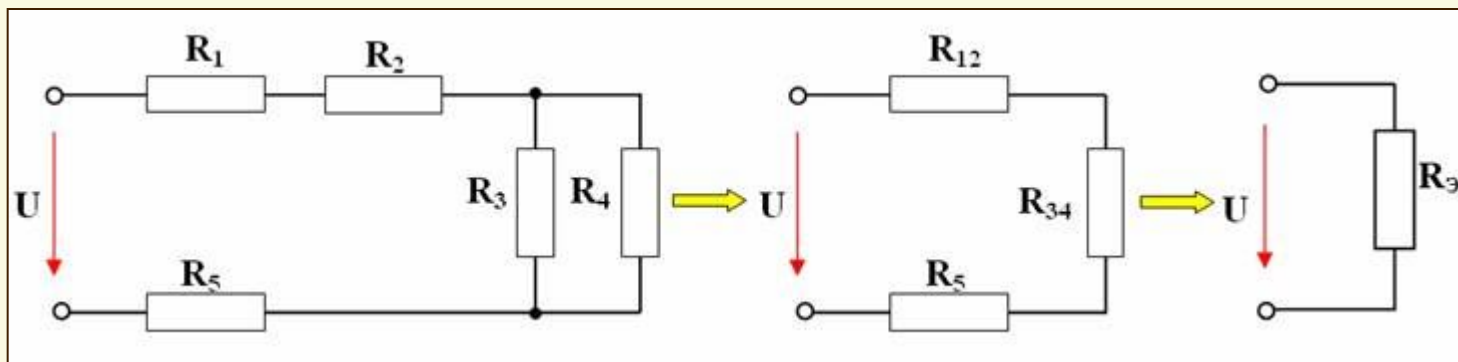
Электрические цепи постоянного тока

Последовательное, параллельное и смешанное соединение сопротивлений



Смешанное соединение сопротивлений

Для расчета разветвленных электрических цепях со *смешанным соединением электроприемников* вначале следует выделить группы последовательно и параллельно соединенных элементов. Постепенно, шаг за шагом, преобразовывая отдельные группы элементов на эквивалентные, можно представить все элементы одним эквивалентным сопротивлением.



Пример

В качестве примера, вначале преобразуем исходную схему замещения (левый рисунок), найдя эквивалентные сопротивления R_{12} и R_{34} , соответственно, для группы последовательно соединенных сопротивлений R_1 и R_2 и параллельно соединенных R_3 и R_4 :

Электрические цепи постоянного тока

Последовательное, параллельное и смешанное соединение сопротивлений



$$R_{12} = R_1 + R_2;$$

$$R_{34} = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}$$

Промежуточная схема замещения в этом случае примет вид трех последовательно соединенных сопротивлений R_{12} , R_{34} и R_5 .
(*средний рисунок*).

Далее, суммируя эти сопротивления, найдем общее эквивалентное сопротивление $R_э$ (*правый рисунок*):

$$R_э = R_{12} + R_{34} + R_5 = R_1 + R_2 + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} + R_5.$$

Электрические цепи постоянного тока



Электрическая энергия и мощность

Определение электроэнергии и электрической мощности

Электрическая энергия W эквивалентна работе A , совершаемой электрическим полем при перемещении электрического заряда Q между концами участка электрической цепи с разностью потенциалов $U = \varphi_1 - \varphi_2$ и равна произведению величины этого заряда на напряжение между концами участка: $W = A = QU$.

В цепи постоянного тока величина заряда Q определяется силой тока I , прошедшего по участку цепи за время t : $Q = I t$.

Поэтому электроэнергия равна: $W = A = U I t$.

Для оценки энергетических характеристик электрических систем важно знать, с какой скоростью энергия вырабатывается в источниках электроэнергии (генераторах) и потребляется в электроприемниках (нагрузке). Для этого служит мера интенсивности выработки, потребления или передачи электроэнергии, которая называется *электрической мощностью* P и в цепях постоянного тока определяется как

$$P = \frac{W}{t} = UI.$$

Электрические цепи постоянного тока



Электрическая энергия и мощность

Таким образом, электроэнергия определяется произведением мощности на время, в течение которого эта мощность расходуется: $W = P \cdot t$.

Единицы измерения электроэнергии и мощности

Основная единица работы в системе СИ – *джоуль (Дж)*. Единица электрической мощности – *ватт (Вт)*. В тысячу раз большая единица мощности – *киловатт (кВт)*, в миллион раз большая – *мегаватт (МВт)*. Практической единицей измерения *электрической энергии* служит *киловатт-час (кВт·час)*, т. е. работа, совершаемая при неизменной мощности 1 кВт в течение 1 часа.

Так как $1 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 1 \text{ Дж}$, то $1 \text{ кВт} \cdot \text{час} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 3600000 \text{ Дж}$.

Воспользовавшись формулами из закона Ома, активную мощность для резистивных элементов можно определить в виде:

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad \text{или} \quad P = I^2 R.$$

Видно, что активная мощность P , выделяемая в нагрузке, прямо пропорциональна квадрату напряжения приложенного к нагрузке. Например, при увеличении напряжения на 10% мощность в нагрузке возрастает в $1,1^2 = 1,21$, то есть более чем на 20%.

Электрические цепи постоянного тока



Электрическая энергия и мощность

Также видно, что активная мощность обратно пропорциональна величине активного сопротивления нагрузки. Поэтому чем мощнее нагрузка, тем меньше ее активное сопротивление.

Активная мощность, вырабатываемая источником ЭДС, определяется формулой: $P_{\text{ист}} = E \cdot I$.

Закон Джоуля-Ленца

Закон Джоуля-Ленца определяет тепловое действие тока на проводник:

Количество тепла, выделенного током в проводнике пропорционально сопротивлению проводника, квадрату силы тока и времени его прохождения: $W = I^2 R t = U I t$.

Баланс мощностей

Из закона сохранения энергии следует, что в замкнутой электрической цепи соблюдается *энергетический баланс – баланс мощностей*:

Алгебраическая сумма мощностей всех источников электроэнергии равна арифметической сумме мощностей, потребляемых в приемниках энергии

$$\sum_{k=1}^m P_{\text{ист}} = \sum_{k=1}^m E_k I_k = \sum_{k=1}^n R_k I_k^2.$$

Электрические цепи постоянного тока



Первый и второй законы Кирхгофа

Первый закон Кирхгофа

Первый закон Кирхгофа устанавливает соотношения токов в ветвях, соединенных электрическим узлом. *Согласно первому закону Кирхгофа: Алгебраическая сумма токов в ветвях цепи, соединенным электрическим узлом, равна нулю:*

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

Токи, направленные к узлу условно считаются положительными и записываются со знаком плюс, а со знаком минус – направленные от узла.

Другая формулировка первого закона Кирхгофа:

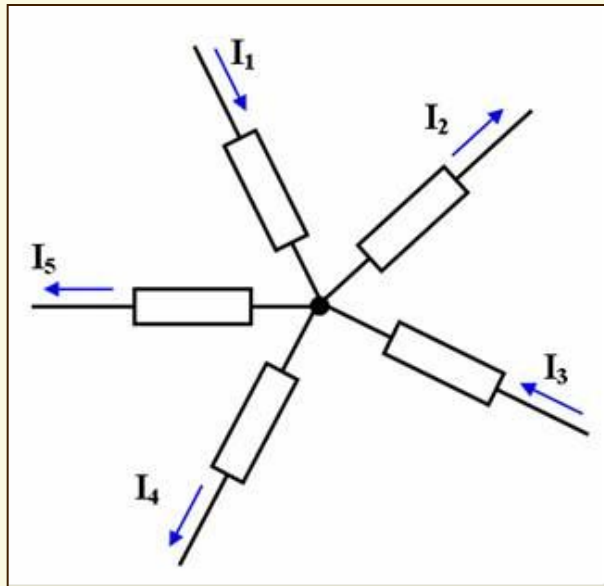
Арифметическая сумма токов в одних ветвях, направленных к узлу электрической цепи, равна арифметической сумме токов, направленных от этого узла по другим ветвям.

Электрические цепи постоянного тока



Первый и второй законы Кирхгофа

Первый закон Кирхгофа



Пример:

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0; \text{ или}$$

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4 + I_5$$

Первый закон Кирхгофа является следствием того, что *электрические заряды, протекающие по токам в ветвях, в узлах электрической цепи не накапливаются.*

Электрические цепи постоянного тока



Первый и второй законы Кирхгофа

Второй закон Кирхгофа

Второй закон Кирхгофа устанавливает соотношение между ЭДС и напряжениями в любом замкнутом контуре электрической цепи. Согласно второму закону Кирхгофа:

Алгебраическая сумма ЭДС в замкнутом контуре электрической цепи равна алгебраической сумме падений напряжений на сопротивлениях, входящих в этот контур:

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m U_k = \sum_{k=1}^m R_k I_k.$$

Здесь E_k , U_k , R_k и I_k – соответственно, k -ые ЭДС, напряжение, сопротивление и ток, входящие в контур электрической цепи.

Электрические цепи постоянного тока



Первый и второй законы Кирхгофа

Для электрических контуров без источников ЭДС, охватывающих только пассивные ветви, формулировка *второго закона Кирхгофа* будет такой: *Алгебраическая сумма напряжений на участках электрической цепи, входящих в замкнутый контур, равна нулю:*

$$\sum_{k=1}^m U_k = \sum_{k=1}^m R_k I_k = 0.$$

Правило знаков при обходе контура

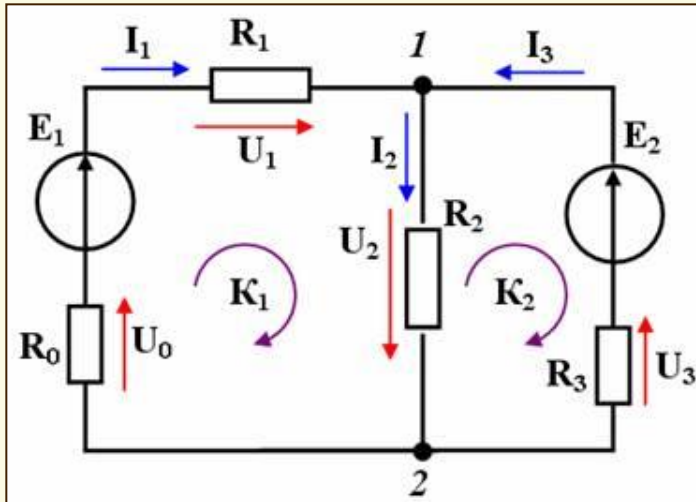
При составлении уравнений слагаемые берут со знаком плюс в случае, когда направления ЭДС, тока или напряжения (обозначенные стрелками на схеме) совпадают с направлением обхода контура. В противном случае эти слагаемые берут со знаком минус.

Электрические цепи постоянного тока



Первый и второй законы Кирхгофа

Пример расчета цепи с использованием законов Кирхгофа



Заданы величины ЭДС E_1 и E_2 , а также сопротивления R_1 , R_2 и R_3 .

Требуется найти токи в ветвях

I_1 , I_2 , I_3 и напряжения U_0 , U_1 , U_2 , U_3

Решение: Составим три линейных уравнения с тремя неизвестными (токи I_1 , I_2 , I_3).

По первому закону Кирхгофа для узла 1 : $I_1 - I_2 + I_3 = 0$.

По второму закону Кирхгофа для контура K_1 (левого):

$$E_1 = U_0 + U_1 + U_2 = I_1 R_0 + I_1 R_1 + I_2 R_2;$$

и для контура K_2 (правого): $-E_2 = -U_2 - U_3 = -I_2 R_2 - I_3 R_3$.

Далее решаем известными методами систему трех линейных уравнений с тремя неизвестными (токи I_1 , I_2 , I_3). По найденным токам и известным сопротивлениям по закону Ома определяем напряжения U_0 , U_1 , U_2 , U_3 .

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Схема простой одноконтурной цепи

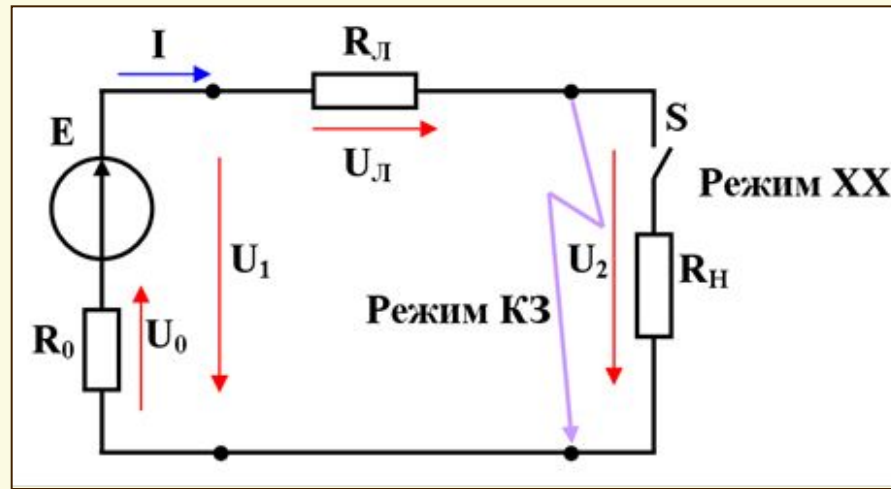


Рис.6. Схема замещения одноконтурной цепи (двухпроводная линия электропередачи)

Расчетные формулы По второму закону Кирхгофа

$$E = U_0 + U_1 = IR_0 + U_1; \quad U_1 = E - U_0 = E - IR_0.$$

Таким образом, напряжение в начале линии электропередачи U_1 меньше ЭДС генератора E на величину потери напряжения в источнике питания U_0 .²⁹

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Расчетные формулы

$$E = U_0 + U_{\text{л}} + U_2 = I(R_0 + R_{\text{л}} + R_{\text{н}});$$

$$U_2 = E - \Delta U = E - I(R_0 + R_{\text{л}}),$$

где

$$\Delta U = U_0 + U_{\text{л}} = I(R_0 + R_{\text{л}}).$$

Видно, что напряжение на нагрузке U_2 всегда меньше ЭДС генератора E на величину суммарной потери напряжения ΔU в источнике питания и линии электропередачи.

По закону Ома ток в одноконтурной цепи $I = \frac{E}{R_0 + R_{\text{л}} + R_{\text{н}}}.$

Напряжение на нагрузке $U_2 = IR_{\text{н}}$. С учетом предыдущей формулы:

$$U_2 = \frac{ER_{\text{н}}}{R_0 + R_{\text{л}} + R_{\text{н}}} \quad \text{или} \quad U_2 = \frac{E}{\frac{R_0 + R_{\text{л}}}{R_{\text{н}}} + 1}.$$

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Анализ вышеприведенных формул показывает, что рост сопротивлений R_0 и R_L вызывает увеличение суммарной потери напряжения ΔU в источнике питания и линии электропередачи и, соответственно, уменьшение напряжения питания нагрузки U_2 .

С увеличением сопротивления нагрузки напряжение питания U_2 увеличивается, изменяясь от 0 до E , при увеличении сопротивления нагрузки от $R_H = 0$ до $R_H = \infty$.

Режим с нулевым значением сопротивления нагрузки ($R_H = 0$) называется *режимом короткого замыкания*, сокращенно – **КЗ**, режим с отключенной нагрузкой, когда до $R_H = \infty$, называется *режимом холостого хода*, сокращенно – **ХХ**.

График зависимости $U_2 = f(R_H)$ от режима **КЗ** до режима **ХХ**, включая номинальный режим (при $R_H = R_{Hном}$) показан на рис. 7.

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

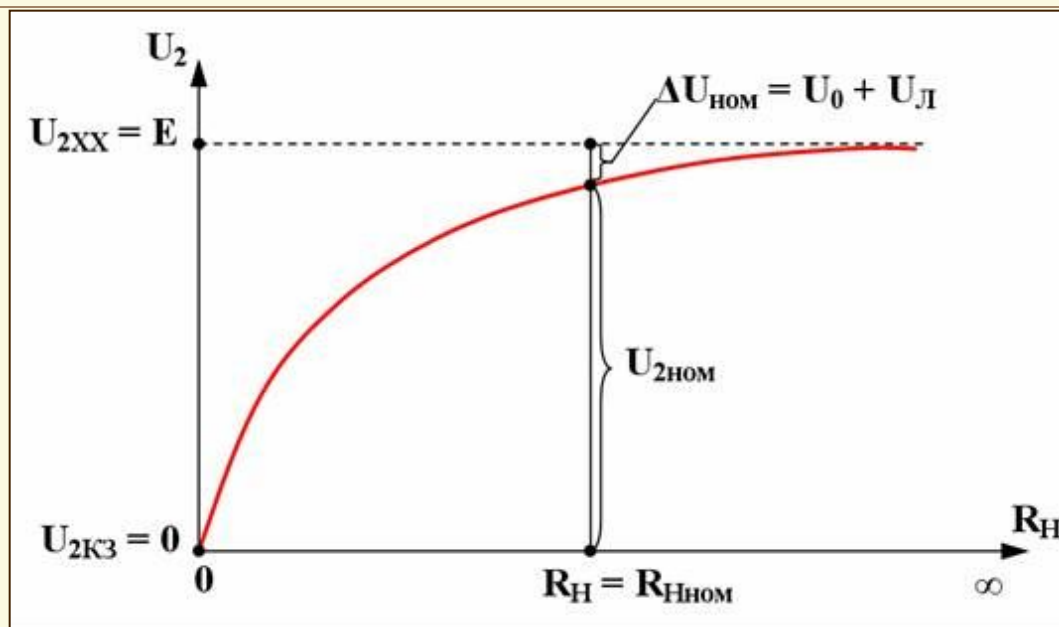


Рис. 7. Зависимость напряжения питания U_2 от сопротивления нагрузки R_H

Из графика видно, что с увеличением сопротивления нагрузки R_H увеличивается доля напряжения U_2 , приходящегося на питание нагрузки с одновременным уменьшением потери напряжения $\Delta U = U_0 + U_L$.

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Номинальный режим работы цепи

При проектировании системы электроснабжения соотношение параметров цепи R_0 , R_L и R_H выбирают таким образом, чтобы в *номинальном режиме*, при номинальной величине сопротивления нагрузки $R_H = R_{Hном}$ потери напряжения $\Delta U_{ном}$ были намного меньше напряжения питания нагрузки $U_{2ном}$. Это объясняется тем, что потери напряжения в линии U_L и источнике питания U_0 напрямую связаны с потерями мощности в этих элементах электрической цепи.

Для уменьшения потерь напряжения нужно, чтобы суммарное сопротивление линии и источника питания было намного меньше сопротивления нагрузки: $R_0 + R_L \ll R_H$. Номинальное напряжение U_H , номинальный ток I_H и номинальная мощность нагрузки P_H связаны соотношением: $P_H = U_H I_H$.

Соблюдение номинальных режимов работы источников и приемников обеспечивает эффективное и экономичное производство и потребление электрической энергии, высокий коэффициент полезного действия и гарантирует заданный срок службы электротехнических устройств.

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Коэффициент полезного действия

Коэффициент полезного действия (КПД) η системы электроснабжения на примере цепи постоянного тока (см. рис. 6), как и любой другой замкнутой энергетической системы, не обязательно электрического характера, определяется как отношение полезной мощности P_2 , выделяемой в нагрузке R_H к мощности P_1 , вырабатываемой в источнике энергии этой системы:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Мощность P_1 , равная мощности $P_{ист}$, вырабатываемой в источнике питания, равна сумме полезной мощности P_2 и мощности потерь ΔP . Поэтому КПД цепи можно определить как:

$$\eta = \frac{P_2}{\Delta P + P_2} = \frac{1}{\frac{\Delta P}{P_2} + 1} < 1.$$

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Коэффициент полезного действия

Мощности в источнике питания и нагрузке соответственно равны:

$$P_1 = P_{\text{ист}} = E \cdot I, \quad P_2 = U_2 \cdot I.$$

Подставляя мощности P_1 и P_2 из этих формул и деля числитель и знаменатель на ток I , получим выражение для КПД в виде отношений напряжений:

$$\eta = \frac{U_2}{E} = \frac{U_2}{U_0 + U_{\text{л}} + U_2} = \frac{U_2}{\Delta U + U_2}.$$

Деля числитель и знаменатель этого выражения на ток I , получим КПД, как отношение сопротивлений элементов цепи:

$$\eta = \frac{R_{\text{н}}}{R_0 + R_{\text{л}} + R_{\text{н}}} = \frac{1}{\frac{R_0 + R_{\text{л}}}{R_{\text{н}}} + 1}.$$

Это выражение показывает, что при увеличении сопротивления нагрузки от нуля до очень большой величины, КПД цепи растет от нуля до величины приближенной к единице (100%).

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Режим холостого хода

Под режимом холостого хода (сокращенно – **ХХ**) *понимается такой режим, при котором через источник или приемник не протекает ток.*

При этом источник не отдает энергию во внешнюю цепь, а приемник не потребляет ее. В частности, отключение нагрузки от источника питания, когда $R_H = \infty$, вызывает *режим холостого хода*. В этом случае:

$$U_2 = U_{XX} = E; \quad I = I_{XX} = 0.$$

Режим короткого замыкания (аварийный режим)

Режим с нулевым значением сопротивления нагрузки ($R_H = 0$) *называется режимом короткого замыкания*, сокращенно – **КЗ**.

Режимом **КЗ** в общем случае может возникнуть при соединении между собой накоротко зажимов источника или иных элементов электрической цепи, между которыми имеется напряжение. Расчет тока при *коротком замыкании нагрузки* ($I_{КЗН}$) для *цепи* рис. 2.6 определяется формулой:

$$I_{КЗН} = \frac{E}{R_{\text{вн}} + R} \gg I_H.$$

Короткое замыкание источника приводит к току **КЗ**: $I_{КЗИ} = \frac{E}{R_0} \gg I_{КЗН} \gg I_H.$

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Режим **КЗ** может быть следствием нарушения изоляции, обрыва проводов, ошибки электромонтажника при сборке электрической цепи и др. При коротком замыкании могут возникнуть недопустимо большие токи $I_{\text{КЗ}}$, электрическая дуга, что может привести к тяжелым последствиям, поэтому режим короткого замыкания является аварийным.

Режим согласованной нагрузки

Согласованный режим работы наступает при условии равенства сопротивления нагрузки $R_{\text{Н}}$ сумме внутреннего сопротивления источника R_0 и сопротивления линии электропередачи $R_{\text{Л}}$: $R_{\text{Н}} = R_0 + R_{\text{Л}}$.

В *согласованном режиме работы* обеспечивается передача максимальной энергии от источника к приемнику и достигается максимальная мощность, выделяемая в нагрузке.

Мощность, выделяемая в нагрузке в согласованном режиме, хотя и будет максимальна, но при этом будет равна только половине мощности вырабатываемой источником: $P_{2\text{max}} = 0,5P_1$ [1] (см. рис. 8).

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Режим согласованной нагрузки

КПД электрической системы в согласованном режиме работы, равен $\eta = 0,5$ (то есть пятьдесят процентов).

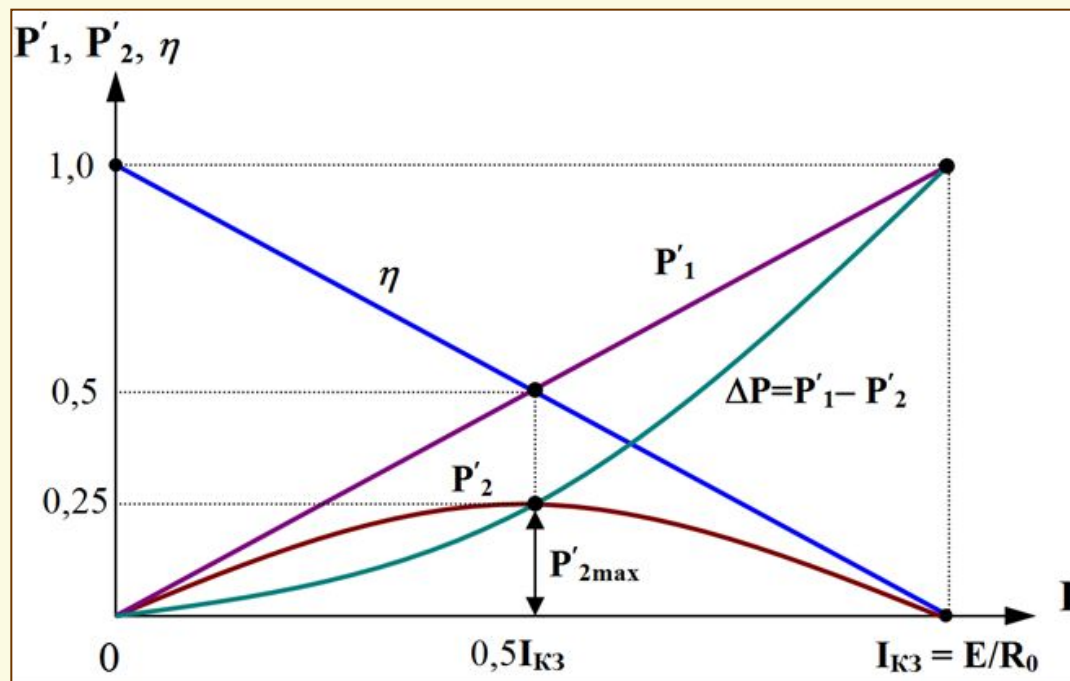


Рис. 8. Зависимости относительных мощностей источника P'_1 , приемника P'_2 и КПД электрической системы η от тока нагрузки I

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Режим согласованной нагрузки

Поэтому *согласованный режим работы* приемлем только для маломощных электрических систем, где можно пренебречь потерями электрической энергии в силу их малости, но совершенно не допустим в силовых (то есть мощных) электротехнических системах, устройствах и установках.

На следующем слайде представлены графики зависимостей относительных мощностей источника P'_1 , приемника P'_2 и КПД электрической системы η от относительного сопротивления R'_H нагрузки:

$$R'_H = \frac{R_H}{R_0 + R_L}$$

Под относительными мощностями P'_1 , P'_2 понимаются мощности источника и приемника при единичной мощности источника в режиме короткого замыкания (при нулевом значении сопротивления нагрузки $R_H = 0$).

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

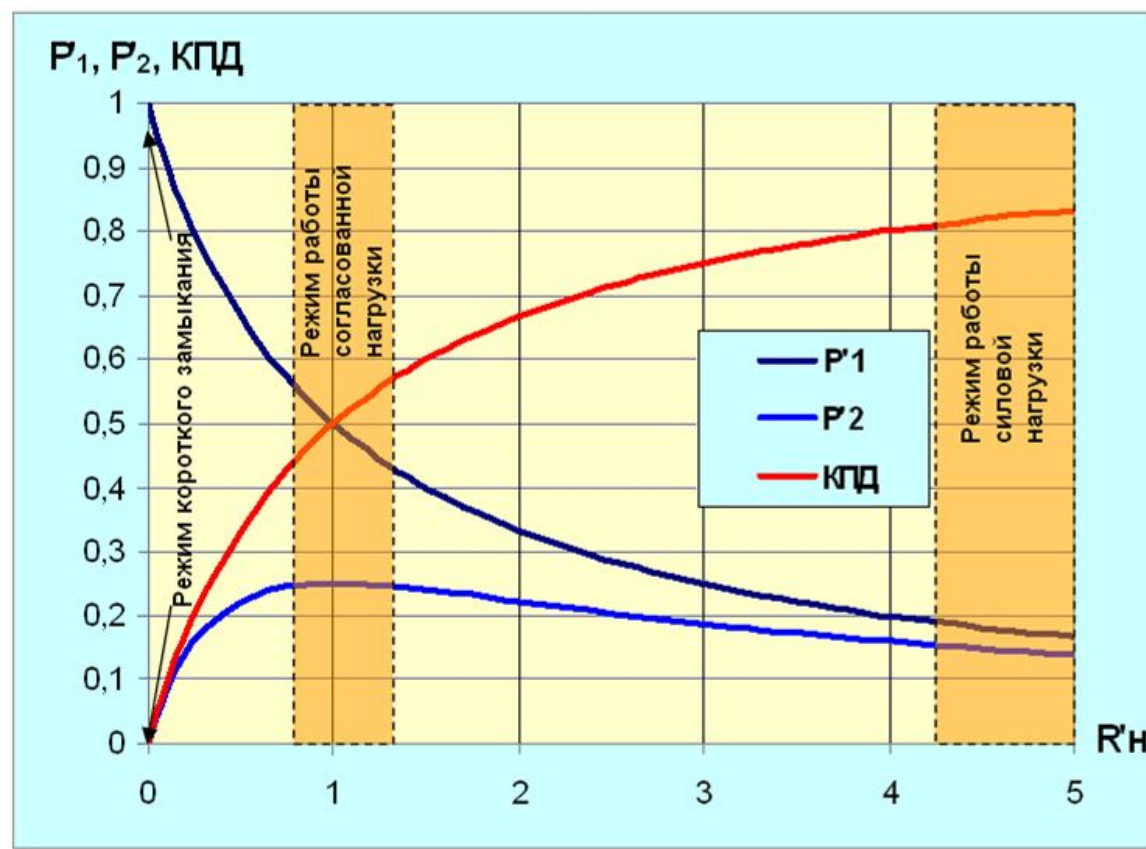


Рис. 9. Зависимости относительных мощностей источника P'_1 , приемника P'_2 и КПД электрической системы η от относительного сопротивления нагрузки R'_H

Электрические цепи постоянного тока



Режимы работы электрической цепи

Режим согласованной нагрузки

Видно, что с увеличением относительного сопротивления нагрузки R'_H мощность P'_1 , выделяемая в источнике питания цепи, падает от максимальной при коротком замыкании ($R'_H = 0$), становясь в два раза больше мощности P'_2 , выделяемой в нагрузке в согласованном режиме.

В режиме работы *силовой нагрузки* (при больших значениях КПД η) мощность источника P'_1 не намного больше мощности нагрузки P'_2 . Из этого графика также видно, что в режиме согласованной нагрузки (при $R'_H = 1$) КПД цепи действительно равен **0,5**, а при увеличении относительного сопротивления нагрузки свыше **4** (в режиме работы силовой нагрузки) КПД цепи превышает **0,8**.

Электрические цепи постоянного тока



Вольт-амперные характеристики

Вольт-амперная характеристика линейного резистора

Вольт-амперными характеристиками (ВАХ) элементов и участков электрических цепей называются зависимости их напряжений от величины проходящего тока $U = f(I)$.

Вольт-амперные характеристики пассивных элементов проходят через начало координат, так как в отсутствии напряжения на элементах ток в них также отсутствует. ВАХ линейного резистивного элемента, определяется формулой: $U = I \cdot R$.

При этом активное сопротивление R принимается неизменным и не зависящим от приложенного напряжения U и проходящего тока I .

Линейное активное сопротивление определяется из закона Ома:

$$R = \frac{U}{I} = \operatorname{tg}\varphi = \text{const.}$$

Меньшему углу наклона ВАХ соответствует резистор с меньшей величиной активного сопротивления R и наоборот (см. рис. 10).

Электрические цепи постоянного тока



Вольт-амперные характеристики

Вольт-амперная характеристика линейного резистора

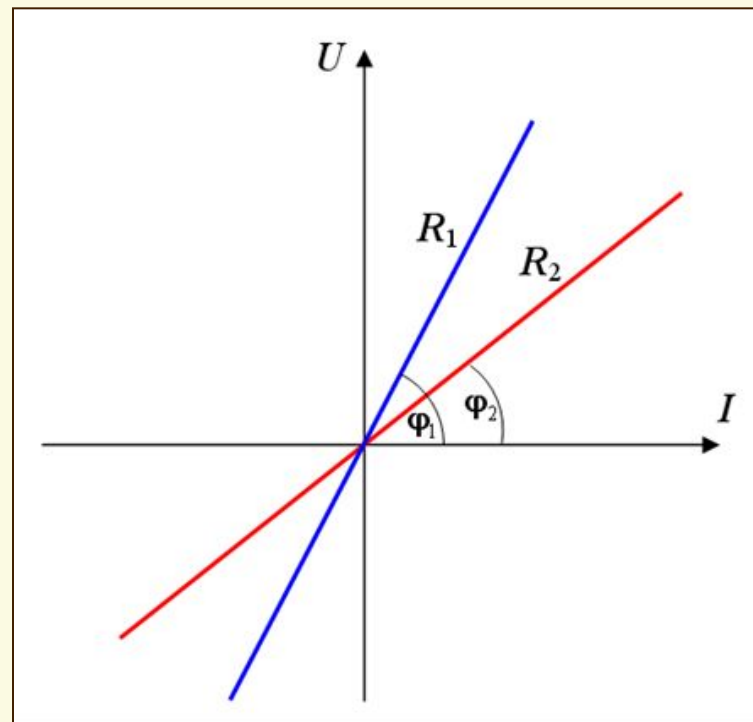


Рис. 10. Вольт-амперные характеристики линейных резисторов ($R_1 > R_2$)

Электрические цепи постоянного тока



Вольт-амперные характеристики

Вольт-амперная характеристика источника ЭДС

(внешняя характеристика)

ВАХ источника ЭДС E с внутренним сопротивлением R_0 , называется *внешней характеристикой*. Внешняя характеристика определяется как зависимость напряжения U_1 на зажимах источника ЭДС от величины протекающего тока I , исходя из второго закона Кирхгофа:

$$U_1 = E - U_0 = E - IR_0.$$

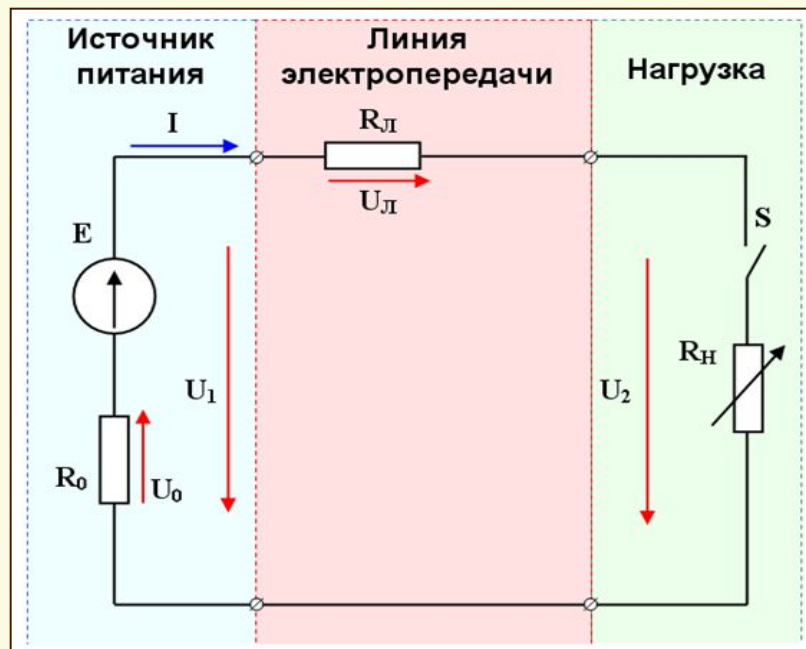


Рис. 11. Схема замещения электрической цепи постоянного тока, состоящей из источника ЭДС и активной нагрузки, соединенных двухпроводной линией электропередачи

Электрические цепи постоянного тока



Вольт-амперные характеристики

Внешняя характеристика

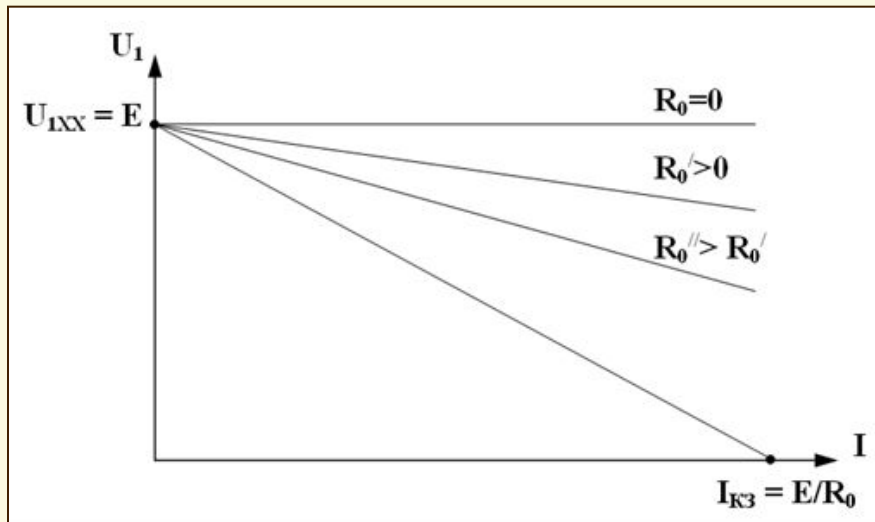


Рис. 12. Внешние характеристики источников ЭДС E с разными внутренними сопротивлениями R_0 .

Видно, что чем меньше внутреннее сопротивление R_0 , тем меньше меняется напряжение питания на зажимах источника от величины тока питания I .

Для идеального источника ЭДС с нулевым внутренним сопротивлением его напряжение равно ЭДС при любом токе в цепи. Для реальных источников ЭДС (с ненулевым внутренним сопротивлением) напряжение на его зажимах U_{1XX} равно величине ЭДС E только в разомкнутой цепи (режим холостого хода). Максимальный ток, вырабатываемый источником ЭДС определяется из режима короткого замыкания, при котором $I_{кз} = E/R_0$.

Электрические цепи постоянного тока



Вольт-амперные характеристики

Вольт-амперная характеристика нелинейного элемента (нелинейная ВАХ)

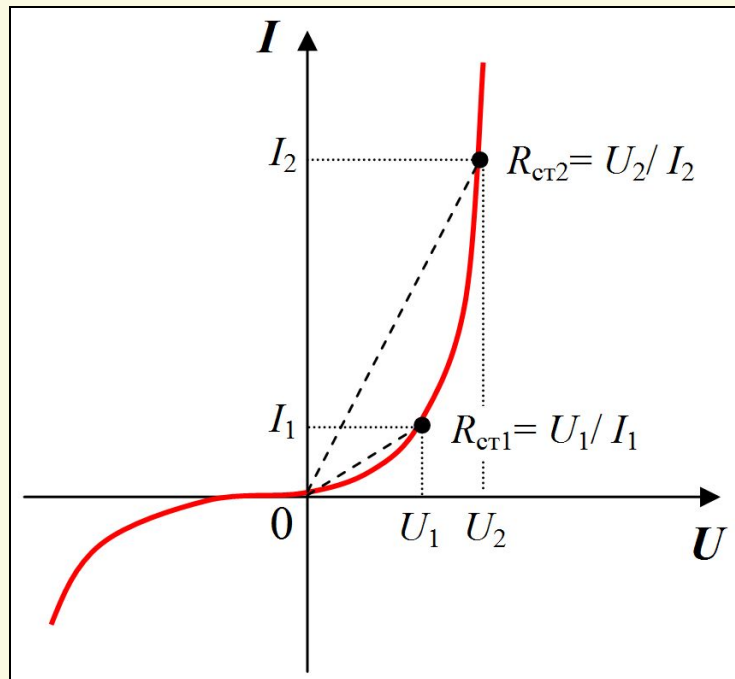


Рис. 13. Нелинейная ВАХ $I(U)$

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{I}} = \mathbf{var.}$$

$$\mathbf{R}_{\text{ст1}} < \mathbf{R}_{\text{ст2}} \cdot$$

Расчет электрических цепей с нелинейными элементами проводится графоаналитическим методом [1].

Примеры нелинейных сопротивлений (элементов):

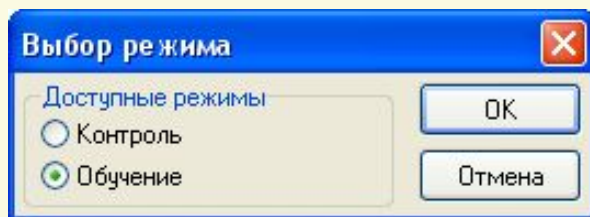
- лампа накаливания $\mathbf{R}_{\text{нагр}} > \mathbf{R}_{\text{хол}}$;
- полупроводниковые приборы: диод, тиристор, транзистор и др.

Электрические цепи постоянного тока



ТЕСТ – Электрические цепи постоянного тока

При нажатии на расположенную внизу кнопку-гиперссылку «ТЕСТ» запускается тестирующая программа и предоставляет пользователю выборку пяти вопросов и задач из общего количества 34 по теме раздела. При этом появляется окно *Выбор режима*.



В этом окне следует отметить пункт *Обучение* и после – нажать кнопку *Ок*, так как тестирование в настоящем пособии проводится только в режиме *Обучение*. При ошибочных ответах пользователя на вопросы теста приводятся подсказки в виде правильных ответов (в режиме контроля подсказки отсутствуют).



Электрические цепи постоянного тока



Литература и электронные средства обучения

Основная литература

1. Касаткин А.С. Электротехника: учеб. для вузов / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 10-е изд. стер. – М.: Изд. Центр «Академия», 2007. – 544с.
2. К.Я. Вильданов, С.Т. Гейдаров, И.Г. Забора и др. Электротехника и электроника. Элементы теории и задания к контрольным работам: Учебно-методическое пособие для студентов строительных специальностей. – М.: МГАКХиС, 2011. – 89 с.

Электронные средства обучения

1. А.С. Касаткин, М.В. Немцов. Электротехника. Электронная версия учебника по электротехнике и электронике, 2009. (формат – веб-страницы).
2. И.Г. Забора. Часть 1. Электрические цепи и измерения. Электронное учебное пособие по лабораторным работам, 2014. (формат – веб-страницы).



ЛЕКЦИЯ ОКОНЧЕНА

Благодарю за внимание!