

Лекция 1

Модуль I.

Электрические цепи

Электрические цепи

постоянного тока

Содержание



1. Основные понятия
2. Основные законы электрических цепей.
3. Характеристики и свойства источника напряжения
4. Основные режимы работы электрических цепей.

1. Основные понятия

Электрическая цепь и её элементы

Электрическая цепь - это совокупность электротехнических устройств, предназначенных для генерирования, передачи и преобразования электрической энергии, соединенные между собой электрическими проводами.

Элементы электрической цепи делятся на 3 группы:

1. Генерирующие устройства (источники электрической энергии)
2. Приемные устройства (приемники электрической энергии)
3. Вспомогательные устройства



Электрическая цепь и её элементы (продолжение)

- Графическое изображение электрической цепи, содержащее условные изображения её элементов и показывающее их соединение, называется **принципиальной схемой** или **схемой электрической цепи**

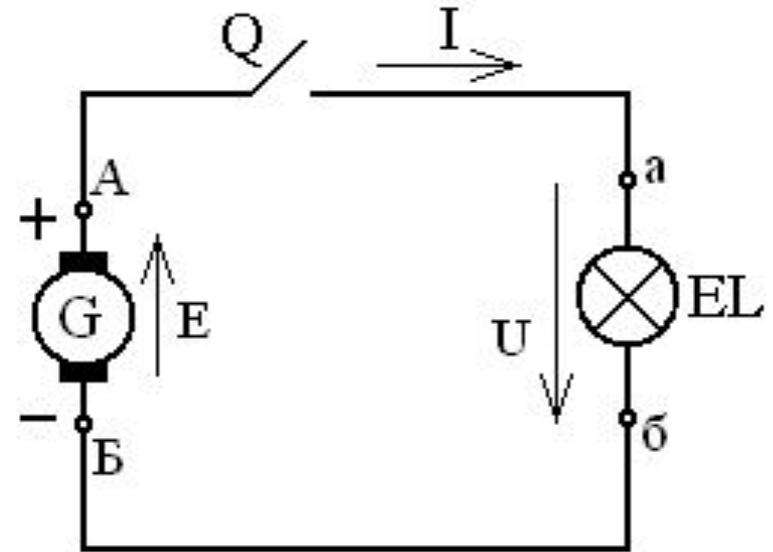


Схема простой электрической цепи

- Цепь содержащая один источник и один приемник электроэнергии называется **простой электрической цепью**.



Электрическая цепь и её элементы (продолжение)

- Электрическая цепь содержащая несколько источников и приемников электрической энергии, соединенных между собой определенным образом называется **сложной электрической цепью**.

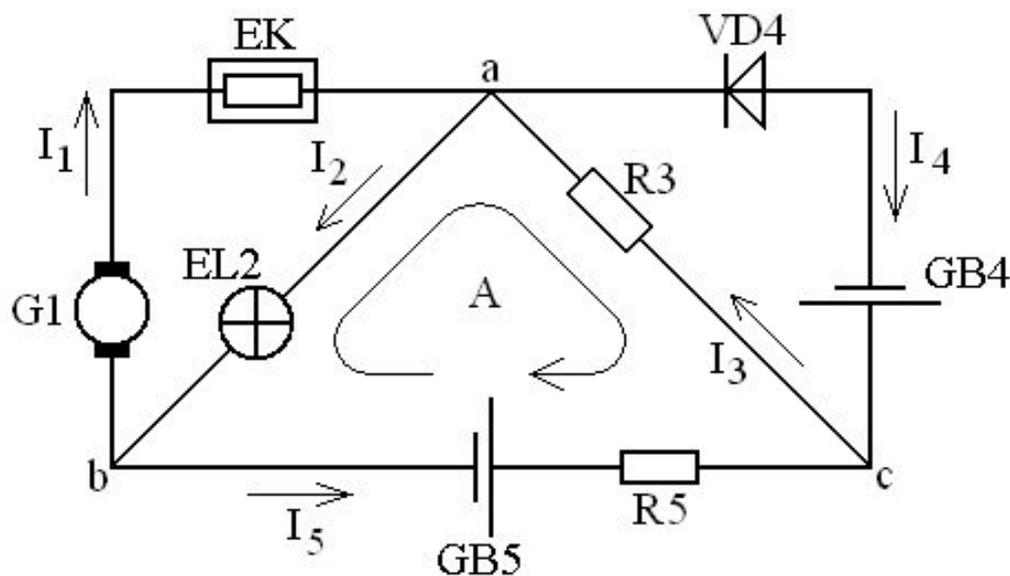


Схема сложной электрической цепи



Топологические понятия в электрической цепи.

Ветвь электрической цепи – это неразветвленный участок электрической цепи, во всех элементах которого замыкается один и тот же электрический ток.

Узел электрической цепи – точка электрической цепи, в которой соединены несколько ветвей.

Контур электрической цепи – замкнутая часть электрической цепи, образованная несколькими ветвями.

В сложной электрической цепи может быть несколько ветвей, несколько узлов и несколько контуров.



Условно–положительные направления

Положительное направление ЭДС принимается от низкого электрического потенциала к высокому и обозначается стрелкой между двумя электрическими зажимами данного устройства.

Положительное направление напряжения принимается от высокого потенциала к низкому и обозначается стрелкой между соответствующими точками на схеме.

Положительное направление тока ветви всегда совпадает с положительным направлением напряжения на этой ветви и обозначается стрелкой рядом с этой ветвью.



Параметры элементов электрической цепи

- **Параметр электродвижущая сила ЭДС (E)** характеризует основное свойство источника электроэнергии создавать и поддерживать разность потенциалов на его зажимах. Единица ЭДС - вольт (**В**).
- **Параметр активное сопротивление (R)** характеризует свойство элементов поглощать электрическую энергию и преобразовывать её в другие виды энергии. Сопротивление связывает мощность этого преобразования с током элемента:

$$P = R * i^2$$

Единица сопротивления - ом (**Ом**).



Параметры элементов электрической цепи (продолжение)

- **Параметр индуктивность (L)** характеризует свойство элемента цепи создавать магнитное поле и накапливать в нем энергию.

$$W_m = \frac{Li^2}{2}$$

Единица индуктивности – генри (**Гн**).

- **Параметр емкость (C)** характеризует свойство элемента цепи создавать электрическое поле и накапливать в нем энергию.

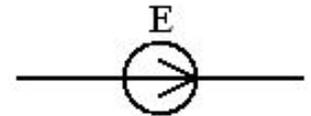
$$W_{\text{Э}} = \frac{Cu^2}{2}$$

Единица емкости - фарад (**Ф**).

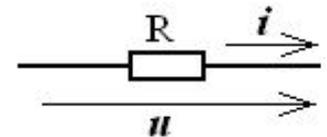


Идеальные элементы электрических цепей

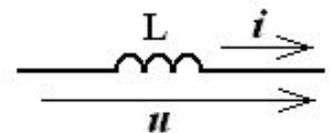
1. Идеальный источник ЭДС с параметром E



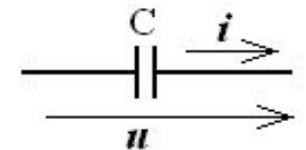
2. Идеальный резистивный элемент с параметром активное сопротивление R



3. Идеальный индуктивный элемент с параметром индуктивность L



4. Идеальный емкостный элемент с параметром емкость C



Идеальные элементы электрических цепей (продолжение)

Графическое изображение электрической цепи с помощью идеальных элементов, отражающих свойства реальных устройств, называется **схемой замещения** или **расчетной схемой** электрической цепи.

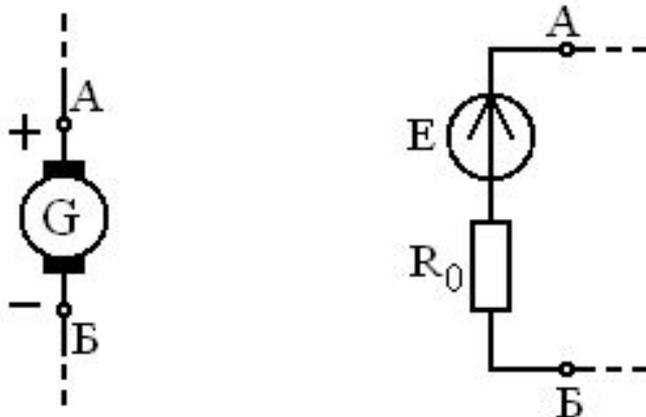


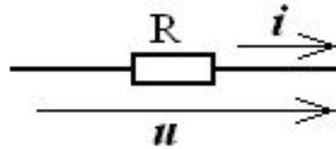
Схема замещения генератора постоянного тока



Идеальные элементы электрических цепей (продолжение)

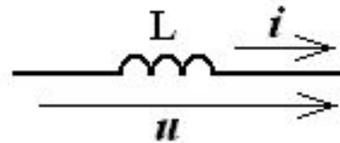
Соотношение тока и напряжения на идеальных элементах

- В резисторе:



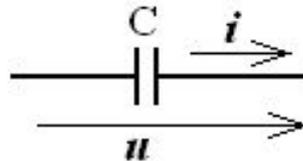
$$i = \frac{u}{R}$$

- В индуктивном элементе:



$$u = L \frac{di}{dt}$$

- В емкостном элементе:



$$i = C \frac{du}{dt}$$



Идеальные элементы электрических цепей (продолжение)

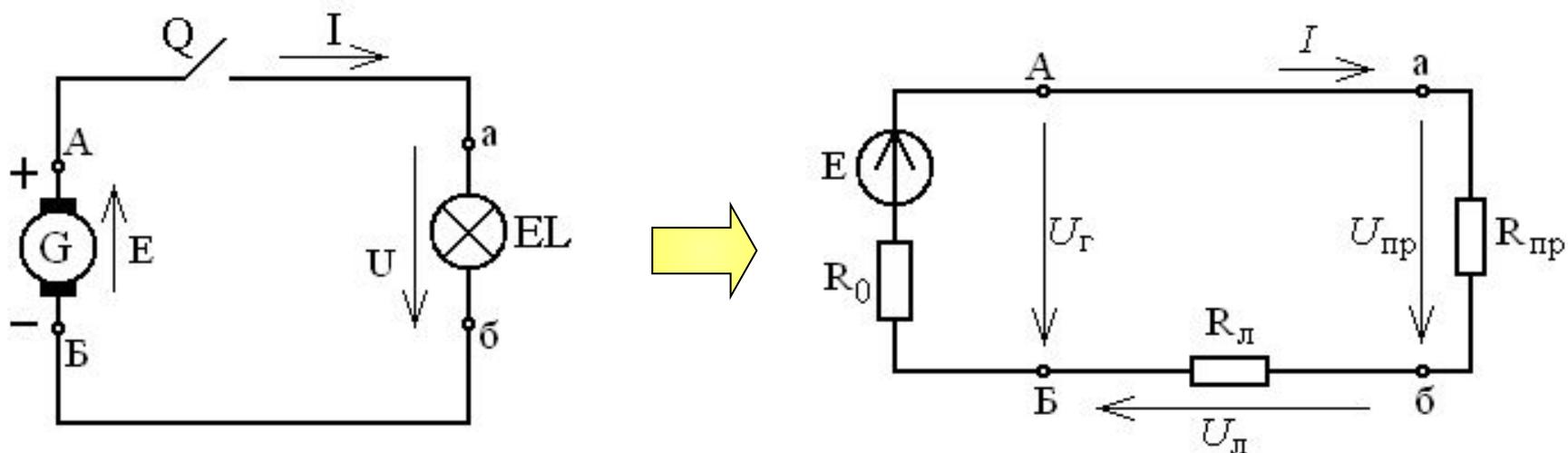


Схема замещения простой электрической цепи

Схема замещения отражает электромагнитные процессы, происходящие в элементах данной цепи, и позволяет провести расчет этой цепи



2. Основные законы электрических цепей.

Для расчета и анализа электрических цепей используются основные законы электрических цепей:

- закон Ома,
- I закон Кирхгофа,
- II закон Кирхгофа.

Закон Ома

ток резистора пропорционален напряжению между его зажимами и обратно–пропорционален его сопротивлению:

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



2. Основные законы электрических цепей (продолжение).

Первый закон Кирхгофа

алгебраическая сумма токов ветвей, соединенных в узле, равна нулю

$$\sum I = 0$$

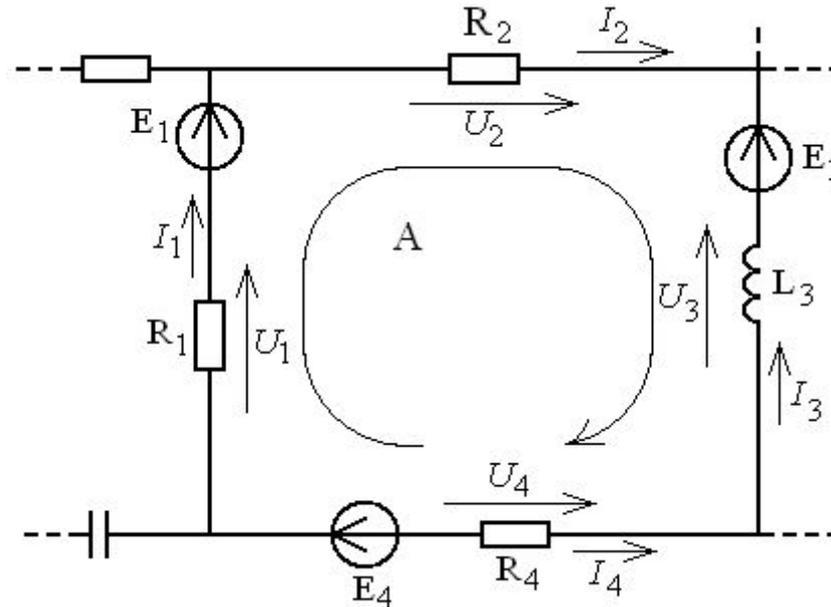
Второй закон Кирхгофа:

в контуре электрической цепи алгебраическая сумма напряжений равна алгебраической сумме ЭДС:

$$\sum U = \sum E$$



2. Основные законы электрических цепей (продолжение).



Контур электрической цепи

Для этого контура уравнение по второму закону Кирхгофа записывается в виде:

$$U_1 + U_2 - U_3 - U_4 = E_1 - E_3 + E_4$$



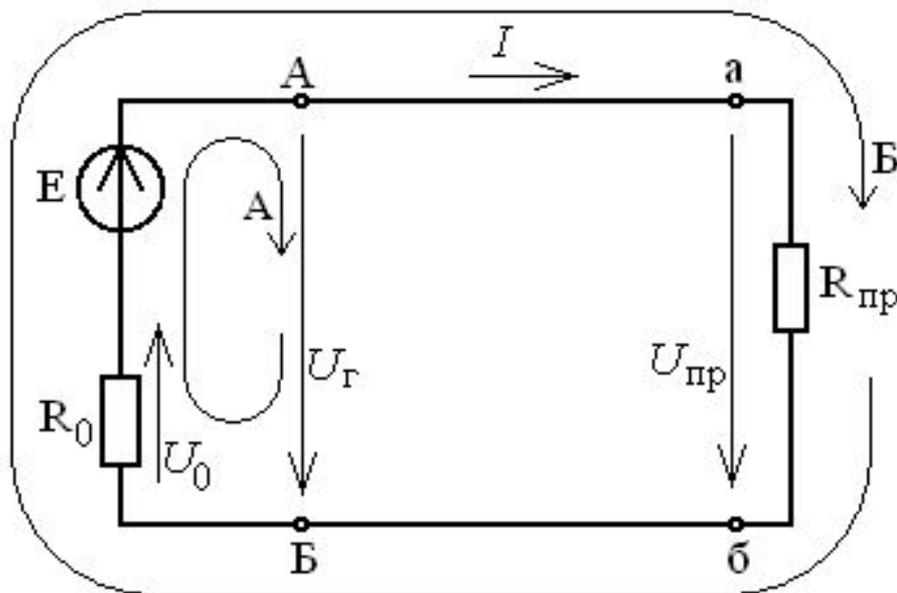
3. Характеристики и свойства источника напряжения

Внешняя характеристика источника напряжения

$$U_{\Gamma} + U_0 = E.$$

$$U_0 = R_0 \cdot I,$$

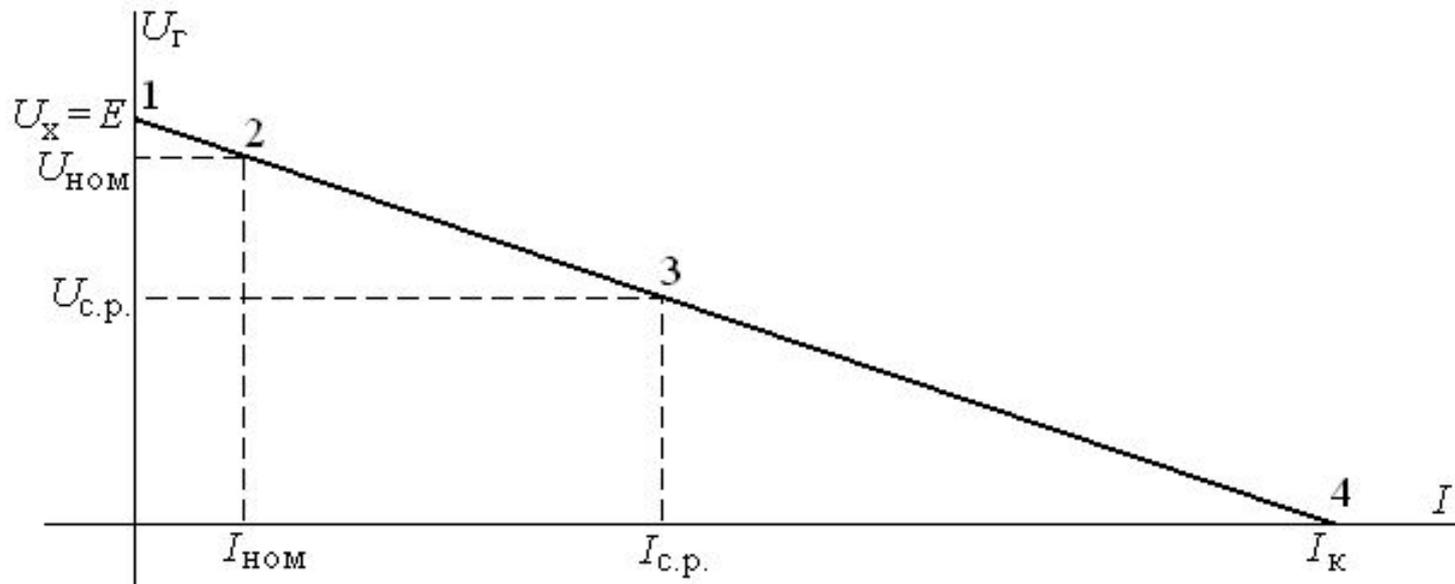
$$U_{\Gamma} + R_0 \cdot I = E.$$



Внешняя характеристика источника напряжения (продолжение)

$$U_{\Gamma} = E - R_0 \cdot I$$

Уравнение определяющее зависимость напряжения на зажимах источника от величины нагрузки. Эту зависимость называют внешней характеристикой источника напряжения.



Внешняя характеристика генератора



Энергетический баланс в электрической цепи

Энергетический баланс определяет соотношение между генерируемой мощностью и потребляемой мощностью в электрической цепи

Мощность, генерируемая идеальным источником ЭДС

$$P_G = EI$$

Мощность, потребляемая идеальным резистором

$$P = RI^2$$



Энергетический баланс в электрической цепи (продолжение)

Уравнение энергетического баланса может быть получено исходя из уравнения, составленного по II закону Кирхгофа для **контура Б**

$$U_{\text{пр}} + U_0 = E \quad \text{или} \quad R_{\text{пр}} I + R_0 I = E$$

Умножим обе части этого равенства на ток I :

$$R_{\text{пр}} I^2 + R_0 I^2 = EI \quad \text{или} \quad P_{\text{пр}} + P_0 = P_{\Gamma}$$

$P_{\text{пр}}$ – мощность, потребляемая приемником

P_0 – мощность потерь энергии в источнике,

P_{Γ} – мощность, генерируемая источником.

Это уравнения *энергетического баланса*: мощность источника электрической энергии равна сумме мощностей приемников в электрической цепи.



4. Основные режимы работы электрических цепей.

Различают четыре основных режима работы электрической цепи:

- **номинальный режим;**
- **режим холостого хода;**
- **режим короткого замыкания;**
- **согласованный режим работы.**



Номинальный режим

- Токи, напряжения, мощности всех элементов электрической цепи соответствуют их номинальным значениям $I_{\text{НОМ}}$, $U_{\text{НОМ}}$, $P_{\text{НОМ}}$, установленным заводом - изготовителем.
- В этом режиме гарантируется надежная работа электрооборудования в течение длительного времени.
- Номинальные значения напряжения, тока и мощности берут за основу при расчетах электрических схем.
- По номинальному напряжению ($U_{\text{НОМ}}$) рассчитывают изоляцию проводов и отдельных устройств.
- По номинальному току ($I_{\text{НОМ}}$) определяют допустимый нагрев всех элементов. Нормально работает устройство когда

$$I \leq I_{\text{НОМ}}$$



Номинальный режим (продолжение)

- Для источника электроэнергии номинальная мощность $P_{\text{НОМ}}$ – это мощность, которую он отдает потребителю при $U_{\text{НОМ}}$ и $I_{\text{НОМ}}$. На внешней характеристике источника его номинальному режиму работы соответствует [точка 2](#).
- Номинальная мощность приемных устройств - это электрическая мощность, потребляемая при номинальном напряжении, т.е.

$$P_{\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}}$$



Режим холостого хода

- Возникает при отключении нагрузки, при обрывах цепи. В этом режиме можно принять сопротивление приемника $R_{\text{пр}}$ бесконечно большим, а ток в цепи $I_x = 0$. Напряжение на зажимах генерирующего устройства в режиме холостой ход в соответствии с $U_x = E$.
- На внешней характеристике источника режиму холостой ход соответствует [точка 1](#).
- Этот режим используется на практике для измерения E источника, которую определяют, подключив к его выходным зажимам электроизмерительный прибор – вольтметр.



Режим короткого замыкания

- создается при замыкании накоротко выходных зажимов источника или входных зажимов приемного устройства (точки А и Б или а и б). В этом режиме можно принять сопротивление приемника равным нулю $R_{\text{пр}} = 0$. При этом напряжение на зажимах генератора также равно нулю $U_{\text{г}} = 0$.
- Ток короткого замыкания определяется только небольшим внутренним сопротивлением источника: $I_{\text{к}} = E / R_0$ и значительно превышает номинальный ток.
- На внешней характеристике источника режиму короткого замыкания соответствует точка 4.



Режим короткого замыкания (продолжение)

- Большой ток короткого замыкания приводит к быстрому чрезмерному нагреву генератора и выходу его из строя.
- В большинстве электротехнических устройств короткие замыкания нежелательны, т.к. возрастание тока ведет к резкому увеличению выделения тепла в токоведущих частях и, следовательно, к выходу из строя электроустановок. Поэтому режим короткого замыкания является аварийным режимом и недопустим при эксплуатации электротехнических устройств и электрических цепей.



Согласованный режим

Характеризуется максимально возможной мощностью передача энергии от источника к потребителю. Это возможно только при определенном соотношения сопротивлений приемника и источника.

Если принять $R_{\text{л}} = 0$, то ток в цепи

$$I = \frac{E}{R_0 + R_{np}}$$

мощность приемника

$$P_{np} = R_{np} I^2 = R_{np} \frac{E^2}{(R_0 + R_{np})^2}$$



Согласованный режим (продолжение)

Исследуем функцию $P_{np}(R_{np})$ на максимум, для чего

найдем $\frac{dP_{np}}{dR_{np}} = 0$ откуда $R_{np} = R_0$

Мощность приемника максимальна, когда $R_{np} = R_0$.

К.п.д. при этом

$$\eta_{cp} = \frac{P_{np}}{P_{\Gamma}} = \frac{R_{np} I^2}{(R_0 + R_{np}) I^2} = 0,5$$

В обычных электрических цепях часто $R_{np} \approx 10 R_0$ и тогда

$$\eta_{cp} = \frac{10R_{np}}{R_0 + 10R_0} \approx 0,9$$



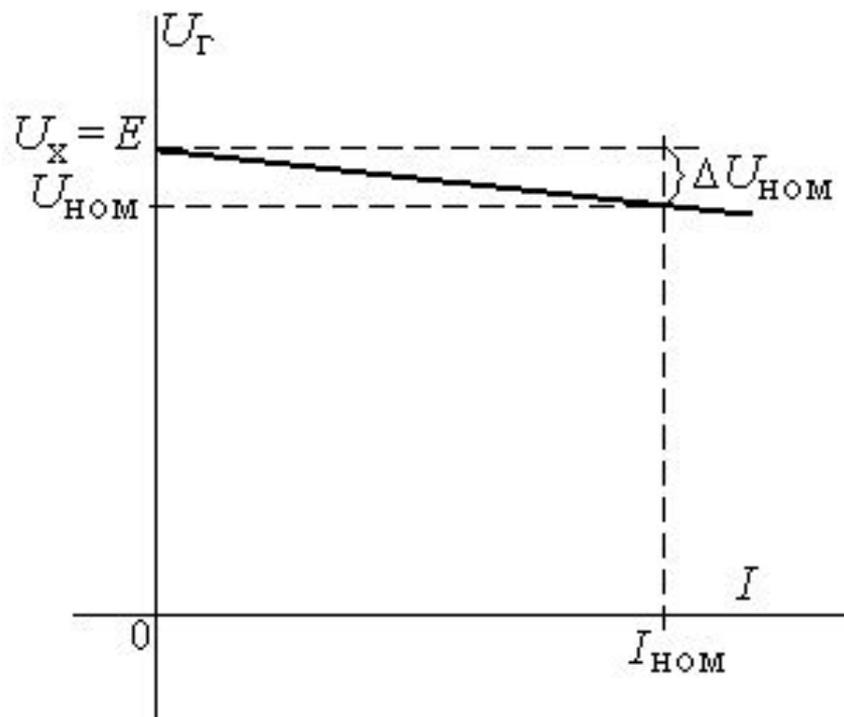
Согласованный режим (продолжение)

- Согласованный режим применяется в радиотехнике и промышленной электронике - там, где передаются небольшие мощности, и ставится задача выделения P_{\max} . В силовых электрических установках общего применения этот режим не используется.
- На внешней характеристике источника согласованному режиму соответствует [точка 3.](#)



Рабочий участок внешней характеристики

В силовых электрических установках общего применения режимы работы источника электроэнергии меняются в диапазоне от холостого хода до номинального режима работы (участок 1-2)

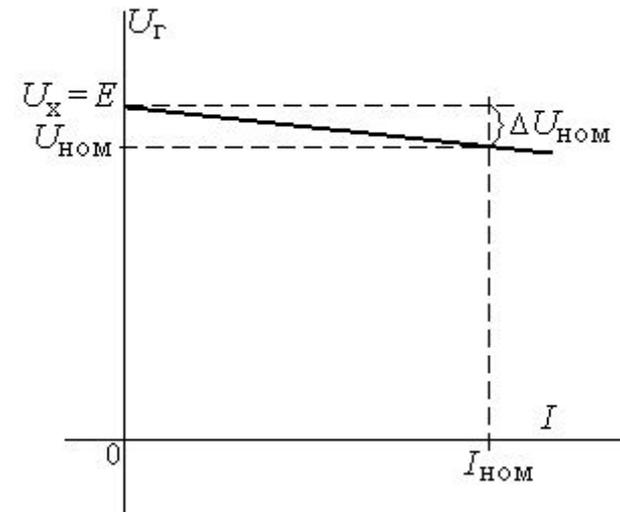


Внешняя характеристика источника напряжения



Рабочий участок внешней характеристики

- В режиме холостого хода, когда ток $I = 0$, напряжение на зажимах генератора определяется величиной ЭДС $U_x = E$.
- С увеличением тока цепи (увеличением нагрузки) напряжение на зажимах источника уменьшается в соответствии с выражением $U_r = E - R_0 \cdot I$ за счет падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника $\Delta U_r = R_0 \cdot I$.
- В номинальном режиме работы, когда $I = I_{\text{НОМ}}$, это изменение напряжения составляет $\Delta U_{\text{НОМ}} = 5 - 10 \%$.



Заключение

1. *Электрическая цепь* содержит источники электрической энергии, приемники электрической энергии и вспомогательные элементы.
2. Свойства элемента электрической цепи характеризуются параметрами:
ЭДС (E), сопротивление (R), индуктивность (L), емкость (C).

При анализе электрической цепи реальный элемент представляют совокупностью *идеальных элементов*, каждый из которых обладает только одним параметром и отражает одно свойство реальных элементов: идеальный источник ЭДС, идеальный резистивный элемент, идеальный индуктивный элемент, идеальный емкостный элемент.

Заключение

3. Для расчета и анализа электрических цепей используются основные законы электрических цепей:
- *Закон Ома* определяет соотношение между током и напряжением в идеальном резистивном элементе: *ток пропорционален напряжению резистора и обратно-пропорционален его сопротивлению.*
 - *Первый закон Кирхгофа* определяет соотношение между токами ветвей, соединенных в узле: *алгебраическая сумма токов ветвей, соединенных в узле, равна нулю.*
 - *Второй закон Кирхгофа* определяет соотношение между напряжениями на отдельных участках или элементах контура и ЭДС в этом контуре: *в контуре электрической цепи алгебраическая сумма напряжений равна алгебраической сумме ЭДС.*

Заключение

4. *Реальный источник* напряжения обладает падающей внешней характеристикой, т.е. с увеличением нагрузки генератора напряжение на его зажимах уменьшается. Это объясняется падением напряжения на внутреннем сопротивлении источника.
- *В режиме холостой ход* ток равен нулю, а напряжение на зажимах источника равно его ЭДС.
 - *В режиме короткого замыкания* напряжение на зажимах источника равно нулю, а ток короткого замыкания значительно превышает номинальный ток.
 - *Номинальный режим* характеризуется тем, что токи, напряжения, мощности всех элементов электрической цепи соответствуют их номинальным значениям $I_{ном}$, $U_{ном}$, $P_{ном}$, установленным заводом-изготовителем.

Контрольные вопросы

Электрическая цепь - это

- совокупность устройств, предназначенных для передачи, распределения и преобразования электрической энергии, соединенные между собой электрическими проводами;
- последовательность электрических проводников, объединенных в звенья электроустановки;
- совокупность устройств, предназначенных для преобразования электрической энергии, расположенные на одной платформе;
- совокупность электрических проводников, развернутых в прямую линию.

Источник электрической энергии – это

- устройство, преобразующее неэлектрическую энергию в электрическую;
- Устройство, преобразующее электрическую энергию в тепловую;
- устройство, преобразующее электрическую энергию в другие виды энергии;
- устройство, преобразующее тепловую энергию в механическую.

Приемник электрической энергии – это

- устройство, преобразующее неэлектрическую энергию в электрическую;
- устройство, преобразующее электрическую энергию в другие виды энергии;
- устройство, преобразующее тепловую энергию в механическую;
- устройство, преобразующее механическую энергию в световую.

Контрольные вопросы

Внешняя характеристика источника напряжения – это

- вольт-амперная характеристика источника;
- напряжение на его зажимах в режиме холостого хода;
- максимальный ток нагрузки источника;
- номинальная мощность источника напряжения;
- зависимость напряжения источника от тока в нем;
- произведение номинального напряжения на номинальный ток источника;
- сопротивление приемника, подключенного к зажимам источника;
- масса, габаритные размеры источника.

С увеличением нагрузки напряжение на зажимах источника

- уменьшается;
- увеличивается;
- не меняется.

Контрольные вопросы

Холостой ход – режим работы цепи при

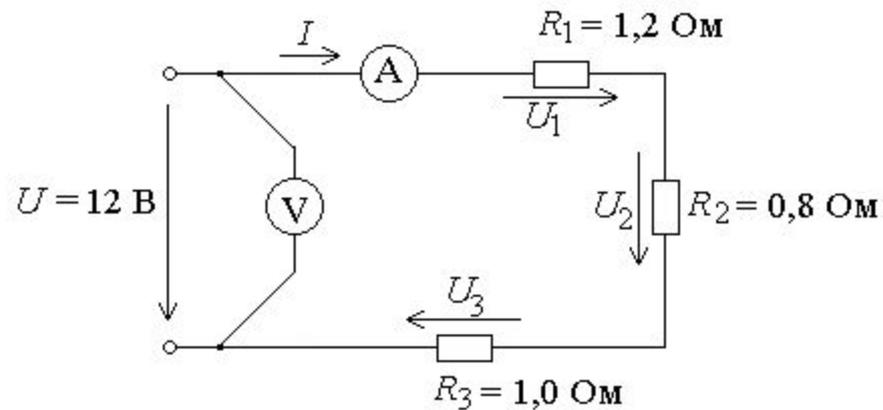
- отключенном приемнике;
- разомкнутых зажимах источника;
- замкнутых между собой зажимах источника;
- сопротивлении приемника, равном внутреннему сопротивлению источника;
- сопротивлении приемника, равном нулю.

Короткое замыкание – режим работы цепи при

- отключенном приемнике;
- разомкнутых зажимах источника;
- замкнутых между собой зажимах источника;
- сопротивлении приемника, равном внутреннему сопротивлению источника;
- сопротивлении приемника, равном нулю.

Контрольные вопросы

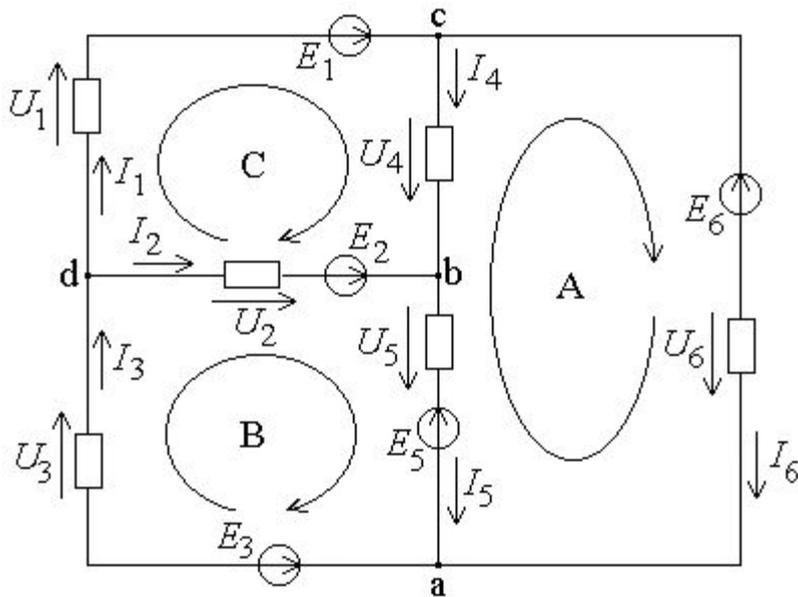
Ток в цепи 4,0 А. Напряжение на резисторе R2 равно ...В.



- $U_2 = 3,2 \text{ В};$
- $U_2 = 12,0 \text{ В};$
- $U_2 = 5,0 \text{ В};$
- $U_2 = 3,0 \text{ В};$
- $U_2 = 12,8 \text{ В}.$

Контрольные вопросы

Указать уравнение, составленное по первому закону Кирхгофа для приведенной схемы.



$$\square U_6 - U_5 - U_4 = E_5 - E_6;$$

$$\square I_1 + I_4 - I_2 = 0;$$

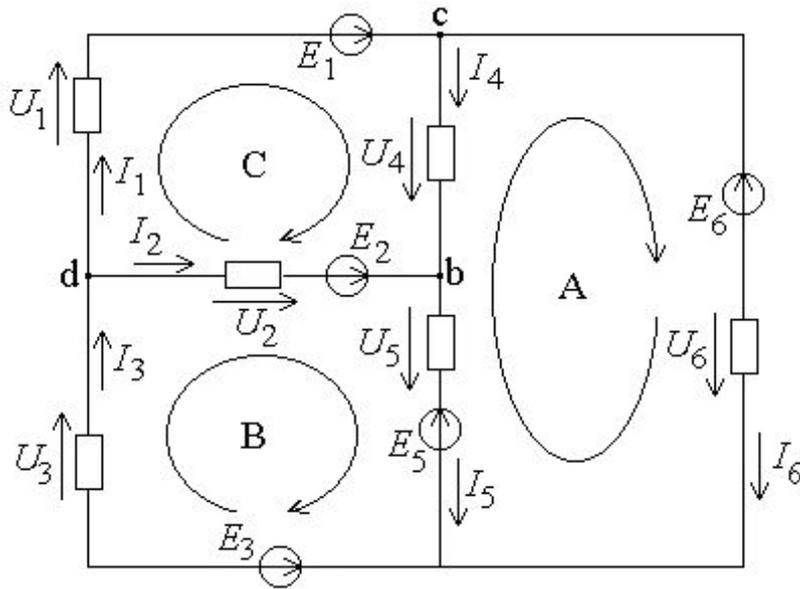
$$\square E_2 + E_5 = U_2 + U_4 - U_5;$$

$$\square -I_4 - I_5 + I_6 = 0;$$

$$\square I_6 + I_5 - I_3 = 0.$$

Контрольные вопросы

Указать уравнение, составленное по второму закону Кирхгофа.



$U_6 - U_5 - U_4 = E_5 - E_6$

$U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 =$
 $= E_1 + E_2 + E_3 + E_5 + E_6$

$E_5 + E_6 = U_4 + U_5 + U_6$

$-I_4 - I_5 + I_6 = 0$

$I_3 - I_2 - I_1 = 0$