

- Лекция № 1
- Линейные электрические цепи постоянного тока

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

- Электротехника – наука об использовании электрических и магнитных явлений на практике
- 1. Теоретическая электротехника.
- 2. Электрические машины.

- В электротехнике рассматривается устройство и принцип действия основных электротехнических устройств, используемых в быту и промышленности. Чтобы электротехническое устройство работало, должна быть создана электрическая цепь, задача которой передать электрическую энергию этому устройству и обеспечить ему требуемый режим работы.

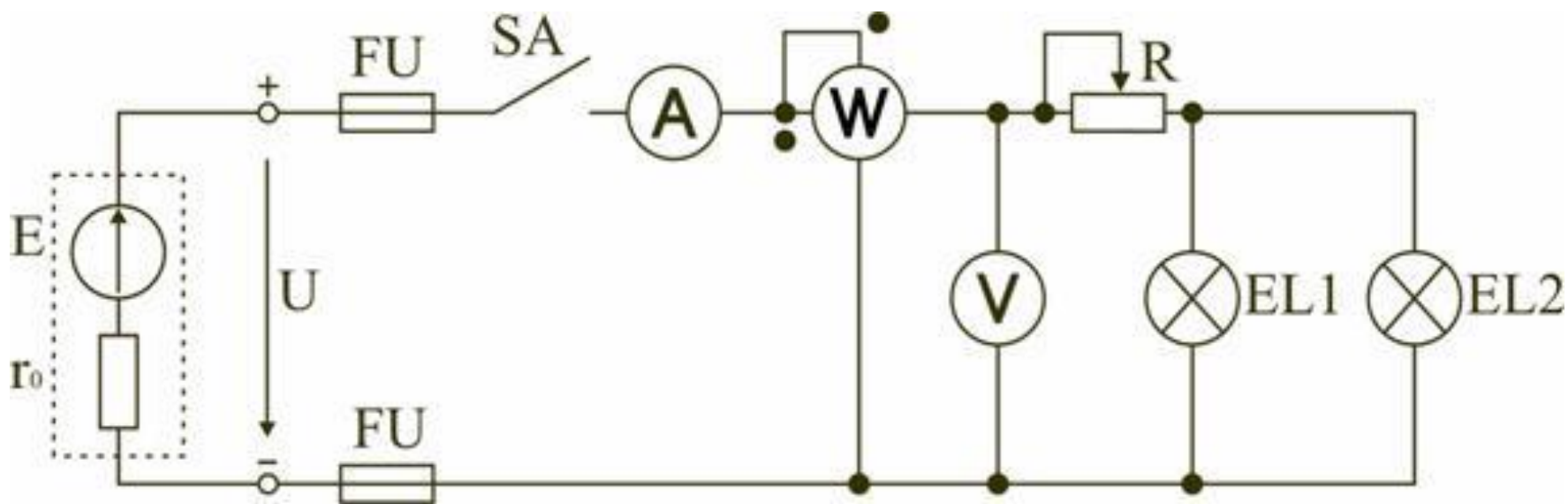
# Электрическая цепь и ее элементы

- **Электрической цепью** называется совокупность источников электрической энергии, потребителей, коммутирующей и измерительной аппаратуры.

# Схема замещения электрической цепи

- Для анализа и расчета электрическая цепь графически представляется в виде электрической схемы, содержащей условные обозначения ее элементов и способы их соединения. Электрическая схема реальной электрической цепи, обеспечивающей работу осветительной аппаратуры, представлена на рисунке.

# Электрическая схема реальной электрической цепи

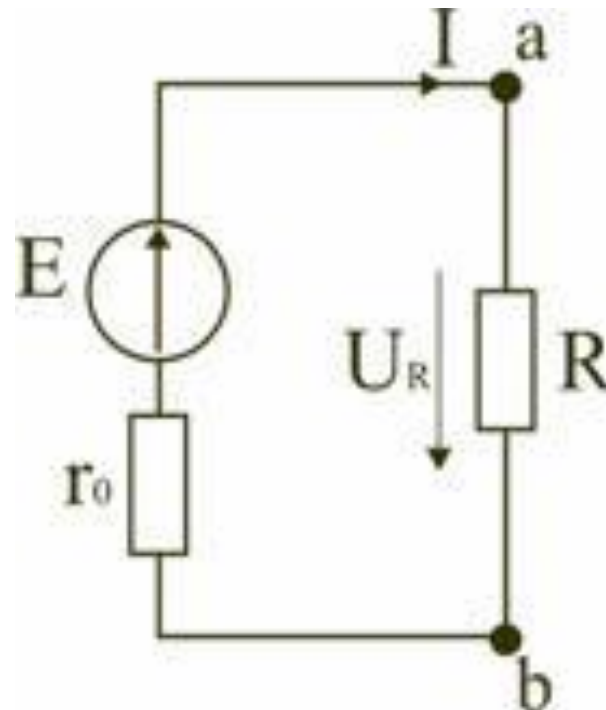


# Основные законы цепей постоянного тока

- Расчет и анализ электрических цепей производится с использованием закона Ома, 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.

# Закон Ома

- **Закон Ома для пассивного участка цепи.** Соотношение между током  $I$ , напряжением  $U_R$  и сопротивлением  $R$  участка  $ab$  электрической цепи выражается законом Ома:



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



- При расчете электрических цепей иногда удобнее пользоваться не сопротивлением  $R$ , а величиной обратной сопротивлению, т.е. электрической проводимостью:
- В этом случае закон Ома для участка цепи запишется в виде:

- $I = gU$ .  $g = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$ .
- Закон Ома для всей цепи. Этот закон определяет зависимость между ЭДС  $E$  источника питания с внутренним сопротивлением  $r_0$ , током  $I$  электрической цепи и общим эквивалентным сопротивлением  $R_{\Sigma} = r_0 + R$  всей цепи:

$$I = \frac{E}{R_{\Sigma}} = \frac{E}{r_0 + R}.$$

# Первый закон Кирхгофа

- В любом узле электрической цепи алгебраическая сумма токов равна нулю

$$\sum_{K=1}^m I_K = 0,$$

- где  $m$  – число ветвей подключенных к узлу.
- При записи уравнений по первому закону Кирхгофа токи, направленные к узлу, берут со знаком «плюс», а токи, направленные от узла – со знаком «минус».

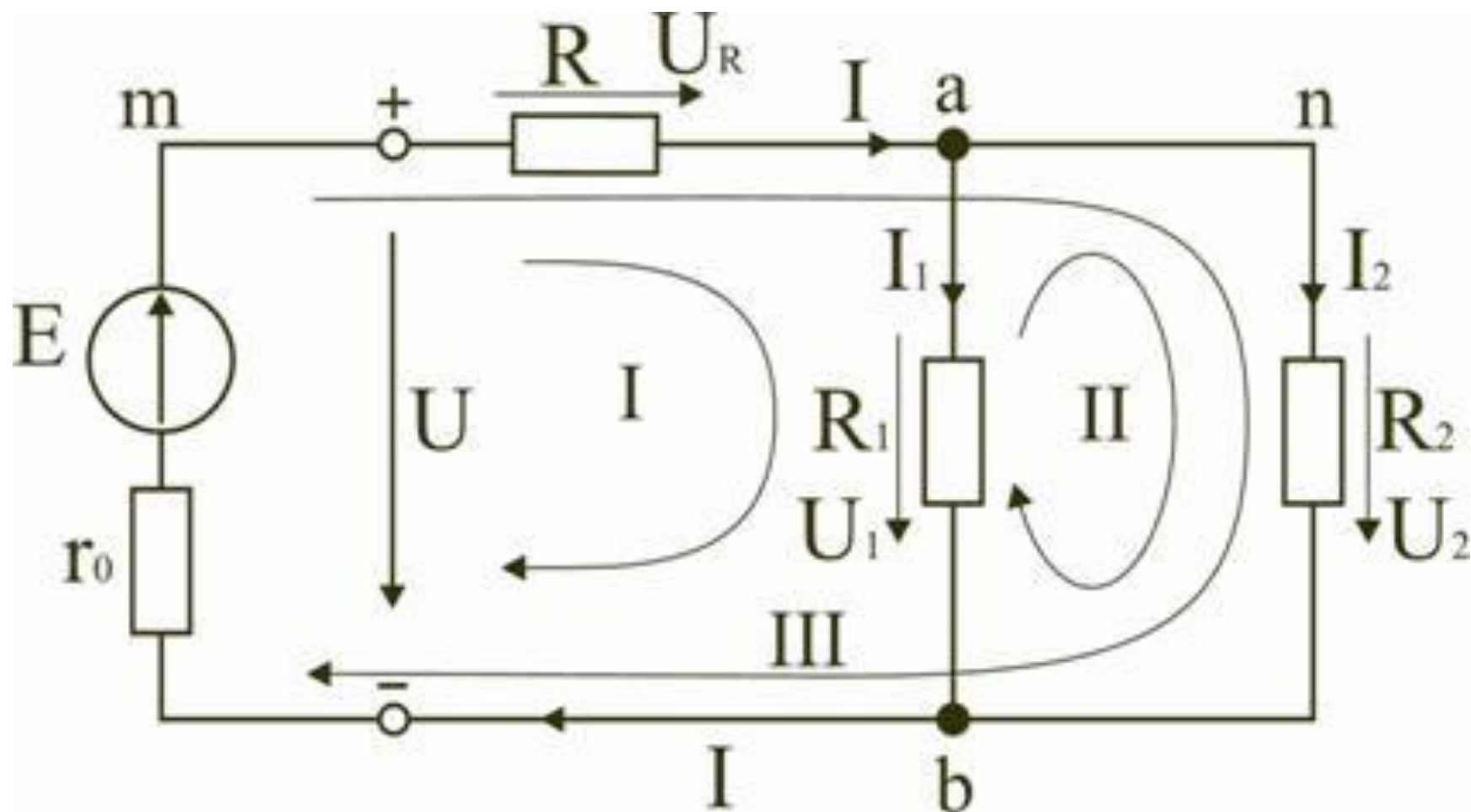
# Второй закон Кирхгофа

- В любом замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений на всех его участках

$$\sum_{K=1}^n E_K = \sum_{K=1}^m R_K I_K = \sum_{K=1}^m U_K,$$

- где  $n$  – число источников ЭДС в контуре;  $m$  – число элементов с сопротивлением  $R_K$  в контуре;  $U_K = R_K I_K$  – напряжение или падение напряжения на  $k$ -том элементе контура.

# Расчетная электрическая схема



- При записи уравнений по первому закону Кирхгофа токи, направленные к узлу, берут со знаком «плюс», а токи, направленные от узла – со знаком «минус». Например, для узла «а» :

- $$I - I_1 - I_2 = 0.$$

- При записи всех уравнений по второму закону Кирхгофа необходимо:
- 1. задать условные положительные направления ЭДС, токов и напряжений;
- 2. выбрать направление обхода контура, для которого записывается уравнение;
- 3. записать уравнение, пользуясь одной из формулировок второго закона Кирхгофа, причем слагаемые, входящие в уравнение, берут со знаком «плюс», если их условные положительные направления совпадают с обходом контура, и со знаком «минус», если они противоположны.
- Запишем уравнения по II закону Кирхгофа для контуров электрической схемы:
- контур I:  $E = RI + R_1 I_1 + r_0 I$ ,
- контур II:  $R_1 I_1 + R_2 I_2 = 0$ ,
- контур III:  $E = RI + R_2 I_2 + r_0 I$ .

# Основные энергетические соотношения

- В действующей цепи электрическая энергия источника питания преобразуется в другие виды энергии. На участке цепи с сопротивлением  $R$  в течение времени  $t$  при токе  $I$  расходуется электрическая энергия
- $W = RI^2t$  (кВтч).

# Электрическая мощность (Вт)

- Скорость преобразования электрической энергии в другие виды представляет электрическую мощность

$$P = \frac{W}{t} = RI^2 = UI.$$

- Из закона сохранения энергии следует, что мощность источников питания в любой момент времени равна сумме мощностей потребителей:

$$\sum EI = \sum RI^2.$$

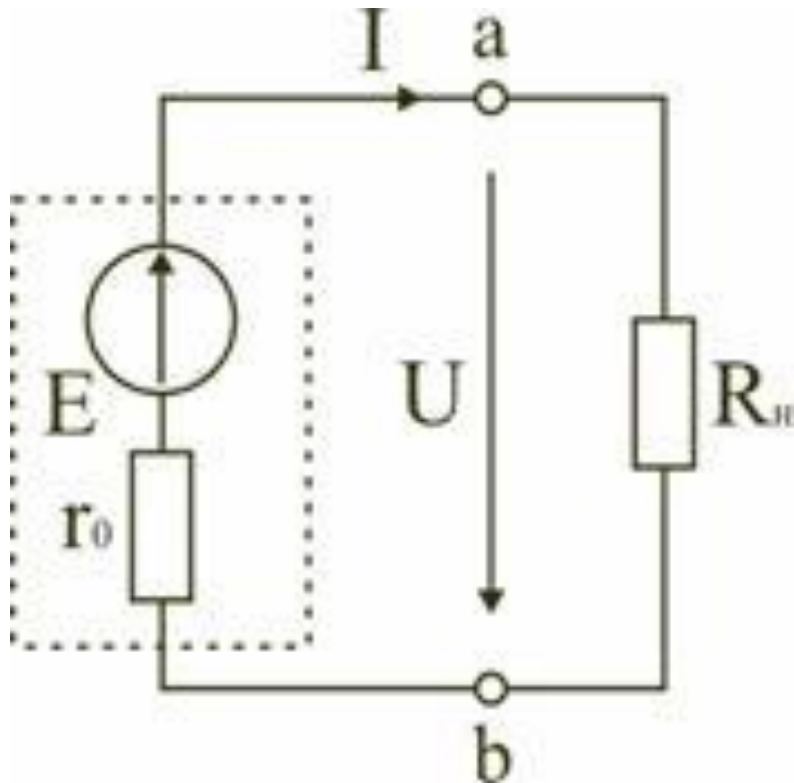


- При составлении уравнения баланса мощностей следует учесть, что если действительные направления ЭДС и тока источника совпадают, то источник ЭДС работает в режиме источника питания, и произведение  $E I$  подставляют (в примере) со знаком плюс. Если не совпадают, то источник ЭДС работает в режиме потребителя электрической энергии, и произведение  $E I$  подставляют со знаком минус. Для цепи, показанной ранее уравнение баланса мощностей запишется в виде:
- $E I = (r_0 + R) I + R_1 I_1 + R_2 I_2$ .
- При расчете электрических цепей используются определенные единицы измерения. Электрический ток измеряется в амперах (А); напряжение – в вольтах (В); сопротивление – в омах (Ом); мощность – в ваттах (Вт); электрическая энергия – ватт-час (Вт-час); проводимость – в сименсах (См).

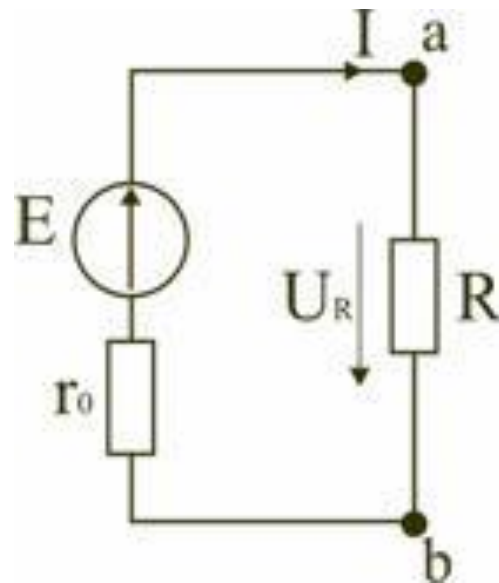
# Источники электрической энергии (питания)

- Общим свойством всех источников питания является преобразование какого-либо вида энергии в электрическую. Источники, в которых происходит преобразование неэлектрической энергии в электрическую, называются первичными источниками. Вторичные источники – это такие источники, у которых и на входе, и на выходе – электрическая энергия (например, выпрямительные устройства).

# Схема с источником ЭДС

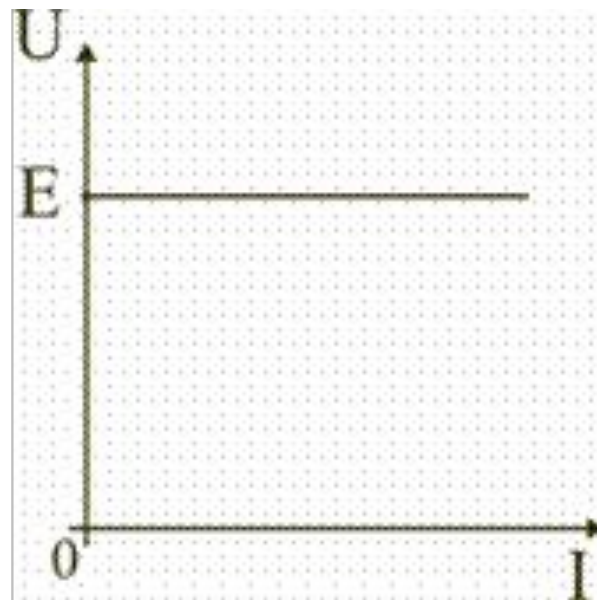
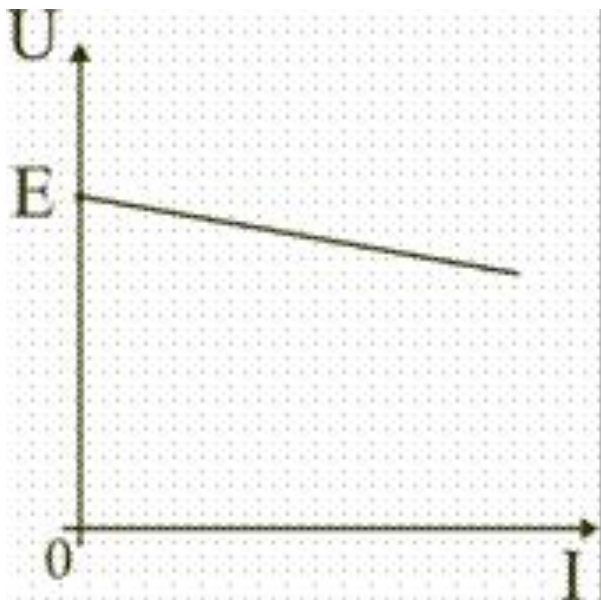


- $E = U + r_0 I$  или
- $U_R = E - r_0 I$

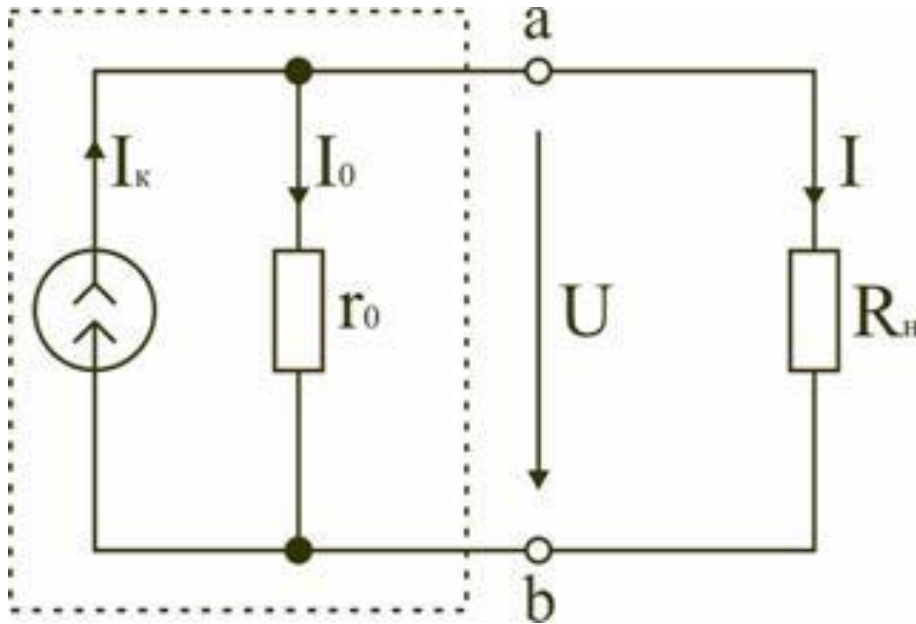


- Зависимость напряжения  $U$  на зажимах реального источника от тока  $I$  определяется его вольт-амперной или внешней характеристикой. Уменьшение напряжения источника  $U$  при увеличении тока нагрузки  $I$  объясняется падением напряжения  $\Delta U = Ir_0$  на его внутреннем сопротивлении  $r_0$ .
- У идеального источника ЭДС внутреннее сопротивление  $r_0 \ll R_n$  (приблизительно  $r_0 \approx 0$ ). В этом случае его вольт-амперная характеристика представляет собой прямую линию, следовательно, напряжение  $U$  на его зажимах постоянно ( $U = E$ ) и не зависит от величины сопротивления нагрузки  $R_n$ .

# Внешняя характеристика источника ЭДС



# Схема с источником тока

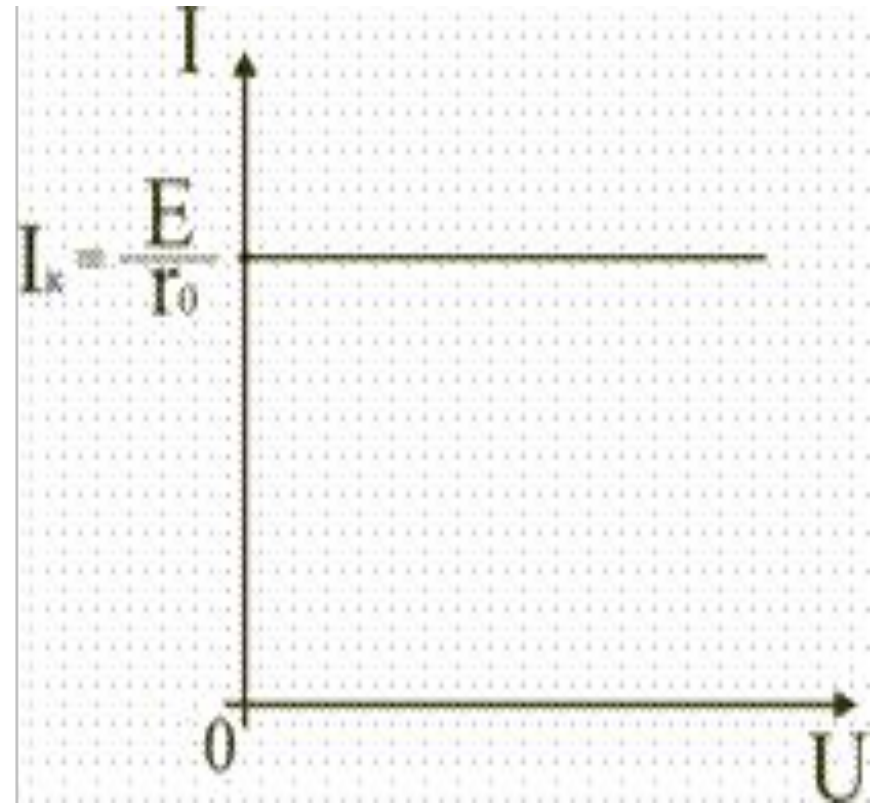
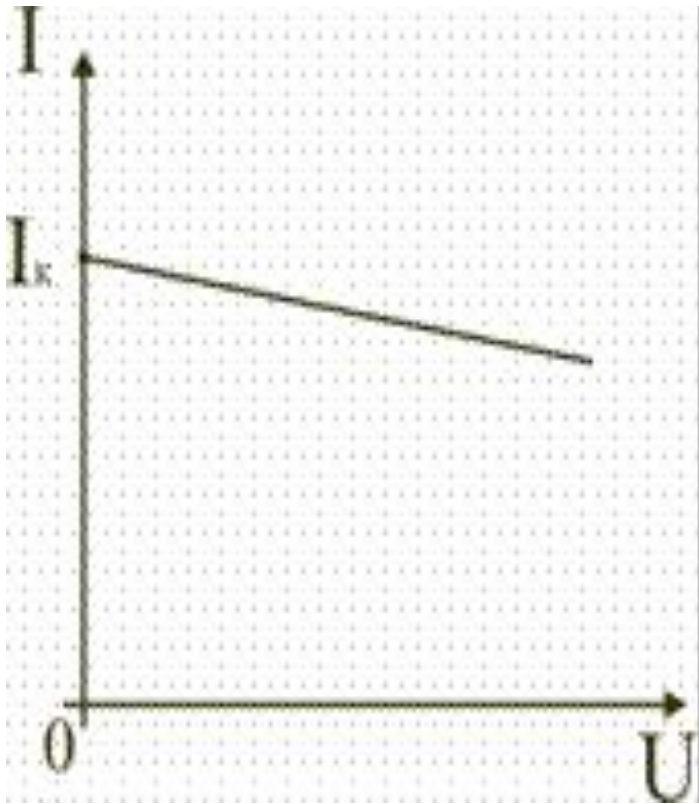


- $I_K = E / r_0,$

$$I_K = I_0 + I; I_0 = U / r_0$$

$$I = I_K - I_0 = I_K - U / r_0$$

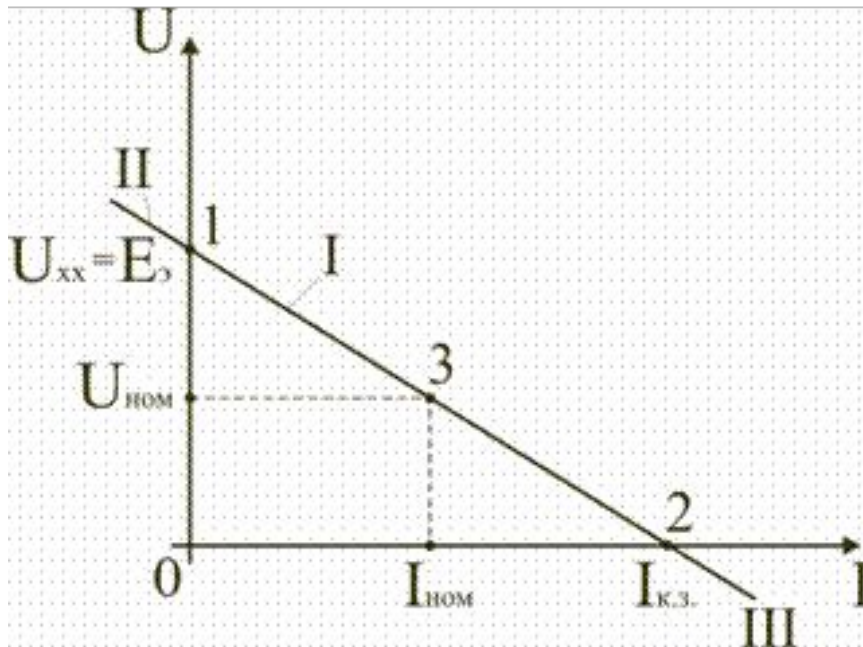
# Вольт-амперная (внешняя) характеристика $I(U)$ источника тока



- При подключении к источнику питания различного количества потребителей или изменении их параметров будут изменяться величины напряжений, токов и мощностей в электрической цепи, от значений которых зависит режим работы цепи и ее элементов.

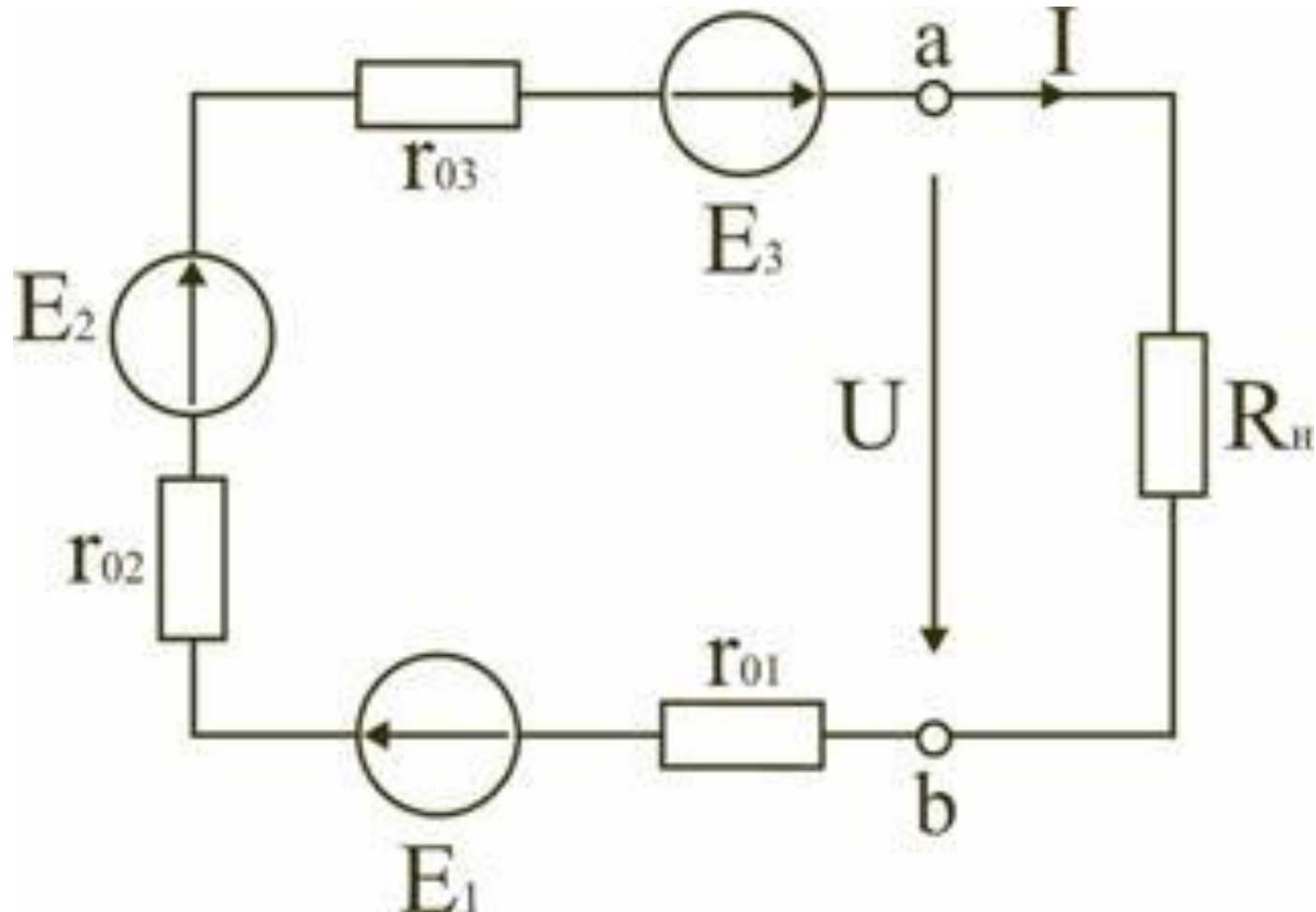


# Режимы работы электрической цепи



- I Режим нагрузки
- II Режим холостого хода
- $R_H =$
- III Режим короткого замыкания
- $R_H = 0$
- IV Согласованный режим работы
- $R_H = r_o$

# Последовательное включение источников ЭДС

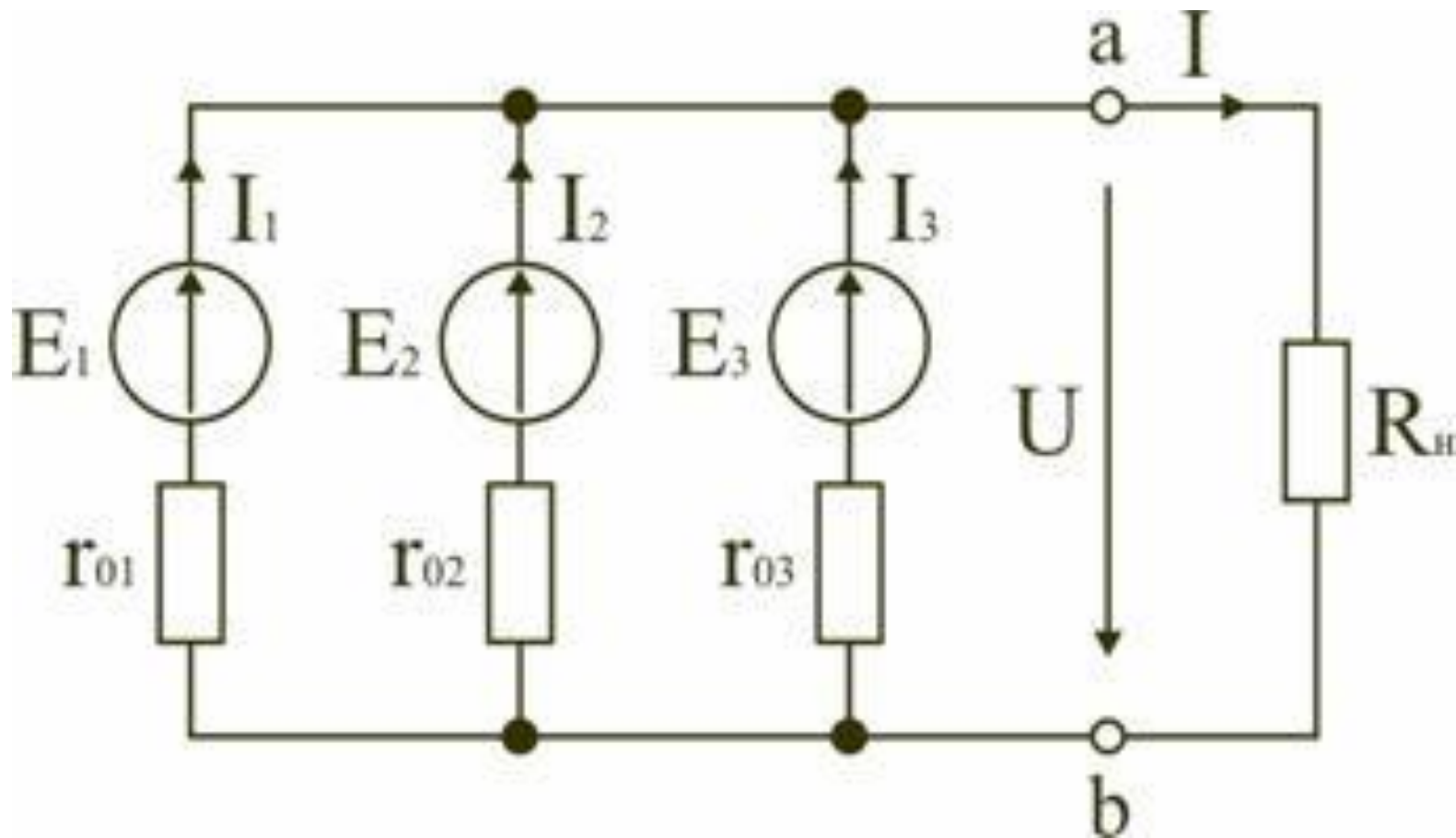


- Последовательное включение источников питания (источников ЭДС) применяется тогда, когда требуется создать напряжение требуемой величины. Для этой цепи на основании второго закона Кирхгофа можно записать

- $E_1 + E_2 + E_3 = (r_{01} + r_{02} + r_{03} + R_H) I$

$$I = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{r_{01} + r_{02} + r_{03} + R_i} = \frac{E_y}{r_y + R_i}.$$

# Схема с параллельным соединением источников



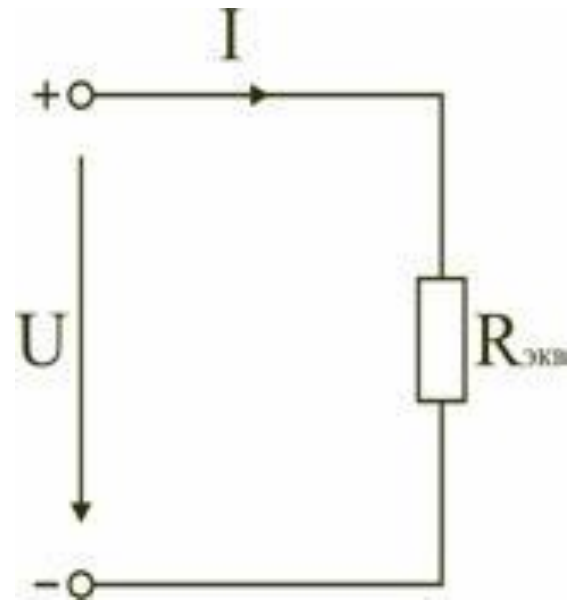
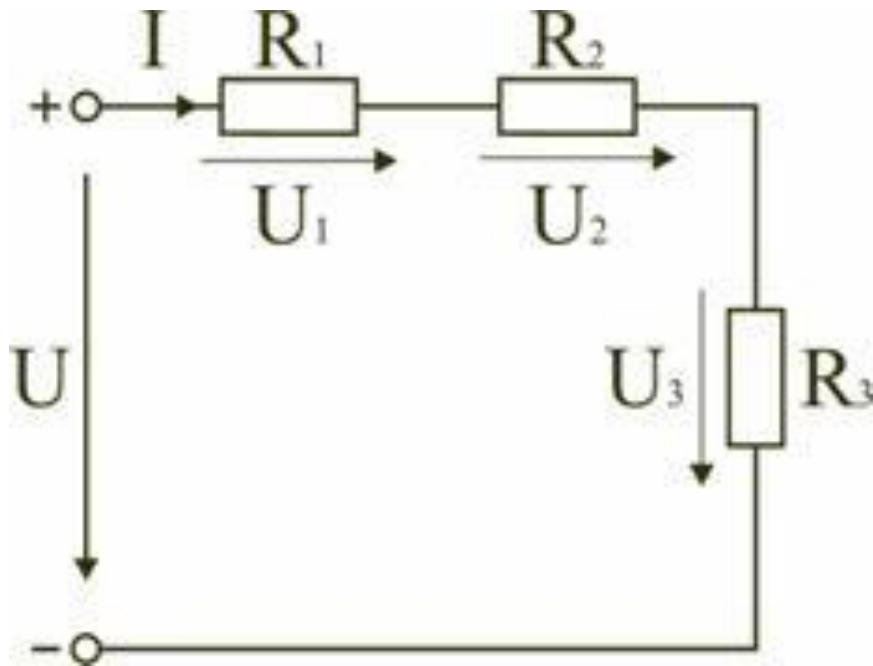
- Характерным для параллельного соединения является одно и то же напряжение  $U$  на выводах всех источников. Для электрической цепи можно записать следующие уравнения:
- $I = I_1 + I_2 + I_3$ ;  $P = P_1 + P_2 + P_3 = UI_1 + UI_2 + UI_3 = UI$ .

# Методы эквивалентных преобразований сопротивлений

- Последовательным называют такое соединение элементов цепи, при котором во всех включенных в цепь элементах возникает один и тот же ток.
- Параллельным называют такое соединение, при котором все включенные в цепь потребители электрической энергии, находятся под одним и тем же напряжением.

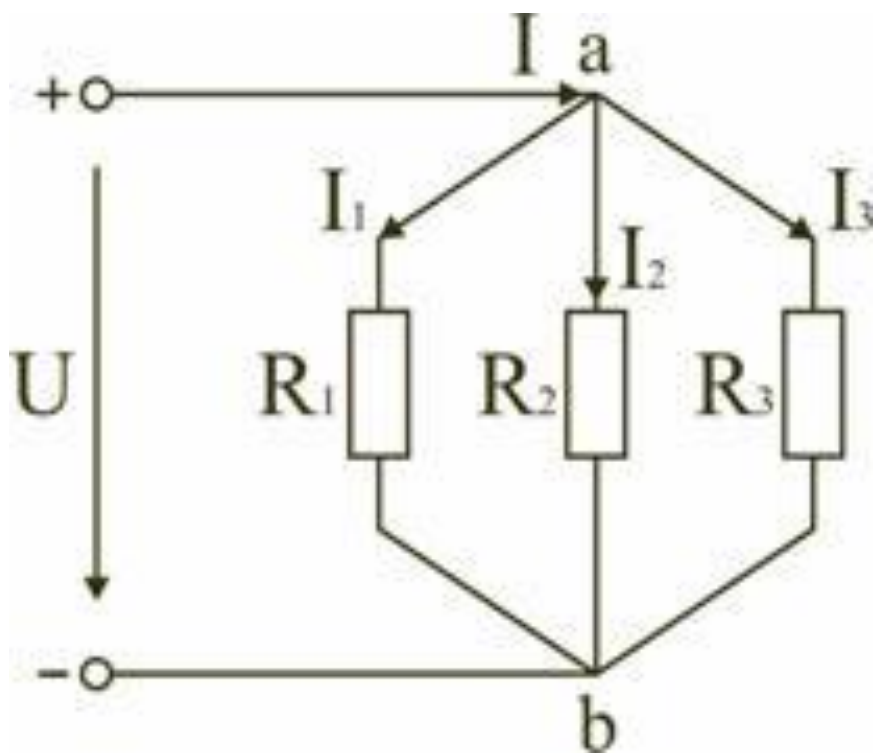
-

# Последовательное соединение элементов



$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + R_2 + R_3.$$

# Параллельное соединение элементов

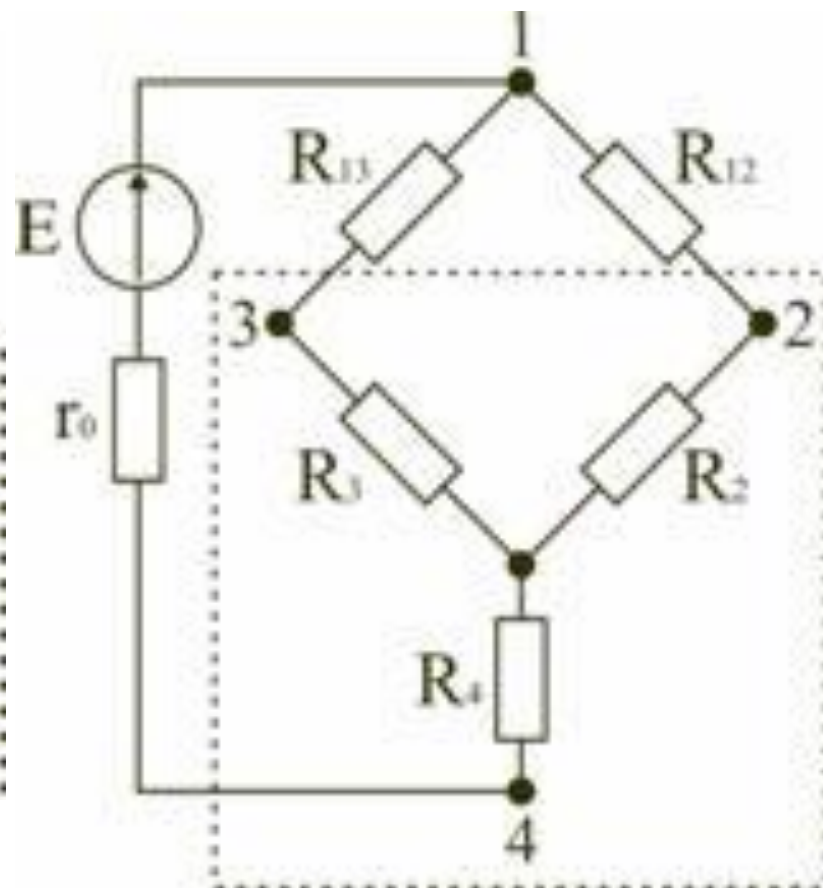
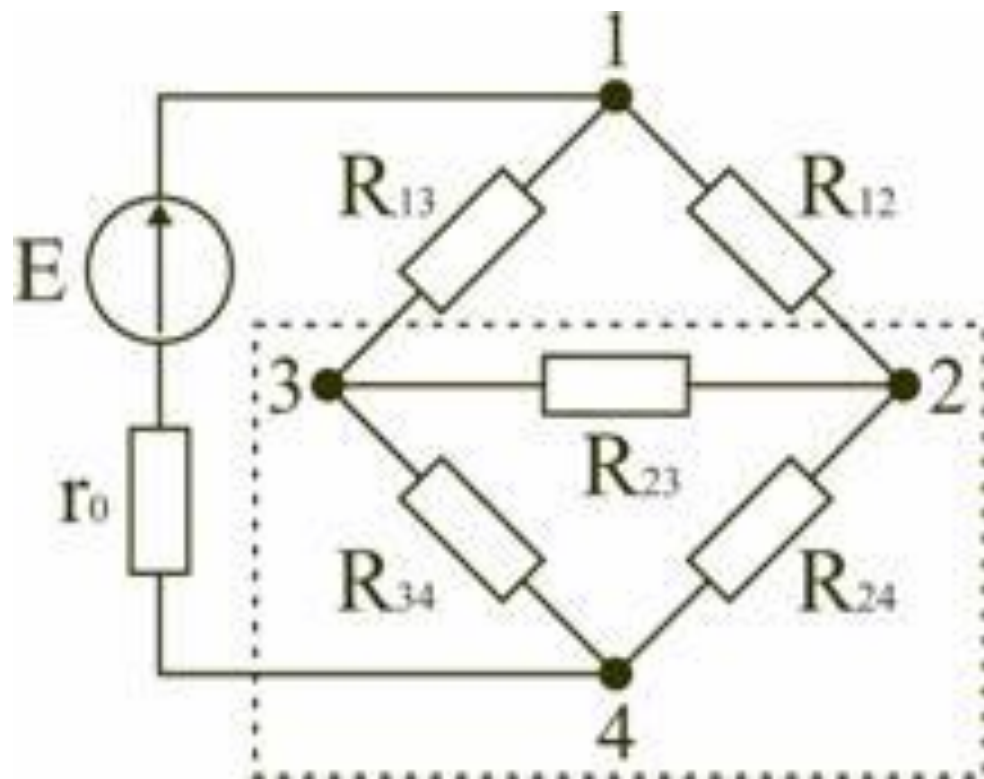


$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

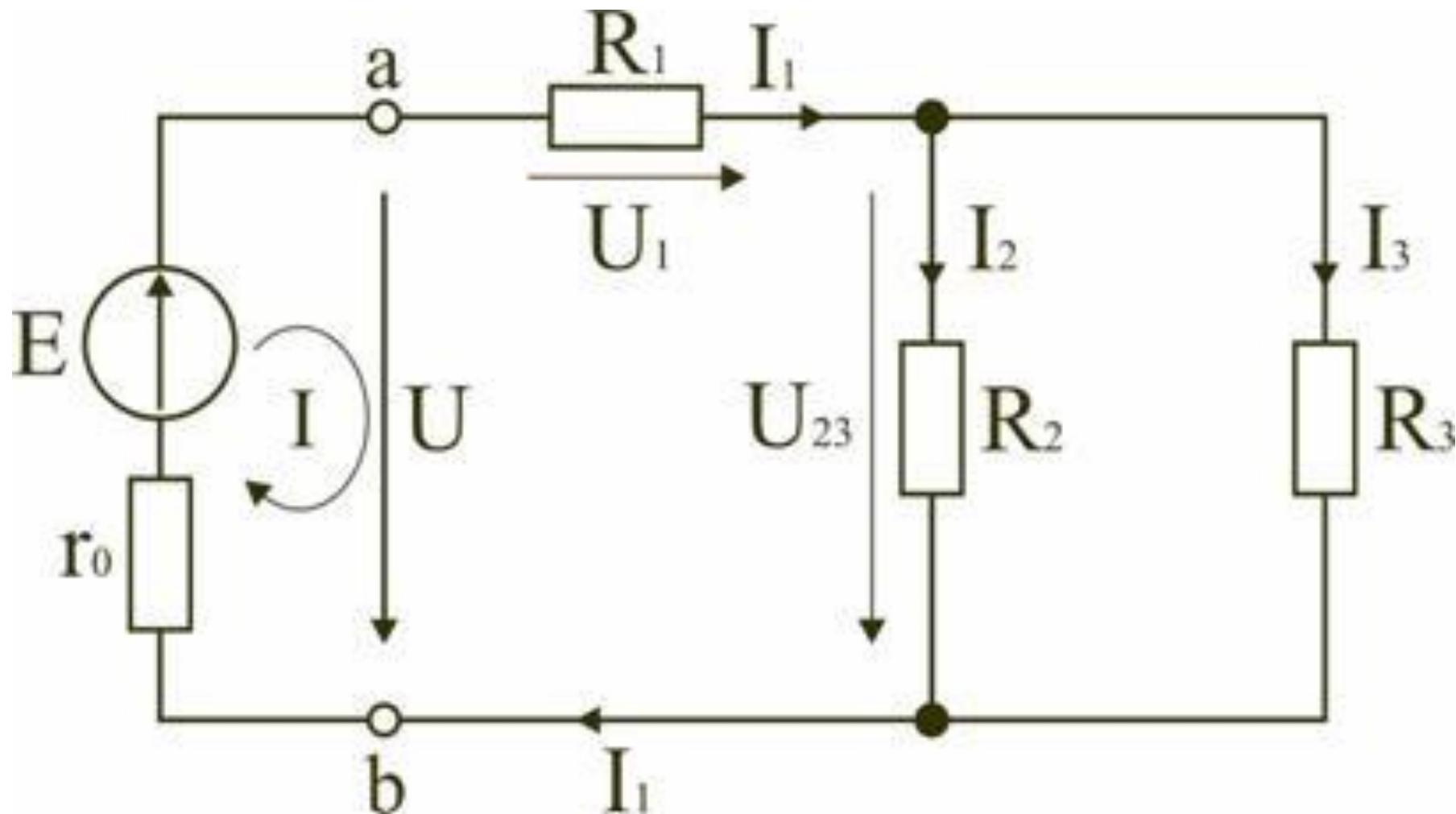
$$g_{\text{экв}} = g_1 + g_2 + g_3$$



# Соединение элементов электрической цепи по схемам «звезда» и «треугольник»



# Расчет электрической цепи с одним источником питания



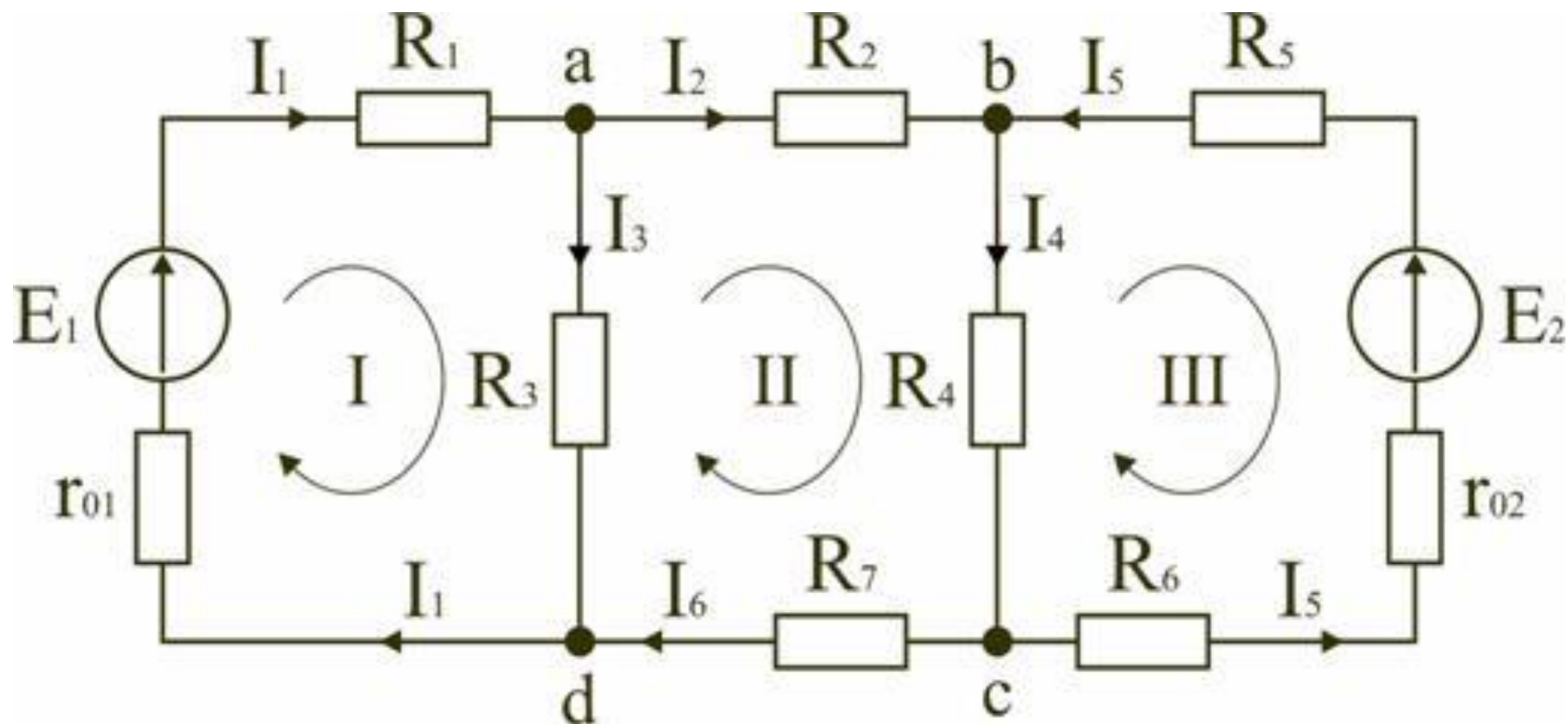
# Порядок расчета

- 1. Задание токов и напряжений на участках цепи.
- Резистор  $R_1$  включен последовательно с источником, поэтому ток  $I_1$  для них будет общим, токи в резисторах  $R_2$  и  $R_3$  обозначим соответственно  $I_2$  и  $I_3$ . Аналогично обозначим напряжения на участках цепи.
- 2. Расчет эквивалентного сопротивления цепи.
- Резисторы  $R_2$  и  $R_3$  включены по параллельной схеме и заменяются эквивалентным сопротивлением  $R_{23}$  :
- В результате схема замещения преобразуется в цепь с последовательно соединенными резисторами  $R_1$ ,  $R_{23}$  и  $r_0$ . Тогда эквивалентное сопротивление всей цепи запишется в виде:
- $R_{\Sigma} = r_0 + R_1 + R_{23}$ .
- 3. Расчет тока в цепи источника.
- Ток  $I_1$  определим по закону Ома:
- $I_1 = U/R_{\Sigma}$ .

- 4. Расчет напряжений на участках цепи.
- По закону Ома определим величины напряжений:
- $U_1 = R_1 I_1$ ;  $U_{23} = R_{23} I_1$ .
- Напряжение  $U$  на зажимах  $ab$  источника питания определим по второму закону Кирхгофа для контура I:
- $E = r_0 I_1 + U$ ;  $U = E - r_0 I_1$ .
- 5. Расчет токов и мощностей для всех участков цепи.
- Зная величину напряжения  $U_{23}$ , определим по закону Ома токи в резисторах  $R_2$  и  $R_3$ :  $I_2 = \frac{U_{23}}{R_2}$ ;  $I_3 = \frac{U_{23}}{R_3}$ .
- Определим величину активной электрической мощности, отдаваемую источником питания потребителям электрической энергии:
- $P = E \cdot I_1$ ,  $P_1 = R_1 I_1^2$ ;  $P_2 = R_2 I_2^2$ ;  $P_3 = R_3 I_3^2$ .
- В элементах схемы расходуются активные мощности:  $\Delta P = r_0 I_1^2$ .
- 
- На внутреннем сопротивлении  $r_0$  источника питания расходуются часть электрической мощности, отдаваемой источником. Эту мощность называют мощностью потерь  $\Delta P$ :  $\Delta P = r_0 I_1^2$ .
- 6. Проверка правильности расчетов.
- Эта проверка производится составлением уравнения баланса мощностей: мощность, отдаваемая источником питания, должна быть равна сумме мощностей, расходуемых в резистивных элементах схемы:

$$EI = (r_0 + R_1)I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2.$$

# Расчет разветвленной электрической цепи с несколькими источниками питания



- 1. Задание токов во всех ветвях.
- Направление токов выбираем произвольно, придерживаемся этого направления до конца расчета.
- 2. Определяем количество неизвестных токов  $m$  и число узлов  $n$ .
- 3. Составление уравнений по первому закону Кирхгофа для  $(n-1)$  узлов.
- Выбираем  $4-1=3$  узла (a, b, c) и для них записываем уравнения:
  - узел a:  $I_1 - I_2 - I_3 = 0$ ;
  - узел b:  $I_2 - I_4 + I_5 = 0$ ;
  - узел c:  $I_4 - I_5 + I_6 = 0$ .
- 4. Определяем число независимых контуров (содержит ветвь, не входящую ни в какой другой), находим их на схеме замещения.
- 5. Составление уравнений по второму закону Кирхгофа для найденных контуров.
- Необходимо составить  $6-3=3$  уравнения. В схеме выбираем контура I, II, III и для них записываем уравнения:
  - контур I:  $E_1 = (r_{01} + R_1) I_1 + R_3 I_3$ ;
  - контур II:  $0 = R_2 I_2 + R_4 I_4 + R_7 I_6 - R_3 I_3$ ;
  - контур III:  $-E_2 = -(r_{02} + R_5 + R_6) \cdot I_5 - R_4 I_4$ .
- 6. Решение полученной системы уравнений и анализ результатов.

- Полученная система из шести уравнений решается известными математическими методами. Если в результате расчетов численное значение тока получено со знаком «минус», это означает, что реальное направление тока данной ветви противоположно принятому в начале расчета. Если в ветвях с ЭДС токи совпадают по направлению с ЭДС, то данные элементы работают в режиме источников, отдавая энергию в схему. В тех ветвях, где направления тока и ЭДС не совпадают, источники ЭДС работают в режиме потребителя.

# . Проверка правильности расчетов

- Для проверки правильности произведенных расчетов можно на основании законов Кирхгофа написать уравнения для узлов и контуров схемы, которые не использовались при составлении исходной системы уравнений:
- узел d:
- $I_3 + I_6 - I_1 = 0$ ,
- внешний контур схемы:
- $E_1 - E_2 = (r_{01} + R_1) I_1 + R_2 I_2 - (r_{02} + R_5 + R_6) I_5 + R_7 I_6$ .
- Независимой проверкой является составление уравнения баланса мощностей с учетом режимов работы элементов схемы с ЭДС:  
$$E_1 I_1 + E_2 I_5 = (r_{01} + R_1) I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + (r_{02} + R_5 + R_6) I_5^2 + R_7 I_6^2$$
- Если активная мощность, поставляемая источниками питания, равна по величине активной мощности, израсходованной в пассивных элементах электрической цепи, то правильность расчетов подтверждена.