

# Теоретические основы электротехники



## *Лекция 2*

*Законы: Ома и Кирхгофа*

*Потенциальная диаграмма*

*Источники тока и напряжения*

преподаватель:

*доцент кафедры электротехники,  
автоматики и метрологии, к.п.н.*

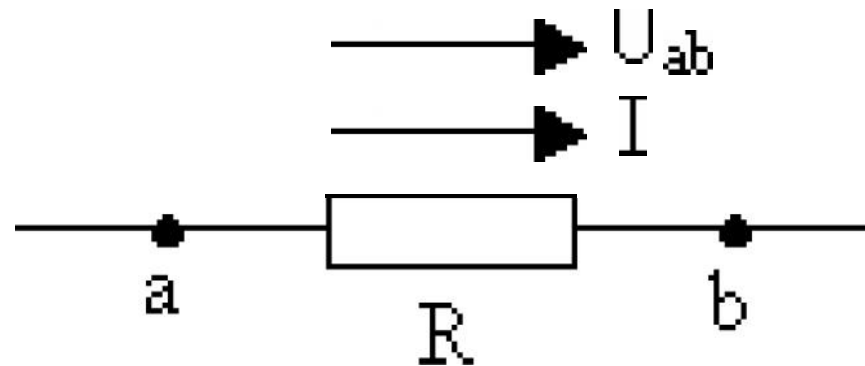
*Елена Артуровна Вахтина*

## ***ПЛАН***

1. Закон Ома для участка цепи
2. Законы Кирхгофа
3. Потенциальная диаграмма
4. Источники напряжения и ток
5. Задача для самостоятельной работы

# 1. Закон Ома для участка цепи

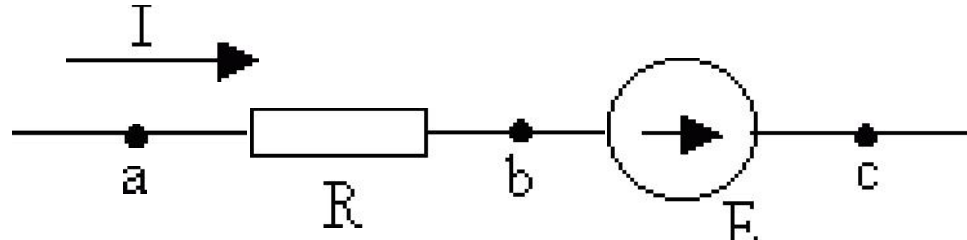
*a) не содержащего ЭДС*

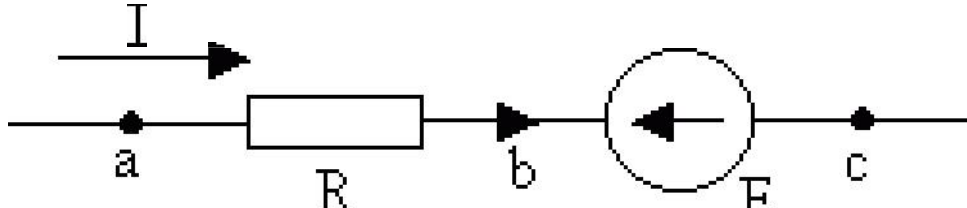


$$I = \frac{U_{ab}}{R} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R}$$

# 1. Закон Ома для участка цепи

б) содержащего ЭДС

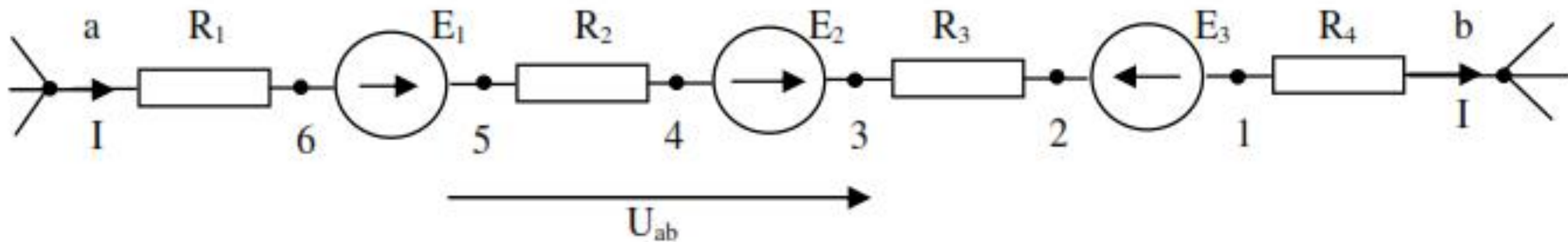
a)  
$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_c + E}{R} = \frac{U_{ac} + E}{R}$$

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

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

# 1. Закон Ома для участка цепи

в) содержащего несколько ЭДС



$$\varphi_a = \varphi_b + I \cdot R_4 + E_3 + I \cdot R_3 - E_2 + I \cdot R_2 - E_1 + I \cdot R_1$$

$$\varphi_a - \varphi_b = U_{ab} = E_3 - E_1 - E_2 + I(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) \rightarrow$$

**Обобщенный закон Ома для участка цепи с ЭДС**

$$I = \frac{U_{ab} + E_1 + E_2 - E_3}{\sum R} = \frac{U_{ab} \pm \sum E}{\sum R}$$

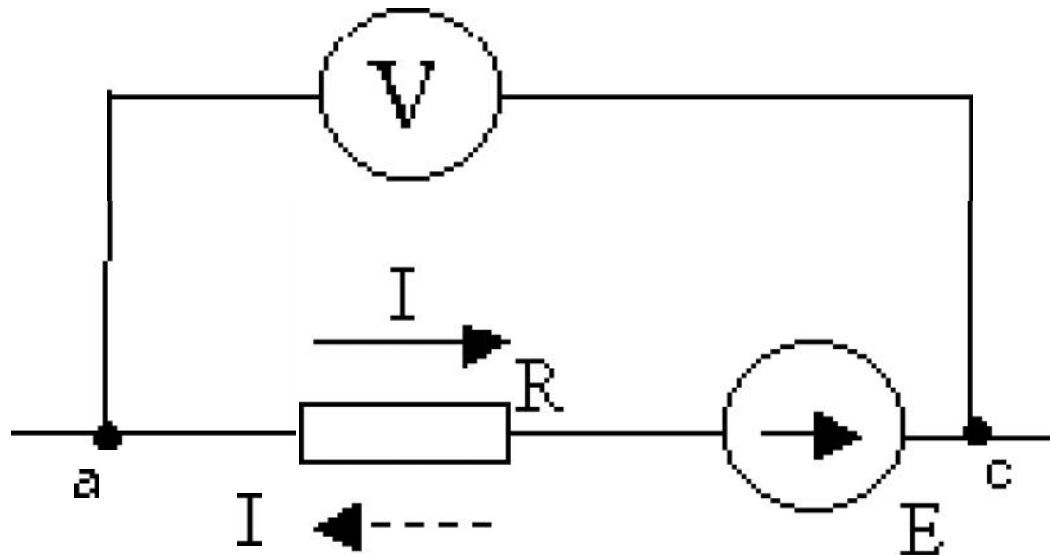
**ПРИМЕР**

К зажимам (*ac*) схемы подключен вольтметр *V*.

Если ток  $I = 10 \text{ A}$  течет от (*a* к *c*), то показания вольтметра  $V = -18 \text{ В}$ .

Если ток  $I = 10 \text{ A}$  течет от (*c* к *a*), то показания вольтметра  $V = -20 \text{ В}$ .

Определить величину сопротивления *R* и ЭДС *E*.



## Решение:

Составим уравнения для двух случаев:

$$(1) U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = IR - E = 10R - E = -18$$

$$(2) U_{ca} = \varphi_c - \varphi_a = -IR - E = -10R - E = -20$$



$$-2E = -38, E = 19 \text{ В}$$

Подставляем в (1)  $10R - 19 = -18$ ,  $10R = 1$ ,  $r = 0,1 \text{ Ом}$

## 2. Законы Кирхгофа

### Топологические параметры электрической цепи:

**Ветвь (В)** – участок электрической цепи, вдоль которого протекает один и тот же ток;

**Узел (У)** – место соединения не менее трех ветвей;

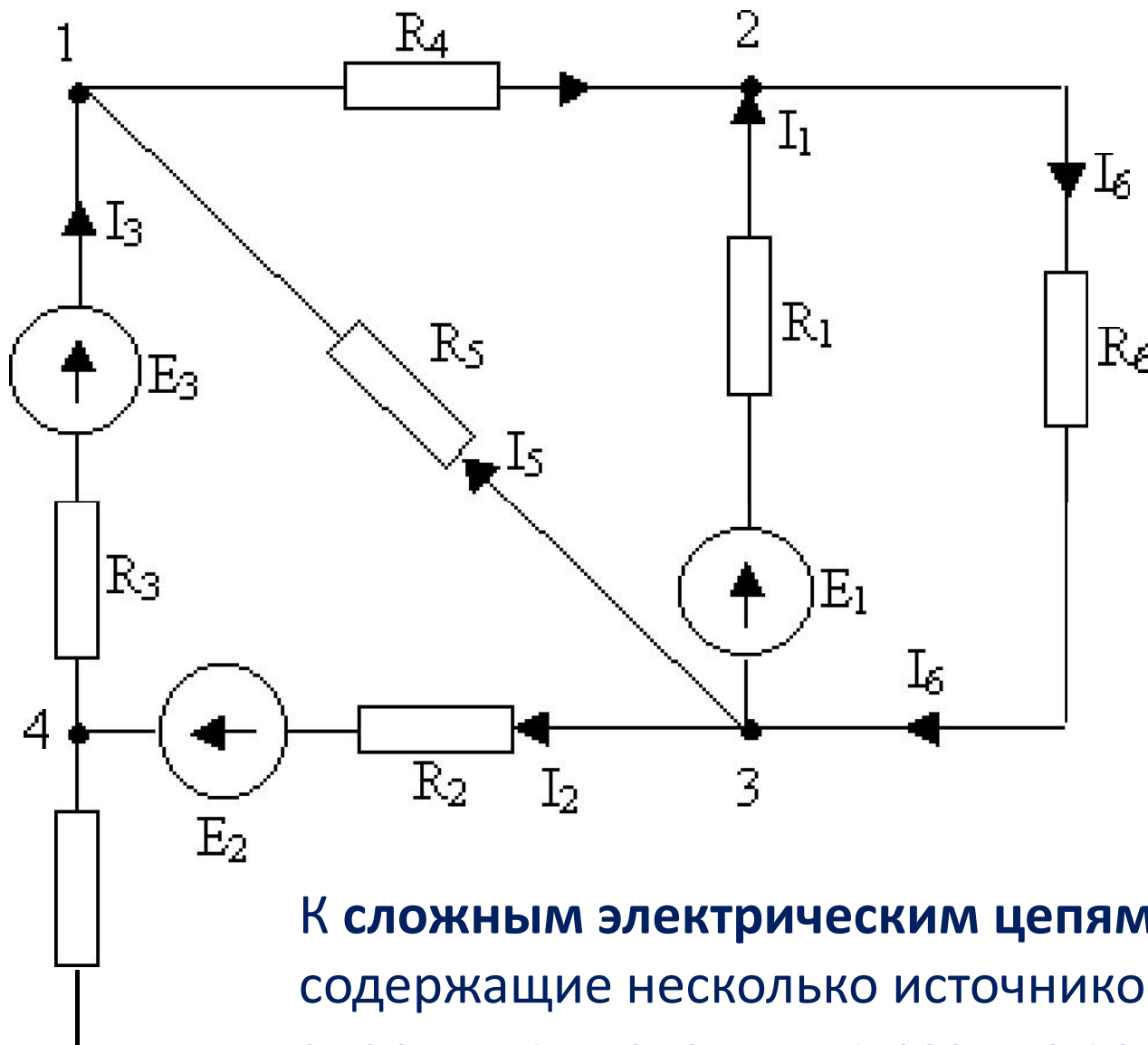
**Контур (К)** – последовательность ветвей электрической цепи, образующая замкнутый путь.

*Линейно независимые контуры  $k_n$  отличаются друг от друга хотя бы одной ветвью.*

Число независимых контуров определяется:

$$k_n = B - (Y - 1)$$

## 2. Законы Кирхгофа



- Для расчета сложной эл. цепи используются различные методы.
- Одним из универсальных является метод **законов Кирхгофа**

К сложным электрическим цепям относят цепи, содержащие несколько источников электрической энергии, включенных в разные ветви.

## 2. Первый закон Кирхгофа

Применяется к токам в узлах схемы и формулируется следующим образом:

**Алгебраическая сумма токов в любом узле эл. цепи равна нулю**

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

*или*

**В любом узле эл. цепи сумма токов подтекающих к узлу, равна сумме токов, оттекающих от узла.**

Например, для узла 3

$$I_6 - I_2 - I_5 - I_1 = 0 \quad \text{или} \quad I_6 = I_2 + I_5 + I_1$$

Подтекающий к узлу ток (+), оттекающий (-)

## 2. Второй закон Кирхгофа

применяется к контурам эл. цепи и формулируется следующим образом:

*Алгебраическая сумма напряжений вдоль замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре.*

$$\sum I_i \cdot R_i = \sum E_i$$

слагаемые берутся со знаком (+), если они совпадают с направлением обхода контура и наоборот.

Например, для контура (1, 2, 3, 4) при обходе элементов цепи по часовой стрелке можно записать:

$$\sum_{k=1}^4 I_k \cdot R_k = \sum_{k=1}^3 E_k$$

$$-I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 + I_4 \cdot R_4 = -E_1 + E_2 + E_3$$

## 2. Законы Кирхгофа

### Порядок расчета

- Выбрать (произвольно) направления токов во всех ветвях схемы, а также направления обхода контуров;
- По первому закону Кирхгофа составляется число уравнений, равное числу узлов без единицы, т.е.

$$N_1 = Y - 1$$

- По второму закону составляется число уравнений, равное числу ветвей, за вычетом числа уравнений, составляемых по первому закону, т.е.

$$N_2 = B - (Y - 1) = B - Y + 1$$

- *Замечание.* Если в схему входит ветвь с источником тока ( $I_K$ ), то число уравнений будет равно:

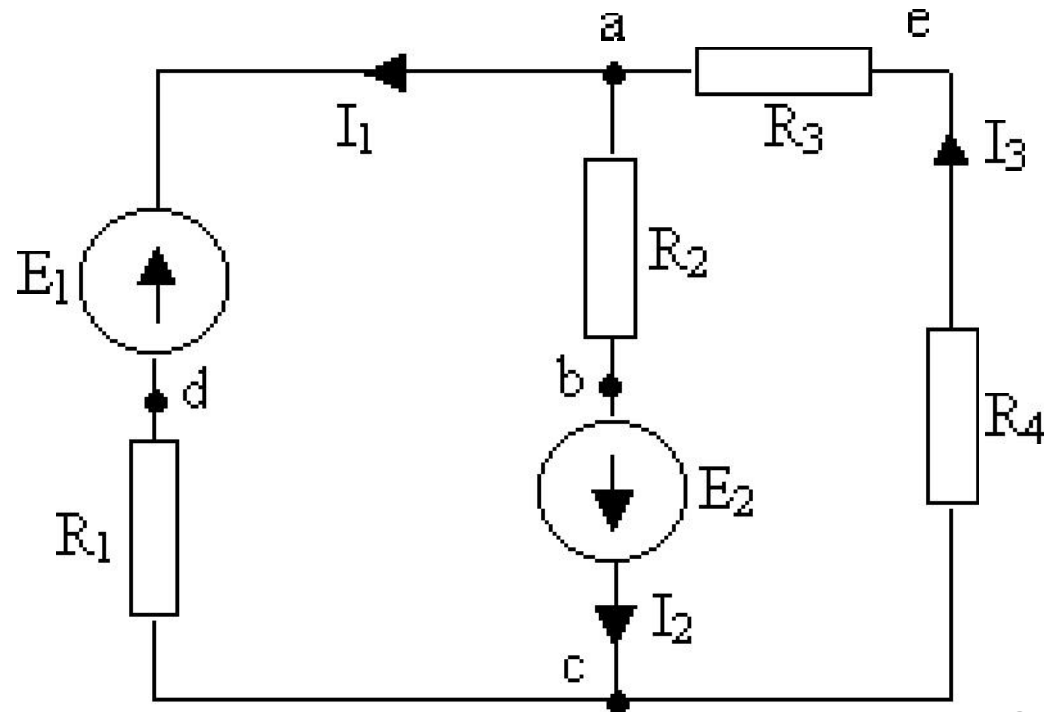
$$N_2 = (B - B_{ист}) - Y + 1$$

### 3. Потенциальная диаграмма (ПД)

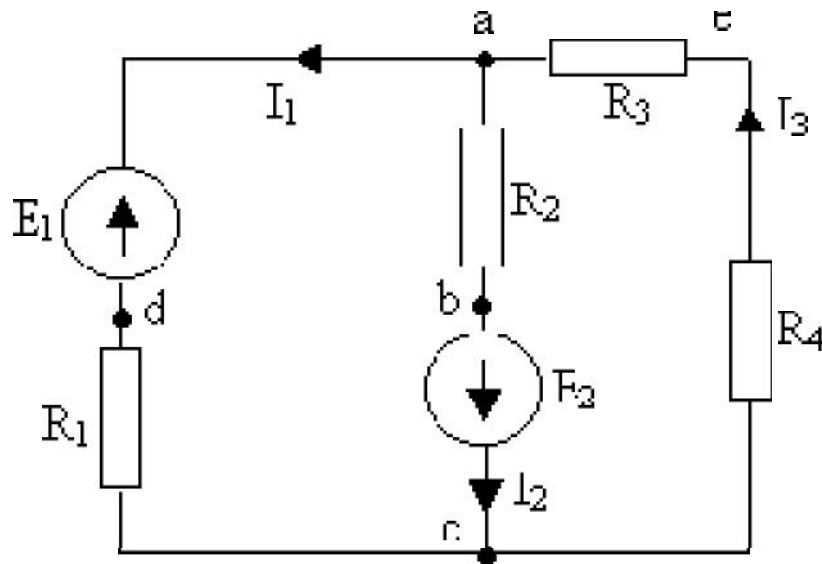
*Это график распределения потенциала вдоль какого-либо участка цепи или замкнутого контура.*

➤ По оси абсцисс откладывают сопротивления вдоль контура (в масштабе), начиная с какой-либо произвольной точки, а по оси ординат – потенциалы.

➤ Рассмотрим последовательность построения ПД для контура (*abcea*) схемы



### 3. Потенциальная диаграмма (ПД)



Параметры цепи:

$$E_1 = 80 \text{ В}; E_2 = 64 \text{ В.}$$

$$R_1 = 6 \text{ Ом}; R_2 = 4 \text{ Ом}; R_3 = 3 \text{ Ом};$$

$$R_4 = 1 \text{ Ом.}$$

$$I_1 = 14 \text{ А}; I_2 = 15 \text{ А}; I_3 = 1 \text{ А};$$

- Подсчитываем суммарное сопротивление выбранного контура:  $R_{\Sigma} = 4 + 3 + 1 = 8 \text{ Ом}$ .
- Выберем масштаб:  $M_R = 2 \text{ Ом/см}$ ,  $M_E = 20 \text{ В/см}$
- Примем потенциал точки (**a**) равным нулю. Эту точку на диаграмме поместим в начало координат

### 3. Потенциальная диаграмма (ПД)

$$b = a - I_2 \cdot R_2 = 0 - 15 \cdot 4 = -60 \text{ В.}$$

Координаты точки (**b**):  $x = 4, y = -60$ .

$$c = b + E_2 = -60 + 64 = 4 \text{ В.}$$

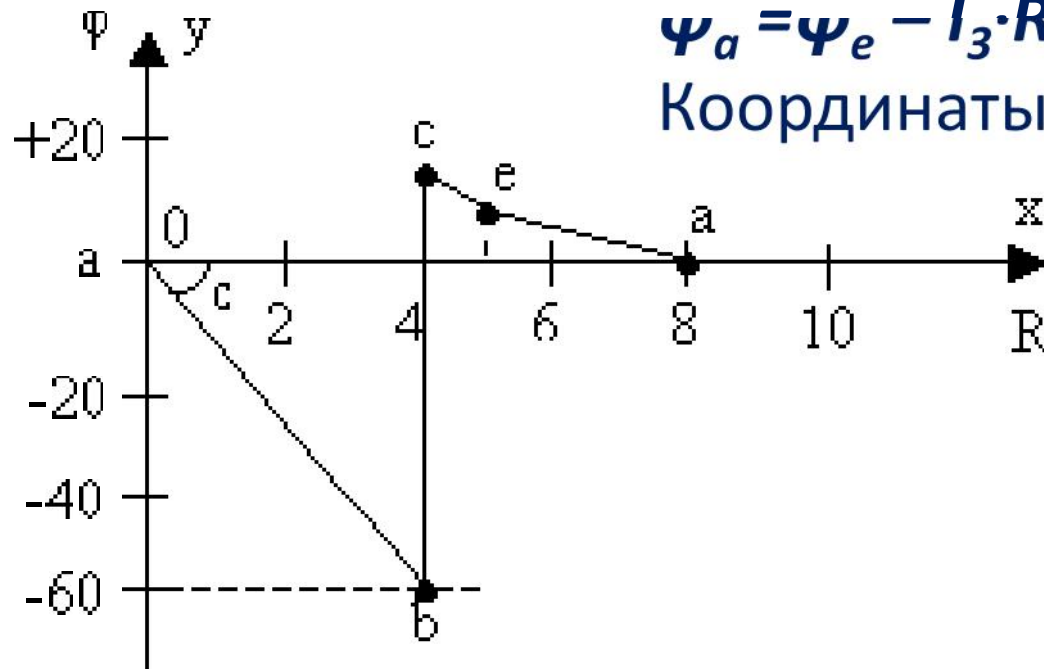
Координаты точки (**c**):  $x = 4, y = 4$ .

$$e = c - I_3 \cdot R_4 = 4 - 1 \cdot 1 = 3 \text{ В.}$$

Координаты точки (**e**):  $x = 5, y = 3$ .

$$\psi_a = \psi_e - I_3 \cdot R_3 = 3 - 1 \cdot 3 = 0 \text{ В.}$$

Координаты точки (**a**):  $x = 8, y = 0$ .

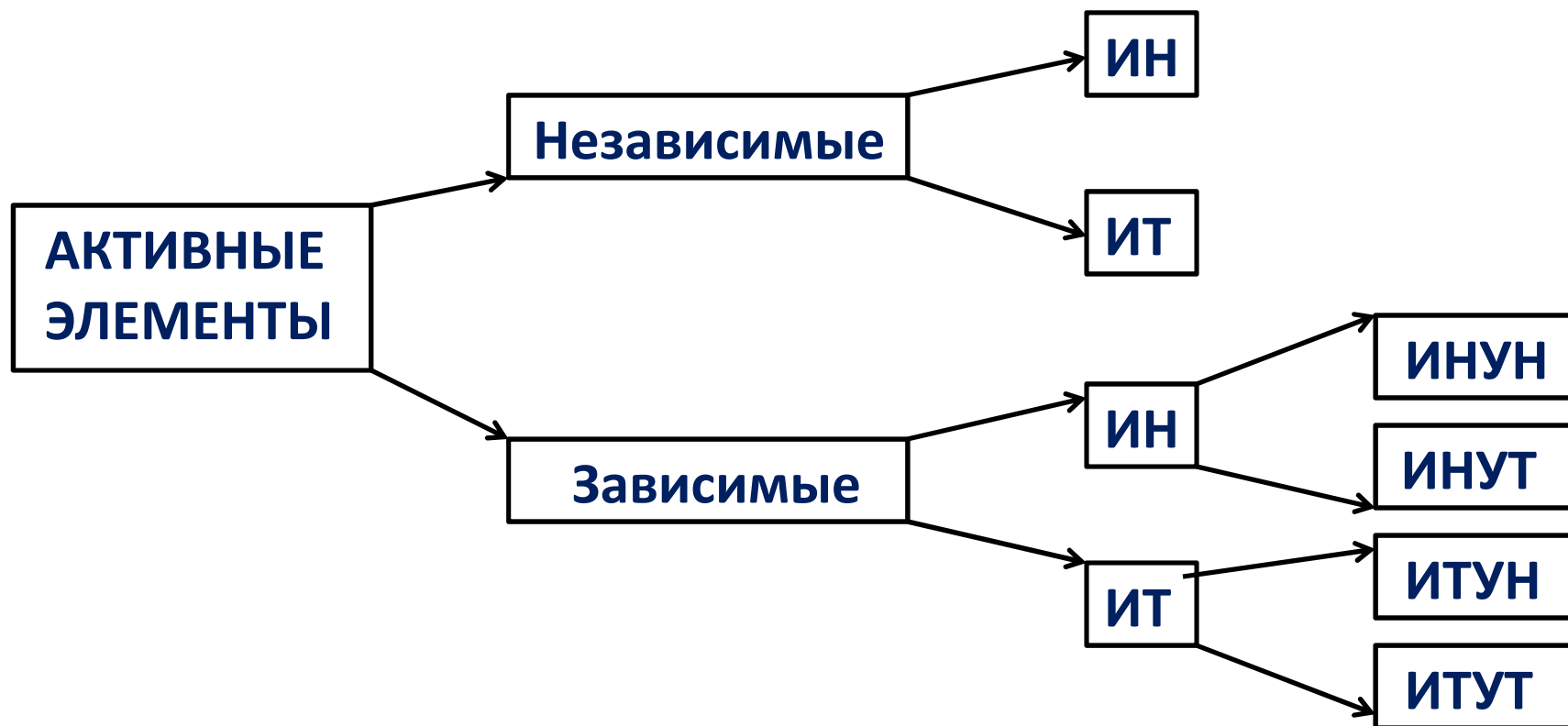


### 3. Потенциальная диаграмма

#### **Замечание.**

- При заземлении любой точки схемы токораспределение в схеме не меняется, т.к. никаких новых ветвей, по которым могли бы протекать токи, при этом не образуется. Иначе будет, если заземлить две и более точек схемы. В этом случае через землю образуются дополнительные ветви, сама схема становится отличной от исходной и токораспределение в ней меняется.
- Всегда потенциалы в схеме рассчитываются относительно какой-то точки, потенциал которой принимается за нуль, т.е. известен.

## 4. Источники напряжения и тока



**ИН** – источник напряжения

**ИТ** – источник тока

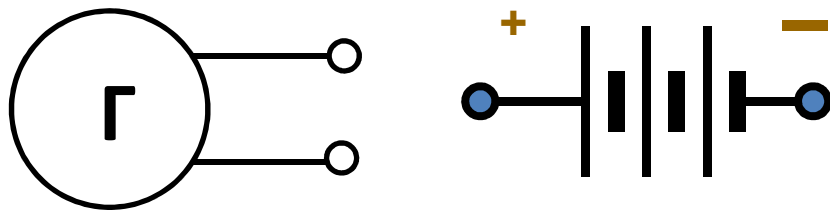
**УН** – управляемый напряжением

**УТ** – управляемый током

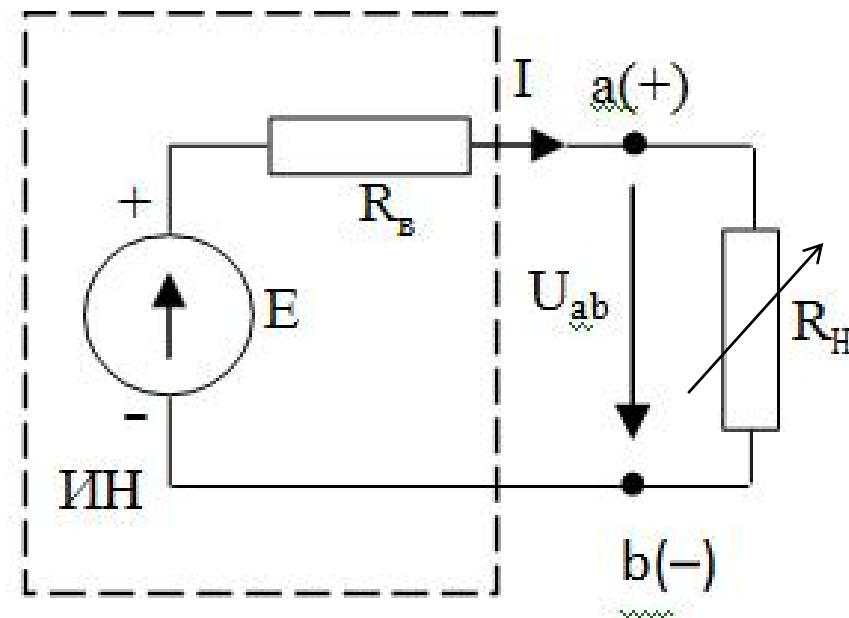
## 4. Источник напряжения ИН

**ИН** – это источник эл. энергии, характеризующийся ЭДС  $E$  и внутренним сопротивлением  $R_B$ .

**Примеры ИН:**



В расчетах **ИН**  
заменяют схемой  
замещения  $\Rightarrow$

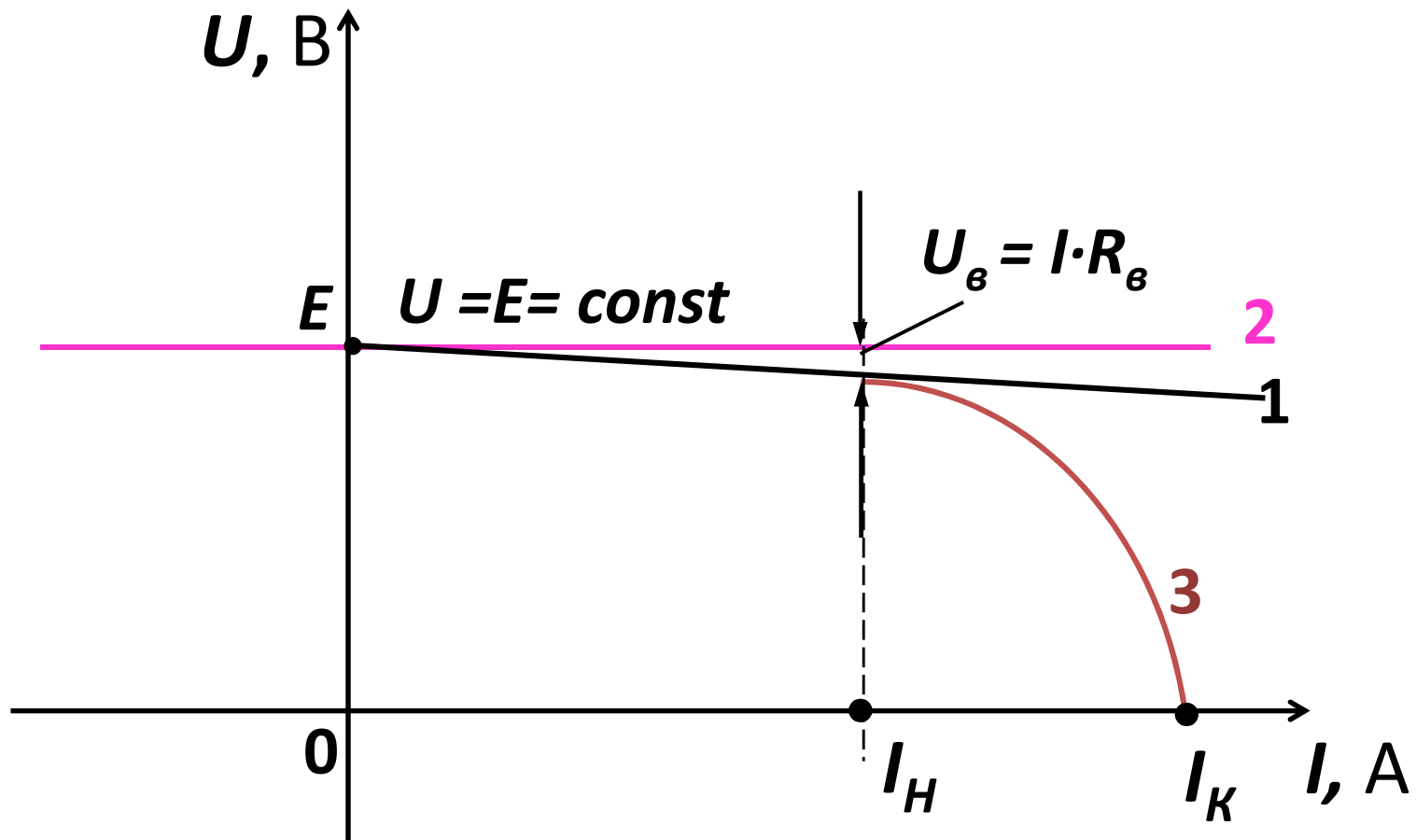


**ИН** представлен двумя элементами:  
ЭДС  $E$  и последовательного с ним резистора  $R_B$

## 4. Источник напряжения ИН

Режим работы	Формулы	График $U = f(I)$
1. Нагрузки	<p>При подключении нагрузки <math>R_H</math> в цепи возникает ток <math>I</math> и <math>U_{ab} = E - U_B = E - I \cdot R_B</math></p> <p>а) если <math>0 &lt; I \leq I_H</math>, тогда <math>U_{ab}</math> ↓ линейно</p> <p>б) при дальнейшем ↑ <math>I</math> и ↓ <math>R_H</math> линейность нарушается, т.к. <math>E</math> ↓, а <math>R_B</math> ↑</p>	<p>-----&gt; <b>1</b></p> <p>-----&gt; <b>3</b></p>
2. Холостого хода (ХХ)	<p>а) <math>I=0</math>, <math>U_{ab} = U_a - U_b = E</math></p> <p>б) <math>R_B \ll R_H</math> и напряжение <math>U_B \ll U_{ab}</math> и им можно пренебречь <math>U_B = I \cdot R_B = 0</math></p> <p><math>U_{ab} \approx E</math> ИН наз. <b>идеальным</b></p>	<p>-----&gt; <b>2</b></p>
3. Короткого замыкания (КЗ)	<p>При <math>R_H=0</math> и <math>U_{ab}=0</math> протекает ток КЗ</p> <p><math>I_K = E / R_B</math>, т.к. <math>I_H \ll I_K</math></p> <p>режим работы ИН аварийный</p>	

$U = f(I)$  – внешняя характеристика ИН - это зависимость между напряжением на выводах источника и током



**4. Источник тока ИТ** – это источник эл. энергии, характеризующийся током  $J$  и внутренней проводимостью  $G_{вт}$

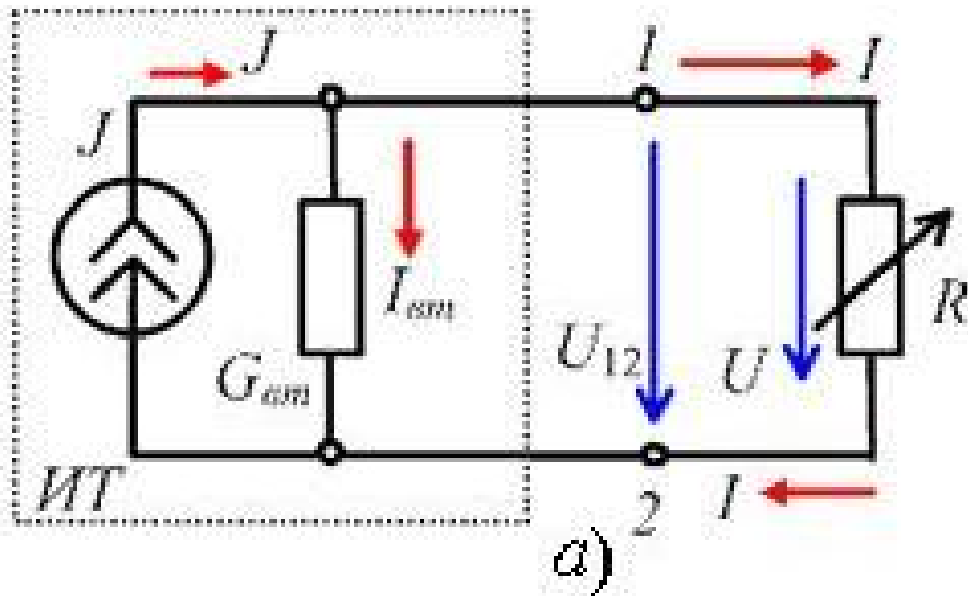
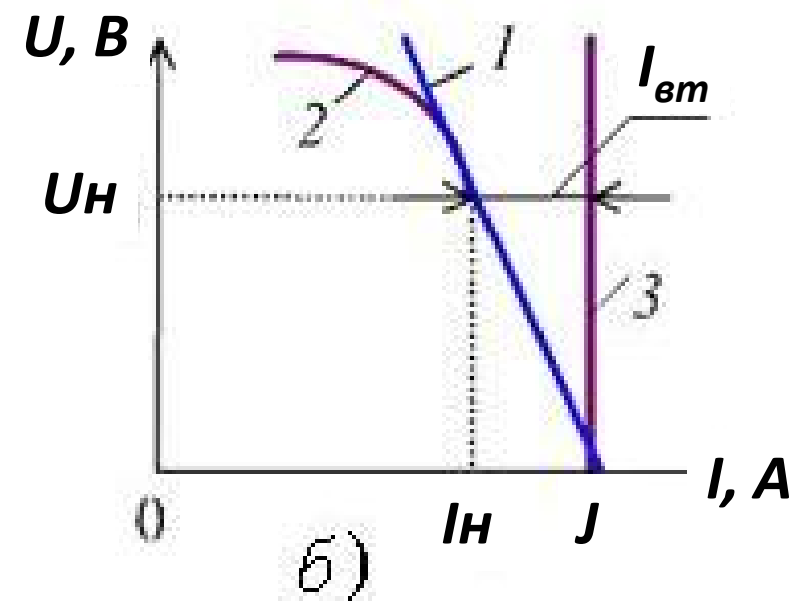


Схема замещения ИТ



Внешняя характеристика ИТ  
 $I = f(U)$

## 4. Источник тока ИТ

На схеме замещения рис. (а) **ИТ** представлен в виде идеального **ИТ** (с бесконечно большим сопротивлением) с заданным током  $J$  и параллельно с ним соединенного резистора  $R_{вт}$  с внутренней проводимостью  $G_{вт} = 1/R_{вт}$ .

- Как правило,  $G_{вт} \ll G$  ( $R_{вт} \gg R$ ) значительно меньшей проводимости приемника  $G = 1/R$ .
- В качестве примера **ИТ** можно привести схему замещения выходной цепи транзисторного усилительного каскада с общим эмиттером.

## 4. Источник тока

- ✓ Пренебрегая сопротивлением проводов и принимая  $U_{12} = U$ , по первому закону Кирхгофа получим:

$$J = I_{\text{вт}} + I = G_{\text{вт}} \cdot U_{12} + I = G_{\text{вт}} \cdot U + I,$$

где  $U = RI$  - напряжение на зажимах приемника.

- ✓ Тогда уравнение внешней характеристики  $I = f(U)$  ИТ:

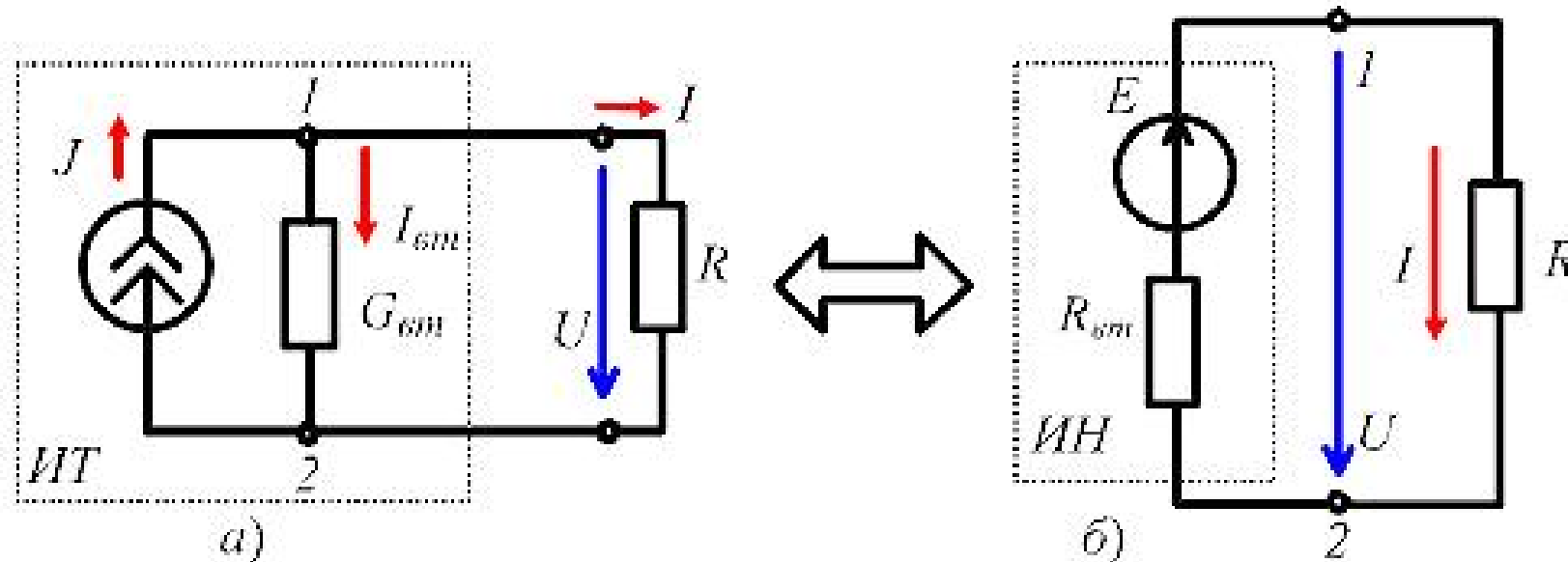
$$I = J - I_{\text{вт}} = J - G_{\text{вт}} \cdot U$$

## 4. Источник тока

Режим работы		График $U = f(I)$
1. Нагрузки	<p>При увеличении <math>R</math> приемника ток изменяется незначительно, практически по линейному закону, от значения <math>J</math> до номинального значения <math>I_n</math>. Напряжение на зажимах ИТ изменяется в широких пределах (от 0 до <math>U_n</math>).</p>	<p>— → 1</p>
2) Короткого замыкания (КЗ)	<p>Если <math>G_{вт} \ll G</math> (<math>R_{вт} \gg R</math>), то при <math>U = U_{12}</math> ток <math>I_{вт} \ll J</math>; ИТ находится в режиме, близком к КЗ. Значением тока <math>I_{вт} = G_{вт} \cdot U</math> можно пренебречь и ветвь с <math>G_{вт}</math> можно из схемы исключить. Такой ИТ наз. <b>идеальным</b> ИТ (источником с заданным током <math>J</math>). <math>I = J</math> и <math>R_{вт} = \infty</math>.</p>	<p>— → 3</p>
3) Холостого хода (ХХ)	<p>Для идеального ИТ исключается</p>	

## 4. Взаимные преобразования ИН и ИТ

При расчете эл. цепи возникает необходимость эквивалентной замены ИТ на ИН и обратно



### Задача:

**ИТ** с параметрами  $J$  и  $G_{em}$  преобразовать в **ИН** с параметрами  $E$  и  $R_{em}$ . Ток  $I$  в приемнике и напряжение  $U$  на его зажимах должны остаться неизменными.

## 4. Взаимные преобразования ИН и ИТ

Уравнение внешней характеристики **ИТ**

$$I = J - G_{\text{вт}} \cdot U$$

преобразуем в уравнение внешней характеристики **ИН**, поделив все его члены на проводимость  $G_{\text{вт}}$ :

$$I/G_{\text{вт}} = J/G_{\text{вт}} - U.$$

Откуда

$$U = J/G_{\text{вт}} - (1/G_{\text{вт}})I.$$

Сравним с внешней характеристикой **ИН**

$$U = E - R_{\text{вт}} \cdot I$$

Учитывая, что напряжение и ток в приемнике должны быть одинаковыми для обеих схем, получим связь параметров **ИН** с параметрами **ИТ**:

$$R_{\text{вт}} = 1/G_{\text{вт}} \quad \text{и} \quad E = J/G_{\text{вт}}$$

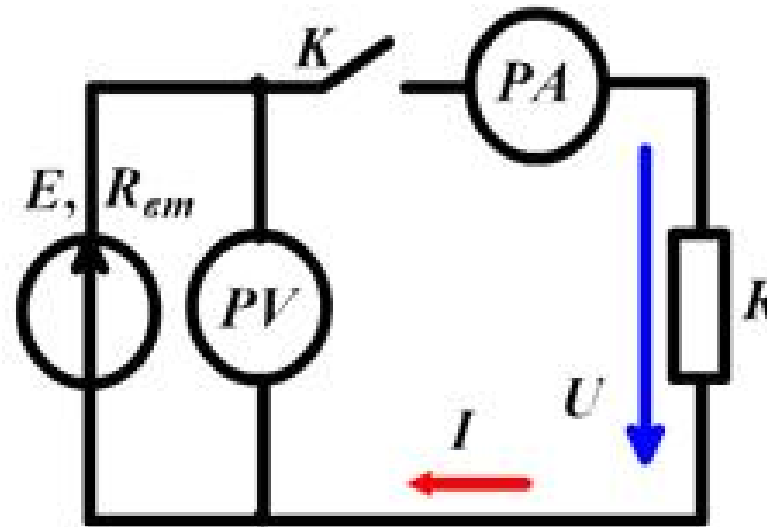
## 4. Взаимные преобразования ИН и ИТ

❖ Итак, чтобы определить параметры **ИН**, зная параметры  $J$  и  $G_{вт}$  **ИТ**, необходимо найти его внутреннее сопротивление  $R_{вт} = 1/G_{вт}$  и определить ЭДС  $E = J/G_{вт}$ .

❖ Обратное преобразование **ИН** в **ИТ** осуществляют, пользуясь соотношениями:

$$G_{вт} = 1/R_{вт} \text{ и } J = E/R_{вт} = E \cdot G_{вт}.$$

## 5. Задача для самостоятельной работы



При разомкнутом ключе  $K$  показание вольтметра  $2,1 \text{ В}$ . Когда ключ замкнут, амперметр фиксирует ток  $1 \text{ А}$ . Сопротивление приёмника  $R = 2 \text{ Ом}$ .

- Определить ЭДС источника напряжения  $E$ , внутреннее сопротивление  $R_{вт}$  и напряжение  $U$  на зажимах приёмника.
- Построить график внешней характеристики  $U = f(I)$  при изменении сопротивления нагрузки от  $1$  до  $40 \text{ Ом}$ .