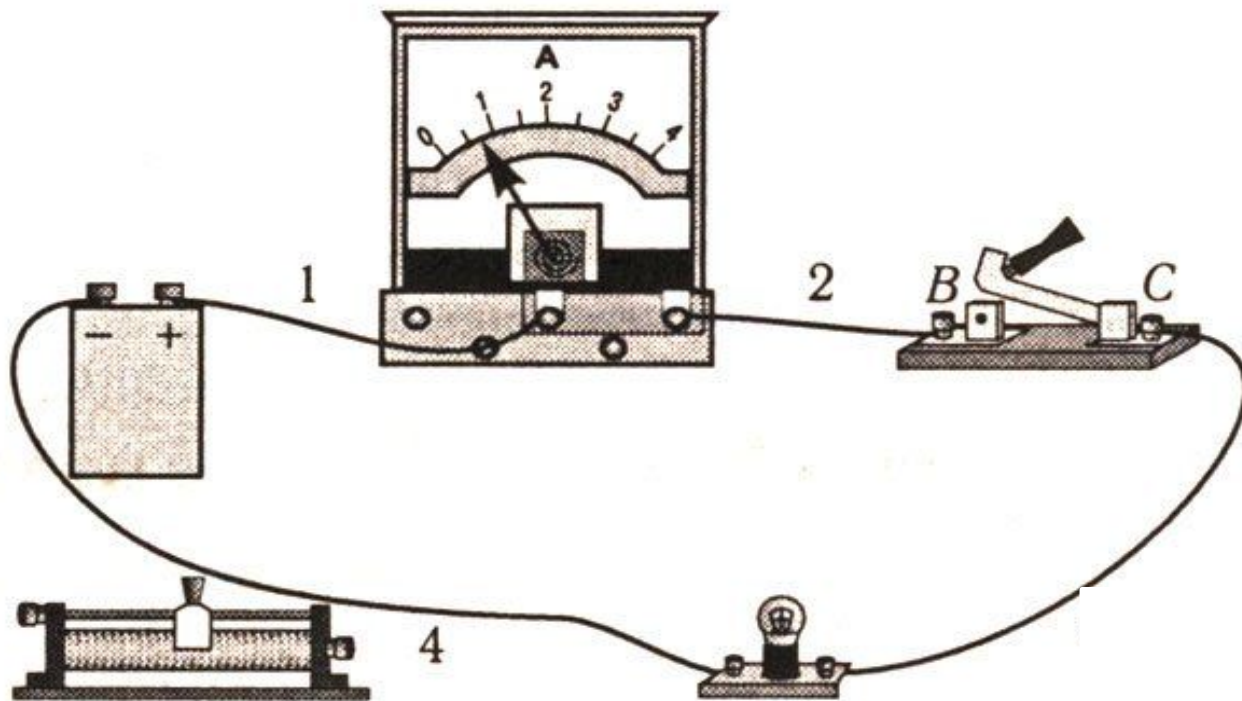


# ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК



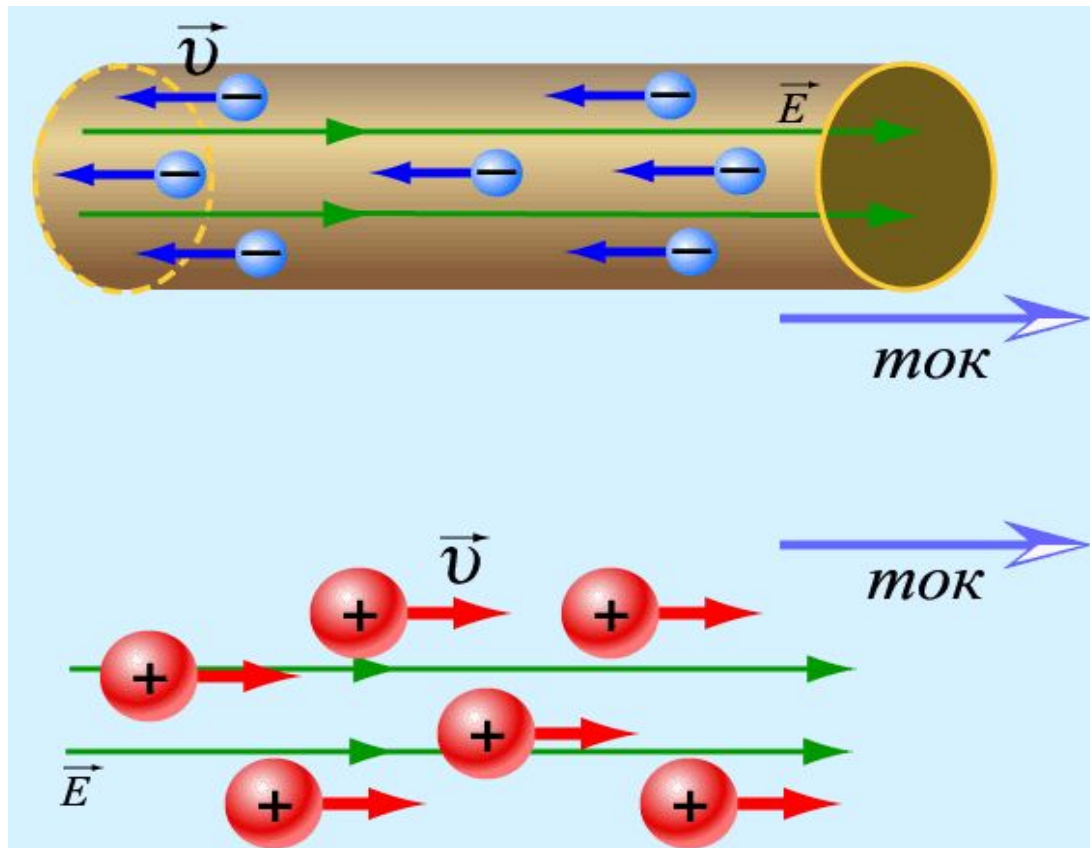
# 1. Электрический ток

Электрический ток – это упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.

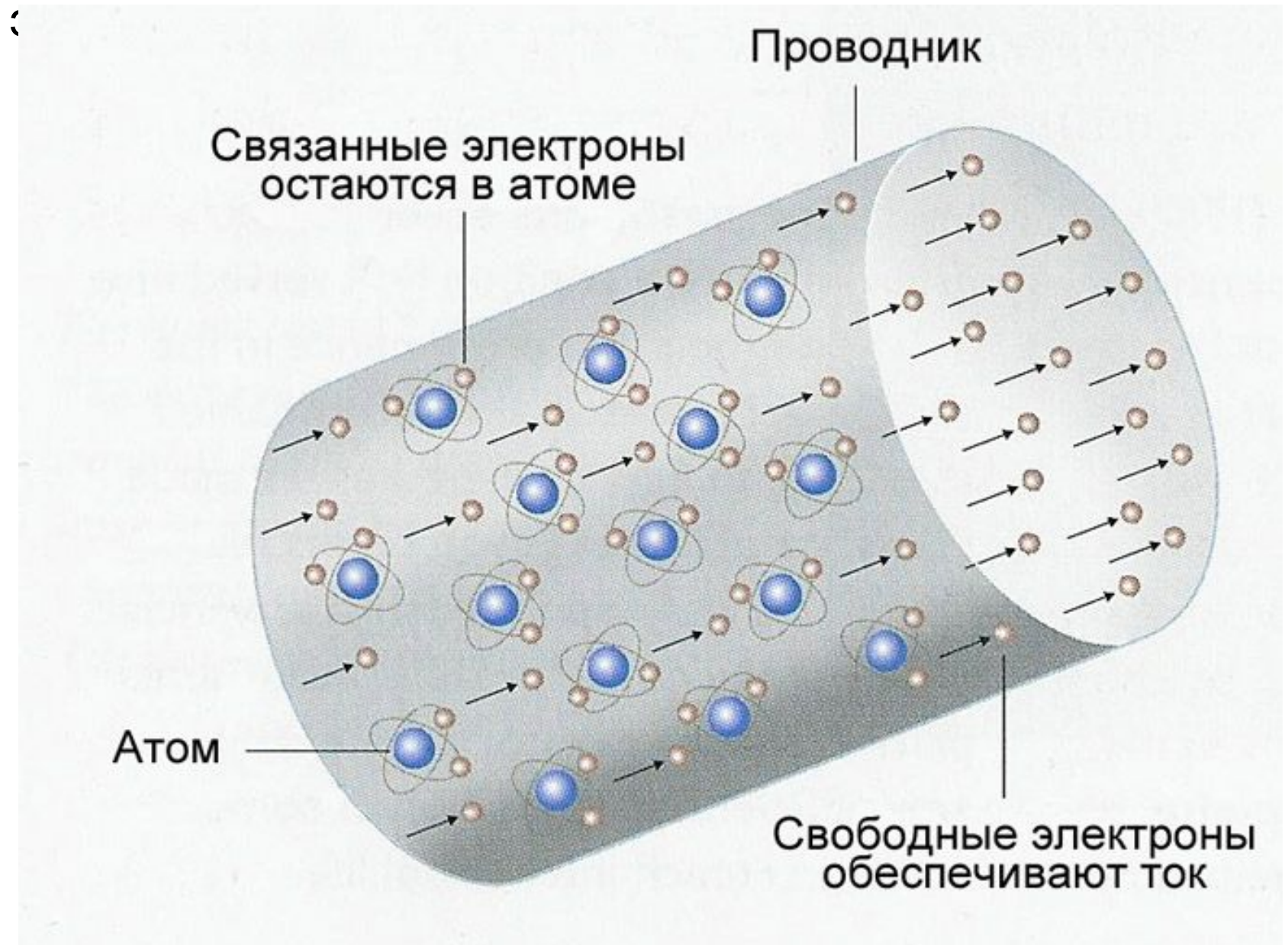
Условия существования электрического тока:

- Наличие свободных носителей заряда (электронов, ионов);
- Наличие электрического поля.

За направление тока условно принимают направление движения **положительных** зарядов.



# Ток в проводнике создается свободными



## 2. Источники тока

Источники тока – устройства, способные создавать и поддерживать разность потенциалов за счет работы сил неэлектрического происхождения.

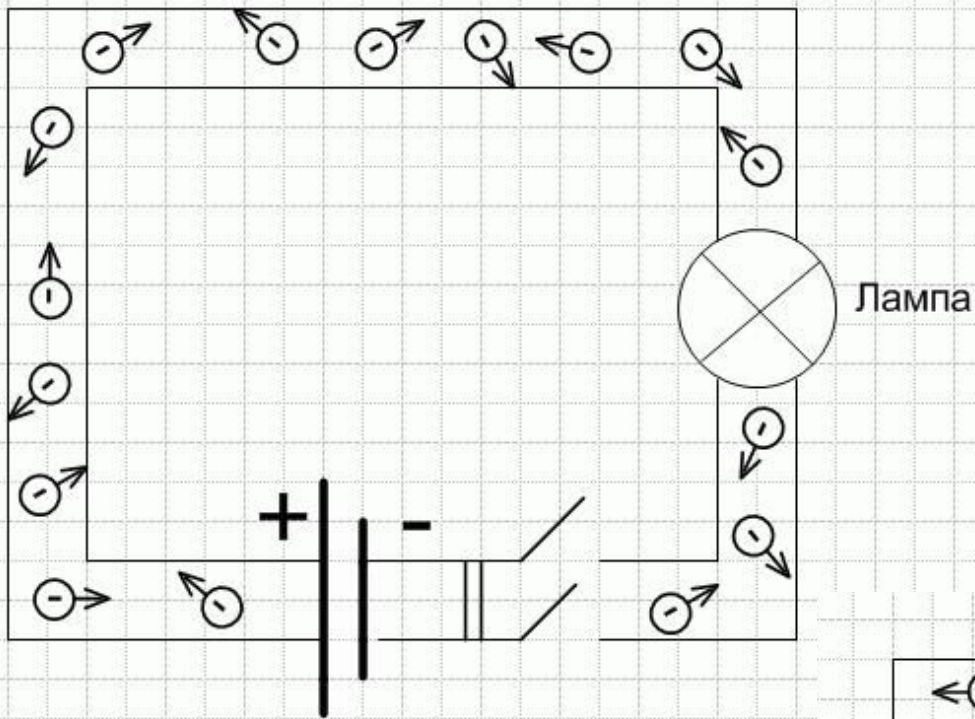


- условное обозначение источников тока

Сторонние силы – это силы неэлектрического происхождения, действующие на заряды со стороны источника тока.

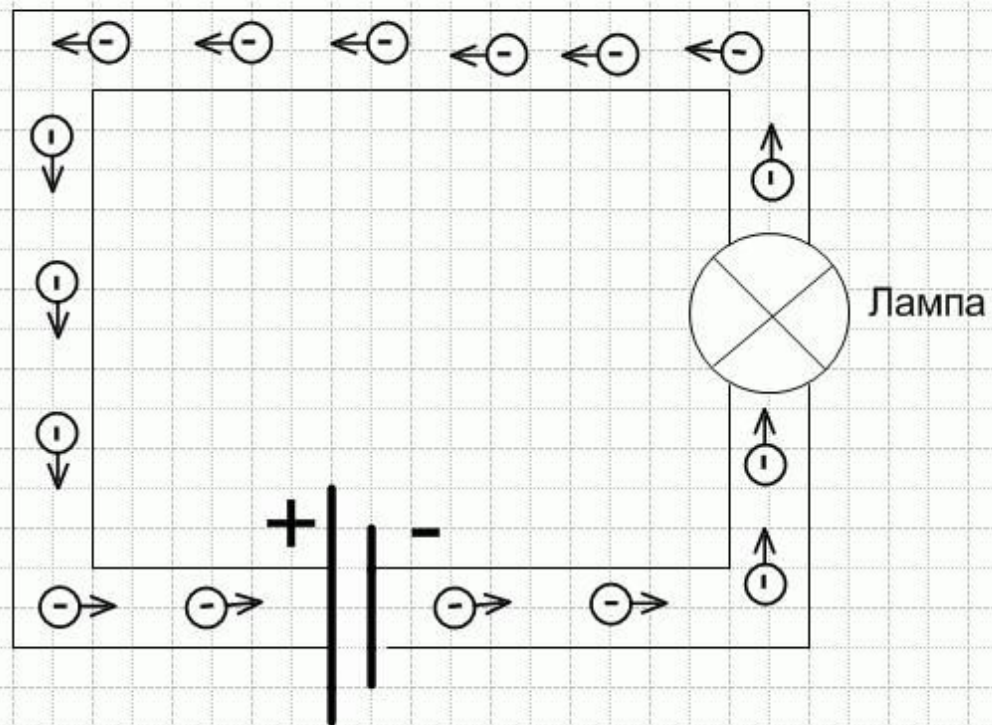
Электрическая цепь – совокупность устройств и элементов, предназначенных для протекания электрического тока.

Для поддержания напряжения цепь должна быть замкнута на источник тока.



разомкнутая  
цепь

замкнутая  
цепь



# Примеры источников тока



Га

(6

Ге

Э

Те

Ф

ет

# 3. Характеристики тока

## I. Сила тока.

Сила тока – это физическая величина, равная заряду, прошедшему через поперечное сечение проводника за единицу времени.

$I$  – сила тока, [А]

$$I = \frac{dq}{dt} \quad \text{- определение силы тока}$$

$dq$  – малый заряд, прошедший через сечение проводника за малое время  $dt$

## II. Плотность

Плотность тока – это физическая величина, равная силе тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника, перпендикулярного направлению тока.

$j$  – плотность тока, [А/м<sup>2</sup>]

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}} \quad \text{- определение плотности тока}$$

$dI$  – малый ток, прошедший через малое сечение проводника  $dS_{\perp}$ , перпендикулярное току.

Плотность тока  $j$  – векторная величина.

Заряд, переносимый через поперечное сечение проводника за время  $dt$ :

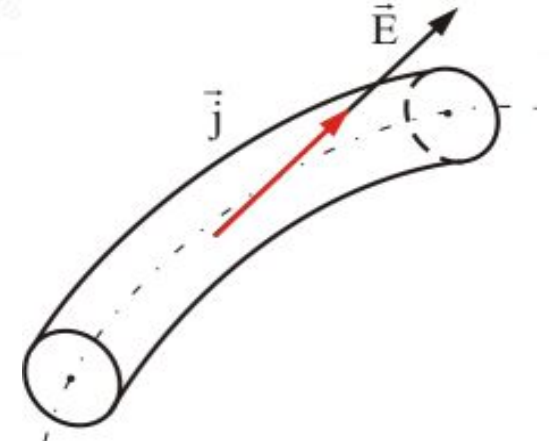
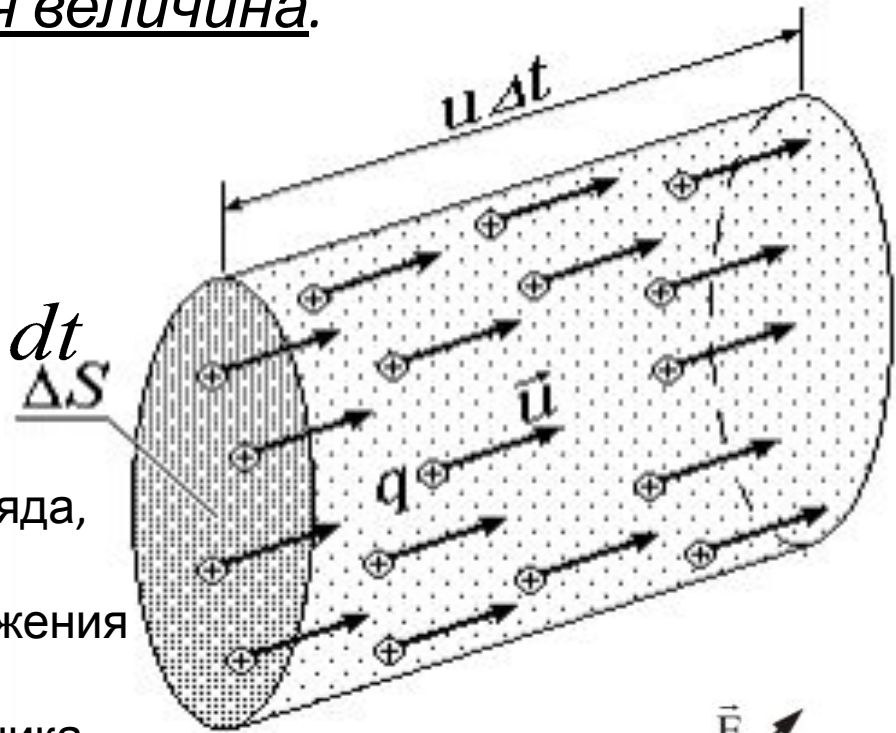
$$dq = \frac{NeV}{V} = n \cdot e \cdot \langle u \rangle \cdot \Delta S \cdot dt$$

$N$  – число заряженных частиц в объеме  $V$ ,  
 $n$  – концентрация свободных носителей заряда,  
 $e$  – заряд одной частицы,  
 $\langle u \rangle$  – средняя скорость упорядоченного движения частиц,  
 $\Delta S$  – площадь поперечного сечения проводника

$$I = \frac{dq}{dt} = n \cdot e \cdot \langle u \rangle \cdot \Delta S$$

$$\vec{j} = \frac{\Delta I}{\Delta S} = n \cdot e \cdot \langle \vec{u} \rangle$$

Вектор  $j$  ориентирован по направлению движения положительных зарядов (по направлению напряженности поля в проводнике).





### III. ЭДС (электродвижущая сила).

ЭДС – это физическая величина, определяемая работой сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда.

$$\mathcal{E} - \text{ЭДС,} \quad \mathcal{E} = \frac{A_{cm}}{q} \quad \text{- определение ЭДС}$$

[В]

$A_{cm}$  – работа сторонних сил по перемещению заряда  $q$ .

$$A_{cm} = \oint \vec{F}_{cm} \cdot d\vec{l} = \oint q \cdot \vec{E}_{cm} \cdot d\vec{l} = q \oint \vec{E}_{cm} \cdot d\vec{l} = q\mathcal{E}$$

То есть  $\mathcal{E} = \oint \vec{E}_{cm} \cdot d\vec{l}$  – ЭДС – это циркуляция вектора  $E$  поля сторонних сил

Кроме сторонних сил на заряд действуют силы электрического поля (силы Кулона  $\vec{F}_{эл}$ ):  $\vec{F}_{эл} = q\vec{E}$

Результирующая сила, действующая на заряд в

цепи:

$$\vec{F} = \vec{F}_{cm} + \vec{F}_{эл} = q(\vec{E}_{cm} + \vec{E})$$

Работа результирующей силы на участке

$$\begin{aligned} 1-2: \quad A_{1-2} &= \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int_1^2 q(\vec{E}_{cm} + \vec{E}) \cdot d\vec{l} = q \int_1^2 \vec{E}_{cm} \cdot d\vec{l} + q \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l} = \\ &= q[\varepsilon_{1-2} + (\varphi_1 - \varphi_2)] = qU_{1-2} \end{aligned}$$

#### IV.

Напряжение – это ~~Напряжение~~ причина, определяемая работой, совершаемой общим полем кулоновских и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда.

$U$  – напряжение, [В]                       $U = \frac{A}{q}$                       - определение напряжения

где  $A = A_{cm} + A_{эл}$   
е

$$U_{1-2} = \varepsilon + (\varphi_1 - \varphi_2)$$

# Приборы для измерения силы тока и

**Амперметр** — прибор для измерения силы тока.

Включается в цепь последовательно с тем участком, на котором измеряется сила тока. Амперметр не должен изменять силу тока в цепи, поэтому его сопротивление должно быть очень малым.

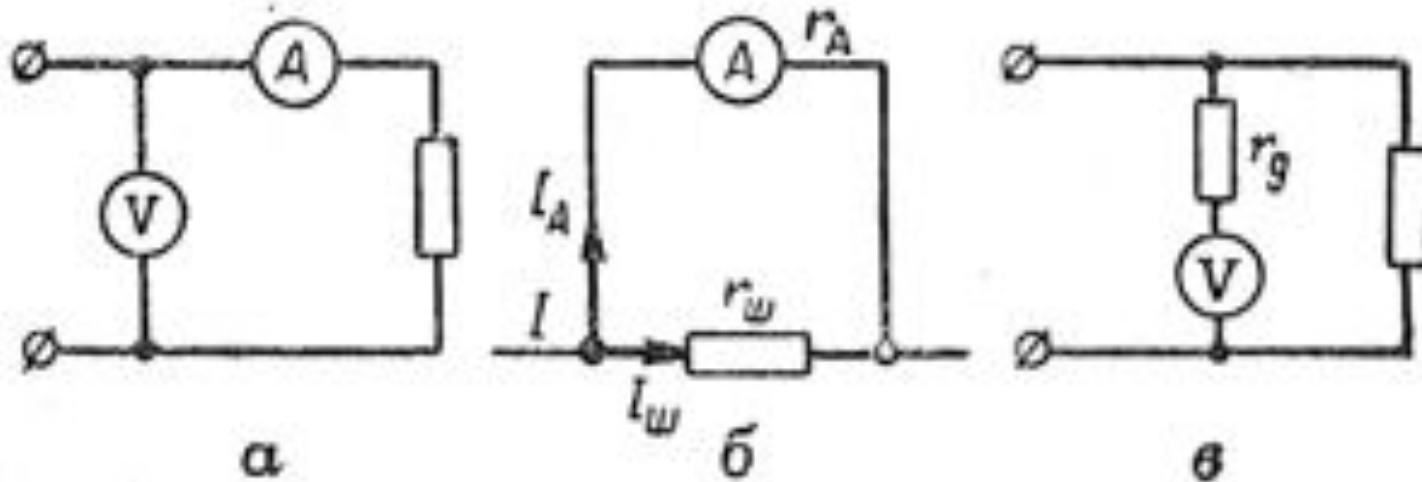
**Вольтметр** — прибор для измерения напряжения и ЭДС.

Включается в цепь параллельно тому участку, на котором измеряется напряжение. Сопротивление вольтметра должно быть очень большим.

Для измерения ЭДС вольтметр включается параллельно источнику тока при разомкнутой цепи.



# Схемы включения:



а — амперметра и вольтметра; б— шунта; в - добавочного сопротивления

Для расширения пределов измерения амперметров применяются **шунты**, благодаря которым в прибор ответвляется лишь часть измеряемого тока.

**Шунт** - это сопротивление, включаемое последовательно в цепь измеряемого тока, амперметр же включается параллельно шунту (рис.б). По отношению к прибору шунты бывают внутренние и наружные.

Для расширения пределов измерения вольтметров применяются **добавочные сопротивления** (рис. в), которые включаются последовательно с вольтметром.

# V. Сопротивление.

Сопротивление – это физическая величина, характеризующая способность вещества проводить электрический ток.

$R$  – сопротивление,  
[Ом]

$$R = \frac{\rho l}{S} \text{ - определение сопротивления}$$

$\rho$  – удельное сопротивление проводника (характеристика материала),  
[Ом·м];

$l$  – длина проводника;

$S$  – площадь поперечного сечения проводника;

Материал	$\rho$ , нОм · м
Серебро	16
Вольфрам	55
Медь	17
Никель	70
Алюминий	26
Нихром	100

Эксперимент  
проводника:

Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления некоторых веществ

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha(t - t_0))$$

$\rho$  – удельное сопротивление при температуре  $t$ ;  
 $\rho_0$  – удельное сопротивление при температуре  $t_0$ ;  
 $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала;  
 $t$  – температура

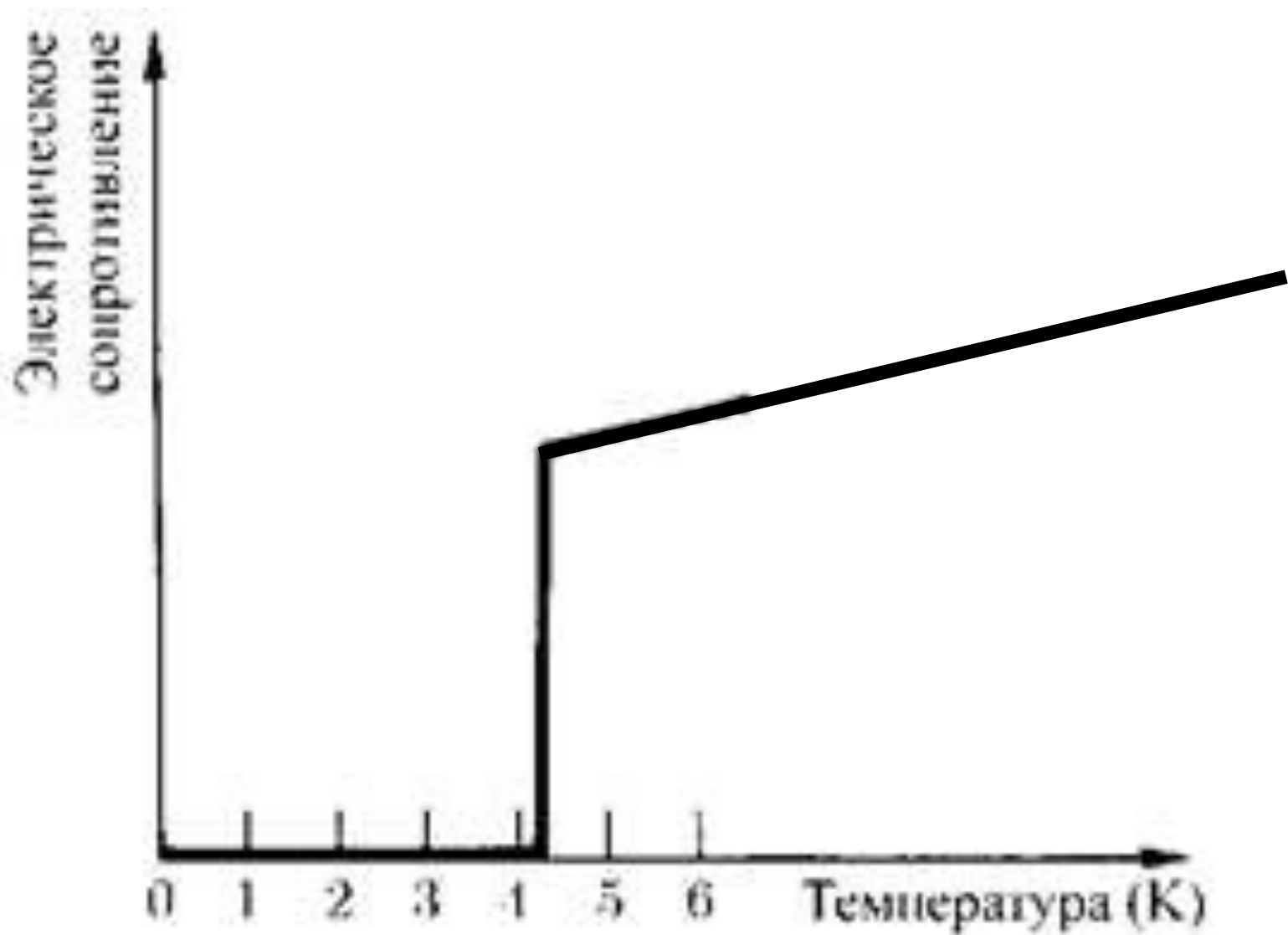
$$R = R_0 (1 + \alpha(t - t_0))$$

Вещество	Удельное сопротивление, Ом·мм <sup>2</sup> /м	Температурный коэффициент сопротивления, 10 <sup>-3</sup> град <sup>-1</sup>
Алюминий	0,028	
Вольфрам	0,055	4,2
Железо	0,098	6
Золото	0,023	
Константан	0,44-0,52	0,02
Латунь	0,025-0,06	
Манганин	0,42-0,48	
Медь	0,0175	4,1
Молибден	0,057	
Никелин	0,39-0,45	0,3
Никель	0,100	
Нихром	1,1	0,15



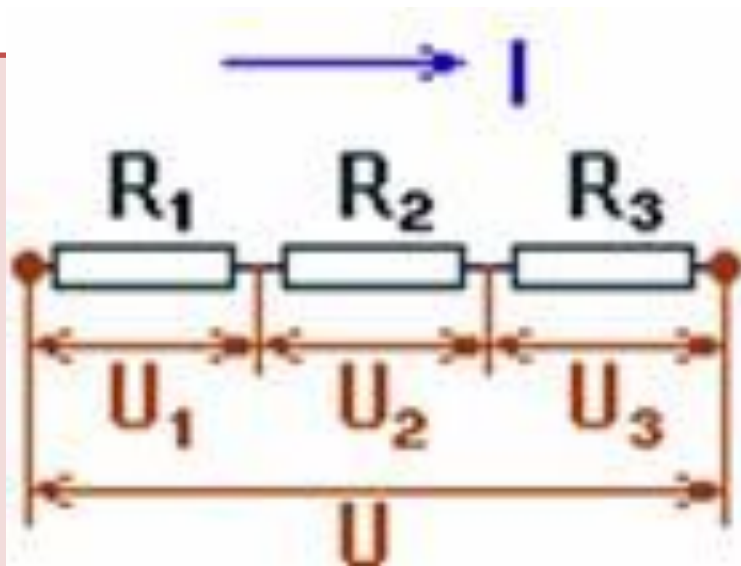
Для многих  
 $T \rightarrow 0$  К (кри  
проводника  
сопротивле  
называется

Для ртути  $T_{кр} = 4,12 \text{ К}$ .

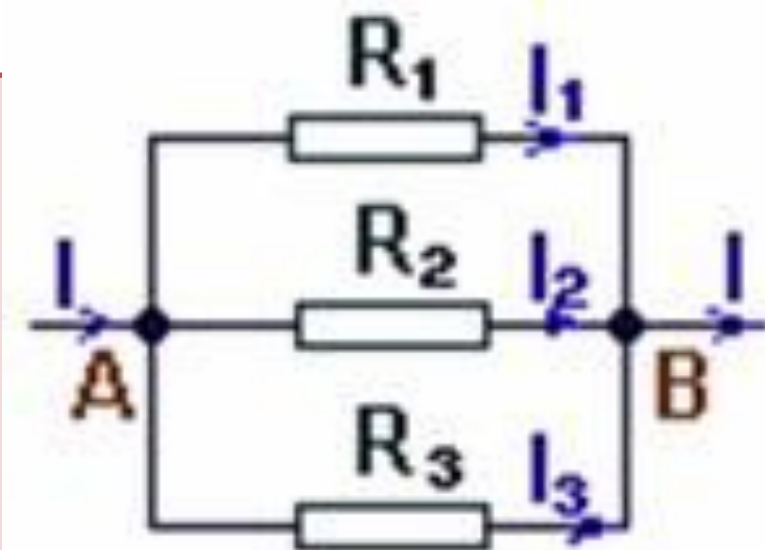


# Соединения проводников

Последовательное



Параллельное



$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

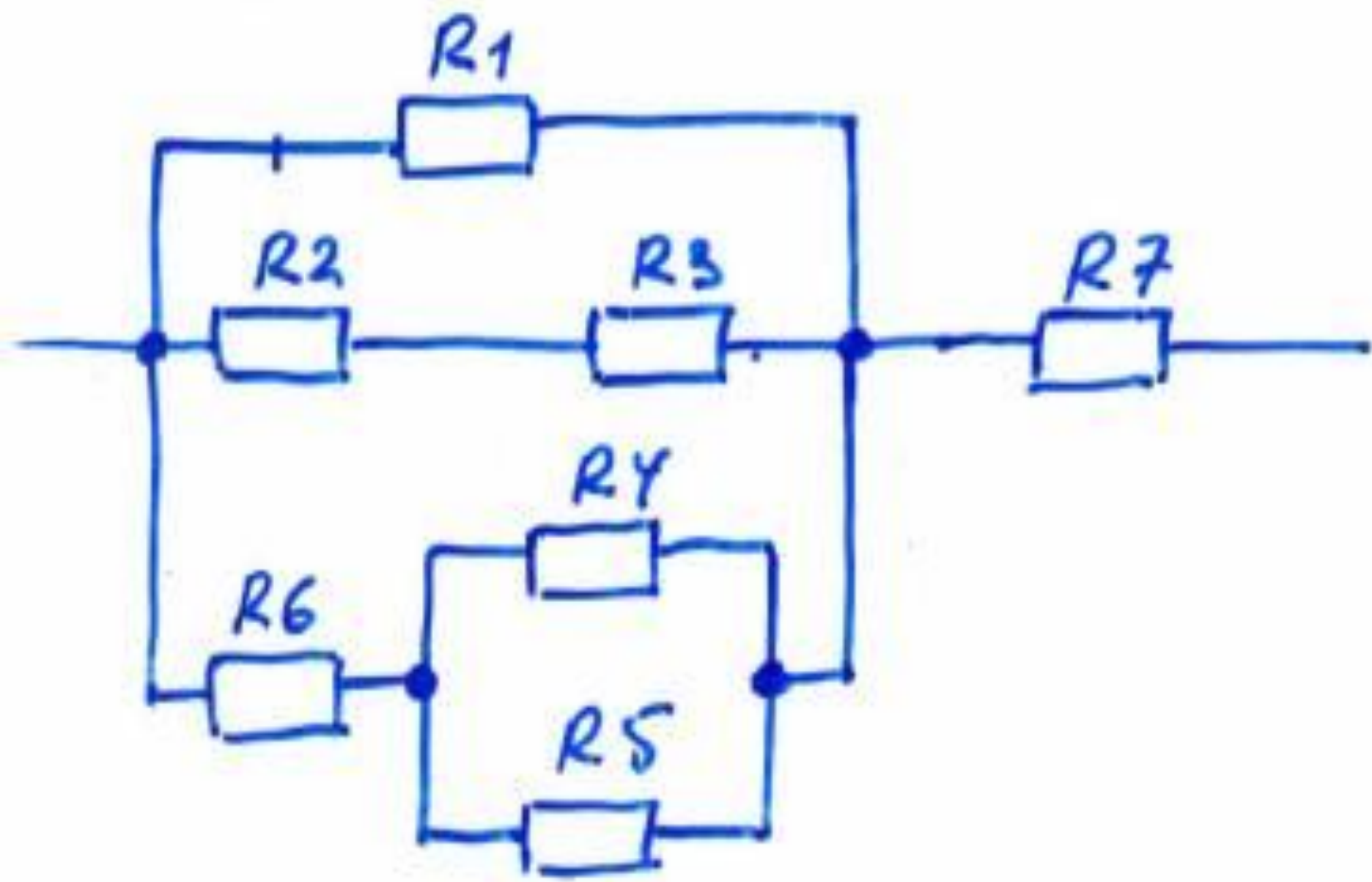
$$I_{\text{общ}} = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

$$I_{\text{общ}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

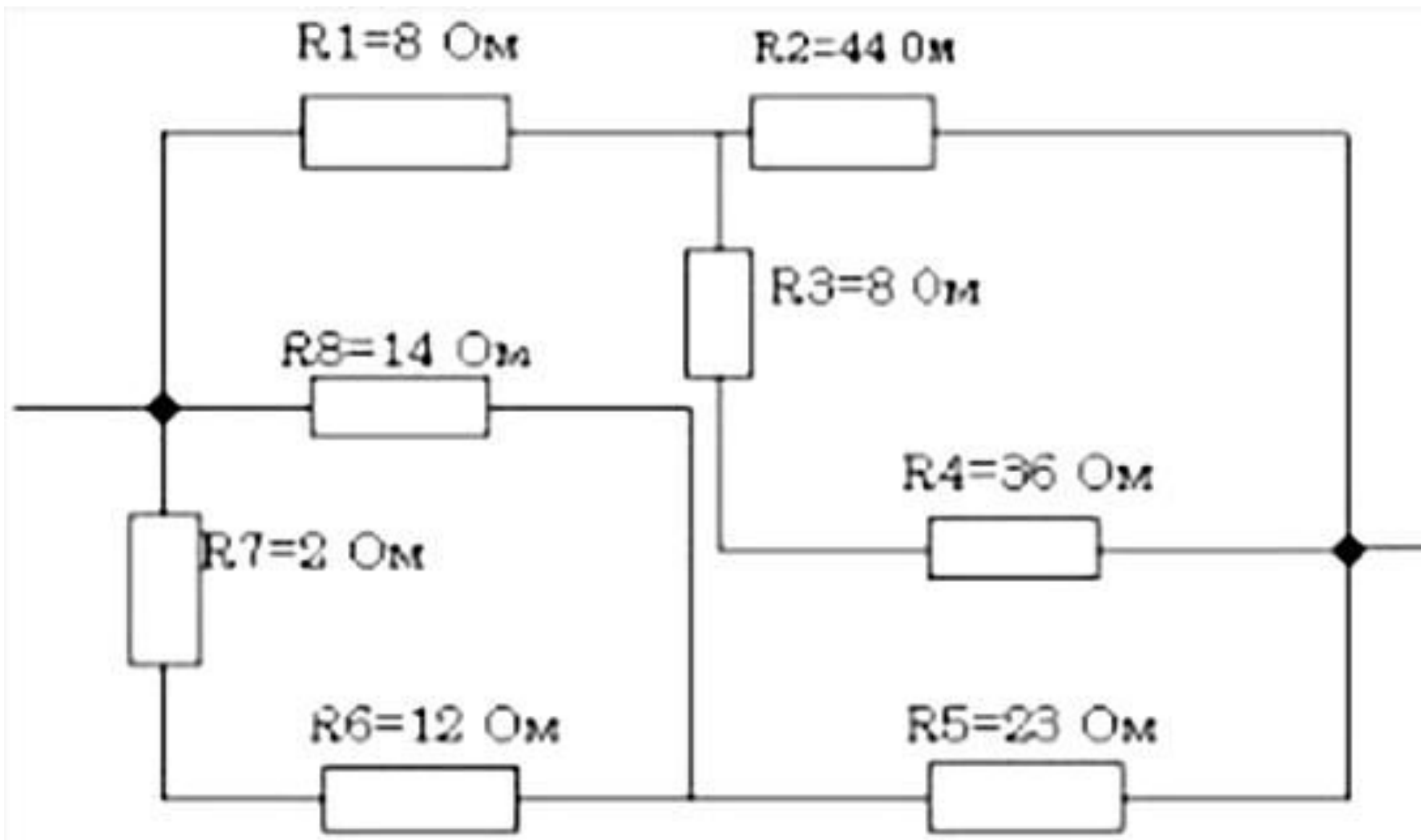
$$U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

$$U_{\text{общ}} = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$





Чему равно общее (эквивалентное) сопротивление данного участка цепи?



Ответ: 15  
Ом

Сопротивлением обладают все элементы электрической цепи (потребители электроэнергии).

Условные обозначения элементов электрической

цепи:

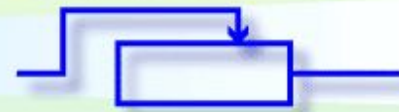
*лампочка*



*звонок*



*реостат*



*амперметр*



*вольтметр*



*хим. источник тока*



*резистор*



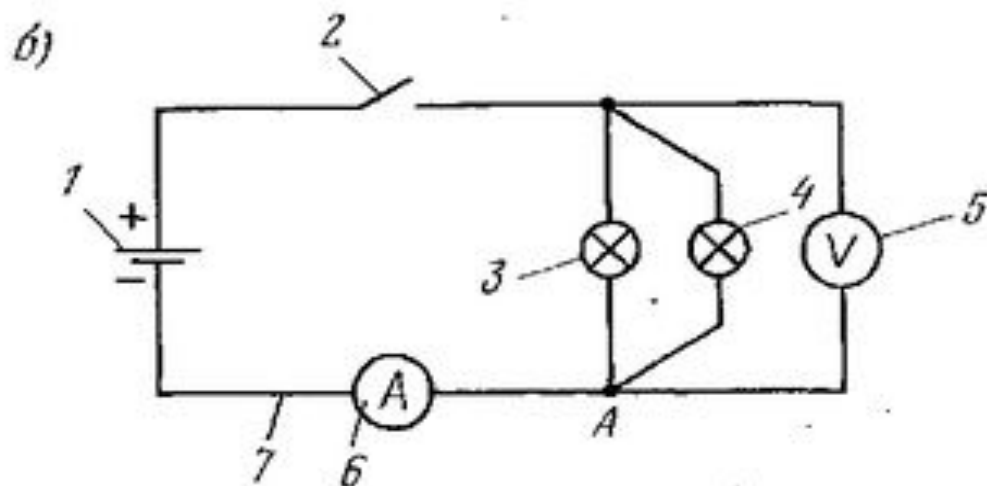
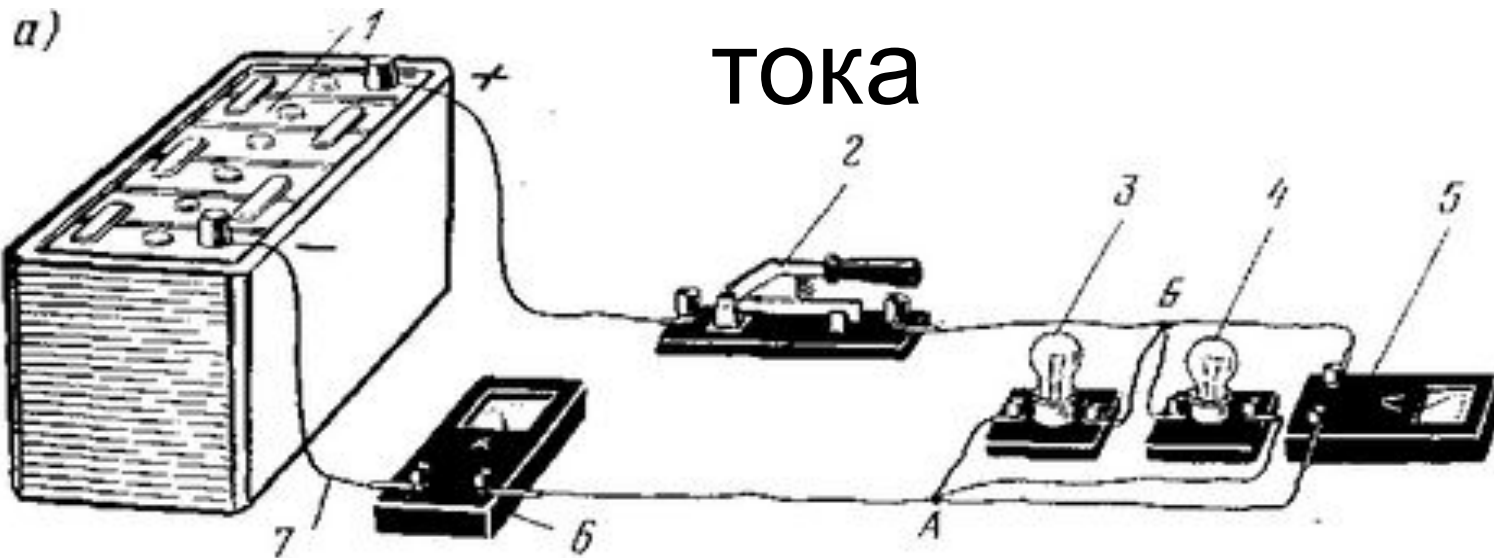
*конденсатор*



*катушка индуктивности*



# Электрическая цепь постоянного тока



тока

а) натурное изображение, б) схема;  
1 – аккумулятор, 2 – ключ, 3,4 – лампы накаливания, 5 – вольтметр, 6 – амперметр, 7 – соединительный провод.

# 4. Закон Ома

Ом экспериментально установил, что сила тока, текущего по однородному металлическому проводнику прямо пропорциональна напряжению  $U$  и обратно пропорциональна сопротивлению  $R$  проводника.

$I = \frac{U}{R}$  - закон Ома для постоянных полей

$$I = \frac{US}{\rho l} \quad j = \frac{I}{S} = \frac{U}{\rho l} = \frac{E}{\rho} = \gamma E$$

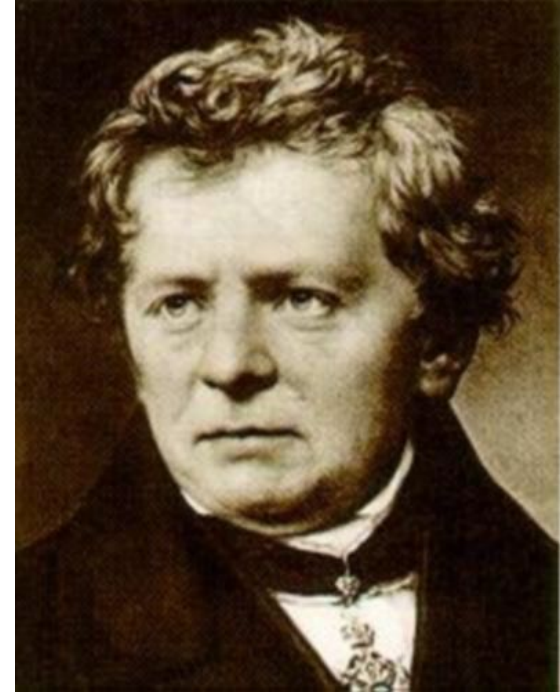
Где  $\gamma = \frac{1}{\rho}$  - удельная проводимость пр

$\rho$  [См/м]

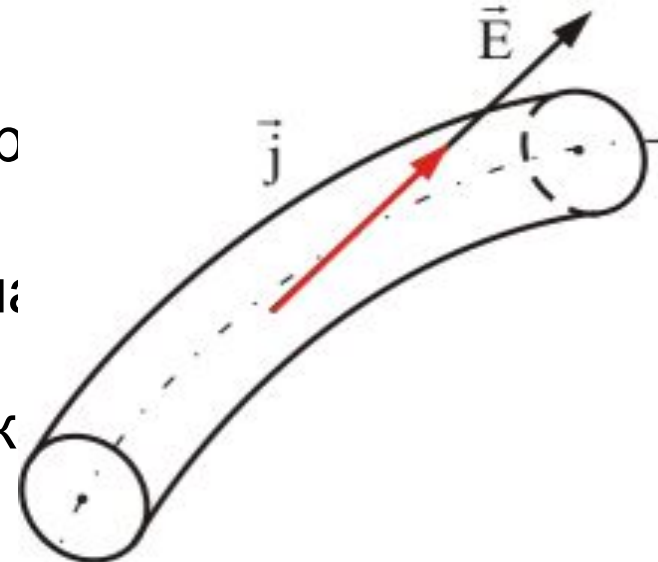
$j = \gamma E$  - закон Ома в дифференциальном виде любых полей

$j$  – плотность тока в произвольной точке проводника,

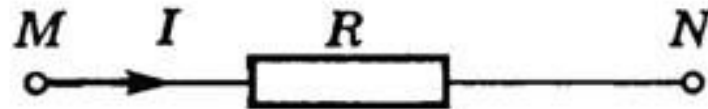
$E$  – напряженность эл. поля в той же то



Георг Симон  
Ом



Для однородного участка цепи (участка, не содержащего источника ЭДС):  $\Rightarrow U = \varphi_1 - \varphi_2$



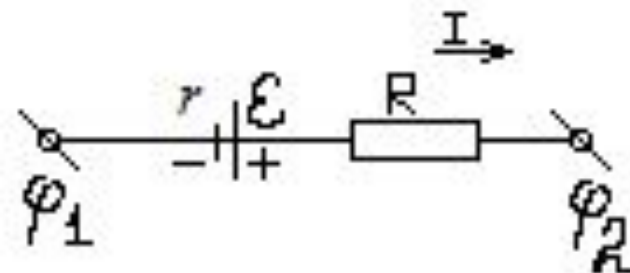
Для неоднородного участка цепи (участка, содержащего источник ЭДС):  $\varphi_1 - \varphi_2 \neq 0 \Rightarrow U = \varepsilon + \varphi_1 - \varphi_2$

$$I = \frac{\varepsilon + \varphi_1 - \varphi_2}{R + r}$$

- закон Ома для неоднородного участка цепи

$$R_{\text{общ}} = R + r$$

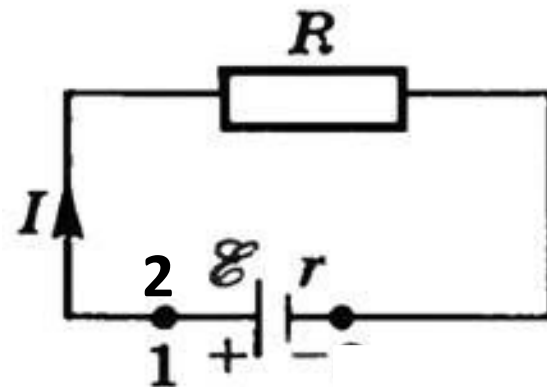
R – сопротивление внешнего участка цепи;  
r – внутреннее сопротивление источника тока



Для полной замкнутой цепи:  $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

- закон Ома для полной цепи



# Короткое замыкание

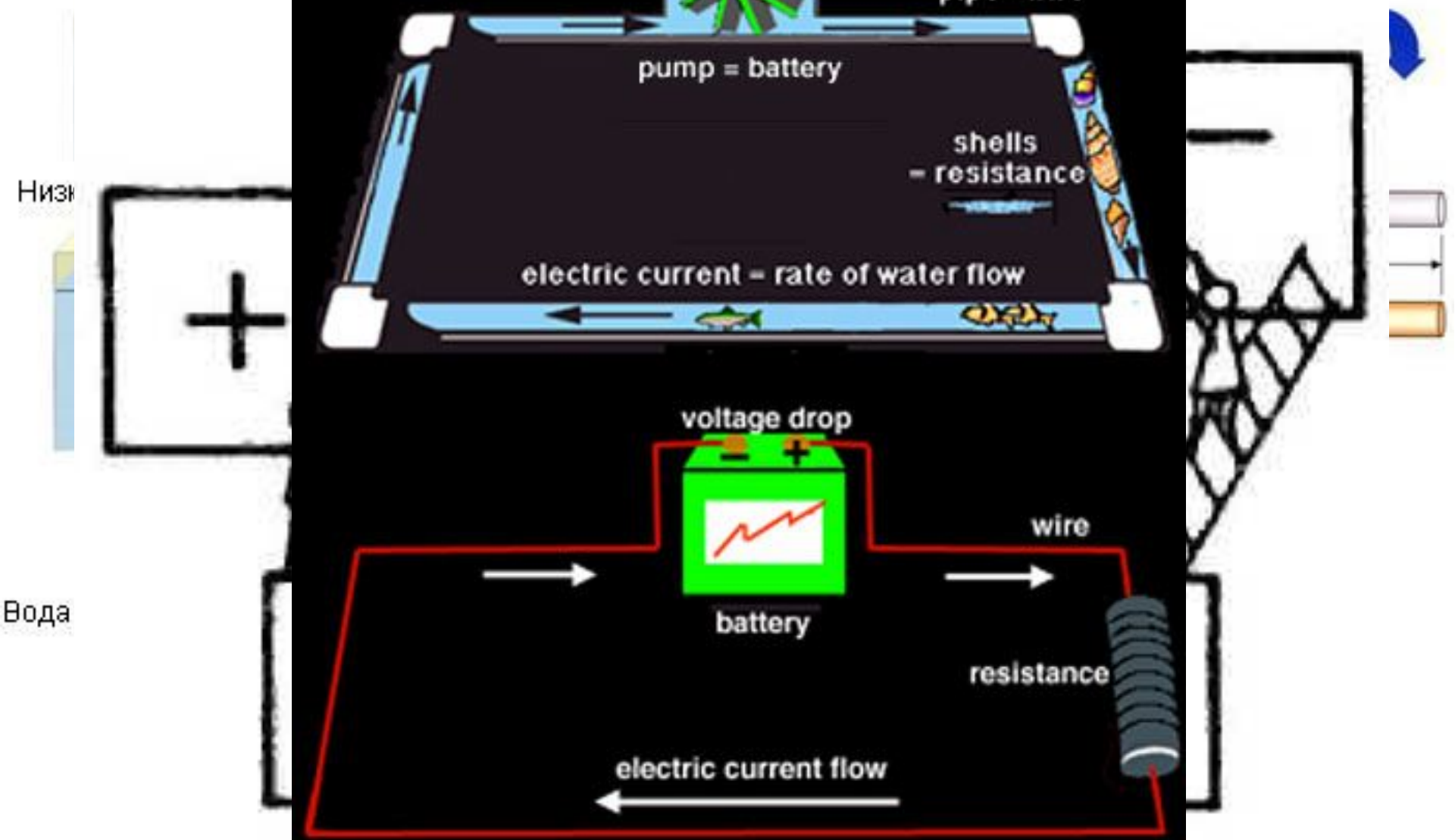
- Соединение проводов «накоротко», т.е. когда внешнее сопротивление  $R = 0$ .

$$I_{кз} = \frac{\mathcal{E}}{r}$$

- Соединение, не предусмотренное конструкцией и нарушающее нормальную работу устройства.

Аналог

нием





# Механическая модель электрической цепи

Т 16.1

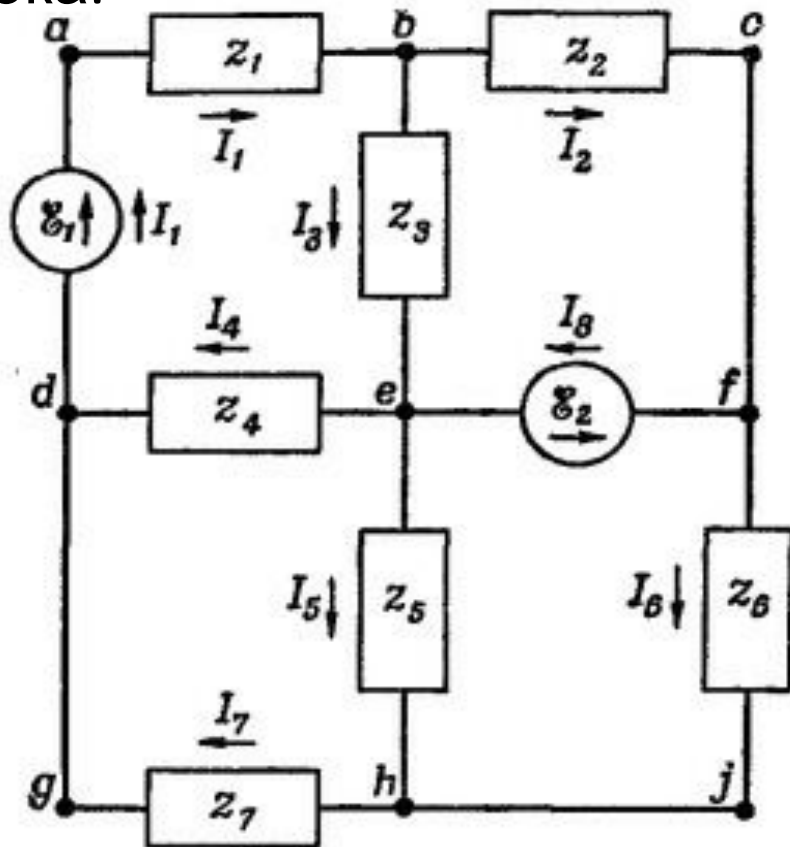
МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ



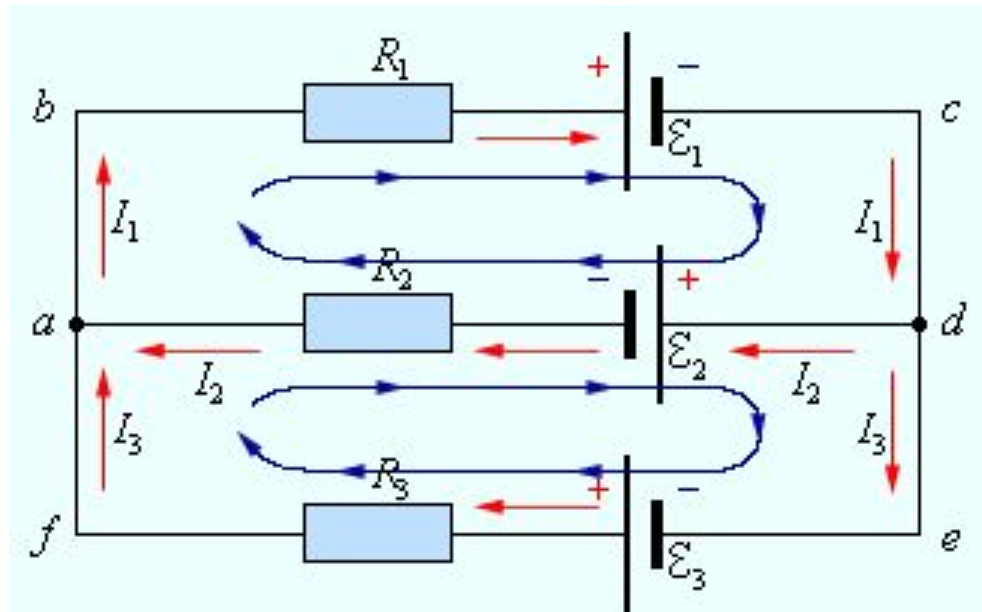
# 5. Правила Кирхгофа для разветвленных цепей

*(Правила Кирхгофа вытекают из законов Ома).*

Разветвленные цепи – это цепи, содержащие несколько замкнутых контуров, которые могут иметь общие участки, и несколько источников тока.



Густав Кирхгоф



I правило Кирхгофа (для узлов):

Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле

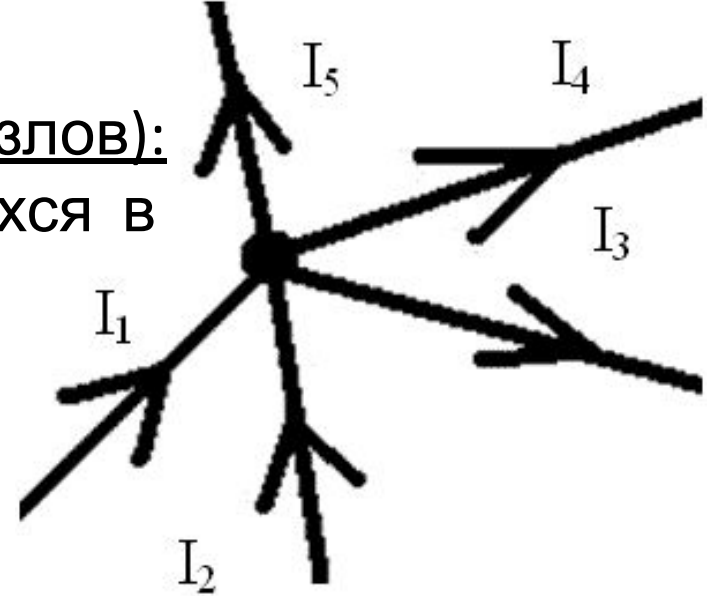
$$\sum_{i=1}^n I_i = 0$$

$I > 0$  – если ток входит в узел;

$I < 0$  – если ток выходит из

узла

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5 = 0$$



**Узел** – точка цепи, в которой сходится не менее трех проводников.

Количество уравнений, составленных по I правилу Кирхгофа, должно быть на 1 меньше, чем общее число узлов в цепи.

II правило Кирхгофа (для замкнутых контуров): Алгебраическая сумма напряжений на участках замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС, встречающихся в данном контуре.

$$\sum_{i=1}^n R_i I_i = \sum_{i=1}^k \varepsilon_i$$

За положительное направление обхода обычно принимается направление по часовой стрелке.

$U_i = R_i I_i > 0$  - если ток на участке совпадает с направлением обхода;

$U_i = R_i I_i < 0$  - если ток на участке НЕ совпадает с направлением обхода;

$\varepsilon_i > 0$  - если ЭДС действует по выбранному направлению обхода.

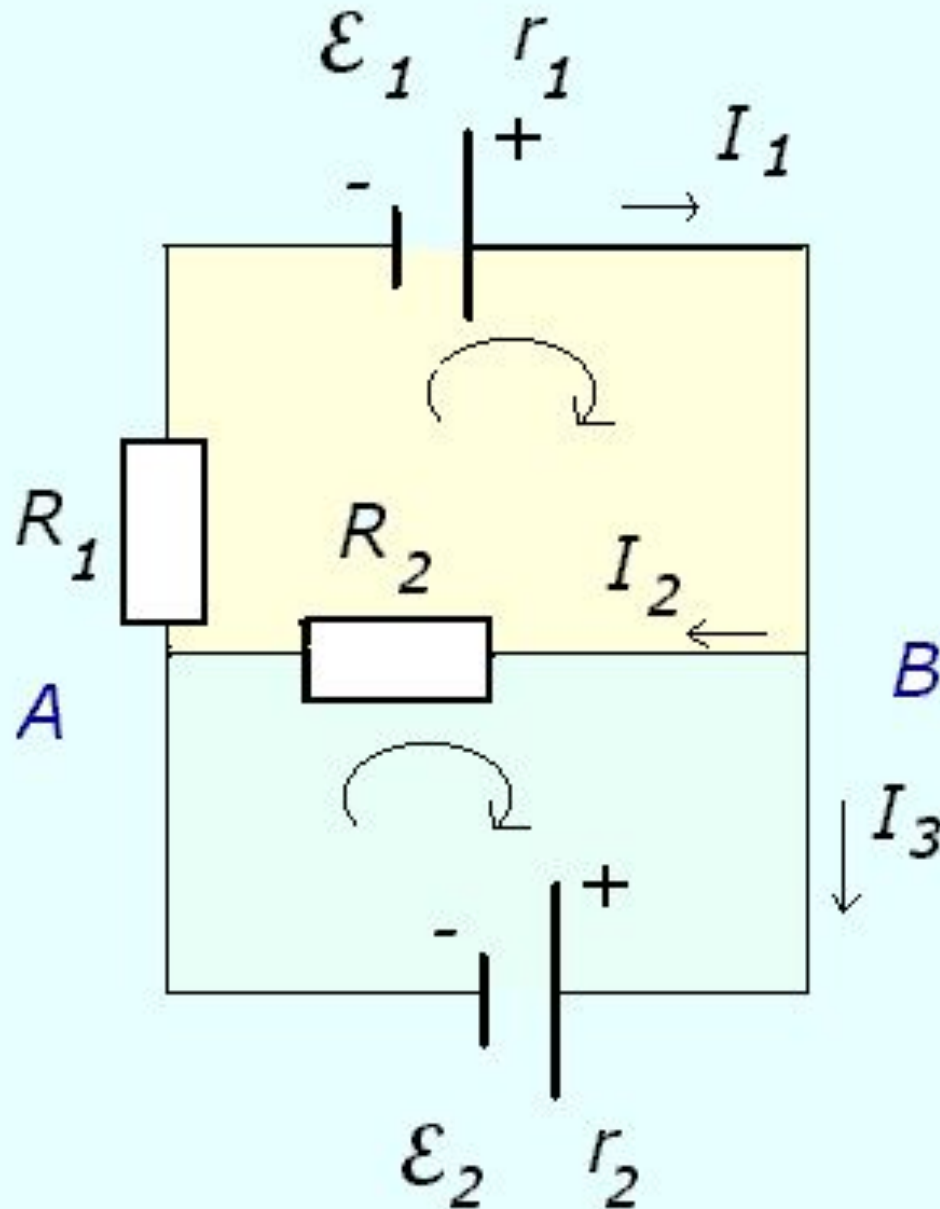
Общее количество уравнений, составленных по I и II правилам Кирхгофа, должно равняться количеству неизвестных в цепи. В систему должны входить все сопротивления и ЭДС рассматриваемой цепи.

# Алгоритм применения правил Кирхгофа

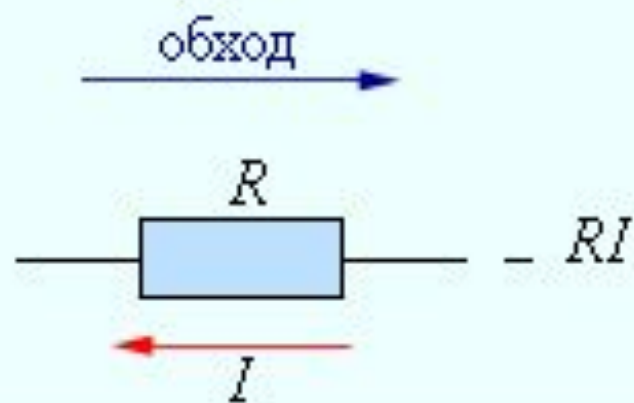
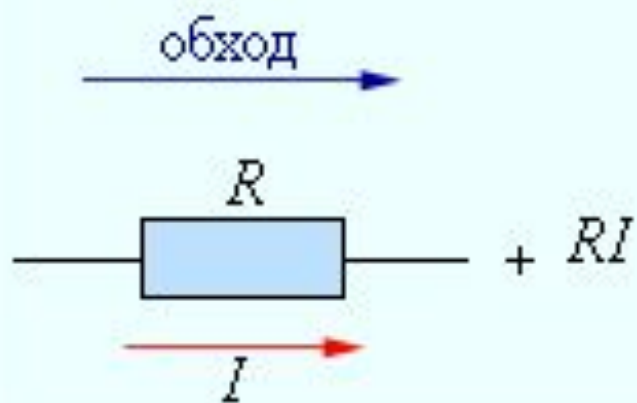
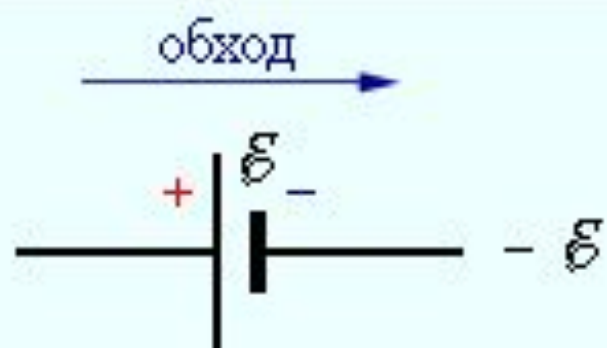
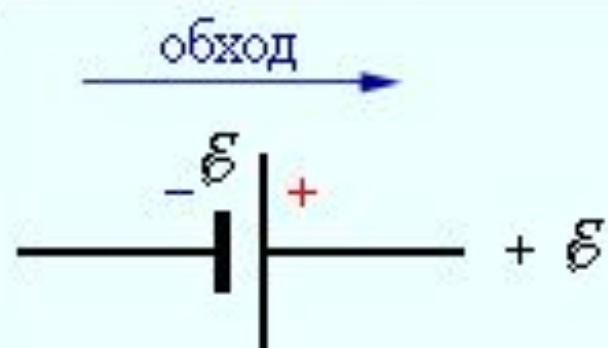
1) определяем контуры и направления токов; предполагаем, что ток течет в определенном направлении; если он течет в противоположном направлении, то его значение будет отрицательным;  
2) пишем уравнения по законам Кирхгофа для каждого контура; количество уравнений должно быть равно числу неизвестных токов.

3) пишем законы Кирхгофа для каждого узла; количество уравнений должно быть равно числу узлов минус один; если направление тока совпадает с направлением обхода, то его значение будет положительным, если нет, то отрицательным.

4) решаем полученную систему уравнений; количество уравнений должно быть равно числу неизвестных токов.

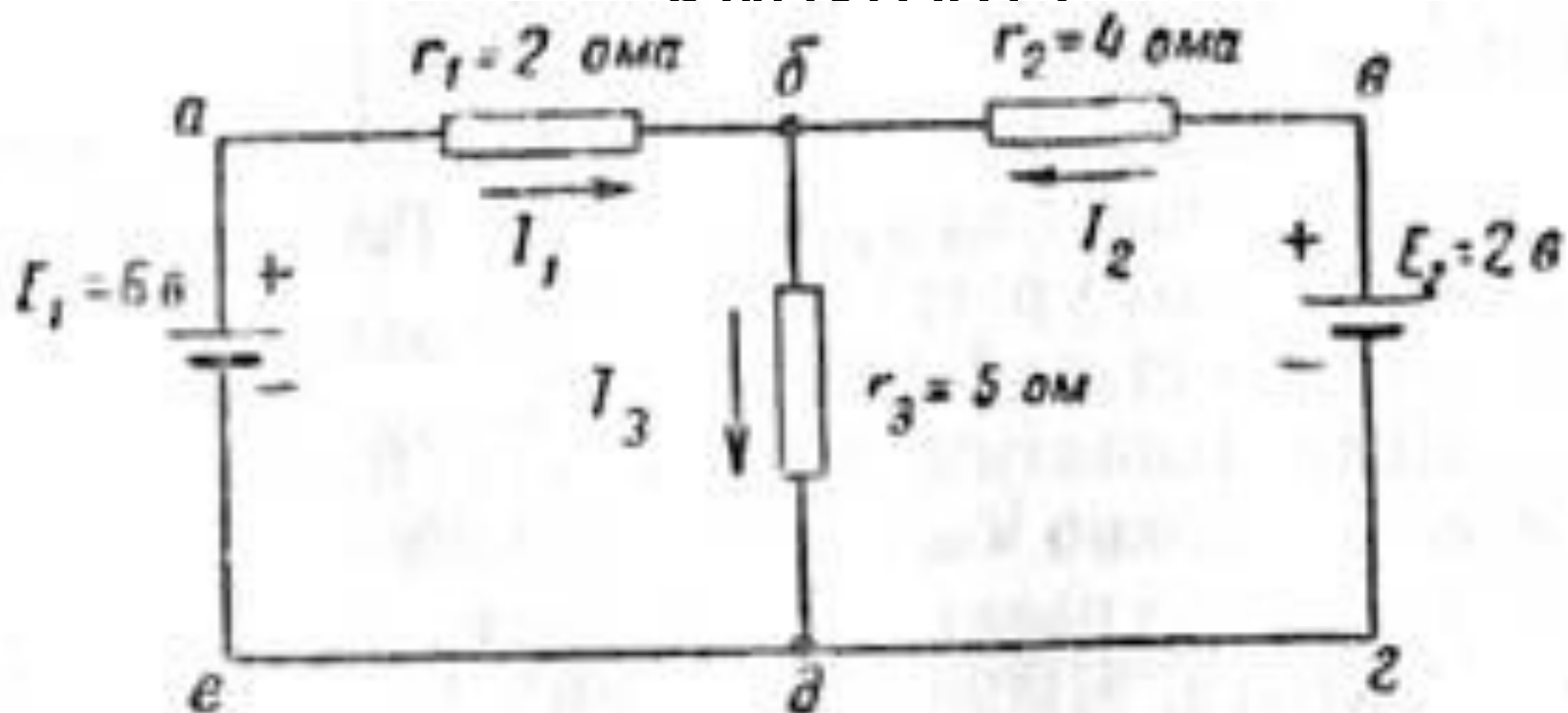


и их  
ти  
есть  
(всего  
в цепи;  
контуров,  
ти  
авлением  
 $\varepsilon_1$   
авнений



# Пример применения правил

## Кирхгофа



Для узла  $I_1 + I_2 - I_3 = 0$

Для контура  $6 = 2I_1 + 5I_3$

абде:  $6 - 2 = 2I_1 - 4I_2$

авге:

$$6 = 2I_1 + 5I_1 + 5I_2;$$

$$6 = 7I_1 + 5I_2$$

$$+ 2 = I_1 - 2I_2$$

$$I_1 = 1,156 A$$

$$I_2 = -0,422 A$$

$$I_3 = 0,74 A$$

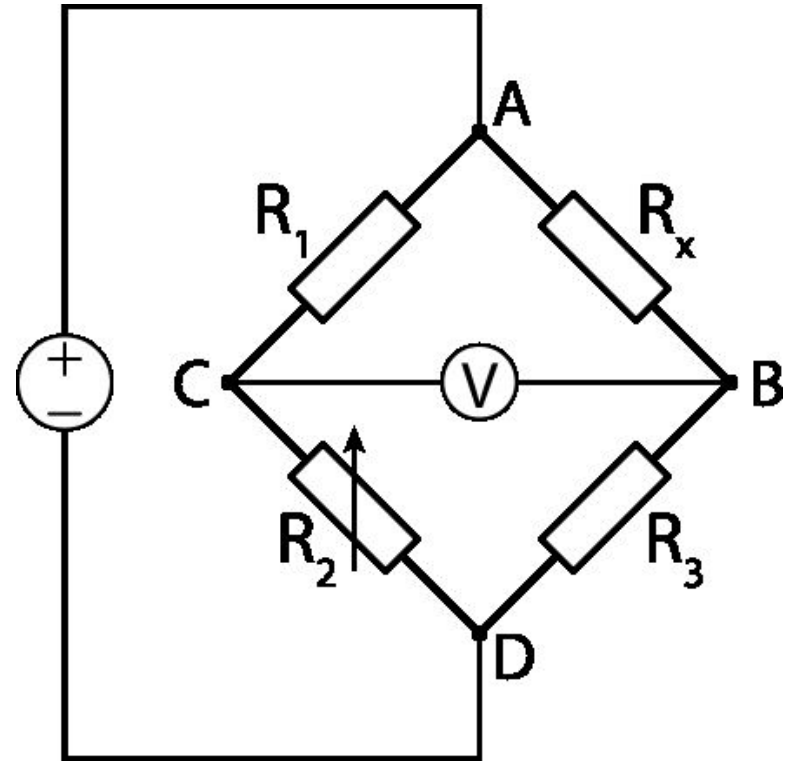


# Мост Уитстона

Мост Уитстона – это четырехполюсник, к двум полюсам которого (A,D) подключен источник тока, а к двум другим (C,B) – гальванометр (вольтметр). Устройство моста используется для измерения сопротивления.

Резисторы – плечи моста.

Если мост находится в равновесии, то ток через гальванометр не идет.



Тогда:

$$I_1 = I_2$$

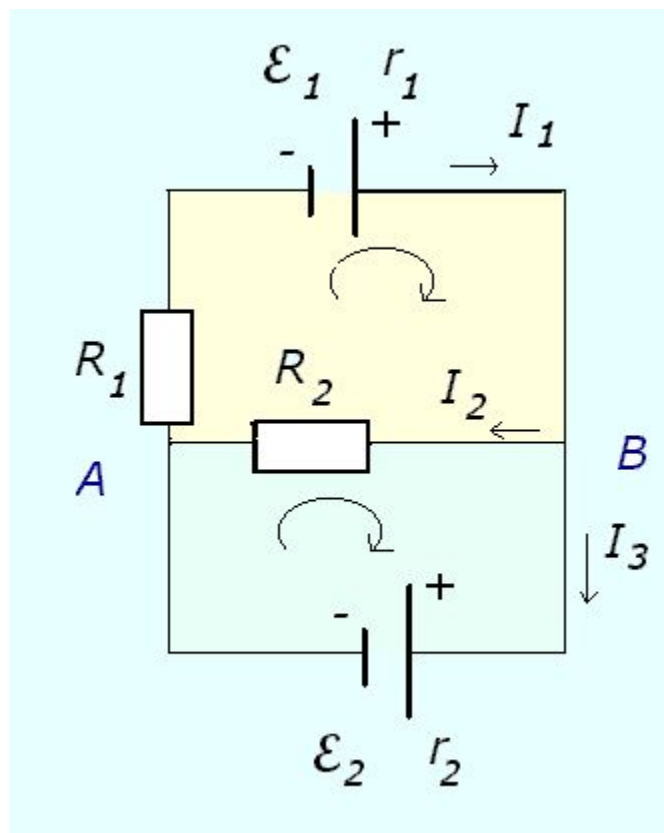
$$I_3 = I_x$$

$$U_1 = U_x$$

$$U_3 = U_2$$

$$\frac{R_x}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$$





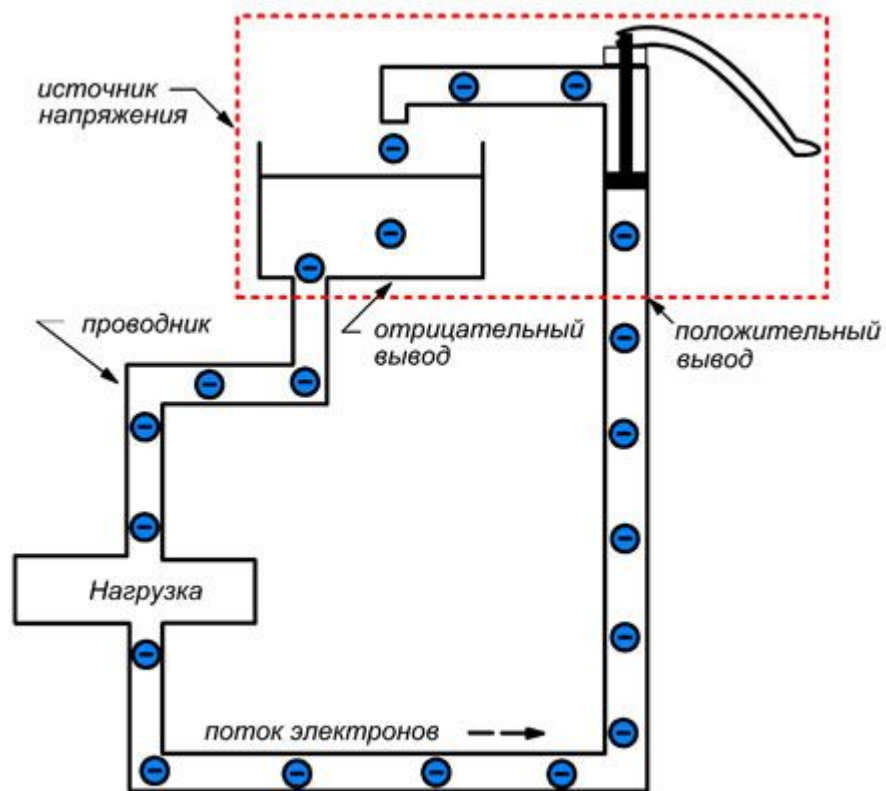


Рисунок 2.5. Источник напряжения может рассматриваться как насос, снабжающий нагрузку электронами и поддерживающий избыток электронов.