



# Электростатика

---

## Литература:

- 1. Савельев И.В. Курс общей физики 2т.
- 2. Иродов И.В. Общая физика. Электромагнетизм (основные законы)
- 3. **Калашников С.Г. Электричество**
- 4. Трофимова Т.И. Курс физики
- 5. Тамм И.Е. Основы теории электричества



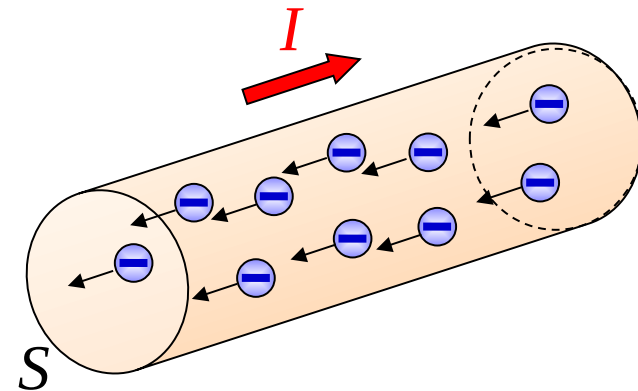
# Тема: Постоянный ток

---

- Электрический ток
- Величина и плотность тока в проводнике
- Уравнение непрерывности
- Закон Ома для однородного участка цепи
- Сторонние силы
- Электродвижущая сила источника тока
- Закон Ома для неоднородного участка цепи

# Электрический ток

- **Электрический ток** - это упорядоченное ( направленное) движение заряженных частиц (тел).
- Два условия протекания тока – носители заряда и электрическое поле, энергия которого расходуется на работу по перемещению заряда.
- Различают;
  - 1) **Ток проводимости** возникает в проводниках под действием электрического поля. В металлах – носители заряда – электроны,, в других проводниках – ионы.
  - 2) **Конвекционный ток** ( ток переноса) -
  - 3) **Диффузионный ток**- возникает из-за разности концентраций носителей заряда
  - 4) **Ток в вакууме** (в электроннолучевых трубках)
  - 5) **Ток смещения** – в изменяющемся во времени электрическом поле (ЭМП)
  - 6)



Существуют еще квазизаряды – ДЫРКИ - -это атом с электронной вакансией.



# Электрический ток

---

Рассмотрим *ток проводимости*, который возникает в проводниках.

Для появления и поддержания тока в проводниках необходимы два условия:

- наличие *свободных носителей заряда*. Носители заряда это заряженные тела (частицы), которые могут перемещаться в пределах тела, это ионы, элементарные частицы, мелкие заряженные тела.
- существование *среде* ( в проводнике) электрического поля , энергия которого расходуется на работу по перемещению носителей заряда.

# Электрический ток

Для количественной характеристики тока служат:

- **сила тока - скаляр –  $I$  (А)**
- **плотность тока - вектор –  $\vec{j}$  (А/м<sup>2</sup>)**

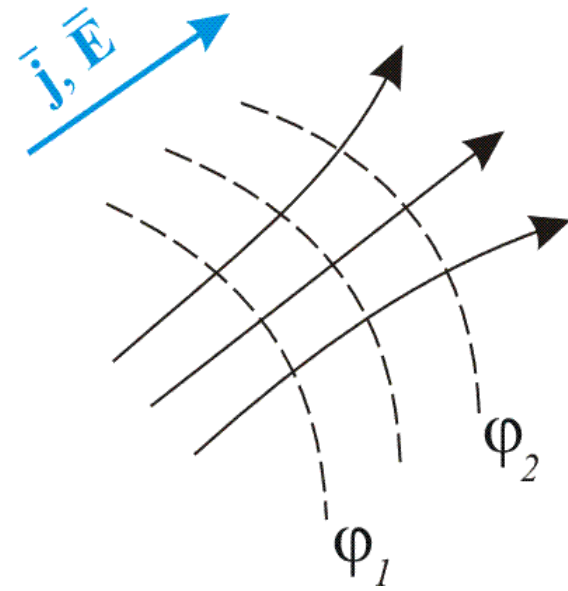
**Плотность тока** - вектор, численно равный заряду, проходящему в единицу времени через единицу поверхности, которая перпендикулярна к линиям тока.

**Линии тока** – линии, вдоль которых движутся заряженные частицы.

или

Поле вектора плотности тока можно

изобразить *графически* с помощью **линий тока**, которые проводятся так же, как линии напряженности





# Электрический ток

---

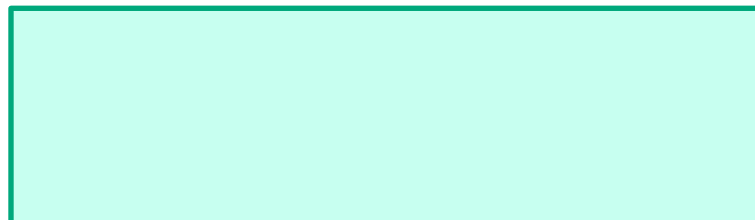
Пусть в некотором единице объёма содержится :

- - положительных носителей заряда с зарядом
- - отрицательных носителей зарядов с зарядом
- Под действием поля носители заряда приобретают среднюю скорость движения  $v$  и , тогда :



+

***Сила тока*** – заряд, протекающий через поперечное сечение проводника в единицу времени



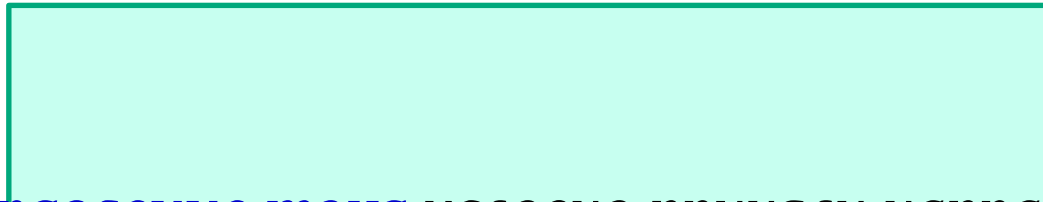


# Электрический ток

---

Свяжем силу тока и плотность тока, из плотности тока: ,  
а по определению сила тока это - .

Тогда:



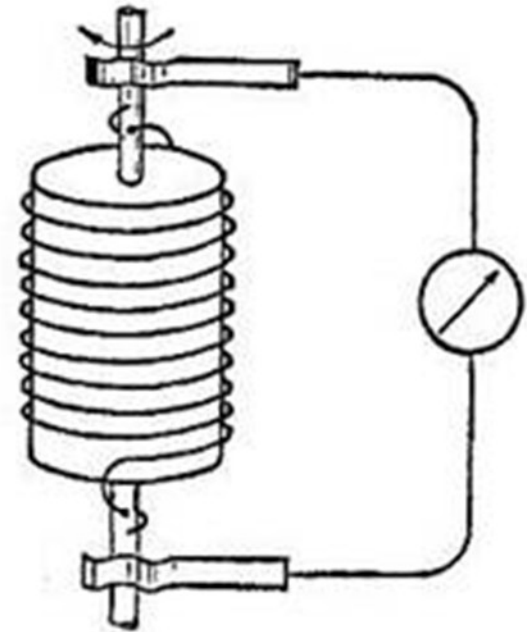
За **направление тока** условно приняли направление  
движения **положительных заряженных частиц**.

Если сила тока *не меняется во времени* – **ток постоянный,  $I$**   
*если меняется* - **переменный -  $i$**  .

# Определение природы носителей тока в металлах

## Катушка

раскручивалась вокруг своей оси и резко останавливалась. Длина проволоки составляла 500м, а линейная скорость вращения — 500м/с. Катушка с помощью скользящих контактов была подключена к гальванометру, который регистрировал возникновение инерционной ЭДС. В данном опыте роль сторонних сил, создающих ЭДС, играла сила инерции.



1913 (Мандельштам–Папалекси),  
1916 (Толмен–Стюарт).



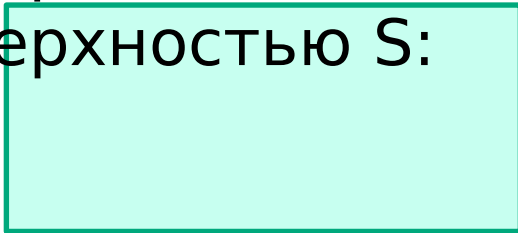


# Уравнение непрерывности

Рассмотрим в некоторой среде воображаемую замкнутую поверхность  $S$ , через которую течёт ток  $i$ :

$$i = \oint \vec{j} \cdot \vec{dS}$$

- В силу *закона сохранения заряда*, эта величина должна быть равна скорости убывания заряда, содержащегося в объеме, ограниченном поверхностью  $S$ :



□ это *интегральная форма уравнения*



# Уравнение непрерывности

---

Воспользуемся понятием *дивергенция* :

или  $\nabla$

или  $= -$

*дифференциальная форма уравнения  
непрерывности*





# Уравнение непрерывности

---

- Если ток постоянный, то все электрические величины не зависят от времени, тогда :
- - *условие стационарности*
- *При постоянном токе, линии плотности тока не имеют источников, не имеют начала и конца, то есть линии замкнуты.*

# Сопротивление и проводимость проводника

*Сопротивление  $R$  проводника характеризует способность проводника препятствовать протеканию тока через него. Из опыта:*

или

- – *удельное сопротивление проводника*

, в технике .

- Обратные величины:

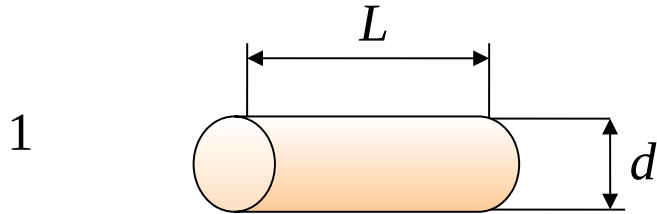
1)  $G$  – проводимость (См)

2) удельная проводимость

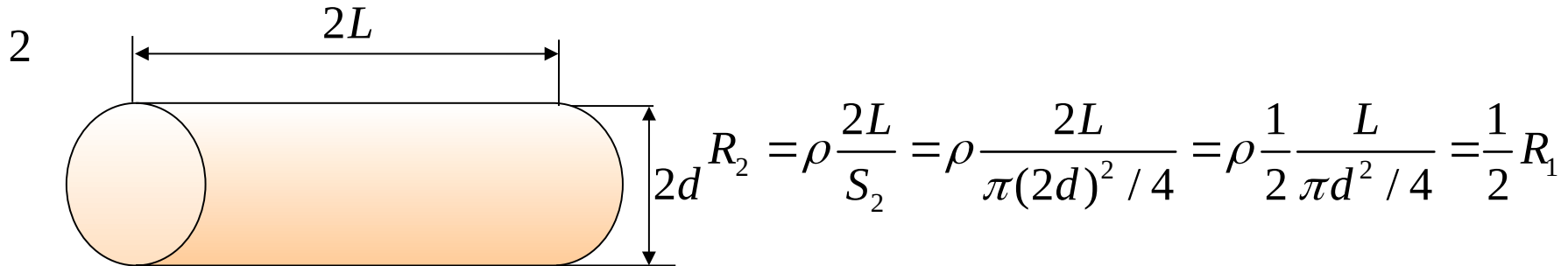
- - температурная зависимость

# Сопротивление и проводимость проводника

Рассмотрим однородные проводники с одинаковым сечением:



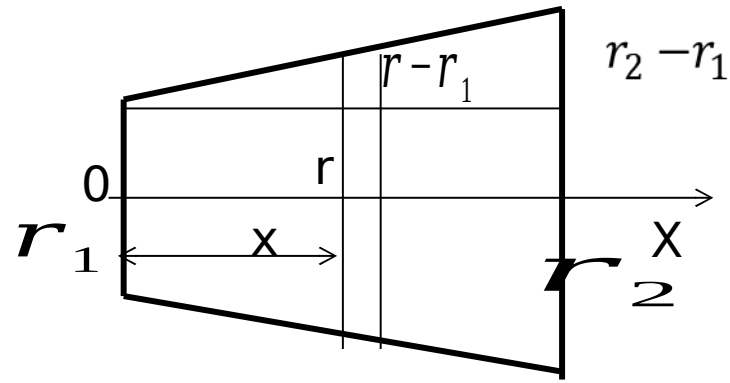
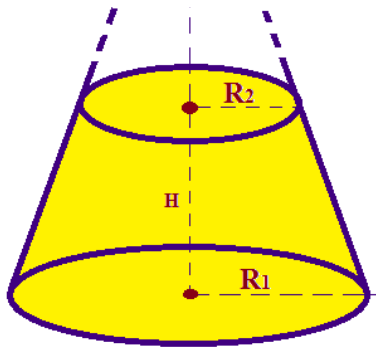
$$R_1 = \rho \frac{L}{S_1} = \rho \frac{L}{\pi d^2 / 4}$$



$$R_2 = \rho \frac{2L}{S_2} = \rho \frac{2L}{\pi (2d)^2 / 4} = \rho \frac{1}{2} \frac{L}{\pi d^2 / 4} = \frac{1}{2} R_1$$

# Сопротивление и проводимость проводника

- Пример: 1. Расчет сопротивления усеченного конуса

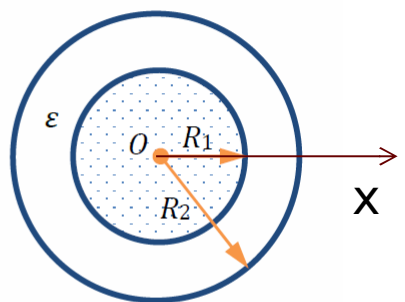


$$dR = \rho \frac{dx}{S_x}$$

$$=$$

$$r = r_1 + (r_2 - r_1) \frac{x}{L}$$

- 2. Коаксиальный кабель



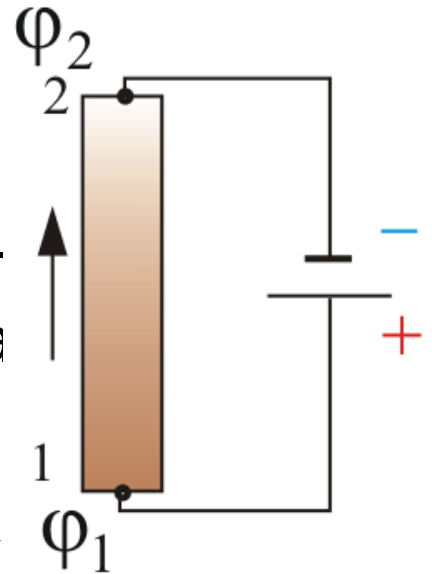
$$dR = \rho \frac{dx}{2 \pi x h} \rightarrow R = \int dR = \int_{R_1}^{R_2} \rho \frac{dx}{2 \pi x h} = \frac{\rho}{2 \pi h} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

# ЭДС, напряжение и разность потенциалов

- Отношение работы , которую совершают *сторонние силы* при перемещении точечного заряда вдоль всей цепи , включая источник тока, к заряду – *называется электродвижущей силой (ЭДС).*
- где
- =
- *ЭДС – циркуляция вектора напряженности сторонних сил по замкнутому контуру.* Так как циркуляция не равна нулю, *поле сторонних сил вихревое*
- На заряд будет действовать результирующая сила:

# ЭДС, напряжение и разность потенциалов

- Рассмотрим проводник длиной  $l$ , на концах которого создана разность потенциалов. Под действие разности потенциалов положительные заряды будут двигаться от точки 1 к точке 2. Потечет первоначальный ток, который будет продолжаться, пока потенциалы не уравниваются, ток прекратится. Для того, чтобы ток прекращался, надо обеспечить обратное движение



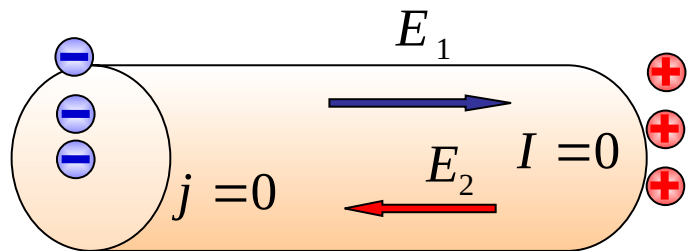
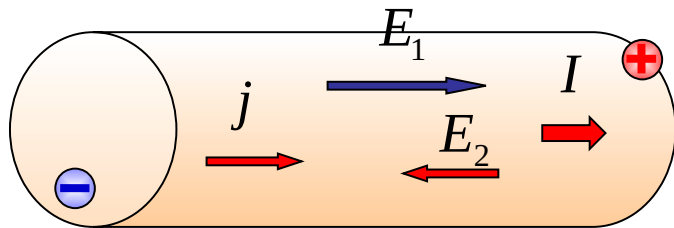
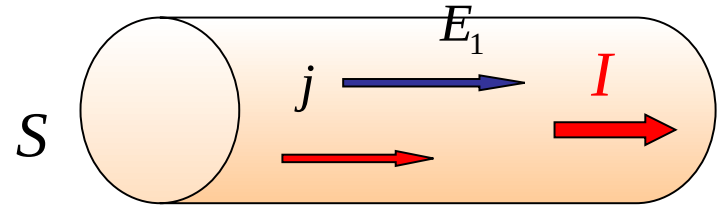
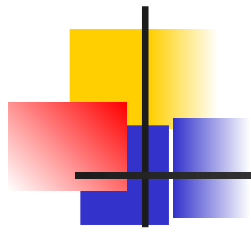
положительных зарядов от точки 2 к точке 1.

Кулоновские

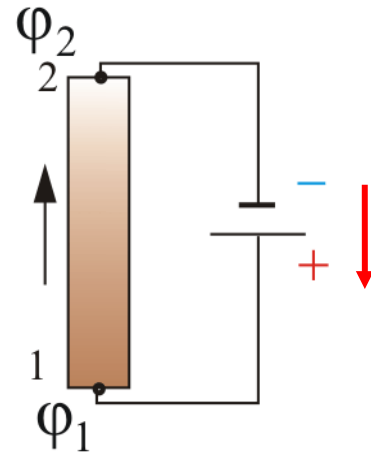
силы не могут обеспечить это движение, против сил поля.



# ЭДС, напряжение и разность потенциалов



$$E_1 + E_2 = 0$$



В источнике разделение зарядов происходит под действием сил неэлектрического происхождения – эти **силы называются сторонними** (химические процессы, диффузия носителей заряда, вихревые электрические поля, механического, магнитного происхождения)

Сторонние силы направлены против сил кулоновских.

, где  $\mathcal{E}$  – напряженность поля сторонних сил.

# ЭДС, напряжение и разность потенциалов

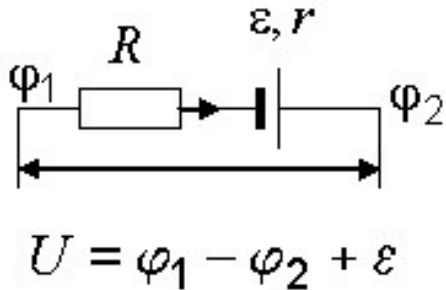
- Рассмотрим работу по перемещению заряда на участке цепи, где действуют сторонние и кулоновские силы:

=

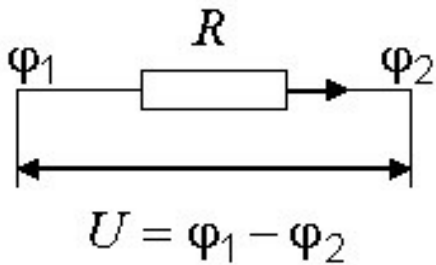


- ***Напряжение** на участке цепи это отношение полной работы, кулоновских и сторонних сил, к заряду*
- Поле сторонних сил не является потенциальным, и к нему нельзя применять термин разность потенциалов или напряжение.

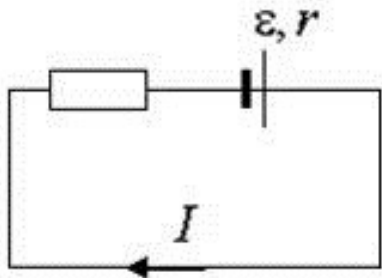
# ЭДС, напряжение и разность потенциалов



- Участок цепи с источником ЭДС называется **неоднородным** (действуют кулоновские и сторонние силы):



- Участок цепи без ЭДС называется **однородным** (действуют только кулоновские силы)



- Если цепь замкнута, то

# ЭДС, напряжение и разность потенциалов

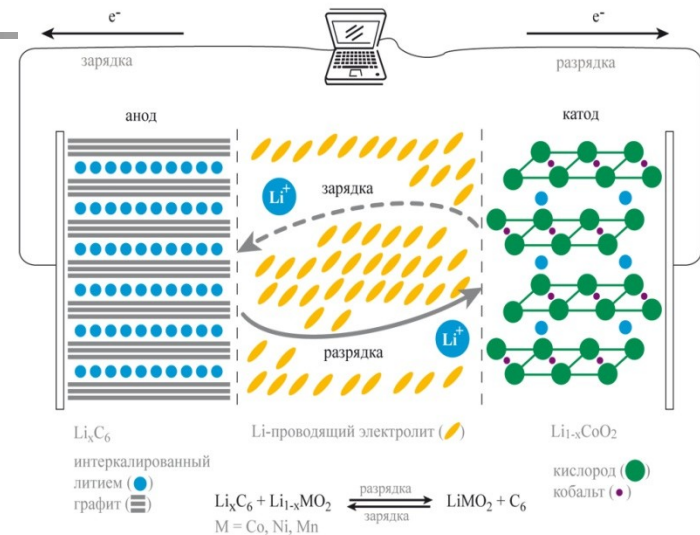
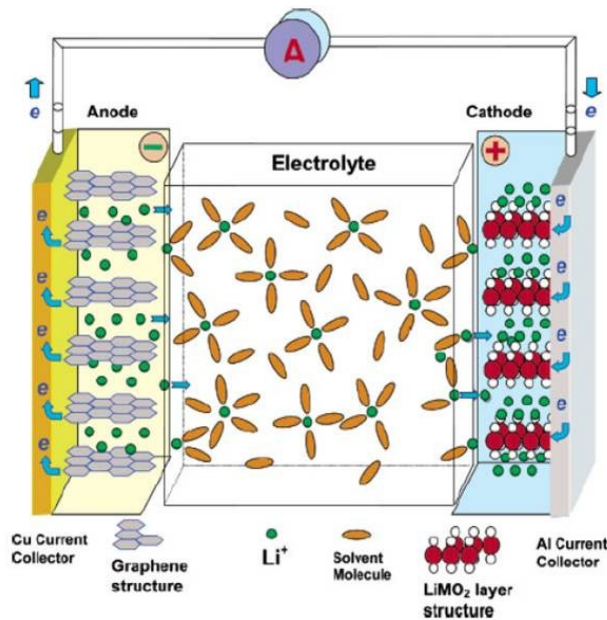
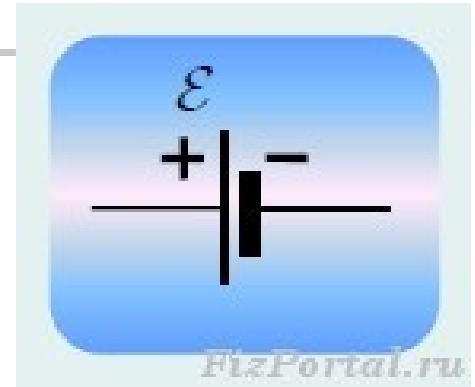


Схема литий-ионного химического источника тока, в котором в качестве материала положительного электрода выступает  $\text{LiMO}_2$  ( $\text{M} = \text{Co, Ni, Mn}$ ), а в качестве материала отрицательного электрода – графит. Во время процесса заряда ионы лития извлекаются из структуры  $\text{LiMO}_2$  и, проходя через электролит, внедряются в межслоевое пространство графита; в процессе разряда перенос ионов лития идет в обратном направлении. Количество сохраняемой энергии ограничено в основном свойствами материала положительного электрода. Так, например, для  $\text{LiCoO}_2$  характерны величины удельной

# ЭДС, напряжение и разность потенциалов

- Для обозначения источников тока на электрических схемах используется специальное обозначение



Электростатическое поле совершает положительную работу по перемещению положительного заряда в направлении уменьшения потенциала поля. Источник тока проводит разделение электрических зарядов – на одном полюсе накапливаются положительные заряды, на другом отрицательный.

Напряженность электрического поля в источнике направлена от положительного полюса к отрицательному, поэтому работа электрического поля по перемещению положительного заряда

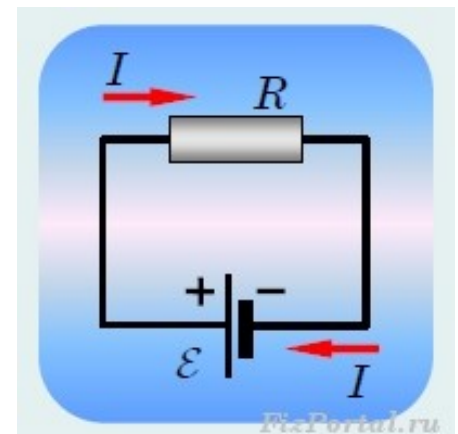
# ЭДС, напряжение и разность потенциалов

Работа сторонних сил, наоборот, положительна в том случае, если положительные заряды перемещаются от отрицательного полюса к положительному, то есть от «минуса» к «плюсу». В этом принципиальная разница

Таким образом, электродвижущую силу источника можно считать алгебраической величиной, знак которой («плюс» или «минус») зависит от направления тока.

В схеме, показанной на рисунке вне источника (во внешней цепи) ток течет от «плюса» источника к «минусу», внутри источника от «минуса» к «плюсу».

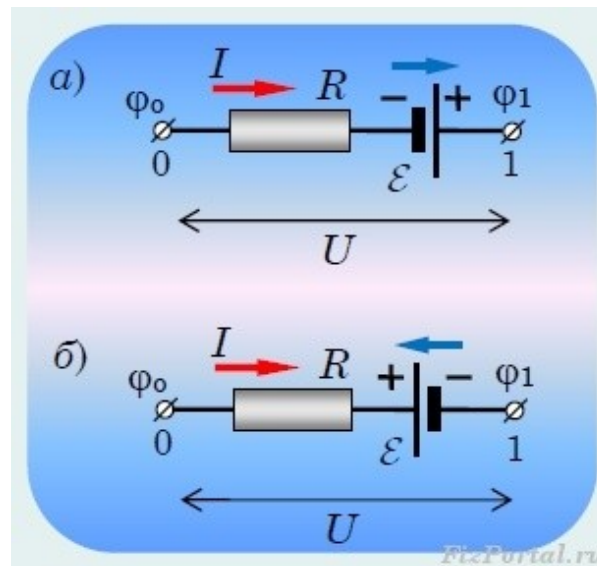
В этом случае, как сторонние силы источника, так и электростатические силы во внешней цепи совершают положительную работу.



# ЭДС, напряжение и разность потенциалов

Суммарная работа электростатических и сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда называется **электрическим напряжением** на участке цепи

$$U = \varphi_0 - \varphi_1 - |\mathcal{E}|$$



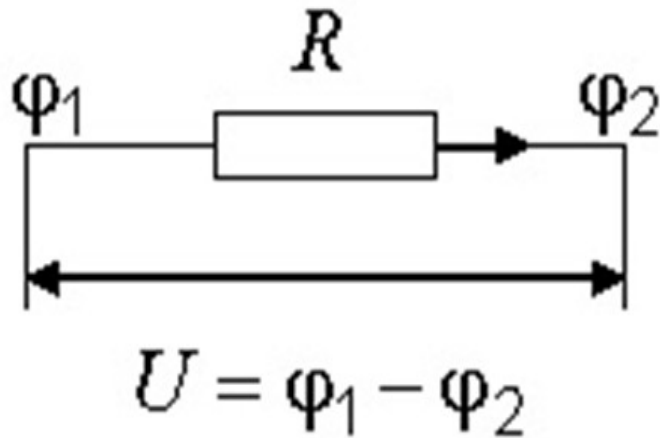
$$U = \varphi_0 - \varphi_1 + |\mathcal{E}|$$

# Закон Ома

- В 1826 году немецкий физик Георг Симон Ом экспериментально установил закон:

## 1 Закон Ома для однородного участка цепи:

*сила тока протекающего по однородному проводнику, прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника*



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

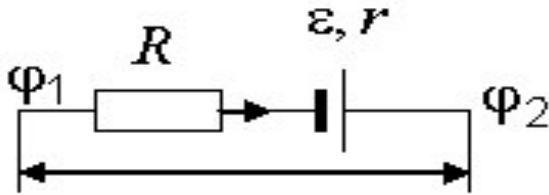
- это закон Ома в интегральной форме



# Закон Ома

В 1830 г. - **закон Ома для неоднородного участка цепи**

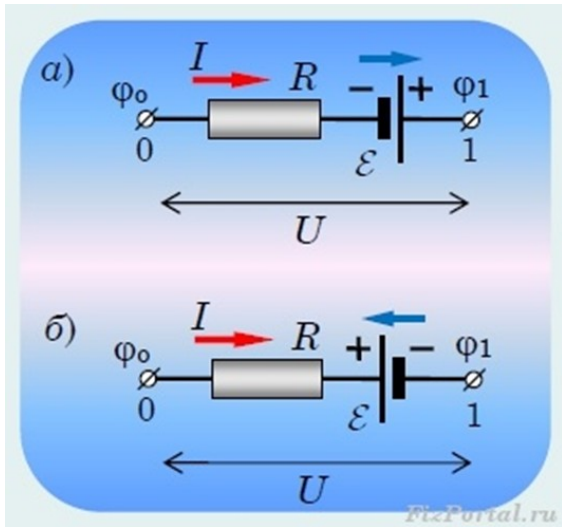
2



$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon$$

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}}{R}$$

*или обобщенный закон Ома*



$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}$$

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 - \varepsilon_{12}$$

- Решая задачи, выбирают направление обхода цепи, если ток и ЭДС совпадают с направлением

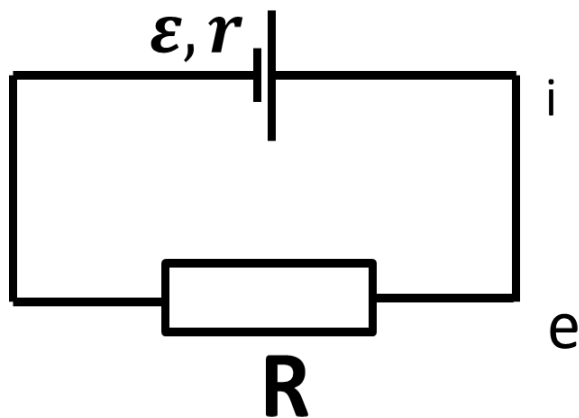
# Закон Ома

■ Если  $=0$  , то участок становится однородным:

3

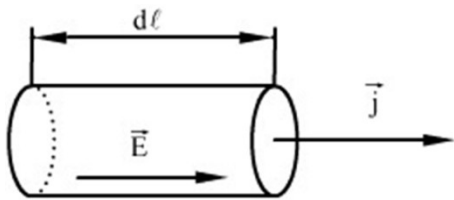
## Закон Ома для замкнутой цепи

Замкнутая цепь, когда




# Закон Ома в дифференциальной форме

- Выделим в проводнике бесконечно малый цилиндр



$$dR = \rho \frac{dl}{dS}$$

- Так как цилиндр мал, то плотность тока поле на этом участке однородное:
- Цилиндр – однородный участок цепи, по закону Ома:
- $dS$
- $=$  
- *это закон Ома в дифференциальной форме*

# Закон Ома в дифференциальной форме

С другой стороны :

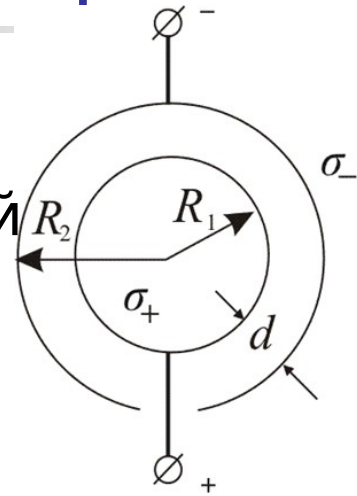
- $\gamma$
- Отношение  $\left( \frac{J}{E} \right) = -$  называется *подвижностью заряда*.

Если два носителя заряда:

■

# Связь между $\rho$ и $C$ конденсатора

- Рассмотрим сферический конденсатор, заполненный диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ .
- Ток утечки течет радиально:  
из закона Ома в дифференциальной форме ,  
получим:



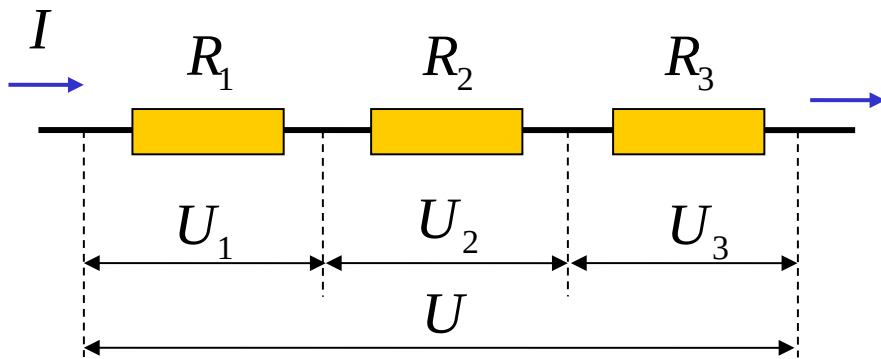
Из определения ёмкости: Числитель – теорема  
Остроградского-Гаусса, знаменатель – закон Ома.

Для плоского конденсатора:



# Соединение проводников

## ■ Последовательное соединение



**При последовательном соединении** проводников сила тока во всех проводниках одинакова

$$U_1 = IR_1 \quad U_2 = IR_2 \quad U_3 = IR_3$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = I(R_1 + R_2 + R_3) \quad U = IR$$

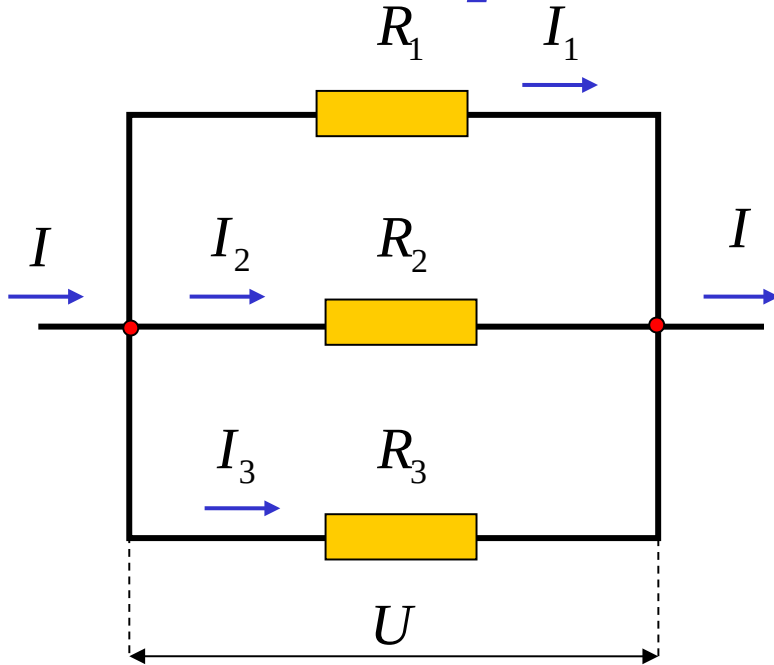
где  $R = R_1 + R_2 + R_3$  - электрическое сопротивление всей цепи

**При последовательном соединении полное сопротивление цепи равно сумме сопротивлений отдельных проводников**

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

# Соединение проводников

## ■ Параллельное соединение



$$U_1 = U_2 = U_3 = U$$

$$I_1 = U / R_1 \quad I_2 = U / R_2 \quad I_3 = U / R_3$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$I = U \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

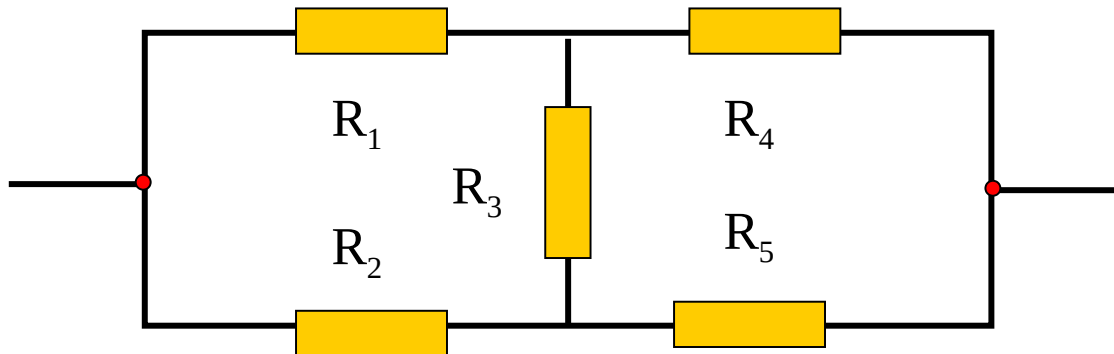
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

**При параллельном соединении проводников величина, обратная общему сопротивлению цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям параллельно включенных проводников**

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

# Соединение проводников

- Последовательно соединено 5 равных сопротивлений. Во сколько раз изменится сопротивление цепи, если их соединить параллельно?
- Следует отметить, что далеко не все сложные цепи, состоящие из проводников с различными сопротивлениями, могут быть рассчитаны с помощью формул для последовательного и параллельного соединений. Ниже приведен пример электрической цепи, которую нельзя рассчитать указанным выше методом. В таких случаях используют правила Кирхгофа.

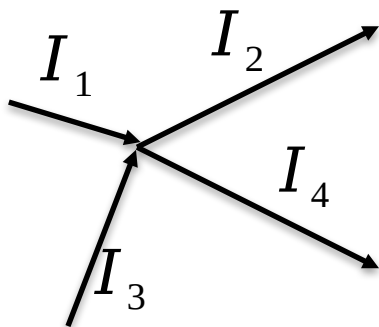




# Правила Кирхгофа

■ **Первое правило Кирхгофа** – оно относится к узлам цепи: *алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю.*

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = 0$$



■ *Входящие* в узел ток записывают со знаком *плюс*, в *выходящие* – со знаком *минус*.

■ Первое правило Кирхгофа является следствием закона сохранения электрического заряда.

■ **Число уравнений составленных по первому правилу Кирхгофа:**

$n-1$  , где  $n$ - число узлов

*Узел (узловые точки)* – любой участок цепи, где сходятся более



# Правила Кирхгофа

■ **Второе правило Кирхгофа** относится к любому выделенному в разветвленной цепи замкнутому контуру: *алгебраическая сумма произведений сил токов в отдельных участках произвольного замкнутого контура на их сопротивления равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре:*

$$\sum I_k R_k = \sum \varepsilon_j$$

■ Второе правило Кирхгофа является следствием обобщенного закона Ома.

■ Число уравнений по второму правилу Кирхгофа :  $m - n + 1$  , где  $m$ - число ветвей, это число уравнений равно числу независимых контуров.

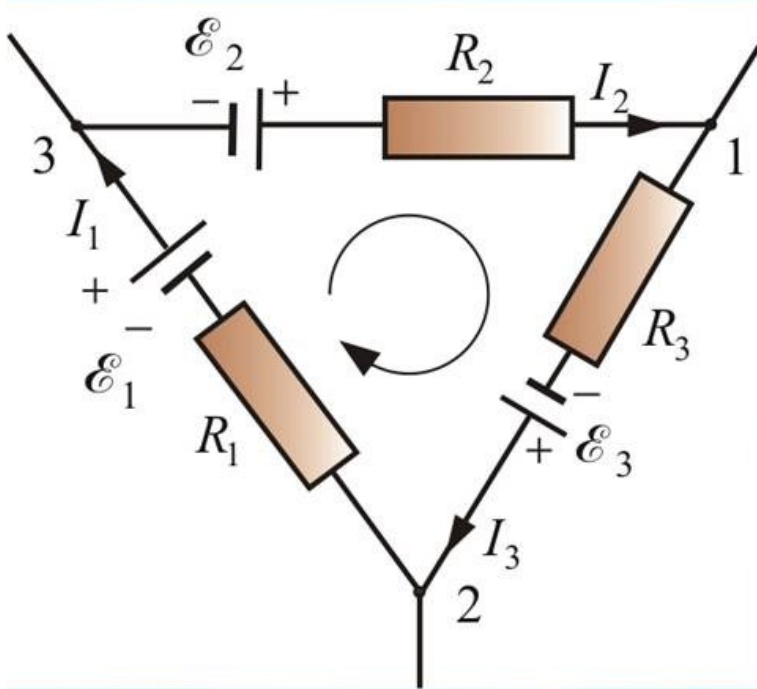
■ **Контурами** называют замкнутые пути в разветвленной цепи, состоящих, как из однородных, так и неоднородных участков .

■ **Независимый контур**, это контур, который имеет хотя бы одну новую ветвь.

■ Суммарное число уравнений по двум правилам равно числу токов в цепи.

# Правила Кирхгофа

Запишем обобщенный закон Ома для каждой ветви:



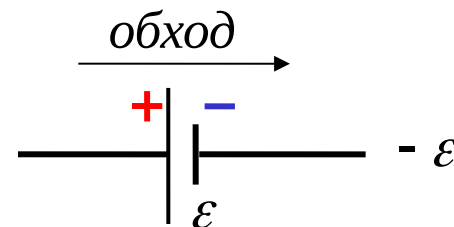
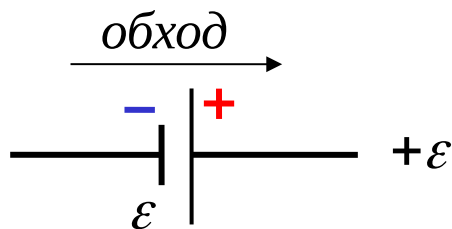
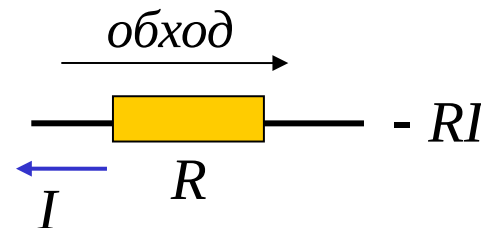
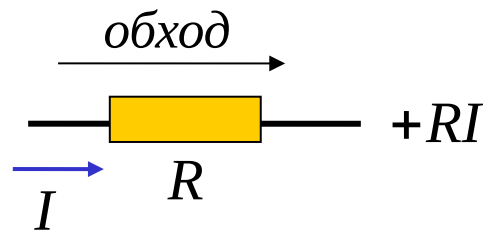
Сложим эти три уравнения и получим второе правило Кирхгофа для контура:

$$\sum I_k R_k = \sum \mathcal{E}_j$$

# Правила Кирхгофа

При составлении уравнений следует придерживаться следующих правил:

1. *Обозначить стрелками предположительные направления токов.* Если в результате решения сила тока на каком-то участке оказывается отрицательной, это означает, что его истинное направление противоположно выбранному направлению стрелки.
2. Выбрав произвольно замкнутый контур, *выбирают направление обхода.* Все его участки следует обойти в одном направлении обхода. Если направление тока совпадает при этом с направлением обхода, то слагаемое нужно брать со знаком «+», в противном случае со знаком «-». Это относится и к эдс



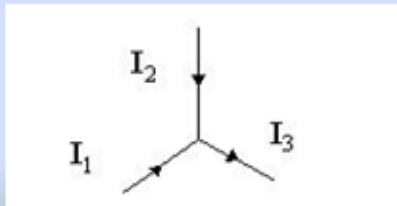
# Правила Кирхгофа

## Правила Кирхгофа

1 Правило: Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле равна нулю:

$$\sum_i I_i = 0$$

Узлом называется точка, в которой сходится более чем два проводника.



$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$\sum_i I_{\text{вход.}} = \sum_j I_{\text{выход.}}$$

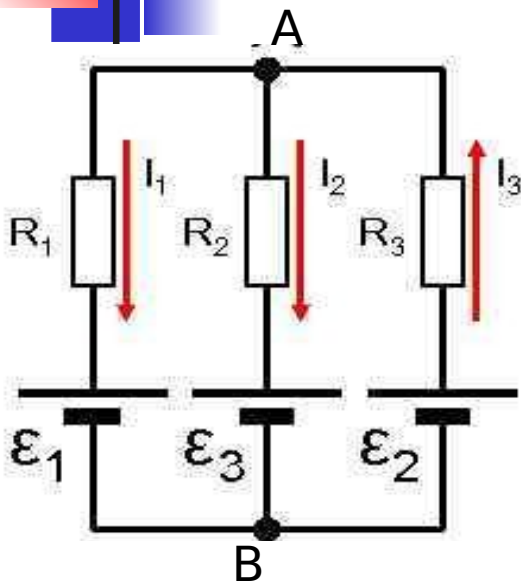
## Правила Кирхгофа

2 Правило: В любом замкнутом контуре сумма падения напряжений равна сумме ЭДС

$$\sum_i I_i R_i = \sum_j \varepsilon_j$$

Пример решения

# Правила Кирхгофа



Применение правил Кирхгофа:

1. Выбрали направления токов в ветвях.

2. По первому правилу Кирхгофа для узлов:

Узел A -

1

Узел B -

Число узлов -  $n = 2$ , число уравнений по первому правилу  $n-1$ , поэтому оставляем одно уравнение.

3. Выбираем направление обхода контуров, например по часовой стрелке.

4. По второму правилу Кирхгофа для узлов:

3

Контур A :

-

Контур A :

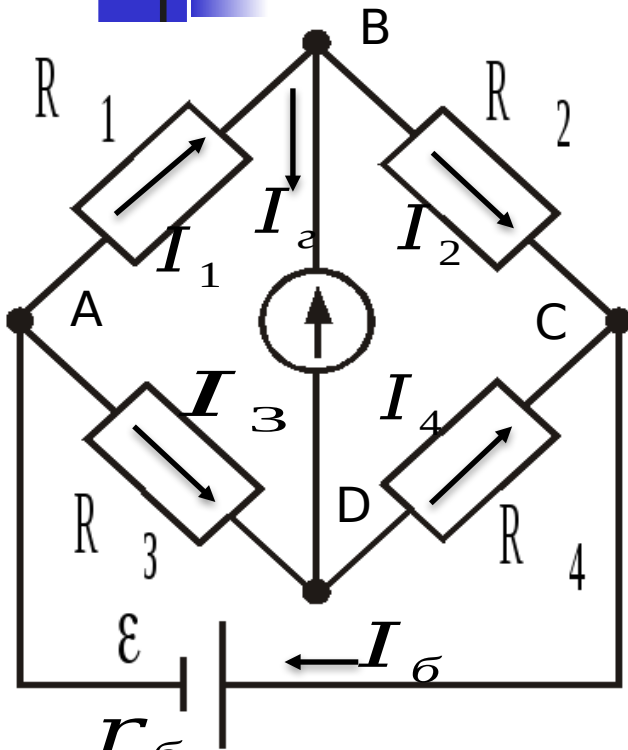
-

Контур A :

Число уравнений по второму правилу  $m-n+1 = 3-2+1=2$  - равно числу независимых контуров. Третье уравнений это сумма первых двух.

Число токов - 3 оставляем три уравнения

# Правила Кирхгофа ( мост Уинстона)



1. Зададим направление токов в ветвях.
2. По первому правилу Кирхгофа запишем уравнения для узлов:

Узел A:  $I_6 = I_1 - I_3$       Узел B:  $I_1 = I_2 + I_a$

Узел C:  $I_2 + I_4 = I_6$       Узел D:  $I_4 = I_a + I_3$

3. Выберем направление обхода контуров - по часовой стрелке.

4. По второму правилу Кирхгофа запишем уравнения для контуров:

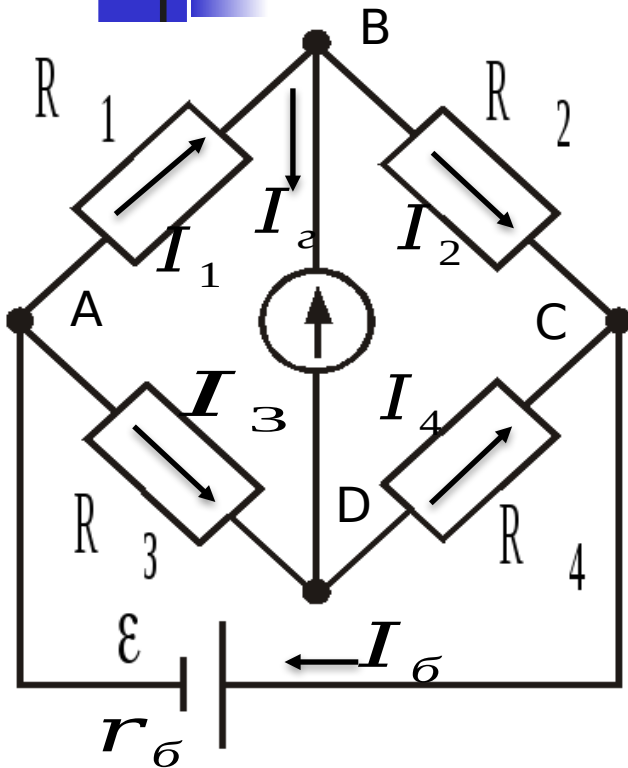
Контур ABC :

Контур ABDA:

Контур BCDB:

Контур ABCD:

# Правила Кирхгофа ( мост Уинстона)



В процессе измерения добиваются **баланса моста**, когда ток через гальванометр не течет.

**Условие баланса :**

Тогда :

1)  
2) }

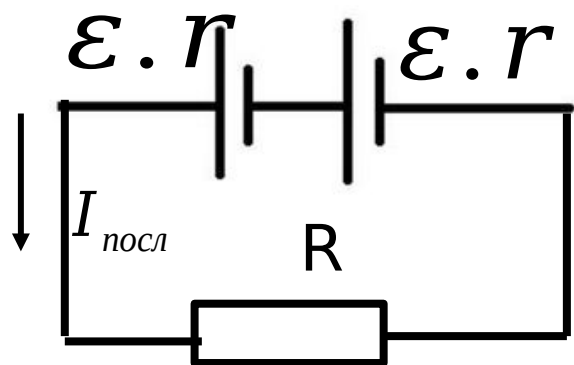
**Условие баланса** 
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

В технике измерений электрическим мостом называют электрический прибор для измерения сопротивлений, емкостей, индуктивностей и других электрических величин, представляющих собой измерительную мостовую цепь, действие которой основано на методике сравнения измеряемой величины с образцовой мерой.



# Правила Кирхгофа

Два одинаковых источника (соединены в батарею, двумя способами. При каком соединении ток в нагрузке R больше?

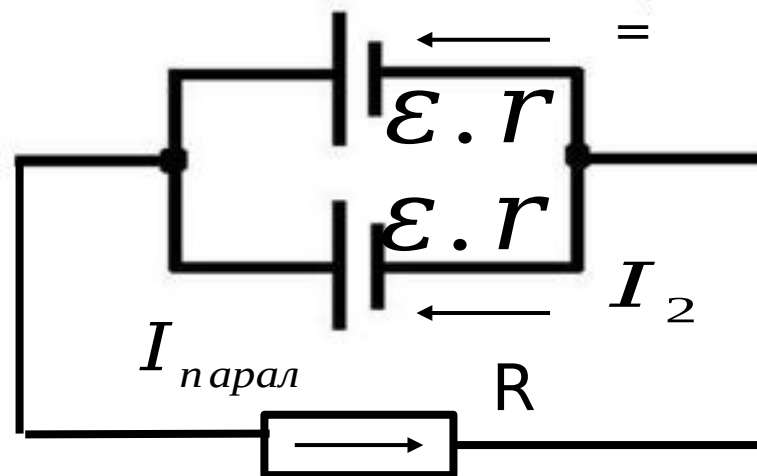


$$I_{\text{посл}}(R + 2r) = 2\varepsilon$$

$$I_{\text{посл}} = \frac{2\varepsilon}{R + 2r}$$

1) Если , то

2) Если , то



I правило:

II правило: +

$$I_{\text{пар}} = \frac{2\varepsilon}{2R + r}$$

3) Если , то



# Последовательное и параллельное соединение источников

---

- Последовательное соединение:



- Параллельное соединение:

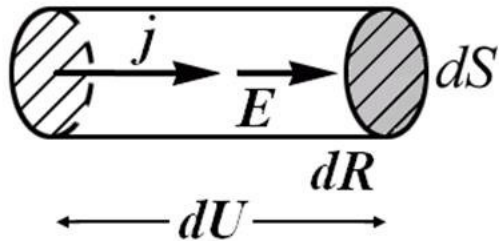


1. При
2. При
3. При

# Закон Джоуля-Ленца

- В 1841 году английский физик Джеймс Джоуль и русский физик Эмилий Христович Ленц получили закон, который определяет количество теплоты, которое выделяется в проводнике, при протекании через него тока.

Рассмотрим участок проводника, по нему течет ток, силы электрического поля совершают работу по переносу заряда  $dq$ , заряд при перемещении теряет эту энергию, сталкиваясь с атомами проводника, эта энергия выделяется в виде тепла.



$$dA = dq \cdot \Delta \varphi = dqU = IUdt = I^2 Rdt = \frac{U^2}{R} dt$$



# Закон Джоуля-Ленца

$$Q = qU = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$$

$$Q = \int_0^t I^2 R dt = \int_0^t \frac{U^2}{R} dt$$

Для постоянного  
тока

Для переменного  
тока

С другой стороны :

- Джоулево тепло зависит от времени протекания тока.
- Введем величину, которая не зависит от времени – *тепловая мощность*:



# Закон Джоуля-Ленца

---

- Мощность тока:

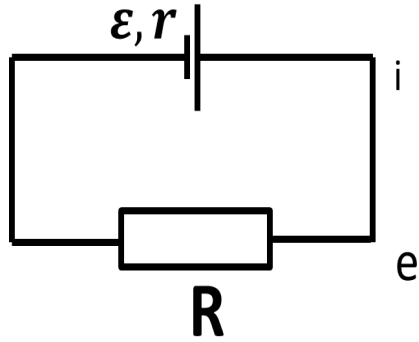
- $$\longrightarrow Q = \int P(t) dt$$

- Введем понятие – удельная мощность тока:

- $$\underline{dQ} = w dV dt$$

- Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме

# Передача мощности в цепи постоянного тока



Рассмотрим протекание тока в простейшей цепи, состоящей из источника (intro - интро-  $i$ ) внутренняя часть и сопротивления нагрузки  $R$  ( внешняя часть - extra - экстра -  $e$ ). Закон Ома для замкнутой цепи.

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

Перепишем это уравнение:      или

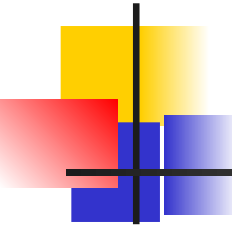


Работа, которую совершает источник ЭДС по переносу заряда  $dq$  в цепи:

Мощность, развиваемая источником ( работа в единицу времени):

$$P = \frac{dA}{dt} = \varepsilon \frac{dq}{dt} = \varepsilon I$$

Полная мощность:



# Передача мощности в цепи постоянного тока

$$P = I(Ir + IR) = I^2r + I^2R$$

■ *Полная мощность*

$$P = \frac{\varepsilon^2}{R + r}$$

$$P = P_i + P_e$$

*Полезная мощность* – выделяется на сопротивлении нагрузки  $R$

$$P_e = I^2R = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2}$$

*Коэффициент полезного действия - КПД*

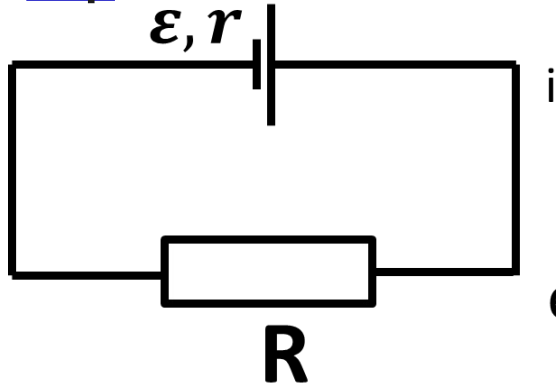
$$\eta = \frac{P_e}{P} = \frac{R}{R + r}$$

*Мощность*

$$P_i = I^2 r$$

потери

# Передача мощности в цепи постоянного тока



$$P = \varepsilon I$$



$$IR + Ir = \varepsilon$$

$$P = (IR + Ir) \cdot I = I^2 R + I^2 r = P_e + P_i$$

- полезная мощность

=

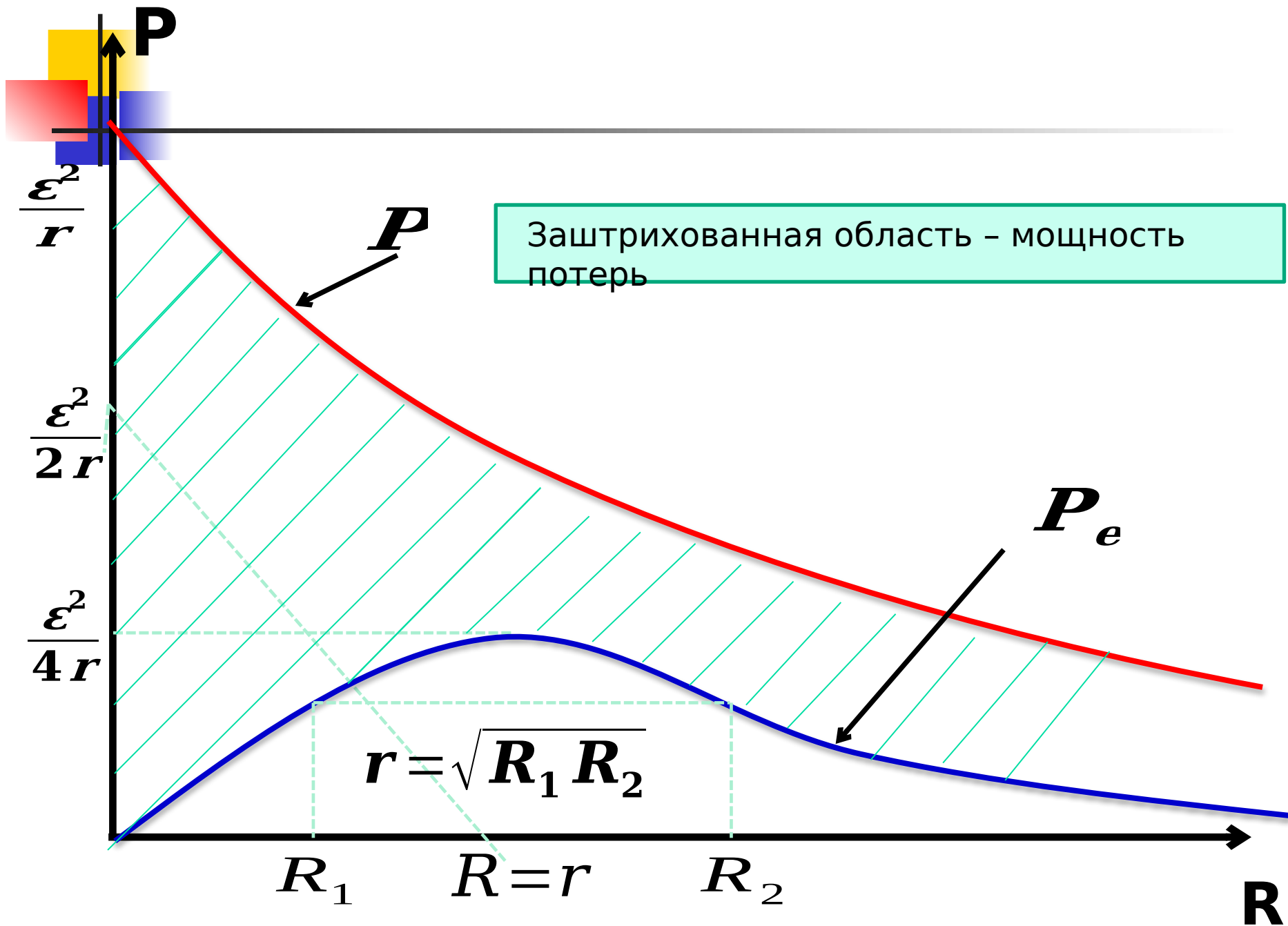
- Полезная мощность имеет максимум при , этот режим называется - **режим согласования**.



# Режимы работы схемы

- $R \rightarrow 0$  Короткое замыкание
- $R \rightarrow \infty$  Холостой ход
- $R = r$  Режим согласования

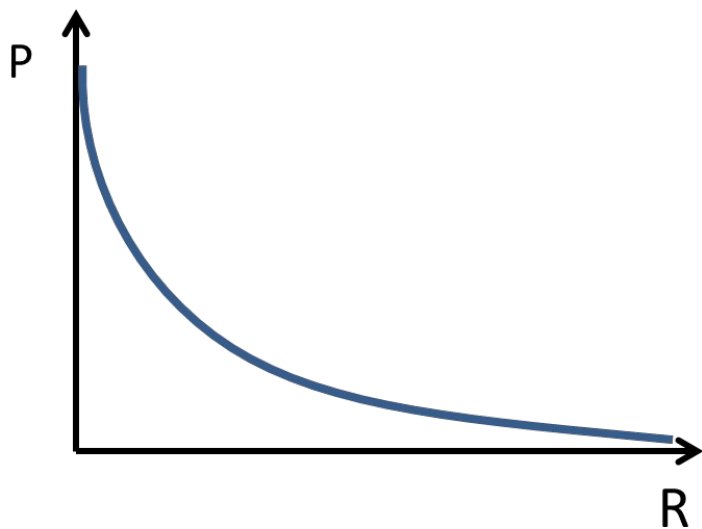
	R	I	P	$P_e$	$\eta$
К.З	0	$I_{\text{К.З}} = \frac{\varepsilon}{r}$	$\frac{\varepsilon^2}{r}$	0	0
Х.Х	$\infty$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 1$
Согл.	$r=R$	$\frac{\varepsilon}{2r}$	$\frac{\varepsilon^2}{2r}$	$\frac{\varepsilon^2}{4r}$	0,5 (50%)



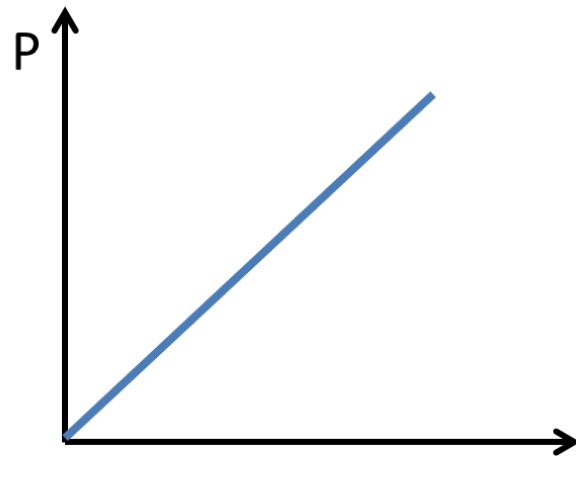


# Полная мощность

Вся мощность, которую может создать источник



$$P = \frac{\varepsilon^2}{R+r}$$

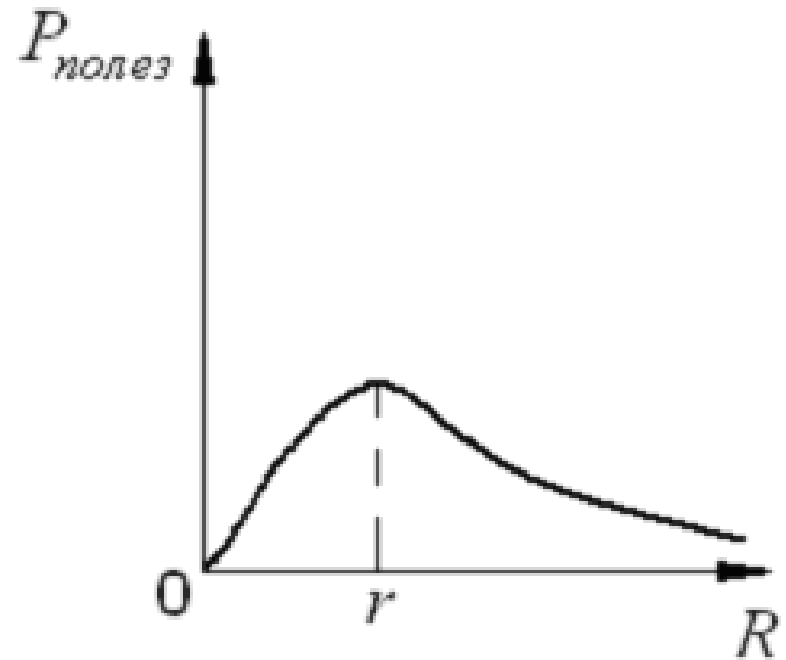
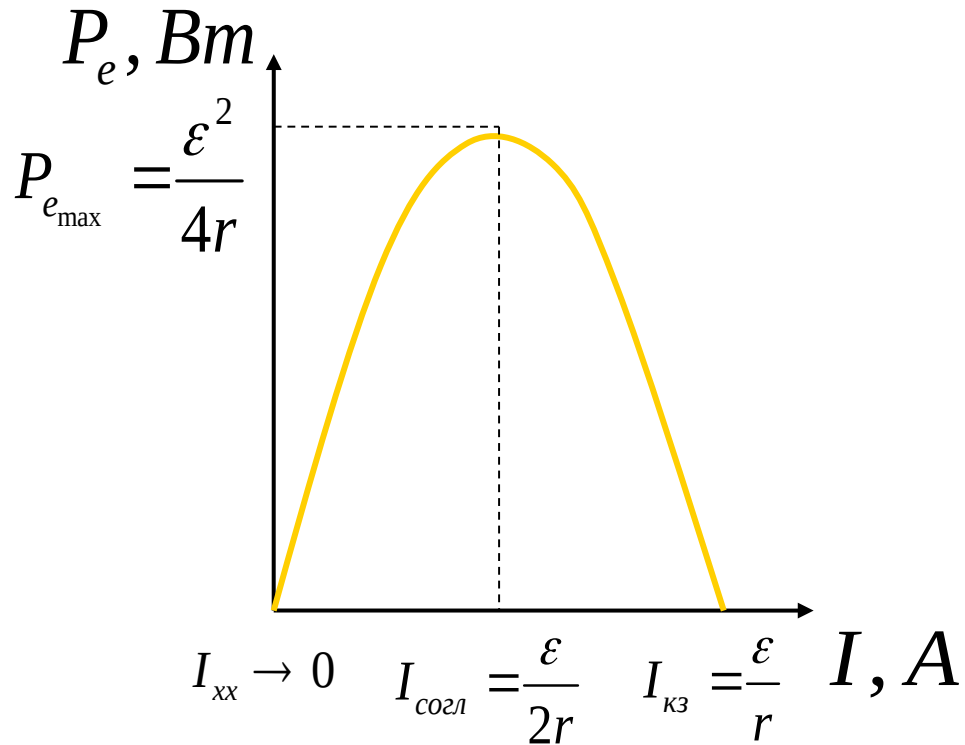


$$P = \varepsilon I$$

# Полезная мощность

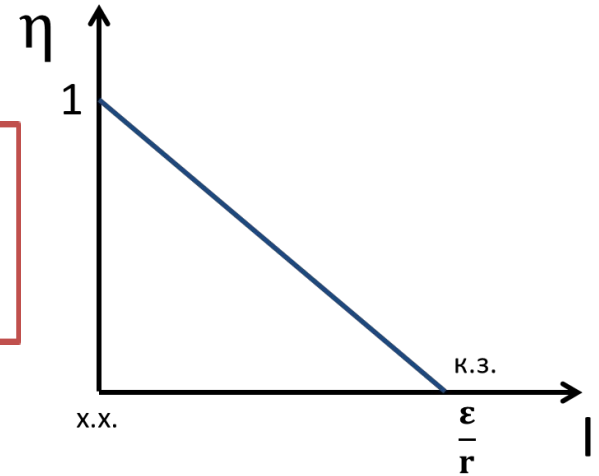
$$P_e = P - P_i = \varepsilon I - I^2 r$$

$$P_e = I^2 R = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2}$$

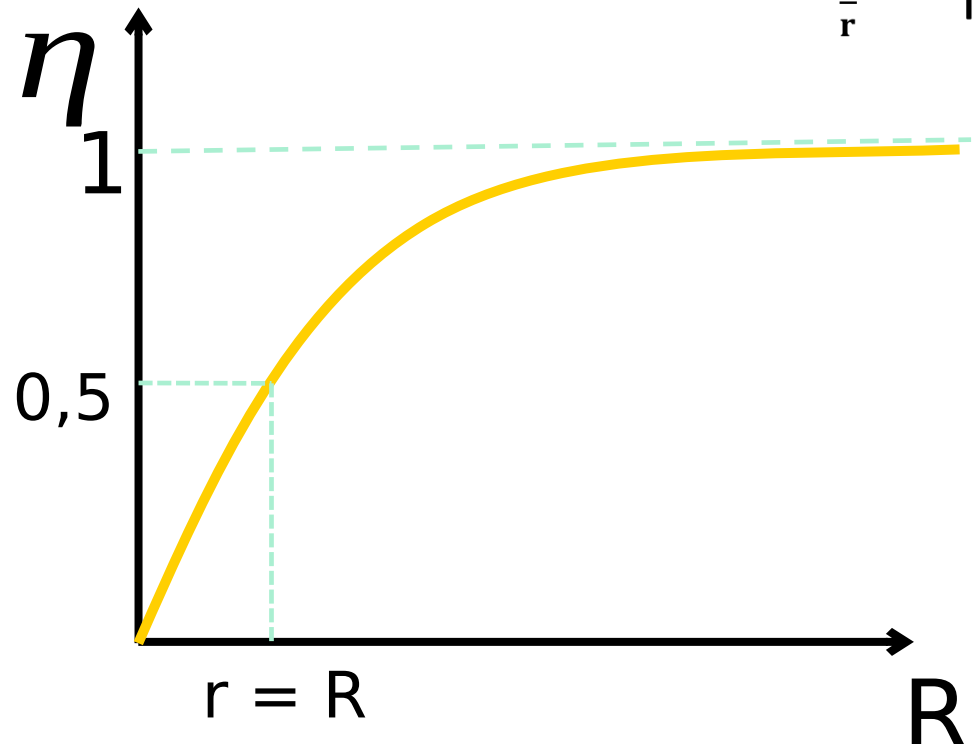


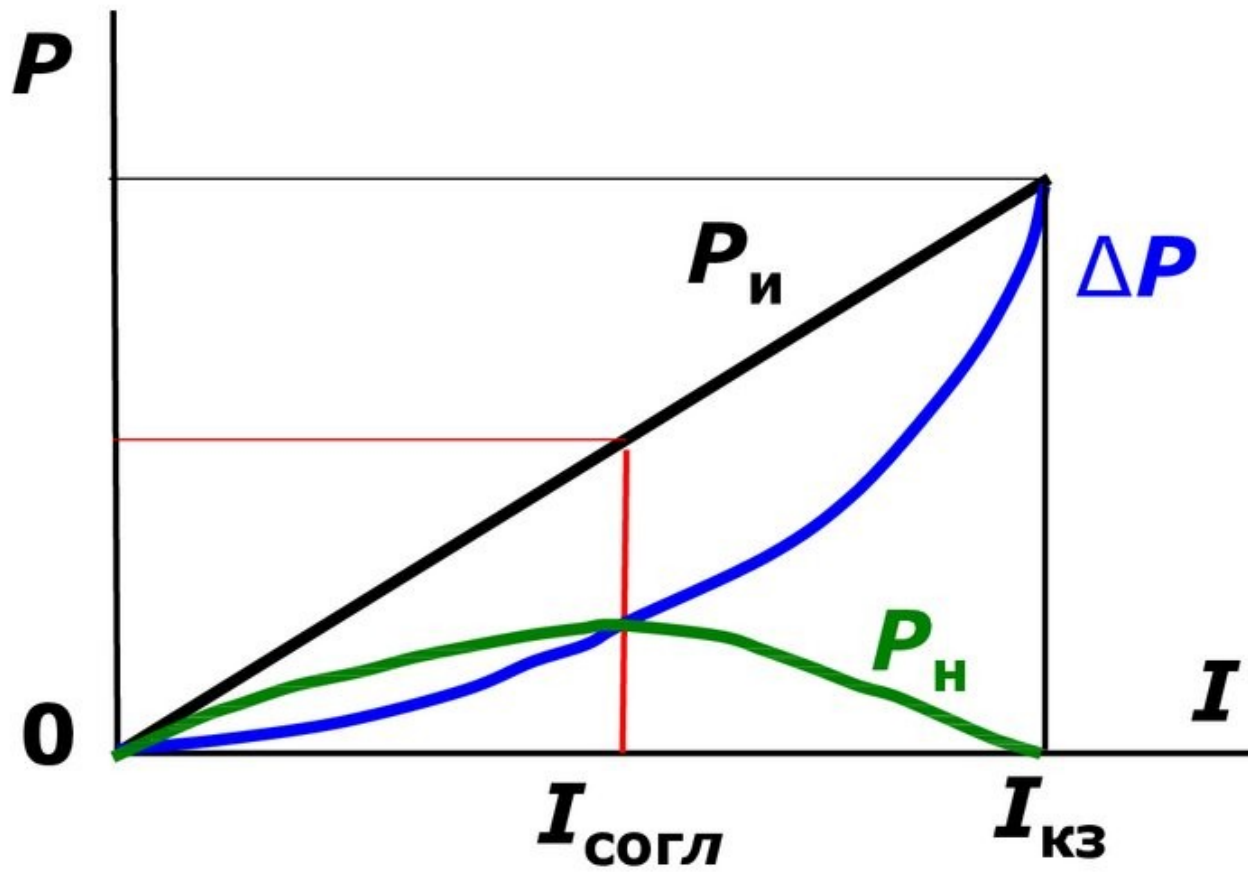
# Коэффициент полезного действия - КПД

$$\eta = \frac{P_e}{P} = \frac{P - P_i}{P} = 1 - \frac{P_i}{P} = 1 - \frac{I^2 r}{\varepsilon I} = 1 - \frac{r}{\varepsilon} I$$



$$\eta = \frac{P_e}{P} = \frac{R}{R + r}$$





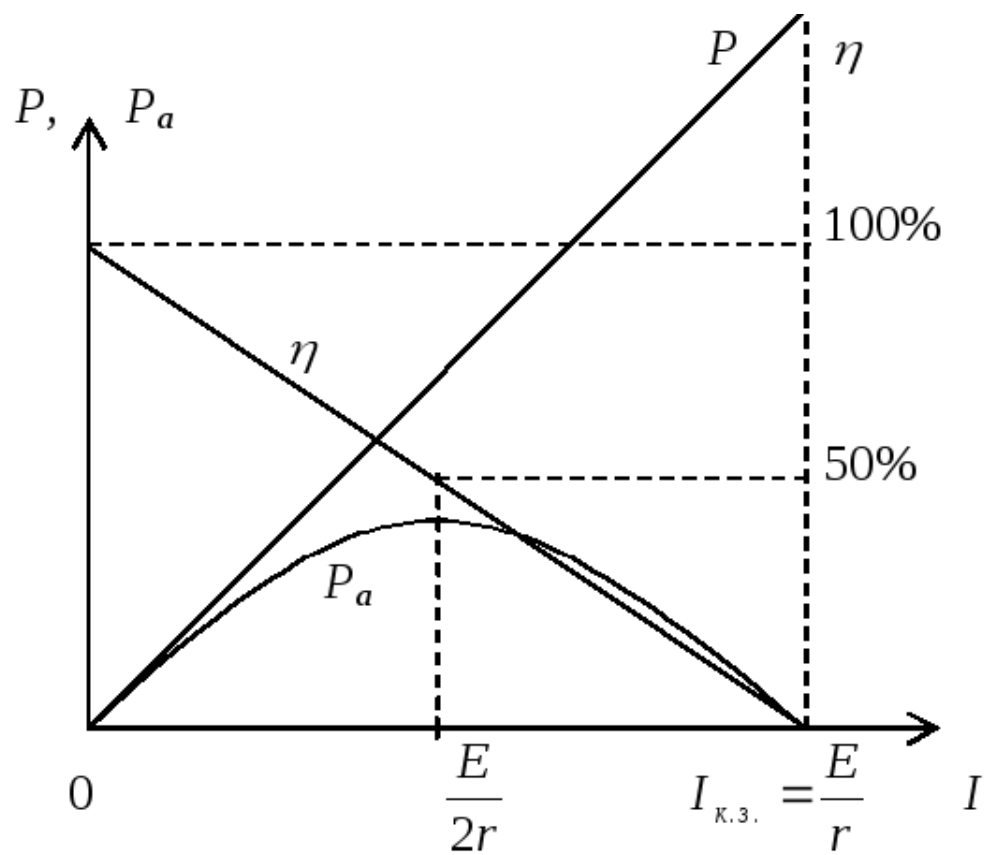


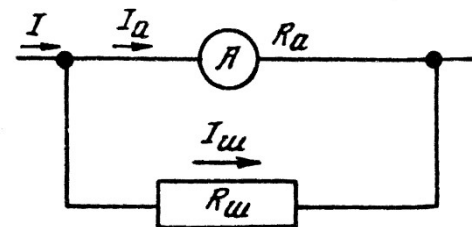
Рис.2

# Расширение пределов приборов

## ■ Шунтирование амперметра:

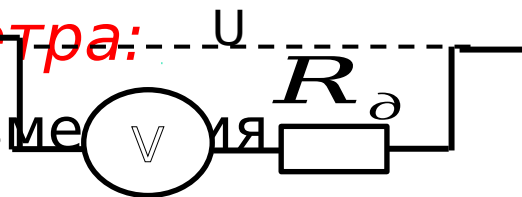
измеряемый ток

- предел тока через амперметр
- ток, отводимый через шунт.



## ■ Добавочное сопротивление вольтметра:

$U$  – измеряемое напряжение; - предел измерения вольтметра



или

