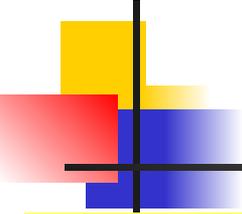


# Дисциплина: Теория электрических цепей

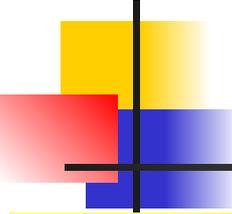




# Лекция №1

---

**Тема: «Основные  
понятия теории  
электрических  
цепей»»**



# Учебные вопросы

---

- 1. Введение.
- 2. Понятие об электрической цепи.
- 3. Основные электрические величины: электрический ток, напряжение, ЭДС, мощность и энергия.
- 4. Идеализированные пассивные элементы. Схемы замещения реальных элементов электрических цепей.
- 5. Идеализированные активные элементы. Схемы замещения реальных источников.

# Литература



- 1. Попов В.П. Основы теории цепей: Учебник для вузов спец. "Радиотехника".-М.: Высшая школа, 2007, с. 6-36.
- 2. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: Учебник для студентов неэлектрических специальностей вузов.— М.: Высшая школа, 2003, с. 4-15.

# Содержание и предмет дисциплины «Теория электрических цепей»

***Содержание дисциплины*** составляют задачи анализ и синтеза линейных и нелинейных электрических цепей, изучение как с качественной, так и с количественной стороны установившихся и переходных процессов, протекающих в различных электронных приборах и устройствах.

***Предметом теории цепей*** является разработка инженерных методов исследования процессов в электротехнических и радиоэлектронных устройствах, основанных на замене этих устройств упрощенными *моделями*, процессы в которых описываются в терминах токов и напряжений.

# Состав электрической цепи

ГОСТ Р52002-2003  
«Электротехника.  
Термины и  
определения  
основных понятий»

Электрическая  
цепь

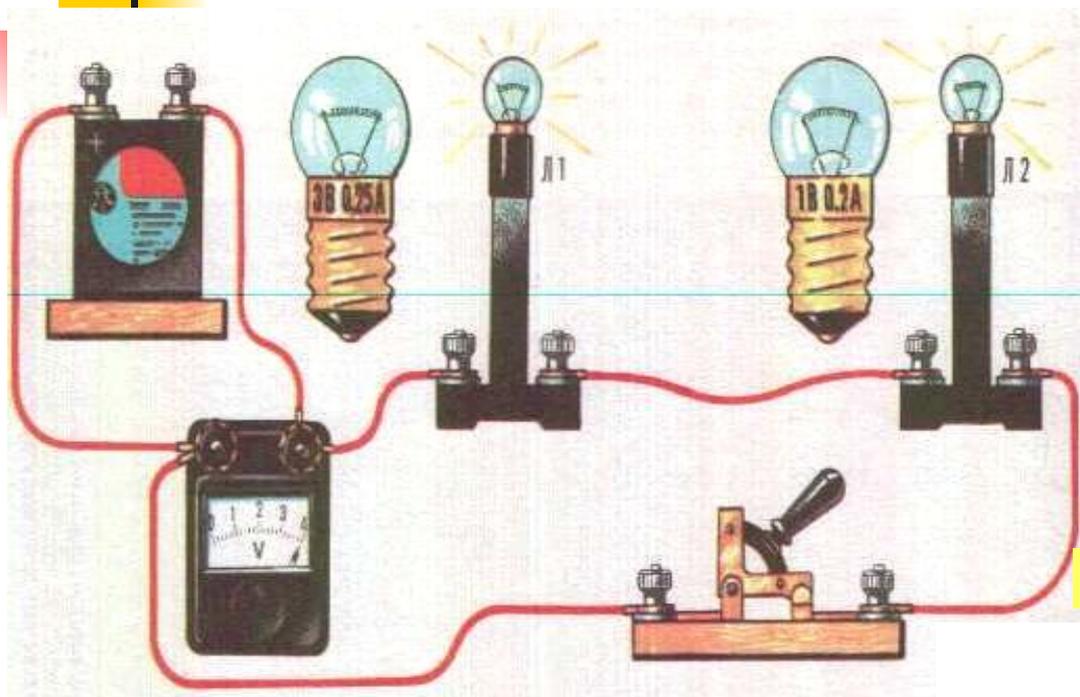
*Электрическая цепь – это совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе, электрическом токе и электрическом напряжении.*

Источники  
электрической  
энергии

Приемники  
электрической  
энергии

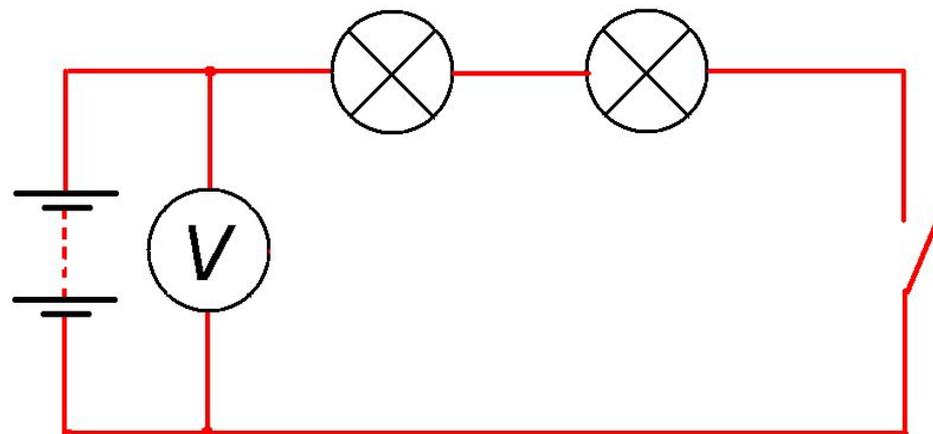
Вспомогательны  
е  
элементы

# Последовательное соединение проводников

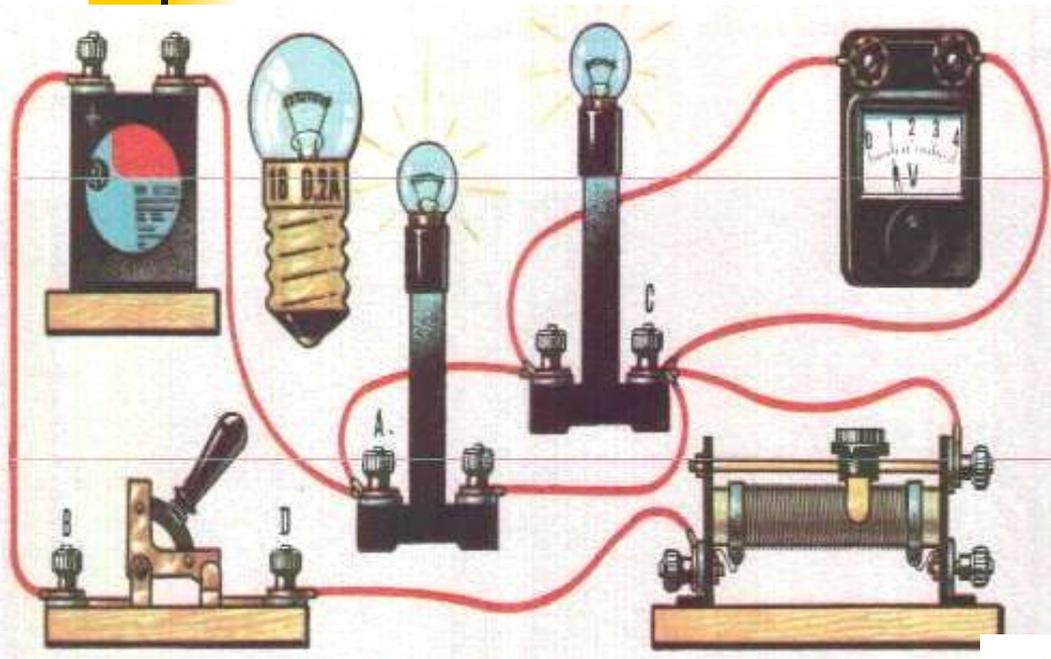


**Монтажная схема**

**Принципиальная схема**

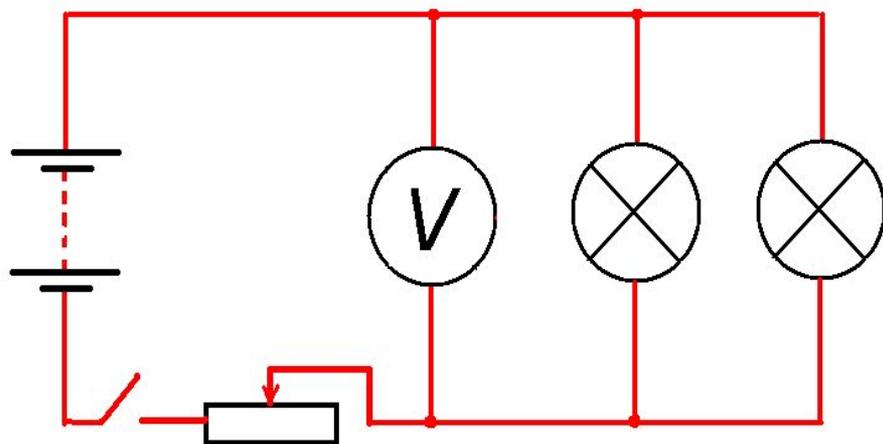


# Параллельное соединение проводников



Монтажная схема

Принципиальная схема



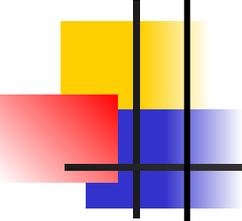
# Основные допущения и принципы теории цепей

**В теории цепей предполагается:**

*каждый элемент цепи полностью характеризуется зависимостью между током и напряжениями на его зажимах, при этом процессы, имеющие место внутри элементов, не рассматриваются .*

**В основе теории электрических цепей**

*лежит принцип моделирования. В соответствии с этим принципом реальные элементы цепи заменяются их упрощенными моделями, построенными из идеализированных элементов.*



# Идеализированные двухполюсные элементы

ИДЭ

Идеаль-  
ный  
резисто-  
р

Идеальная  
индуктив-  
ная  
катушка

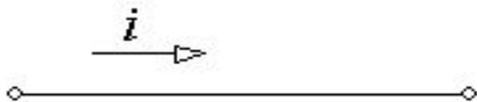
Идеаль-  
ный  
конденса-  
тор

Идеаль-  
ный  
источник  
напряжени-  
я

Идеаль-  
ный  
источник  
тока

# Понятие об электрическом токе

**Электрический ток проводимости** – явление направленного движения свободных носителей электрического заряда в веществе или в пустоте, количественно характеризуемое скалярной величиной, равной производной по времени от электрического заряда, переносимого свободными носителями заряда сквозь рассматриваемую поверхность.



$$i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}$$

$$i(t) = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{q}{t} = I = \text{const}$$

**Постоянный электрический ток** – это неизменное во времени однонаправленное движение заряженных частиц (зарядов).  
Условное **положительное направление тока** при расчетах электрических цепей может быть выбрано совершенно **произвольно**.

# Электрические величины и единицы их измерения

**Мгновенное значение тока равно скорости изменения заряда во времени:**

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}.$$



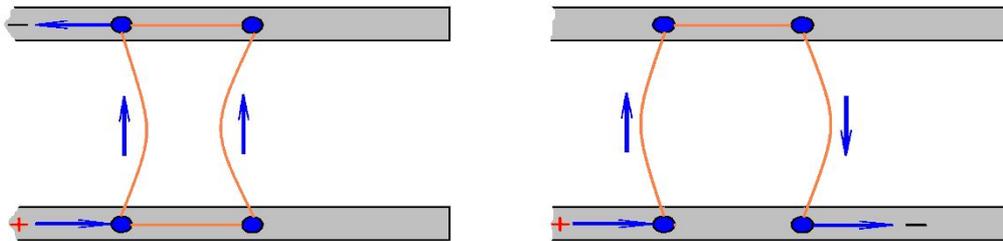
**Андре-Мари  
Ампер 1775 - 1836**

***Единица измерения тока в системе СИ – ампер (А).***

# Сила тока. Единицы силы тока. Амперметр.

Заряд, протекающий через данное поперечное сечение проводника в единицу времени, характеризует электрический ток.

Ток в цепи измеряют специальным прибором - амперметром.



*Схема включения:* амперметр включается в электрическую цепь последовательно с элементом, в котором он измеряет электрический тока.

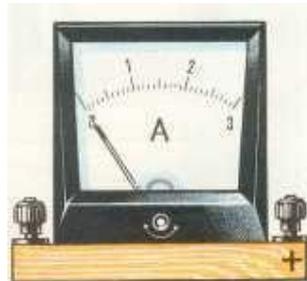


 **АМПЕР** Андре Мари (22.I 1775 - 10.VI 1836) французский физик, математик и химик

**Амперметр** - электрический прибор для измерения силы тока.



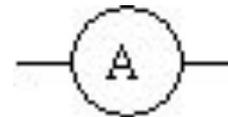
Амперметр лабораторный



Амперметр технический

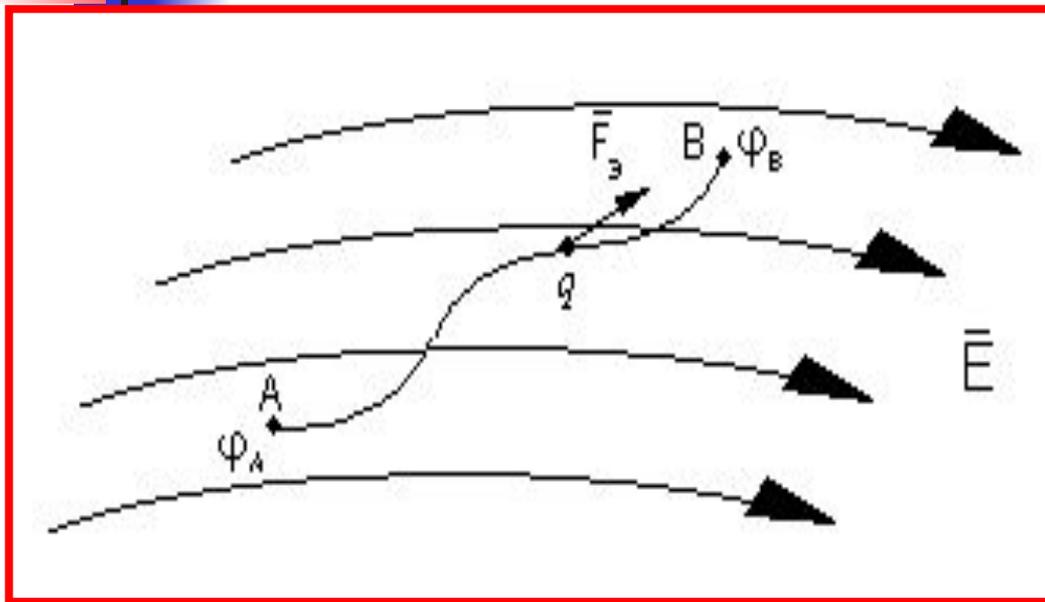


Амперметр демонстрационный



*Условное обозначение на схемах*

# Понятие о напряжении



$$\varphi_A = \int_A^{\infty} \overline{E} dl = \frac{1}{q} \int_A^{\infty} \overline{F}_{\text{Э}} dl = \frac{A}{q}$$

$$\varphi_B = \int_B^{\infty} \overline{E} dl$$

$$u = \varphi_A - \varphi_B = \int_A^B \overline{E} dl$$

**Электрическое напряжение** между точками А и В электрической цепи (или **разность потенциалов** точек А и В) – это **работа совершаемая силами электрического поля по перемещению единичного положительного заряда по произвольному пути из точки А в точку В поля и равная линейному интегралу напряженности электрического поля.**

# Понятие о напряжении



$$u = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta w}{\Delta q} = \frac{dw}{dq}$$

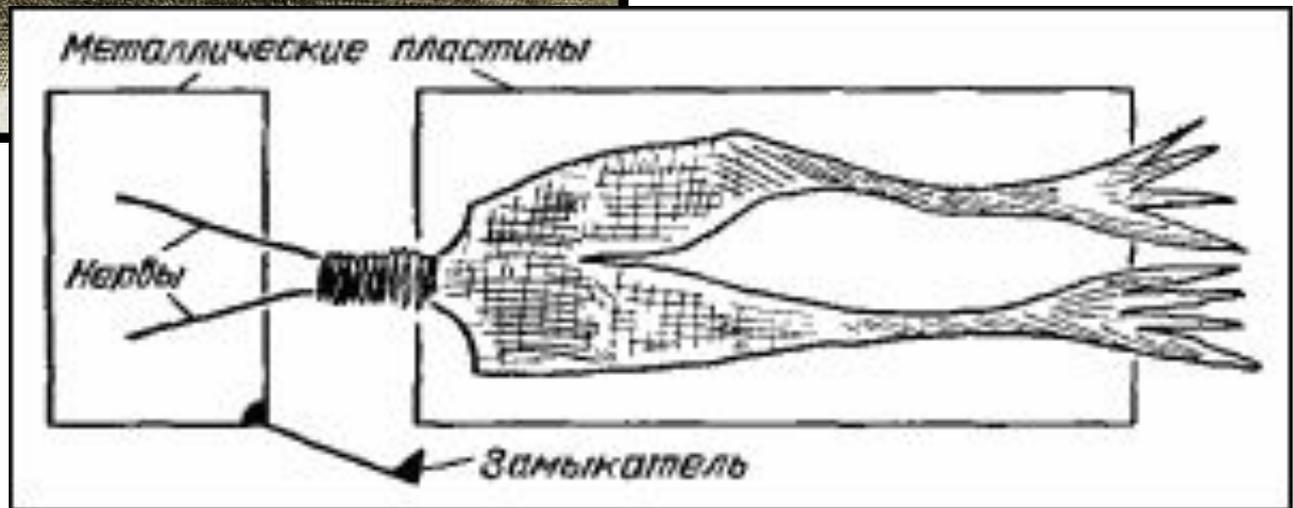
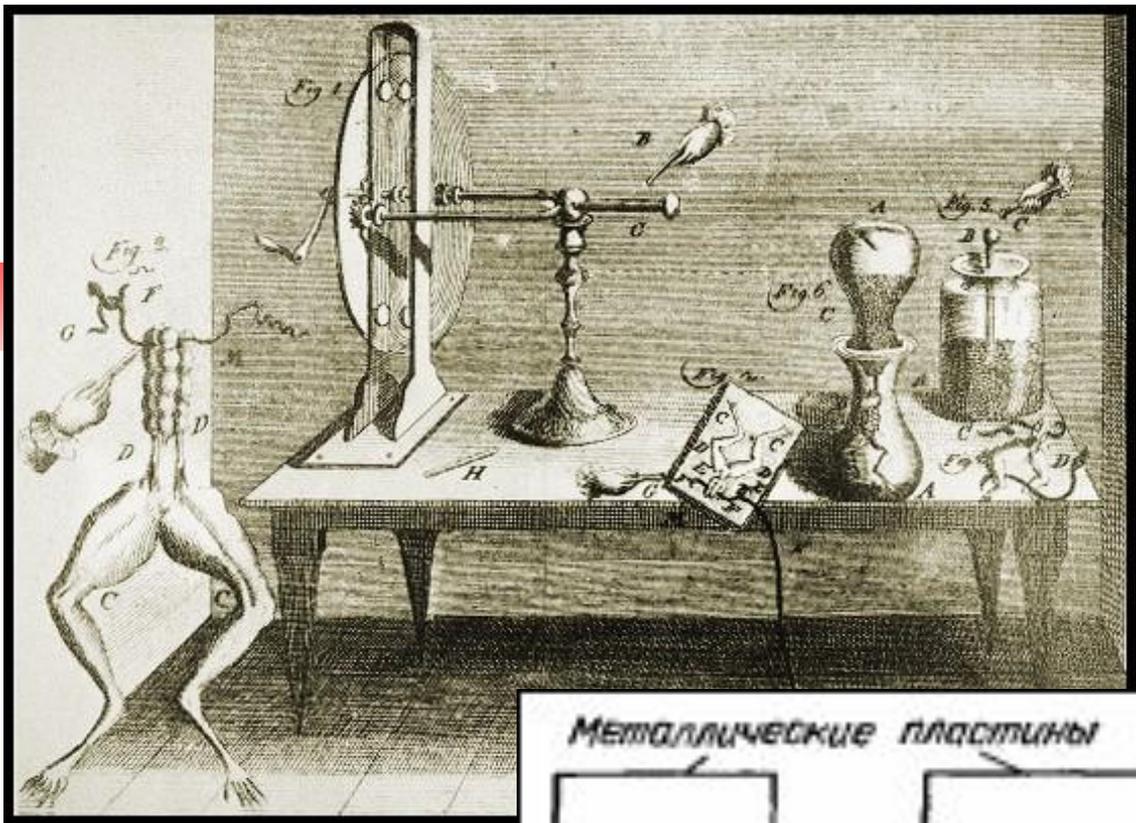
**Напряжение между точками A и B электрической цепи может быть определено как предел отношения энергии электрического поля  $w$ , затрачиваемой на перенос положительного заряда  $q$  из точки A в точку B к этому заряду при**

**Единица измерения напряжения в системе СИ – вольт(В).**

$$\Delta q \rightarrow 0$$



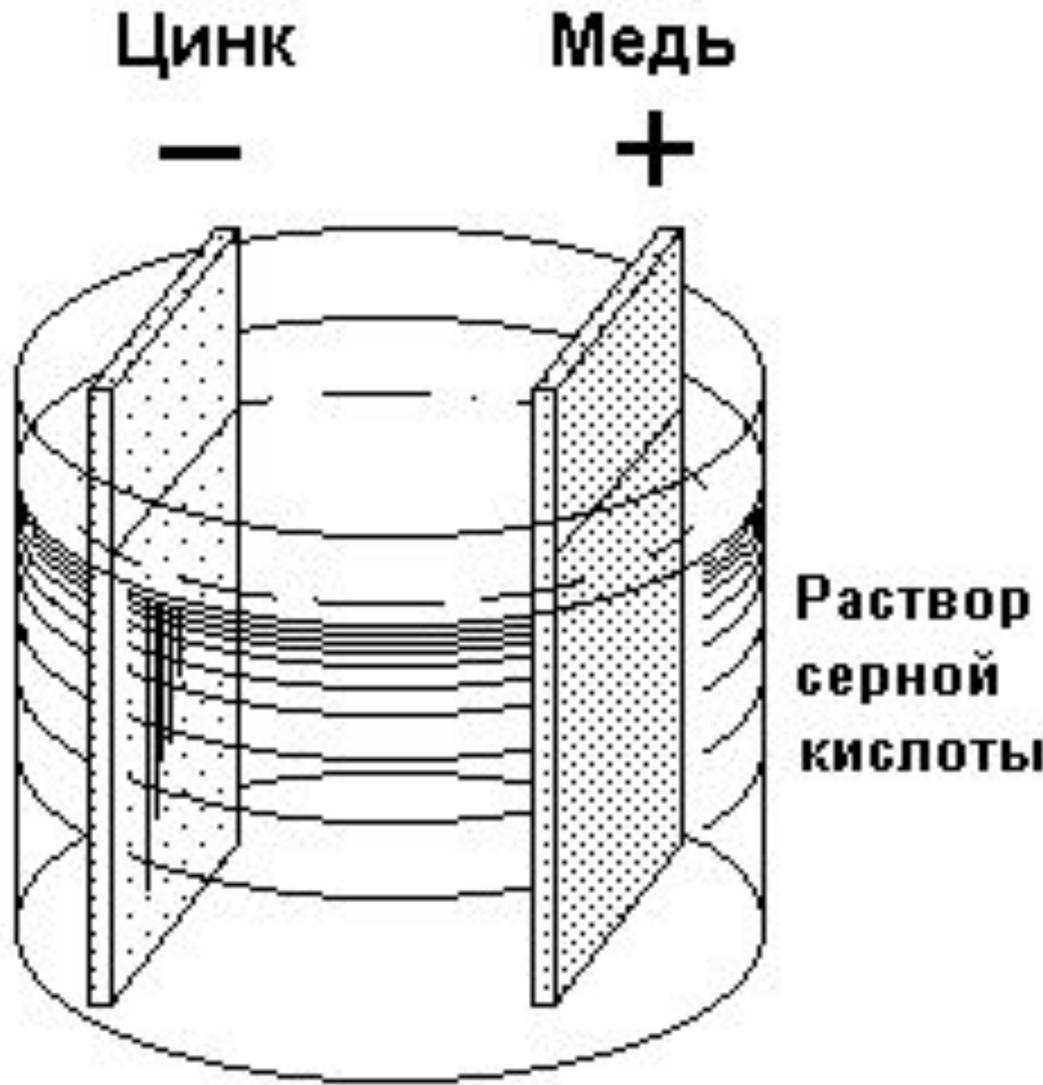
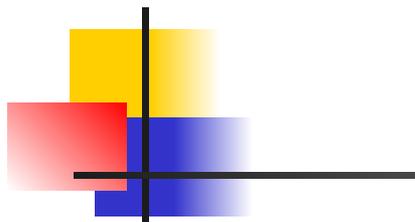
Луиджи Гальвани (1737-1798)



Опыт Луиджи Гальвани с лапками лягушки

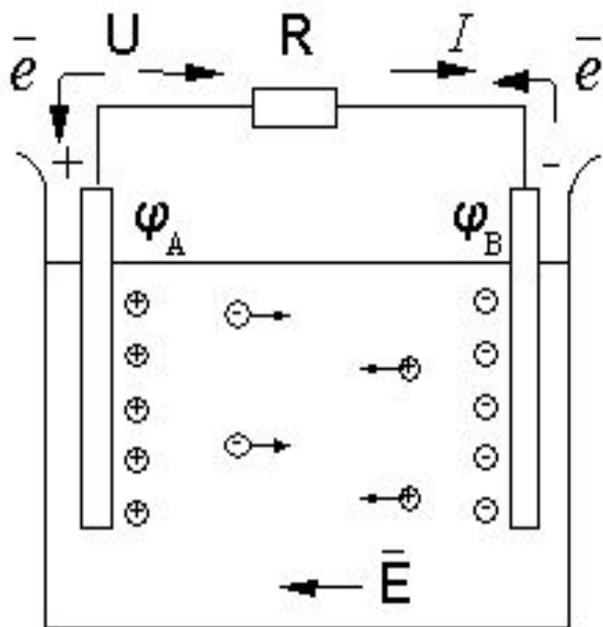


Алессандро Вольта(1745-1827)



Гальванический (или химический) элемент  
Алессандро Вольта

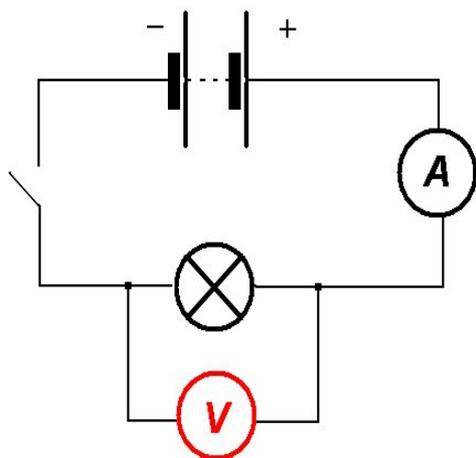
# Понятие об ЭДС



**Электродвижущая сила** –  
скалярная величина, численно  
равная работе сторонних сил,  
затрачиваемая на  
перемещение единичного  
положительного заряда внутри  
источника от зажима с  
меньшим потенциалом к  
зажиму с большим  
потенциалом.

Независимо от природы сторонних сил **ЭДС источника численно равна напряжению** между зажимами источника энергии при отсутствии в нем тока, т.е. в режиме холостого хода.

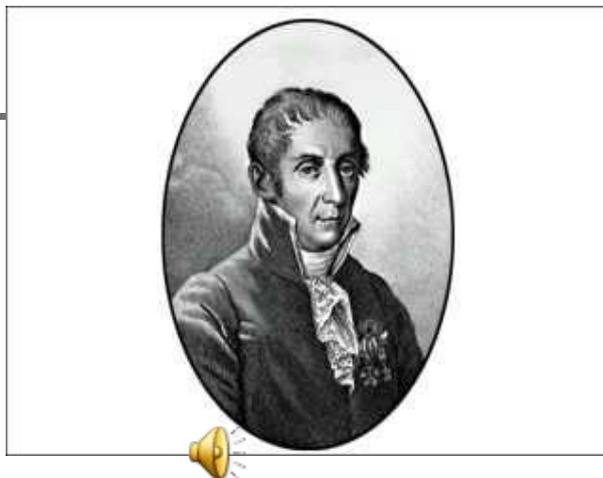
# Электрическое напряжение. Единицы напряжения. Вольтметр



**Схема включения:**

вольтметр включается в электрическую цепь параллельно вольтметр включается в электрическую цепь параллельно тому элементу, на котором он измеряет напряжение.

**Условное обозначение на схемах**



**ВОЛЬТА** Алессандро - (1745-1827) итальянский физик и физиолог

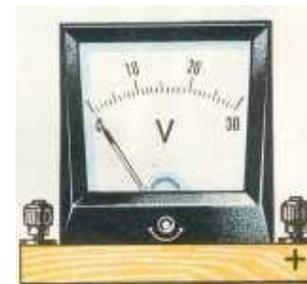
Вольтметр – электрический прибор для измерения напряжения.



Вольтметр технический



Вольтметр лабораторный



Вольтметр лабораторный

# Понятие о мощности и энергии

$$u = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta w}{\Delta q} = \frac{dw}{dq}$$

$$dw = u dq = u i dt$$

Энергия,  
затрачиваемая на  
перемещение  
заряда:

$$w = \int_0^q u dq = \int_{-\infty}^t u i dt$$

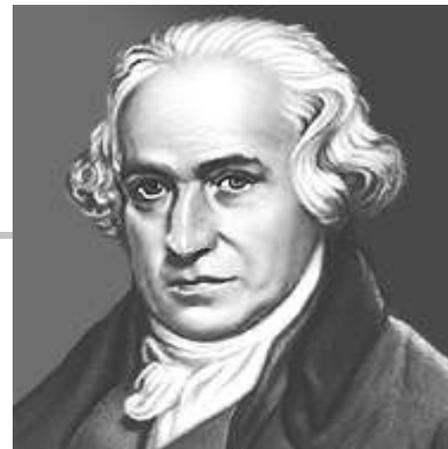
$$p = u i = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = \frac{dw}{dt}$$

# Понятие о мощности и энергии

Мгновенная мощность участка цепи:

$$p = \frac{dw}{dt} = ui.$$

Мощность измеряется в ваттах (Вт)



Джеймс Уатт  
1736 – 1819

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p dt$$

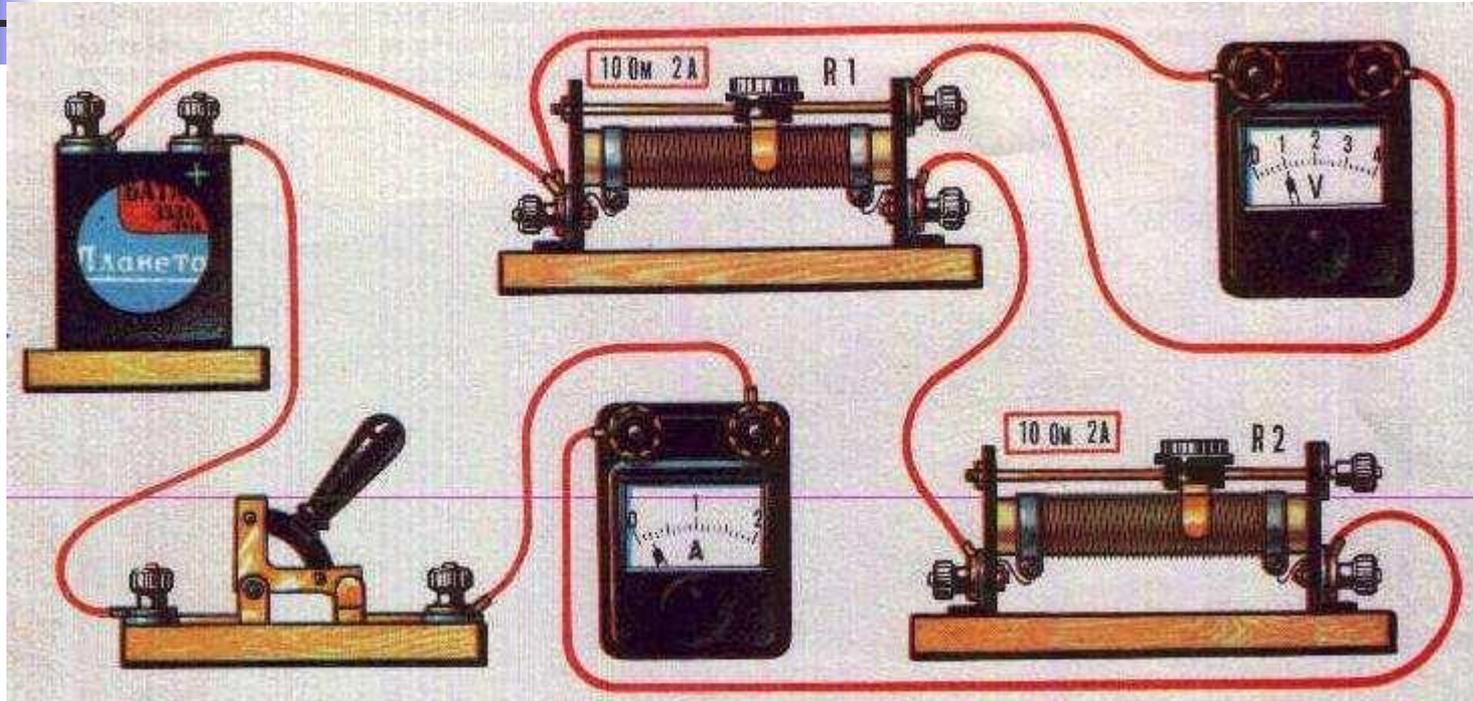
Энергия измеряется в джоулях (Дж)



Джеймс Джоуль  
1818 – 1889

$$W = w(t_2) - w(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} p dt$$

# Экспериментальное определение мощности электрического тока

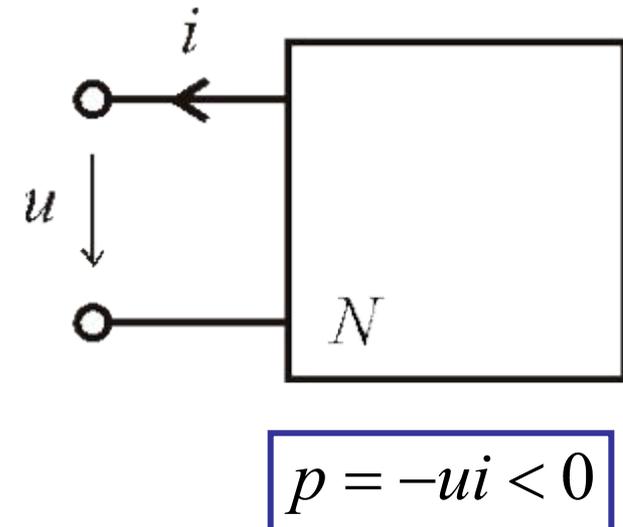
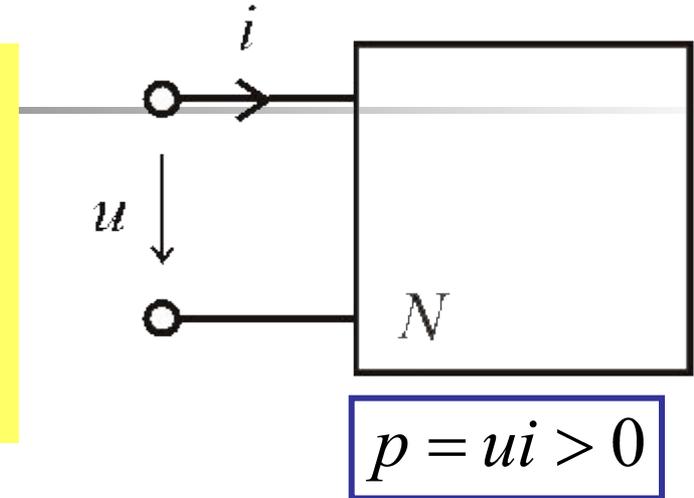


$$P = U \cdot I \quad 1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \cdot \text{А}$$

# Электрическая цепь может быть потребителем и источником энергии

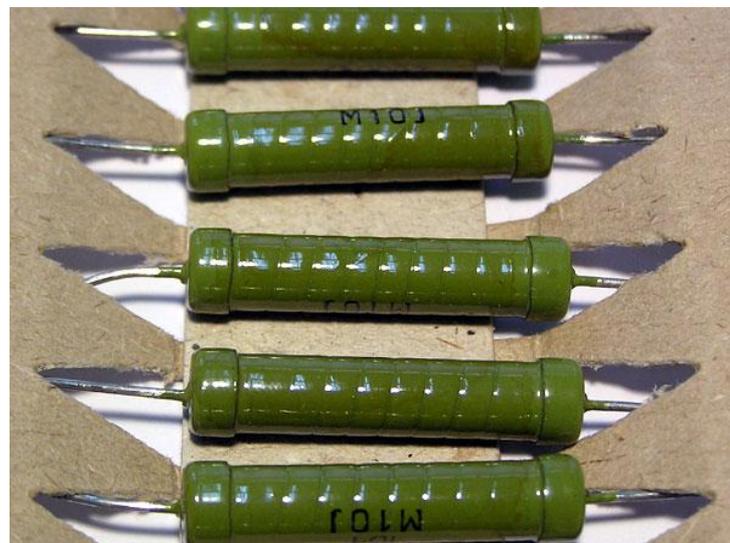
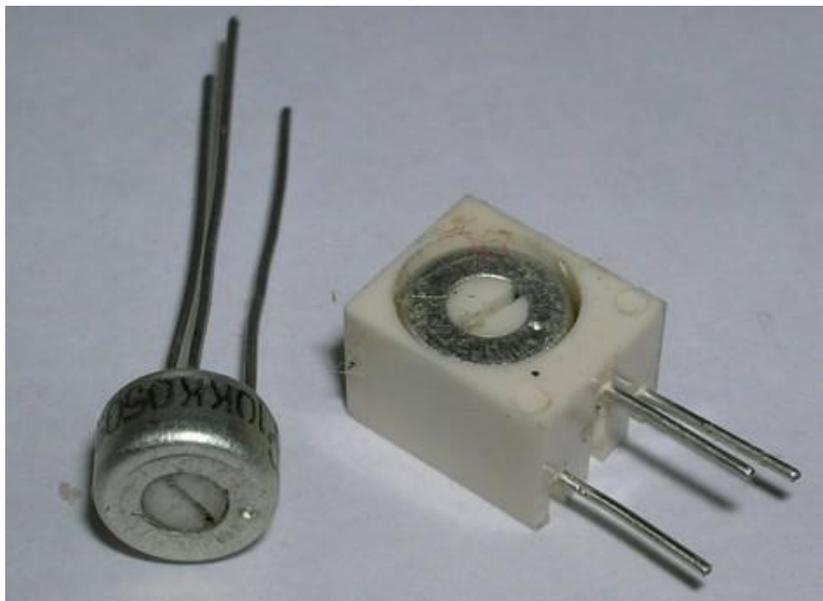
**При совпадении знаков** напряжения и тока мощность положительна. Это соответствует потреблению энергии участком цепи.

**При несовпадении знаков** напряжения и тока мощность отрицательна. Это означает, что участок цепи является источником энергии.

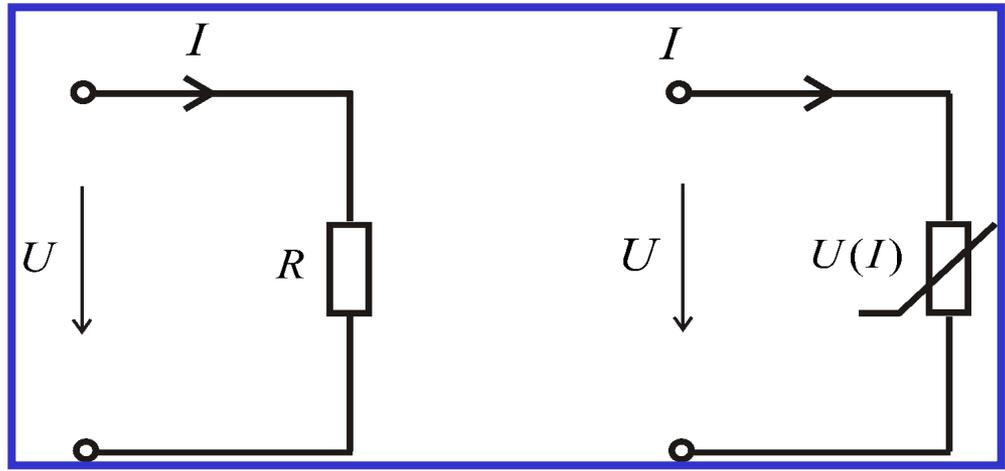
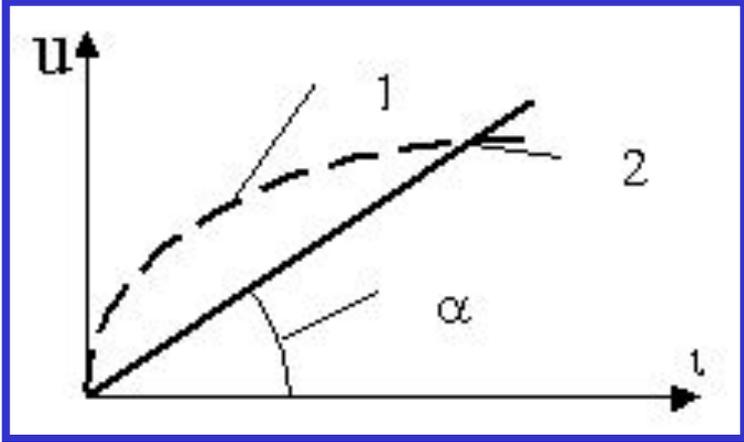
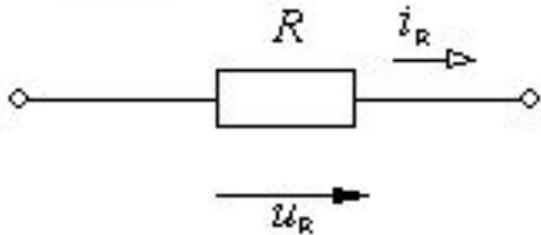


# Резистивный элемент

Резистивный элемент – идеализированный элемент, в котором происходит только необратимое преобразование электромагнитной энергии в тепло и другие виды энергии.



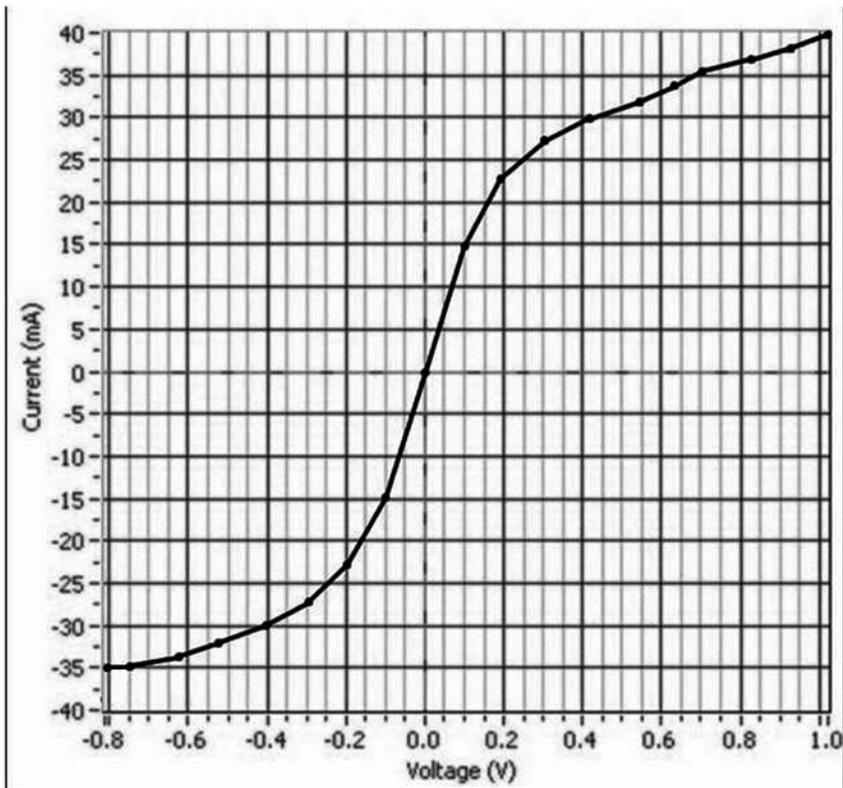
# Условное графическое обозначение и ВАХ резистивного элемента



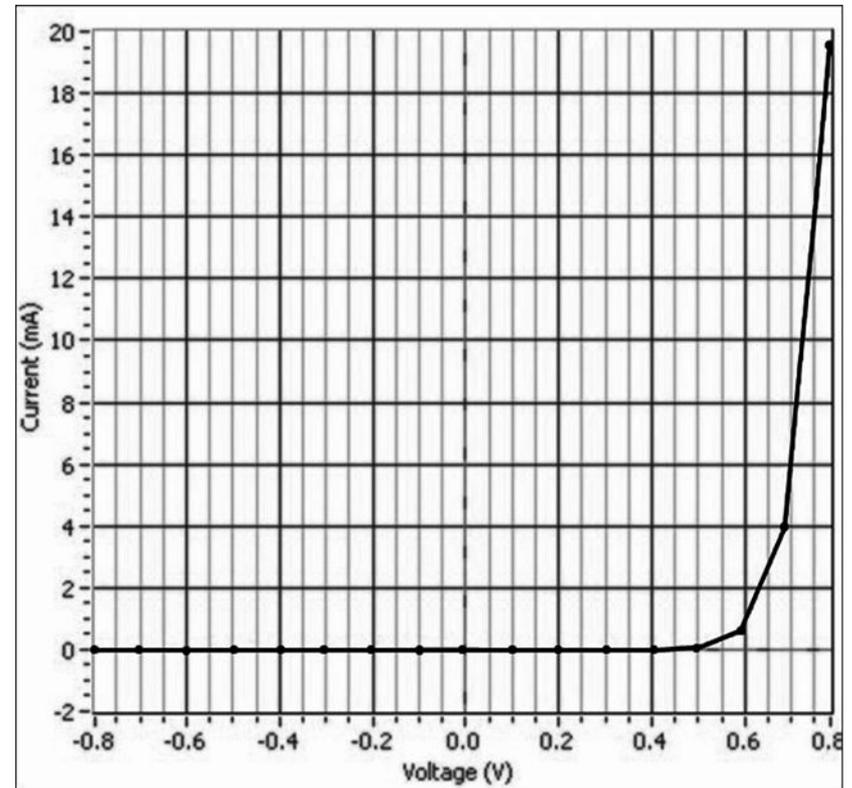
# Резистивный элемент

## Вольт-амперные характеристики нелинейных резистивных элементов

### Лампа накаливания



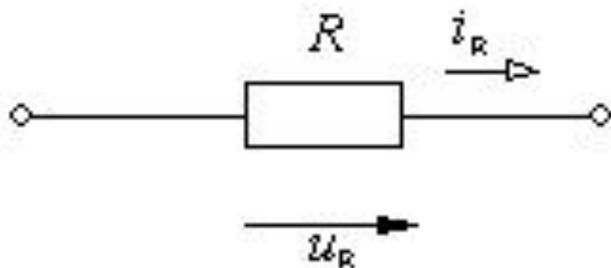
### Полупроводниковый диод



# Резистивный элемент

Если ВАХ – прямая, проходящая через начало координат, то резистор называют линейным.

Закон Ома:



$$u_R = Ri_R$$

$$i_R = Gu_R$$

$R$  – сопротивление



Георг Симон Ом  
1789 – 1854

$$u = Ri$$

Единица измерения сопротивления – Ом.

# Резистивный элемент

Закон Ома:

$$i = Gu$$

Проводимость:

$$G = \frac{1}{R}$$

*Единица измерения проводимости – Сименс (См).*



Вернер фон Сименс  
1816-1892

# Электрическое сопротивление. Единицы сопротивления. Закон Ома для участка цепи.

Омметр - электрический прибор для измерения сопротивления проводника.

Определение: *сопротивление* - мера противодействия проводника установлению в нем электрического тока.

Обозначение: **R.**

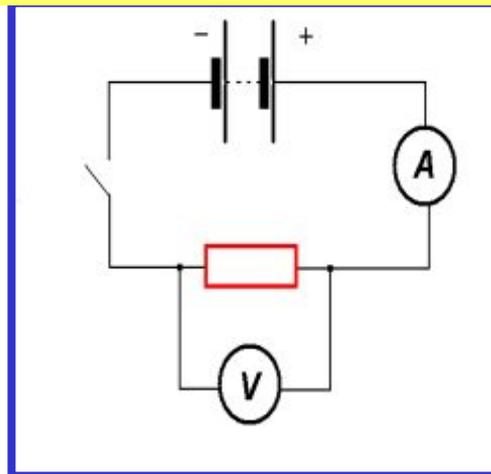
Единица измерения: **1 Ом.**

Определяющая формула:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$\rho$  удельное сопротивление вещества,  
 $l$  - длина проводника,  $S$  - площадь поперечного сечения проводника.

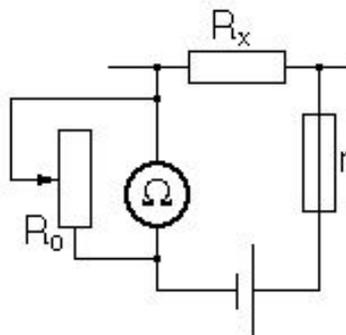
$$R = \frac{U}{I}$$



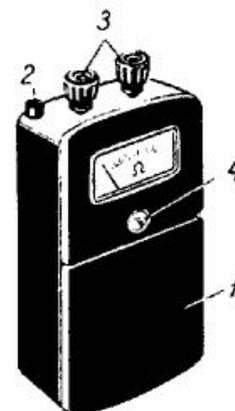
**Ом Георг Симон**  
(1787-1854 гг.)  
немецкий физик

## **Схема включения:**

омметр включается аналогично амперметру вместе с источником тока и переменным резистором, необходимым для установки нуля шкалы.

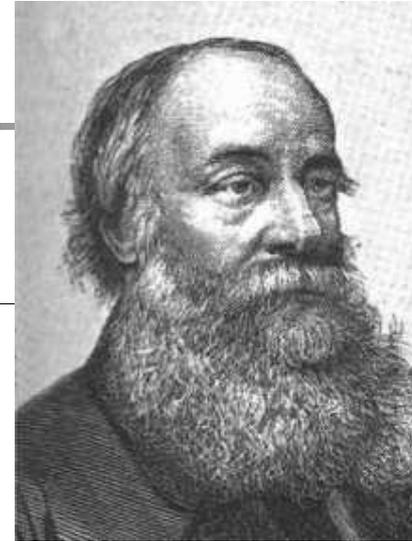
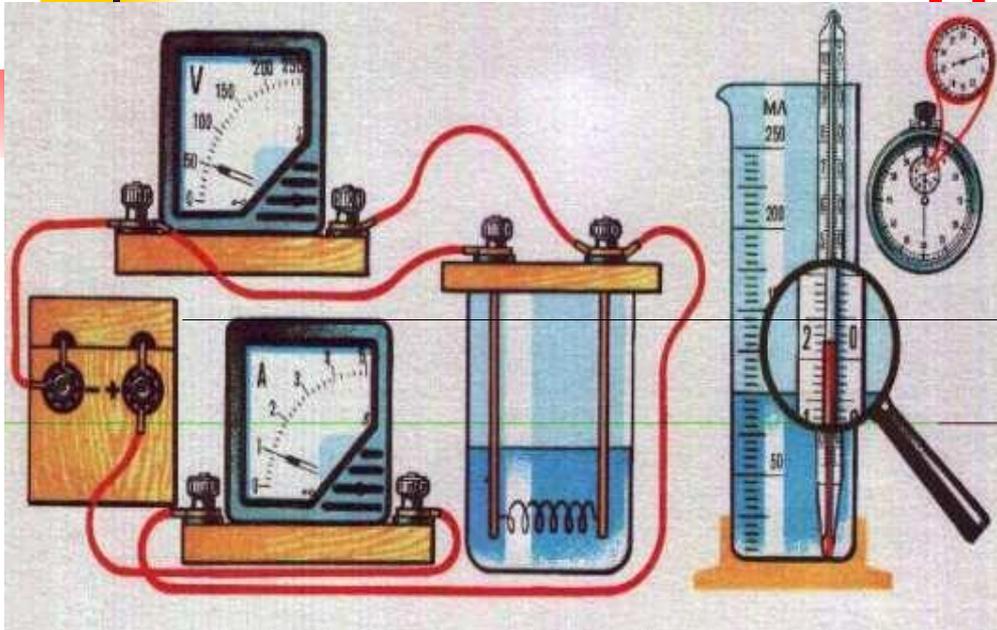


**Условное обозначение на схемах**



**Омметр лабораторный**

# Нагревание проводников электрическим током. Закон Джоуля-Ленца.



**ДЖОУЛЬ ДЖЕЙМС ПРЕСКОТТ**  
(1818–1889), английский физик

**Ленц Эмилий Христианович**  
(1804–1865 гг.), российский физик

$$U = I \cdot R$$

$$A = IUt = I \cdot IRt = I^2 Rt$$

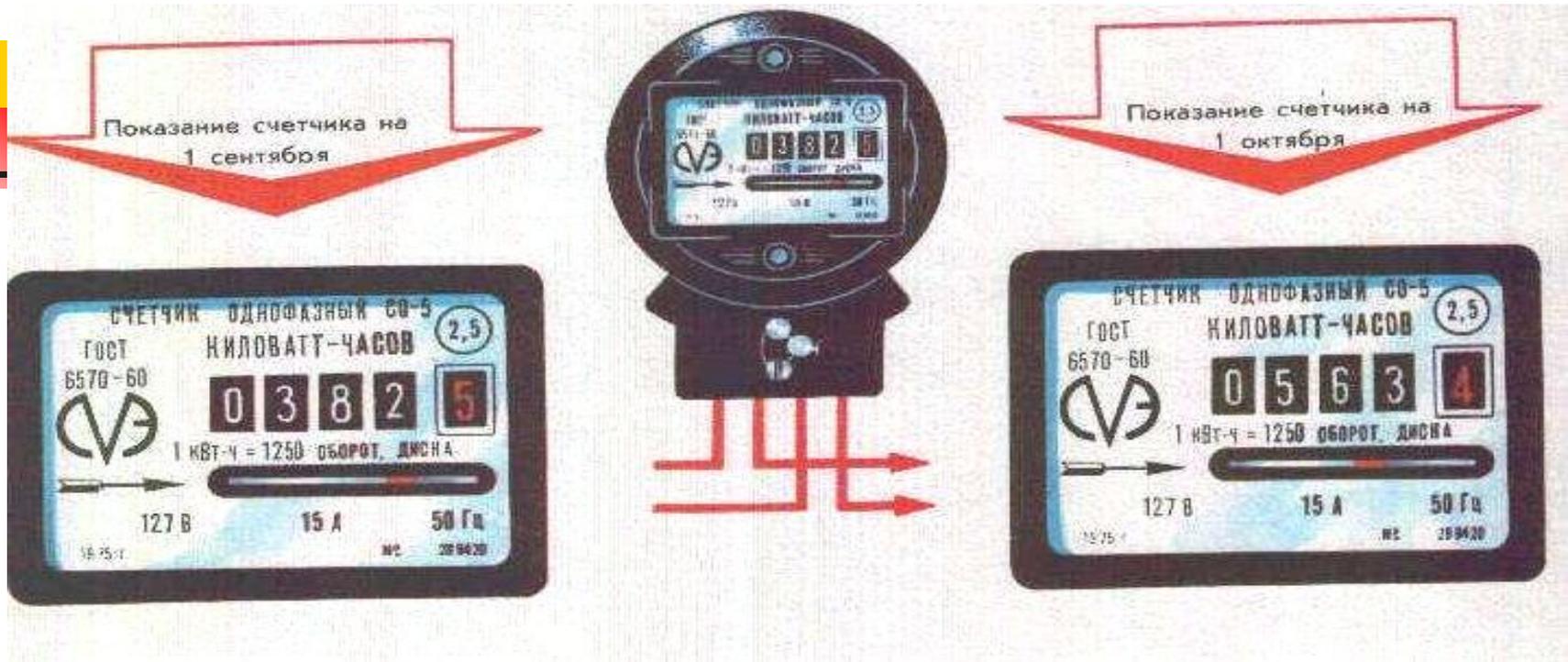
$$P_R = u_R i_R = Ri_R^2 = Gu_R^2$$

$$W_R(t) = \int_{-\infty}^t P_R dt = R \int_{-\infty}^t i_R^2 dt = G \int_{-\infty}^t u_R^2 dt > 0$$

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

$$A = \frac{U}{R} Ut = \frac{U^2 t}{R}$$

# Работа электрического тока



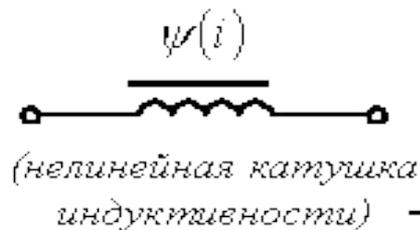
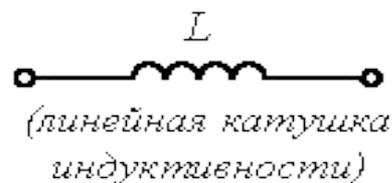
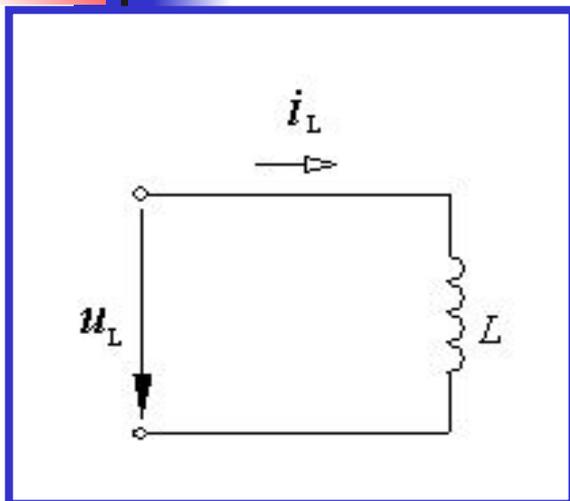
$$A = Pt$$

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}$$

$$1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 1000 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3600000 \text{ Дж}$$

# Индуктивный элемент



а

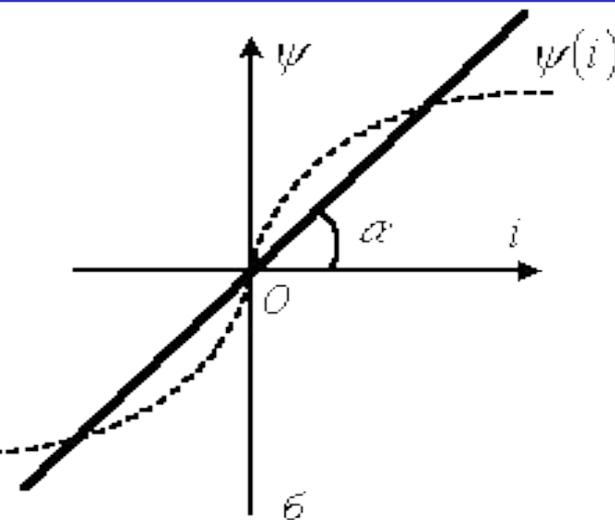
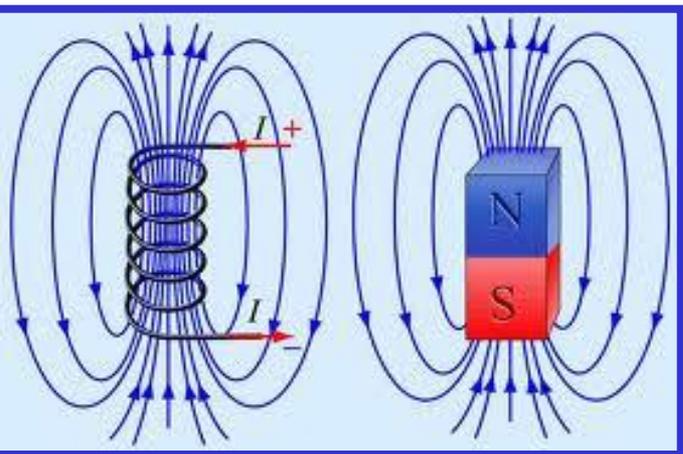


Рис.2

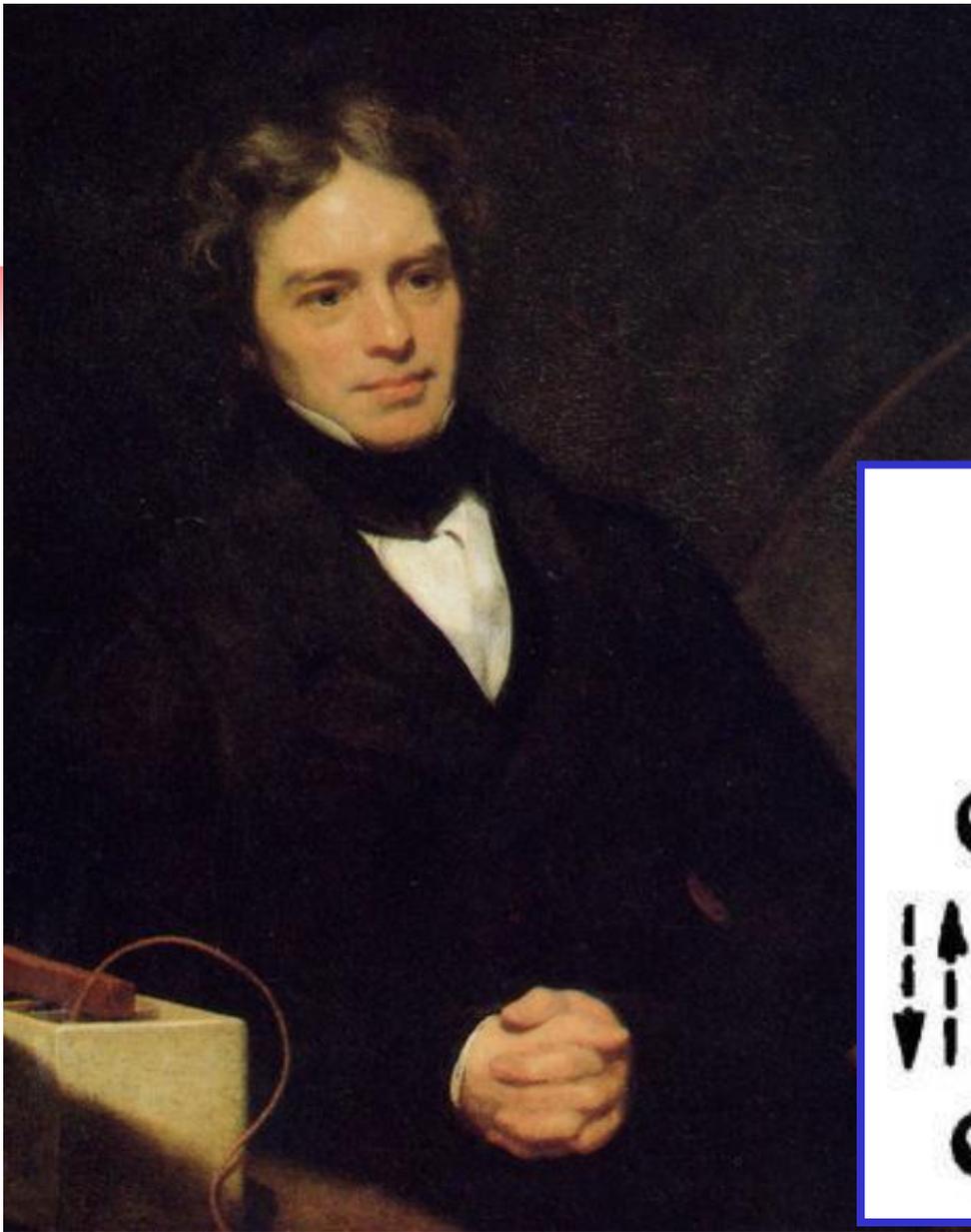


$$\psi = Li$$

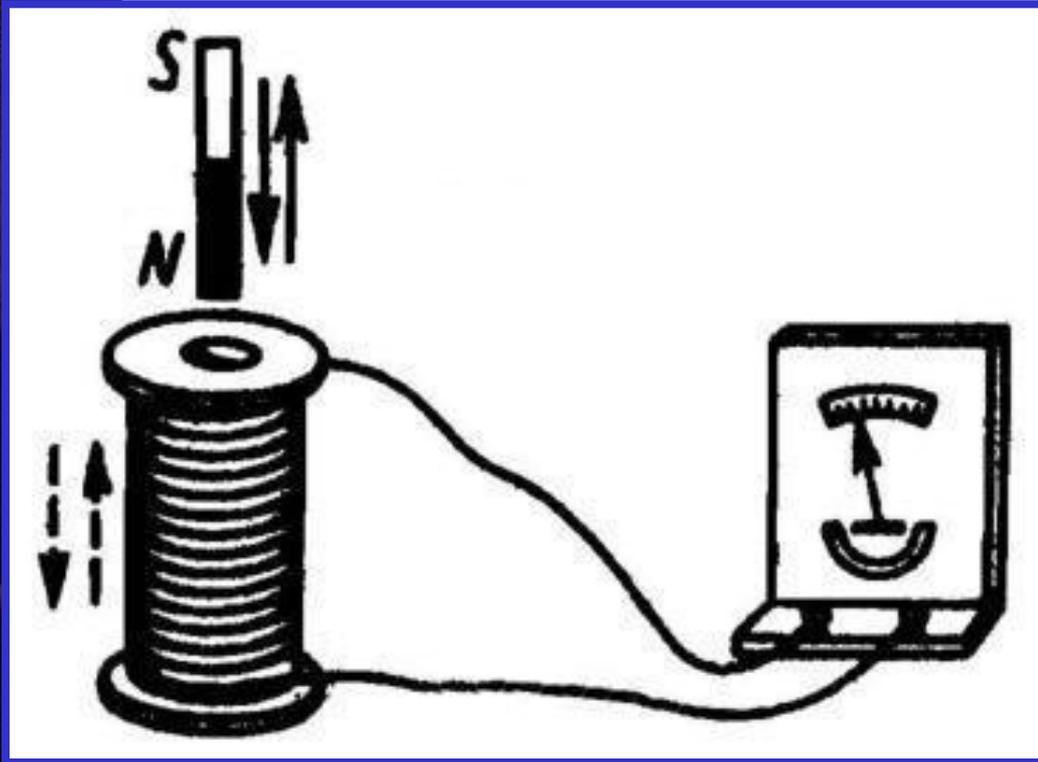
Вебер-амперная характеристика

$$\psi = \sum_{k=1}^N \Phi_k$$

$$\psi = N\Phi$$

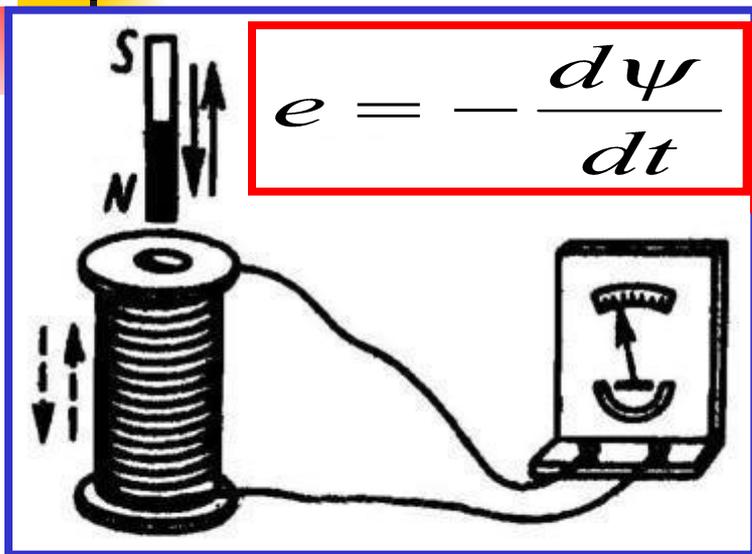


$$e = - \frac{d\psi}{dt}$$



Майкл Фарадей (1791-1867)

# Закон электромагнитной индукции Майкла Фарадея (открыт в 1831 г.)



$$e = - \frac{d\psi}{dt}$$

$$u_L = -e = L \frac{di_L}{dt}$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u_L dt$$

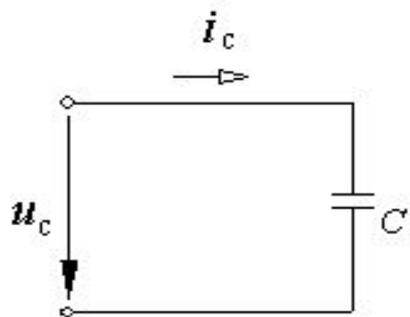
$$P_L = u_L i_L = L i_L \frac{di_L}{dt}$$

Это закон устанавливает взаимосвязь между магнитными и электрическими явлениями.

**Формулировка:** ЭДС электромагнитной индукции, в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром.

# Ёмкостной элемент

$$q = CU_c$$



$$i_c = C \frac{du_c}{dt}$$

$$i_c = \frac{dq}{dt} = \frac{dq}{du_c} \cdot \frac{du_c}{dt}$$

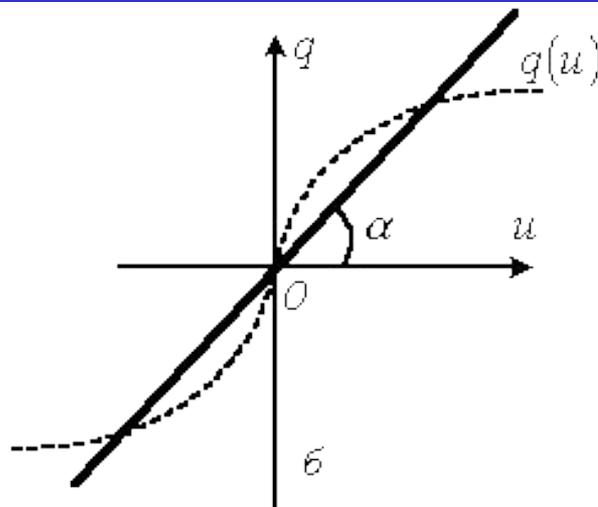
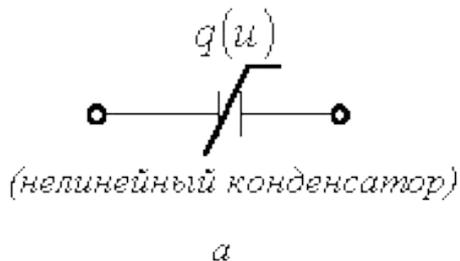
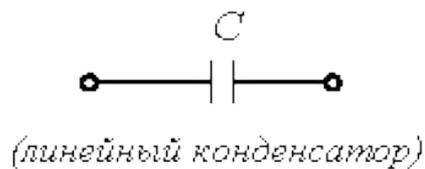
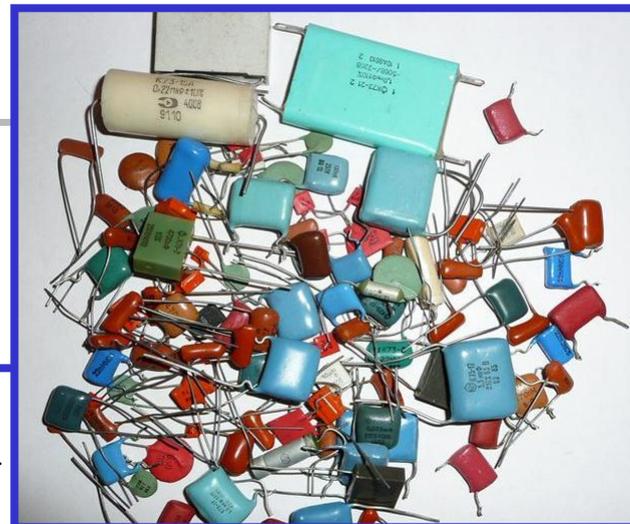
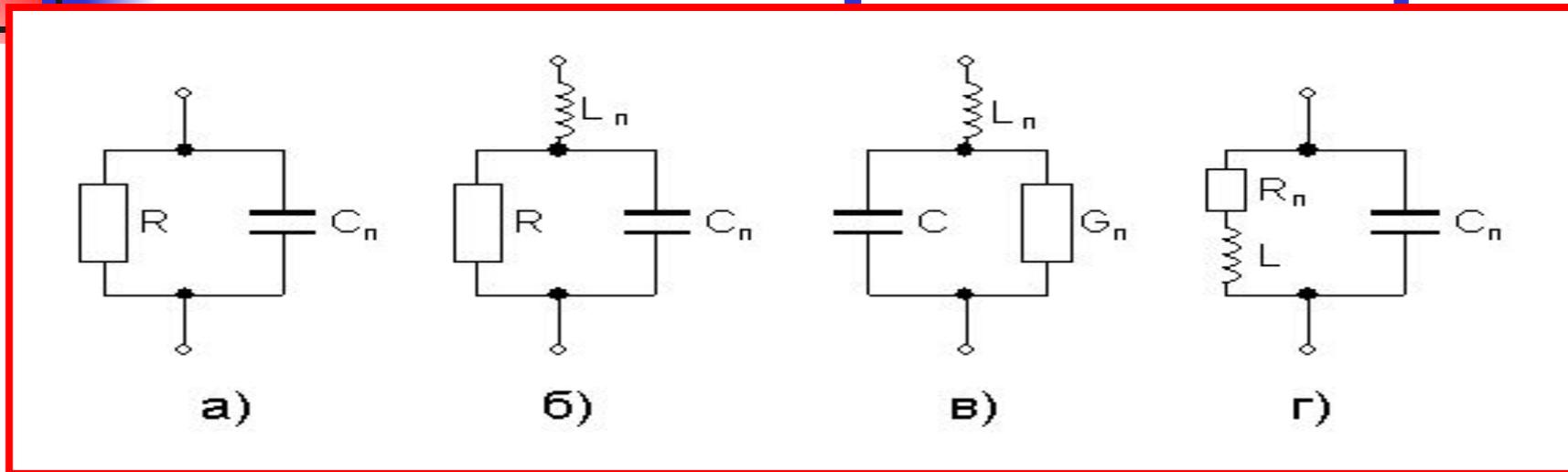


Рис.3

$$u_c = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_c dt$$

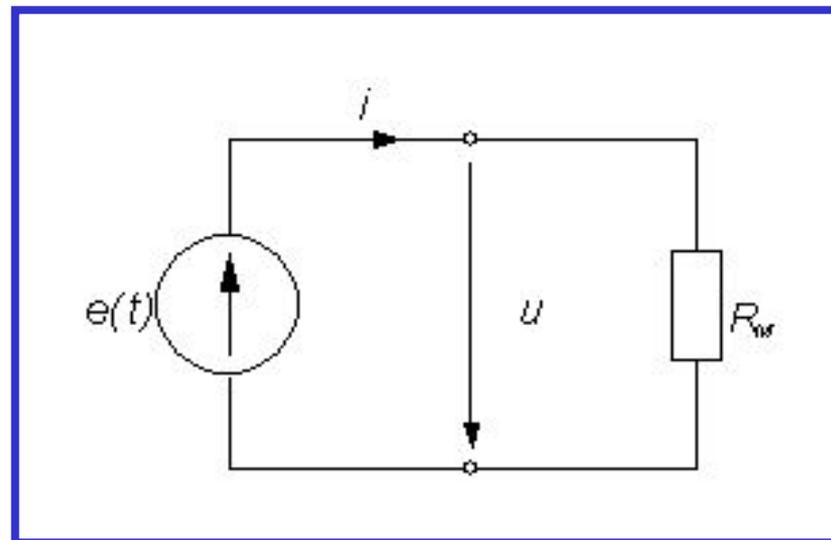
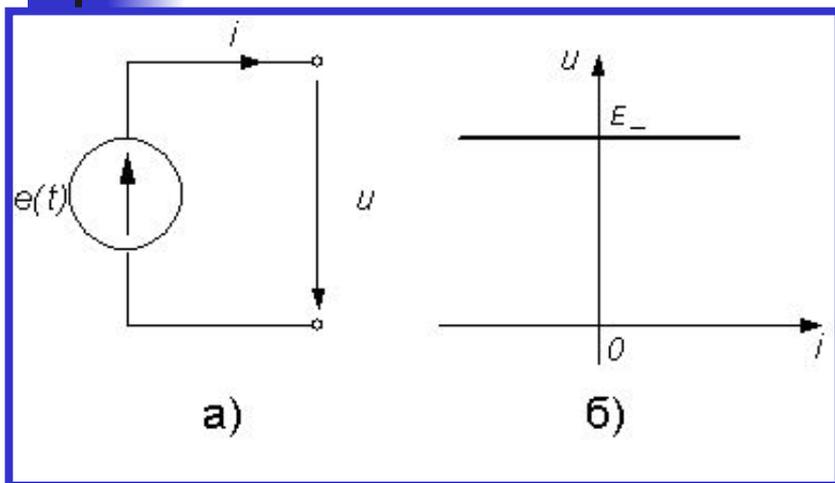
$$P_C = u_c i_c = cu_c \frac{du_c}{dt}$$

# Схемы замещения реальных элементов электрической цепи



- ВЫВОДЫ:** 1. Чем выше требуемая точность, тем большее число факторов принимается во внимание, и тем сложнее будет схема замещения каждого элемента.
2. С целью снижения трудоемкости расчетов стремятся использовать упрощенные схемы замещения, содержащие минимально допустимое число элементов.
3. Схемы замещения одного и того же элемента могут иметь различный вид в зависимости от рассматриваемого диапазона частот.

**Идеальный источник напряжения (источник напряжения, источник ЭДС) представляет собой идеализированный активный элемент, напряжение на зажимах которого не зависит от тока через эти зажимы.**

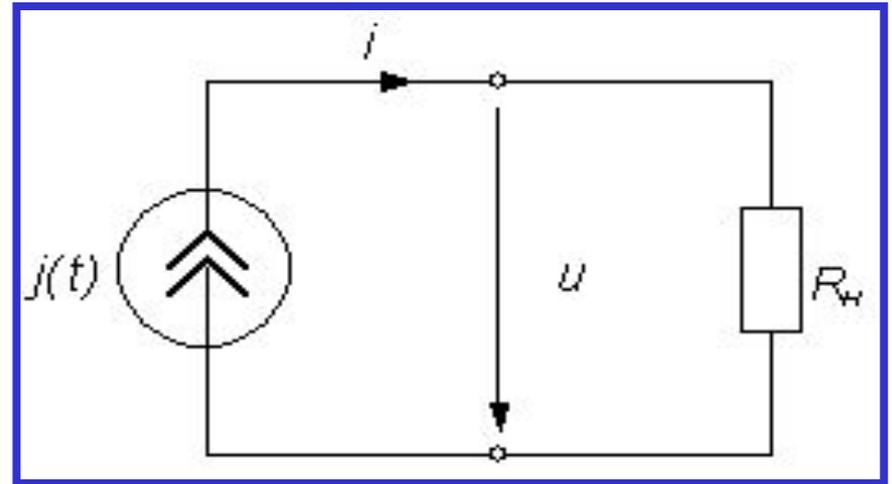
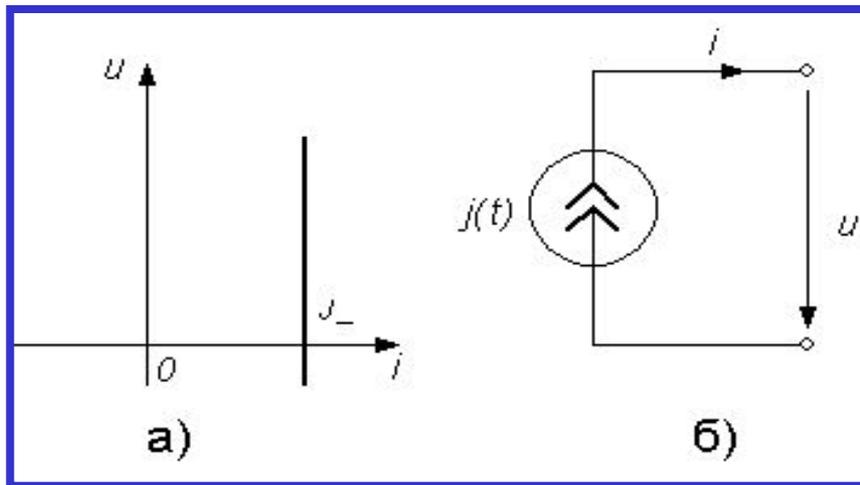


$$u=e(t)$$

$$i = u / R_n = (1 / R_n) e(t) \quad p = (1 / R_n) u^2 = (1 / R_n) e^2 (t)$$

**Идеальный источник напряжения можно рассматривать как источник энергии, внутреннее сопротивление которого равно нулю.**

**Идеальный источник тока (источник тока) — это идеализированный активный элемент, ток которого не зависит от напряжения на его зажимах.**

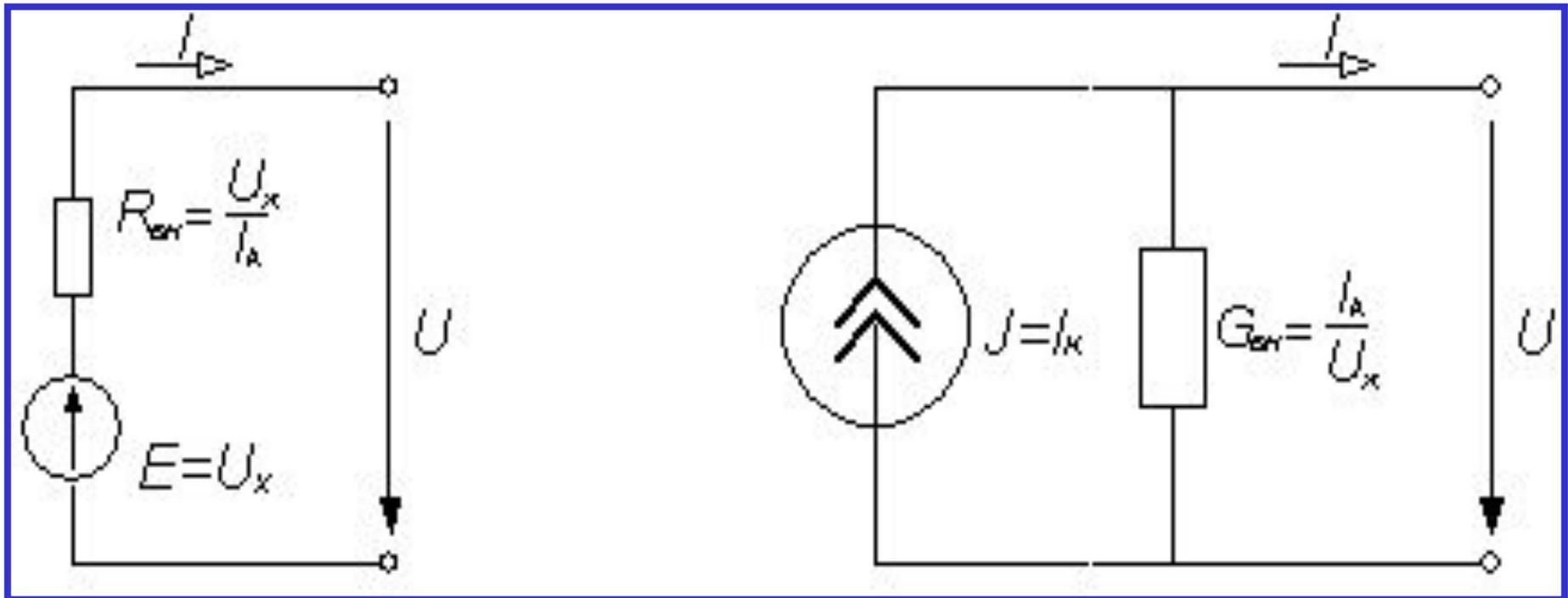


$$i=j(t)$$

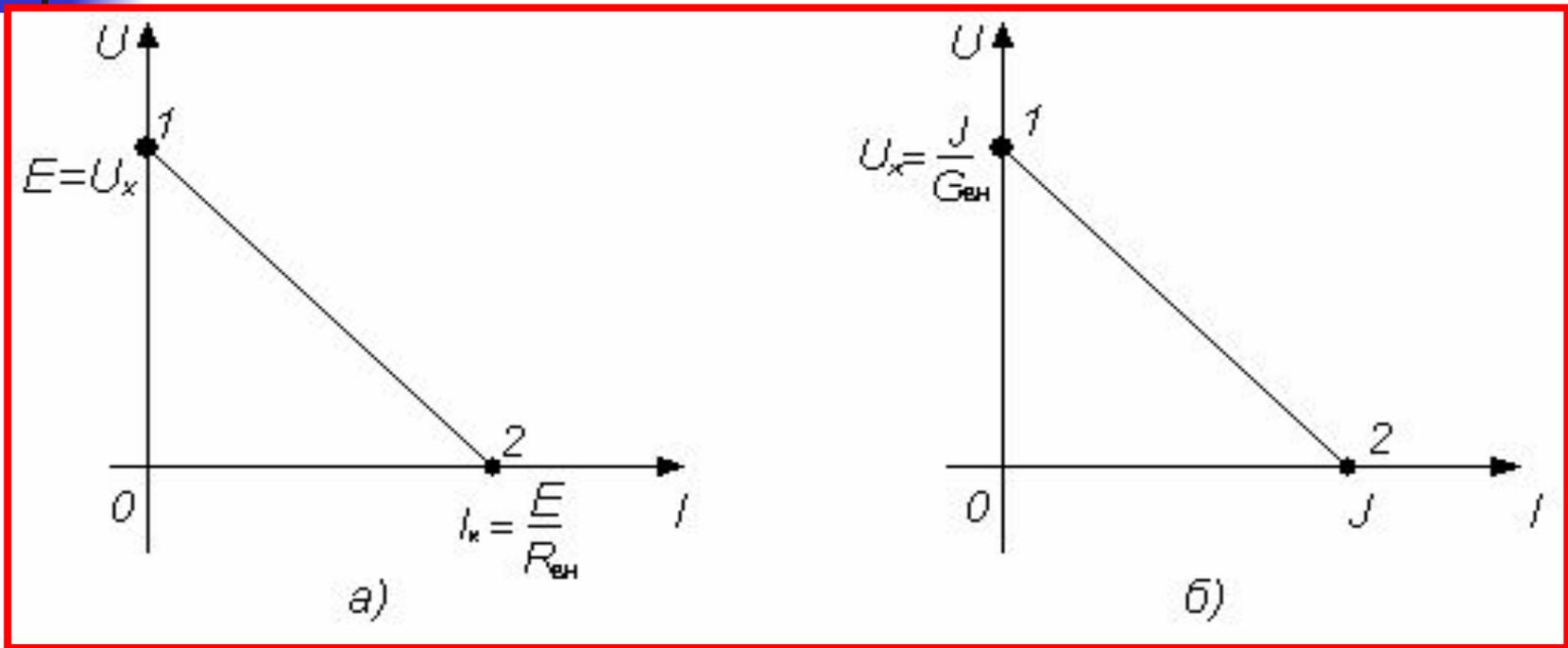
$$u = R_H i = R_H j(t) \quad p = R_H i^2 = R_H j^2(t)$$

**Идеальный источник тока можно рассматривать как источник энергии с бесконечно малой внутренней проводимостью (бесконечно большим внутренним сопротивлением).**

# Схемы замещения реальных источников



# Внешние характеристики реальных источников



$$U = E - R_{\text{вн}} I$$

$$I = J - G_{\text{вн}} U$$

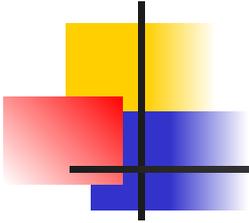
$$J = \frac{E}{R_{\text{вн}}}$$

$$G_{\text{вн}} = \frac{1}{R_{\text{вн}}}$$

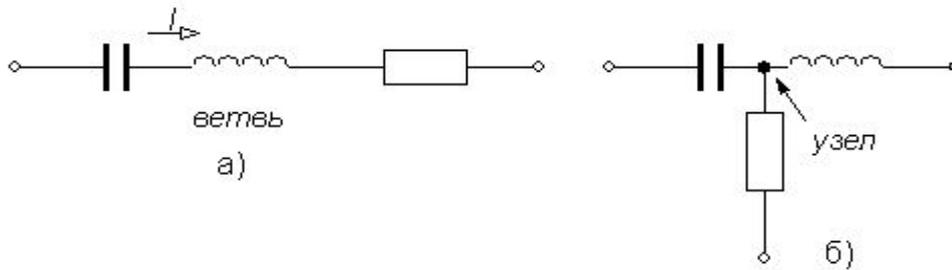
$$E = \frac{J}{G_{\text{вн}}}$$

$$R_{\text{вн}} = \frac{1}{G_{\text{вн}}}$$

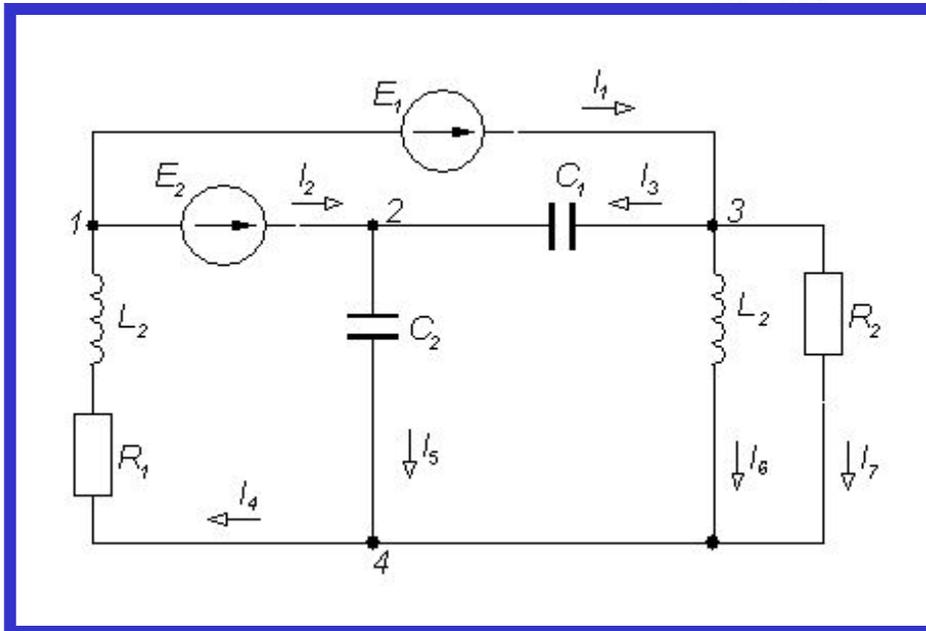
**Спасибо за внимание!!!**



# Основные понятия топологии цепей



**Узел цепи является независимым, если к нему присоединена хотя бы одна новая ветвь, не подходящая к ранее рассматриваемым узлам.**



**Контур цепи является независимым, если он содержит хотя бы одну новую ветвь, не входящую в ранее рассматриваемые контуры.**

# Компонентные уравнения идеализированных элементов

- $u_R = Ri_R$
- $i_R = Gu_R$

$$i_R = \frac{u_R}{R}$$

$$u_R = \frac{i}{G}$$

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u_L dt$$

$$u = e(t)$$

$$i = j(t)$$

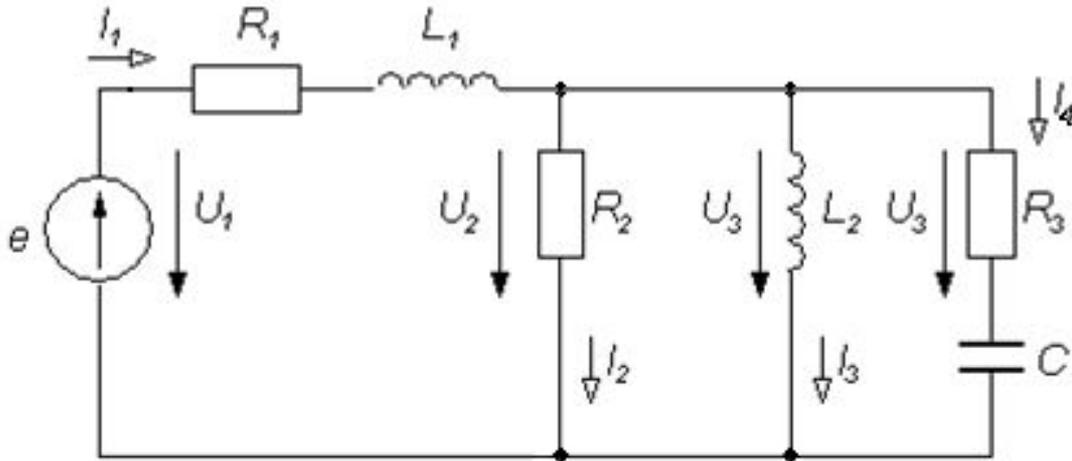
$$i_C = C \frac{du_C}{dt}$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_C dt$$

$$u = E - R_j i$$

$$i = J - G_j u$$

# Математическое моделирование ветвей электрической цепи на базе компонентных уравнений



$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - e;$$

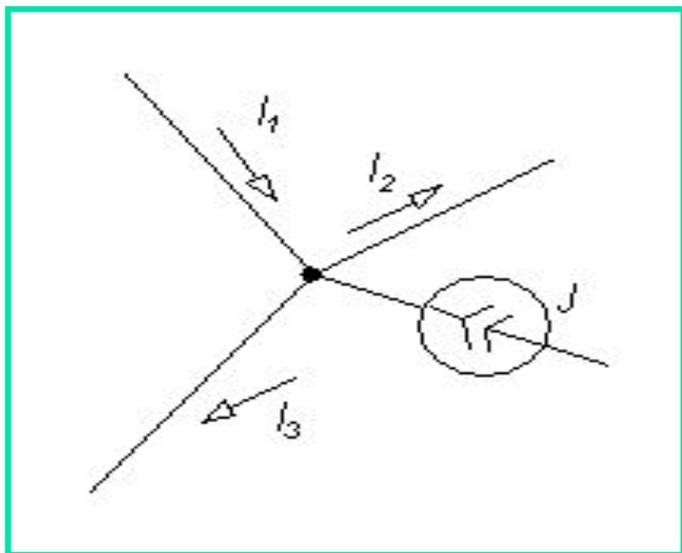
$$u_2 = R_2 i_2;$$

$$u_3 = L_3 \frac{di_3}{dt};$$

$$u_4 = R_3 i_4 + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_4 dt.$$

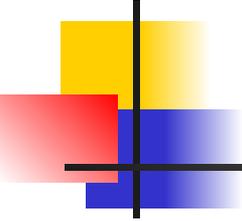
# Первый закон Кирхгофа

- **Первый закон Кирхгофа** – это закон баланса токов в разветвленной цепи, формулируется для узлов электрической цепи.
- **Он гласит: алгебраическая сумма токов в любом узле электрической цепи в любой момент времени равна нулю, т.е.**



$$\sum_{k=1}^m i_k(t) = 0$$

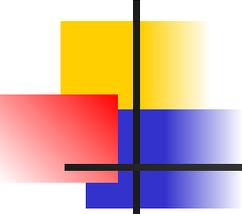
$$I_1 - I_2 - I_3 + J = 0.$$



# Второй закон Кирхгофа

- **Второй закон Кирхгофа** – это закон баланса напряжений на замкнутых участках цепи, формулируется для контуров электрической цепи.
- Он гласит: **алгебраическая сумма напряжений в любом замкнутом контуре в любой момент времени равна нулю:**

$$\sum_{k=1}^n u_k(t) = 0$$



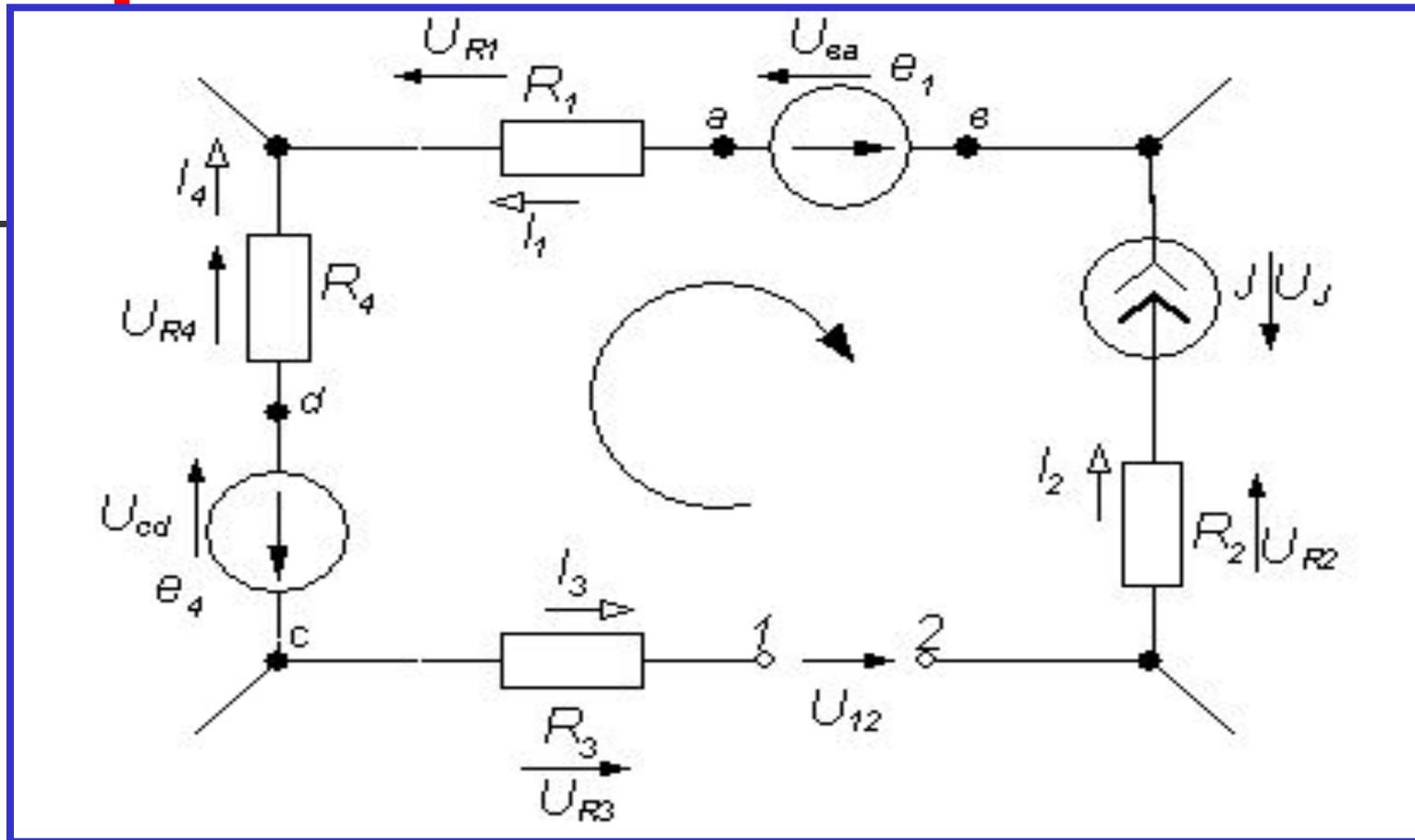
# Второй закон Кирхгофа

---

- *Вторая формулировка второго закона Кирхгофа: алгебраическая сумма ЭДС в любом замкнутом контуре цепи в любой момент времени равна алгебраической сумме падений напряжений на элементах этого контура:*

$$\sum_{k=1}^m e_k(t) = \sum_{k=1}^n u_k(t)$$

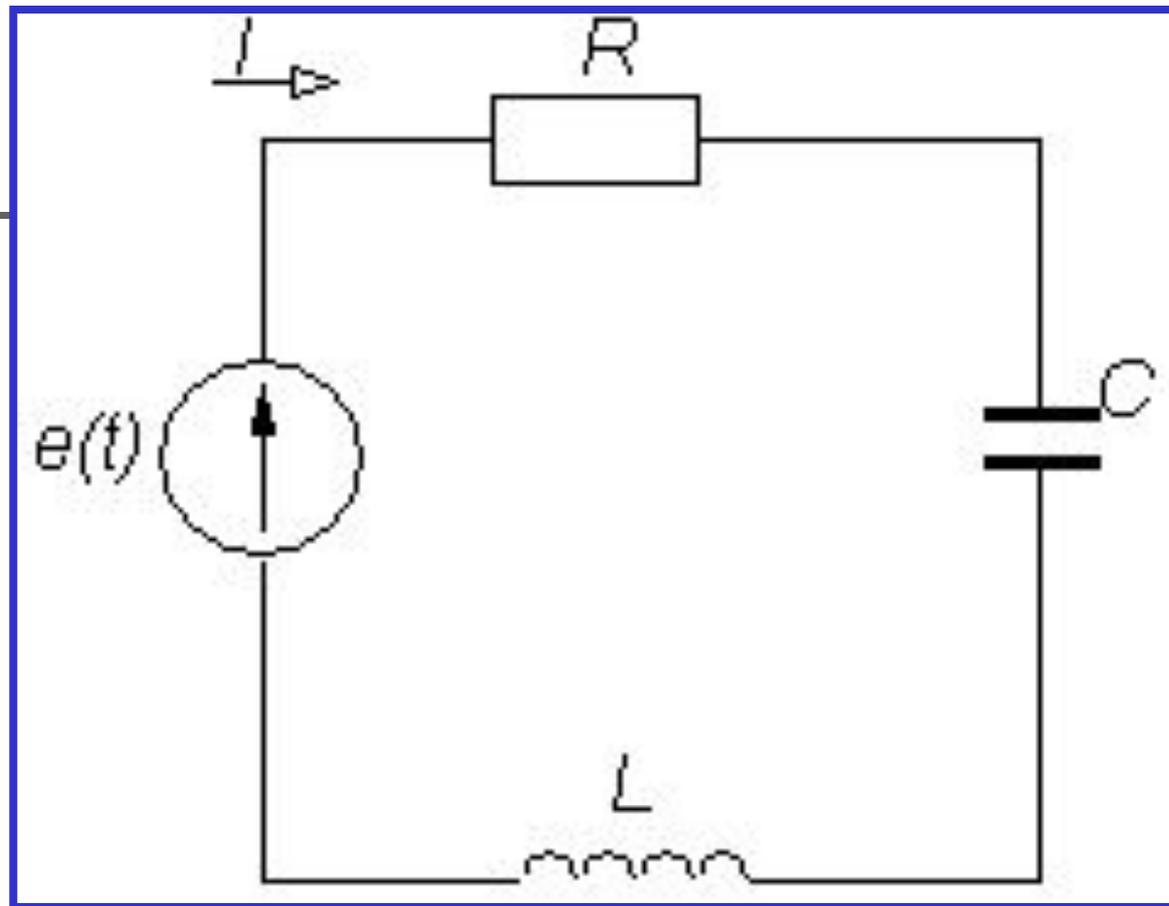
# Пример 1.



$$-u_{R1} - u_{ba} + u_J - u_{R2} - u_{12} - u_{R3} + u_{cd} + u_{R4} = 0$$

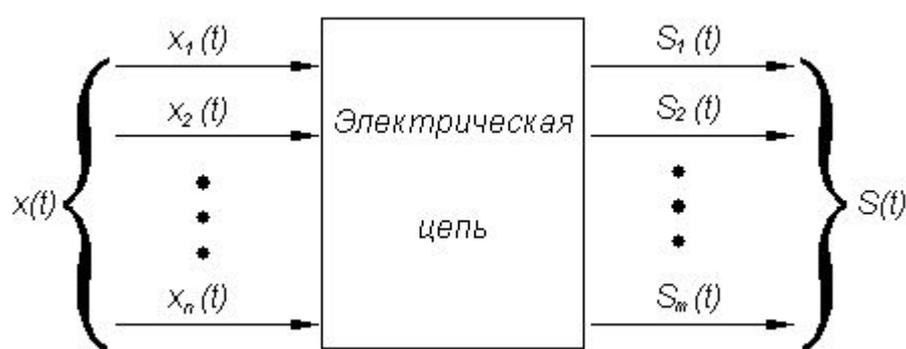
$$e_1 - e_4 = -R_1 i_1 + u_J - u_{12} - R_2 i_2 - R_3 i_3 + R_4 i_4$$

## Пример 2.



$$Ri + \frac{1}{C} \int i dt + L \frac{di}{dt} = e(t)$$

# Основные задачи теории цепей



$$x(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$$

$$S(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_m(t)\}$$

**Задачи анализа цепи** – это задачи, в которых по известным внешнему воздействию  $x(t)$ , конфигурации и параметрам цепи определяют реакцию цепи  $S(t)$ .

**Задачи синтеза** – это задачи, в которых требуется определить структуру и параметры цепи по заданной реакции цепи  $S(t)$  на некоторое внешнее воздействие  $x(t)$ .