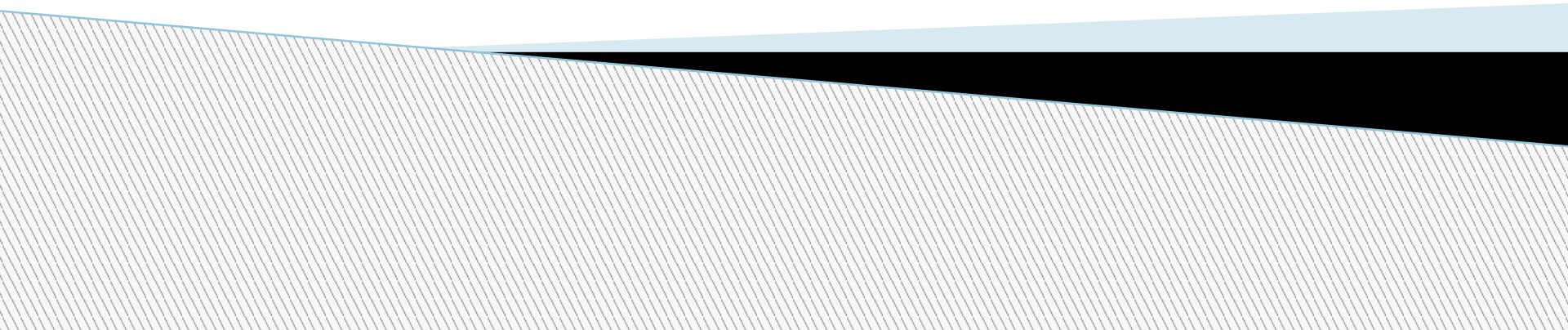
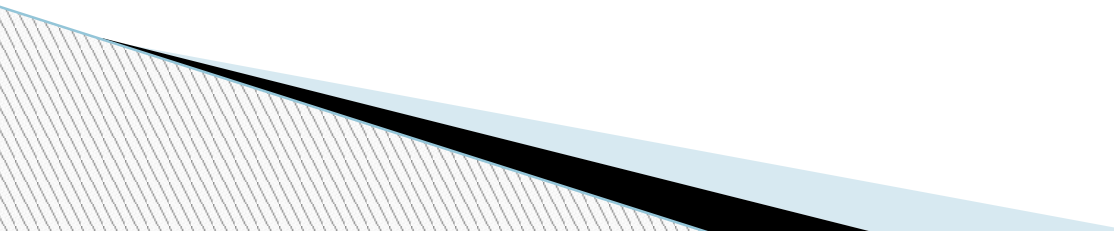


# Законы постоянного тока

Лекция 29



- 1. Закон Ома для участка цепи. Проводимость.**
  - 2. Сторонние ЭДС. Правила Кирхгоффа .**
  - 3. Закон Ома для полной цепи и неоднородного участка цепи содержащего источник тока.**
- 

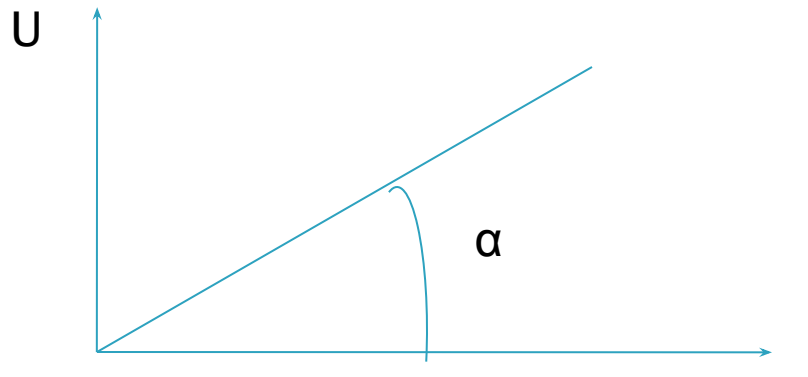
## 5. Закон Ома для участка цепи. Проводимость.

Закон Ома для участка цепи установлен в 1827г.:

$$(1) I = \frac{U}{R}$$

На любом участке цепи сила тока, приложенная напряжению

$$U = \Delta \varphi$$



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U}{I} = R$$

Коэффициент пропорциональности между током и напряжением:

$R$  – электрическое сопротивление участка цепи  $[R]=1\text{ Ом}$ .

Сопротивление зависит от :

1. рода материала;
2. размеров тела;
3. температуры:  $\rho(t) = \rho_0(1 + \alpha t)$

Для прямолинейного цилиндрического проводника

$$R = \rho \frac{\Delta l}{s} \quad (2) \quad [\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}$$

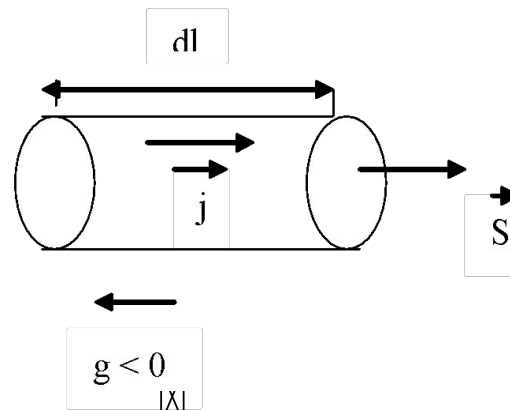
$\Delta l$  - длина проводника,  $s$  – площадь поперечного сечения,  $\rho$  - удельное сопротивление вещества.

$$R = \frac{U}{I} \quad - \text{ формула для вычисления } R, \text{ но не физический закон.}$$

Смысл закона Ома (1) состоит в том, что на участке цепи под действием напряжения возникает электрический ток, и между ними линейная зависимость.

Проводимость.

Рассмотрим прямолинейный участок цилиндрического проводника:



Тогда

$$j = qN \langle v \rangle$$

Если ток постоянный:  $I = jS$

Для однородного поля  $U = E \Delta l$

Тогда с учётом (1) и (2):

$$jS = \frac{E\Delta\ell}{\rho \frac{\Delta\ell}{s}}$$

$$j = \frac{1}{\rho} E \quad (3)$$

Введём величину:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

Которая называется удельная проводимость вещества.

Проводимость вещества:

$$\Gamma \stackrel{(5)}{=} \frac{1}{R}$$

Измеряется проводимость в  $[\Gamma] = \text{См}$  (сименс)

$$1 \text{См} = \frac{1}{10^9 \text{Ом}}$$

т.к. 
$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E}$$

то 
$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

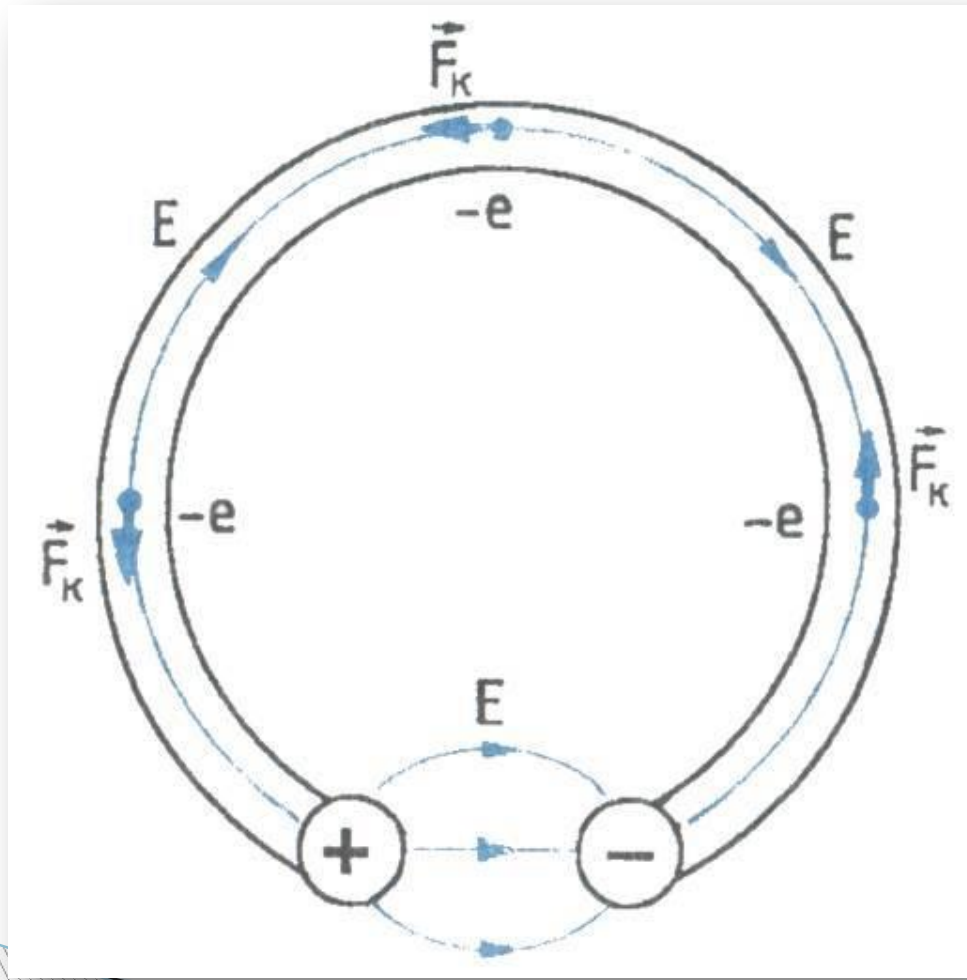
(7) и (6) – закон Ома в дифференциальной форме, физический смысл его состоит в том, что в любой точке внутри проводника, где существует ток обязательно есть электрическое поле, которое является причиной существования тока.

(Если  $\vec{E} = 0$  то и  $\vec{j} = 0$  - тока нет )

<p>объёмная плотность заряда</p> $\rho = \frac{dq}{dv}$	<p>удельное сопротивление</p> $\rho$
$\text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ <p>- Закон Кулона в дифференциальной форме</p> $\text{div} \vec{D} = \rho_{\text{своб.}}$ $\vec{j} = \rho \langle \vec{v} \rangle$ $\rho = \rho_{\text{связ}} + \rho_{\text{своб.}}$ $\text{div} \vec{p} = \rho_{\text{своб.}}$	$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E}$ $R = \rho \frac{\Delta l}{\Delta s}$ $\sigma = \frac{1}{\rho}$ $\rho(t) = \rho_0(1 + \alpha t)$



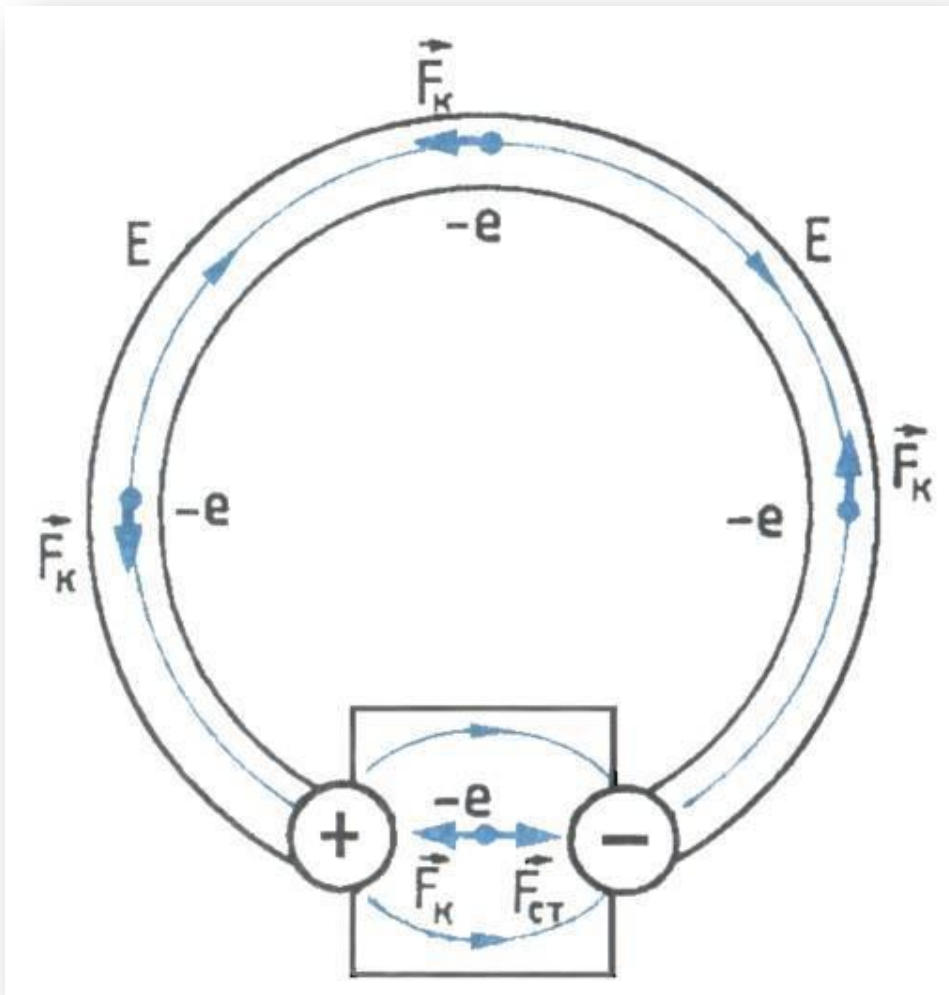
## 2. Сторонние ЭДС и их природа. Правила Кирхгофа.



Соединим проводником два металлических шарика, несущих заряды противоположных знаков. Под влиянием электрического поля этих зарядов в проводнике возникает электрический ток.

Но этот ток будет очень кратковременным. Заряды быстро нейтрализуются, потенциалы шариков станут одинаковыми, и электрическое поле исчезнет.

# Сторонние силы



Для того чтобы ток был постоянным, надо поддерживать постоянное напряжение между шариками.

Для этого необходимо устройство (источник тока), которое перемещало бы заряды от одного шарика к другому в направлении, противоположном направлению сил, действующих на эти заряды со стороны электрического поля шариков.

В таком устройстве на заряды, кроме электрических сил, должны действовать силы неэлектрического происхождения.

**Одно лишь электрическое поле заряженных частиц (кулоновское поле) не способно поддерживать постоянный ток в цепи.**

Таким образом:

*Условия существования электрического тока:*

- Наличие свободных носителей заряда
- Наличие разности потенциалов между точками
- Устройство, поддерживающее разность потенциалов.

**Сторонняя сила** – это сила не электростатического происхождения, которая отделяет положительно заряженные частицы от отрицательно заряженных (т. к. это консервативные силы и их работа по замкнутому контуру равна нулю). Сторонние силы могут быть механическими, химическими и т.д. Электродвижущая сила (э.д.с.) численно равна работе сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда по замкнутой цепи.

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{сторонних сил}}}{q}$$

ЭДС выражают в вольтах:  $[\mathcal{E}] = \text{Дж/Кл} = \text{В}$

Поскольку сторонние силы действуют только внутри источника тока и не действуют на участках цепи, внешних по отношению к источнику, то можно сделать вывод, что **э.д.с. источника численно равна работе, совершаемой сторонними силами** при перемещении единичного положительного заряда между полюсами внутри источника тока:

$$\varepsilon = \int_1^2 \vec{E}_{\tilde{n}\hat{o}\hat{i}\delta} dl$$

где точка 1 находится на отрицательном полюсе, а точка 2 – на положительном полюсе источника тока;

$\vec{E}_{\tilde{n}\hat{o}\hat{i}\delta}$  - **напряжённость поля сторонних сил**, то есть отношение сторонней силы  $F_{стор.}$ ,

действующей на частицу, к величине её заряда  $q$  :

$$\vec{E}_{\tilde{n}\hat{o}\hat{i}\delta} = \frac{F_{\tilde{n}\hat{o}\hat{i}\delta}}{q}$$

если цепь содержит несколько источников тока:

$$\varepsilon = \oint \vec{E}_{\tilde{n}\hat{o}\hat{i}\delta} dl$$

Сторонние силы приводят в движение заряженные частицы внутри всех источников тока: в генераторах на электростанциях, в гальванических элементах, аккумуляторах и т.

д.

*Генератор переменного тока, Россия*



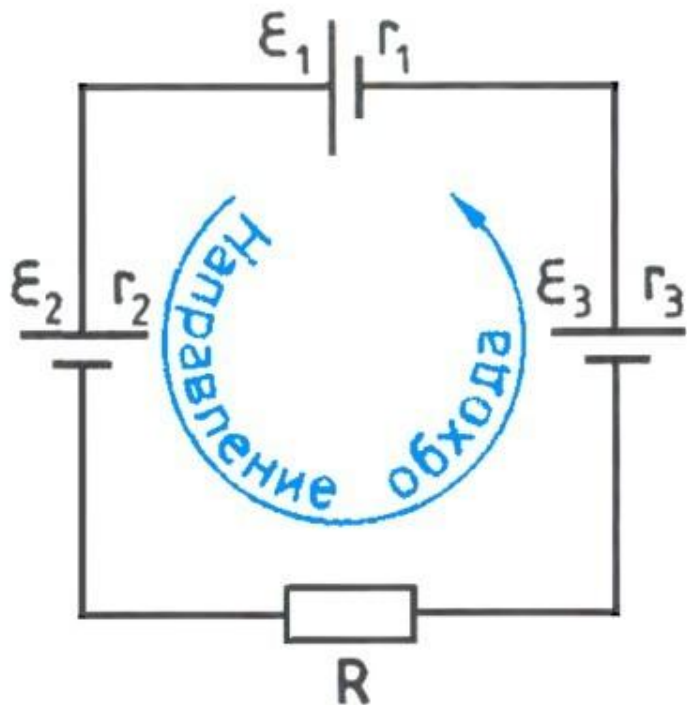
*Аккумулятор, Тюмень*



*Гальванические элементы, СССР*

# Природа сторонних сил

Источники тока	Сторонняя сила
Генератор электростанции	Сила, действующая со стороны магнитного поля на электроны в движущемся проводнике
Гальванический элемент (элемент Вольта)	Химические силы, растворяющие цинк в растворе серной кислоты



Если цепь содержит несколько последовательно соединённых элементов с ЭДС  $\mathcal{E}_1$ ,  $\mathcal{E}_2$ ,  $\mathcal{E}_3$  и т.д., то полная ЭДС цепи равна алгебраической сумме ЭДС отдельных элементов.

Для определения знака ЭДС выберем положительное направление обхода контура.

Если при обходе цепи переходят от «-» полюса к «+», то ЭДС  $\mathcal{E} > 0$ .

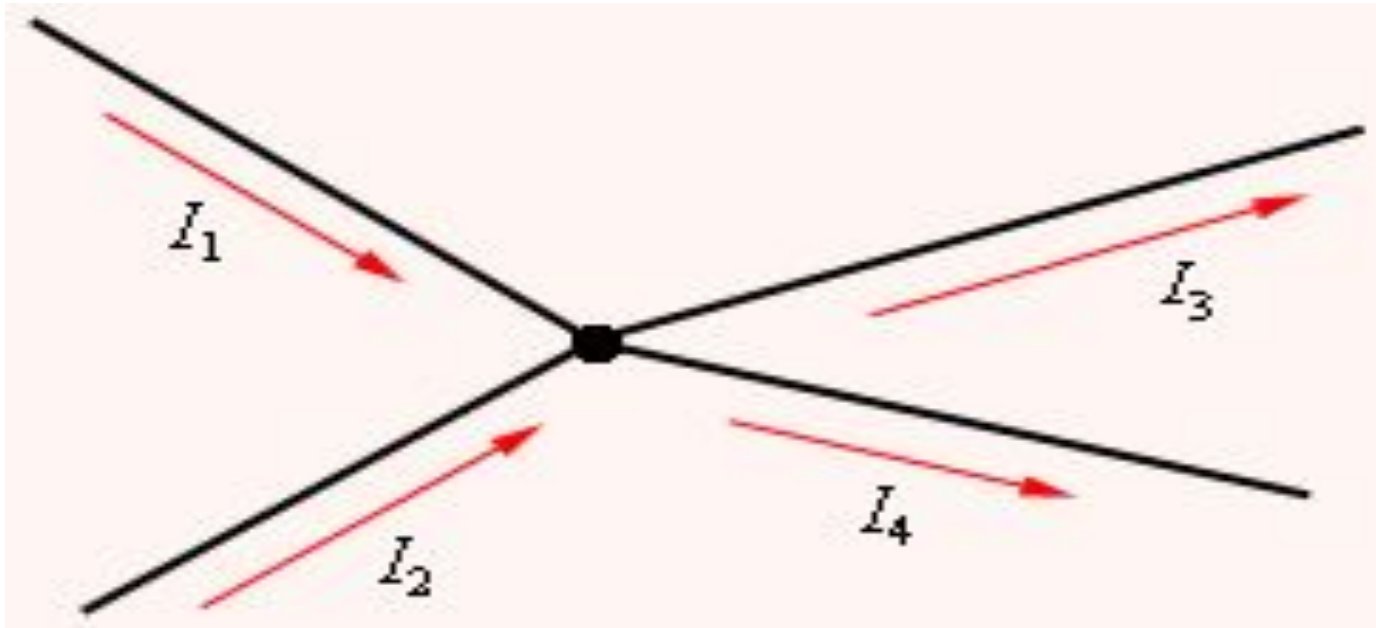
Для данной цепи:  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3$  и  $R_n = R + r_1 + r_2 + r_3$

Если  $\mathcal{E} > 0$ , то  $I > 0 \rightarrow$

направление тока совпадает с направлением обхода контура.

# Правила Кирхгоффа.

## Первое правило Кирхгоффа



$$I_1, I_2 > 0; I_3, I_4 < 0$$

Токи, втекающие в узел, принято считать положительными; токи, вытекающие из узла – отрицательными.



В узлах цепи постоянного тока не может происходить накопление зарядов. Суммарный заряд в узле равен нулю.

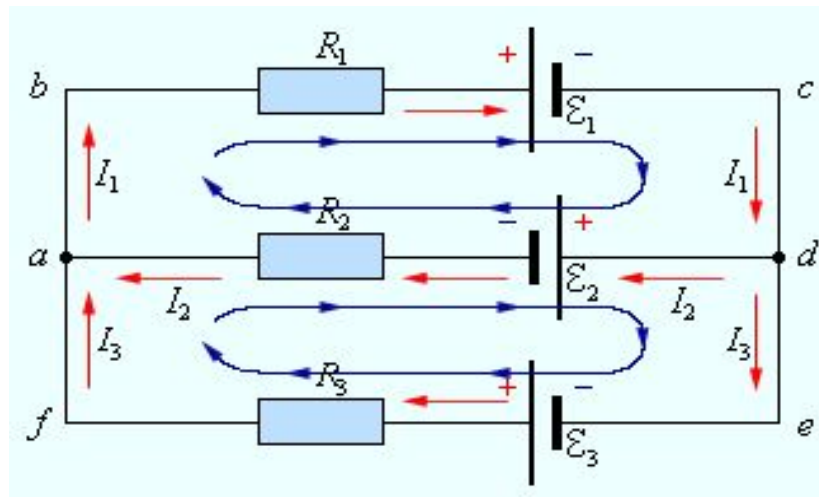
## I правило Кирхгоффа

**Алгебраическая сумма сил токов для каждого узла в разветвленной цепи равна нулю**

$$\sum_k (\pm) I_k = 0$$

# Второе правило Кирхгоффа

В разветвленной цепи всегда можно выделить некоторое количество замкнутых путей, состоящих из однородных и неоднородных участков, которые называются контурами.



Цепь содержит два узла  $a$  и  $d$ , в которых сходятся одинаковые токи

## II правило Кирхгоффа

**В любом замкнутом контуре алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений на активных элементах данного контура.**

$$\sum_k (\pm) \varepsilon_k = \sum_m (\pm) I_m R_m$$

# В цепи можно выделить три контура *abcd*, *adef* и *abcdef*

Задаем положительное направление тока и положительное направление обхода контура.

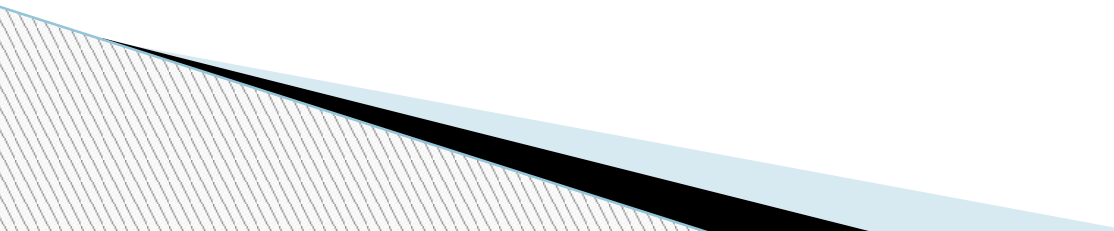
Для участков контура *abcd* обобщенный закон Ома записывается в виде:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = -E_1 - E_2$$

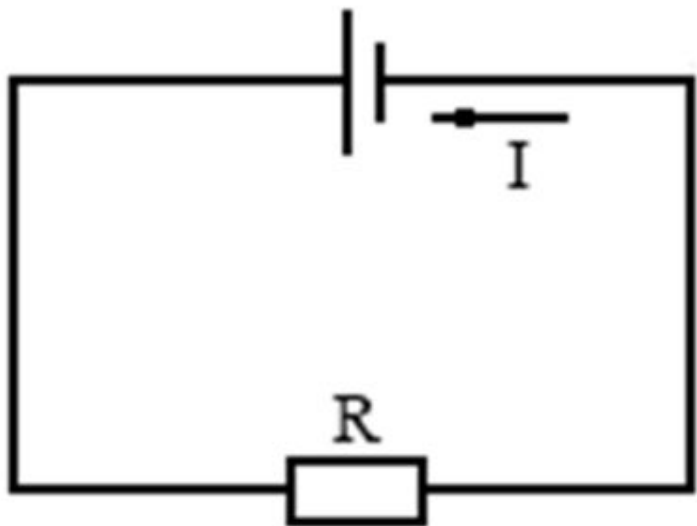
Аналогично, для контура *adef* можно записать

$$-I_2 R_2 + I_3 R_3 = E_2 + E_3$$

## Алгоритм расчета электрических цепей:

1. Посчитать число узлов и контуров в цепи.
  2. Произвольно задать направления обхода контуров и токов в сопротивлениях.
  3. Записать первое правило Кирхгоффа для  $n-1$ го узла.
  4. Записать второе правило Кирхгоффа для каждого контура.
  5. Решить систему уравнений.
- 

### 3. Закон Ома для полной цепи и неоднородного участка цепи содержащего источник тока.



Рассмотрим полную электрическую цепь с источником ЭДС=  $\varepsilon$  ,  
сопротивлением  $r$  , и внешним  
нагрузочным сопротивлением  $R$ .

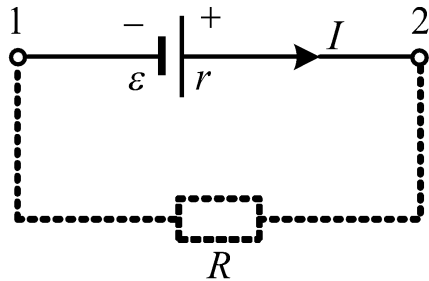
Применяя второе правило  
Кирхгоффа получим:

$$A_{ст} = Q \quad \rightarrow \quad \varepsilon = I \cdot R + I \cdot r \quad \rightarrow \quad \varepsilon = I \cdot (R + r)$$

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

**Сила тока в полной цепи равна отношению ЭДС цепи к её полному сопротивлению.**

## Закон Ома для неоднородного участка цепи, содержащего источник тока.



Сила  $\vec{F}$ , действующая на заряд  $q$  в любой точке цепи, может быть записана в виде :

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{E}_{\text{ind}})$$

Работа, совершаемая суммарной силой  $\vec{F}$  над зарядом  $q$  на участке цепи 1 – 2:

$$A = \int_1^2 \vec{F} dl = q(\varphi_1 - \varphi_2) + q\varepsilon \quad (8)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  - значения скалярного потенциала электростатического поля на границах участка.

Величина, численно равная суммарной работе, совершаемой электростатическими и сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда, называется **падением напряжения** или просто **напряжением**  $U$  на данном участке цепи.

напряжение на неоднородном участке цепи определяется выражением :

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon$$

Таким образом, для неоднородного участка цепи **электрическое напряжение не равно разности потенциалов**. Это результат действия на данном участке цепи сторонней силы, которая имеет не электростатическую природу.

**Закон Ома для неоднородного участка цепи** имеет следующий вид:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon}{r} \quad (9)$$

Используя закон Ома для замкнутой цепи (11.9), можно вычислить напряжение на полюсах источника тока:

$$U = \varepsilon - Ir$$

*Электродвижущую силу источника можно определить как разность потенциалов между полюсами источника тока в разомкнутой цепи.*