

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Диэлектриками называются вещества, которые при обычных условиях практически не проводят электрический ток.

Если заменить положительные заряды ядер молекул суммарным зарядом $+q$, находящимся в, так сказать, "центре тяжести" положительных зарядов, а заряд всех электронов – суммарным отрицательным зарядом $-q$, находящимся в "центре тяжести" отрицательных зарядов, то молекулы можно рассматривать как *электрические диполи с электрическим моментом*.

Различают **три типа** диэлектриков.

1) **Диэлектрики с неполярными молекулами**, симметричные молекулы которых в отсутствие внешнего поля имеют **нулевой** дипольный момент (например, N_2 , H_2 , O_2 , CO_2).

2) **Диэлектрики с полярными молекулами**, молекулы которых вследствие асимметрии имеют **ненулевой** дипольный момент (например, H_2O , NH_3 , SO_2 , CO).

3) **Ионные диэлектрики** (например, $NaCl$, KCl). Ионные кристаллы представляют собой пространственные решётки с правильным чередованием ионов разных знаков.

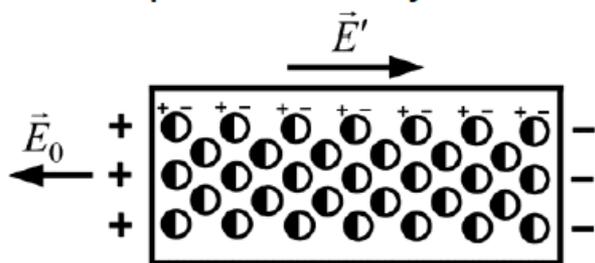
Внесение диэлектриков во внешнее электрическое поле приводит к возникновению отличного от нуля результирующего электрического момента диэлектрика.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКА

Поляризацией диэлектрика называется процесс ориентации диполей или появления под воздействием электрического поля ориентированных по полю диполей.

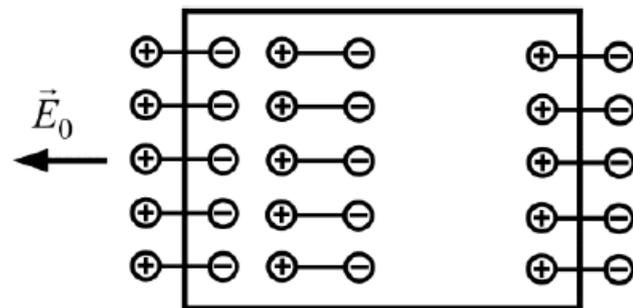
Соответственно трём видам диэлектриков различают **три вида поляризации**.

1) **Электронная, или деформационная, поляризация** диэлектрика с неполярными молекулами – за счёт деформации электронных орбит возникает индуцированный дипольный момент у атомов или молекул диэлектрика.



2) **Ориентационная, или дипольная, поляризация** диэлектрика с полярными молекулами – ориентация

имеющихся дипольных моментов молекул по полю (эта ориентация тем сильнее, чем больше напряжённость электрического поля и чем ниже температура).



3) **Ионная поляризация** диэлектрика с ионными кристаллическими решётками – смещение подрешётки положительных ионов вдоль поля, а отрицательных ионов против поля приводит к возникновению дипольных моментов.

ПОЛЯРИЗОВАННОСТЬ. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Поместим пластину из однородного диэлектрика во внешнее электрическое поле созданное двумя бесконечными параллельными разноимённо заряженными плоскостями.

Во внешнем электрическом поле диэлектрик объёмом V поляризуется, т. е. приобретает дипольный момент $\vec{P}_V = \sum_i \vec{p}_i$, где \vec{p}_i — дипольный момент одной молекулы.

В случае изотропного диэлектрика поляризованность (для большинства диэлектриков за исключением сегнетоэлектриков) **линейно** зависит от напряжённости внешнего поля: $\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}$,

Вследствие поляризации на поверхности диэлектрика появляются нескомпенсированные заряды, которые называются **связанными** (в отличие от **свободных** зарядов, которые создают внешнее поле).

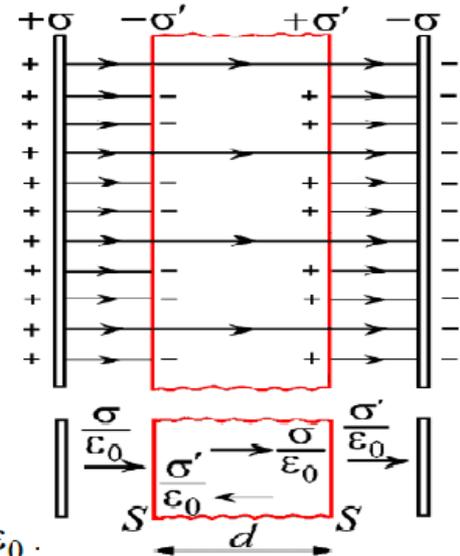
Поле \vec{E}' внутри диэлектрика, создаваемое связанными зарядами, направлено против внешнего поля \vec{E}_0 , создаваемого свободными зарядами. Результирующее поле внутри диэлектрика: $E = E_0 - E'$.

В нашем примере поле, создаваемое двумя бесконечно заряженными плоскостями с поверхностной плотностью зарядов σ' : $E' = \sigma' / \epsilon_0$. Поэтому $E = E_0 - \sigma' / \epsilon_0$.

Следовательно, $E = E_0 - \frac{\sigma'}{\epsilon_0} = E_0 - \frac{P}{\epsilon_0} = E_0 - \frac{\chi \epsilon_0 E}{\epsilon_0} = E_0 - \chi E$.

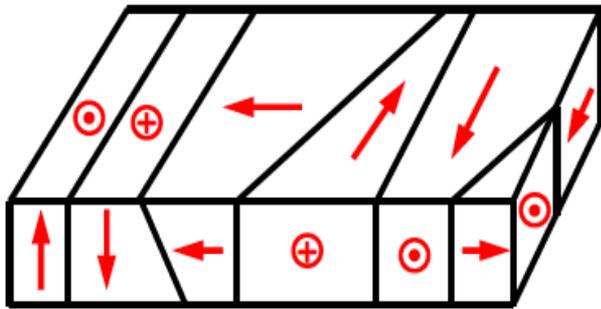
Откуда напряжённость результирующего поля внутри диэлектрика: $E = \frac{E_0}{1 + \chi} = \frac{E_0}{\epsilon}$.

Безразмерная величина $\epsilon = 1 + \chi = \frac{E_0}{E}$ называется **диэлектрической проницаемостью среды**.



СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ

Сегнетоэлектриками называются кристаллические диэлектрики, у которых в отсутствие внешнего электрического поля возникает самопроизвольная ориентация дипольных электрических моментов составляющих его частиц.



Примеры: сегнетова соль $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; титанат бария BaTiO_3 .

Сегнетоэлектрики состоят из **доменов** – областей с различными направлениями поляризованности.

Температура, выше которой исчезают сегнетоэлектрические свойства – **точка Кюри**.

Для сегнетоэлектриков связь между векторами \vec{E} и \vec{P} нелинейная и наблюдается явление **диэлектрического гистерезиса** – сохранения **остаточной поляризованности** при снятии внешнего поля.

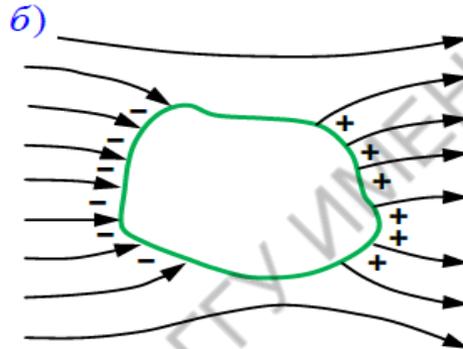
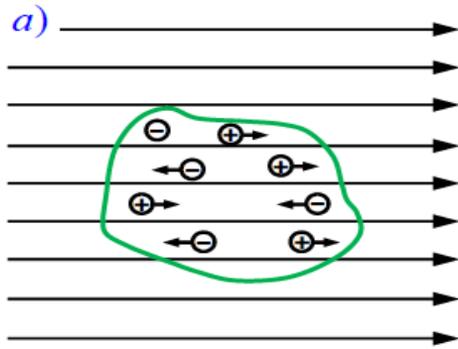
Пьезоэлектрики – это кристаллические диэлектрики, в которых при сжатии или растяжении возникает электрическая поляризация – **прямой пьезоэффект**.

Обратный пьезоэффект – появление механической деформации под действием электрического поля.

ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Если поместить проводник во внешнее электростатическое поле или его зарядить, то на заряды проводника будет действовать электростатическое поле, в результате чего они начнут перемещаться до тех пор, пока не установится равновесное распределение зарядов, при котором электростатическое поле внутри проводника обращается в нуль $\vec{E} = 0$.

— При помещении нейтрального проводника во внешнее поле свободные заряды (электроны и ионы) начнут перемещаться: положительные – по полю, а отрицательные – против поля



отрицательные – против поля (рис. (a)). На одном конце проводника будет *избыток* положительных зарядов, на другом – отрицательных. Эти заряды называются **индуцированными**. Процесс будет продолжаться до тех пор, пока напряжённость поля

внутри проводника не станет **равной нулю**, а линии напряжённости вне проводника – **перпендикулярными** его поверхности (рис. (б)).

— если проводнику сообщить некоторый заряд q , то **нескомпенсированные заряды** располагаются **только на поверхности** проводника, причём $D = \sigma$ и

$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}$, где σ – поверхностная плотность зарядов, и ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, окружающей проводник.

Индукционные заряды распределяются на **внешней** поверхности проводника. Явление перераспределения поверхностных зарядов на проводнике во внешнем электростатическом поле называется **электростатической индукцией**.

ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ

Рассмотрим **уединённый проводник** – проводник, удалённый от других тел и зарядов. Из опыта следует, что разные проводники, будучи одинаково заряженными, имеют разные потенциалы.

Физическая величина C , равная отношению заряда проводника q к его потенциалу φ , называется **электрической ёмкостью** этого проводника

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Ёмкость уединённого проводника численно равна заряду, который нужно сообщить этому проводнику для того, чтобы изменить его потенциал на единицу.

Она зависит от формы и размеров проводника и от диэлектрических свойств окружающей среды. Ёмкости геометрически подобных проводников пропорциональны их линейным размерам.

Пример: **ёмкость уединённого проводящего шара:** $C = \frac{q}{\varphi} = 4\pi\epsilon_0 R.$

Единица ёмкости – фарад (Ф): 1 Ф – ёмкость такого уединённого проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда 1 Кл. Ёмкостью 1 Ф обладает шар с радиусом $R = 9 \cdot 10^6$ км. Ёмкость Земли 0,7 мФ.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Если к проводнику с зарядом q приблизить другие тела, то на их поверхности возникнут индуцированные (на проводнике) или связанные (на диэлектрике) заряды. Эти заряды *ослабляют* поле, создаваемое зарядом q , тем самым, *понижая потенциал* проводника и *повышая его ёмкость*.

Конденсатор – это система из двух проводников (обкладок) с одинаковыми по модулю, но противоположными по знаку зарядами, форма и расположение которых таковы, что поле сосредоточено в узком зазоре между обкладками.

Ёмкость конденсатора – физическая величина, равная отношению заряда q , накопленного в конденсаторе, к разности потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ между его обкладками: $C = \frac{q}{\Delta\varphi}$.

1. Ёмкость плоского конденсатора (две параллельные металлические пластины площадью S каждая, расположенные на расстоянии d друг от друга ($\sigma = \frac{q}{S}$)):

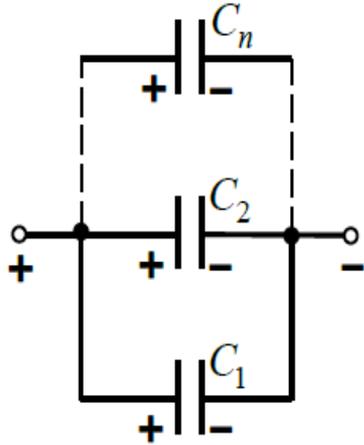
$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{q}{\frac{\sigma d}{\epsilon_0 \epsilon}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}.$$

3. Ёмкость сферического конденсатора (две концентрических сферы с радиусами r_1 и r_2):

$$C = \frac{q}{\frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} = 4\pi\epsilon_0\epsilon \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}.$$

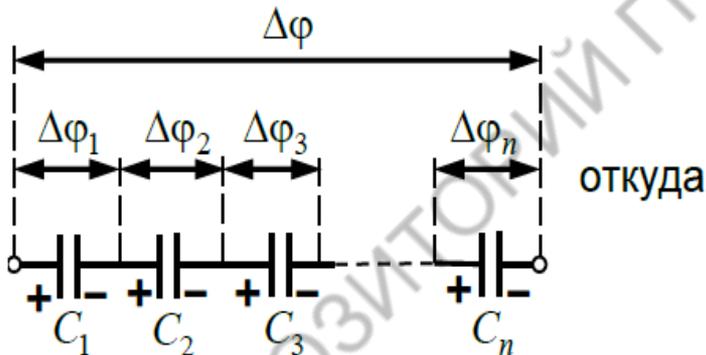
СОЕДИНЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ

У **параллельно** соединённых конденсаторов $C_1, C_2 \dots C_n$ разность потенциалов на обкладках конденсаторов одинакова $\Delta\varphi$. Полная ёмкость



$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\Delta\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \Delta\varphi}{\Delta\varphi} = \sum_{i=1}^n C_i.$$

У **последовательно** соединённых конденсаторов $C_1, C_2 \dots C_n$ заряды q всех обкладок равны по модулю, а суммарная разность потенциалов



$$\Delta\varphi = \sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i = \sum_{i=1}^n \frac{q}{C_i} = \frac{q}{C},$$

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}.$$

ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Энергия заряженного конденсатора равна работе внешних сил, которую необходимо затратить, чтобы зарядить конденсатор.

Процесс зарядки конденсатора можно представить как последовательный перенос достаточно малых порций заряда $\Delta q > 0$ с одной обкладки на другую. При этом одна обкладка постепенно заряжается положительным зарядом, а другая - отрицательным.

Элементарная работа внешних сил по перенесению малого заряда dq с обкладки 2 конденсатора на обкладку 1: $dA = \Delta\phi dq = \frac{q dq}{C}$.

Работа внешних сил при увеличении заряда конденсатора от 0 до q : $A = \int_0^q \frac{q dq}{C} = \frac{q^2}{2C}$.

Энергия заряженного конденсатора (используя $C = \frac{q}{\Delta\phi}$):

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{C(\phi_1 - \phi_2)^2}{2} = \frac{q\Delta\phi}{2}.$$

Электрическую энергию W следует рассматривать как потенциальную энергию, запасенную в заряженном конденсаторе. Формулы для W аналогичны формулам для потенциальной энергии E_p

деформированной пружины

$$E_p = \frac{kx^2}{2} = \frac{F^2}{2k} = \frac{Fx}{2}$$

где k - жесткость пружины, x - деформация, $F = kx$ - внешняя сила.

По современным представлениям, электрическая энергия конденсатора локализована в пространстве между обкладками конденсатора, то есть в электрическом поле. Поэтому ее называют энергией электрического поля.

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. СИЛА, ПЛОТНОСТЬ ТОКА

Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов.

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

Количественной мерой электрического тока служит **сила тока** I – скалярная физическая величина, равная отношению заряда dq , переносимого сквозь рассматриваемую поверхность за малый промежуток времени, к

величине dt этого промежутка
$$I = \frac{dq}{dt}.$$

Единица силы тока – ампер (А)

Плотностью электрического тока называется вектор \vec{j} , совпадающий с направлением электрического тока в рассматриваемой точке и численно равный отношению силы тока dI сквозь малый элемент поверхности, **ортогональной** направлению тока, к площади dS_{\perp} этого

элемента:
$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}.$$

Для постоянного тока I , текущего перпендикулярно сечению S проводника:

$$j = \frac{I}{S}.$$

Единица плотности тока – А/м².

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА И НАПРЯЖЕНИЕ

Силы не электростатического происхождения, действующие на заряды со стороны источников тока, называются **сторонними**.

Физическая величина, определяемая работой, которую совершают сторонние силы при перемещении единичного положительного заряда, называется **электродвижущей силой (ЭДС)** действующей в цепи:

$$\Theta = \frac{A}{q_0}.$$

Эта работа совершается за счёт энергии, затрачиваемой в источнике тока, поэтому величину Θ , можно назвать электродвижущей силой источника тока, включённого в цепь. ЭДС, как и потенциал выражается в **вольтах**.

Работа сторонних сил по перемещению заряда q_0 **на замкнутом участке** цепи:

$$A = \oint \vec{F}_{\text{стор}} \vec{dl} = q_0 \oint \vec{E}_{\text{стор}} \vec{dl}.$$

Отсюда, ЭДС действующая в замкнутой цепи – это **циркуляция вектора напряжённости поля сторонних сил**: $\Theta = \oint \vec{E}_{\text{стор}} \vec{dl}.$

ЭДС, действующая на участке 1–2 цепи, равна $\Theta_{12} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{стор}} \vec{dl}.$

Напряжением U на участке 1–2 называется физическая величина, численно равная суммарной работе совершаемой электростатическими и сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда на

данном участке цепи: $U_{12} = \frac{A_{12}}{q_0} = \varphi_1 - \varphi_2 + \Theta_{12}.$

ЗАКОН ОМА. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Закон Ома для однородного участка цепи (не содержащего источника тока): сила тока, текущего по однородному металлическому проводнику, пропорциональна напряжению на конце проводника (интегральная форма закона Ома).

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

Коэффициент пропорциональности R называется *электрическим сопротивлением проводника*.

Единица электрического сопротивления – ом (Ом): 1 Ом – сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 В течёт постоянный ток 1 А.

Величина $G = \frac{1}{R}$ называется *электрической проводимостью* проводника.

Единица электрической проводимости – сименс (См): 1 См – проводимость участка электрической цепи сопротивлением 1 Ом.

Сопротивление проводника зависит от его размеров и формы, а также от материала, из которого проводник изготовлен. Например, для однородного линейного проводника длиной l и площадью поперечного сечения S сопротивление рассчитывается по формуле:

где коэффициент пропорциональности ρ , характеризующий материал проводника, называется *удельным электрическим сопротивлением*.

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

Единица удельного электрического сопротивления – ом-метр (Ом·м).

Величина обратная удельному сопротивлению называется *удельной электрической проводимостью* вещества проводника:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

Единица удельной электрической проводимости – сименс на метр (См/м).

СОПРОТИВЛЕНИЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ

(1). Последовательное соединение n про-

водников: $I_1 = I_2 = \dots = I_n = I$,

$$IR = U = \sum_{i=1}^n U_i = \sum_{i=1}^n I_i R_i = I \sum_{i=1}^n R_i,$$

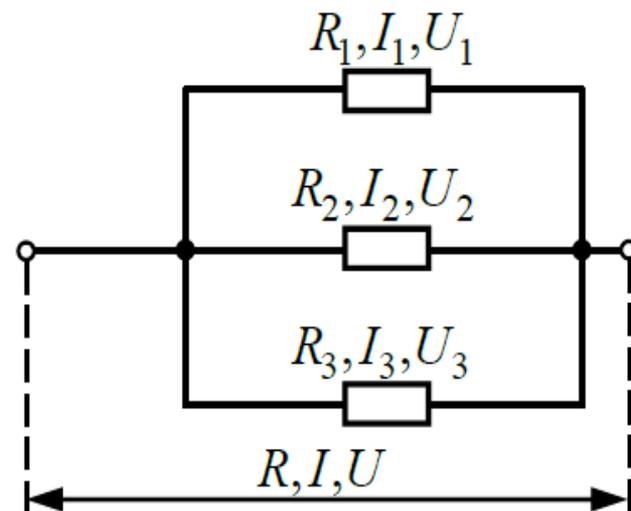
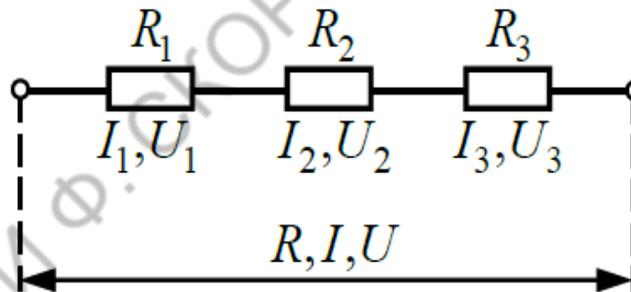
$$R = \sum_{i=1}^n R_i.$$

(2). Параллельное соединение n проводни-

ков: $U_1 = U_2 = \dots = U_n = U$,

$$\frac{U}{R} = I = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{R_i} = U \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i},$$

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}.$$



ОБОБЩЕННЫЙ ЗАКОН ОМА (ДЛЯ НЕОДНОРОДНОГО УЧАСТКА)

Отсюда следует закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме, который является **обобщенным законом Ома**:

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \Theta_{12} \text{ или } I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \Theta_{12}}{R}.$$

Частные случаи.

1) Если на данном участке цепи источник тока **отсутствует**, то мы получаем **закон Ома для однородного участка цепи**: $I = \frac{U}{R}$.

2) Если цепь **замкнута** ($\Delta\varphi = 0$), то получаем **закон Ома для замкнутой цепи**:
$$I = \frac{\Theta}{R} = \frac{\Theta}{r_{\text{внутр}} + R_{\text{внеш}}},$$

где Θ – ЭДС, действующая в цепи;

R – суммарное сопротивление всей цепи;

$R_{\text{внеш}}$ – сопротивление внешней цепи;

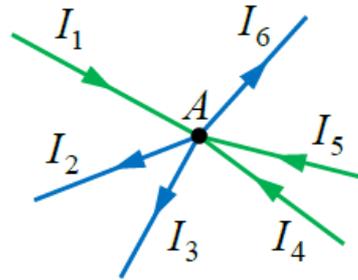
$r_{\text{внутр}}$ – внутреннее сопротивление источника тока.

3) Если цепь **разомкнута**, то $I = 0$ и $\Theta_{12} = \varphi_2 - \varphi_1$, т. е. ЭДС, действующая в разомкнутой цепи равна разности потенциалов на её концах.

ПРАВИЛА КИРХГОФА ДЛЯ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦЕПЕЙ (1)

Узел электрической цепи называется любая точка разветвления цепи, в которой сходится *не менее трёх* проводников с током. Ток, входящий в узел, считается *положительным*, а ток, выходящий из узла – *отрицательным*.

Первое правило Кирхгофа – алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

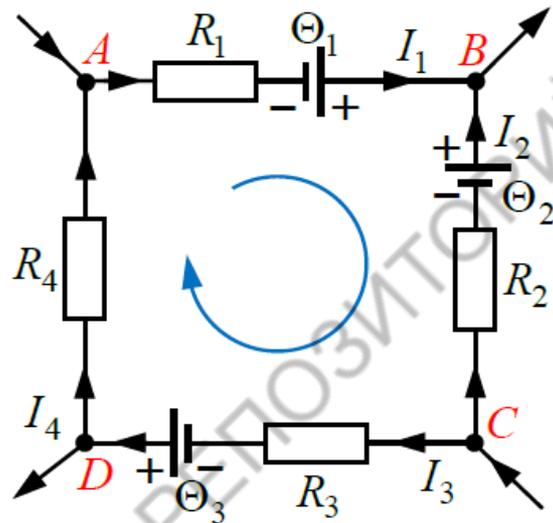


$$\sum_k I_k = 0.$$

Например, для узла *A* на рисунке первое правило Кирхгофа:

$$I_1 - I_2 - I_3 + I_4 + I_5 - I_6 = 0.$$

Второе правило Кирхгофа – в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвлённой электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I_i на сопротивление R_i соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме ЭДС Θ_k , встречающихся в этом контуре:



$$\sum_i I_i R_i = \sum_k \Theta_k.$$

Например, для обхода по часовой стрелке замкнутого контура *ABCD* второе правило Кирхгофа имеет вид

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_3 R_3 + I_4 R_4 = \Theta_1 - \Theta_2 + \Theta_3.$$

ПРАВИЛА КИРХГОФА ДЛЯ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦЕПЕЙ (2)

При расчёте сложных цепей с применением правил Кирхгофа **необходимо**:

1. *Выбрать произвольное направление токов* на всех участках цепи; действительное направление токов определяется при решении задачи: если искомый ток получится положительным, то его направление было выбрано правильно, а если – отрицательным – его истинное направление противоположно выбранному.
2. *Выбрать направление обхода* контура и строго его придерживаться; произведение IR положительно, если ток на данном участке совпадает с направлением обхода. ЭДС, действующие по выбранному направлению обхода, считаются положительными, против – отрицательными.
3. *Составить столько уравнений*, чтобы их число было равно числу искомых величин (в систему уравнений должны входить все сопротивления и ЭДС рассматриваемой цепи); каждый рассматриваемый контур должен содержать хотя бы один элемент, не содержащийся в предыдущих контурах, чтобы не получались уравнения, которые являются простой комбинацией уже составленных уравнений.