Физические основы систем связи

Рабчевский Андрей Николаевич
Старший преподаватель кафедры ИБиСС
E-mail: andrey@ranat.ru, +7 (912) 7808729

Список литературы

- Савельев И.В. Курс общей физики. В 5-и тт. Том 2. Электричество и магнетизм. ISBN - 978-5-8114-1208-2. Издательство «Лань». 2021 г.
- Савельев И.В. Курс общей физики. В 5-и тт. Том 4. Волны. Оптика. ISBN - 978-5-8114-1210-5. Издательство «Лань». 2021 г.
- Трофимова Т. И. Руководство к решению задач по физике : учебное пособие для прикладного бакалавриата: Учебное пособие/Трофимова Т. И..-М:Издательство Юрайт,2019, ISBN 978-5-9916-3429-8.-265. https://elis.psu.ru/node/557918

Проводники в электрическом поле

Лекция 5

Главы 3.1-4.3

Основные темы

- Равновесие зарядов на проводнике
- Проводник во внешнем электрическом поле
- Электроемкость
- Конденсаторы

Равновесие зарядов на проводнике

- Носители зарядов в проводнике могут перемещаться под действием сколь угодно малой силы.
- Для равновесия зарядов необходимо выполнение следующих условий:

1. Напряженность поля всюду внутри проводника должна быть равна 0

$$E = 0 \tag{3.1}$$

мы помним, что $E = -\nabla\varphi$, это значит внутри проводника потенциал должен быть постоянным

$$\varphi = const$$

Равновесие зарядов на проводнике

2. Напряженность поля на поверхности проводника должна быть в каждой точке направлена по нормали к поверхности

$$E = E_n \qquad (3.2)$$

Следовательно, в случае равновесия зарядов поверхность проводника будет эквипотенциальной.

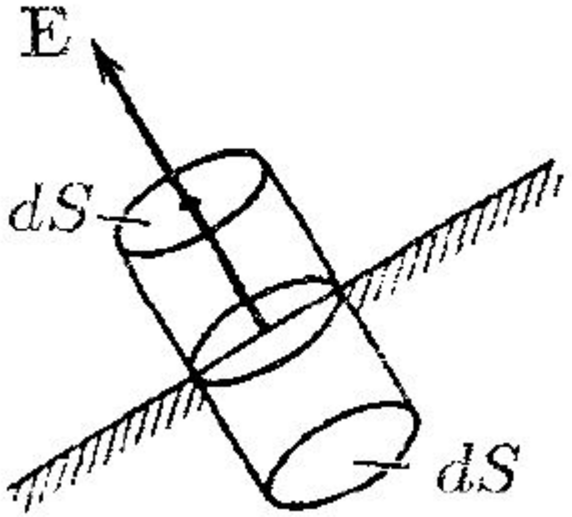
- Если проводящему телу сообщить заряд $\boldsymbol{q}$, то он распределится так, чтобы соблюдались условия равновесия.
- Поскольку поле внутри проводника отсутствует, то и поток вектора электрического смещения через произвольную поверхность также равна 0

Равновесие зарядов на проводнике

- Согласно теореме Гаусса и сумма зарядов внутри этой поверхности также будет равна 0.
- Следовательно, при равновесии ни в каком месте внутри проводника не может быть избыточных зарядов
- Все заряды распределяются по поверхности проводника с некоторой поверхностной плотностью $\boldsymbol{\sigma}$.
- Если из внутреннего объема проводника удалить часть вещества, то ничего не изменится.
- То есть, на полом проводнике избыточный заряд распределяется так же, как и на сплошном

Равновесие зарядов на проводнике

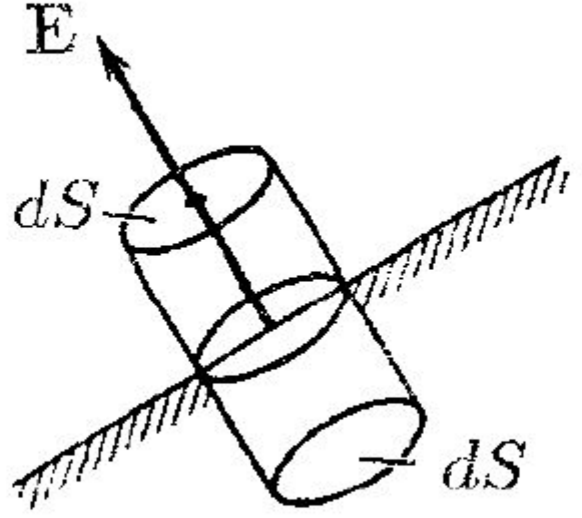
- Кроме того, одноименные элементарные заряды, образующие данный заряд q взаимно отталкиваются и стремятся расположиться на максимальном расстоянии друг от друга.



- Представим небольшую цилиндрическую поверхность, образованную нормалями к поверхности проводника и основаниями dS, одно из которых расположено внутри, а другое вне проводника.
- Поток вектора смещения через внутреннюю часть поверхности равен 0, так как $\mathbf{E}$, а значит и $\mathbf{D}$, внутри проводника равно 0.

Равновесие зарядов на проводнике

- Вне проводника в непосредственной близости к нему напряженность поля E направлена по нормали к поверхности
- Для выступающей наружу боковой поверхности цилиндра ***Dn=0,*** а для внешнего основания ***Dn=D***.



- Следовательно, поток смещения через рассматриваемую поверхность равен ***DdS,*** где ***D*** – смещение в непосредственной близости к поверхности.
- Внутри цилиндра содержится сторонний заряд ***σdS,*** где ***σ*** - плотность заряда в данном месте поверхности проводника

Равновесие зарядов на проводнике

- Применив теорему Гаусса, получим

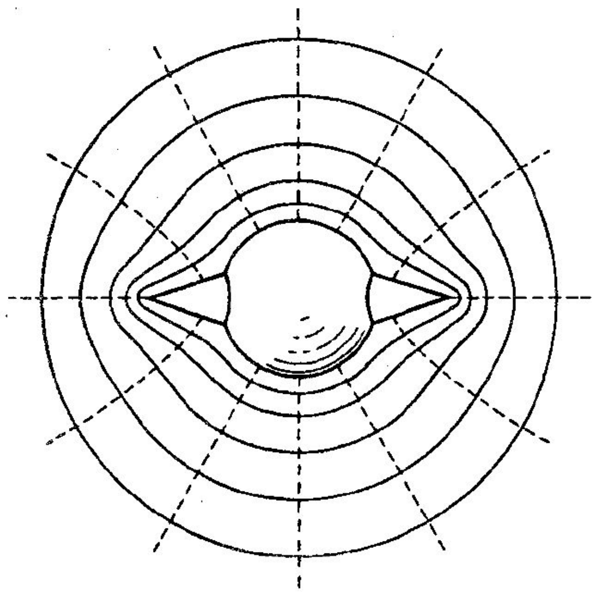
$$D_n\,dS = \sigma\,dS, \qquad\qquad = \sigma$$

- Отсюда следует, что напряженность поля вблизи поверхности проводника равна

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} \qquad (3.3)$$

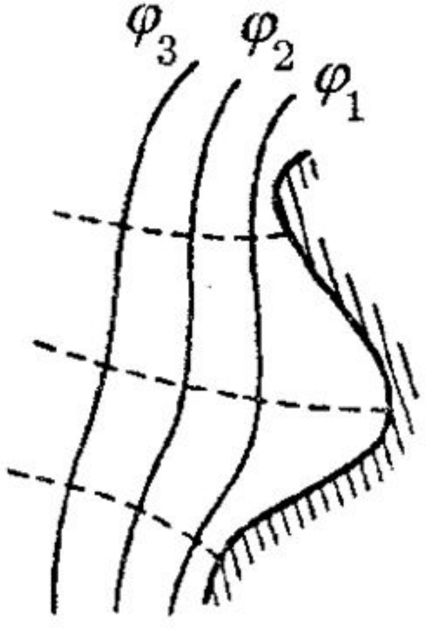
Где ε - диэлектрическая проницаемость среды, окружающей проводник

Равновесие зарядов на проводнике



- На больших расстояниях от проводника эквипотенциальные поверхности имеют форму как у точечного заряда
- По мере приближения к поверхности эквипотенциальные поверхности все больше повторяют поверхность проводника
- Вблизи выступов эквипотенциальные поверхности располагаются гуще, значит и напряженность поле здесь больше.
- Следовательно, плотность зарядов вблизи выступов особенно велика

Равновесие зарядов на проводнике

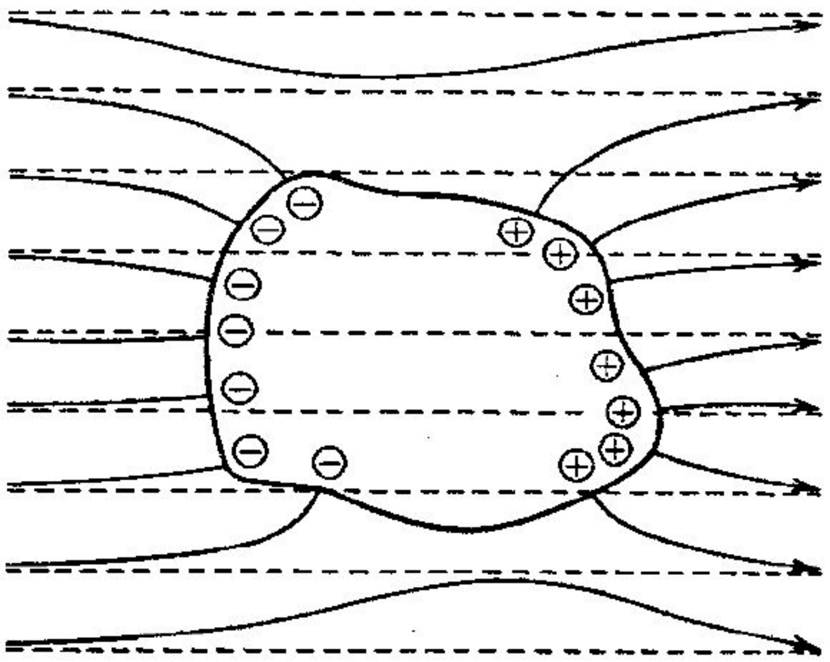


- Вблизи углублений эквипотенциальные поверхности расположены реже, значит и напряженность поля и плотность зарядов ниже.
- Вообще, плотность зарядов при заданном потенциале проводника определяется кривизной поверхности.
- Она растет с увеличением положительной кривизны (выпуклости) и убывает с увеличением отрицательной кривизны (вогнутости).
- Особенно велика плотность зарядов на остриях

Равновесие зарядов на проводнике

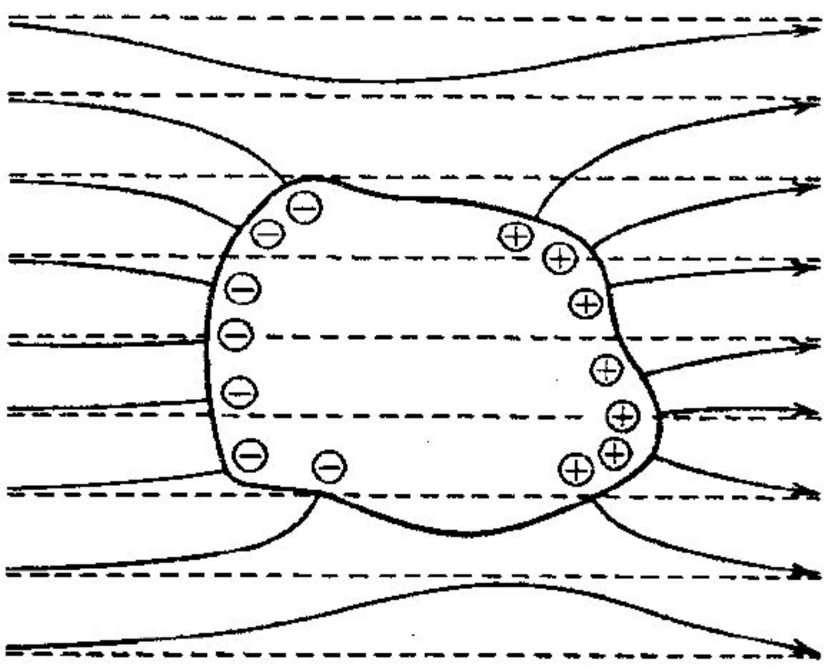
- Напряженность поля вблизи остриев может быть настолько большой, что возникает ионизация молекул газа, окружающего проводник.
- Ионы иного знака, чем q, притягиваются к проводнику и нейтрализуют заряд.
- Ионы того же знака, что и q, отталкиваются от проводника, увлекая за собой молекулы газа.
- В результате возникает ощутимое движение газа , называемое электрическим ветром.
- Заряд проводника уменьшается, он как бы стекает с острия и уносится ветром. Такое явление называют истечением заряда с острия.

Проводник во внешнем электрическом поле



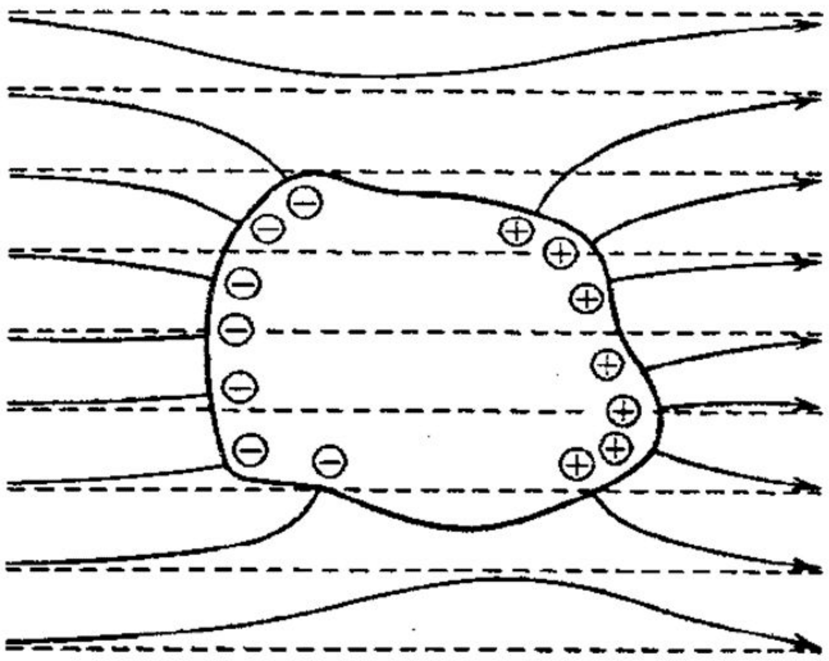
- При внесении незаряженного проводника в электрическое поле носители заряда приходят в движение.
- Положительные заряды движутся в направлении поля E
- Отрицательные заряды в противоположном направлении
- В результате у концов проводника возникают заряды противоположного знака, называемые индуцированными зарядами.

Проводник во внешнем электрическом поле



- Поле этих зарядов направлено противоположно внешнему полю.
- Накапливание зарядов у концов проводника приводит к ослаблению в нем поля.
- Перераспределение зарядов происходит до тех пор, пока не начнут выполняться условия (3.1) и (3.2).
- Нейтральный проводник разрывает часть линий напряженности. Они заканчиваются на отрицательных и начинаются на положительных зарядах.

Проводник во внешнем электрическом поле



- Индуцированные заряды распределяются по внешней поверхности проводника.
- Если внутри проводника имеется полость, то при равновесном состоянии поле внутри этой полости равно 0.
- На этом основывается электростатическая защита.
- Если прибор хотят защитить, его окружают проводящим экраном.
- Внешнее поле компенсируется внутри экрана индуцированными зарядами, возникающими на его поверхности

Электроемкость

- Сообщенный проводнику заряд q распределяется по его поверхности так, чтобы напряженность поля внутри проводника была равно нулю.
- Если этому проводнику сообщить еще заряд такой же величины, то он распределится так же как и первый заряд.
- В противном случае он создаст внутри проводника ненулевое поле.
- Следовательно, потенциал уединенного проводника пропорционален находящемуся на нем заряду.
- Действительно, увеличение заряда вызовет такое же увеличение напряженности электрического поля

Электроемкость

- Так же точно увеличится и работа переноса единичного заряда из бесконечности на поверхность проводника, то есть потенциал проводника.
- Таким образом, для уединенного проводника

$$q = C\varphi \qquad (3.4)$$

- Коэффициент пропорциональности C между потенциалом и зарядом называют **электроемкостью** проводника.

$$C = \frac{q}{\varphi} \qquad (3.5)$$

Электроемкость

- ***Емкость численно равна заряду, сообщение которого проводнику повышает его потенциал на единицу***
- Потенциал заряженного шара радиуса R можно выразить как

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_R^\infty \frac{q}{\varepsilon r^2}dr = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{\varepsilon R} \qquad (3.6)$$

- Сопоставив (3.5) и (3.6) получим

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R \qquad (3.7)$$

Электроемкость

- За единицу емкости принимают емкость такого проводника, потенциал которого изменяется на 1В при сообщении ему заряда 1Кл.
- Эта единица называется фарадом (Ф).

$$1Ф = \frac{1Кл}{1В} = \frac{3 \cdot 10^9}{1/300} СГСЭ - ед.\, емкости = 9 \cdot 10^{11} см$$

- Это шар, радиус которого в 1500 раз больше радиуса земли.

Конденсаторы

- Уединенные проводники обладают небольшой емкостью.
- Даже шар размером с планету Земля имеет емкость 700 мкФ
- На практике требуются устройства, накапливающие заметные по величине заряды при небольшом размере
- Такие устройства называются конденсаторами
- В их основе лежит свойство увеличения электроемкости проводника по мере приближения к нему других тел
- Под действием поля, создаваемого заряженным проводником, на поднесенном к нему теле возникают индуцированные или связанные заряды

Конденсаторы

- Заряды, противоположные по знаку заряду проводника q, располагаются ближе к проводнику, чем одноименные, и следовательно оказывают большее влияние на потенциал.
- При поднесении к заряженному проводнику какого-либо тела потенциал проводника уменьшается по абсолютной величине.
- При том же заряде, это означает увеличение емкости проводника.
- Конденсаторы делают в виде двух проводников, помещенных близко друг к другу.
- Образующие конденсатор проводники называют его обкладками

Конденсаторы

- Обкладкам придают такую форму, чтобы поле концентрировалось между обкладками
- Это могут быть две пластинки, два коаксиальных цилиндра или две концентрические сферы.
- Соответственно бывают плоские, цилиндрические или сферические конденсаторы.
- Основной характеристикой конденсатора является его емкость, которая прямо пропорциональна заряду и обратно пропорциональна разности потенциалов на его обкладках

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \qquad (3.8)$$

Конденсаторы

- Разность потенциалов $\phi_1 - \phi_2$ называют напряжением между соответствующими точками. Мы будем обозначать напряжение буквой U. В этом случае выражение (3.8) примет вид
$$C = \frac{q}{U} \qquad (3.9)$$

- Емкость определяется геометрией конденсатора и диэлектрическими свойствами среды, заполняющей пространство между обкладками.

Конденсаторы

- Найдем формулу плоского конденсатора. Если площадь обкладки S, а заряд на ней q, то напряженность поля между обкладками

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} = \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon S}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = Ed = \frac{qd}{\varepsilon_0 \varepsilon S}$$

- Разность потенциалов между обкладками
- Отсюда, емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} \qquad (3.10)$$

где S –площадь обкладки, d – зазор между обкладками,

ε - диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего

Конденсаторы

- Из формулы (3.10) следует, что размерность ε_0 измеряется в фарадах не метр Ф/м
- Формула цилиндрического конденсатора

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\ln\left(R_2/R_1\right)} \qquad (3.11)$$

- Где l – длина конденсатора, R_1 и R_2 – радиусы внутренней и внешней обкладок.
- Емкость сферического конденсатора равна

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon\,\frac{R_1R_2}{R_2-R_1} \qquad (3.12)$$

Конденсаторы

- Помимо емкости конденсатор характеризуется предельным напряжением U_{max}, которое можно прикладывать к обкладкам.
- При превышении этого напряжения между обкладками проскакивает искра и конденсатор выходит из строя.

Постоянный электрический ток

Лекция 5

Главы 5.1-5.8

Основные темы

- Электрический ток
- Уравнение непрерывности
- Закон Ома. Сопротивление проводников
- Закон Ома для неоднородного участка цепи
- Разветвленные цепи. Правило Кирхгофа
- Мощность тока
- Закон Джоуля-Ленца

Электрический ток

- Если через некоторую воображаемую поверхность переносится суммарный заряд, отличный от нуля, говорят что через эту поверхность течет **электрический ток**.
- Ток может течь в твердых телах (металлы, полупроводники), в жидкостях (электролиты) и в газах.
- Для протекания тока необходимо наличие в данном теле (или в данной среде) заряженных частиц, которые могу свободно перемещаться.
- Такие частицы называют **носителями тока**.
- Ими могут быть электроны, ионы, либо макрочастицы (пылинки и капельки воды)

Электрический ток

- Ток возникает при условии, что внутри тела существует электрическое поле.
- Носители заряда принимают участие в молекулярном тепловом движении с некоторой скоростью $\mathbf{v}$ даже в отсутствие поля.
- В этом случае через произвольную площадку проходит в среднем одинаковое количество носителей любого знака в обе стороны
- При включении поля на хаотичное движение носителей со скоростью $\mathbf{v}$ накладывается упорядоченное движение со скоростью $\mathbf{u}$.

Электрический ток

- Таким образом, скорость носителей будет $\mathbf{v} + \mathbf{u}$.
- Так как среднее значение $\mathbf{v}$ равно нулю, то средняя скорость носителей равна $\langle \mathrm{v} + \mathrm{u} \rangle = \langle \mathrm{v} \rangle + \langle \mathrm{u} \rangle = \langle \mathrm{u} \rangle$
- То есть, **электрический ток** можно определить как **упорядоченное движение электрических зарядов**.
- Количественной характеристикой тока служит величина заряда, переносимого через рассматриваемую поверхность в единицу времени

$$I = \frac{dq}{dt} \qquad (5.1)$$

Электрический ток

- Электрический ток может быть обусловлен движением как положительных, так и отрицательных носителей.
- Перенос отрицательного заряда в одном направлении эквивалентен переносу положительного заряда в другом.
- Если ток создается носителями обоих знаков, за время dt через данную поверхность положительные носители переносят dq^+ в одном направлении и отрицательные – заряд dq^- в другом, то

$$I = \frac{dq^+}{dt} + \frac{|dq^-|}{dt}$$

- За направление тока принимается направление движения положительных носителей

Электрический ток

- Электрический ток может быть распределен по поверхности, через которую он течет, неравномерно.
- Ток можно охарактеризовать с помощью вектора плотности тока $\boldsymbol{j}$.
- Этот вектор численно равен силе тока $\boldsymbol{dI}$ через расположенную в данной точке перпендикулярную к направлению движения носителей площадку $\boldsymbol{dS_\perp}$, отнесенной к величине этой площадки.

$$j = \frac{dI}{dS_\perp} \qquad (5.2)$$

- За направление $\boldsymbol{j}$ принимается направление вектора скорости

Электрический ток

- Зная вектор плотности тока в каждой точке пространства, можно найти силу тока I через любую поверхность S

$$I = \int_S \mathrm{j} dS \qquad (5.3)$$

- Из (5.3) следует, что сила тока есть поток вектора плотности тока через поверхность
- Пусть в единице объема содержится $\boldsymbol{n}^+$ положительных носителей и $\boldsymbol{n}^-$ отрицательных.
- Алгебраическая величина зарядов носителей равно $\boldsymbol{e}^+$ и $\boldsymbol{e}^-$.

Электрический ток

- Если под действием поля носители приобретают средние скорости $\boldsymbol{u}^{+}$ и $\boldsymbol{u}^{-}$, то за единицу времени через единичную площадку пройдет $\boldsymbol{n}^{+}\boldsymbol{u}^{+}$ положительных носителей, которые перенесут заряд $\boldsymbol{e}^{+}\boldsymbol{n}^{+}\boldsymbol{u}^{+}$.
- Аналогично отрицательные носители перенесут $\boldsymbol{e}^{-}\boldsymbol{n}^{-}\boldsymbol{u}^{-}$
- Таким образом, для плотности тока получается

$$\mathrm{j} = e^{+}n^{+}u^{+} + |e^{-}|n^{-}u^{-} \qquad (5.4)$$

- В векторном виде

$$\mathbf{j} = e^{+}n^{+}\mathbf{u}^{+} + e^{-}n^{-}\mathbf{u}^{-} \qquad (5.5)$$

Электрический ток

- Вектор $\mathbf{u}^-$ направлен противоположно вектору $\mathbf{j}$. При умножении его на отрицательный скаляр e- получается вектор одинакового направления с $\mathbf{j}$.
- Произведение e^+n^+ дает плотность заряда положительных носителей ρ^+, аналогично e^-n^- дает плотность заряда отрицательных носителей ρ^-. Тогда выражение (5.5) можно записать в виде

$$\mathrm{j} = \rho^+ \mathrm{u}^+ + \rho^- \mathrm{u}^- \qquad (5.6)$$

- **Ток, не изменяющийся со временем, называется постоянным.**

Электрический ток

- Для постоянного тока справедливо соотношение

$$I = \frac{q}{t} \qquad (5.7)$$

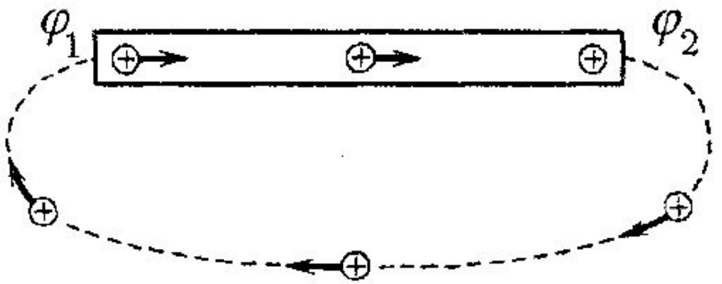
- Где $\boldsymbol{q}$ – заряд, переносимый через рассматриваемую поверхность за конечное время $\boldsymbol{t}$.
- В СИ **единица силы тока Ампер (А)**. Единица заряда кулон определяется как заряд, переносимый за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока в 1А.

$$1\mathrm{A} = 3 \cdot 10^9\, СГСЭ - ед.силы\ тока \qquad (5.8)$$

Электродвижущая сила

- Если в проводнике создать электрическое поле и не принять мер для его поддержания, то перемещение носителей очень быстро приведет к тому, что поле внутри проводника исчезнет и ток прекратится.
- Для того чтобы поддерживать ток, нужно от конца с меньшим потенциалом непрерывно отводить приносимые током заряды, к концу с большим потенциалом непрерывно их подводить.
- То есть необходимо обеспечить круговорот зарядов, чтобы они двигались по замкнутому пути.

Электродвижущая сила



- В замкнутой цепи наряду с участками, на которых положительные носители движутся в сторону убывания потенциала ϕ, должны быть участки, на которых перенос положительных зарядов происходит в направлении возрастания потенциала ϕ.

- Перемещение носителей на этих участках возможно лишь с помощью сил не электростатического характера.
- Такие силы называют **сторонними силами**.

Электродвижущая сила

- Таким образом, для поддержания тока необходимы сторонние силы, действующие на всем протяжении цепи или на отдельных ее участках.
- Сторонние силы можно охарактеризовать работой, которую они совершают над перемещающимися по цепи зарядами.
- Величина, равная работе сторонних сил над единичным положительным зарядом, называется электродвижущей силой (ЭДС), действующей в цепи или на ее участке.

$$\mathrm{E} = \frac{A}{q} \qquad (5.9)$$

Электродвижущая сила

- Размерность ЭДС совпадает с размерностью потенциала.
- ЭДС измеряется в тех же единицах, что и потенциал (Вольты).
- Стороннюю силу $\boldsymbol{F}_{cm}$, действующую на заряд $\boldsymbol{q}$, можно представить в виде

$$\mathbf{F}_{CT} = \mathbf{E}^* q \qquad (5.10)$$

- Векторную величину $\boldsymbol{E}^*$ называют напряженностью поля сторонних сил.
- Работа сторонних сил на участке цепи 1-2 равна

$$A_{12} = \int_1^2 \mathbf{F}_{CT} d\mathbf{l} = q \int_1^2 \mathbf{E}^* d\mathbf{l}$$

Электродвижущая сила

- Разделив эту работу на заряд q, получим ЭДС, действующую на данном участке

$$\mathcal{E}_{12} = \int_1^2 \mathbf{E}^* d\mathbf{l} \qquad (5.11)$$

- Аналогичный интеграл, вычисленный для замкнутой цепи, даст ЭДС, действующую в этой цепи.

$$\mathcal{E} = \oint \mathbf{E}^* d\mathbf{l} \qquad (5.12)$$

- Таким образом, ЭДС, действующая в замкнутой цепи, может быть определена как циркуляция вектора напряженности сторонних сил.

Электродвижущая сила

- Кроме сторонних сил на заряд действуют силы электростатического поля $\mathbf{F}_E = q\mathbf{E}$.
- Следовательно результирующая сила, действующая в каждой точке цепи на заряд q, равна

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_E + \mathbf{F}_{CT} = q\left(\mathbf{E} + \mathbf{E}^*\right)$$

- Работа, совершаемая этой силой над зарядом q на участке цепи 1-2, определяется выражением

$$A_{12} = q\int_1^2 \mathbf{E}d\mathbf{l} + q\int_1^2 \mathbf{E}^* d\mathbf{l} = q\left(\varphi_1 - \varphi_2\right) + q\mathcal{E}_{12} \qquad (5.13)$$

Электродвижущая сила

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

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + q\mathcal{E}_{12} \qquad (5.14)$$

- Участок цепи, на котором не действуют сторонние силы, называется однородным.
- Участок, на котором на носители тока действуют сторонние силы, называется неоднородным.
- Для однородного участка цепи напряжение это разность потенциалов $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ (5.15)

Закон Ома. Сопротивление проводников.

- Немецкий физик Ом экспериментально установил, что сила тока, текущего по однородному металлическому проводнику, пропорциональна падению напряжения $\boldsymbol{U}$ на проводнике

$$I = \frac{1}{R} U \qquad (5.16)$$

- Обозначенная буквой $\boldsymbol{R}$ величина называется **электрическим сопротивлением** проводника.
- Единицей сопротивления служит **Ом**, равный сопротивлению такого проводника, в котором **при напряжении 1В течет ток силой в 1А**.

Закон Ома. Сопротивление проводников.

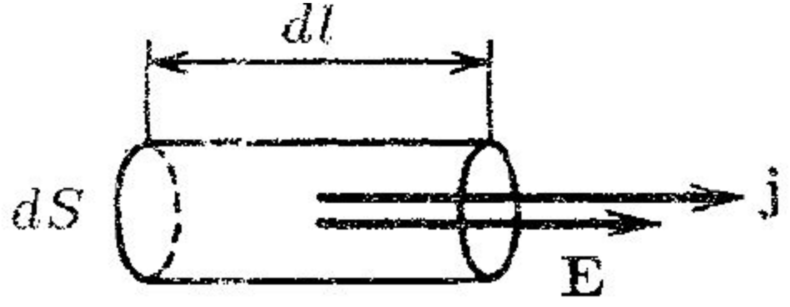
- Величина сопротивления зависит от формы и размеров проводника, а также свойств материала, из которого он сделан.
- Для однородного цилиндрического проводника

$$R = \rho \frac{l}{S} \qquad (5.17)$$

Где l - длина проводника, S – площадь его поперечного сечения, ρ - зависящий от свойств материал коэффициент, называемый удельным электрическим сопротивлением вещества.

В системе СИ удельное сопротивление ρ измеряется в ом-метрах (Ом*м)

Закон Ома. Сопротивление проводников.



- Пусть носители заряда перемещаются по вектору $\boldsymbol{j}$, напряжение поля соответствует вектору $\boldsymbol{E}$.

- В изотропном проводнике упорядоченное движение носителей тока происходит в направлении вектора $\boldsymbol{E}$, поэтому направление векторов $\boldsymbol{j}$ и $\boldsymbol{E}$ совпадают.
- Выделим мысленно в окрестности некоторой точки элементарный цилиндрический объем с образующими, параллельно векторам $\boldsymbol{j}$ и $\boldsymbol{E}$.

Закон Ома. Сопротивление проводников.

- Через поперечное сечение цилиндра течет ток силой ***jdS***.
- Напряжение, приложенное к цилиндру, равно ***Edl***.
- Сопротивление цилиндра ***ρ(dl/dS)***. Тогда

$$jdS = \frac{dS}{\rho dl} Edl, \text{или} \quad j = \frac{1}{\rho} E$$

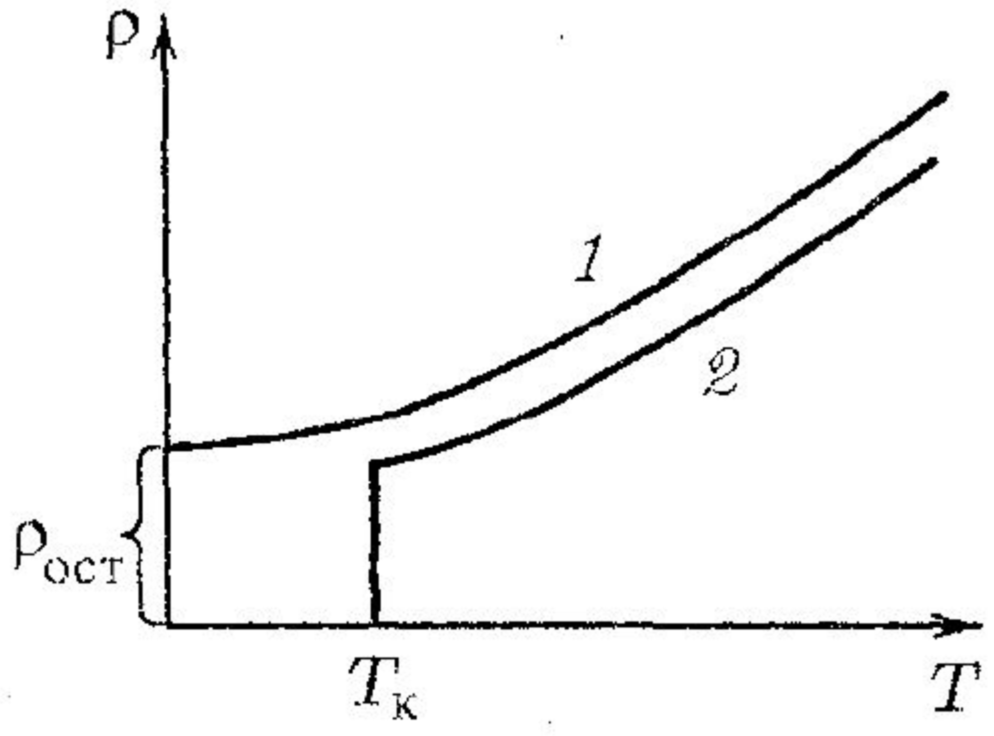
- Поскольку направление векторов j и E совпадают, можно записать

$$\mathrm{j} = \frac{1}{\rho}\mathrm{E} = \sigma \mathrm{E} \qquad (5.18)$$

Закон Ома. Сопротивление проводников.

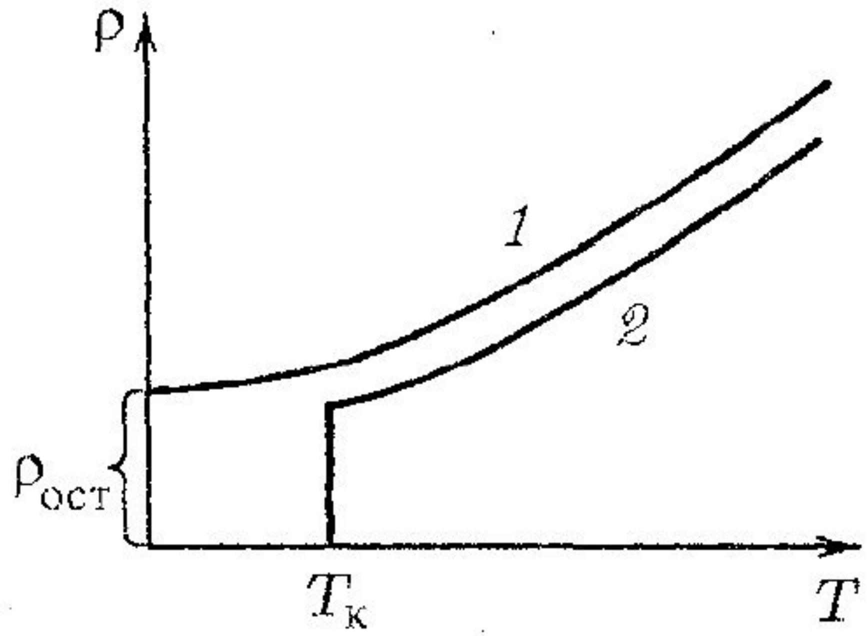
- Величина σ называется удельной электрической проводимостью материала.
- Единица, обратная Ому является Сименс
- Единицей удельной проводимости является Сименс на метр (См/м).
- Проводимость или сопротивление зависят от сил взаимодействия носителей тока с частицами, из которых состоит вещество проводника.
- Чем больше эти силы взаимодействия, тем больше сопротивление.

Закон Ома. Сопротивление проводников.



- Проводимость и сопротивление определяются химической природой вещества и внешними условиями.
- Для большинства металлов при температурах близких к комнатной удельное сопротивление пропорционально температуре
- При низких температурах закономерность нарушается
- Остаточное удельное сопротивление зависит от чистоты материала

Закон Ома. Сопротивление проводников.



- У абсолютно чистых металлов с идеально правильной кристаллической решеткой при абсолютном нуле ρ = 0
- У большой группы металлов при температурах порядка нескольких Кельвинов сопротивление резко обращается в 0.
- Это явление названо сверхпроводимостью
- Впервые в 1911 году сверхпроводимость была выявлена для ртути.
- В дальнейшем сверхпроводимость выявлена у олова, свинца, цинка …
- Для каждого сверхпроводника своя критическая температура T

Закон Ома. Сопротивление проводников.

- Состояние сверхпроводимости может быть разрушено под воздействием магнитного поля.
- Зависимость сопротивления от температуры используется в термометрах сопротивления.
- Обычно это платиновая проволочка, намотанная на фарфоровый каркас.
- Проградуирован по постоянным температурным точкам.
- Позволяет измерять температуру с погрешностью в несколько сотых Кельвина.

Закон Ома для неоднородного участка цепи

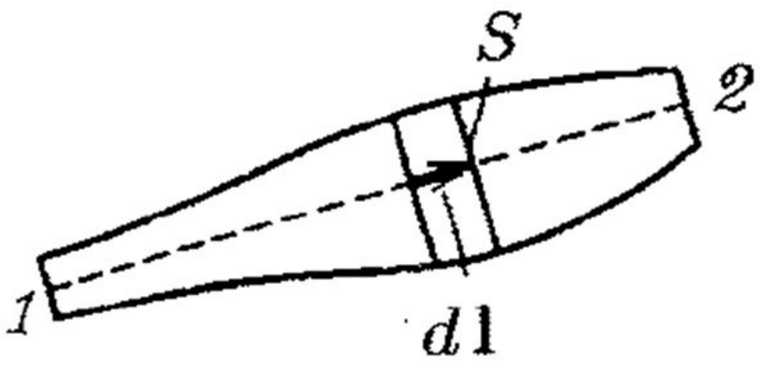
- На неоднородном участке цепи на носители тока действуют кроме электростатических сил $e\mathbf{E}$, сторонние силы $e\mathbf{E}^*$
- Сторонние силы способны вызывать упорядоченное движение носителей в той же мере, что и электростатические
- Средняя скорость упорядоченного движения носителей в проводнике пропорциональна электростатической силе $e\mathbf{E}$.
- При наличии сторонних сил средняя скорость движения носителей будет пропорциональна суммарной силе $e\mathbf{E}+ e\mathbf{E}^*$
- Значит плотность тока в этих точках пропорциональна сумме напряженностей $\mathbf{E} + \mathbf{E}^*$

Закон Ома для неоднородного участка цепи

$$j = \sigma\left(E + E^*\right) \qquad (5.19)$$

- Выражение (5.19) это более общий случай по сравнению с (5.18).
- Допустим, что внутри неоднородного участка цепи существует линия (контур тока), удовлетворяющая условиям:
  1) В каждом сечении, перпендикулярном контуру, величины j, σ, E, E* имеют с достаточной точностью одинаковые значения
  2) Векторы j, E и E* в каждой точке направлены по касательной к контуру
- Поперечное сечение проводника может быть непостоянным

Закон Ома для неоднородного участка цепи



- Выберем произвольное направление движения по контуру от конца 1 к концу 2 участка цепи.
- Спроецируем векторы (5.19) на элемент контура $d\mathrm{l}$, в результате получим

$$j_l = \sigma\left(E_l + E_l^*\right) \qquad (5.20)$$

- Проекция каждого из векторов равна модулю вектора, взятому со знаком + или – в зависимости от направления вектора по отношению к $d\mathrm{l}$. То есть $j_l = j$ или $j_l = -j$

Закон Ома для неоднородного участка цепи

- Вследствие сохранения заряда сила постоянного тока в каждом сечении должна быть одинаковой.
- Поэтому величина $I=j_l S$ постоянна вдоль контура
- Силу тока в данном случае можно рассматривать как алгебраическую величину. Тогда

$$j_l = \sigma\left(E_l + E_l^*\right) \text{или } \frac{I}{S} = \sigma\left(E_l + E_l^*\right) \text{ или } I\frac{\rho}{S} = E_l + E_l^*$$

- Умножим это соотношение на dl и проинтегрируем вдоль контура

$$I\int_1^2 \rho\frac{dl}{S} = \int_1^2 E_l dl + \int_1^2 E_l^* dl$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи

- Выражение $\rho dl/S$ представляет собой сопротивление участка контура длины dl, а интеграл от этого выражения – сопротивление R участка цепи.
- Первый интеграл в правой части дает ϕ_1 - ϕ_2, а второй – ЭДС $\mathcal{E}_{12}$, действующую на участке цепи. Таким образом получаем

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12} \tag{5.21}$$

- ЭДС – величина алгебраическая. Если ЭДС способствует движению положительных носителей в направлении 1-2, ЭДС > 0, а если препятствует, тогда ЭДС < 0.

Закон Ома для неоднородного участка цепи

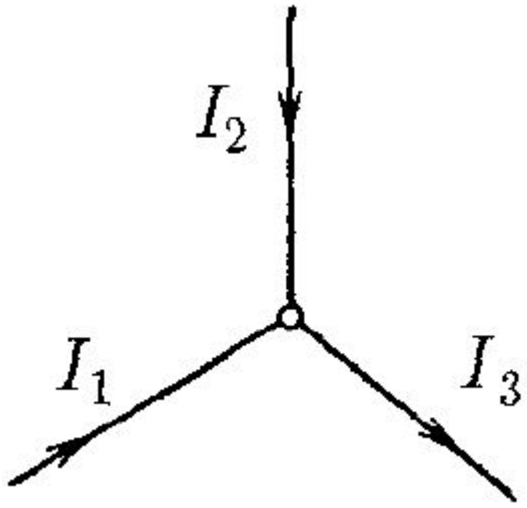
$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathrm{E}_{12}}{R} \qquad (5.21)$$

- Эта формула выражает закон Ома для неоднородного участка цепи.
- Положив $\phi_1 = \phi_2$, получим выражение закона Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\mathrm{E}}{R} \qquad (5.22)$$

- Здесь E - ЭДС, действующая в цепи, $\boldsymbol{R}$ – суммарное сопротивление всей цепи.

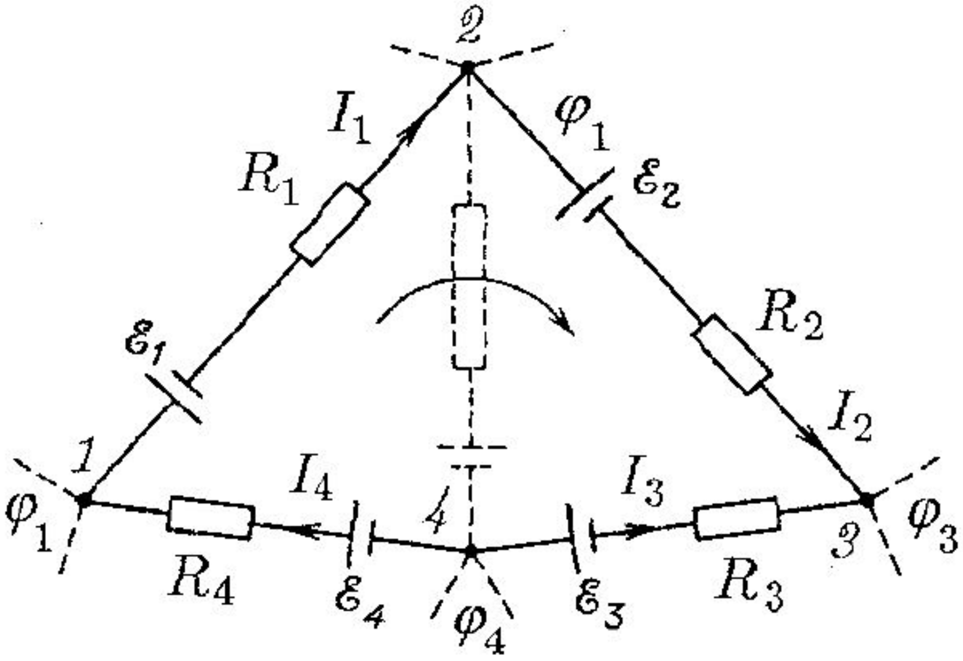
Разветвленные цепи. Правило Кирхгофа.



- Для расчета разветвленных цепей пользуются правилами Кирхгофа
- Узлом называется точка, в которой сходится более чем два проводника
- Считается что ток, текущий к узлу имеет один знак, а от узла - другой
- Первое правило - Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле равна нулю

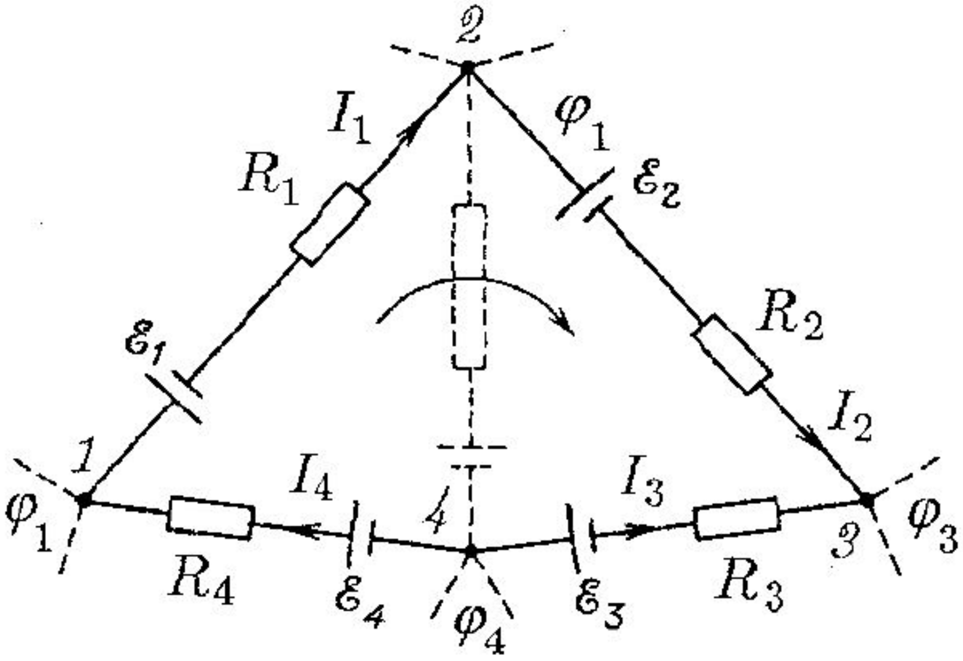
$$\sum I_k = 0 \qquad (5.23)$$

Разветвленные цепи. Правило Кирхгофа.



- Это правило вытекает из закона сохранения заряда.
- Для постоянного тока ∇j всюду равна нулю. Следовательно, поток вектора j (т.е. алгебраическая сумма токов, текущих через окружающую узел воображаемую замкнутую поверхность) должен быть равен нулю.
- Второе правило относится к любому выделенному в разветвленной цепи замкнутому контуру (1-2-3-4-1)

Разветвленные цепи. Правило Кирхгофа.



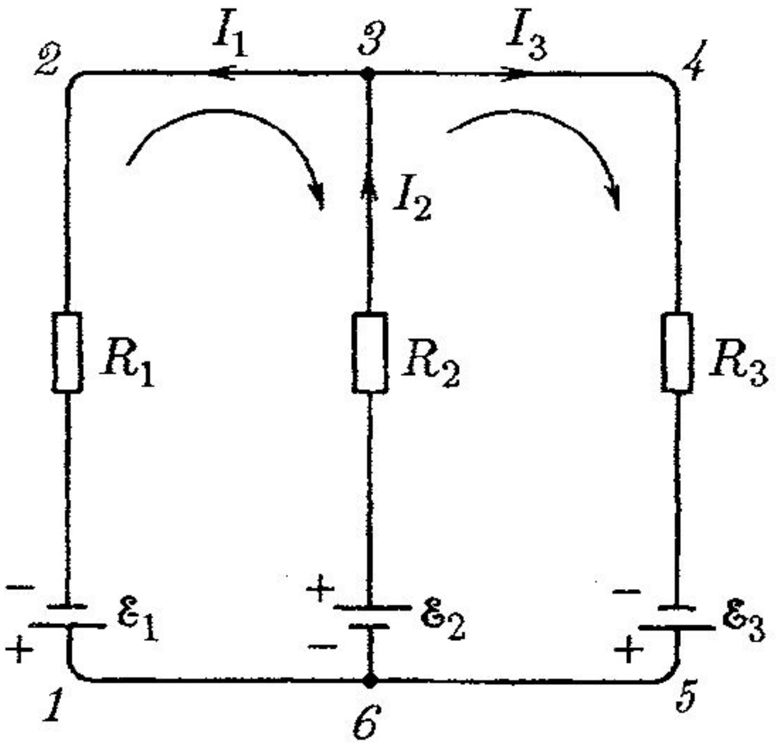
- Зададим направление обхода (например по часовой стрелке)
- Применим к каждому из неразветвленных участков закон Ома

$$I_1R_1 = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathrm{E}_1, \quad I_2R_2 = \varphi_2 - \varphi_3 + \mathrm{E}_2$$
$$I_3R_3 = \varphi_3 - \varphi_4 + \mathrm{E}_3, \quad I_4R_4 = \varphi_4 - \varphi_1 + \mathrm{E}_4$$

- При сложении этих выражений потенциалы взаимно уничтожаются и получается уравнение (5.24)

Разветвленные цепи. Правило Кирхгофа.

$$\sum I_k R_k = \sum \mathrm{E}_k \qquad (5.24)$$

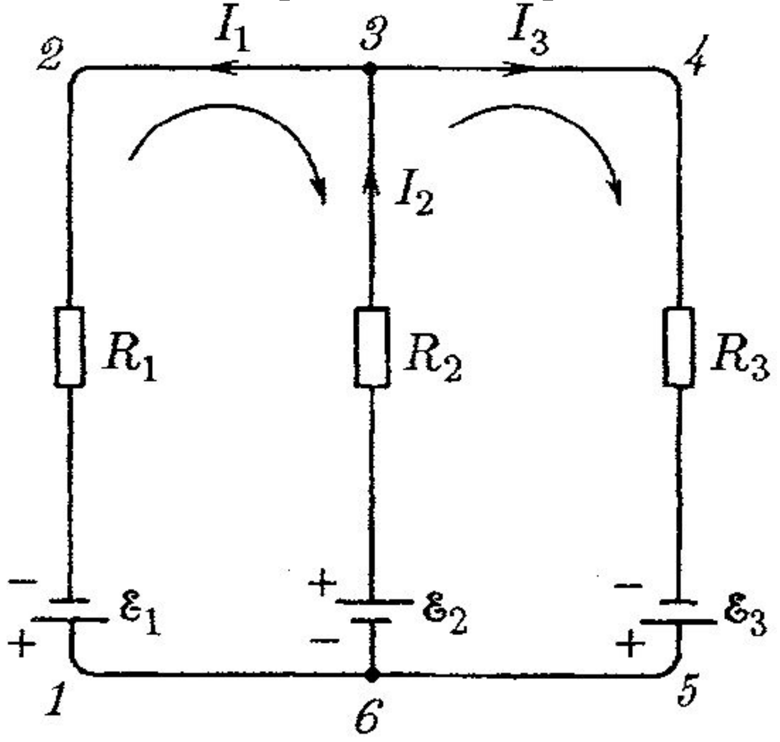


- Уравнение (5.24) выражает второе правило Кирхгофа
- Это уравнение можно составить для всех замкнутых контуров
- Однако независимыми будут уравнения тех контуров, которые нельзя получить наложением других контуров один на другой.
- Для данной цепи можно составить три уравнения

1 – для контура 1-2-3-6-1, 2- для контура 3-4-5-6-3,

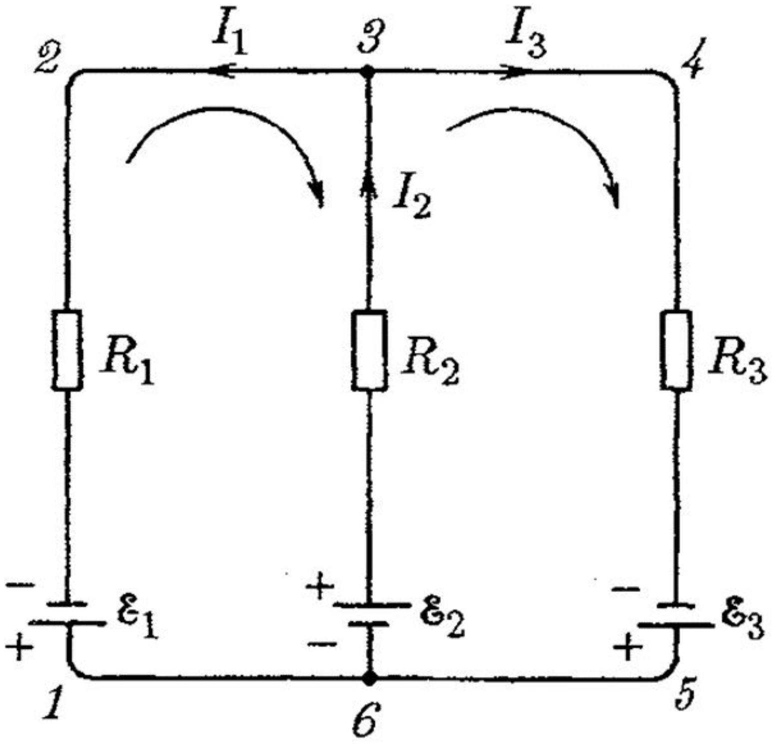
3 – для контура 1-2-3-4-5-6-1

Разветвленные цепи. Правило Кирхгофа.



- Последний контур получается наложением первых двух, поэтому уравнения не будут независимыми.
- В качестве независимых можно взять любые два уравнения из трех.
- При составлении уравнений второго правила Кирхгофа токам и ЭДС нужно приписывать знаки в соответствии с выбранным направлением обхода.
- Ток I_1 и его нужно считать отрицательным, так как он течет навстречу направлению обхода
- ЭДС E_1 также нужно считать отрицательной, так как она действует против направления обхода

Разветвленные цепи. Правило Кирхгофа.



- Направления обхода в каждом из контуров можно выбирать произвольно и независимо от направлений в других контурах
- При этом может быть, что один и тот же ток или ЭДС войдут в разные уравнения с разными знаками
- Следует помнить что через любое сечение неразветвленного участка цепи течет один и тот же ток
- Например от точки 6 до источника тока 2 течет такой же ток как от источника 2 до точки 3

Разветвленные цепи. Правило Кирхгофа.

- Число независимых уравнений, составленных в соответствии с первым и вторым правилами Кирхгофа, оказывается равным числу различных токов, текущих в разветвленной цепи.
- Поэтому, если заданы ЭДС и сопротивления для всех неразветвленных участков, то могут быть вычислены все токи.
- Можно найти ЭДС, которые нужно включить в каждый из участков цепи, что получить при заданных сопротивлениях нужные токи.

Мощность тока

- Рассмотрим произвольный участок цепи постоянного тока, к концам которого приложено напряжение U
- За время t через каждое сечение проводника проходит заряд $q=It$
- Это равносильно тому, что заряд It переносится за время t из одного конца проводника в другой
- При этом силы электростатического поля и сторонние силы, действующие на данном участке, совершают работу

$$A = Uq = UIt \qquad (5.25)$$

Мощность тока

- Разделив работу A на время t, за которое она совершается, получим мощность, развиваемую током на данном участке

$$P = UI = (\varphi_1 - \varphi_2) I + \mathcal{E}_{12} I \qquad (5.26)$$

- Эта мощность может расходоваться на нагрев, на протекание химических реакций, на перемещение внешних тел и т.д.
- Отношение мощности ΔP, развиваемой током в объеме проводника ΔV, к этому объему называется удельной мощностью тока $P_{уд}$, отвечающей данной точке проводника.

$$P_{уд} = \frac{\Delta P}{\Delta V} \qquad (5.27)$$

- Удельная мощность есть мощность, развиваемая в единице объема проводника.

Закон Джоуля-Ленца

- Если проводник неподвижен и химических реакций в нем не протекает, работа тока затрачивается на увеличение внутренней энергии проводника, в результате чего проводник нагревается.
- Принято говорить, что при протекании тока в проводнике выделяется теплота $Q = UIt$
- Выразив U через RI, получим формулу $Q = RI^2 t$ (5.28)
- Это соотношение было установлено экспериментально Джоулем и Ленцем независимо и названо законом Джоуля-Ленца

Закон Джоуля-Ленца

- Если сила тока изменяется во времени, то количество теплоты, выделяющееся за время t, вычисляется по формуле

$$Q = \int_0^t RI^2 dt \qquad (5.29)$$

- От вычисления выделяемой теплоты во всем проводнике можно перейти к выражению, характеризующих выделение теплоты в различных местах проводника
- Для этого выделим в проводнике элементарный объем в виде цилиндра.

Закон Джоуля-Ленца

- Согласно закону Джоуля-Ленца за время dt в этом объеме выделится теплота

$$dQ = RI^2 dt = \frac{\rho dl}{dS}\left(jdS\right)^2 dt = \rho j^2\, dV\, dt \qquad (5.30)$$

- Разделив это выражение на dV и dt, получим количество теплоты, выделяющееся в единице объема в единицу времени

$$Q_{уд} = \rho j^2 \qquad (5.31)$$

- Величина $Q_{уд}$ называется удельной тепловой мощностью тока
- Выражения (5.29) и (5.31) справедливы и для неоднородного участка цепи, при условии, что действующие в нем