

Министерство народного образования БССР
Минский ордена Трудового Красного Знамени государственный
педагогический институт имени А.М. Горького

ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ
ПО КУРСУ "ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ"
Методические рекомендации

Минск 1989

Печатается по решению редакционно-издательского совета МГУ
имени А.М.Горького

Составитель: Т.Ю.Герасимова

Рецензенты: кафедра общей физики Могилевского пединститута им. А.А.
Кулешова; профессор Китунович Ф.Г.

В пособии содержится 28 конспектов-схем, которые составлены в
соответствии с программой по курсу "Электричество и магнетизм".

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯДОВ

ФАЛЕС
7 в. до н.э.

ГИЛЬБЕРТ
XVI в.

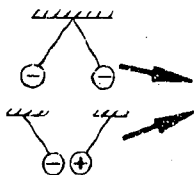
ДЖ.ТОМСОН
XIX в.

РЕЗЕРФОРД
XX в.

ЭЛЕКТРОСТАТИКА – раздел учения об электричестве, в котором изучают взаимодействие и свойства неподвижных зарядов.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД – это физическая величина, определяющая интенсивность электромагнитных взаимодействий.

ОПЫТНЫЕ ДАННЫЕ О ЗАРЯДАХ :



1. два вида – положительные и отрицательные
2. одноименные отталкиваются, разноименные притягиваются
3. существует наименьший заряд – элементарный
4. заряд тела $q = \pm N e$

Носители электрических зарядов – элементарные частицы – протоны и электроны

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

СПОСОБЫ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ – ?

$$\sum_{i=1}^n q_i = const$$

В замкнутой системе алгебраическая сумма зарядов всех частиц остается постоянной.

НЕПРЕРЫВНО РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ЗАРЯД

1. **ЛИНЕЙНАЯ** плотность электрического заряда

$$\lambda = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta l}$$

$$[\lambda] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}}$$

2. **ПОВЕРХНОСТНАЯ** плотность электрического заряда

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta S}$$

$$[\sigma] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$$

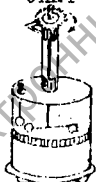
3. **ОБЪЕМНАЯ** плотность электрического заряда

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V}$$

$$[\rho] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^3}$$

ТОЧЕЧНЫЙ ЗАРЯД – ?

ОПЫТ



ЗАКОН КУЛОНА

1785 г.

Сила взаимодействия двух точечных зарядов прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Силы взаимодействия равны и направлены в противоположные стороны по прямой, соединяющей эти заряды.

$$[q] = \text{Кл} = \text{А} \cdot \text{с}$$

$$F_0 = \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{4\pi \epsilon_0 r^2}$$

$$\epsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

$\epsilon = \frac{F}{F_0}$ – диэлектрическая проницаемость вещества

$$F = \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{4\pi \epsilon \epsilon_0 r^2}$$

диэлектрическая постоянная

ЦЕНТРАЛЬНЫЕ СИЛЫ

НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

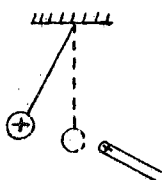
М. ФАРАДЕЙ

XIX век

Д. МАКСВЕЛЛ

*теория Максвелла
действительна*

Взаимодействие осуществляется посредством электростатического поля.



ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ :

1. создается только неподвижными зарядами
2. материально
3. действует на заряженные тела
4. подчиняется принципу суперпозиции

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$

принцип суперпозиции

Напряженность электрического поля точечных зарядов равна векторной сумме напряженностей электрических полей, создаваемых каждым из этих зарядов в отдельности

ПРИБЫВШИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД - ?

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{пр}}$$

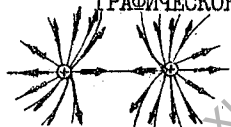
Напряженность численно равна силе, с которой электрическое поле действует на единичный положительный точечный заряд, помещенный в данную точку поля, и направлена в сторону действия силы.

$$\vec{E} \parallel \vec{F}$$

$$E = I \frac{q}{Kt} = I \frac{q}{M}$$

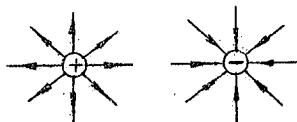
сила характеристика и

ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПОЛЕЙ

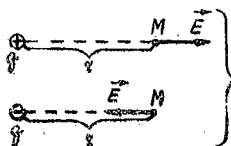


Линии напряженности - линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с вектором напряженности в этой точке.

1. непрерывны и не пересекаются
2. не замкнуты, начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных
3. по густоте линий судят о величине напряженности

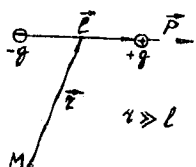


ПОЛЕ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА



$$E = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q}{r^2} \vec{r}$$

ДИПОЛЬ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

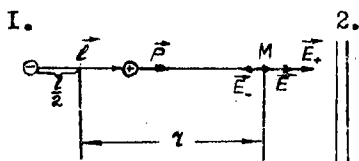


ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ДИПОЛЕМ называется система равных по величине, но противоположных по знаку двух точечных зарядов $+q$ и $-q$, находящихся на малом расстоянии l друг от друга.

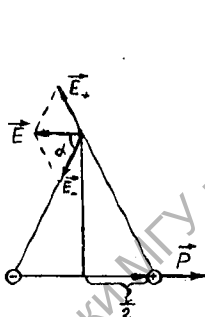
$$\vec{p} = q \cdot \vec{l} \quad \text{момент диполя} \quad [p] = \text{Кл} \cdot \text{м}$$

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОЛЯ ДИПОЛЯ

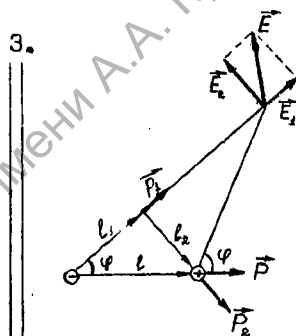
$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$$



$$\vec{E} = \frac{2\vec{p}}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^3}$$

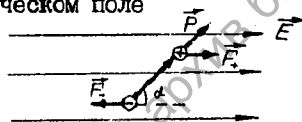


$$\vec{E} = -\frac{\vec{p}}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^3}$$



$$\vec{E} = \frac{\vec{p}}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^3} \sqrt{1+3\cos^2\varphi}$$

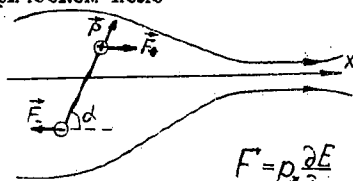
1. Диполь в однородном электрическом поле



$$\vec{M} = [\vec{p}, \vec{E}]$$

Диполь в поле поворачивается

2. Диполь в неоднородном электрическом поле



$$F = p \cdot \frac{\partial E}{\partial x}$$

Диполь не только поворачивается в поле, но и втягивается в область более сильного поля (угол α - острый), либо выталкивается из неё (угол α - тупой)

ТЕОРЕМА ОСТРОГРАДСКОГО - ГАУССА

ПОТОК вектора

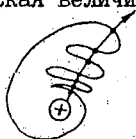
$$\Phi = \oint_S \vec{E} d\vec{S}$$

По густоте линий напряженности судят о величине напряженности.

$E_n dS$ - число линий, пронизывающих площадку dS .

Поток вектора Φ - алгебраическая величина

Для точечного положительного заряда



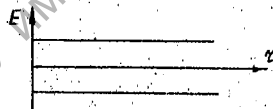
$$\oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon \epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i$$

Поток вектора \vec{E} электрического поля через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, заключенных внутри этой поверхности, деленной на $\epsilon \epsilon_0$.

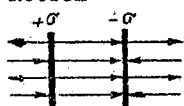
1. Поле бесконечно однородно заряженной плоскости



$$E = \frac{\sigma}{2 \epsilon \epsilon_0}$$



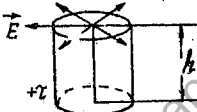
2. Поле двух равномерно и разноименно заряженных бесконечных плоскостей



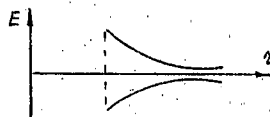
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0}$$



3. Поле бесконечно заряженной проволоки



$$E = \frac{\tau}{2 \pi \epsilon \epsilon_0 r^2}$$

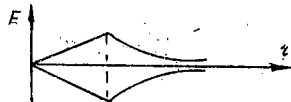


4. Поле равномерно заряженного шара

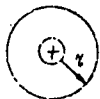


1) $r \geq R$ $E = \frac{q}{4 \pi \epsilon \epsilon_0 r^2}$

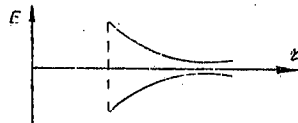
2) $r < R$ $E = \frac{\rho r}{3 \epsilon \epsilon_0}$



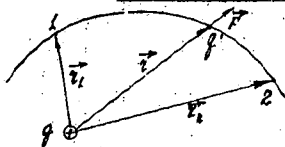
5. Поле равномерно заряженной сферы



$$E = \frac{q}{4 \pi \epsilon \epsilon_0 r^2}$$



РАБОТА СИЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ПОТЕНЦИАЛ



$$A = \frac{q q'}{4\pi \epsilon_0} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)$$

1. Работа сил отталкивания одноименных зарядов положительна, если заряды удаляются, и наоборот.
2. Работа не зависит от формы пути, а зависит от начального и конечного положений заряда
3. Работа по замкнутой траектории равна нулю.

$\oint \vec{E}_e dl = 0$ циркуляция вектора напряженности \vec{E} по замкнутому контуру L .

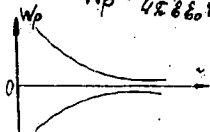
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИЛЫ - КОНСЕРВАТИВНЫ

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ - ПОТЕНЦИАЛЬНО



$\Delta_{12} = -\Delta W_p$ Работа - мера изменения потенциальной энергии в электрическом поле

$W_p = \frac{q q'}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_0 r}$ - потенциальная энергия электрического заряда



ПОТЕНЦИАЛ - энергетическая характеристика электростатического поля

$\varphi = \frac{W_p}{q'} ; \quad \varphi = \frac{W_p}{q} ; \quad [\varphi] = \text{В}$

потенциал точечного заряда

РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ

$$\varphi = \frac{q}{4\pi \epsilon \epsilon_0 r}$$

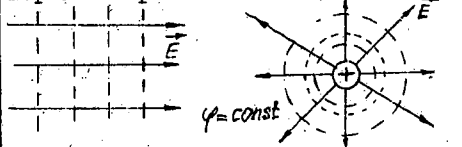
$$\Delta \varphi = \frac{U}{q} \quad [\Delta \varphi] = \text{В}$$

СВЯЗЬ E с φ

$$\vec{E} = -\frac{d\varphi}{dr} ; \quad \vec{E} = -\text{grad } \varphi = -\nabla \varphi$$

Напряженность поля измеряется уменьшением потенциала, приходящимся на единицу длины вдоль линии напряженности

ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ - поверхности равного потенциала



1. Потенциал поля диполя

$$\varphi = \frac{p \cos \alpha}{4\pi \epsilon_0 r^2}$$

3. Потенциал поля заряженной сферы



1) $r > R \quad \varphi_1 - \varphi_2 = \Delta \varphi = \frac{q}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$

2) $r = R \quad \varphi = \frac{q}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_0 R}$

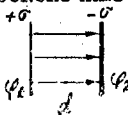
3) $r < R \quad \varphi_1 = \varphi_2$

2. Равномерно заряженная бесконечная плоскость



$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0 \epsilon_0} (x_2 - x_1)$$

4. Две разноименные заряженные бесконечные плоскости



$$\varphi_1 - \varphi_2 = E d$$

$$E = \frac{\Delta \varphi}{d}$$

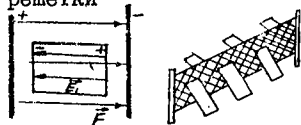
П Р О В О Д Н И К И В Э Л Е К Т Р И Ч Е С К О М П О Л Е

П Р О В О Д Н И К И

В отсутствии поля ионы колеблются в узлах кристаллической решетки

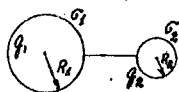
Обладают свободными носителями зарядов

Свободные электроны движутся хаотически



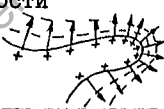
Электростатическая защита

1. Заряд распределяется на поверхности проводника
2. Напряженность поля внутри проводника равна нулю
3. Поверхность и объем проводника - эквипотенциальны
4. На поверхности проводника напряженность перпендикулярна поверхности
5. Плотность распределения заряда зависит от кривизны поверхности



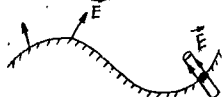
$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

$$\frac{q_1}{C_1} = \frac{R_2}{R_1}$$

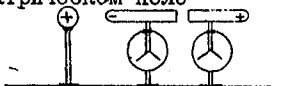


Напряженность поля вблизи поверхности проводника

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ИНДУКЦИЯ - перераспределение свободных зарядов в проводнике, находящемся в электрическом поле

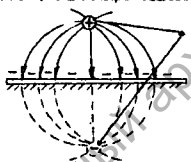


$$E = \frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0}$$



М Е Т О Д З Е Р К А Л Ь Н О Г О О Т О Б Р А Ж Е Н И Я

Эквипотенциальная поверхность - ?



Электрическое поле между точечным зарядом и бесконечной проводящей плоскостью совпадает с полем, создаваемым рассматриваемым зарядом и его зеркальным отображением в проводящей плоскости.

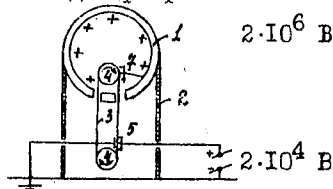
Э Л Е К Т Р О С Т А Т И Ч Е С К И Й Г Е Н Е Р А Т О Р В А Н - д е - Г Р А А Ф А

Условия равновесия зарядов на проводнике

Схема опыта



1929 г. Ван-де-Графф



ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ ПРОВОДНИКОВ

$C = \frac{q}{\varphi}$ ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ проводника численно равна заряду, при сообщении которого проводнику, его потенциал увеличивается на единицу. $[C] = \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = \Phi$

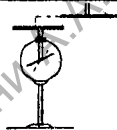
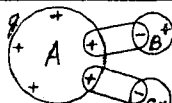
I Ф - ?

C — не зависит — рода материала, массы, заряда проводника
 — зависит — размеров, формы проводника, электрических свойств среды

Электроемкость шара $C = 4\pi \epsilon \epsilon_0 R$

$C_3 = 640 \mu\Phi$

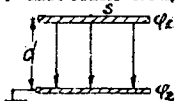
Конденсатор — два проводника, разделенные слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводника



$$C = \frac{q}{\varphi_2 - \varphi_1}$$

Типы конденсаторов:

1. Плоский конденсатор



$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

2. Сферический конденсатор



$$C = 4\pi \epsilon \epsilon_0 \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$

1) $R_2 \gg R_1 \Rightarrow C = 4\pi \epsilon \epsilon_0 R_1$

2) $R_2 - R_1 = d \ll R_1; R_2 \approx R_1$

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

3. Цилиндрический конденсатор



$$C = \frac{2\pi \epsilon \epsilon_0 h}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$

ПРОБИВНОЕ напряжение равно разности потенциалов между его обкладками, при которой может произойти пробой диэлектрика.

ПРЕДЕЛЬНОЕ напряжение U_{max} равно разности потенциалов, которую можно прикладывать к обкладкам конденсатора, не опасаясь его пробоя.

Условные обозначения:



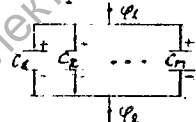
постоянной емкости



переменной емкости

С О Е Д И Н Е Н И Е конденсаторов :

параллельное



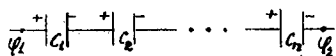
$$\varphi_1 - \varphi_2 = U$$

$$U = const$$

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$$

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

последовательное



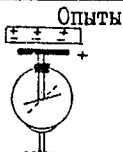
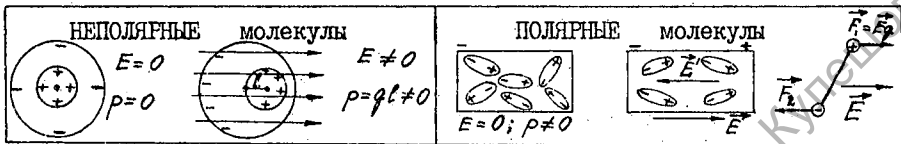
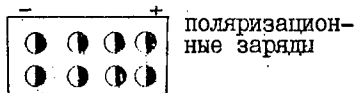
$$q_1 = q_2 = \dots = q_n$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

ДИЭЛЕКТРИКИ - ?

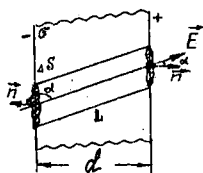
- Отсутствуют свободные носители зарядов
 а/ валентные электроны связаны с ядрами
 б/ молекулы электрически нейтральны



1. Поляризованный заряд сосредоточен на поверхности

Смещение положительных и отрицательных связанных зарядов диэлектрика в противоположные стороны - **ПОЛЯРИЗАЦИЯ**

Электрический момент - ?



Вектор поляризации - физическая величина, численно равная электрическому моменту единицы объема диэлектрика

$$[\mathcal{P}] = \text{Кл} \cdot \text{м}^{-2} \quad \vec{\mathcal{P}} = \alpha \epsilon_0 \vec{E}$$

α - диэлектрическая восприимчивость

$\sigma' = \mathcal{P}_n$ Поверхностная плотность поляризованных зарядов равна нормальной составляющей вектора поляризации в данной точке поверхности



$$E = \frac{\sigma - \sigma'}{\epsilon_0}$$

Вектор электрического смещения или электрической индукции

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{\mathcal{P}} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$$

$\epsilon = \frac{E_0}{E}$ показывает во сколько раз электрическое поле внутри диэлектрика меньше, чем в вакууме

$$[\vec{D}] = \text{Кл} \cdot \text{м}^{-2}$$

\vec{D} в диэлектрике совпадает с \vec{D}_0 в вакууме
 $\vec{D} = -\vec{D}_0$

Теорема Остроградского-Гаусса

$$\oint \vec{D}_n dS = \sum_{i=1}^n q_i$$

Поток вектора электрического смещения через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности свободных зарядов.

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ


ЭЛЕКТРЕТЫ

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

ЭНЕРГИЯ И ПЛОТНОСТЬ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Энергия зависит от состояния системы

1. Для системы точечных зарядов:



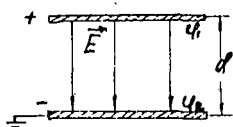
$$W = \frac{1}{2} (q_1 \varphi_{12} + q_2 \varphi_{21})$$

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \varphi_i$$

2. Для заряженного проводника

$$W = \rho \quad W = \frac{q^2}{2C} = \frac{q\varphi}{2} = \frac{C\varphi^2}{2}$$

3. Энергия заряженного конденсатора

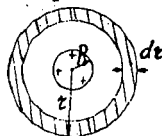


$$W = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2 V}{2}$$

$$w = \frac{W}{V} \quad \text{плотность энергии}$$

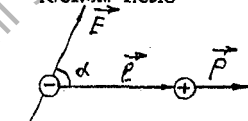
$$w = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} \quad [w] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$$

4. Заряженный шар радиуса



$$W = \frac{q^2}{2C}$$

5. Диполь во внешнем электрическом поле



$$W = -\vec{p} \cdot \vec{E}$$

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Электрический ток – упорядоченное движение электрических зарядов

Х А Р А К Т Е Р И С Т И К И

скалярная

сила тока $\gamma = \frac{q}{t}; \quad \gamma = \frac{dq}{dt}$

$\gamma = \frac{dq^+}{dt} + \frac{dq^-}{dt}$

$\gamma = I \text{ А}$

векторная

плотность тока $j = \frac{\gamma}{S} \quad [j] = \frac{A}{m^2}$

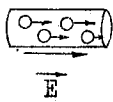
$j \parallel \vec{v}$ $j = n^+ v^+ e^+ + n^- v^- e^-$

I А – сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным бесконечно длинным проводникам ничтожно малой площади поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии I метра друг от друга вызвал бы на каждый метр длины проводника силу взаимодействия $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

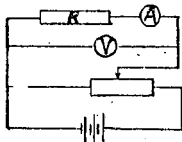
УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ ТОКА

1. Наличие свободных заряженных частиц
2. Стационарное электрическое поле
3. Замкнутая цепь

Если распределение зарядов вдоль проводника с течением времени не изменяется – стационарное электрическое поле.

ПОЛЕ	ИСТОЧНИК	E внутри проводника	Направление линий напряженности вне проводника	φ	Магнитное поле
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ	Неподвижные заряды	$E = 0$	Перпендикулярны к поверхности проводника	во всех точках проводника $\Delta\varphi = 0$	НЕ возникает
СТАЦИОНАРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ	Движущиеся заряды	$E \neq 0$ 	Не перпендикулярны к поверхности проводника	между точками проводника $\Delta\varphi \neq 0$	Возникает

ЗАКОН ОМА



ГЕОРГ ОМ 1827 г.

$\sigma = \frac{U}{R}$ При постоянной температуре отношение напряжения на концах проводника к току в нем является постоянной величиной.

СОПРОТИВЛЕНИЕ характеризует свойство проводника уменьшать скорость упорядоченного движения свободных зарядов.

$[R] = \text{Ом}$
Ом - ?

Сопротивление обуславливает превращение электрической энергии во внутреннюю энергию проводника

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

$$R = R_0(1 + \alpha t)$$

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$$

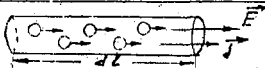
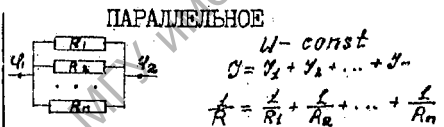
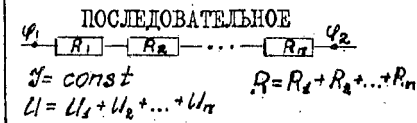
$$\sigma = \frac{1}{R} \quad [\sigma] = \text{Сим}$$

Сверхпроводимость
Камерлинг-Оннес
1911 г.



проводимость проводника

СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ:

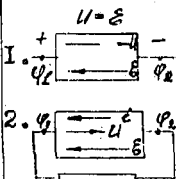


Закон Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

ИСТОЧНИКИ ТОКА

условное обозначение $\leftarrow | \rightarrow$



Внутреннее сопротивление r

ЭДС $-\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}$

Сторонние силы
численно равна работе сторонних сил, отнесенных к единице положительного заряда

$$[\mathcal{E}] = \text{В}$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{J} R + \mathcal{J} r$$

1. На внутреннем участке цепи за счет сторонних сил происходит разделение зарядов и создается электрическое поле.
2. На внешнем участке цепи под действием электрического поля свободные заряды приходят в движение и энергия превращается в другие виды энергии.

ЗАКОН ОМА

неоднородный участок

дифференциальная форма

$$j = \frac{\mathcal{E}_{ст} + (\varphi_1 - \varphi_2)}{R}$$

$$\vec{j} = \sigma (\vec{E}_{ст} + \vec{E}_\kappa)$$

ПЕРЕМЕЩАЕТСЯ ЗАРЯД

действуют силы

сторонние кулоновские

совершают работу

$$A_{ст} = \mathcal{J} q \quad A_{\kappa} = 0$$

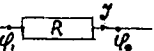
РАБОТА И МОЩНОСТЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

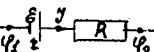
Заряды движутся под действием сил стационарного электрического поля

→ совершает работу

→ Работа электрического тока

РАБОТА

1.  $A = JUt = J^2 R t = \frac{U^2}{R} t$

2.  $A = J^2 R_{\text{вн}} t$
 $R_{\text{вн}} = R + r$

3.  $A = J \mathcal{E} t$

К.П.Д.

$$\eta = \frac{P_{\text{вн}}}{P_{\text{полн}}} = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{R}{R+r}$$

МОЩНОСТЬ

Мощность - это физическая величина, численно равная работе электрического тока, совершенной за единицу времени.

$$P = \frac{A}{t} = J U = J^2 R = \frac{U^2}{R} \quad [P] = \text{Вт}$$

$J \mathcal{E}$ - мощность, развиваемая источником;

$J^2 R$ - мощность, выделяемая во внешней цепи;

$J^2 r$ - мощность, выделяемая во внутренней цепи.

ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА

ОПЫТ:

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

$$[Q] = [A] = \text{Дж}$$

дифференциальная форма записи:

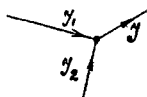
$$\omega = \frac{dQ}{dV \cdot dt} \quad \begin{matrix} \text{удельная} \\ \text{мощность тока} \end{matrix}$$

$$\omega = \sigma E^2$$

ПРАВИЛА КИРХГОФА

Узел - ?

ветвь - ? контур - ?

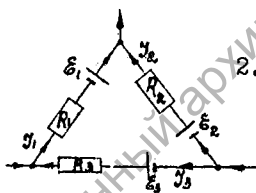


1. В каждой точке разветвления проводов алгебраическая сумма токов равна нулю. Токи, идущие к точке разветвления, и токи, исходящие из неё, следует считать величинами разных знаков.

$$\sum_{n=1}^n J_n = 0$$

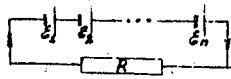
2. Алгебраическая сумма электродвижущих сил, действующих в контуре, равна алгебраической сумме произведений сил токов в отдельных участках этого контура на их сопротивления, включая и внутреннее.

$$\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i = \sum_{k=1}^m J_k (R_k + r_k)$$



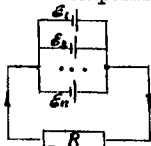
СОЕДИНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ

последовательное



$$J = \frac{n \mathcal{E}_1}{R + n r_1}$$

параллельное



$$J = \frac{\mathcal{E}_1}{R + \frac{r}{n}}$$

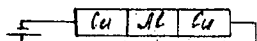
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Электрический ток - ?

1901 г. РИККЕ

1913 г. МАНДЕЛЬШТАМ Л.И.

1916 г. ТОЛМЕН

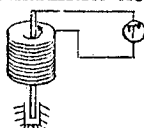


$$t = 1 \text{ год}, \pm 0,03 \cdot 10^{-3} \text{ г}$$

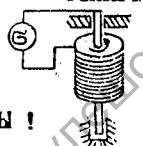
$$\rho = 3,5 \cdot 10^6 \text{ Кл}$$

НЕ ИОНЫ !

ПАПАЛЕКСИ Н.Л.



СТЮАРТ



ЭЛЕКТРОНЫ !

ДРУДЕ 1900 г.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕОРИИ :

1. Совокупность свободных электронов в металле можно рассматривать как электронный газ
2. Электронный газ подчиняется законам классической механики (законы Ньютона)
3. Электронный газ подчиняется законам идеального газа
4. Электронный газ подчиняется закону равномерного распределения энергии по степеням свободы, согласно которому средняя кинетическая энергия теплового движения, приходящаяся на каждую степень свободы равна $\frac{1}{2} kT$.

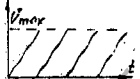
ЗАКОН ОМА

σ

ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА

ВИДЕМАН и ФРАНЦ, 1853

$$j = \frac{ne^2 \lambda E}{m \nu \tau} = \sigma E$$



$$Q = \frac{ne^2 \lambda E^2}{2m \nu \tau} = \sigma E^2$$

$$\frac{\alpha}{\sigma} = cT; \quad c = 3 \left(\frac{k}{e} \right)^2$$

c - постоянная Видемана-Франца

Загрязнения классической электронной теории металлов

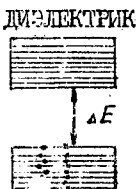
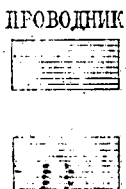
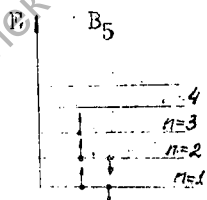
1. Температурная зависимость Сверхпроводимость
2. Теплоемкость металлов
3. Не соответствие в законе Видемана Франца

ПОНЯТИЕ О ЗОННОЙ ТЕОРИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Уровни энергии

Принцип запрета ПАУЛИ

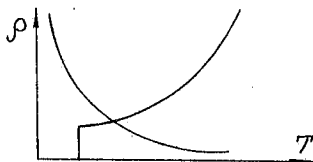
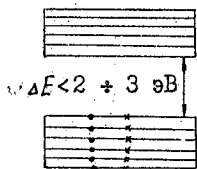
В любой квантовой системе (атоме, молекуле, кристалле) на каждом энергетическом уровне может находиться не более двух электронов с разными собственными (спиновыми) моментами (противоположные направления).



Зона проводимости
Запрещенная зона
Валентная зона

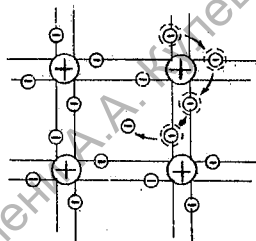
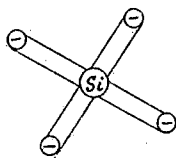
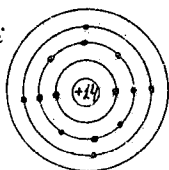
ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Зона проводимости
Запрещенная зона
Валентная зона



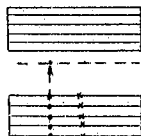
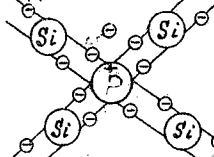
СОБСТВЕННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

Si



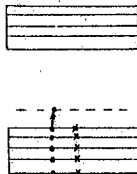
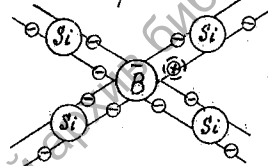
ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

1. полупроводник n-типа

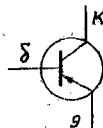
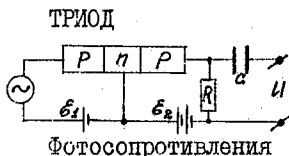


Зона проводимости
Донорные уровни
Валентная зона

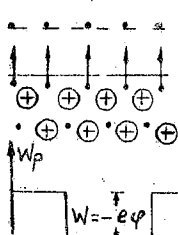
2. полупроводник p-типа



Зона проводимости
Акцепторные уровни
Валентная зона



Т Е Р М О Э Л Е К Т Р О Н Н А Я Э М И С С И Я



Двойной слой электрических зарядов
 Поле подобно полю конденсатора
 $d \approx 10^{-10}$ м
 $\mathcal{E} = e\varphi_k = \Delta W_p$
 $[\mathcal{E}] = \text{эВ}$ эВ - ?

Разность потенциалов в этом слое - контактная разность потенциалов между металлом и вакуумом - $\Delta\varphi_k$.

Минимальная работа, которую должен совершить электрон за счет своей кинетической энергии, чтобы выйти из твердого или жидкого тела в вакуум, называется работой выхода.

Работа выхода **ЗАВИСИТ** рода и чистоты металла, температуры

Причины возникновения работы выхода - ?

1883 г. ЭДИСОН ВАКУУМ - ?

ВЫХОД СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ МЕТАЛЛА - ЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

ХОЛОДНАЯ

в электрическом поле большой напряженности

ВТОРИЧНАЯ

при бомбардировке металла предварительно ускоренными в электрическом поле электронами

ФОТОЭМИССИЯ

при освещении металла светом

ТЕРМОЭМИССИЯ

при нагревании металла

Э Л Е К Т Р О Н Н Ы Е Л А М П Ы

ДИОД

Обладает односторонней проводимостью и используется для выпрямления переменного тока

ТРИОД

Используется в качестве усилителя колебаний напряжения, поданного на сетку

КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МЕТАЛЛАХ И ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Контактная разность потенциалов

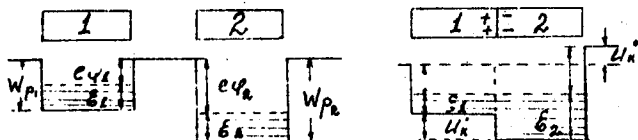
ВОЛЬТА

1797 г.

Закон

Вольты

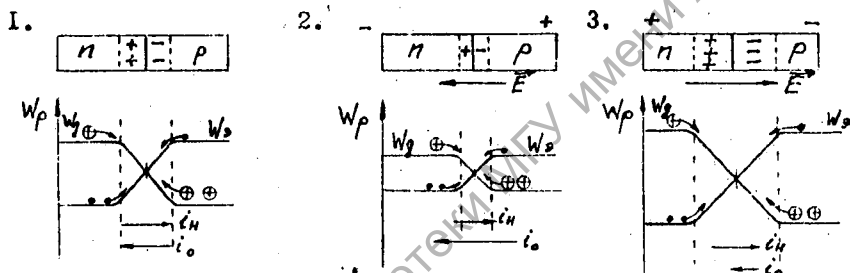
$$U_k = \frac{A_2 - A_1}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}$$



Внутренняя — контактная разность потенциалов
внешняя — контактная разность потенциалов

Причины возникновения контактной разности потенциалов — ?

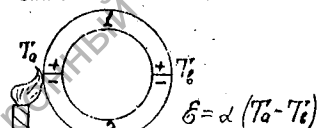
p-n - ПЕРЕХОД



- - электрон
- ⊕ - дырка

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

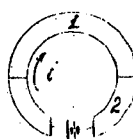
ЗЕЕБЕК, 1821 г.



термопары,
термостолбик

ПЕЛЬТЬЕ

1834 г.



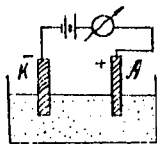
$$Q = \Pi_{12} \Delta T$$

$$\Pi_{12} = \alpha_{12} T$$

ТОМСОН

1856 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ

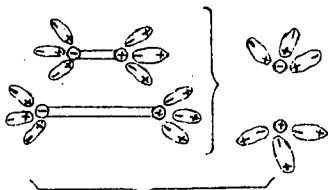


Проводники II рода - электролиты - растворы (расплавы) солей, кислот, щелочей

ЭЛЕКТРОЛИТ - ? ЭЛЕКТРОЛИЗ - ?

КЛАУЗИУС 1857 г.

АРРЕНИУС 1887 г.



Распад молекул на ионы под действием растворителя - электролитическая диссоциация



ПРИЧИНЫ :

1. Ослабление силы электрического взаимодействия между ионами
2. Тепловое движение молекул

СТЕПЕНЬ ДИССОЦИИАЦИИ
ЗАВИСИТ

природы растворителя и растворяемого вещества, концентрации раствора, температуры

ЗАКОН ОСТВАЛЬДА

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha} = \frac{A}{B} \cdot \frac{1}{n_0}$$

A - константа равновесия
 B (константа диссоциации)

1800 г. НИКОЛЬС, КАРЛЕЙЛЬ

1807 г. ДЭВИ

М. ФАРАДЕЙ

1833 - 1836 г.

I закон: $m = k q = k J t$

2 закон: $k = \frac{1}{F} \cdot \frac{q}{z}$

k - электрохимический эквивалент

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{q}{z} J t$$

число Фарадея

$F = 96487$ Кл/моль

Физический смысл k - ?

Физический смысл F - ?

Значение законов Фарадея в установлении дискретной природы электричества

$$e = \frac{F}{N_A} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

ЗАКОН ОМА ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Скорость движения иона

$$v = \frac{1}{\gamma} E$$

$$b = \frac{v}{E}$$

Подвижность иона

$$b = \frac{v}{E} = \text{const}$$

$$[b] = \frac{m^2}{Vs}$$

Закон Ома

$$j = \alpha n_0 q (b_+ + b_-) E = \sigma E$$

Физический смысл b - ?

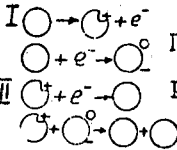
$$\sigma = \alpha n_0 q (b_+ + b_-) = \alpha c F (b_+ + b_-)$$

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ: гальванопластика, гальваностегия, электрометаллургия,

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

ВАКУУМ - ?

НЕТ свободных зарядов !!! необходим источник зарядов !



Процесс образования ионов - ионизация газа
 рекомбинация газа \longrightarrow ОДНОВРЕМЕННО

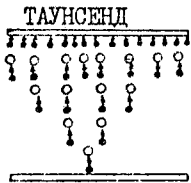
Работа ионизации $A_i = e\varphi_i$ энергия ионизации

НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД

Процесс прохождения электрического тока через газ называется газовым разрядом.

$$\alpha = \beta n^2 + \frac{j}{U}$$

САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД



•• - электрон
 ○ - нейтральный атом

Образование электронных лавин

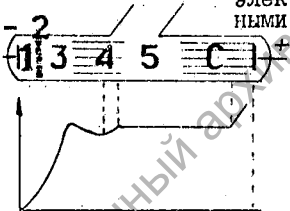
ИОНИЗАЦИЯ

ударная вторичная эмиссия фотоионизация

$$n_a = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

условие зажигания газового разряда

ГЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД - самостоятельный разряд, в котором катод испускает электроны вследствие бомбардировки его положительными ионами и фотонами, образующимися в газе.



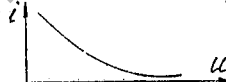
0,1 мм рт. ст.

1. анодное темное пространство
2. катодный слой
3. темное катодное пространство /кружково/
4. отрицательное глеющее пространство
5. фарадеево темное пространство
6. остов разряда (положительное свечение)

ПРИМЕНЕНИЕ - ?

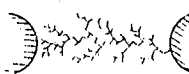
ДУГОВЫЙ РАЗРЯД

1802 г. В.В.Петров



ПЛАЗМА $\left\{ \begin{array}{l} \text{неизотермическая} \\ \text{изотермическая} \end{array} \right.$

ИСКРОВОЙ РАЗРЯД



Стример - сильно ионизированный канал

$$\frac{E_{сп}}{P} = const$$

КОРОННЫЙ РАЗРЯД

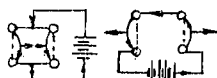
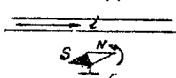
КАТОДНЫЕ ЛУЧИ - поток электронов, испускаемый катодом при очень низких давлениях

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

600 лет до н. э.

ЭРСТЕД 1819 г.

АМПЕР 1820 г.



Магнитное взаимодействие

Магнитное поле

1. Создается движущимися зарядами (током)
2. Действует на движущийся заряд (ток)

исследуется

пробным контуром с током

магнитной стрелкой



магнитный момент

$$P_m = IS$$

Напряженность

$$H = \frac{M}{\mu_0 P_m}; [H] = \frac{A}{M}$$

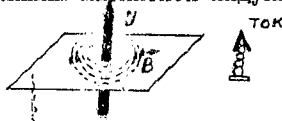
Магнитная индукция

$$B = \frac{M}{P_m} = \frac{M}{IS} \quad [B] = \frac{H}{A \cdot M} = Tл$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu H$$

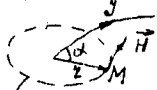
Линии магнитной индукции

Линии магнитной индукции - ЗАМКНУТЫ!



Магнитное поле - Вихревое!
Магнитных зарядов в природе НЕТ!

ЗАКОН БИО-САВАРА-ЛАПЛАСА

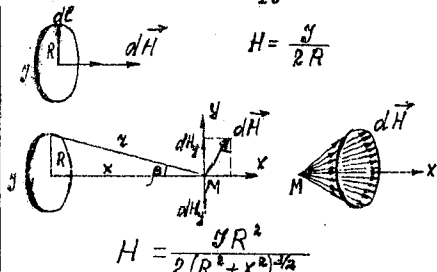
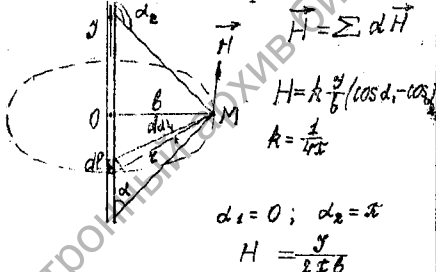


$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{I dl \times \vec{r}}{r^3}$$

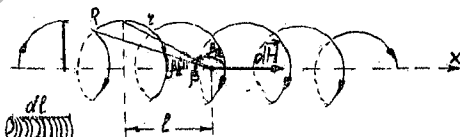
$$dB = \frac{\mu_0 \mu I dl \sin \alpha}{4\pi r^2}$$

1. Магнитное поле прямого тока

2. Магнитное поле кругового тока



3. Магнитное поле соленоидального тока



$$H = \frac{In}{2} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2)$$

$$\beta_1 = 0; \beta_2 = \pi \quad H = In$$

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Закон полного тока

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum_{n=1}^k I_n$$

Теорема Остроградского-Гаусса

$$\oint \vec{H}_n dS = 0$$

Сила Ампера

$d\vec{F} = j [d\vec{l}, \vec{B}]$ закон Ампера

$\frac{dF}{dl} = \frac{\mu_0 \mu_n}{4\pi} \cdot \frac{2 I_1 I_2}{r}$ для 2-х взаимодействующих токов

1. Параллельные токи одного направления притягиваются
2. Параллельные токи противоположных направлений отталкиваются
3. Непараллельные токи стремятся стать параллельными одного направления

К О Н Т У Р С Т О К О М

однородное магнитное поле

$M = [p_n, \vec{B}]$

неоднородное магнитное поле

Сила ЛОРЕНЦА $\vec{F}_L = q [\vec{v}, \vec{B}]$

Правило левой руки $\vec{F} = q (\vec{E} + [\vec{v}, \vec{B}])$

Определение удельного заряда электрона

Э Ф Ф Е К Т Х О Л Л А

1880 г.

Разность потенциалов $U_x = R v_j B$

Постоянная Холла $R = \frac{1}{en}$

Применение - ?

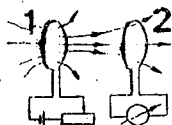
МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР - МГД - генератор



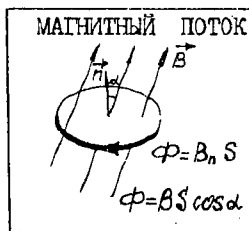
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

ФАРАДЕЙ 1831 г.

Опыты:



- Индукционный ток будет возникать, если
1. изменять сопротивление R ;
 2. приближать или удалять контур 2 к 1;
 3. поворачивать контур так, чтобы менялся угол между нормалью к контуру и направлением поля



При всяком изменении магнитного потока через площадь, ограниченную проводящим контуром, в нем возникает индукционный ток

1. Скалярная величина
2. численно равен полному числу линий магнитной индукции, проходящих через данную поверхность
3. знак зависит от знака $\cos \alpha$

НАПРАВЛЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО ТОКА \rightarrow ПРАВИЛО ЛЕНЦА !

Индукционный ток всегда направлен так, чтобы его магнитное поле противодействовало изменению магнитного потока, вызывающему этот ток.

ЗАКОН ФАРАДЕЯ :

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

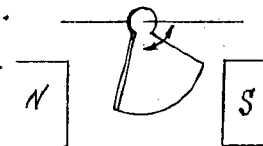
$\Phi = I \text{ Вб} = I \text{ В} \cdot \text{с}$

$\mathcal{E}_i > 0$, если $\Phi < 0$

$\mathcal{E}_i < 0$, если $\Phi > 0$

трансформатор бетатрон генератор тока

Замкнутые линии тока -
вихревые токи или
токи ФУКО



Возникает

1. торможение проводника
2. большие потери на джоулево тепло

Используют:

1. в индукционных печах - плавление металла в вакууме
2. прогрев металлических частей вакуумных установок для их обезгаживания

СКИН - ЭФФЕКТ

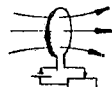
САМОИНДУКЦИЯ



ПОЧЕМУ ?

ТОК → МАГНИТНОЕ ПОЛЕ → МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Явление самоиндукции состоит в возникновении эдс индукции в контуре при всяком изменении тока в самом контуре



$$\Phi \sim B; B \sim I \rightarrow \Phi = LI \quad L = \frac{\Phi}{I} = \frac{1}{I} \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \text{Гн}$$

Направление тока самоиндукции - ПРАВИЛО ЛЕНЦА !

Физич. смысл: Индуктивность контура численно равна магнитному потоку через этот контур при силе тока в контуре, равной единице.

Индуктивность ЗАВИСИТ от размеров и формы контура, магнитных свойств среды

$$\mu = \frac{L}{L_0}$$

$$L = \mu \mu_0 n^2 V$$

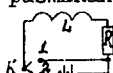
$$\mathcal{E}_s = - \frac{d\Phi}{dt} = - (L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt})$$

$$L = \text{const} \quad \mathcal{E}_s = -L \frac{di}{dt}$$

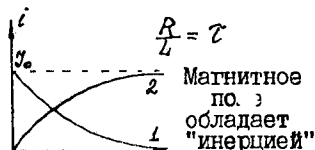
Индуктивность численно равна ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока на 1 А за 1 сек.

Ток самоиндукции при

1. размыкании цепи $iR + L \frac{di}{dt} = 0 \rightarrow i = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}$



2. при замыкании цепи $iR = \mathcal{E} - L \frac{di}{dt} \rightarrow i = I_0 (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$



ВЗАИМНАЯ ИНДУКЦИЯ

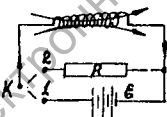
Явление взаимной индукции заключается в наведении ЭДС индукции во всех проводниках, находящихся вблизи цепи переменного тока

$$\mathcal{E}_{12} = -L_{12} \frac{di_2}{dt}$$

$$\mathcal{E}_{21} = -L_{21} \frac{di_1}{dt}$$

$$L_{12} = L_{21}$$

ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКОВ



При замыкании катушки на сопротивление без источника тока (положение 2) ток исчезая, совершает работу за счет энергии магнитного поля катушки.

Энергия магнитного поля локализована в окружающем проводник пространстве

$$W = \frac{L I^2}{2}$$

Собственная энергия магнитного поля токов

Объемная плотность энергии $w = \frac{\mu \mu_0 H^2}{2}$

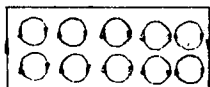
$$W = \frac{L_1 I_1^2}{2} + \frac{L_2 I_2^2}{2} + L_{12} I_1 I_2$$

Взаимная энергия магнитного поля двух токов

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Вещества, способные намагничиваться — **МАГНЕТИКИ**

Теория АМПЕРА



диамагнетики

$$\mu < 1, \alpha < 0$$

парамагнетики

$$\mu > 1, \alpha > 0$$

ферромагнетики

$$\mu \gg 1, \alpha \gg 0$$

Намагниченность

α — магнитная восприимчивость вещества, зависит от рода магнетика и его состояния

$$j = \frac{\Sigma \vec{p}_n}{V}$$

$$[j] = \frac{A}{M}$$

магнитный момент


$$\vec{p}_n = JS\vec{n}$$

Магнитная проницаемость вещества

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

$$j = \alpha H$$

$$\mu = 1 + \alpha$$



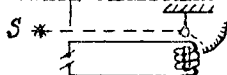
$$\frac{\vec{p}_n}{L} = -\frac{e}{2m}$$

Отношение магнитного момента элементарной частицы к её механическому моменту называется магнитомеханическим или гиромагнитным отношением.

Суть магнитомеханических явлений:

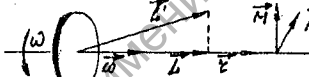
намагничивание приводит к вращению магнетика и, наоборот, вращение магнетика вызывает его намагничение

Опыты Эйнштейна и де Гааза



$$\frac{p_n}{L_s} = \frac{e}{m}$$

Опыты Барнетта 1915 г.



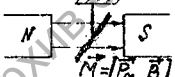
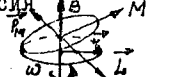
Спиновое движение электронов

Диамагнетизм

1905 г. ЛАНЖЕВЕН П.

Результирующая векторная сумма орбитальных и спиновых моментов электронов атома равна нулю

Ларморовская прецессия



$$\vec{B} \parallel \vec{B}_0; \vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'; \alpha < 0; \mu < 1;$$

Инертные газы, золото, цинк, смолы, вода, органические в-ва

Ферромагнетизм

Ферромагнетики способны обладать намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля.

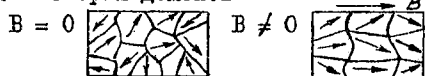
Только кристаллическое состояние

Железо, никель, гадолиний, их сплавы и соединения, а также некоторые сплавы и соединения марганца и хрома с неферромагнитными элементами

СВОЙСТВА:

1892 г. Б.Л.Розинг, 1907 г. Вейсс, 1928 г. Я.И.Френкель, Гейзенберг

1. теория доменов



$$\mu \gg 1; \alpha \gg 1; B' \gg B_0$$

2. Зависимость



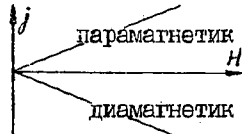
3. Зависимость



4. Гистерезис

Парамагнетизм

$$\vec{B} \parallel \vec{B}_0; \vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'; 0 < \alpha < 1$$



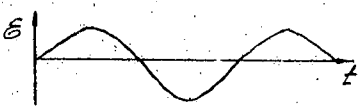
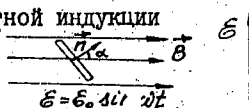
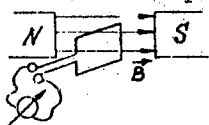
Хром, марганец и др. элементы В-ой группы периодической системы Менделеева, Na, K, т.д.

К В А З И С Т А Ц И О Н А Р Н Ы Е Т О К И

$$\tau = \frac{l}{c} \ll T$$

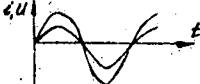
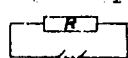
Ток называют квазистационарным, если длина проводника, по которому течет ток, значительно меньше длины электромагнитной волны.

Явление электромагнитной индукции



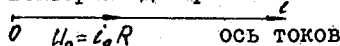
Переменный ток – ток, который изменяется по величине и направлению.

АКТИВНОЕ сопротивление в цепи переменного тока

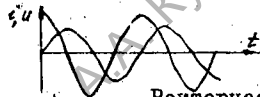
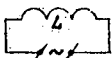


$$U = U_0 \sin \omega t$$

Векторная диаграмма



ИНДУКТИВНОСТЬ в цепи переменного тока

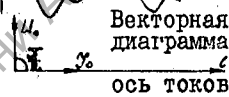


$$i = i_0 \sin \omega t$$

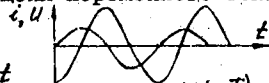
$$U = U_0 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$U_0 = \gamma_0 \omega L = \gamma X_L$$

$$X_L \sim \omega; X_L \sim L$$



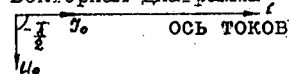
ЕМКОСТЬ в цепи переменного тока



$$i = i_0 \sin \omega t$$

$$U = U_0 \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

Векторная диаграмма

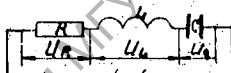


$$U_0 = \frac{I_0}{\omega C}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Напряжение на конденсаторе определяется зарядом конденсатора, который был получен за счет ранее протекавших колебаний тока

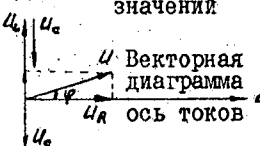
ЗАКОН ОМА



справедлив только для амплитудных значений

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$



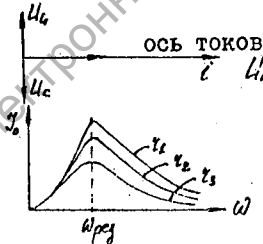
Общее сопротивление

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \rightarrow \text{tg } \varphi = 0; \varphi = 0$$

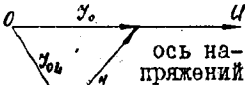
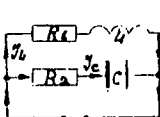
$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$



$$U_{0 \text{ рез}} = U_{\text{рез}} = \frac{U_0}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$R_1 < R_2 < R_3$$

РЕЗОНАНС ТОКОВ



Резонанс токов характерен тем, что сопротивление цепи оказывается чисто активным и имеет наибольшую, возможную при данных параметрах цепи, величину (при резонансе напряжений Z имеет наименьшую величину).

РАБОТА И МОЩНОСТЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Мощность

$$P = iU = \frac{1}{2} (U_m I_m \cos \varphi + U_m I_m \cos (2\omega t - \varphi))$$

Средняя мощность

$$P = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi$$

Действующее значение силы тока - это значение силы постоянного тока, при которой выделяется одинаковая мощность

$$P = \frac{I_m^2 R}{2} \rightarrow I_{\text{эф}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; U_{\text{эф}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

$$P = I_{\text{эф}} \cdot U_{\text{эф}} \cos \varphi$$

1. $X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \rightarrow Z = R; \cos \varphi = 1, \varphi = 0 \rightarrow P = I_{\text{эф}} \cdot U_{\text{эф}}$

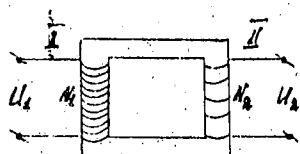
2. $R = 0, \cos \varphi = 0 \rightarrow P = 0$ реактивная мощность не выделяется

3. $\varphi = 90^\circ, \cos \varphi = 0 \rightarrow P = 0$

ТРАНСФОРМАТОР - устройство для преобразования напряжения и силы тока: повышения или понижения

П.Н.ЯБЛОЧКОВ

И.Ф.УСЫТИН



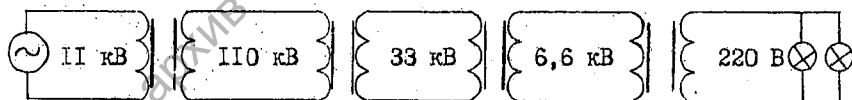
коэффициент трансформации k

$$k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

показывает, во сколько раз вторичное напряжение больше первичного в режиме холостого хода

АВТОТРАНСФОРМАТОР

Передача и распределение электроэнергии



Повышающая подстанция

Понижающая I подстанция

2-ая

3-ья

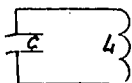
подстанции

САВАРИ

Б. ФЕДЦЕРСЕН

В. ТОМСОН

Колебание - ?



Колебательным контуром называется система, состоящая из последовательно соединенных конденсатора C , катушки индуктивности L и проводника с омическим сопротивлением R .

Электрические колебания, происходящие в колебательном контуре без воздействия внешних ЭДС - СОБСТВЕННЫЕ или СВОБОДНЫЕ электрические колебания

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$q = q_0 \cos(\omega t + \alpha)$$

собственная частота контура

Формула ТОМСОНА

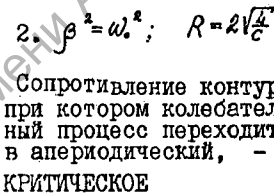
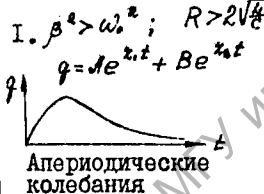
$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{q}{C} = 0$$

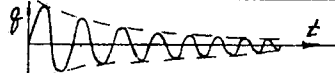
$$i + 2\beta i + \omega_0^2 q = 0$$

$$\frac{R}{L} = 2\beta; \quad \frac{1}{LC} = \omega_0^2$$



$1. \beta^2 < \omega_0^2;$ $q = q_m e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha)$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$$



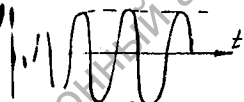
Период затухающих колебаний	Время затухания	Декремент затухания	Логарифмический декремент затухания	Добротность
$T' = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$	$\tau = \frac{1}{\beta}$	$\delta = e^{\beta T}$	$\lambda = \ln \delta = \beta T$	$Q = \frac{\omega_0}{\lambda} = \frac{\omega_0}{\beta} = \pi N$

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

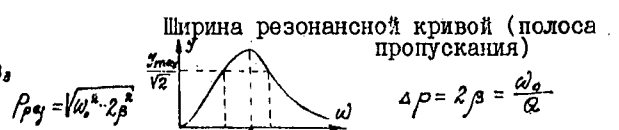
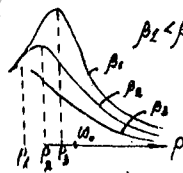
$$L \ddot{q} + R \dot{q} + \omega_0^2 q = \frac{U_m}{C} \cos pt$$

$$q_m = \frac{\frac{U_m}{C}}{\sqrt{(\omega_0^2 - p^2)^2 + 4\beta^2 p^2}} = \frac{U_m}{p\sqrt{R^2 + (\rho_0^2 - p^2)^2}}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{2\beta p}{\omega_0^2 - p^2} = \frac{R}{\rho_0^2 - p^2}$$



представляет величину отставания по фазе вынужденного колебания от обусловившей его вынуждающей силы.



Чем уже резонансная кривая, тем больше добротность \rightarrow выше чувствительность приемника

$$p_{рез} < \omega_0$$

колебания.



$\frac{d\Phi}{dt} > 0$ МАКСВЕЛЛ XIX век
Явление электромагнитной индукции

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ :

1. Линии напряженности разомкнуты: начинаются и оканчиваются на зарядах

$$2. \oint_L \vec{E}_e d\vec{l} = 0$$

Поле не может поддерживать замкнутое движение зарядов → не может привести к возникновению ЭДС

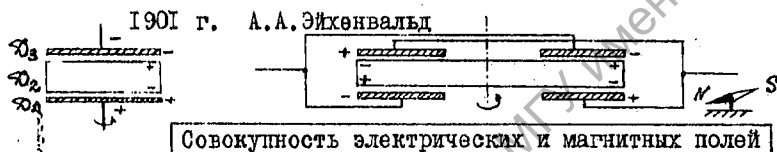
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ :

1. Линии напряженности непрерывны (замкнуты)

$$2. \oint_L \vec{E}^* d\vec{l} \neq 0 \text{ зависит от формы проводника}$$

Поле вызывает в проводнике движение электронов и приводит к возникновению ЭДС.

ВИХРЕВОЕ электрическое поле !



1901 г. А.А. Эйненвальд

Совокупность электрических и магнитных полей называется электромагнитным полем.

УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА :

1. выражает закон электромагнитной индукции

$$\oint_L \vec{E}_e d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$$

Циркуляция вектора напряженности электромагнитного поля по замкнутому контуру равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

2. устанавливает связь между током (электрическим полем) и порождающимся магнитным полем, является обобщением закона полного тока

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum I_{\text{полн}} \text{ или } \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum I_{\text{пр}} + \int_S \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right)_n d\vec{S}$$

3. выражает теорему Остроградского-Гаусса

$$\oint_S \vec{D}_n d\vec{S} = \int_V \rho dV$$

Поток электрической индукции \vec{D} через замкнутую поверхность равен полному заряду, замкнутому внутри этой поверхности

4. отражает тот факт, что линии магнитной индукции замкнуты

$$\oint_S \vec{B}_n d\vec{S} = 0$$

Поток вектора магнитной индукции через замкнутую поверхность равен нулю

Уравнения Максвелла в дифференциальной

1. $\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ форме

3. $\text{div } \vec{D} = \rho$

5. $\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$

2. $\text{rot } \vec{H} = \vec{j}_{\text{пр}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

4. $\text{div } \vec{B} = 0$

6. $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$

7. $\vec{j} = \sigma \vec{E}$

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Уравнения МАКСВЕЛЛА для плоской волны

$$\begin{aligned} -\frac{\partial H_x}{\partial y} &= \epsilon_0 \epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} \\ \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -\mu_0 \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \end{aligned}$$

Уравнения распространяющейся волны

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} &= \epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} &= \epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \end{aligned}$$

РЕШЕНИЯ

$$E = E_0 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{y}{\lambda} \right)$$

$$H = H_0 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{y}{\lambda} \right)$$

Скорость электромагнитной волны в среде

$$V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu}} = \frac{c}{n}$$

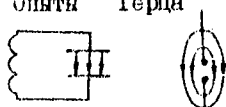
$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

Закон
Максвелла

ГЕРЦ

1888 г.

опыты Герца



ПЛОТНОСТЬ ЭНЕРГИИ

электрического
поля

$$\omega_e = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}$$

магнитного
поля

$$\omega_m = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}$$

электромагнитного
поля

$$\omega = \frac{EH}{V}$$

Поток энергии - величина, численно равная количеству энергии, проносимой волной за единицу времени через единицу площади, перпендикулярной к направлению распространения волны.

$$S = \omega V = EH$$

$\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}]$ Вектор
Умова-
Пойтинга

Татьяна Юрьевна Герасимова
ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ
ПО КУРСУ "ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ"

Методические рекомендации

Подписано в печать 16. 01. 89. Формат 60 x 84 1/16. Бумага писчая
№ 2. Офсетная печать. Усл. печ. л. 1,93 (1,79). Уч.-изд. л. 1.
Тираж 150 экз. Заказ 56 . Цена 5 к.

Ротапринт МГУИ им. А. М. Горького. 220809, г. Минск, ул. Советская, 18.