Физика. Занятие №8, 28.10.2024

Рудяк А.С., СГУ им. Чернышевского
2 курс, «Программная инженерия»

Саратов, 2024

Содержание

Колебательный контур

ФС:

Техническое устройство, в начальный момент находящиеся в состоянии, способном воспроизвести поля и токи, изменяющиеся во времени.

Модель ФС:

Колебательный контур — цель, состоящая из включенных последовательно катушки индуктивностью L, конденсатора емкостью C и резисторов сопротивлением R.

Допущения к модели:
- Контур идеальный, т.е. R = 0
- Внешнее напряжение отсутствует, ток заряжающий конденсатор положительный

По 2 закону Кирхгофа: $IR + U = \varepsilon_S$

$\varepsilon_S = -L\frac{dI}{dt}, I = \frac{dq}{dt}, U = \frac{q}{C}$ =>

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

Решение: $q = q_m \cos(\omega t + \alpha)$, где $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ — собственная частота контура.

Напряжение на конденсаторе: $U = \frac{q}{C} = \frac{q_m \cos(\omega t + \alpha)}{C}$

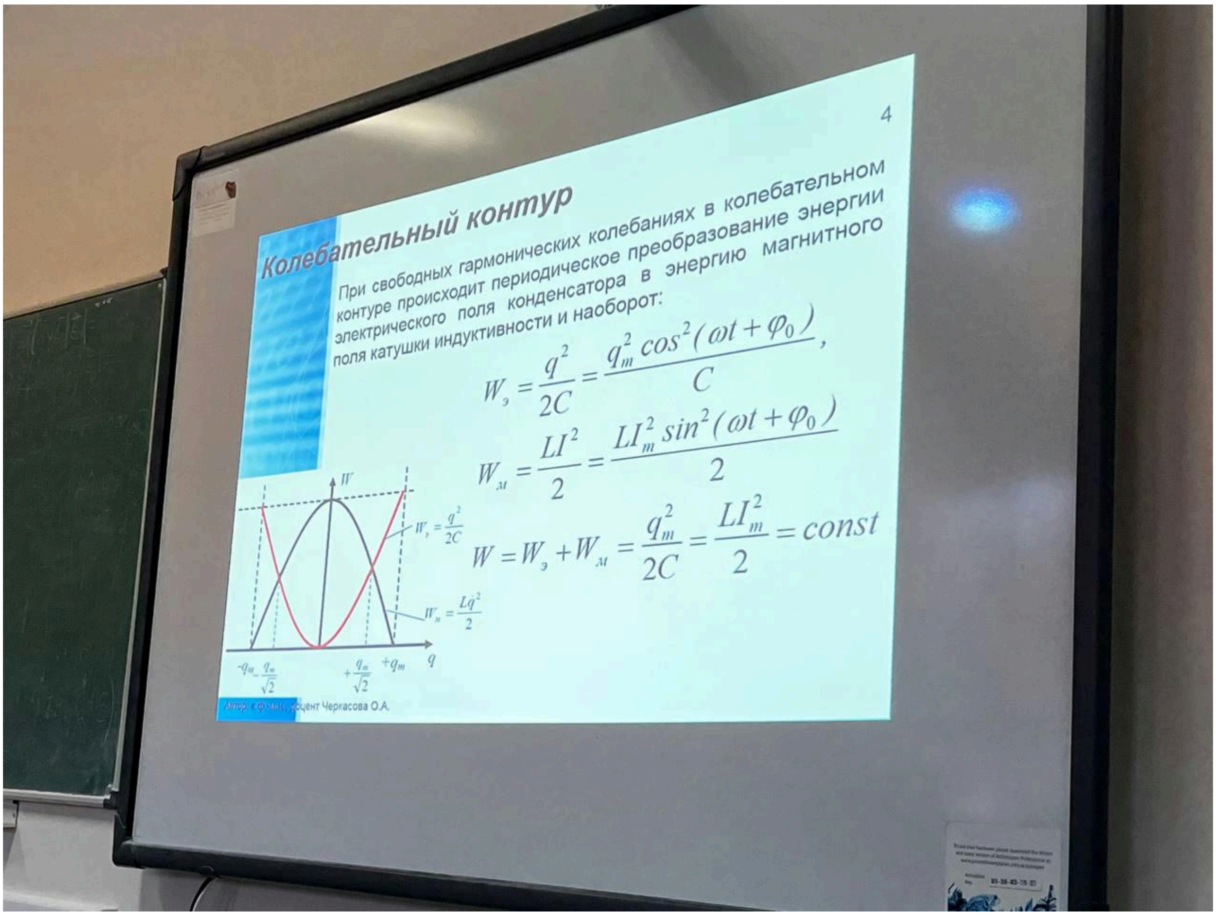
Ток на конденсаторе: $I = -\omega q_m \sin(\omega t + \alpha) = I_m \cos\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{2}\right)$

При свободных гармонических колебаниях в колебательном контуре происходит периодическое преобразование энергии электрического поля конденсатора в энергию магнитного поля катушки индуктивности и наоборот:

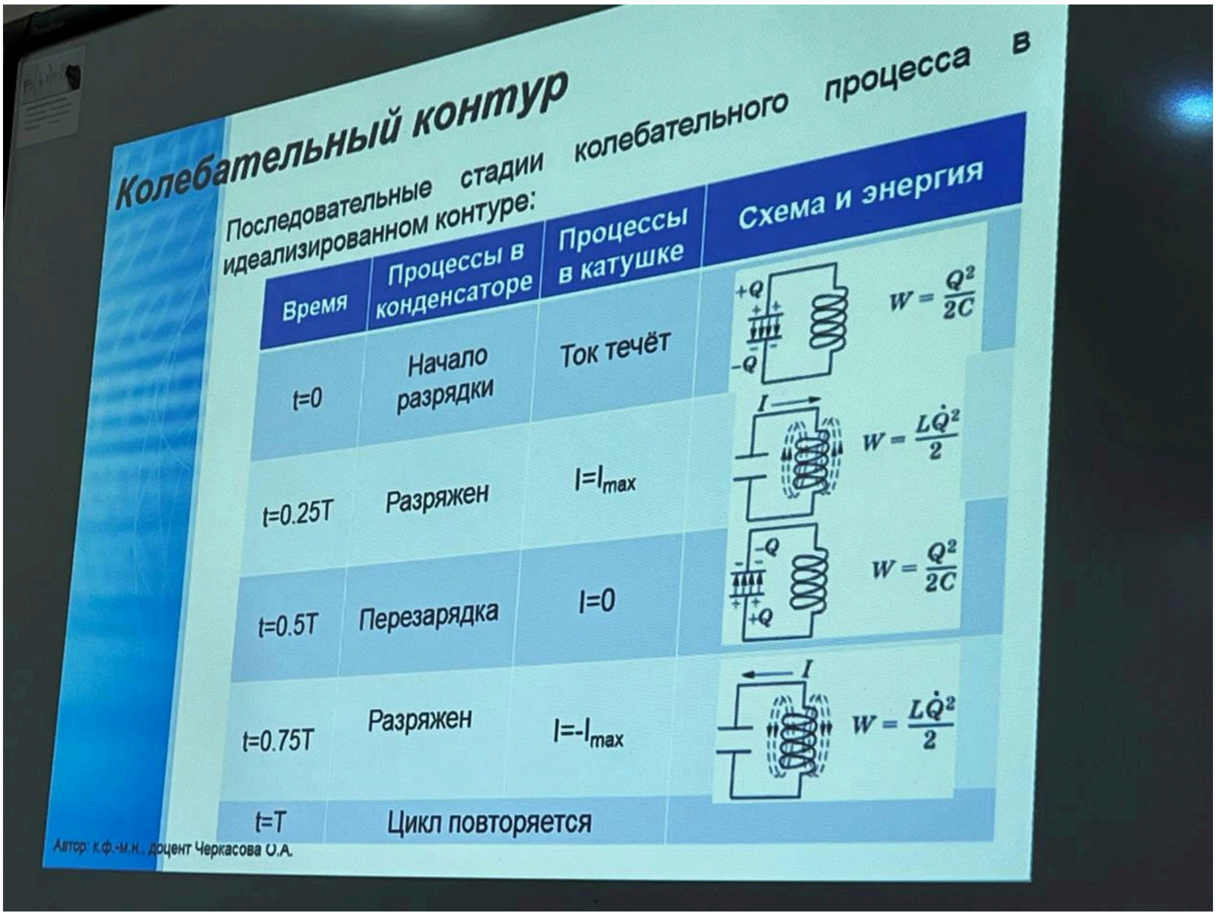
$$W_э = \frac{q^2}{2C} = \frac{q_m^2 \cos(\omega t + \varphi_0)^2}{C}$$

$$W_м = \frac{LI^2}{2} = \frac{LI_m^2 \sin(\omega t + \varphi_0)^2}{2}$$

$$W = W_э + W_м = \frac{q_m^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \text{const}$$



Последовательные стадии колебательного процесса в идеализированном контуре:



Затухающие электрические колебания

В реальном контуре $R \neq 0$, следовательно, есть потеря энергии и затухание колебаний, которое характеризуется коэфициентом затухания

$$\delta = \frac{R}{2L}$$

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{Rdq}{Ldt} + \frac{1}{LC}q = \frac{d^2q}{dt^2} + 2\delta\frac{dq}{dt} + \omega^2 q = 0$$

Решение: $q = q_m e^{-\delta t}\cos(\omega t + \varphi)$

частота затухающих колебаний: $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$

Логарифмический декремент затухания: $\theta = \delta T$

Добротность колебательной системы:

$$Q = \frac{\pi}{\theta} = \frac{\omega_0}{2\delta} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$$

Добротные: от 10. Максимум: 100

Вынужденные электрические колебания

В контуре при включении внешней ЭДС $U = U_m \cos(\omega t)$

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\delta\frac{dq}{dt} + \omega^2 q = \frac{U_m}{L}\cos(\omega t)$$

Решение: при установившихся колебаниях:

$$q = q_m \cos(\omega t - \alpha)$$

α – сдвиг фаз между q и внешней ЭДС

$$q_m = \frac{X_0}{\sqrt{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^2 + 4\delta^2\omega^2}} = \frac{U_m}{\omega Z}$$

I_m = omega q_m = U_m / Z

1) $\alpha = \arctan\left(\frac{2\delta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right)$ 2) $\mathrm{tg}(\alpha) = \frac{R}{\frac{1}{\omega C} - \omega L}$

Из 1 и 2 следует:

$$\mathrm{tg}(\varphi) = \mathrm{tg}\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R_L}$$

Ток смещения

Замечания к модели:

- В пространстве между обкладками конденсатора нет токов проводимости, а цепь токов ведет себя как замкнутая.
- По Максвеллу линии тока проводимости на границах обкладок конденсатора переходят в линии тока смещения.

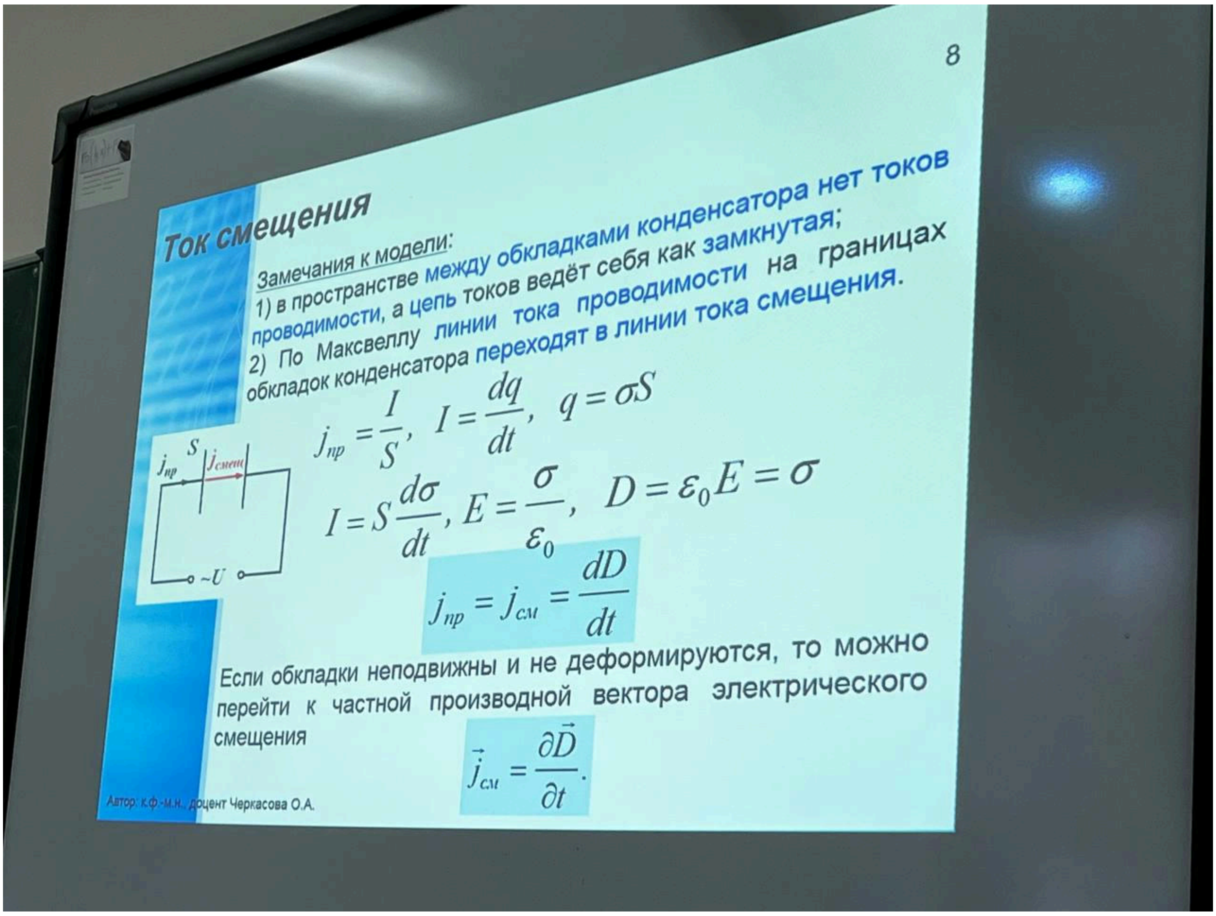
$j_{\text{пр}} = \frac{I}{S}, I = \frac{dq}{dt}, q = \sigma S$

$I = S\frac{d\sigma}{dt}, E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}, D = \varepsilon_0 E = \sigma$

$$j_{\text{пр}} = j_{\text{см}} = \frac{dD}{dt}$$

Если обкладки неподвижны, и не деформируются, то можно перейти к частной производной вектора электрического смещения

$\overline{j_{\text{см}}} = \frac{\partial \overline{D}}{\partial t}$



1. Конденсатор заряжается: электрическое поле возрастает, вектор D увеличивается,

$$\overline{j_{\text{см}}} \upuparrows \overline{D}$$

2. Конденсатор разряжается: электрическое поле убывает, вектор D уменьшается

$$\overline{j_{\text{см}}} \uparrow\downarrow \overline{D}$$

$$I_{\text{смещ}} = \int_S \overline{j_{\text{см}}} d\overline{S} = \int_S \frac{\partial \overline{D}}{\partial t} d\overline{S} = \frac{\partial \Phi_D}{\partial t}$$

Максвелл приписал току смещения только одно общее свойство с током проводимости — способность создавать в окружающем пространстве магнитное поле.

Выводы:

1. Ток смещения не является направленным движением заряженных частиц, поэтому может существовать в вакууме.

2. Протекания тока смещения не приводит к выделению тепла, поэтому проводник не нагревается.

$j_{\text{полн}} = j_{\text{пр}} + j_{\text{см}} = j + \frac{\partial D}{\partial t}$, $\oint_L \overline{H} d\bar{l} = \int_S \left(\bar{j} + \frac{\partial \overline{D}}{\partial t}\right) d\overline{S}$

В диэлектрике:

$$D = \varepsilon_0 E + P \Rightarrow j_{\text{см}} = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t}$$

Ток поляризации связан с потерией энергии в диэлектрике в процессе его поляризации, следовательно, выделяется джоулево тепло.

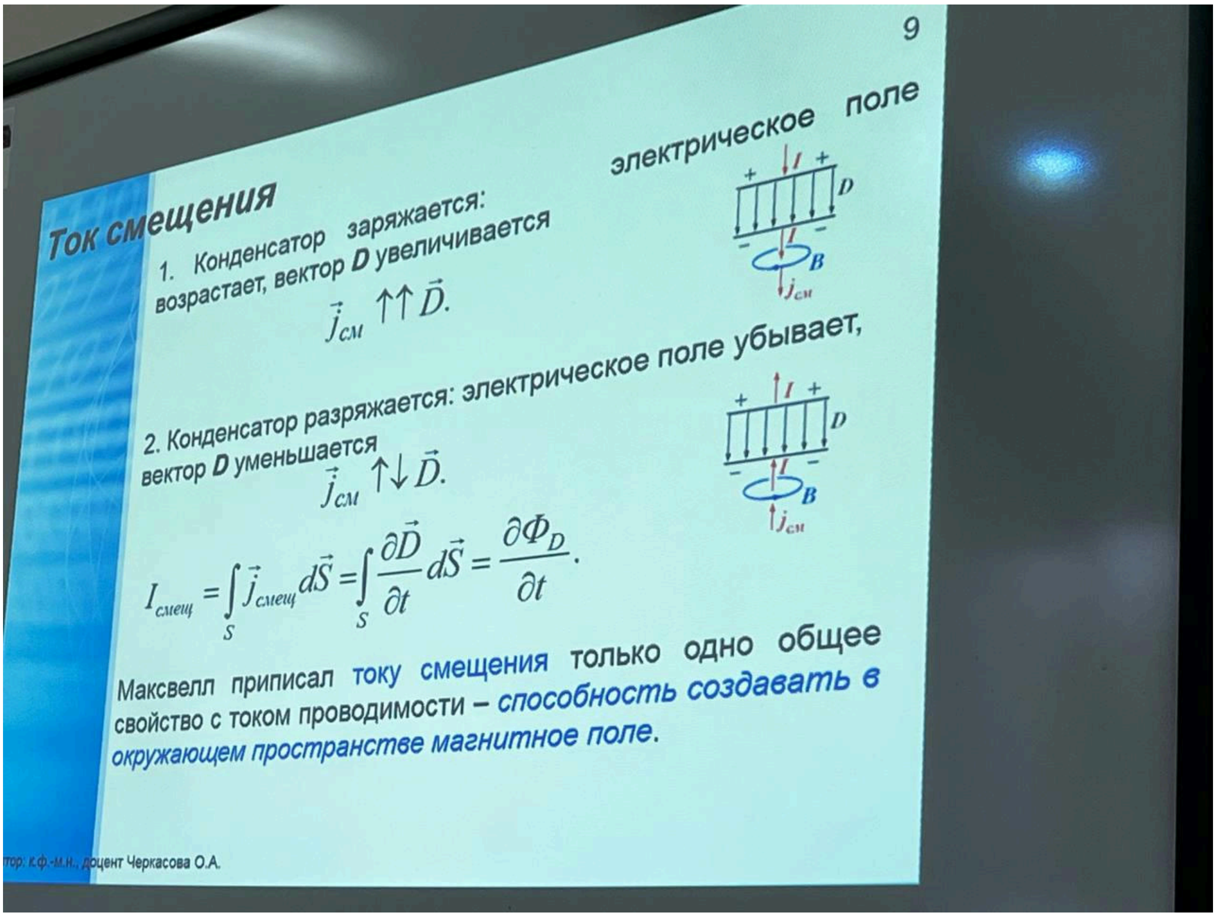
Уравнения Максвелла и их физический смысл

1. $\oint_L \overline{E} d\bar{l} = -\int_S \frac{\partial \overline{B}}{\partial t} d\overline{S}$. Циркуляция вектора напряженности E вихревого электрического поля по замкнутому контуру равна скорости изменения магнитного потока через площадь контура, взятую с обратным знаком. Отражает
   - Первое положение теории Максвелла
   - Закон электромагнитной индукции
2. $\oint_S \overline{B} d\overline{S} = 0$. Поток вектора индукции B магнитного поля через любую замкнтую область равен нулю.
3. $\oint_L \overline{H} d\bar{l} = \int_S \left(\bar{j} + \frac{\partial \overline{D}}{\partial t}\right) d\overline{S}$. Циркуляция вектора напряженности H магнитного поля по замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов, пронизывающих этот контур. **Закон полного тока**.
4. $\oint_S \overline{D} d\overline{S} = \int_V \rho dV$. Поток вектора электрической индукции D через любую замкнутую поверхность равен сумме свободных зарядов, охватываемых этой поверхностью. **Теорема Гаусса для вектора D**

Из уравнений Максвелла следует:

1. Электрическое и магнитные поля взаимосвязаны, т.е. в общем случае электрическое и магнитное поля не могут существовать независимо друг от друга. Следовательно, существует единое электромагнитное поле.
2. Уравнения Максвелла являются инвариантными относительно преобразований Лоренца, т.е. их вид не меняется при переходе от одной ИСО к другой.
3. В общем случае уравнения Максвелла не симметричны.
4. Возникновение электромагнитной волны.

Недостатки: не учитывает квантовые эффекты.



Значение теории Максвелла

1. Показал, что электромагниное поле — это совокупность взаимосвязанных электрических и магнитных полей.
2. Предсказал существование электромагнитных волн, распространяющихся от точки к точке с конечной скоростью.
3. Показал, что световые волны являются электромагнитными волнами
4. Связал воедино электричество, магнетизм и оптику

Практическое подтверждение:

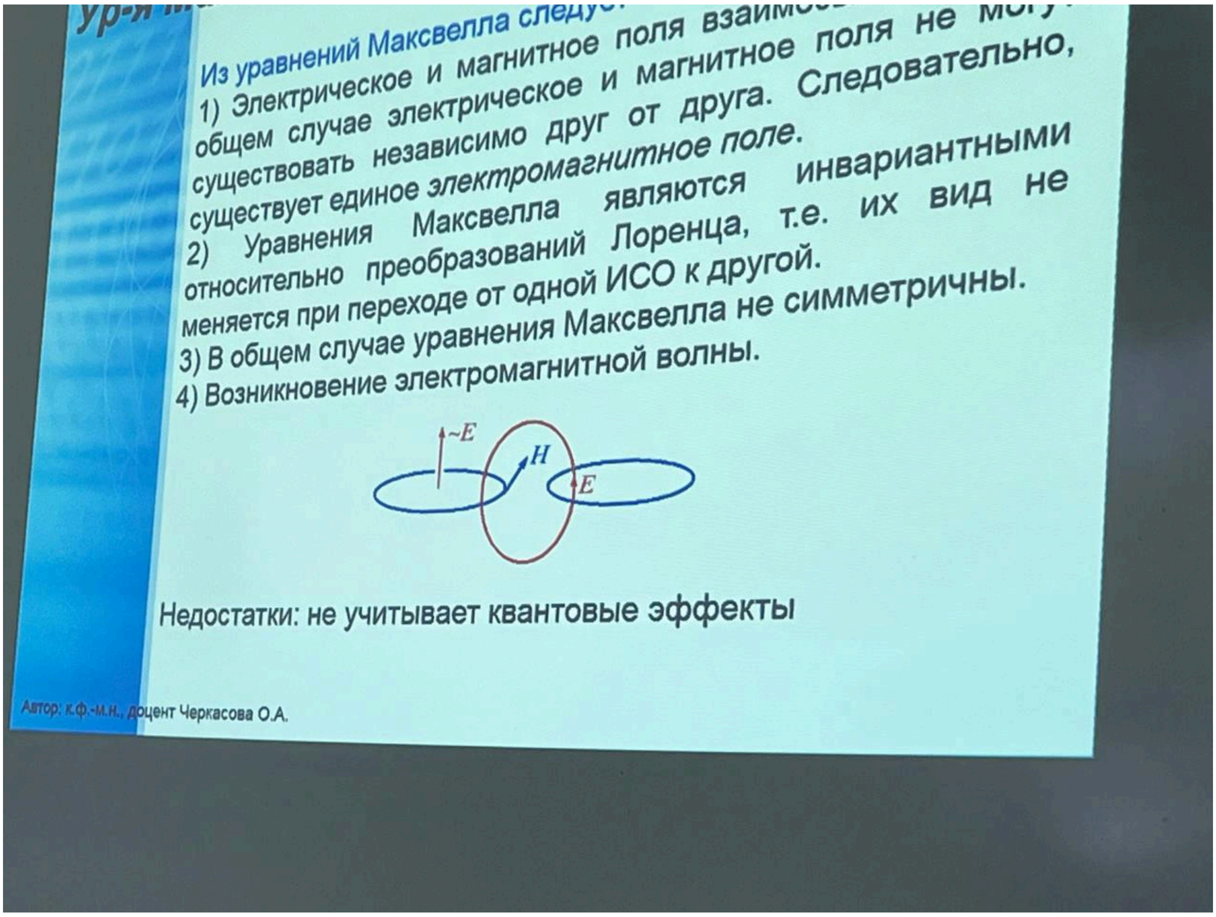
1. Опыты Герца — Вибратор Герца (1887 г.) — открытый колебательный контур, колебания поддерживаются за счет источника ЭДС, подключенного между обкладками конденсатора, а искровой промежуток применяется для того, чтобы увеличить разность потенциалов, до которой первоначально заряжается конденсатор.
2. Опыт Лебедева П. Н.
3. Опыт Глаголевой-Аркадьевой.

Электромагнитные волны

Электромагнитная волна — процесс распространенния электромагнитного поля в пространстве с конечной скоростью.

Физическая модель:

1. Среда однородная и изотропная $\overline{D} = \varepsilon\varepsilon_0\overline{E}, \overline{B} = \mu\mu_0\overline{H}$
2. Непроводящая $j = 0$



Скорость света в вакууме:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$$

Фазовая скорость:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

Свойства электромагнитных волн

1. Скорость распространения электромагнитных волн $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{c}{n}$, где n — показатель преломления среды. Т.е.

- Скорость распространения электромагнитных волн в среде меньше, чем в вакууме
- Среда влияет на распространение электромагнитных волн, они преломляются, отражаются, поглощаются.

2. Электромагнитная волна — поперечная, вектора E и H лежат в плоскость, перпендикуклярной к направлению распространения волны, т.е. вектору v в рассматриваемой точке поля.
3. Вектора E и H взаимно перпендикулярны, причем вектора E, H образуют правовинтовую тройку.
4. Вектора E, H колеблются в одной фазе — одновременно обращаются в нуль и одновременно достигают максимума.
5. Мгновенные значения векторов E, H связаны соотношением $\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}E = \sqrt{\mu\mu_0}H$ Для вакуума соотношение $\frac{E_0}{H_0} \approx 377$

   Плоская монохроматическая ЭМВ: $E_y = E_0 \cos(\omega t - kx)$ $H_z = H_0 \cos(\omega t - kx)$, где $k = \frac{\omega}{v}$ — волновое число.
6. Электромагнитная волна переносит энергию (т.к. мы можем обнаружить электромагнитную волну)
7. Электромагнитная волна оказывает на тело давление, т.к. заряженные частицы тела в магнитном поле волны начинают двигаться под действием силы Лоренца.

скор...

Физическая модель:

1. Среда однородная и изотропная $\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0 E, B = \mu\mu_0$
2. Непроводящая j=0

$$\underbrace{rot\vec{E} = -\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad rot\vec{H} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}}, \quad div\vec{E} = 0, \quad div\vec{D} = \rho$$

Возьмем ротор от обеих частей

Оператор Лапласа: $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

Оператор набла (Гамильтона): $\nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2}\vec{i} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\vec{j} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\vec{k}$