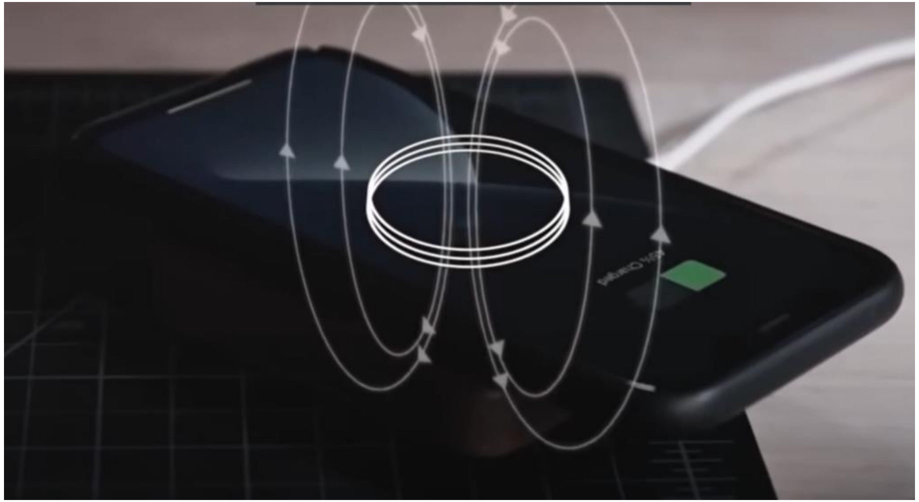
Физические основы компьютерных и сетевых технологий

Семестр 2. Колебания и волны

Музыченко Я.Б.
muzychenko@itmo.ru
2024

Лекция 5. Электромагнитная индукция (продолжение). Уравнения Максвелла.



Музыченко Я.Б.
muzychenko@itmo.ru
2024

План лекции

- Электромагнитная индукция. Применение
- Токи при размыкании/замыкании цепи
- Энергия магнитного поля
- Вихревое электрическое поле
- Ток смещения
- Следствия из уравнений Максвелла – электромагнитные волны

Где применяется электромагнитная индукция?

Почему ток не мгновенно устанавливается в цепи?

В чем смысл уравнений Максвелла?

Как описать все законы электромагнетизма?

Дополнительные источники:

Савельев, Электричество и магнетизм, Уравнения Максвелла.

МФТИ, Курс лекций Крымского К.М.,

https://www.youtube.com/watch?v=yaRBwpq2O5M&feature=emb_logo

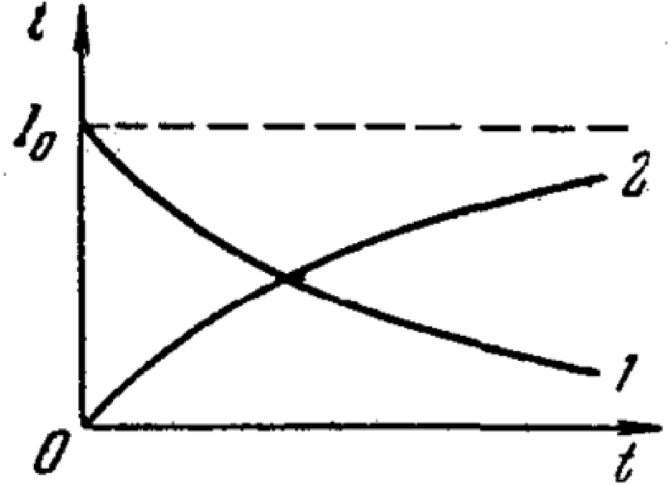
Walter Lewin, 8.03

https://www.youtube.com/watch?v=ckUyN5XNG0Y&list=PLyQSN7X0ro2314mKyUiOILaOC2hk6Pc3j&index=23

Энергия магнитного поля

Здесь вывод на доске

Токи при замыкании/размыкании цепи



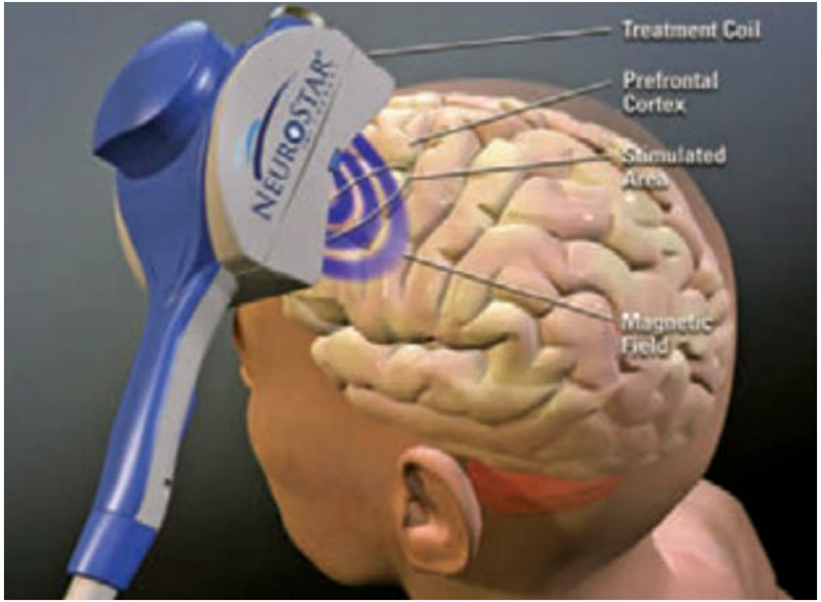
$$I = I_0\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)$$

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

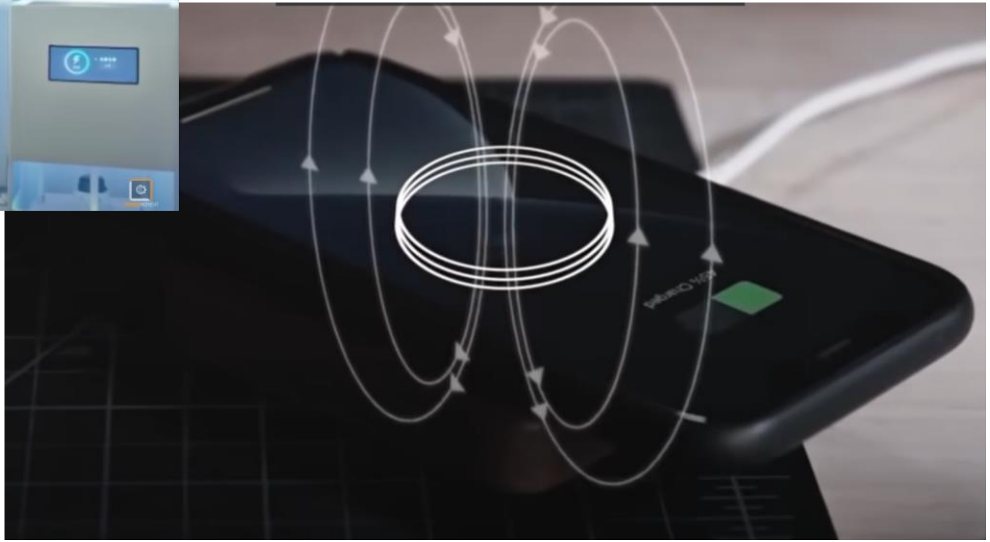
Токи при замыкании/размыкании цепи

Здесь вывод на доске

Где применяется? Медицина



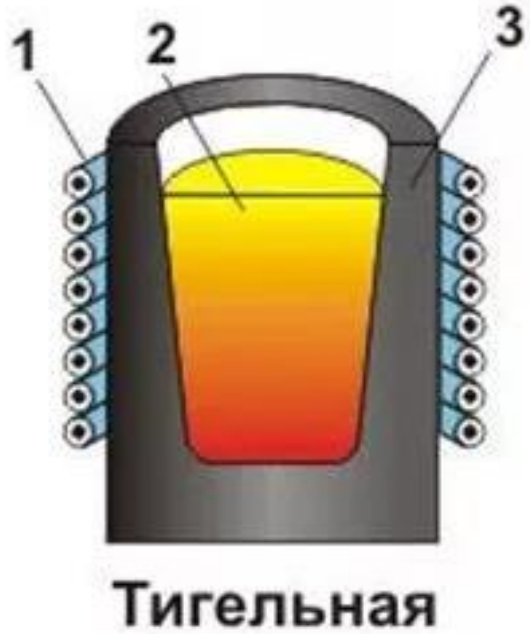
Где применяется? БПЭ



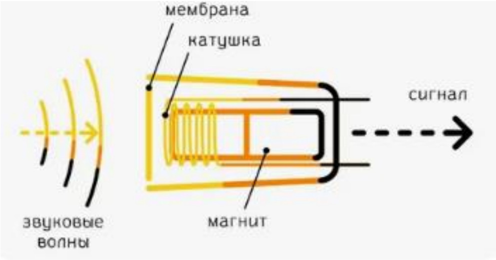
Где применяется? БПЭ

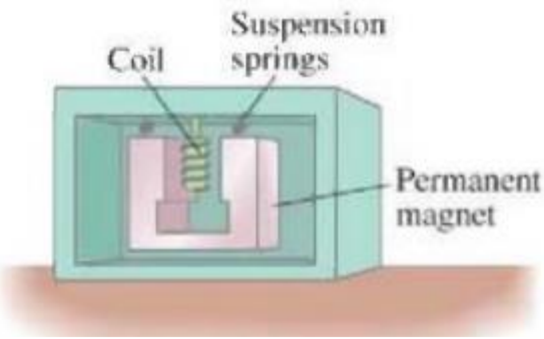
https://habr.com/ru/companies/vdsina/articles/559978/

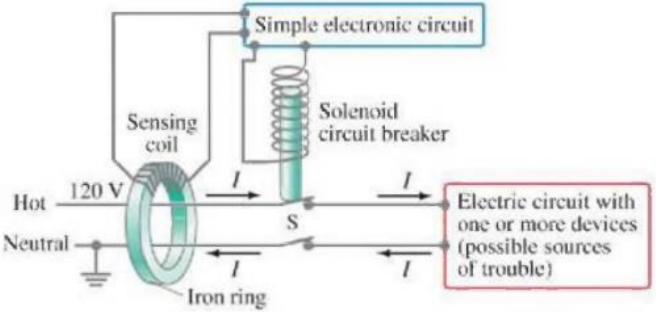
Где применяется? Промышленность



Где применяется? Везде



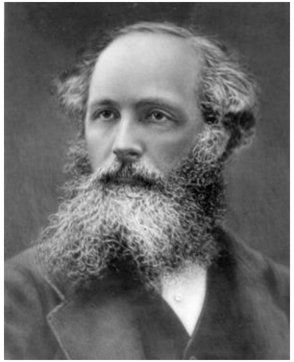




Теория М. Фарадея

«Я пришел к заключению, что на распространение магнитного воздействия требуется время, которое, очевидно, кажется весьма незначительным. Я полагаю, что направление магнитных сил от магнитного полюса похоже на колебание взволнованной поверхности… По аналогии я считаю возможным применить теорию колебаний к распространению электрической индукции»

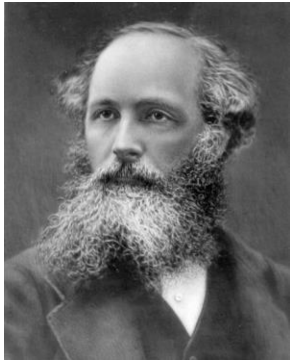
М. Фарадей, 1832



М. Фарадей – концепция силового электрического и магнитного поля, силовые линии поля.
Дж. К. Максвелл (1831-1879) – математическое описание идей Фарадея и др. Система дифференциальных уравнений, описывающих эм поле.

Уравнения Максвелла

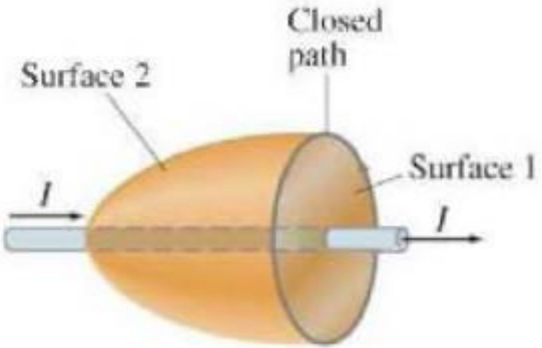
Основные идеи:

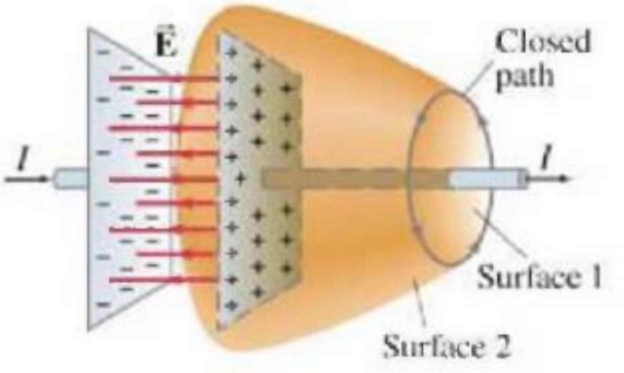


меняющееся во времени магнитное поле создает вихревое электрическое поле (получено из закона эм индукции). Вспомним:

Уравнения Максвелла. Основные идеи

меняющееся во времени электрическое поле создает магнитное?





Ток смещения

Максвелл ввел понятие плотности тока смещения, определяемое как:

$$\vec{j}_{\text{см}} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$\vec{D}$ – электрическая индукция/электрическое смещение

Ток смещения через поверхность равен потоку вектора $\vec{j}_{\text{см}}$ через эту поверхность:

$$\boxed{I_{\text{см}} = \int \vec{j}_{\text{см}} d\vec{S} = \int \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S}}$$

Ток смещения

Магнитное поле создается как токами, текущими в проводниках (токами проводимости), так и переменным электрическим полем (токами смещения).

Плотность полного тока:

$$\vec{j}_{\text{полн}} = \vec{j} + \vec{j}_{\text{см}} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Обобщение теоремы о циркуляции вектора H:

$$\boxed{\oint_l \vec{H} d\vec{l} = I_{\text{полн}} = \int_S (\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) d\vec{S}}$$

Цепь полного тока всегда замкнута.

Уравнение Максвелла (1)

Обобщение закона электромагнитной индукции:

$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$$

Циркуляция вектора напряженности электрического поля по произвольному замкнутому контуру равна потоку вектора скорости изменения магнитного поля через поверхность, ограниченную данным контуром, взятому со знаком «-».

Т.е. переменное магнитное поле вызывает **вихревое электрическое поле.**

Уравнение Максвелла (2)

Обобщение теоремы о циркуляции вектора Н:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = I_{\text{полн}} = \int_S (\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) d\vec{S}$$

Циркуляция вектора напряженности магнитного поля по произвольному замкнутому контуру равна полному току через поверхность, ограниченную этим контуром.

Уравнение Максвелла (3)

Обобщение теоремы Гаусса для вектора электрической индукции:

$$\oint\limits_S \vec{D}d\vec{S} = \int\limits_V \rho dV$$

Поток вектора электрической индукции через замкнутую поверхность в **электромагнитном поле** равен свободному заряду в объеме, ограниченном этой поверхностью.

Уравнение Максвелла (4)

Обобщение теоремы Гаусса для вектора магнитной индукции:

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

Поток вектора магнитной индукции через замкнутую поверхность в **электромагнитном поле** равен нулю

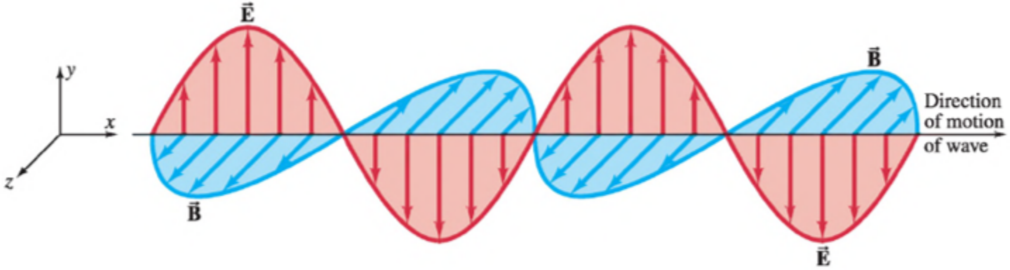
Уравнение Максвелла

$$\oint_l \vec{E}d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial B}{\partial t} d\vec{S} \qquad rot\vec{E} = \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\oint_l \vec{H}d\vec{l} = I_{полн} = \int_S (\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t})d\vec{S} \qquad rot\vec{H} = \nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

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

$$\oint_S \vec{B}d\vec{S} = 0 \qquad div\vec{B} = 0$$



Следствия из уравнений Максвелла

1. Линейность (принцип суперпозиции полей);
2. Содержат уравнение непрерывности (закон сохранения заряда);
3. Выполняются во всех системах отсчета (релятивистски инварианты);
4. Основное следствие из уравнение Максвелла – существование эм полей!!! Оно существует без зарядов и токов, его изменение всегда носит волновой характер.
5. Скорость распространения эм волн в вакууме – скорость света!

Задание к лекции. Вариант 1

1. **Моделирование. Замыкание/размыкание цепи.**

Входные параметры: индуктивность, сопротивление, ЭДС источника тока.

Итоговый вид модели: Графики зависимости тока в зависимости от времени при размыкании/замыкании цепи.

Задание к лекции. Вариант 2

2. Моделирование. Конденсатор с круглыми пластинами радиусом R_0 (расстояние между пластинами d), на которые подается переменное напряжение $U = U_0 sin\omega t$.

Входные параметры: величины обозначенные шрифтом **такого** цвета.

Итоговый вид модели:

1) Графики зависимости амплитуды магнитной индукции от радиальной координаты $B_0(r)$
2) График зависимости магнитной индукции от времени $B(t)$ для определенной радиальной координаты r.

При вводе параметров ориентироваться на данные из приведенной задачи.

(III) Suppose that a circular parallel-plate capacitor has radius $R_0 = 3.0$ cm and plate separation $d = 5.0$ mm. A sinusoidal potential difference $V = V_0 \sin(2\pi f t)$ is applied across the plates, where $V_0 = 150$ V and $f = 60$ Hz. (*a*) In the region between the plates, show that the magnitude of the induced magnetic field is given by $B = B_0(R)\cos(2\pi f t)$, where R is the radial distance from the capacitor's central axis. (*b*) Determine the expression for the amplitude $B_0(R)$ of this time-dependent (sinusoidal) field when $R \leq R_0$, and when $R > R_0$. (*c*) Plot $B_0(R)$ in tesla for the range $0 \leq R \leq 10$ cm.

Задание к лекции. Вариант 3

1. Записать уравнения Максвелла в двух формах, материальные уравнения, граничные условия.

- Очень кратко пояснить смысл каждого из них.
- Показать, какие законы электромагнетизма могут быть выведены из уравнений Максвелла (минимум 3).
- Зачем уравнения Максвелла записывают в дифференциальной форме?
- Основные следствия из уравнений Максвелла.
- Как выяснилось, что существуют эм волны?

2. In earlier times when many households received nondigital television signals from an antenna, the lead-in wires from the antenna were often constructed in the form of two parallel wires (Fig. P32.78). The two wires carry currents of equal magnitude in opposite directions. The center-to-center separation of the wires is w, and a is their radius. Assume w is large enough compared with a that the wires carry the current uniformly distributed over their surfaces and negligible magnetic field exists inside the wires. (a) Why does this configuration of conductors have an inductance? (b) What constitutes the flux loop for this configuration? (c) Show that the inductance of a length x of this type of lead-in is

$$L = \frac{\mu_0 x}{\pi} \ln\left(\frac{w-a}{a}\right)$$

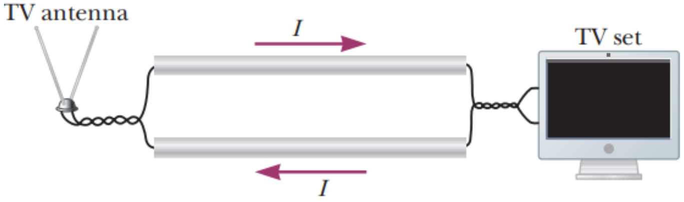


Figure P32.78

Спасибо за внимание!

muzychenko@itmo.ru

BE in LOVE with physics