



**Физические основы компьютерных и
сетевых технологий**

Семестр 2. Колебания и волны



Музыченко Я.Б.
muzychenko@itmo.ru
2024

Лекция 4. Магнетики. Электромагнитная индукция



- Магнетики: диа-, пара-, ферромагнетизм
- Физическая природа диамагнетизма. Спин электрона. Гиромагнитное соотношение.
- опыты Фарадея
- Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца
- Природа электромагнитной индукции

Какие есть типы магнетиков? Почему вещества ведут себя по-разному в магнитном поле?

Закон электромагнитной индукции: почему важен и в основе каких технологий лежит электромагнитная индукция?

Что такое гиромагнитное соотношение и спин электрона?

Почему важно помнить про правило Ленца?

Дополнительные источники:

ІТМО

Савельев, т.2 гл. 7,9

МФТИ, Курс лекций Крымского К.М.,

<https://www.youtube.com/watch?v=3WtKJx4ZHQA&list=PLtkGmqQ5HKX6geOcSsOzowaLrqEWMSMEi&index=8> с 54 мин про магнетики и диамагнетизм

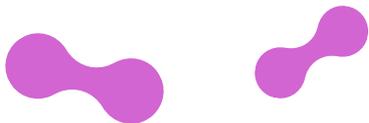
<https://www.youtube.com/watch?v=JpNYPnyD7Z0&list=PLtkGmqQ5HKX6geOcSsOzowaLrqEWMSMEi&index=10> с 31 мин про ЭМ индукцию

Walter Lewin 8.02

<https://www.youtube.com/watch?v=nGQbA2jwkWI&list=PLyQSN7X0ro2314mKyUiOILaOC2hk6Pc3j&index=17>

Гервидс В.И.

https://www.youtube.com/playlist?list=PLWM8IO-3TQjOm1VahNbxIPaTO-3W4iP2_



Электрон обладает :

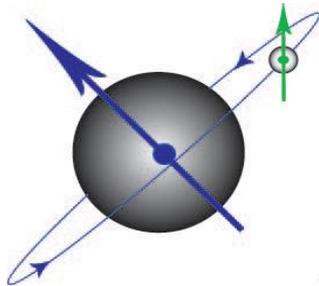
- магнитным моментом (замкнутый контур с током)
- вращающим моментом (частица с массой)
- собственным магнитным моментом (спином).

Магнитный момент электрона:

$$p_m = IS = \frac{\bar{e}}{T} S = \bar{e}vS$$

Механический момент (момент импульса электрона):

$$L = I\omega = mr^2\omega = mr^22\pi\nu$$



Гиромагнитное отношение

$$\Gamma = \frac{\vec{p}_m}{\vec{L}} = -\frac{\bar{e}v\pi r^2}{mr^2 2\pi v} = -\frac{\bar{e}}{2m}$$

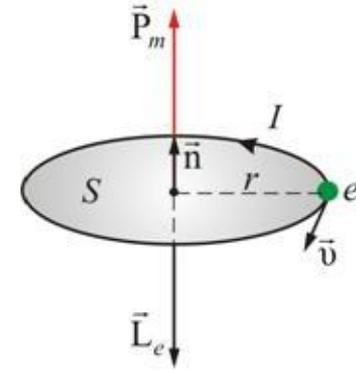
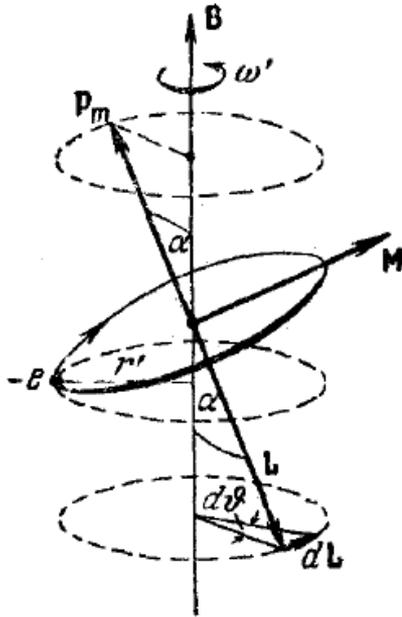
Удельный заряд электрона

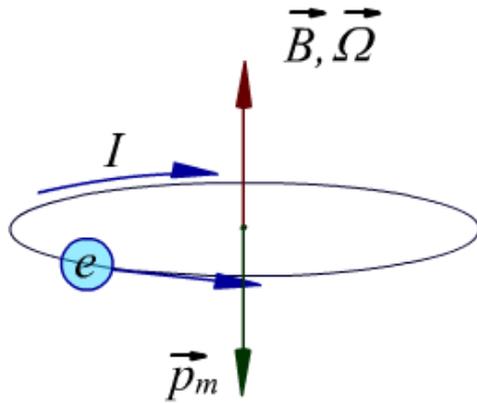
$$\frac{\bar{e}}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$$

Электрон в атоме подобен волчку, т.е. под действием сил во внешнем магнитном поле совершает прецессионное движение (Ларморова прецессия).

Угловая скорость прецессии:

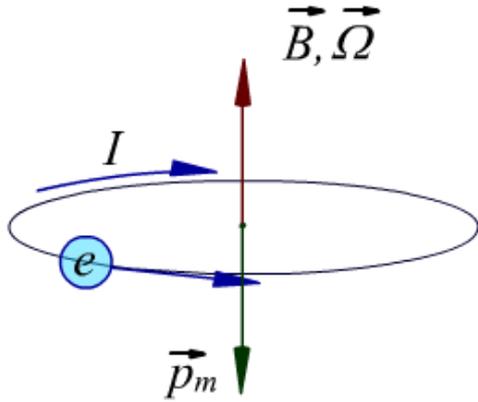
$$\Omega = \frac{\bar{e}B}{2m}$$





При включении внешнего магнитного поля возникает дополнительное движение электрона – ларморова прецессия, при этом **все вещества** испытывают ларморову прецессию – проявляют диамагнитные свойства.

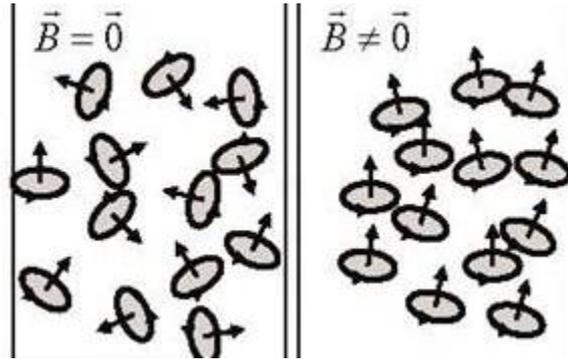
$$\vec{p}_m \uparrow \downarrow \vec{B}$$



При включении внешнего магнитного поля возникает дополнительное движение электрона – ларморова прецессия, при этом **все вещества** испытывают ларморову прецессию – проявляют диамагнитные свойства.

$$\vec{p}_m \uparrow \downarrow \vec{B}$$

Парамагнетики – вещества, молекулы которых обладают собственным магнитным моментом.



В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов ориентированы хаотично

$$\sum \vec{p}_m = 0 \quad \vec{J} = 0$$

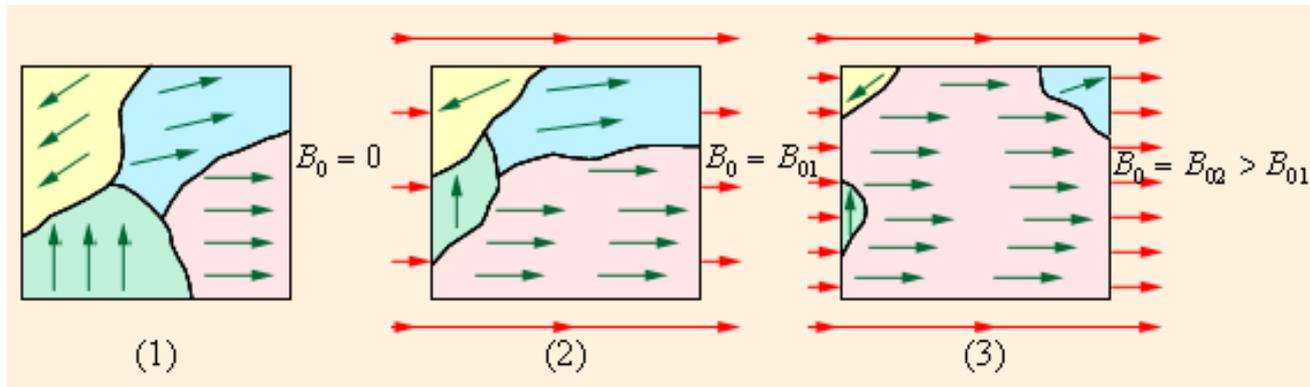
Во внешнем поле на каждую молекулу действуют силы, стремящиеся развернуть магнитный момент вдоль линий поля

$$\sum \vec{p}_m \neq 0 \quad \vec{J} \uparrow \uparrow \vec{B}, \vec{H}$$

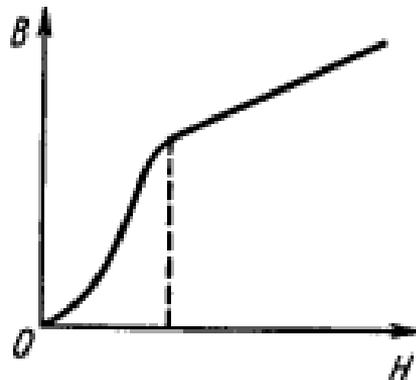
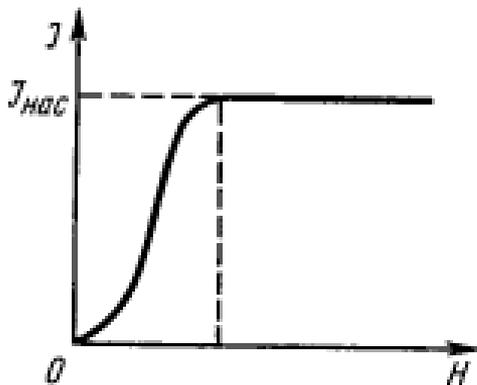
Сильномагнитные вещества, способные сохранять намагниченность в отсутствии внешнего магнитного поля (*Ferrum* – железо, кобальт, никель, сплавы).

Электрон в атомах ферромагнетиков обладает **сильным собственным магнитным моментом (спином)**;

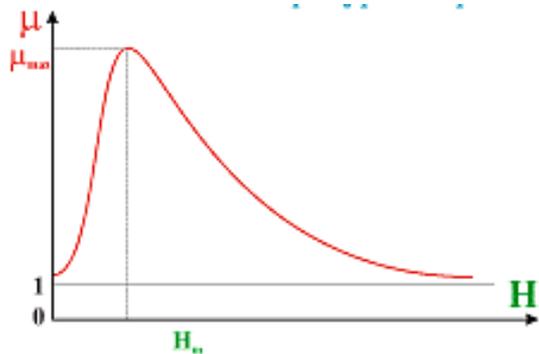
В ферромагнетиках возникают **домены** – области самопроизвольной намагниченности. В магнитном поле происходит ориентация целых доменов по направлению магнитного поля.



$$\mu = 10^2 - 10^5$$

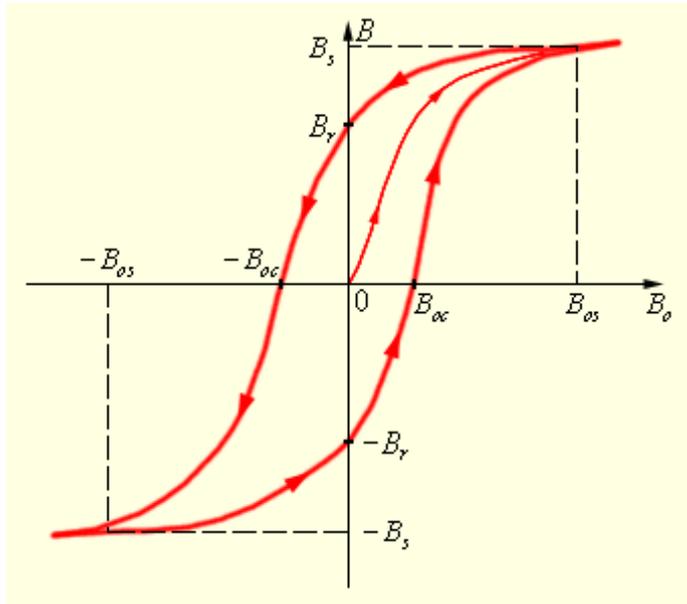


Магнитная проницаемость μ зависит от напряженности магнитного поля:



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

Намагничивание ферромагнетика зависит не только от индукции магнитного поля, но и от предыдущих состояний вещества.



B_r – остаточная индукция
(ферромагнетик становится
постоянным магнитом);
 B_{oc} – коэрцитивная сила.

Магнито-мягкие материалы –
небольшое значение B_{oc} ,
Магнито-жесткие (твердые)
материалы обладают большим
значением B_{oc}

С увеличением температуры способность намагничиваться у ферромагнетиков уменьшается.

Температура Кюри – температура, выше которой ферромагнитные свойства исчезают, а ферромагнетик превращается в парамагнетик.

Кобальт - 1150° С;

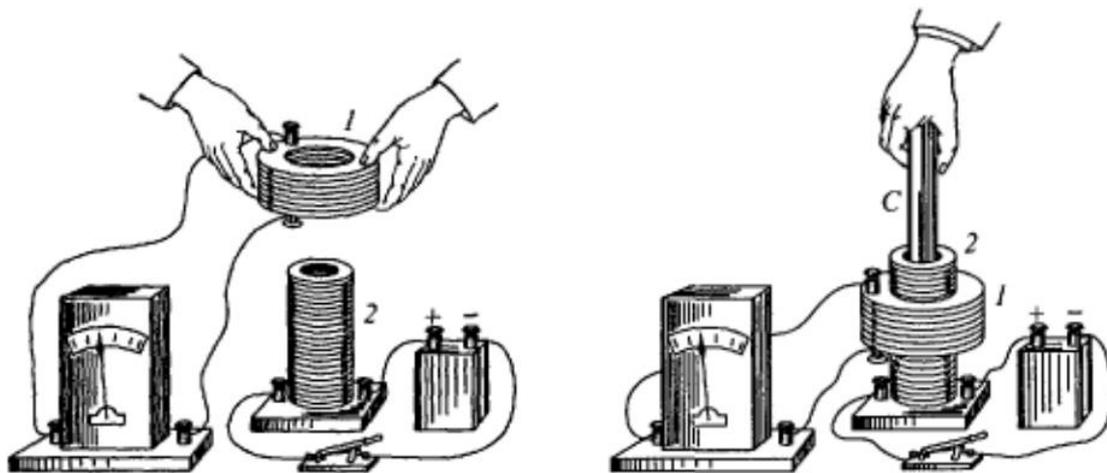
Железо - 770° С;

Никель - 360° С;

Гадолиний -17° С.



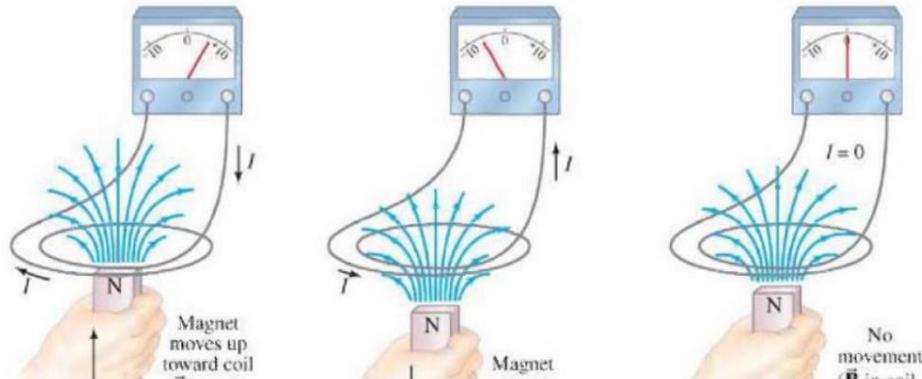
Цель опытов: превратить магнетизм в электричество!



Явление электромагнитной индукции

В замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока через поверхность, охватываемую этим контуром, возникает электрический ток, называемый **индукционным**, а само явление – **электромагнитной индукцией**.

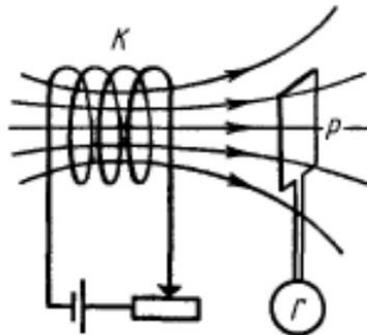
При изменении магнитного потока возникает ЭДС, которая совершенно не зависит от того, каким образом меняется магнитный поток, а определяется **исключительно скоростью его изменения**.





Направление индукционного тока определяется **правилом Ленца** – индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причинам, его вызывающим. Правило Ленца – частный случай принципа ле Шателье-Брауна.

Электромагнитная инерция – стремление системы противодействовать изменению ее состояния.



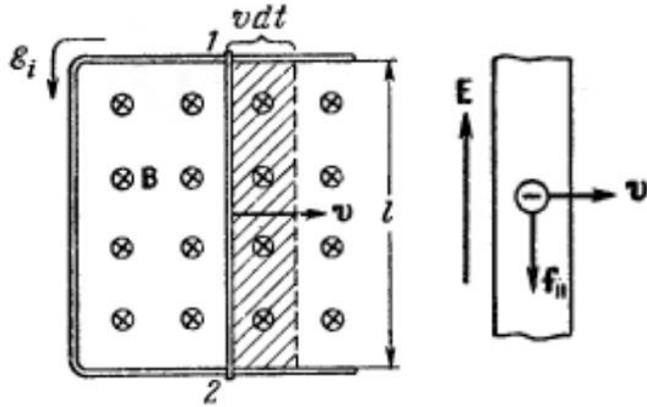
Закон электромагнитной индукции

ЭДС индукции, возникающая в замкнутом контуре численно равна скорости изменения магнитного потока через замкнутый контур, взятой со знаком «-».

Знак « - » связан с правилом Ленца.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\langle \varepsilon_i \rangle = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$



Рассмотрим контур в однородном магнитном поле с подвижной перемычкой длиной l ,двигающейся со скоростью v перпендикулярно линиям магнитного поля.

Природа эм индукции в движущемся проводнике – сила Лоренца!

Пример: Разность потенциалов самолета – прим. 1 В.



$$\varepsilon_i = Bvlsin\alpha$$

Индукционный ток вызван действием сторонних сил не магнитной природы ($v = 0$).
Изменяющееся во времени магнитное поле порождает электрическое поле независимо от наличия проводящего контура (Д.К. Максвелл, 1864 г.)

$$\varepsilon_i = \oint \vec{E} d\vec{l} = - \frac{\partial \Phi}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial t} \left(\int \vec{B} d\vec{S} \right)$$

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

Природа э/м индукции – **возникновение вихревого электрического поля (непотенциального).**

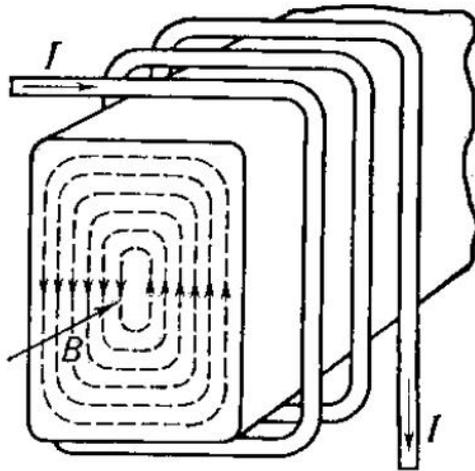
Обобщение закона электромагнитной индукции:

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

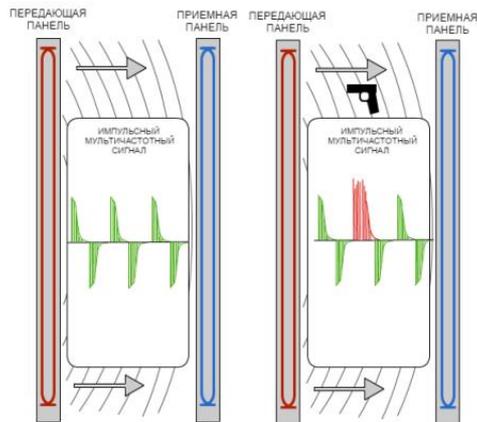
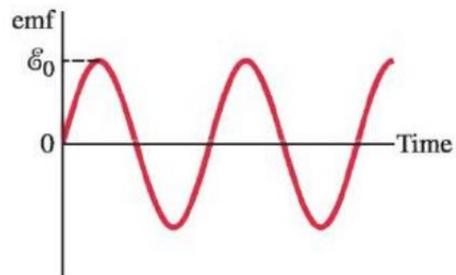
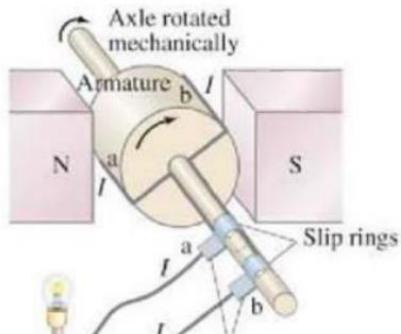
Т.е. переменное магнитное поле вызывает вихревое электрическое поле.

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

Индукционные токи могут возникать не только в проволочных контурах, но и в массивных проводниках. Такие токи называются вихревыми или токами Фуко. Тепловое действие токов Фуко используется в индукционных печах (плавление металлов). Однако чаще приходится с ними бороться, т.к. вихревые токи приводят к потерям энергии и размагничиванию материалов



Применение электромагнитной индукции



1. Моделирование электрогенератора: вращение контура в магнитном поле.

Входные параметры: величина магнитного поля, частота вращения, сопротивление контура.

Итоговый вид модели: Графики зависимости ЭДС и индукционного тока в зависимости от времени. Графики меняются при изменении параметров.

1. Визуализация петли гистерезиса для ферромагнетика. Визуализация лабораторной работы 3.07.

Входные параметры: величина напряженности магнитного поля.

Итоговый вид модели: График зависимости индукции и намагниченности магнитного поля в зависимости от напряженности. В начальный момент времени напряженность поля равна нулю. Далее при увеличении/уменьшении напряженности строятся графики для J и B . Задача – показать процесс изменения B и J с течением времени. Нахождение коэрцитивной силы, остаточной индукции, максимальной проницаемости является преимуществом.

1. В рамках проекта Приоритета 2030 в ИТМО происходит разработка прототипа беспроводной комнаты. Опишите физические процессы, которые лежат в основе технологии? При описании приведите формулы и физические законы, на которых основана технология. При описании также ответьте на следующие вопросы:

- Какие трудности возникают при создании комнаты?
- Будет ли безопасно находиться человеку или домашнему животному в комнате при зарядке устройств?
- Почему беспроводная зарядка до сих пор широко не распространена?

2. МРТ является признанным инструментом диагностики здоровья человека, основанный на получении томографических изображений с целью дальнейшего исследования состояния внутренних органов и тканей. В основе метода лежит принцип ядерно-магнитного резонанса. Опишите данный метод, используя базовые понятия, полученные в лекциях 3 и 4. Дополните описание необходимыми сведениями. При описании также ответьте на следующие вопросы:

- Есть ли альтернативы у данного метода диагностики?
- Что представляет собой низкопольный МРТ?
- Приведите характеристики стандартного томографа, используемого в здравоохранении. Что необходимо улучшить/изменить при создании отечественного томографа? Какие улучшения планируют признанные мировые производители?

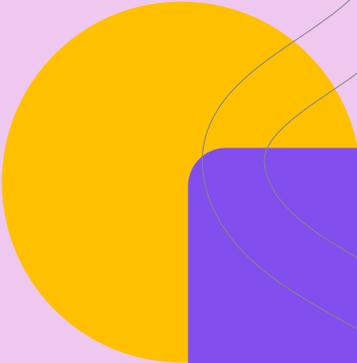
ЕСТЬ ЕЩЕ ОДИН ВОПРОС НА СЛЕДУЮЩЕМ СЛАЙДЕ!

Задание к лекции. Вариант 3

(III) In an experiment, a coil was mounted on a low-friction cart that moved through the magnetic field B of a permanent magnet. The speed of the cart v and the induced voltage V were simultaneously measured, as the cart moved through the magnetic field, using a computer-interfaced motion sensor and a voltmeter. The Table below shows the collected data:

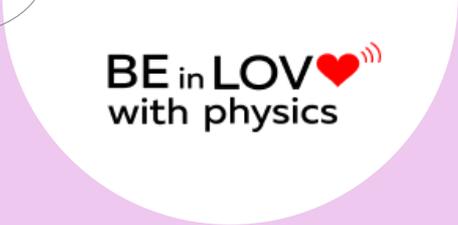
Speed, v (m/s)	0.367	0.379	0.465	0.623	0.630
Induced voltage, V (V)	0.128	0.135	0.164	0.221	0.222

(a) Make a graph of the induced voltage, V , vs. the speed, v . Determine a best-fit linear equation for the data. Theoretically, the relationship between V and v is given by $V = BN\ell v$ where N is the number of turns of the coil, B is the magnetic field, and ℓ is the average of the inside and outside widths of the coil. In the experiment, $B = 0.126$ T, $N = 50$, and $\ell = 0.0561$ m. (b) Find the % error between the slope of the experimental graph and the theoretical value for the slope. (c) For each of the measured speeds v , determine the theoretical value of V and find the % error of each.



**Спасибо
за внимание!**

muzychenko@itmo.ru



BE in LOV  
with physics