



Занятие 5. Движение заряженных частиц в магнитных и электрических полях. Электромагнитная индукция, энергия магнитного поля.

Для подготовки к семинару надо проработать

Лекция 6. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях.

ОЛ-1 (§6.1- 6.7), ОЛ-3 (§6.5, 10.1- 10.5, 11.3), ДЛ-10,11,12..

Лекция 9. Электромагнитная индукция.

ОЛ-1 (§9.1- 9.6), ОЛ-3 (§8.1- 8.8), ОЛ-4 (§9.1- 9.7), ДЛ-10,11,12.

ОЛ-1. Мартинсон Л.К., Морозов А.Н., Смирнов Е.В. Электромагнитное поле. Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2013. – 423 с.

ОЛ-3. Савельев И. В. Курс общей физики: Учебное пособие для втузов. В 5 кн (кн.2). – М.: Наука, 1998.

ОЛ-4. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. – 352 с.

ДЛ-10. Макаров А.М., Лунёва Л.А., Макаров К.А. Теория и практика классической электродинамики. – М.: URSS, 2014. – 774 с.

ДЛ-11. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 720 с.

ДЛ-12. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Учебное пособие для вузов. В 5 томах. – М.: Физматлит, 2002. – 4506 с.

Краткие теоретические сведения



$F = qvB \sin \alpha$ Сила Лоренца; α - угол между направлениями v и B .

$F = IBl \sin \alpha$ Сила Ампера; α - угол между направлениями l и B .

$F = p_m \frac{\partial B}{\partial x}$ Сила, действующая на магнитный диполь в неоднородном поле

$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}]$ Вращательный момент сил, действующих на рамку с током в однородном магнитном поле

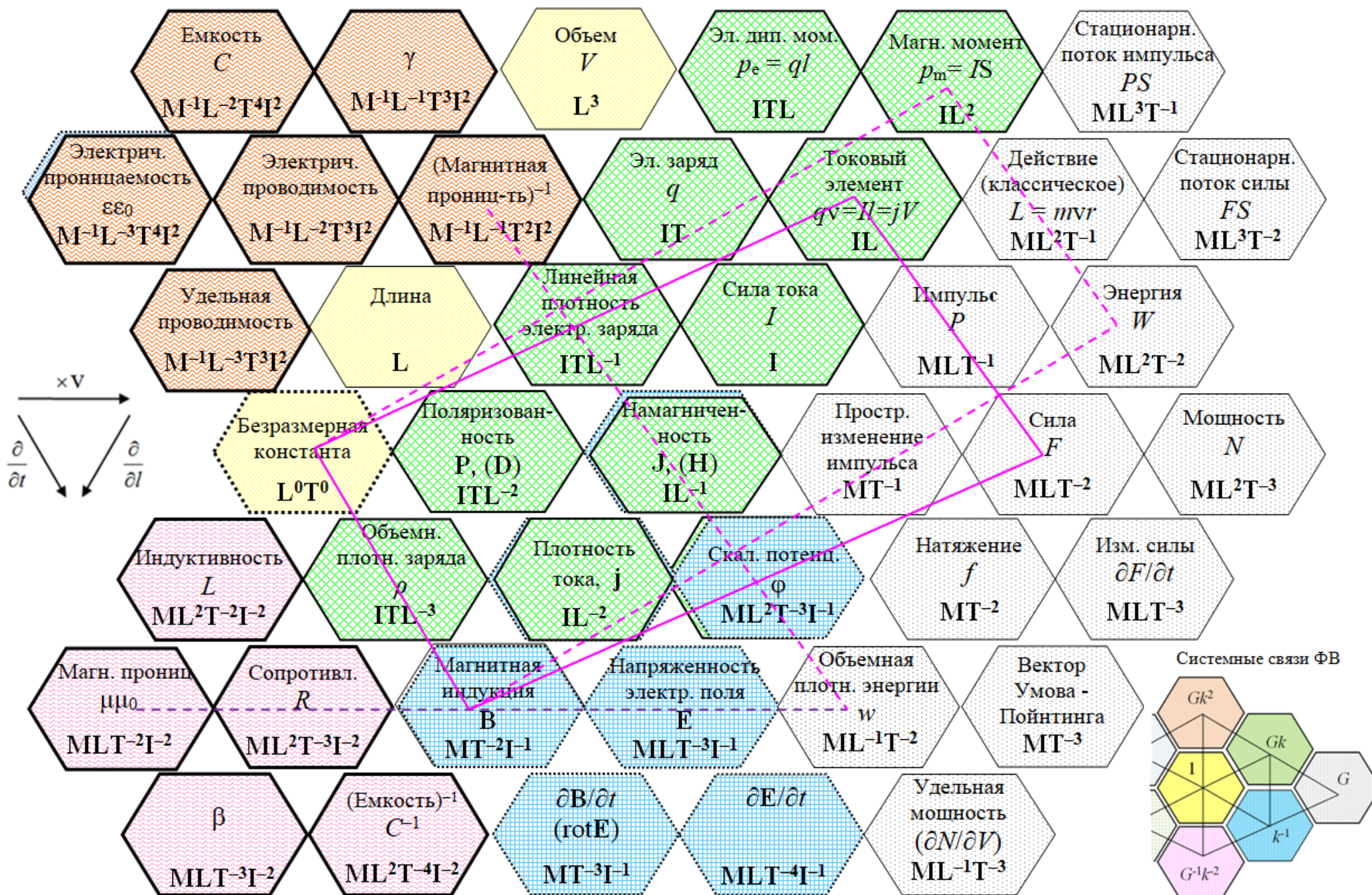
$W = -\vec{p}_m \vec{B}$ Потенциальная энергия магнитного диполя, находящегося в силовом магнитном поле

$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt}$ ЭДС индукции

$\mathcal{E}_L = -L \frac{dI}{dt}$ ЭДС самоиндукции

$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}; \quad w = \frac{\mu_0 H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0}.$ Энергетические соотношения.

Электромагнитные величины в системе ФВЗ



Задача 2.417. Нерелятивистская заряженная частица пролетает электрическое поле цилиндрического конденсатора и затем попадает в однородное поперечное магнитное поле с индукцией B (рис. 8). В конденсаторе частица движется по окружности, в магнитном поле – по полуокружности радиуса r . Разность потенциалов на конденсаторе U , радиусы обкладок a и b , причём $a < b$. Найти скорость частицы и её удельный заряд q/m .

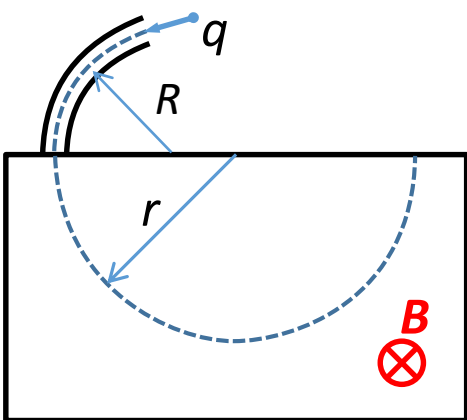


Рис. 8

Решение: Частица движется в конденсаторе по дуге окружности

$$m \frac{v^2}{R} = qE, \quad (1)$$

R – радиус траектории частицы.

Напряженность электрического поля в пространстве между обкладками цилиндрического конденсатора

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 R l} \quad (2)$$

q – заряд конденсатора, l – длина его обкладок.

Заданное напряжение между обкладками связано с E и др. параметрами

выражением

$$U = \int_a^b E dR = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 l} \ln\left(\frac{b}{a}\right), \quad (3)$$

откуда определим отношение

$$\frac{q}{2\pi\epsilon_0 l} = \frac{U}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}, \quad (4)$$

С учетом (4) уравнение (1) примет вид

$$mv^2 = \frac{qU}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}. \quad (5)$$

При движении в **магнитном поле** центробежная и сила Лоренца равны

$$m \frac{v^2}{r} = qvB. \quad (6)$$

Подставив (5) в (6) определим скорость частицы

$$v = \frac{U}{Br \ln\left(\frac{b}{a}\right)}. \quad (7)$$

Подставив (7) в (5) определим удельный заряд частицы

$$\frac{q}{m} = \frac{U}{B^2 r^2 \ln\left(\frac{b}{a}\right)}. \quad (8)$$

Таким образом, **искомые параметры найдены.**

Задача 2.325. На расстояниях a и b от длинного прямого проводника с постоянным током I_0 расположены два параллельных ему провода, замкнутых на одном конце сопротивлением R (рис. 9).

По проводам без трения перемещают с постоянной скоростью v стержень-перемычку. Пренебрегая сопротивлением проводов и стержня, а также магнитным полем индукционного тока, найти:

- индукционный ток в стержне;
- силу, нужную для поддержания постоянства скорости.

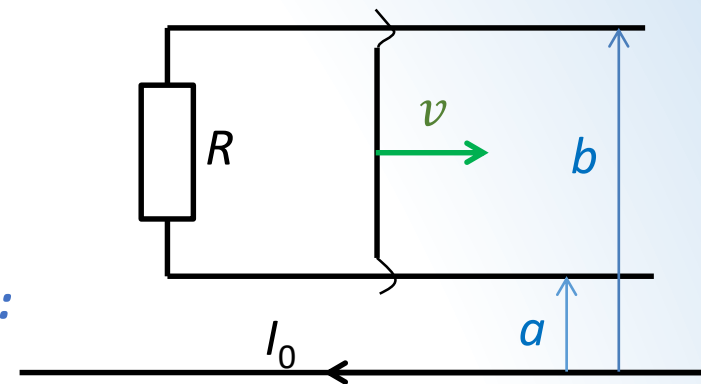


Рис. 9

Решение: Ток I_0 создаёт в пространстве вокруг провода магнитное поле, индукция которого B . В контуре, содержащем движущуюся перемычку и сопротивление R , появляется индукционный ток I_{ind} , создающий вторичное магнитное поле с индукцией B_{ind} , направленной внутри контура (по правилу Ленца) против вектора индукции магнитного поля от первичного тока I_0 .

Магнитный поток через площадку контура равен

$$\Phi_B = \iint_S (\vec{B}, \vec{dS}). \quad (1)$$

Направление нормали к площадке контура \vec{n} согласуем с направлением индукционного тока - она направлена как вектор \vec{B}_{ind} . Поэтому

$$(\vec{B}, \vec{dS}) = (\vec{B}, \vec{n})dS = -BdS. \quad (2)$$

Пусть l – длина контура, а ось Y направлена вверх (рис.10), тогда $dS = ldy$ и индукция магнитного поля от проводника с током I_0 равна

$$B = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi y}. \quad (3)$$

Магнитный поток в контуре равен

$$\Phi_B = - \int_a^b \frac{\mu_0 I_0 l dy}{2\pi y} = - \frac{\mu_0 I_0 l}{2\pi} \ln \left(\frac{b}{a} \right). \quad (4)$$

ЭДС индукции в контуре с учётом скорости $v = \frac{dl}{dt}$

$$\mathcal{E}_{ind} = - \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu_0 I_0 v}{2\pi} \ln \left(\frac{b}{a} \right). \quad (5)$$

Тогда искомая сила индукционного тока

$$I_{ind} = \frac{\mathcal{E}_{ind}}{R} = \frac{\mu_0 I_0 v}{2\pi R} \ln \left(\frac{b}{a} \right). \quad (6)$$

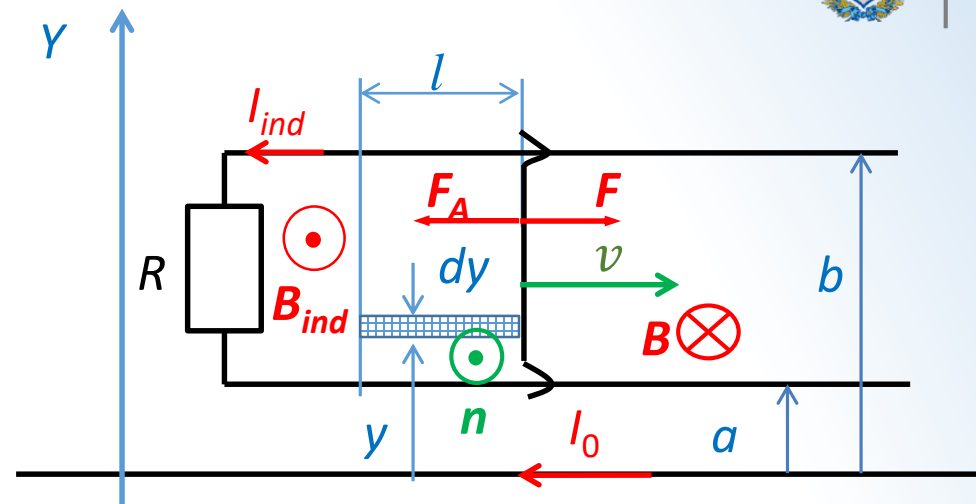


Рис. 10

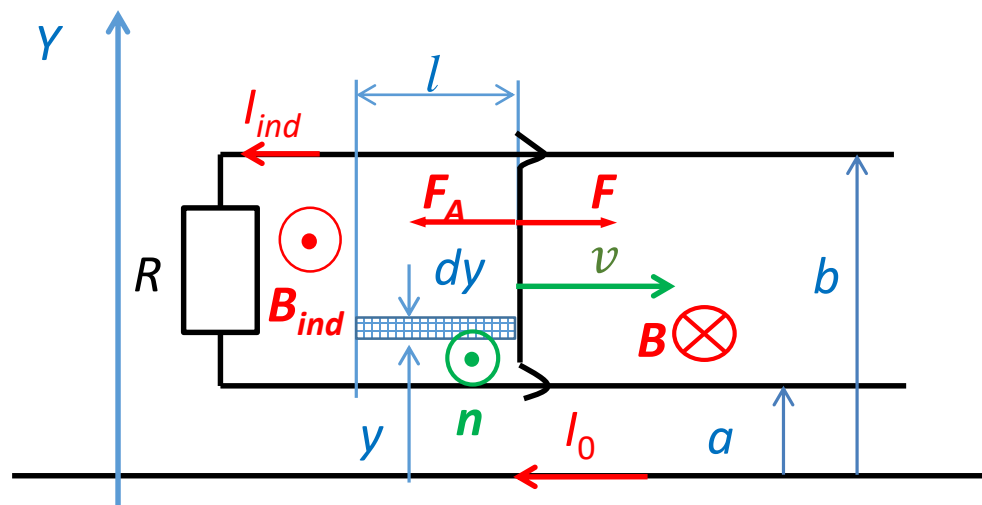


Рис. 10

На перемычку с индукционным током в магнитном поле действует сила Ампера, направленная против движения (рис.10)

$$F_A = \int_a^b I_{ind} B dy = \int_a^b \frac{\mu_0 I_0 v}{2\pi R} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \frac{\mu_0 I_0}{2\pi y} dy = \frac{v}{R} \left[\frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \right]^2. \quad (7)$$

Чтобы **скорость** перемычки была **постоянной** к ней надо приложить внешнюю **силу, равную силе Ампера**

$$F = \frac{v}{R} \left[\frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \right]^2. \quad (8)$$

Задача 2.329. Плоская спираль с большим числом витков N , плотно прилегающих друг к другу, находится в однородном магнитном поле, перпендикулярном плоскости спирали. Наружный радиус витков спирали равен a . Индукция поля изменяется во времени по закону $B = B_0 \sin(\omega t)$, где B_0 и ω - имеют постоянные значения. Найти амплитудное значение ЭДС индукции в спирали.

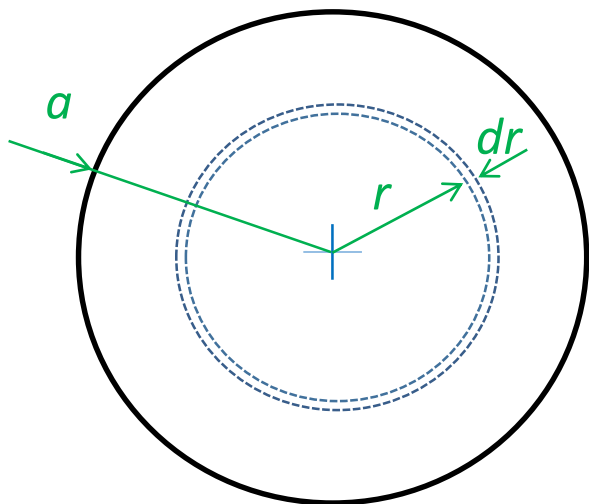


Рис. 11

Решение: Выбираем внутри спирали тонкое кольцо (рис.11) радиуса r и толщиной dr . Число витков, попавших в полоску кольца шириной dr равно

$$dN = \frac{N}{a} dr. \quad (1)$$

Это кольцо охватывает круг площадью $S = \pi r^2$.

Магнитный поток, образуемый витками кольца толщиной dr равен

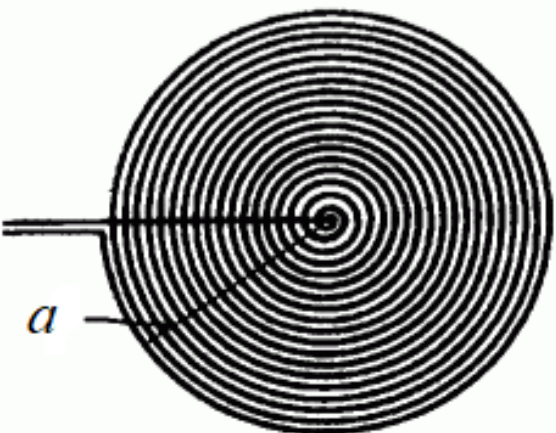
$$d\Phi_B = BSdN = B_0 \sin(\omega t) \pi r^2 \frac{N}{a} dr. \quad (2)$$

Полный магнитный поток, образуемый всей спиралью

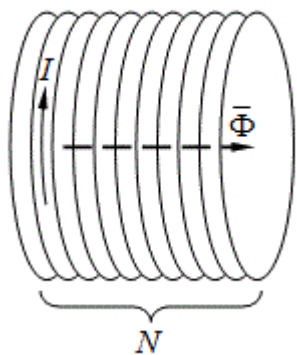
$$\Phi_B = \int_0^a B_0 \sin(\omega t) \pi r^2 \frac{N}{a} dr = \pi \frac{a^2}{3} N B_0 \sin(\omega t). \quad (3)$$

Амплитуда ЭДС индукции

$$(\mathcal{E}_{ind})_{max} = \left(\frac{d\Phi_B}{dt} \right)_{max} = \pi \frac{a^2}{3} N B_0 \omega. \quad (4)$$



Задача 2.374. Два соленоида одинаковой длины и почти одинакового сечения вставлены один в другой. Найти их взаимную индуктивность, если их индуктивности L_1 и L_2 .



Решение: Найдём выражение для индуктивности соленоида, радиус сечения которого равен R , длина l , число витков N .

Индуктивность равна отношению суммарного магнитного потока к силе тока, протекающего через соленоид

$$L = \frac{\Phi_B}{I}. \quad (1)$$

Ток силой I создает внутри соленоида однородное магнитное поле, величина индукции которого равна

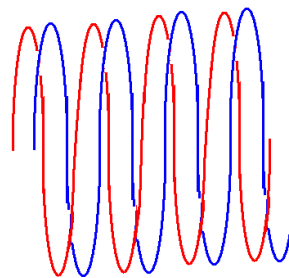
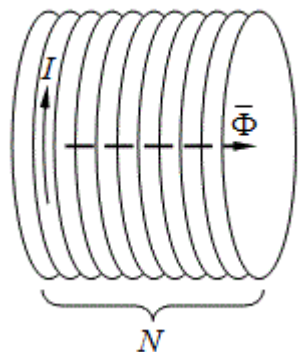
$$B = \mu_0 I \frac{N}{l}. \quad (2)$$

Суммарный магнитный поток через соленоид

$$\Phi = NBS = \mu_0 I \frac{N^2}{l} \pi R^2. \quad (3)$$

Откуда индуктивность соленоида по формуле (1) равна

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l} \pi R^2. \quad (4)$$



Взаимная индуктивность двух соленоидов равна отношению магнитного потока в одном соленоиде к силе тока в другом соленоиде

$$L_{12} = \frac{\Phi_1}{I_2}. \quad (5)$$

Повторяя рассуждения (2)-(4) находим для соленоидов одинаковой длины l , одинакового радиуса R , вставленных один внутрь другого, но с разным числом витков N_1 и N_2 :

$$L_{12} = \mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} \pi R^2 = L_{21} \quad (6)$$

Т.к. согласно (4), индуктивность каждого соленоида

$$L_1 = \mu_0 \frac{N_1^2}{l} \pi R^2 \quad (7)$$

$$L_2 = \mu_0 \frac{N_2^2}{l} \pi R^2, \quad (8)$$

то **взаимная индуктивность** соленоидов

$$L_{12} = L_{21} = \sqrt{L_1 L_2}.$$



Для закрепления знаний по теме данного семинара дома следует самостоятельно решить следующие задачи, которые рекомендуются учебным планом

Домашнее задание к семинару 5

Иродов И.Е. Задачи по общей физике.- М.: Бином, 1998 - 2001,

Дома: **ОЛ-7** задачи 2.377, 2.375 или **ОЛ-8** задачи 3.361, 3.359.

ОЛ-7. Иродов И.Е. Задачи по общей физике.- М.: Бином, 1998÷2001.

ОЛ-8. Иродов И.Е. Задачи по общей физике.- М.: Наука, 1988.



2.377. В двух круглых контурах с радиусами a и b текут токи I_1 и I_2 . Центры контуров совпадают, а угол между их осями равен ϑ . Найти энергию взаимодействия контуров, если $a \ll b$.

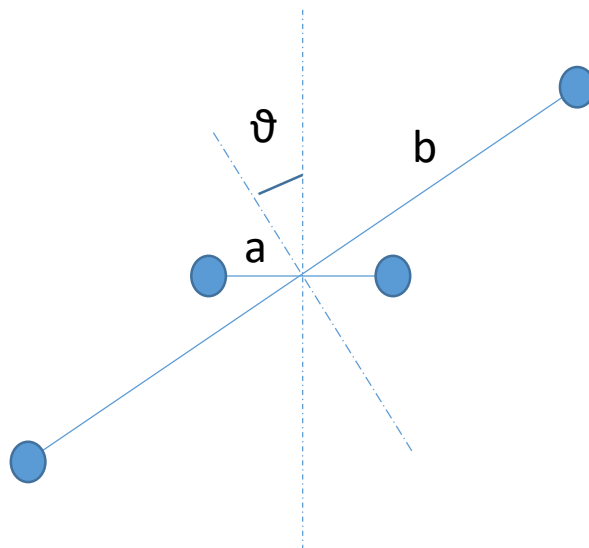
$$2.377. W_{1-2} = (\mu_0 \pi a^2 / 2b) I_1 I_2 \cos \xi$$

2.375. Два одинаковых коаксиальных круговых витка из сверхпроводника, каждый индуктивности L , расположены на большом расстоянии друг от друга. В каждом витке в одном и том же направлении течет ток I . Витки затем совместили. Найти:

- а) результирующий ток I' в каждом витке;
- б) приращение магнитной энергии системы.

$$2.375 \quad \text{а) } I' = I/2 \quad \text{б) } \Delta W = -LI^2/2$$

К задаче 2.377.

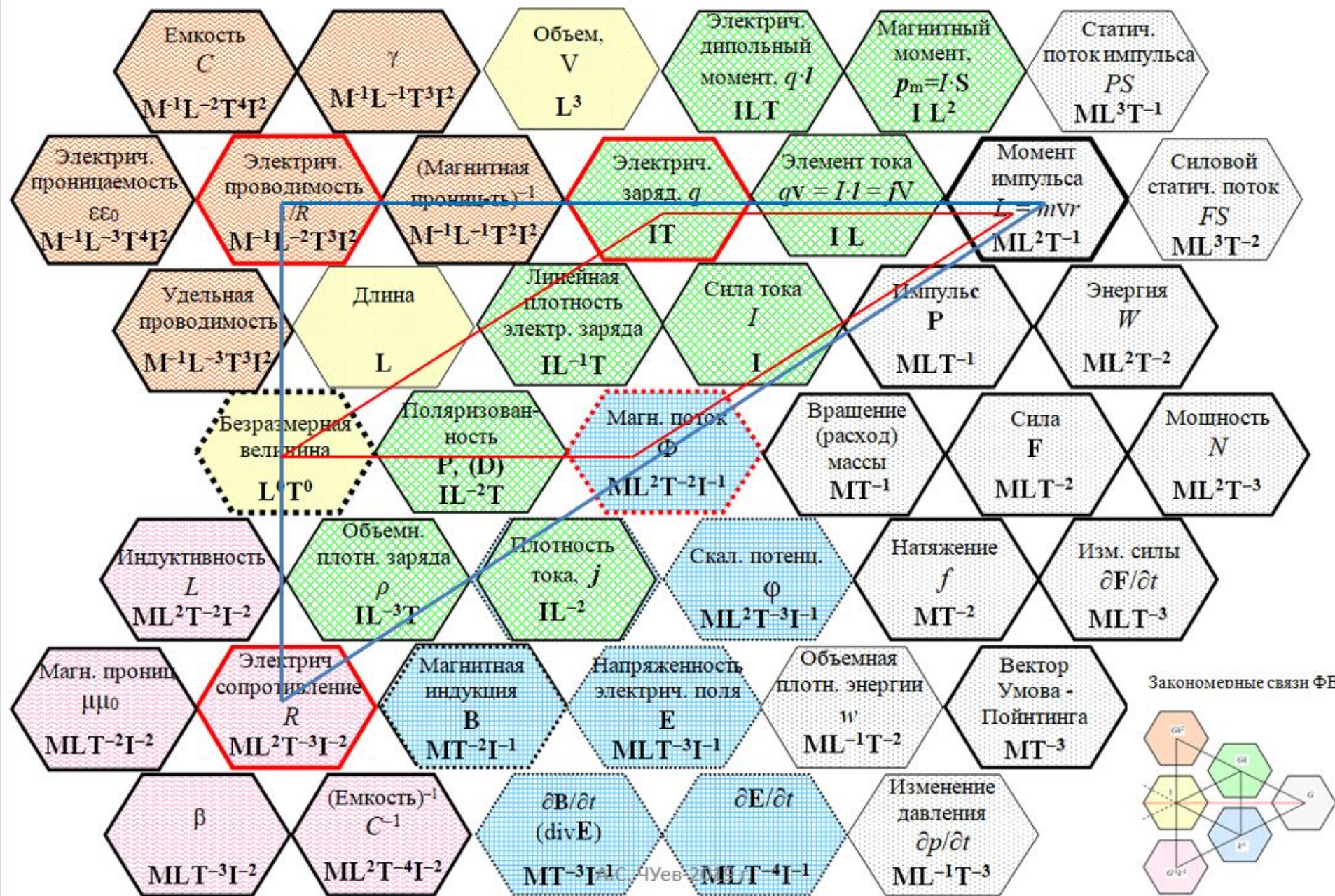


К задаче 2.375.



Задачу решать из условия неизменности начального и конечного значений магнитного потока.

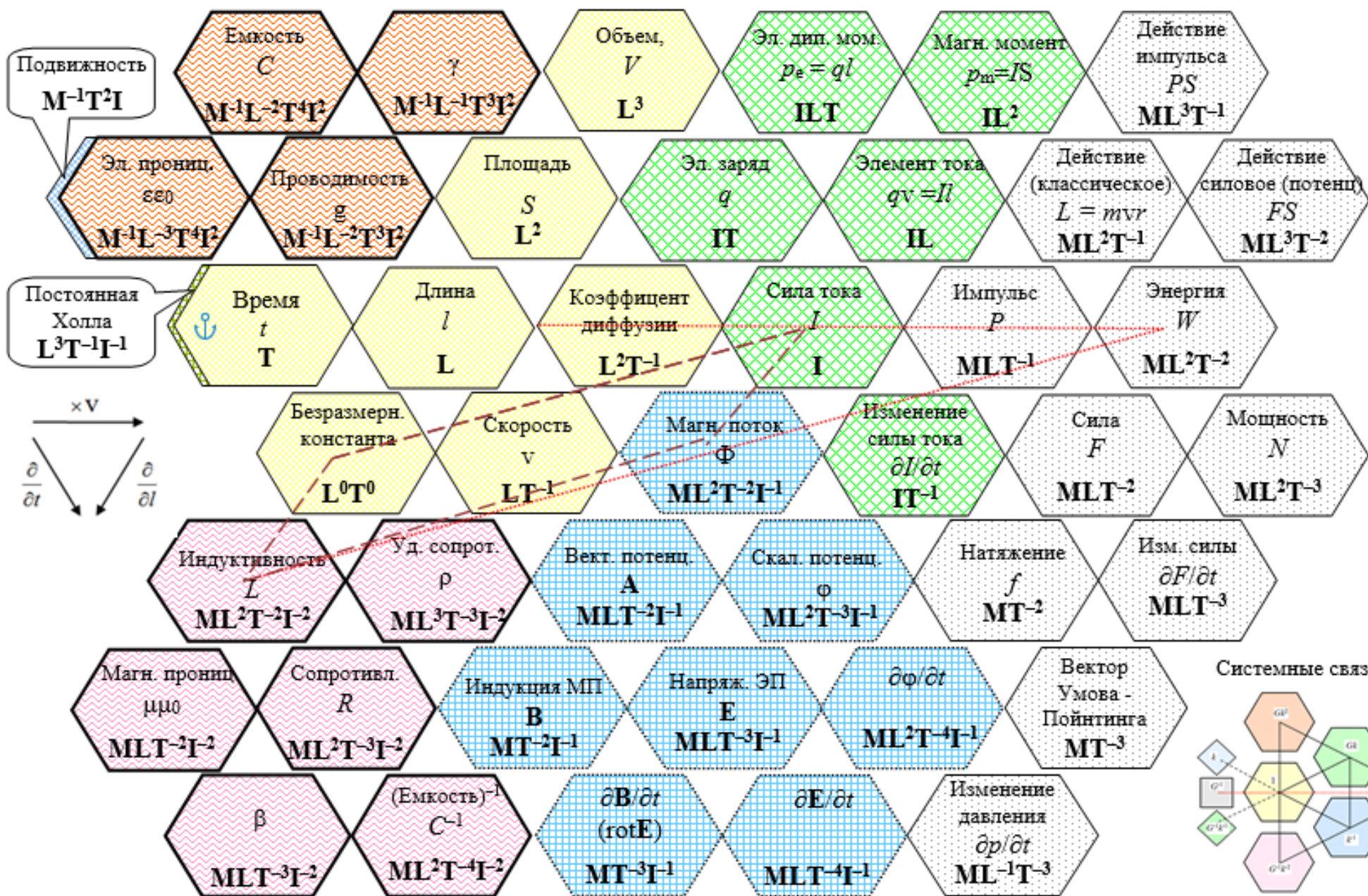
Опорные физические величины и связи системной структуры



СИСТЕМА ФВиз В ПЛАНАРНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ



МГТУ им.
Н.Э. Баумана





Спасибо за внимание