

Агентство образования администрации Красноярского края
Красноярский государственный университет
Заочная естественно-научная школа при КрасГУ

Физика: Модуль № 3 для 11 класса. Учебно-методическая часть. /
Сост: Н.М.Бордушко; КрасГУ. – Красноярск, 2006 —9 с.

ISBN 5-73-638-0704-9

Физика
Основы электродинамики.
Электромагнитная индукция

Модель №3 для 11 класса

Учебно-методическая часть

Печатается по решению Дирекции
Краевого государственного учреждения дополнительного образования
Заочная естественно-научная школа
при Красноярском государственном университете

Красноярск 2006

ISBN 5-7638-0704-9

© Красноярский
государственный
университет, 2006

Программа модуля

1. Понятия стационарного электрического и магнитного полей.

2. Поток вектора через произвольную поверхность. Теоремы о потоках напряженности электрического поля и магнитной индукции.

4. Понятие элементарной работы. Работа электрического поля по перемещению точечного заряда на конечное расстояние. Циркуляция вектора напряженности электрического поля.

5. Электромагнитная индукция. Закон электромагнитной индукции Фарадея. Правило Ленца. Разность потенциалов на концах движущегося в магнитном поле проводника.

6. Вывод выражения Э.Д.С. индукции из закона сохранения энергии.

7. Максвелловская трактовка явления электромагнитной индукции.

8. Понятие самоиндукции и взаимной индукции двух витков. Индуктивность проводов.

9. Принцип действия трансформатора. Коэффициент трансформации. Повышающий и понижающий трансформаторы.

10. Энергия, запасенная в катушке индуктивности.

Примеры решения задач. Контрольные вопросы, задачи и тесты.

Введение

Для чего предназначено данное пособие

Данное пособие предназначено для подготовки к решению задач по курсу «Электромагнитная индукция».

Пособие состоит из трех частей. В первой части приведены основные определения физических величин, единицы их измерения и формулы, связывающие величины между собой. Во второй части располагаются вывод формул и дополнительные теоретические данные, призванные помочь в освоении курса. В третьей части приведен пример решения и оформления задачи.

Как пользоваться пособием

Рекомендуется следующая последовательность действий при решении задач:

1. Изучить раздел "Индуктивность" школьного курса.
2. Охарактеризовать рассмотренное в задаче явление.
3. Выбрать физические величины, используемые в задаче.
4. Установить связь между величинами при помощи формул.
5. Выразить неизвестную величину в символьном виде.
6. Согласовать единицы измерения и подставить в формулу.
7. Получить ответ и округлить его до 2 значащих цифр.

Что еще почитать

Для более детального рассмотрения электромагнитной индукции рекомендуется почитать книги, приведенные в списке дополнительной литературы.

Часть I. Основные сведения

Физические величины

Определения

Φ \Rightarrow Поток вектора магнитной индукции через поверхность - это величина, равная произведению модуля вектора магнитной индукции B и площади проекции данной поверхности на плоскость, перпендикулярную направлению вектора магнитной индукции.

$E_{ин}$ \Rightarrow ЭДС (ЭлектроДвижущая Сила) индукции – ЭДС, возникающая в проводнике при изменении магнитного потока.

Правило для определения направления индукционного тока: Индукционный ток всегда направлен так, что его магнитное поле противодействует тому изменению магнитного потока, которое вызывает ток. Таким образом, при приближении магнита к свободно висящему контуру, контур будет отталкиваться от магнита, а при удалении магнита от контура – притягиваться.

E_c \Rightarrow ЭДС (ЭлектроДвижущая Сила) самоиндукции – ЭДС, возникающая в проводнике под действием магнитного поля, созданного самим проводником.

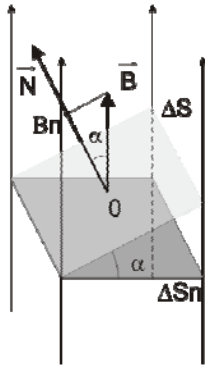
L \Rightarrow Индуктивность – это коэффициент пропорциональности между Магнитным потоком, проходящим через контур и электрическим током в контуре.

Индуктивность зависит от числа витков и формы проводника.

Обозначения

Здесь и ниже будут использованы следующие обозначения для физических величин:

Обозначение	Величина	Единица измерения
I	Эл. Ток	А (Ампер)
B	индукция магнитного поля	Тл (Тесла)
$E_{ин}$	ЭДС индукции	В (Вольт)
L	Индуктивность	Гн (генри)
W	энергия	Дж (Джоуль)



Связь единиц измерения

$$\Gamma_n = \text{Ом} \cdot \text{с} = \frac{B \cdot \text{с}}{A}$$

$$\text{Джс} = \frac{\text{кЭ} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} = B \cdot A \cdot \text{с}$$

$$\text{Тл} = \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2} = \frac{B \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$$

$$\text{Вб} = B \cdot \text{с}$$

Использование кратных приставок

В задачах могут встречаться приставки перед размерностями величин, ниже приведен список наиболее часто встречающихся.

Приставка	множитель	Значение
Нано	10^{-9}	0,000 000 001
Микро	10^{-6}	0,000 001
Мили	10^{-3}	0,001
Кило	10^3	1000
Мега	10^6	1000 000

Формулы, необходимые при решении задач

В данном разделе приведены формулы, необходимые при решении задач по курсу «Индуктивность». Вывод формул будет представлен ниже.

ЭДС индукции в движущемся проводнике:

$$E_{ин} = -B \cdot l \cdot v \cdot \sin(\beta),$$

где B – индукция магнитного поля, l – длина проводника, v – скорость проводника, β - угол между скоростью проводника и направлением магнитной индукции B

Магнитный поток через рамку с током

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos(\alpha)$$

где B – индукция магнитного поля, S – площадь контура, α – угол между вектором напряженности магнитного поля и направлением, перпендикулярным контуру.

ЭДС самоиндукции соленоида:

$$E_c = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

где $\Delta\Phi$ – изменение магнитного потока за интервал времени Δt .

Индуктивность

Индуктивность – коэффициент пропорциональности между магнитным потоком и силой тока в проводнике:

$$\Phi = L \cdot I,$$

Используя индуктивность, можно переписать выражение для

ЭДС самоиндукции

$$E_c = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Энергия магнитного поля проводника с током:

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

здесь L – индуктивность, I – ток в контуре.

Коэффициент трансформации

$$k = \frac{N_2}{N_1} = \frac{E_1}{E_2},$$

Здесь N – количество витков в обмотках трансформатора, E – напряжение в обмотках.

Часть II. Дополнительные сведения

Дополнительные сведения по математике

Интеграл

При вычислениях будет использовано понятие интеграла: предельное значение суммы при стремлении слагаемых к нулю, а их количества к бесконечности:

$$\int_{x_0}^{x_1} f(x) dx \equiv \lim_{\Delta \rightarrow 0} \sum f(x_i) \Delta x$$

Геометрический смысл интеграла – площадь, ограниченная кривой, осью Ox и прямыми $x = x_1$ и $x = x_2$.

Интегралы некоторых простых функций

Функция $f(x)$	Интеграл $F(x)$
1	x
x	$x^2/2$
$\sin(x)$	$-\cos(x)$
$\cos(x)$	$\sin(x)$

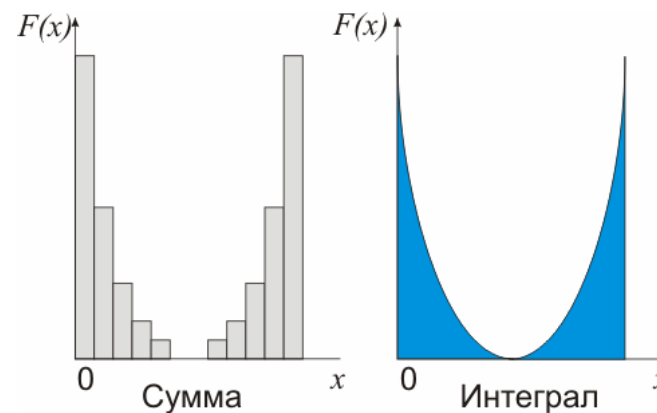


Рис.1 Интеграл и сумма

При вычислении определенных интегралов следует использовать формулу Ньютона:

$$\int_{x_0}^{x_1} f(x) dx = F(x_1) - F(x_0)$$

Поток вектора

Для удобства дальнейшего рассмотрения необходимо ввести следующее понятие: Поток вектора через плоскую площадку – произведение перпендикулярной составляющей вектора на площадь поверхности.

$$\Phi_{\vec{A}} = |\vec{A}| \cdot |\vec{S}| \cdot \cos(\alpha)$$

Для удобства такое произведение обозначают:

$$\Phi_{\vec{A}} = (\vec{A}, \vec{S})$$

Понятие потока вектора можно обобщить на криволинейные поверхности. Для этого поверхность разбивается на большое количество частей так, что в пределах каждой части кривизной поверхности и изменением вектора можно пренебречь и считают сумму потоков для всех частей поверхности:

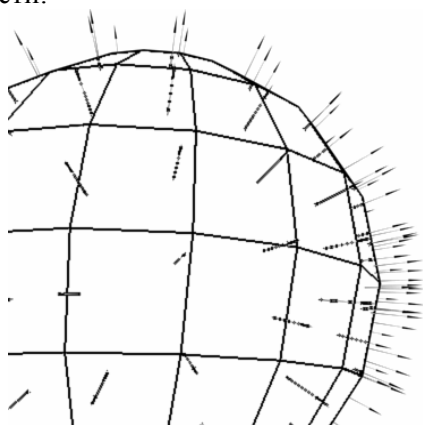


Рис 2. Вычисление потока через сумму

Таким образом, Общий поток будет равен сумме по всем элементам поверхности:

$$\Phi_{\vec{A}} = \sum (\vec{A}_i, \Delta \vec{S}_i)$$

Делая разбиения все более мелкими, получим в итоге:

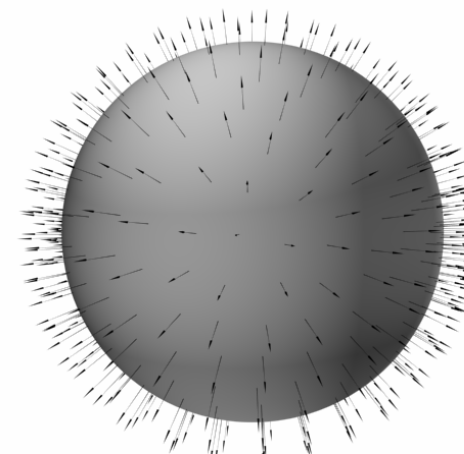


Рис2. Переходя к пределу, получаем поток вектора через криволинейную поверхность

Формула для расчета потока вектора через криволинейную поверхность:

$$\Phi_{\vec{A}} = \int_S \vec{A} \cdot \Delta \vec{S}$$

Векторное произведение

Для удобства дальнейшего изложения необходимо ввести еще одно понятие: векторное произведение.

$$\vec{c} = [\vec{a} \times \vec{b}]$$

Векторным произведением двух векторов будем называть вектор, перпендикулярный обоим векторам и численно равный произведению длин векторов на синус угла между ними.

Геометрическим смыслом векторного произведения является площадка, образованная двумя векторами. Величина векторного произведения равна площади, а направление – перпендикулярно площадке.

Обозначается векторное произведение квадратными скобками. Направление векторного произведения зависит от порядка векторов.

Поток электрического и магнитного полей

Теорема 1. Поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность пропорционален величине электриче-

ского заряда, находящегося внутри поверхности, и не зависит от формы поверхности.

$$\oint_S (\vec{E}, d\vec{S}) = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Теорема 2. Поток вектора магнитного поля через замкнутую поверхность равен нулю.

$$\oint_S (\vec{B}, d\vec{S}) = 0$$

Эти теоремы имеют наглядный физический смысл. Поток вектора образуется источниками поля. Равенство нулю потока означает отсутствие заряда внутри поверхности. Если представлять поле силовыми линиями, то поток будет пропорционален количеству линий, проходящих через поверхность. Для магнитного поля силовые линии замкнуты и через любую замкнутую поверхность количество входящих линий будет равно количеству исходящих. Что свидетельствует об отсутствии магнитных зарядов.

Работа по перемещению заряда в электрическом поле

На заряд, помещенный в электрическое поле, действует сила, под действием этой силы заряд начинает двигаться, при этом совершается работа. Работа идет на изменение кинетической энергии. Полная энергия системы зарядов должна сохраняться, поэтому говорят, что пробный заряд приобрел дополнительную кинетическую энергию за счет изменения потенциальной энергии взаимодействия.

Численно потенциальная энергия взаимодействия зарядов равна кинетической энергии, приобретаемой зарядом при движении под действием электрических сил из положения покоя до бесконечности (расстояния, на котором электрическим взаимодействием можно пренебречь).

Можно показать, что энергия поля, создаваемого неподвижными зарядами, зависит только от положения зарядов. Такое поле называют потенциальным. Работа по перемещению заряда в потенциальном поле по замкнутому контуру, таким образом равна нулю.

Для переменных полей такое правило в общем случае неверно. В такой ситуации работа по перемещению по замкнутому контуру отлична от нуля и называется циркуляцией вектора.

Определение электромагнитной индукции

Электромагнитной индукцией называется явление возникновения электрического поля в проводнике под действием магнитного поля.

Рассмотрим проводник, движущийся в постоянном магнитном поле. При движении на каждый заряд внутри проводника будет действовать сила Лоренца. Определяемая так:

$$\text{Сила Лоренца} \quad \vec{F}_L = [q \cdot \vec{v} \times \vec{B}]$$

Под действием этой силы заряды приходят в движение, то есть возникает электрический ток. Электрический ток будет тем больше, чем больше силовых линий за единицу времени пересечет проводник. Количество силовых линий, проходящих через площадку, замкнутую проводником, можно определить потоком вектора. Для численной характеристики явления удобно ввести понятие электродвижущей силы магнитной индукции.

Учитывая, что при движении проводника он пересекает силовые линии магнитного поля и учитывая определение полтока и векторного произведения, можно переписать значение ЭДС индукции в следующем виде.

$$\text{ЭДС самоиндукции} \quad \mathcal{E} = \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

Вывод формулы ЭДС самоиндукции из закона сохранения энергии

Рассмотрим плоский контур, одна сторона которого может без трения передвигаться по проводящим шинам. Контур находится в магнитном поле, перпендикулярном плоскости контура.

Под действием силы Ампера стержень приходит в движение. При этом будет совершена работа:

$$\Delta A = (\vec{F}_a, \Delta \vec{z}) = (I \cdot [\vec{B} \times \vec{l}], \Delta \vec{z}) = I \cdot B \cdot l \cdot \Delta z$$

При перемещении проводника площадь контура измениться на:

$$l \cdot \Delta z = \Delta S$$

Изменение потока магнитного поля, проходящего через контур, будет равно:

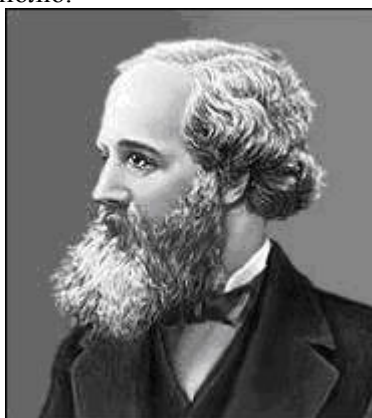
$$\Delta \Phi = B \cdot \Delta S = B \cdot l \cdot \Delta z$$

Таким образом, работа по перемещению проводника будет равна:

$$\Delta A = I \cdot \Delta \Phi$$

Максвелловская трактовка явления электромагнитной индукции

Согласно предположению Максвелла всякое переменное магнитное поле приводит к появлению в окружающем пространстве электрического поля. При наличии проводника это приводит к появлению индукционного тока. Важно, что электрическое поле возникает без электрических зарядов. Этот факт позволяет существовать свободному электромагнитному полю.



Джеймс Клерк Максвелл (англ. James Clerk Maxwell, 13 июня 1831, Эдинбург – 5 ноября 1879, Кембридж), английский физик

Индуктивность проводов

Электрический ток в проводнике приводит к появлению магнитного поля. Поток поля при этом будет тем больше, чем больше ток в проводнике. Коэффициент пропорциональности зависит от геометрических свойств проводника и называется индуктивностью или коэффициентом самоиндукции.

$$\Phi_{\vec{B}} = L \cdot I$$

При изменении геометрических свойств проводника, или при изменении силы тока в цепи возникает ЭДС:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi_{\vec{B}}}{\Delta t}$$

Знак минус при этом показывает, что препятствует изменению силы тока.

Трансформатор

Трансформатором переменного тока называется устройство, состоящее из двух катушек проводника, намотанных на один общий сердечник и предназначенное для преобразования тока и напряжения.

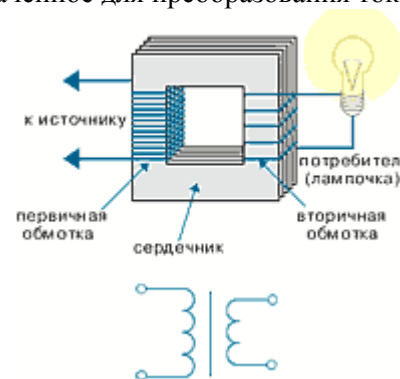


Схема действия трансформатора

При прохождении тока по первичной обмотке возникает магнитный поток. Так как катушки находятся на одном сердечнике, то магнитный поток внутри каждой и обмоток одинаковый:

$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Отношение числа витков во вторичной обмотке к числу витков в первичной обмотке и называется коэффициентом трансформации.

$$k = \frac{N_2}{N_1} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$

При коэффициенте трансформации меньше 1 напряжение понижается и трансформатор называется понижающим, в противном случае – повышающим.

Вывод формулы расчета энергии, запасенной в индуктивности

При замыкании контура в цепи возникает ЭДС индукции, препятствующая изменению магнитного потока. Поэтому, для того чтобы

в цепи с индуктивностью L установился ток I , необходимо совершить работу против ЭДС самоиндукции. Работу совершает подключенный к цепи источник тока. Энергия запасается в магнитном поле контура, она равна:

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

Рассмотрим вывод этой формулы,

Работа, совершаемая источником тока по переносу зарядов против сил самоиндукции, равна:

$$\Delta A = E_c \Delta Q = E_c I(t) \Delta t$$

где $I(t)$ – мгновенное значение тока в момент времени t .

Учитывая ЭДС самоиндукции:

$$E_c = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Получаем формулу для приращения работы:

$$\Delta A = I(t) \Delta t \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = I(t) \Delta \Phi$$

Подставляя формулу для изменения магнитного потока:

$$\Delta \Phi = L \Delta I$$

получим:

$$\Delta A = LI(t) \Delta I$$

ЭДС самоиндукции равна.

$$E_c = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

За время Δt через контур переносится заряд $\Delta Q = I \Delta t$. При переносе заряда источник тока совершает работу

$$\Delta A = -E_c \Delta Q = -E_c I \Delta t$$

Для определения всей работы необходимо выполнить суммирование и сделать предельный переход $\Delta I \rightarrow 0$.

$$A = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \sum_{\Delta I} LI(t) \Delta I = \int_0^I L i di = L \int_0^I i di = \frac{LI^2}{2}$$

По закону сохранения энергии вся работа, затраченная источником на изменения тока в контуре, переходит в энергию магнитного поля, мы получаем необходимую формулу.

Пример решения задач

В данном разделе приводится пример решения задачи. Последовательность действий может отличаться от предложенной ниже.

Тем не менее, рекомендуется придерживаться следующей последовательности действий:

1. Выписать все имеющиеся в задаче данные с учетом единиц измерения.
2. Назвать явление, рассмотренное в задаче.
3. (При необходимости) сделать чертеж.
4. Привести формулы, связывающие известные величины с неизвестными.
5. Выразить искомую величину через известные в символьном виде.
6. Подставить исходные данные, и согласовать единицы измерения.
7. Получить ответ и (при необходимости) округлить его до двух значащих цифр.

Задача

Найти скорость изменения магнитного потока в соленоиде из 2000 витков при возбуждении в нем ЭДС индукции 120 В.

Дано:

$$N = 2000$$

$$E = 120 \text{ В}$$

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} - ?$$

Решение

В задаче идет речь о явлении самоиндукции.

$$E_c = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

выражая из этой формулы скорость изменения потока, находим:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{E_c}{N}$$

Подставляя исходные данные, находим:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{120 \text{ В}}{2000} = -0,06 \text{ В} =$$

$$= -0,06 \text{ Вб} / \text{с} = -60 \text{ мВб} / \text{с}$$

Ответ: 60 мВб/с

Список литературы

Основная:

1. Рымкевич А.П., Рымкевич П.А. Сборник задач по физике для 8 – 10 классов средней школы. – 5-е изд. – М.: Просвещение, 1980. – 160 с., ил.
2. Мустафаев Р.А., Кривцов В.Г. Физика в помощь поступающим в вузы. – М.: Высш. шк., 1989. – 496 с., ил.

Дополнительная:

1. Сборник задач и вопросов по физике для средних и специальных учебных заведений / Под ред. Р.А. Гладковой. - 7-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. ред. физ. – мат. лит., 1988. – 384 с., ил.
2. Физика: Сборник задач для проведения устного экзамена по физике за курс средней школы. 11 кл. – 2-е изд., стереотип. – М.: Дрофа, 2000. – 192 с.: ил.

Физика: Основы электродинамики. Электромагнитная индукция

Учебно-методическая часть

Модуль №3 для 11 класса

Составитель: Николай Михайлович Бордушко

Редактор: О.Ф.Александрова

Корректурa автора

Подписано в печать 25.12.2006.

Формат 60x84/16.

Бумага газетная.

Печать ризографическая.

Усл. печ. л. 0,5.

Тиражируется на электронных носителях

Адрес в Internet: zensh.ru/resources

Отдел информационных ресурсов управления информатизации КрасГУ
660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 79, ауд. 22-05, e-mail: info@lan.krasu.ru

Издательский центр Красноярского государственного университета
660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 79, e-mail: rio@lan.krasu.ru