

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ .
Закон Фарадея–Максвелла**

Методические указания
к лабораторной работе

Составитель: *Е. Л. Казакова*, канд. физ.-мат. наук, доцент
А.И. Назаров, д.п.н., доцент

Рецензент: *В. С. Кривченкова*, канд. физ.-мат. наук, доцент

Петрозаводск
2007

Изучение явления электромагнитной индукции. Закон Фарадея-Максвелла

Цель работы: исследовать явление электромагнитной индукции для случая неподвижного контура, находящегося в переменном магнитном поле.

Задачи:

1. Ознакомиться с принципом измерения импульса ЭДС индукции, возникающий в неподвижной катушке при движении сквозь нее постоянного магнита, и методами обработки полученного сигнала.
2. Исследовать зависимость импульса ЭДС индукции от скорости движения магнита.
3. Установить зависимость потокосцепления через витки катушки от скорости движения магнита и проверить закон Фарадея-Максвелла.

Приборы и принадлежности.

1. Базовый измерительный блок «Кобра-3».
2. Источник постоянного напряжения на 12 В.
3. Набор стеклянных трубок различной длины.
4. Держатель катушки.
5. Катушка, 600 витков.
6. Катушка, 1200 витков.
7. Постоянный магнит диаметром $d = 8$ мм и длиной $l = 60$ см.
8. Источник постоянного напряжения на 5 В.
9. Фотозатвор.

Теоретическое введение

Явление электромагнитной индукции

В 1831 г. М. Фарадеем было сделано одно из наиболее важных открытий – явление электромагнитной индукции. Оно заключается в том, что в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, охватываемого этим контуром, возникает переменный электрический ток, который называется индукционным.

Фарадей обнаружил, что индукционный ток в проводящем контуре можно вызвать двумя различными способами:

- 1 – при перемещении замкнутого проводящего контура в стационарном магнитном поле;
- 2 – при изменении магнитного поля, в котором находится неподвижный контур.

Появление индукционного тока обусловлено тем, что при изменении магнитного потока в контуре возникает ЭДС индукции ε_i . Величина ε_i не зависит от того, каким образом осуществляется изменение магнитного потока Φ – потока вектора магнитной индукции через поверхность S , и определяется лишь скоростью его изменения $d\Phi/dt$. Изменение знака производной $d\Phi/dt$ приводит к изменению знака ЭДС индукции.

Правило Ленца

Направление индукционного тока (а значит и знак ЭДС индукции) определяются правилом Ленца: индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, его вызывающей. Иначе говоря, индукционный ток создает магнитный поток, препятствующий изменению магнитного потока, вызывающего этот ток.

Рассмотрим пример (рис. 1). Магнит подносят северным полюсом к замкнутому проводящему витку. Магнитный поток, пронизывающий виток, увеличивается. Поскольку направление индукционного тока I и вектора индукции \mathbf{B}_i связаны правилом правого винта, для того чтобы препятствовать увеличению магнитного потока, линии индукции магнитного поля \mathbf{B}_i должны быть направлены в противоположную сторону по отношению к линиям индукции магнитного поля магнита.

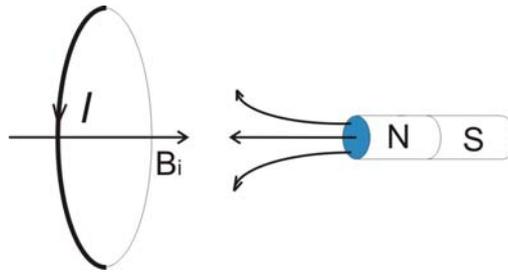


Рис. 1. Иллюстрация к правилу Ленца.

Закон электромагнитной индукции

При изменении магнитного потока, охватываемого замкнутым проводящим контуром, в контуре возникает ЭДС индукции, пропорциональная скорости изменения магнитного потока:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (1)$$

Знак минус в формуле обусловлен правилом Ленца.

Магнитный поток через поверхность S по определению равен:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}. \quad (2)$$

Если замкнутый контур, в котором индуцируется ЭДС, состоит из N витков, то полный магнитный поток, охватываемый всеми витками (потокосцепление) Ψ , определяется как

$$\Psi = \sum_{k=1}^N \Phi_k, \quad (3)$$

где Φ_k – магнитный поток, охватываемый одним витком.

В этом случае ε_i будет равна сумме ЭДС, индуцируемых в каждом из витков, и рассчитывается как:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt}. \quad (4)$$

Если магнитный поток, охватываемый каждым витком, одинаков и равен Φ , то ЭДС индукции, возникающая в контуре определяется как:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (5)$$

Причины возникновения ЭДС индукции

1. Контур движется в стационарном магнитном поле.

При движении проводника в магнитном поле его свободные электроны под действием силы Лоренца приводятся в движение относительно проводника, т.е. в проводнике возникает электрический ток. Это явление называется индукцией токов в движущихся проводниках.

Рассмотрим прямолинейный участок DG проводника (рис. 2), который, двигаясь со скоро-

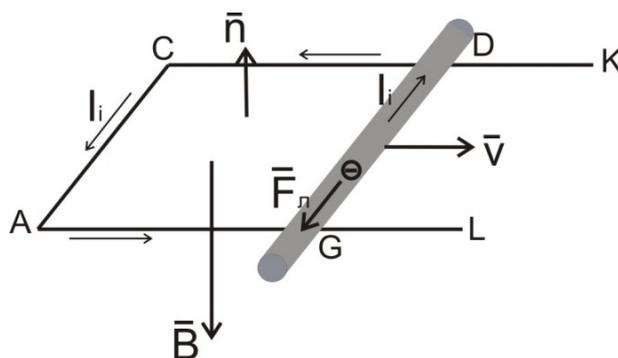


Рис. 2. Индукция в движущихся проводниках.

стью v , скользит по проводникам СК и АL как направляющим, постоянно сохраняя контур AGDCA замкнутым.

Индукция \mathbf{B} внешнего однородного магнитного поля перпендикулярна плоскости, в которой лежит контур. На заряды в движущемся проводнике DG действует сила Лоренца

$$\vec{F}_л = q[\vec{v} \times \vec{B}], \quad (6)$$

коллинеарная DG. Свободные заряды приходят в движение и образуют электрический ток в контуре AGDCA. Таким образом, на участке DG действует сторонняя сила – сила Лоренца. Работа этой силы по перемещению единичного заряда равна ЭДС, возникшей на участке DG:

$$(\varepsilon_1)_{DG} = \int_G^D \vec{E}_{\text{стор}} \cdot d\vec{l} = \int_G^D [\vec{v} \times \vec{B}] \cdot d\vec{l} = vBL, \quad (7)$$

где $E_{\text{стор}} = F_л/q$ – напряженность поля сторонних сил.

На неподвижных участках замкнутого контура ЭДС не образуется. Поэтому ЭДС индукции в замкнутом контуре AGDCA, вызванная движением его части DG во внешнем поле, равна

$$\varepsilon_i = \int_{AGDCA} \vec{E}_{\text{стор}} \cdot d\vec{l} = vBL. \quad (8)$$

Выразив скорость проводника DG в виде

$$v = dx/dt, \quad (9)$$

где x – координата его контактов точках D и G с направляющими проводниками, запишем (8) в виде

$$\varepsilon_i = LB \frac{dx}{dt}. \quad (10)$$

Примем во внимание, что

$$\Phi = -\mathbf{B} \cdot \mathbf{S} = -B \cdot x \cdot L \quad (11)$$

есть величина, равная потоку магнитной индукции сквозь поверхность, ограниченную контуром AGDCA. Знак минус в (11) показывает, что вектора \mathbf{B} и $d\mathbf{S}$ (вектор нормали \mathbf{n}) противоположны по направлению.

Из приведенных рассуждений следует, что (8) является частным случаем закона электромагнитной индукции (1).

Отметим, что полученный результат справедлив для любого контура, движущегося произвольным образом в стационарном магнитном поле.

Итак, возбуждение ЭДС индукции при движении контура в стационарном магнитном поле объясняется действием силы Лоренца, т. е. взаимодействием между движущимся зарядом и стационарным магнитным полем.

2. Контур покоится в переменном магнитном поле.

Опыт показывает, что изменяющееся во времени магнитное поле вызывает в замкнутом покое контуре индукционный ток. Возникновение этого тока обусловлено наличием сторонних сил. Какова их природа? Это не может быть сила Лоренца, как в 1-ом случае, т.к. проводник неподвижен.

Максвелл предположил, что изменяющееся во времени магнитное поле приводит к появлению в пространстве электрического поля. При этом проводники играют второстепенную роль, т.к. поле существует как в проводнике, так и вне него, однако в проводнике под действием этого электрического поля заряды приходят в движение.

Это электрическое поле существенно отличается от электростатического: оно не потенциальное, а вихревое. Силовые линии вихревого электрического поля замкнуты. Работа сил вихревого электрического поля при перемещении заряда по замкнутому контуру не равна нулю:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = \varepsilon_i. \quad (12)$$

В этом случае закон электромагнитной индукции (1) имеет вид:

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{L} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}. \quad (13)$$

Здесь символ частной производной по времени ($\partial/\partial t$) подчеркивает тот факт, что контур L и поверхность, охватываемая контуром – неподвижны.

Правую часть в равенстве (13) преобразуем с учетом (2) для магнитного потока:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}, \quad (14)$$

причем производная по времени внесена под знак интеграла на том основании, что площадь интегрирования не зависит от времени.

С учетом (1), (12) и (14) получаем, что циркуляция вектора напряженности электрического поля по замкнутому контуру L равна со знаком минус производной по времени от магнитного потока через поверхность, ограниченную данным контуром:

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{L} = -\int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}. \quad (15)$$

Уравнение (15) входит в систему уравнений Максвелла для электромагнитного поля и выражает тот факт, что переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

Методика эксперимента

В случае движения постоянного магнита сквозь катушку вследствие изменения магнитного потока, пронизывающего витки катушки, в ней возникает импульс ЭДС индукции (2) и (5).

Для регистрации импульса ЭДС индукции в опыте используется автоматизированная установка на основе базового измерительного блока "Кобра-3", подключенная к компьютеру. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 3. Обработка полученных результатов производится с помощью программы «Phywe measure».

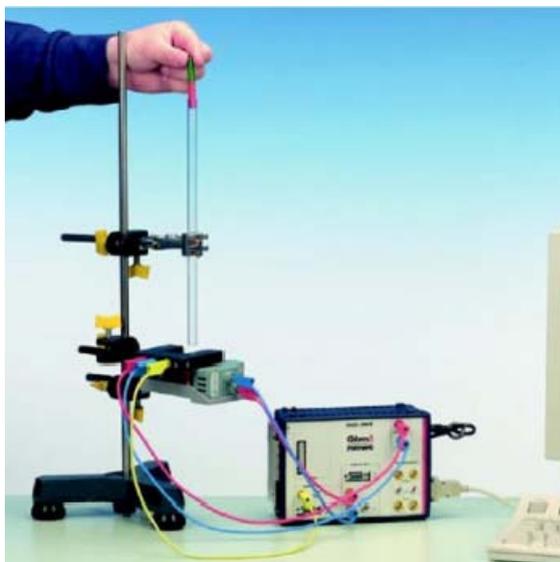


Рис.3 Общий вид установки

Магнит бросают через стеклянную трубку, стенки которой обеспечивают его поступательное движение по направлению к катушке. Перед тем, как попасть в катушку магнит проходит через фотозатвор.

Меняя высоту падения магнита, можно варьировать его скорость v перед входом в катушку, а, следовательно, и скорость изменения магнитного потока $d\Psi/dt$, сцепленного с витками катушки ($d\Psi/dt \sim v$).

Скорость магнита перед входом в катушку определяется как

$$v = l/\Delta t, \quad (16)$$

где l – длина магнита,

Δt – время прерывания сигнала фотозатвора при прохождении сквозь него постоянного магнита.

Фотозатвор представляет собой инфракрасный передатчик и приемник. При открытом фотозатворе напряжение U_1 на выходе равно ~ 5 В, при закрытом – 0 В. Магнит, пересекая луч света между передатчиком и приемником, последовательно открывает и закрывает фотозатвор. Сигнал от фотозатвора U_1 передается на вход «Analog In 1» установки «Кобра-3» и регистрируется с помощью программы «Phywe measure» в виде графика зависимости $U_1(t)$ (рис. 4).

Импульс ЭДС индукции регистрируется на входе «Analog In 2» установки «Кобра-3» и отображается в виде графика зависимости $U_2(t)$ (рис. 4). Изменение полного магнитного потока (потокосцепления) $\Delta\Psi$, пронизывающего витки катушки при движении магнита, определяется согласно закону электромагнитной индукции (4):

$$\Delta\Psi = \int |U_2| \cdot dt, \quad (17)$$

где $U_2 = \varepsilon_i$.

Изменение полного магнитного потока согласно (17) определяется как площадь фигуры, ограниченной графиком $U_2(t)$ и осью абсцисс (рис. 5). Эту площадь можно вычислить программными средствами.

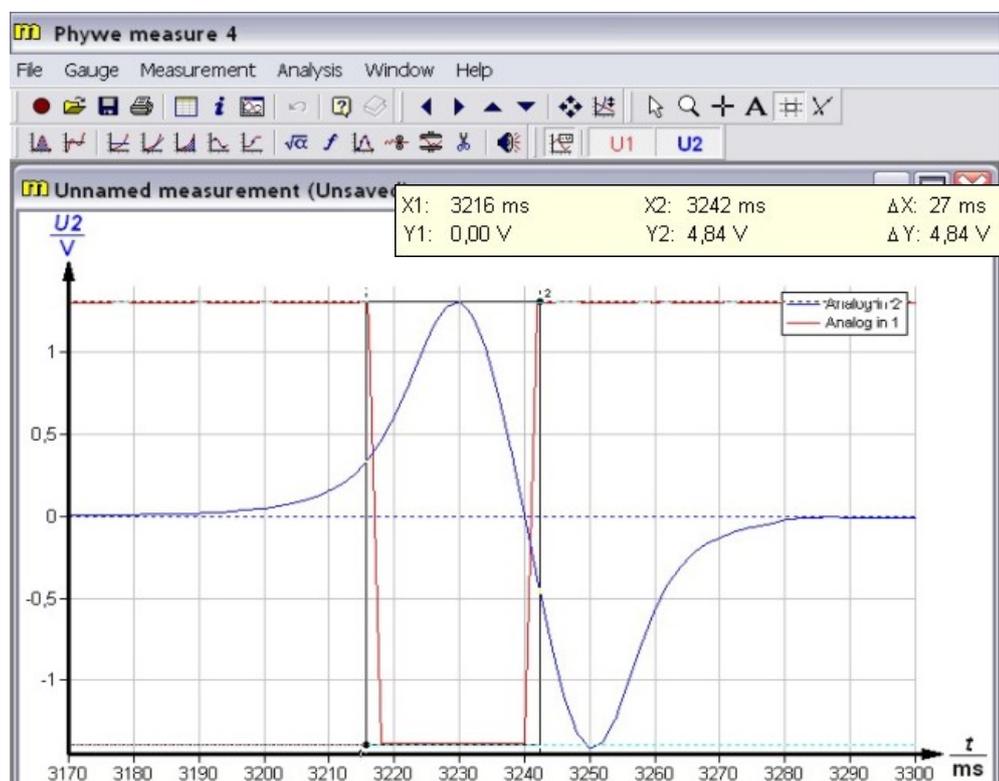


Рис.4. Зависимости напряжения на выходе фотозатвора U_1 и ЭДС индукции U_2 от времени.

U_1 – прямоугольный импульс,

U_2 – сигнал сложной формы.

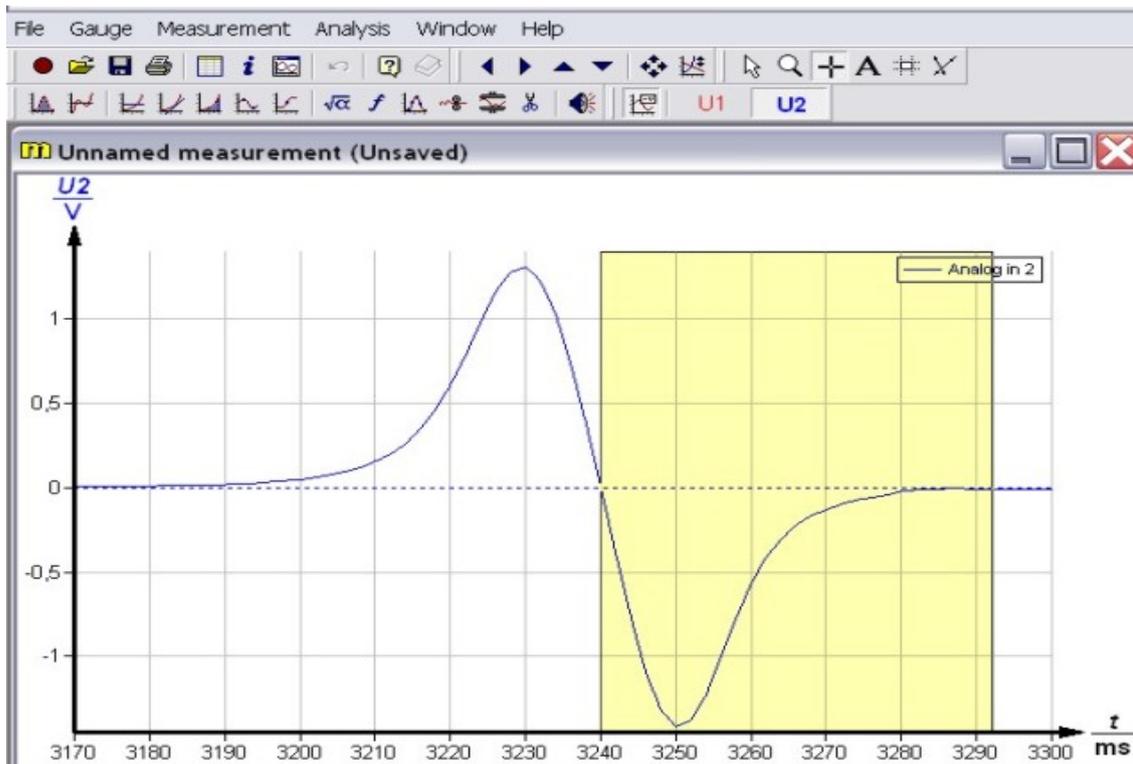


Рис. 5. Расчет магнитного потока

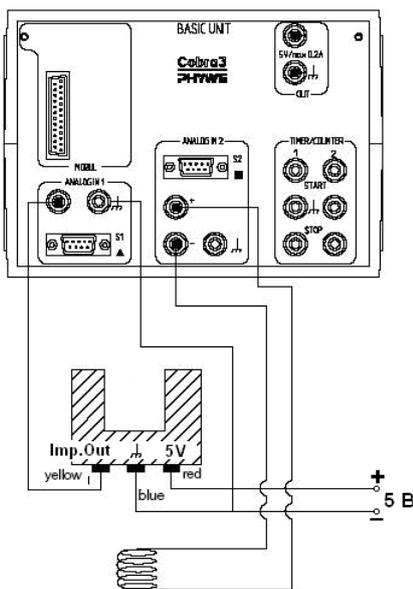


Рис.6. Электрическая схема установки

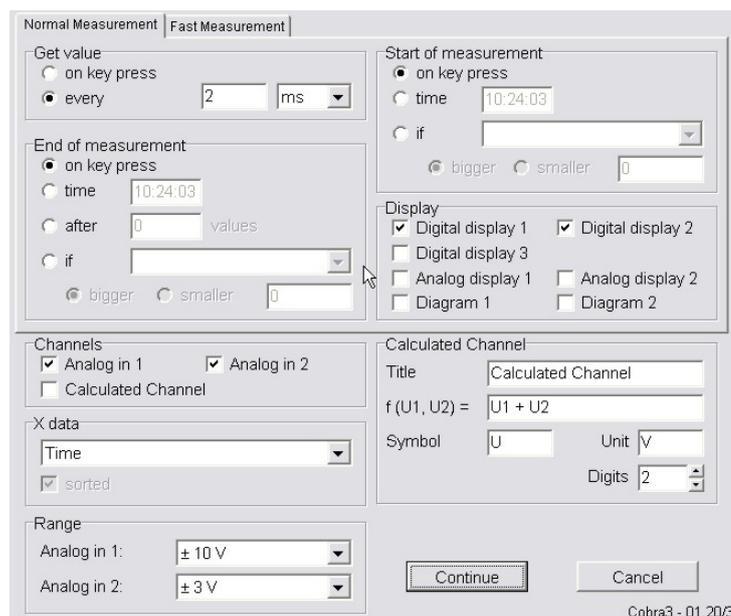


Рис.7. Параметры измерения

Порядок измерений

1. Соберите установку, как показано на рис. 3 и рис. 6.
2. Расположите фотозатвор над катушкой без зазора.
3. Стеклообразную трубку установите таким образом, чтобы магнит при падении пересекал луч света между передатчиком и приемником фотозатвора.
4. Включите питание блока «Кобра-3».
5. Запустите программу «Phywe measure», в строке меню выберите пункт «Gauge» - "Cobra 3 Universal Writer".
6. Установите параметры измерения, как указано на рис.7. и нажмите «Continue». На экране будут отображены лицевые панели цифровых приборов, с помощью которых регистрируются напряжение на выходе фотозатвора U_1 и импульс ЭДС индукции U_2 .

7. Начните измерения, нажав кнопку «Start measurement».
8. Отпустите магнит в стеклянную трубку. После прохождения магнита через катушку завершите процедуру измерения, нажав кнопку «Stop measurement». Чтобы избежать повреждения магнита и поверхности стола рекомендуется поймать магнит рукой.
9. Для расчета скорости движения магнита перед его попаданием в катушку (16) измерьте время прерывания сигнала фотозатвора Δt . Для этого используйте опцию «Обзор» (“Survey”) (рис. 4).
10. С помощью опции «Обзор» измерьте размах импульса ЭДС индукции U_2 (рис. 4).
11. Вычислите площадь, ограниченную графиком $U_2(t)$ и осью абсцисс. Для этого в меню Analysis используйте опцию «Показать интеграл» («Show integral») (рис. 5). Расчет площади проведите для "верхней" и "нижней" частей кривой ($\Delta\Psi_1$ и $\Delta\Psi_2$).
12. Результаты расчета скорости магнита v , размаха импульса $U_2 = \varepsilon_i$, потокосцеплений $\Delta\Psi_1$ и $\Delta\Psi_2$ занесите в таблицу.
13. Повторите эксперимент, меняя скорость падения магнита.
14. По результатам измерений постройте графики зависимости $\varepsilon_i(v)$ и $\Delta\Psi(v)$.
15. Поставьте катушку с другим числом витков и повторите эксперимент.
16. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое магнитный поток? Потокосцепление?
2. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
3. Запишите закон электромагнитной индукции.
4. Как определить направление индукционного тока в контуре?
5. Физический смысл правила Ленца.
6. Какова причина возникновения ЭДС индукции при движении проводника в стационарном магнитном поле?
7. Каковы условия возникновения ЭДС индукции в неподвижном контуре?
8. Как меняется полный магнитный поток, пронизывающий витки катушки, при движении магнита сквозь нее?
9. Почему при прохождении магнита сквозь катушку ЭДС индукции меняет знак?
10. Как можно объяснить тот факт, что зависимость импульса ЭДС индукции от времени не являются симметричной относительно горизонтальной оси?

Индивидуальное задание

1. По результатам экспериментов для каждой катушки рассчитайте величину ЭДС индукции, возникающую в одном витке (для максимальной и минимальной скоростей магнита).
2. Рассчитайте заряд, протекший по виткам катушки за время движения магнита.
3. Определите направление индукционного тока в витке (рис. 1), если магнит:
 - а) приближается к витку южным полюсом;
 - б) отдаляется от витка (южный полюс обращен к витку);
 - в) отдаляется от витка (северный полюс обращен к витку).
 Как будет вести себя виток: отталкиваться от магнита или притягиваться?
4. Оцените скорость магнита при выходе из катушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1970.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. М.: Наука, 1978, Т.2.
3. Сивухин Д.В. Курс общей физики. М.: Наука, 1977, Т.3.
4. Яворский Б.М., Пинский А.А. Основы физики. М.: Наука, 1972, Т.2.
5. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Мильковская Л.Б. Курс физики. М.: Высшая школа, 1977, Т.2.
6. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
7. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. М.: Высшая школа, 1983.