

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра физики, электротехники и автоматики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ФИЗИКЕ
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №49
для студентов всех специальностей

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ВЗАИМОИНДУКЦИИ

Казань
2015

УДК 539.1

Составитель Хакимов А. М.

Под редакцией Алексеева В. В., Маклакова Л. И.

Методические указания лабораторная работа №49 по физике для студентов всех специальностей. Изучение явления взаимоиндукции / Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Составитель Хакимов А. М. Казань, 2015 г., 14 с.

В работе изложены вопросы, связанные с явлениями электромагнитной индукции и самоиндукции. Описывается и изучается явление взаимоиндукции.

Рис. 4, Илл.2, табл. 1

Рецензент: доцент кафедры электротехники и автоматики Казанского государственного архитектурно-строительного университета д.ф.-м.н. Р. К. Сафиуллин

© Казанский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2007 г.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Известно, что вокруг проводников, по которым течёт электрический ток, существует магнитное поле. Для его характеристики используется физическая величина, называемая индукцией магнитного поля, обозначаемая через \vec{B} . Существует два вида магнитных полей: однородное и неоднородное. **Магнитное поле** называется **однородным**, если в любой его точке вектор \vec{B} одинаков. В противном случае поле неоднородное. Для исследования магнитных полей применяется пробный контур. **Пробным контуром** (витком с током) называют *столь малый замкнутый контур, по которому течёт постоянный ток, если в его пределах магнитное поле можно считать однородным*. Пробный контур характеризуют магнитным моментом \vec{p}_m . Его модуль равен $p_m = IS$, где I — сила тока, S — площадь контура. Вектор \vec{p}_m направлен перпендикулярно плоскости контура в соответствии с **правилом правого винта**: *при вращении винта по направлению тока его поступательное движение (направление, в котором вворачивается винт) указывает направление магнитного момента*. Магнитный момент измеряется в $A \cdot m^2$. Если пробному контуру дать возможность свободно установиться в окрестности произвольной точки магнитного поля, то направление \vec{p}_m совпадает с направлением вектора магнитной индукции \vec{B} в этой точке. В этом случае пробный контур находится в положении устойчивого равновесия, и на него не действует момент силы. Если контур вывести из положения равновесия, то на него будет действовать момент сил, стремящийся вернуть его в положение равновесия. Этот момент сил будет наибольшим (максимальным), когда магнитный момент контура перпендикулярен к направлению поля. Тогда модуль магнитной индукции в некоторой точке магнитного поля равен отношению максимального момента силы, действующего на пробный контур, находящийся в этой точке, к магнитному моменту контура, т. е.

$$B = \frac{M_{\max}}{p_m}. \quad (1)$$

В системе единиц СИ индукция магнитного поля измеряется в теслах (Тл).

МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Магнитным потоком через некоторую поверхность называют *число линий магнитной индукции, пронизывающих её*. Магнитный поток Φ_B через площадку S вычисляется по формуле

$$\Phi_B = \int_S B_n \cdot dS, \quad (2)$$

где B_n — проекция индукции магнитного поля \vec{B} на нормаль к площадке в месте её расположения. В системе СИ магнитный поток измеряется в веберах.

Если по замкнутому контуру течёт постоянный ток силы I , то возникает магнитное поле, которое пронизывает площадку, охваченную контуром. Магнитный поток Φ_B через площадь контура оказывается пропорциональным силе тока, т. е. $\Phi_B = LI$. Коэффициент пропорциональности L называют **индуктивностью проводника**. Единица индуктивности — генри.

ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Явление электромагнитной индукции заключается в следующем: *при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего площадь, охватываемую проводящим контуром, в нём возникает электродвижущая сила*. Её называют **э. д. с. индукции**. Согласно закону Фарадея, **э. д. с. индукции** равна скорости изменения магнитного потока через площадь, ограниченную контуром, т. е.

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (3)$$

Если контур замкнут, то под действием э. д. с. появляется электрический ток, называемый **индукционным**. Направление индукционного тока определяется **правилом Ленца**: *индукционный ток всегда имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, которое вызывает этот ток*. Из этого следует, что при возрастании магнитного потока возникающий индукционный ток будет иметь такое направление, чтобы порождаемое им магнитное поле было направлено против внешнего поля, противодействуя увеличению магнитного потока. Уменьшение магнитного потока, наоборот, приводит к появлению индукционного тока, создающего магнитное поле, совпадающее по направлению с внешним полем.

ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ

Явление возникновения э. д. с. в том же проводнике, по которому течёт переменный ток, называют **самоиндукцией**, а саму э. д. с. — **э. д. с. самоиндукции**. Возникновение э. д. с. самоиндукции объясняется следующим. Переменный ток, проходящий по проводнику, порождает вокруг себя переменное магнитное поле, которое в свою очередь, создаёт магнитный поток, изменяющийся со временем, через площадь, ограниченную проводником. Согласно явлению электромагнитной индукции, это изменение магнитного потока и приводит к появлению э. д. с. самоиндукции.

Величину э. д. с. самоиндукции находим с помощью закона электромагнитной индукции: $\mathcal{E}_s = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -L\frac{dI}{dt}$. Этот закон выполняется, если контур или проводник с током находится в неферромагнитных средах.

ЯВЛЕНИЕ ВЗАИМОИНДУКЦИИ

Рассмотрим два контура, по которым текут токи силами I_1 и I_2 (рис. 1). На рис. 1 сплошными линиями изображены линии индукции магнитного поля, создаваемого током, текущим по первому контуру, штриховыми — по второму. Индуктивность контуров соответственно равна L_1 и L_2 . Полный магнитный поток через площадь первого контура равен сумме магнитных потоков, создаваемых этими токами:

$$\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{12}, \quad (4)$$

где Φ_{11} — магнитный поток сквозь первый контур, созданный током I_1 ; Φ_{12} — та часть магнитного потока, созданная током I_2 , которая пронизывает площадь первого контура. Аналогично полный магнитный поток, который пронизывает площадь второго контура:

$$\Phi_2 = \Phi_{22} + \Phi_{21}. \quad (5)$$

Магнитные потоки в каждом контуре пропорциональны силе тока в них, т. е.

$$\Phi_{11} = L_1 I_1, \quad \Phi_{22} = L_2 I_2. \quad (6)$$

Φ_{12} — это часть магнитного потока, которая проходит через площадь первого контура, обусловленная магнитным полем, создаваемым током силой I_2 второго контура. Поэтому эта часть потока пропорциональна силе тока I_2 , т.е.

$$\Phi_{12} = L_{12} I_2, \quad (7)$$

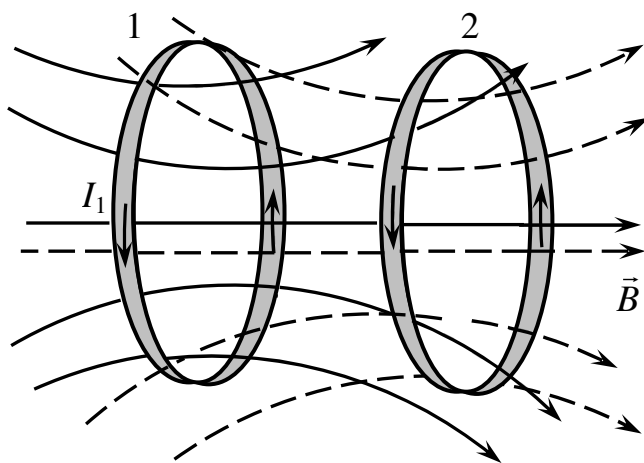


Рис. 1

где L_{12} — коэффициент взаимной индукции первого контура. Аналогично для второго контура

$$\Phi_{21} = L_{21} I_1. \quad (8)$$

Тогда, учитывая (6) — (8), уравнения (4) и (5) перепишем в виде:

$$\Phi_1 = L_1 I_1 + L_{12} I_2; \quad \Phi_2 = L_2 I_2 + L_{21} I_1. \quad (9)$$

Э. д. с. индукции, которые возникают в контурах, будут равны:

$$\varepsilon_{i1} = -\frac{d\Phi_1}{dt} = -L_1 \frac{dI_1}{dt} - L_{12} \frac{dI_2}{dt} \text{ и } \varepsilon_{i2} = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -L_2 \frac{dI_2}{dt} - L_{21} \frac{dI_1}{dt}. \quad (10)$$

Для неферромагнитных сред можно доказать равенство коэффициентов взаимной индукции L_{12} и L_{21} для произвольных двух контуров, т. е. $L_{12} = L_{21}$. Коэффициенты взаимной индукции являются мерой магнитной связи между контурами и зависят от геометрической формы, размеров и взаимного размещения контуров с токами, а также магнитных свойств среды, где расположены контуры. В системе СИ коэффициенты взаимной индукции измеряют в генри.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

В данной работе изучается явление взаимной индукции между двумя близкими по размерам катушками 1 и 2. Катушка 2 надевается на катушку 1 и может перемещаться вдоль её оси. На катушки через сопротивление R подаётся переменное напряжение с частотой $\nu = 50$ Гц, изменяющееся по закону:

$$U = U_0 \cdot \cos \omega t. \quad (11)$$

Зная напряжение на сопротивлении R , можно определить силу тока, протекающего, например, в первой катушке:

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{U_0}{R} \cos \omega t = I_{\max 1} \cos \omega t. \quad (12)$$

Переменный ток в катушке 1 (при условии, что катушка 2 не подключена к источнику переменного тока) создаёт переменную э. д. с. взаимной индукции в катушке 2:

$$\varepsilon_{i2} = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt} = I_{\max 1} \omega L_{21} \cdot \sin \omega t = \varepsilon_{\max 2} \cdot \sin \omega t, \quad (13)$$

где амплитуда э. д. с. взаимной индукции равна: $\varepsilon_{\max 2} = I_{\max 1} \omega L_{21} = I_{\max 1} 2\pi\nu L_{21}$.

Тогда

$$L_{21} = \frac{\varepsilon_{\max 2}}{2\pi\nu I_{\max 1}}. \quad (14)$$

Аналогично для коэффициента взаимной индукции первого контура L_{12} :

$$L_{12} = \frac{\varepsilon_{\max 1}}{2\pi\nu I_{\max 2}}. \quad (15)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка для исследования явления взаимной индукции состоит из прибора ФПЭ-05м, компьютера, включающего в себя дисплей, клавиатуру и мышку, а также блока сопряжения с ним. Внешний вид прибора ФПЭ-05м показан на рис. 2. На лицевой панели этого прибора слева на право

расположены тумблер «СЕТЬ», переключатель «PQвнутр.», тумблеры L1 и L2, шток Ш и реостат P. Верхний тумблер L1 включает в электрическую цепь катушку 1, а нижний — катушку 2. С помощью штока Ш передвигается катушка 2 относительно катушки 1, а посредством реостата P происходит регулировка силы тока, текущего через индуктивность L_1 или L_2 .

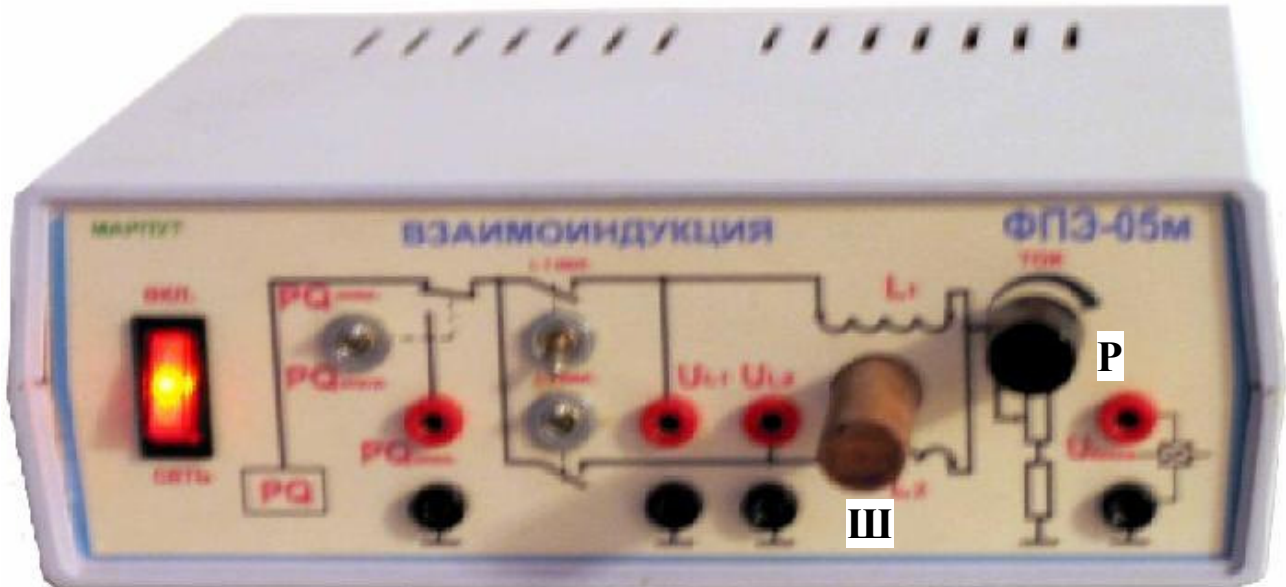


Рис. 2

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед началом работы ручка реостата на приборе ФПЭ-05м должна быть переведена в крайнее левое положение поворотом против часовой стрелки, переключатель «PQвнутр» поставлен в верхнее положение, а тумблер «Сеть» — в положении «ВЫКЛ».

Задание 1. Измерение коэффициентов взаимоиנדукции

1. Включите установку в сеть. Поставьте тумблер «СЕТЬ» на приборе ФПЭ-05м в положение «ВКЛ».
2. Включите компьютер, нажав кнопку «POWER». После появления картины на экране дисплея наведите курсор (маленькую стрелку) на иконку «ЛАБ. 49». При этом появится картина, изображённая на рис. 3. В левом окне **UL** показываються графики зависимости напряжения U_{L1} (красный цвет) и U_{L2} (синий цвет), возникающие в катушках 1 и 2. Принципиальная электрическая схема приведена в секторе **1**.
3. Подвижную катушку 2, используя шток Ш на приборе ФПЭ-05м, полностью вставьте в катушку 1. При этом датчик перемещения подвижной катушки должен показывать значение, близкое к нулю. Это значение **z** показывается в окне, расположенном в средней части сектора **1** на рис. 3.

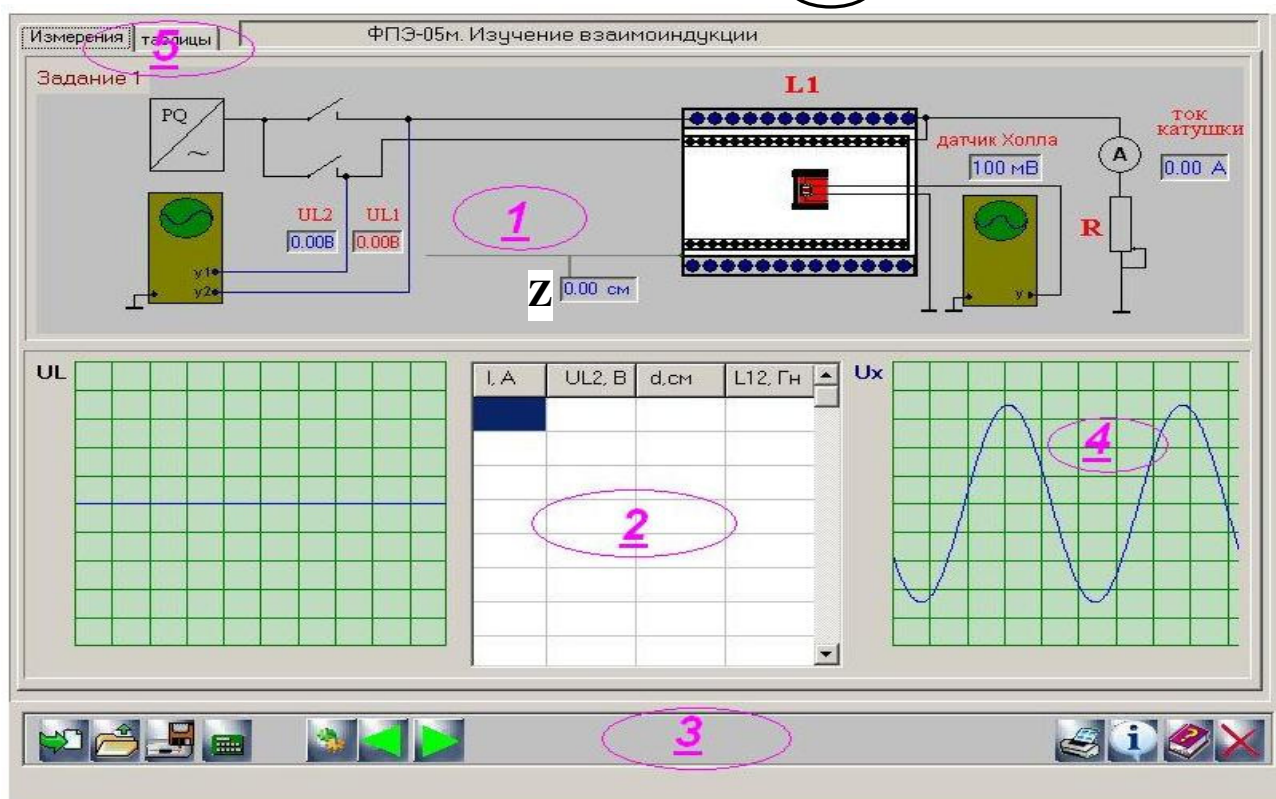


Рис 3

4. Подайте напряжение на катушку 1 с помощью тумблера **L1**, поднятого в положение «вверх». Э.д. с. индукции $\mathcal{E}_{\max 2}$, возникающая в катушке 2, будет отображаться в левом **UL2** окне, также расположенном в секторе **1**, цифрами синего цвета. Амплитудное значение силы тока $I_{\max 1}$, протекающего в катушке 1, отображается справа на экране в окошке «**ТОК КАТУШКИ**» (рис. 3). Вращая ручку реостата **P**, находящегося на приборе ФПЭ-05м (рис. 2), изменяйте силу тока в катушке. Измерьте э. д. с. индукции $\mathcal{E}_{\max 2}$ для пяти значений силы тока. Данные занесите в табл. 1.

5. Отключите катушку 1, переведя тумблер **L1** вниз (рис. 2). Подайте напряжение на катушку 2 с помощью тумблера **L2**, переведённого в верхнее положение. Э. д. с. индукции $\mathcal{E}_{\max 1}$, возникающая в катушке 1, будет отображаться в правом **UL1** окне цифрами синего цвета. Амплитудное значение силы тока $I_{\max 2}$, протекающего в катушке 2, отображается справа на экране в окошке «**ТОК КАТУШКИ**» (рис. 3). Вращая ручку реостата **P**, изменяйте силу тока в катушке. Измерьте э. д. с. индукции $\mathcal{E}_{\max 1}$ для пяти значений силы тока. Данные занесите в табл. 1.

6. По формулам (14) ($L_{21} = \frac{\mathcal{E}_{\max 2}}{2\pi n I_{\max 1}}$) и (15) ($L_{12} = \frac{\mathcal{E}_{\max 1}}{2\pi n I_{\max 2}}$) рассчитайте коэффициент взаимной индукции L_{21} и L_{12} для пяти значений силы тока. Результаты занесите в табл. 1. Частота ν , подаваемого на катушку напряжения, равна 50 Гц. Вычислите среднее значение коэффициентов взаимной индукции. Вы-

числение проводите на калькуляторе. Для его появления на экране поставьте курсор на пиктограмму («кнопку») «**КАЛЬКУЛЯТОР**», находящуюся в секторе 3 четвёртая «кнопка» слева, и нажмите левую клавишу мышки. Далее работайте как с обычным калькулятором, наводя курсор на соответствующие цифры и знаки.

Таблица 1

№ катушки	I_1, A	I_2, A	$\epsilon_{\max 1}, B$	$\epsilon_{\max 2}, B$	$L_{12}, мГн$	$L_{21}, мГн$
1						
2						

Задание 2. Исследование зависимости коэффициента взаимной индукции от взаимного расположения катушек

1. Отключите катушку 2, переведя тумблер **L2** в нижнее положение. Подайте напряжение на катушку 1 с помощью тумблера **L1**, переведя его вверх. Установите силу тока ручкой реостата **P** (рис. 2). Значение силы тока спросите у преподавателя.
2. Подвижную катушку 2, используя штوك **Ш** на приборе ФПЭ-05м рис. 2, полностью вставьте в катушку 1. При этом в окне z , расположенном в средней части сектора 1 (рис. 3), появится цифра 0,06 см. Снимите показание окна **UL2** и запишите его в табл. 2. Поочерёдно поставьте шток в положения 1, 2, 3, 4 и 5 см. При этом снимайте показание из того же окна. Запишите значения э. д. с. взаимной индукции $\epsilon_{\max 2}$, равные напряжениям U_{L2} на катушке 2, и расстояние между катушками z в табл. 2.

3. По формуле (14) рассчитайте коэффициент взаимной индукции L_{21} . Полученные данные занесите в табл. 2.

Таблица 2

z , см	0,06	1	2	3	4	5
$\mathcal{E}_{\max 2}$, В						
L , мГн						

4. Постройте график зависимости L_{21} как функции координаты z (z — расстояние между катушками).
5. По окончании поставьте курсор на пиктограмму красный крест, расположенную в секторе **3** в правом нижнем углу, и щелкните по ней. При этом исчезает картинка на экране. Затем установите курсор на пиктограмму «ПУСК», находящуюся в левом нижнем углу экрана дисплея. Щелкните по ней. Далее следуйте указаниям на экране дисплея. Кнопкой «POWER» отключите компьютер и тумблером «СЕТЬ» прибор ФПЭ-5м.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется магнитным моментом контура и магнитной индукцией? Как находятся направление этих векторов? Какое поле называется однородным?
2. Дайте определение магнитного потока и индуктивности.
3. В чём заключается явление электромагнитной индукции?
4. Сформулируйте закон электромагнитной индукции Фарадея и правило Ленца.
5. Сформулируйте закон самоиндукции.
6. В чём состоит явление взаимной индукции?
7. Чему равна э. д. с. взаимной индукции двух контуров?
8. От чего зависит коэффициент взаимной индукции?
9. Объясните график зависимости L_{21} как функции расстояния z , полученный в данной работе.