

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**имени М. В. Ломоносова**

---

**Физический факультет  
кафедра общей физики и физики конденсированного состояния**

**Методическая разработка  
по общему физическому практикуму**

**Лаб. работа № 63**

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ. ЗАКОН  
ФАРАДЕЯ**

**Описание составил доц. Попов Ю. Ф.**

**Москва - 2012**

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

## ЗАКОН ФАРАДЕЯ

### Вихревое электрическое поле

Явление электромагнитной индукции (ЭМИ), открытое М. Фарадеем в 1831 г., иллюстрируется следующим опытом. Если к проводящему витку быстро поднести постоянный магнит, то в нем возбуждается электрический ток, регистрируемый гальванометром (рис. 1,а). Когда магнит быстро удаляют от витка, возникающий ток имеет другое направление (рис. 1,б).

Индукционные токи соответствующих направлений возникают и в том случае, если магнит неподвижен, а виток приближается или удаляется от него.

Количественные исследования, проведенные Фарадеем, позволили установить, что величина электродвижущей силы (ЭДС), индукции зависит от скорости изменения магнитного потока  $\Phi_B$

$$\Phi_B = \int_S \mathbf{B}_n dS . \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{B}_n$  - проекция вектора магнитной индукции на нормаль к элементу поверхности  $dS$ , а интеграл берется по любой поверхности  $S$ , ограниченной проводящим витком. Единицей магнитного потока является вебер (Вб):  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$ . Так как индукция магнитного поля  $\mathbf{B}$  равна магнитному потоку через единицу площади:  $\mathbf{B} = \Phi_B / S$ , ее иногда называют плотностью магнитного потока.

Используя понятие магнитного потока, результат опытов Фарадея можно записать математически, а именно: ЭДС индукции в

контуре равна скорости изменения магнитного потока через сечение контура:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2)$$

Величина ЭДС индукции получается в вольтах, если скорость изменения магнитного потока  $d\Phi_B/dt$  выражена в веберах в секунду (Вб/с). Это утверждение называется законом электромагнитной индукции Фарадея и представляет собой один из фундаментальных законов электромагнетизма. Если контур состоит из  $N$  одинаковых витков, то индуцированные в каждом витке ЭДС складываются и формула (2) принимает вид:

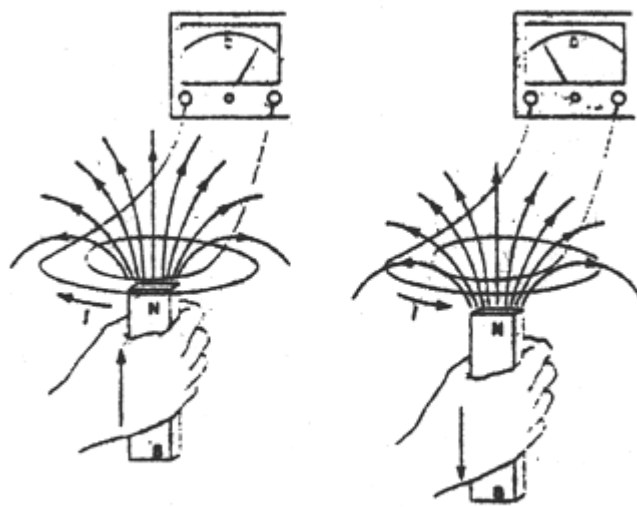


Рис. 1

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3)$$

Знак минус в (2) и (3) указывает направление, в котором действует ЭДС индукции, т.е. ее полярность. Согласно экспериментальным данным ЭДС индукции возбуждает в контуре такой ток, индукция магнитного поля которого всегда противодействует первоначальному изменению магнитного потока. Это положение известно как правило Ленца.

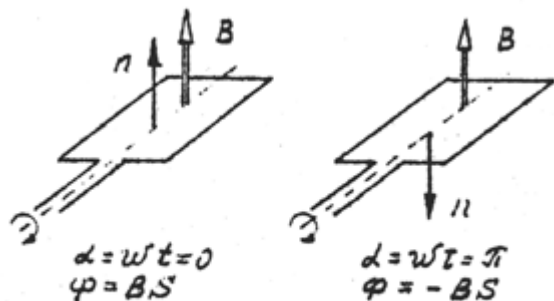


Рис. 2

Важно отметить, что ЭДС индукции возникает всегда, когда происходит изменение магнитного потока. Поскольку магнитный поток равен

$$\Phi_B = \int_S \vec{B}_n dS = \int_S B \cos \alpha dS, \text{ то закон Фарадея можно записать в виде}$$

$$\varepsilon = - \frac{d}{dt} \int_S B \cos \alpha dS, \quad (4)$$

где  $\alpha$  - угол между вектором  $\vec{B}$  и нормалью к элементу  $dS$  поверхности  $S$ , через которую считается поток.

Отсюда следует, что ЭДС индукции может быть индуцирована следующими способами:

1. Изменением индукции магнитного поля:  $dB/dt \neq 0$ .
2. Изменением ориентации контура по отношению к вектору  $\vec{B}$ :  $d\alpha/dt \neq 0$ .
3. Изменением площади сечения контура:  $dS/dt \neq 0$ .

Первый способ получения ЭДС индукции подробно рассмотрен выше на примере опыта, изображенного на рис. 1. Второй способ, т.е. изменение ориентации контура по отношению к  $\vec{B}$ , положен в основу такого практического устройства, как генератор переменного тока (напряжения). Если проводящую рамку поместить в постоянное магнитное поле с индукцией  $B$  и вращать вокруг оси, лежащей в плоскости рамки, с постоянной угловой скоростью  $\omega$  (рис. 2), то поток магнитной индукции через сечение рамки  $S$  будет изменяться за половину периода от значения  $\Phi = BS$  до значения  $\Phi = -BS$  по закону  $\Phi = BS \cos \omega t$ .

При этом ЭДС индукции, наводимая в рамке, будет изменяться по закону:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} = \omega BS \sin \omega t \quad (5)$$

Изменение площади контура непосредственно связано с движением элементов проводника в магнитном поле, что также сопровождается возникновением ЭДС индукции. Анализ этого случая позволяет более полно понять природу наводимой ЭДС. Пусть однородное магнитное поле с индукцией  $B$  перпендикулярно площади, ограниченной П-образным проводником и лежащим на нем подвижным стержнем (рис. 3).

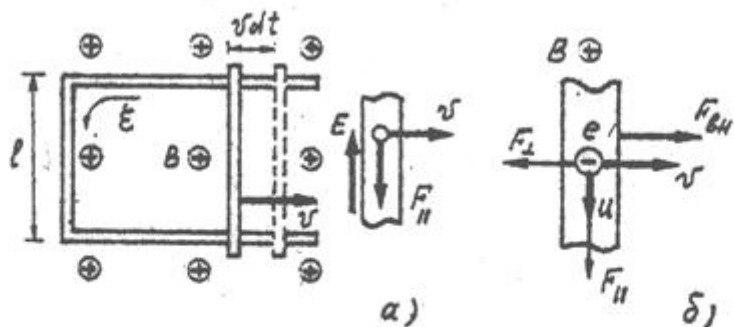


Рис. 3. Поле  $B$  перпендикулярно рамке и направлено вниз.

Когда стержень скользит по проводнику со скоростью  $v$ , он проходит за время  $dt$  расстояние  $dx = v dt$ . Площадь контура при этом увеличивается на величину  $dS = l v dt$ . Согласно закону Фарадея (2), в контуре наводится ЭДС индукции

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{B dS}{dt} = -Blv \quad (6)$$

Это соотношение справедливо при условии, что  $B$ ,  $l$  и  $v$  взаимно перпендикулярны. Если они не перпендикулярны, то учитываются лишь их взаимно перпендикулярные компоненты.

То же самое соотношение можно получить помимо закона Фарадея. Известно, что на движущийся в магнитном поле заряд действует сила Лоренца  $F_{\perp} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ . При движении проводящего стержня вместе с ним движутся находящиеся в нем носители заряда - электроны. В результате на каждый электрон начинает действовать сила Лоренца  $F_{\perp} = evB$ . Индекс «II» указывает, что сила направлена вдоль проводника (рис. 3,а).

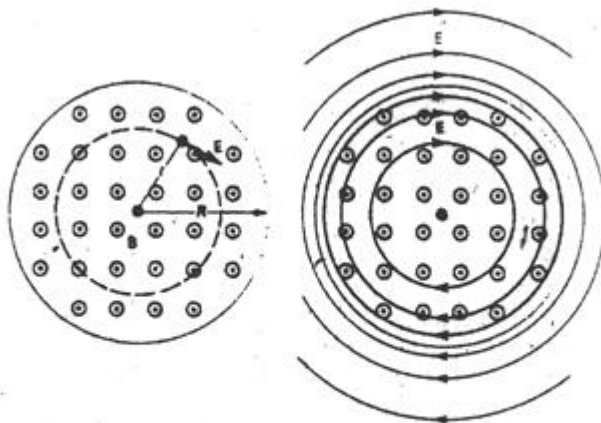


Рис. 4. Силовые линии вихревого электрического поля, возникающего при изменении магнитной индукции  $B$  в соленоиде, радиус соленоида  $R$ .

Действие этой силы эквивалентно действию электрической силы, обусловленной полем напряженностью  $E = vB$ . Под действием этой силы электроны перемещаются вдоль проводника со скоростью  $u$  (рис. 3,б). Вследствие этого появляется перпендикулярная составляющая силы Лоренца  $F_{\perp} = euB$ . Таким образом, результирующая сила Лоренца, действующая на

электрон, равна  $F_{\perp} = F_{\parallel} + F_{\perp}$ . Работа этой силы за время  $dt$  равна  $dA = F_{\parallel} u dt - F_{\perp} v dt$ . С учетом направления векторов  $\vec{F}_{\parallel}$ ,  $\vec{F}_{\perp}$ ,  $\vec{v}$  и  $\vec{u}$  полная работа силы Лоренца оказывается равной нулю.

Так как сила  $F_{\perp}$  направлена противоположно скорости подвижного проводника  $v$ , то для его перемещения к нему необходимо приложить внешнюю силу  $F_{\text{вн}}$ , равную сумме всех перпендикулярных составляющих  $F_{\perp}$ , действующих на электроны в проводнике. За счет работы этой силы и будет возникать энергия, выделяемая в контуре индукционным током, т.е. ЭДС индукции.

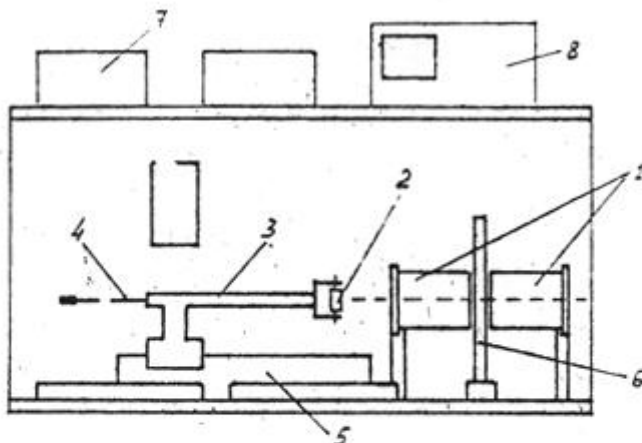


Рис. 5. Общий вид ЛКЭ-1. Обозначены только элементы комплекса, которые используются при выполнении настоящей работы.

1 - соленоиды, 2 - датчик ЭМИ  $D_1$ , 3 - кронштейн датчика  $D_1$ , 4 - коаксиальный кабель, 5 - рейтер, 6 - плоский кольцевой датчик  $D_2$  (см. рис. 6), 7 - генератор переменного тока (рис. 7), 8 - осциллограф (рис. 8).

Из рассмотренных выше примеров следует важный вывод: изменение магнитного потока ведет к возникновению электрического поля. Это относится не только к проводникам - электрическое поле возникает в любой области пространства, где происходит изменение магнитного потока. Это поле неэлектростатической природы, т.е. для его возникновения не требуется наличия свободных зарядов; часто это поле называется вихревым полем. Силовые линии вихревого электрического поля являются замкнутыми (непрерывными) линиями (рис. 4).

Вектор напряженности вихревого электрического поля  $\vec{E}$  направлен по касательной к силовым линиям, а их плотность пропорциональна величине  $E$ .

Основным отличием вихревого электрического поля от электростатического (потенциального) заключается в том, что работа по перемещению заряда по замкнутому контуру в вихревом поле отлична от нуля. Действительно, наводимая в контуре ЭДС индукции равна работе по перемещению единичного положительного заряда по контуру, т.е. равна циркуляции вектора  $\vec{E}$  по замкнутому контуру  $l$ :

$$\varepsilon = \oint_l \vec{E}_l d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (7)$$

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение явления электромагнитной индукции, проверка закона Фарадея, исследование вихревого электрического поля вокруг соленоида, возникающего при изменении в нем тока, т.е. магнитной индукции.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Практическая часть работы выполняется на многофункциональном лабораторном комплексе ЛКЭ- 1. В настоящей работе используются следующие элементы комплекса (рис. 5).

1. Два соосно закрепленных соленоидов  $L_1$  и  $L_2$  с небольшим зазором между собой. Включенные последовательно они позволяют моделировать бесконечно протяженный соленоид ( $d \ll l$ ) (рис. 5). Параметры обоих соленоидов идентичны: длина  $l=120$  мм, число витков  $N=422$  вит., средний диаметр

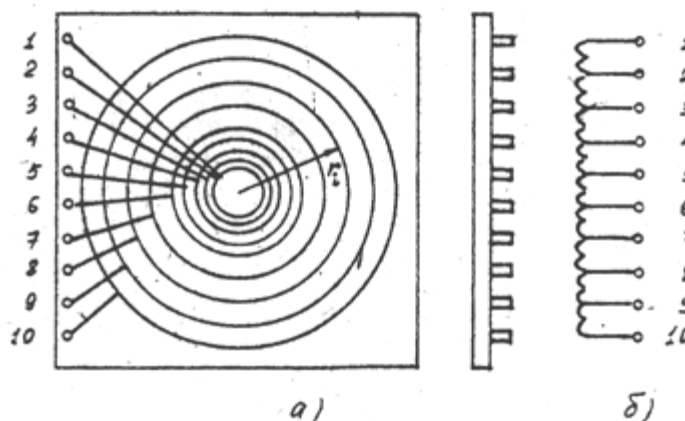


Рис. 6

обмотки  $\langle d \rangle = 52$  мм.

2. Датчик электромагнитной индукции  $D_1$  с фиксированными параметрами.

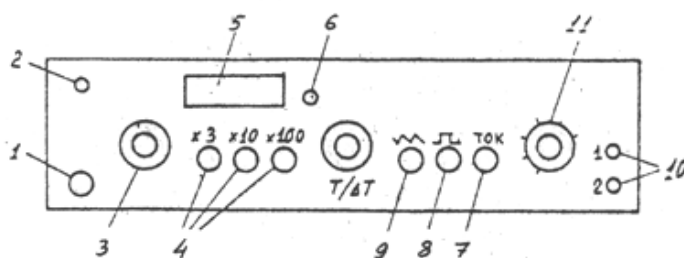


Рис. 7. Генератор ГСФ-1.

1 - включение прибора, 2 - индикатор включения, 3 - плавная установка частоты, 4 - световое табло индикации установленного значения частоты (с учетом выбранной кратности), 5 - сброс показаний табло, 6 - установка режима работы генератора как источника переменного тока синусоидальной формы, 7 - установка выходного напряжения (тока) прямоугольной формы, 8 - установка выходного напряжения (тока) пилообразной формы, 9 - установка выходного напряжения (тока) пилообразной формы, 10 - клеммы (гнезда) выходного напряжения, 11 - плавная регулировка напряжения (тока) на выходе.

Датчик представляет собой катушку, закрепленную на вертикальной оси таким образом, что ось катушки может поворачиваться в горизонтальной плоскости на угол  $\pm 90^\circ$ . Угол поворота фиксируется по лимбу. Датчик укреплен на подставке, которая может перемещаться

по рейтеру со шкалой. Рейтер ориентирован вдоль оси соленоидов, что позволяет устанавливать катушку датчика в любой точке на оси соленоидов. Параметры катушки датчика  $D_1$ : длина  $l = 10 \text{ мм}$ , число витков  $N = 250$ , диаметр обмотки  $d = 18 \text{ мм}$ . Плоский кольцевой датчик электромагнитной индукции  $D_2$ , состоящий из 9 концентрических контуров (рис. 6,а). Число витков в каждом контуре  $N = 50$ , радиусы контуров  $r_i = 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70 \text{ мм.}$ , соответственно. Схема контуров и подключения их выводов показана на рис.

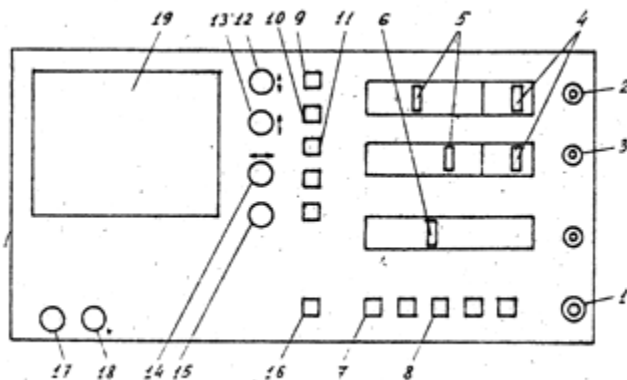


Рис. 8. Осциллограф С1-131/1.

1 - включение прибора (индикатор в кнопке), 2 - вход первого канала ( $Y_1$ ), 3 - вход второго канала ( $Y_2$ ), 4 - установка диапазона измеряемых напряжений (В, мВ) по  $Y_1$  и  $Y_2$  соответственно, 5 - установка чувствительности по  $Y_1$  и  $Y_2$  соответственно (см. рис. 9), 6 - установка длительности развертки по X, 7 - установка диапазона развертки по X в мкс. или мс. (mS/μS), 8 - синхронизация (запуск развертки по X) внешняя или внутренняя (EXT/INT), 9 - инверсия (смена полярности) напряжения на первом канале, 10,11 - включение яркости первого ( $Y_1$ ) и второго ( $Y_2$ ) луча, соответственно, 12,13 - смещение первого ( $Y_1$ ) и второго ( $Y_2$ ) луча по вертикали, соответственно, 14 - смещение развертки обоих каналов (картинки) по горизонтали, 15 - регулировка уровня синхронизации (по  $Y_1$  или  $Y_2$ ), 16 - включение режима XY (развертка по X осуществляется напряжением первого канала), 17 - фокусировка лучей, 18 - регулировка яркости лучей, 19 - экран. Назначение остальных органов управления, не используемых в данной задаче, не указывается.

6,б. Выводы  $i$ -го контура подключены к клеммам с номерами  $i$  и  $i+1$ .

4. Точный резистор  $R = 1,0 \text{ Ом}$  с отклонением по номиналу  $\pm 1\%$ , смонтированный на отдельной панельке с клеммами. Два

коаксиальных кабеля с разветвленными проводниками, соединительные провода с простыми и комбинированными штекерами.

Комбинированный штекер (штекер с гнездом) используется в точках, где на схеме имеются узлы. (Узел - точка, в которой сходятся три или более

проводников.)

5. Генератор сигналов функциональный ГСФ-1, рис. 7.

6. Осциллограф 2-канальный С1-131/1, рис. 8.

## Внимание!

Так как все измерения в настоящей работе осуществляются с помощью этих двух приборов, необходимо внимательно ознакомиться с назначением органов управления, расположенных на их лицевых панелях, рис. 7-9.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Вынуть из зазора между соленоидами плоский датчик  $D_2$ . Установить датчик  $D_1$  на рейтер, расположенный вдоль оси соленоидов (рис. 6). Повернуть катушку датчика  $D_1$  так, чтобы ее ось совпадала с осью соленоидов ( $0^\circ$  на лимбе). Перемещая подставку датчика  $D_1$  по рейтеру, вдвинуть датчик в соленоиды так, чтобы он оказался между ними. При этом риска на подставке



датчика должна оказаться на делении 456 мм. по шкале рейтера. Коаксиальный кабель с датчика  $D_1$  (синий) подключить к разъему входа второго канала осциллографа  $Y_2$ . Собрать схему, как показано на рис. 10.

При этом для того, чтобы магнитное поле в обоих соленоидах было направлено в одну и ту же сторону, необходимо нижнюю (вторую) клемму

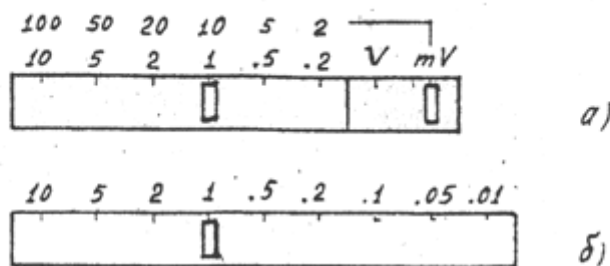


Рис. 9. (а) - переключение диапазонов V, mV (справа) и чувствительности (цены деления шкалы экрана) по  $Y_1$  ( $Y_2$ ) (слева). (б) - установка времени развертки по X (диапазон разверток в мс., мкс. задается кнопкой 7, рис. 8).

левого соленоида соединить с верхней (первой) клеммой правого соленоида. При несоблюдении этого условия магнитное поле в области

зазора будет равно нулю.

В узлах схемы использовать комбинированные штекеры (с гнездами), что позволяет в этих точках подсоединять более одного проводника. Напряжение с резистора  $R$  посредством коаксиального кабеля (белого) подать на разъем входа первого канала осциллографа  $Y_1$ .

Перед включением приборов следует внимательно ознакомиться с назначением их органов управления (рис. 7,8) и перевести их в исходное состояние, т.е. установить режим работы приборов, необходимый для проведения эксперимента. По ходу выполнения эксперимента режим работы приборов может корректироваться.

Задание режима работы генератора производится в следующем порядке.

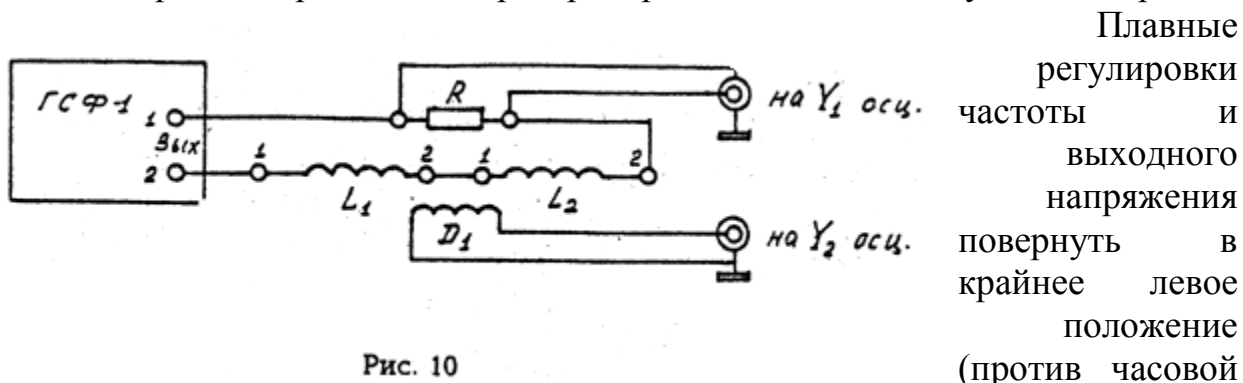


Рис. 10

Плавные регулировки частоты и выходного напряжения повернуть в крайнее левое положение (против часовой

стрелки). Кнопки с символами « $\times 100$ » и «ток» должны быть в нажатом положении, остальные кнопки остаются в свободном (отжатом) состоянии.

В этом режиме генератор работает как источник стабильного по амплитуде (или по эффективному значению) тока, поддерживая его неизменным при изменении частоты или сопротивления нагрузки. Напомним, что сопротивление соленоида переменному току прямо пропорционально частоте  $\omega$  переменного напряжения и индуктивности  $L$  соленоида и равно  $L\omega$ .

Аналогичным образом устанавливается режим работы осциллографа. Кнопки с символами « $Y_1$ », « $Y_2$ », « $\equiv$ », « $\frac{\mu S}{mS}$ », « $\frac{EXT}{INT}$ » перевести в нажатое состояние, остальные кнопки перевести в отжатое (свободное) состояние. Установить диапазон измерений по обоим каналам  $mV$ , масштаб (цена деления по  $Y$ ) на первом канале  $100 mV/дел$ , на втором канале -  $10 mV/дел$ . (см. рис. 8, ). Установить длительность развертки по оси  $X$  (частота генератора развертки) равную  $2 mV/дел$ . (рис. 9).

Подсоединить приборы к источнику питания, т.е. вставить вилку кабеля питания в розетку с напряжением  $220B$ . После этого можно включить приборы и дать им прогреться в течение 2-3 мин. После появления на экране

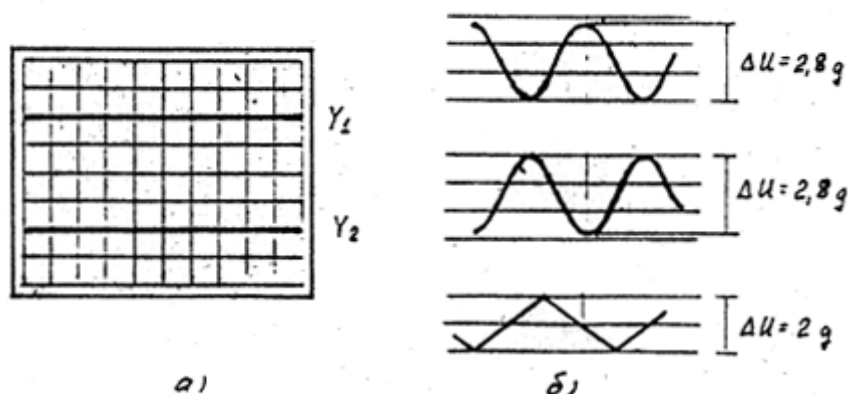


Рис. 11

осциллографа лучей, регулировкой вертикального смещения лучей установить луч первого канала ( $Y_1$ ) на два деления выше центральной линии, второго канала ( $Y_2$ ) - на два деления ниже (рис. 11а). В случае необходимости скорректировать яркость и фокусировку лучей соответствующими регулировками.

Плавной регулировкой частоты генератора установить частоту, равную  $100 Гц$ . При этом необязательно добиваться установки значения частоты точно  $100 Гц$ , вполне достаточно, если значение частоты на табло будет лежать в пределах  $90-110 Гц$ . Однако при проведении измерений обязательно регистрировать и заносить в таблицу те значения частоты, которые отображаются на табло.

Плавной регулировкой выходного напряжения генератора устанавливается такое напряжение на выходе (ток в цепи нагрузки), при котором удвоенное значение амплитуды напряжения на первом канале не превышает 3-х делений. Это соответствует примерно одному делению на лимбе плавной регулировки выходного напряжения генератора.

Все измерения напряжений в настоящей работе осуществляются с помощью осциллографа следующим образом. Определяется расстояние по оси  $Y$  между минимальным и максимальным значениями напряжений  $\Delta U$  в делениях шкалы экрана осциллографа. Чтобы получить истинное значение измеряемого напряжения в вольтах (милливольтах), надо измеренное значение  $\Delta U$  в делениях шкалы умножить на цену деления (чувствительность), установленную

на данном канале. Для повышения достоверности результатов измерений можно использовать методику, суть которой поясняет рис. 11,б.

Используя регулировку вертикального смещения луча, устанавливают два соседних минимума (или два соседних максимума) на ближайшую горизонтальную линию. Регулировкой горизонтального смещения лучей (вправо-влево) совмещают максимум между соседними минимумами (минимум между соседними максимумами) с центральной вертикальной линией экрана. Этот прием существенно упрощает считывание показаний. Более того, таким образом можно переместить участок кривой, на котором производятся измерения, в центр экрана, что позволит перейти на более высокую чувствительность (уменьшить цену деления шкалы). Однако, при таком увеличении участка кривой  $\Delta U$  не должно превышать 6-7 делений

При проведении измерений следует обратить внимание на два обстоятельства. Во-первых, измеренное таким образом значение  $\Delta U$  равно удвоенному амплитудному значению переменного напряжения. Во-вторых, шкала экрана осциллографа позволяет измерять напряжение с точностью до 0,1 деления (половина наименьшего деления шкалы), т.е. погрешность таких измерений довольно велика.

## **Упражнение 1**

### **НАБЛЮДЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ**

#### **1.1. Наблюдение ЭМИ при гармоническом изменении тока в соленоиде**

После выполнения описанных выше операций по установке режима работы генератора на его выходе генерируется переменное напряжение. При этом в цепи нагрузки (последовательно включенных резистора  $R$  и соленоида  $L$ ) возникает переменный ток, изменяющийся по гармоническому закону  $I = I_0 \cos \omega t$ .

Как известно, магнитное поле в соленоиде прямо пропорционально току:  $B \sim I$ . С другой стороны, падение напряжения на резисторе  $R$  также пропорционально току:  $U_R = IR$ . Следовательно, зависимость от времени напряжения  $\Delta U$ , наблюдаемая на первом канале осциллографа, с точностью до постоянного множителя повторяет зависимость от времени магнитной индукции соленоида  $B(t) = B_0 \cos \omega t$ .

В соответствии с законом Фарадея (2,3) в катушке датчика ЭМИ  $D_1$  возникает ЭДС индукции

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -N_1 S_1 \frac{dB}{dt} = B N_1 S_1 \omega \sin \omega t . \quad (8)$$

Зарисовать и объяснить наблюдаемые зависимости  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ .

Перевести осциллограф в режим работы XY (нажать кнопку с символом XY). В этом режиме работы осциллографа развертка по оси X обеспечивается не

внутренним генератором развертки, а напряжением, поступающим на первый канал  $Y_1$ . При этом на экране появятся фигуры Лиссажу вследствие сложения перпендикулярно направленных колебаний. Зарисовать наблюдаемые картины.

Анализируя полученные ранее зависимости  $U_1(t)$ ,  $U_2(t)$ , сложение которых и приводит к наблюдаемым фигурам Лиссажу, определить сдвиг фаз между  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ .

Вернуться к исходному режиму работы осциллографа (отжать кнопку ХУ) и произвести следующие измерения:

$$\Delta U_1 = n_1 \text{ дел.} \times 100 \text{ мВ} = \dots$$

$$\Delta U_2 = n_2 \text{ дел.} \times 10 \text{ мВ} = \dots$$

$$\nu = \dots \text{ Гц}$$

## 1.2. Наблюдение ЭМИ при импульсном изменении тока соленоида (импульс прямоугольной формы)

Перевести генератор в режим генерирования импульсов тока прямоугольной формы. Для этого надо нажать (утопить) кнопку с символом «П П». При этом ток в соленоиде за очень короткое время  $\Delta t$  (скачком) будет менять направление (знак) от  $-I$  до  $+I$  и в течение полупериода импульса будет оставаться постоянным. Точно так же будет меняться индукция магнитного поля в соленоиде, и в соответствии с законом Фарадея (2,3) ЭДС индукции в датчике.

Зарисовать и объяснить наблюдаемые зависимости  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ .

## 1.3. Наблюдение ЭМИ при пилообразном изменении тока в соленоиде

Для перевода генератора в этот режим работы надо отжать кнопку с символом «П П» и нажать кнопку с символом «ЛЛЛ». При этом ток в соленоиде будет в течение полупериода изменяться от  $-I_{\text{max}}$  до  $+I_{\text{max}}$  с постоянной скоростью. По такому же закону будет изменяться индукция магнитного поля в соленоиде. Следовательно, в соответствии с законом Фарадея (2,3) в течение этого интервала времени ЭДС индукции должна оставаться постоянной.

Зарисовать и объяснить наблюдаемые зависимости  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ .

Измерения:

$$\Delta U_1 = n_1 \text{ дел.} \times 100 \text{ мВ} = \dots$$

$$\Delta U_2 = n_2 \text{ дел.} \times 10 \text{ мВ} = \dots$$

$$\nu = \dots \text{ Гц}$$

## 1.4. Расчет индукции магнитного поля соленоида

При вычислении величины амплитудного значения индукции магнитного поля соленоида используются следующие величины и параметры:

$S_1$  - площадь витка катушки датчика ЭМИ  $D_1$ ,  $S_1 = \pi d_1^2 / 4 \text{ м}^2$ .

$d_1$  - диаметр катушки датчика,  $d_1 = 18 \text{ мм} = 0,018 \text{ м}$ .

$N_1$  - число витков катушки датчика,  $N_1 = 250$ .

$\varepsilon_m$  - амплитудное значение ЭДС индукции,  $\varepsilon_m = \Delta U_2 / 2 \text{ Вольт}$ .

$I_m$  – амплитудное значение тока в соленоиде,  $I_m = \Delta U_1 / 2R$  [А],  $R = 1,0 \text{ Ом}$ .

$\nu$  – частота переменного тока в соленоиде [Гц].

$\omega$  – круговая (угловая) частота,  $\omega = 2\pi\nu$  [рад/с].

$T$  – период переменного тока,  $T = 1/\nu$  [с].

В СИ величина индукции магнитного поля измеряется в теслах:  $1 \text{ Тесла} = 10^4 \text{ Гаусс}$ . Гаусс – единица измерения магнитной индукции в электромагнитной (гауссовой) системе единиц.

По результатам измерений в пункте 1.1 амплитудное значение магнитной индукции рассчитывается по формуле

$$B_m = \frac{\varepsilon_m}{\omega N_1 S_1}, \quad (9)$$

которая получается из соотношений (3-5).

1)  $B_m = \dots$  [Тл].

По результатам измерений в пункте 1.3 амплитуда магнитной индукции равна:

$$B_m = \frac{\varepsilon_m T}{4 N_1 S_1}, \quad (10)$$

Эта формула получается из тех же соотношений (3-5,9), если учесть, что за половину периода магнитная индукция в соленоиде меняется от  $-B_m$  до  $+B_m$  по линейному закону, т.е. с постоянной скоростью, равной  $2B_m/0,5T = 4B_m/T$ .

2)  $B_m = \dots$  [Тл].

Расчет индукции магнитного поля по формуле для бесконечно длинного соленоида

$$B_m = \mu_0 n I_m, \quad (11)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Тл/м}$  – магнитная постоянная,  $n$  – число витков на единицу длины соленоида:  $n = N/l$ , где  $N = 422$  – число витков в каждом соленоиде,  $l = 120 \text{ мм} = 0,12 \text{ м}$  – длина каждого соленоида.

3)  $B_m = \dots$  [Тл].

Сравнение трех полученных значений магнитной индукции в соленоиде  $B_m$  показывает, что два первых значения отличаются друг от друга в пределах погрешности эксперимента, которая может составлять  $\sim 15\%$ . (Предлагается самостоятельно оценить реальную погрешность результата определения  $B_m$ .) Третье значение  $B_m$  более существенно отличается от первых двух: оно несколько завышено, что вполне объяснимо. Дело в том, что это значение получено по формуле (11) для идеального бесконечно длинного соленоида, для которого  $l \gg d$ . Реальный соленоид имеет отношение  $l/d \approx 5$  и кроме того между двумя его половинами имеется зазор, что значительно снижает величину  $B_m$ . Следовательно, значения  $B_m$ , полученные индукционным методом (формулы (9), (10)), более точно соответствуют истинному значению магнитного поля соленоида.

## Упражнение 2

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНА ЭМИ ФАРАДЕЯ

Измерения выполняются при пилообразной форме изменения тока в соленоиде (см. упражнение 1, п.3). Регулировкой выходного напряжения генератора установить  $\Delta U_1$  на экране осциллографа, равной двум-трем делениям при чувствительности по  $Y_1$   $100\text{ мВ/дел.}$  При дальнейшей работе следует следить за тем, чтобы это значение  $\Delta U_1$  оставалось неизменным.

Установить частоту генератора  $\nu \approx 100\text{ Гц}$  и провести измерение  $\Delta U_2$  в делениях шкалы, полученное значение занести в таблицу 1. Изменяя частоту генератора с шагом  $\approx 100\text{ Гц}$ , произвести аналогичное измерение  $\Delta U_2$ . (При установке частоты  $\approx 400\text{ Гц}$  и выше следует воспользоваться дополнительным множителем  $\times 3$ , для чего необходимо нажать кнопку с символом « $\times 3$ ».) Следует заметить, что с увеличением частоты увеличивается скорость изменения магнитной индукции  $dB/dt$  и, соответственно,  $\Delta U_2$ . При этом для проведения измерений необходимо корректировать чувствительность второго канала осциллографа  $Y_2$  и длительность развертки по оси X. С этой целью в таблице 1 приведены рекомендуемые значения чувствительности по  $Y_2$  и по X для различных частот. При проведении реальных измерений возможны отклонения от рекомендованных значений в ту или иную сторону. В этом случае эти отклонения следует занести в таблицу. Можно считать, что условия проведения измерений  $\Delta U_2$  оптимальны, если  $\Delta U_2$  не меньше 2-3 делений, но не больше 6-7 делений, причем измеряемый участок картинки не выходит за пределы сетки экрана осциллографа.

Таблица 1

$\nu$ , Гц	разв. по xms/дел	$\Delta U_2$ , дел.	цена дел., мВ/дел.	$\Delta U_2$ , мВ	$d\Phi/dt$ , Вб/с
100	2,0	...	5	...	...
200	1,0	...	10	...	...
300	1,0	...	20	...	...
400	0,5	...	20	...	...
500	0,5	...	50	...	...
600	0,5	...	50	...	...
700	0,2	...	50	...	...
800	0,2	...	100	...	...

Так как магнитная индукция в соленоиде меняется по линейному закону, т.е. с постоянной скоростью, от  $-B_m$  до  $+B_m$  за половину периода, то скорость изменения потока магнитной индукции в катушке датчика можно рассчитать по формуле

$$\frac{d\Phi}{dt} = -4B_m N_1 S_1 \nu \text{ Вб/с} . \quad (12)$$

Поскольку амплитудное значение тока в соленоиде не изменяется по величине ( $\Delta U_1 = const$ ) при изменении частоты генератора, то  $B_m$  является константой (значение  $B_m$  определялось в упражнении 1. п.3). Следовательно,  $d\Phi/dt$  оказывается прямо пропорционально частоте  $\nu$ , а  $\varepsilon_m = \Delta U_2/2$ . Построить зависимость  $\varepsilon_m$  от  $d\Phi/dt$ .

### Упражнение 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Выдвинуть из соленоидов датчик  $D_1$  и отсоединить его кабель от входа второго канала  $Y_2$  осциллографа. В зазор между соленоидами вставить плоский кольцевой датчик  $D_2$  так, чтобы его центр оказался на оси соленоидов. Используя запасной коаксиальный кабель (синий) со штекерами на конце, подсоединить ко второму каналу  $Y_2$  осциллографа первый контур (клеммы 1,2). Установить частоту генератора  $\nu \approx 100 \text{ Гц}$ . Измерить величину  $\Delta U_2$  в делениях шкалы экрана и занести результат в таблицу 2. (Рекомендуемая чувствительность по  $Y_2$   $5 \text{ мВ/дел.}$ , см. табл. 2). Для подключения второго контура достаточно переставить штекер с клеммы 1 на клемму 3 (так как полярность  $\Delta U_2$  для настоящих измерений значения не имеет) и повторяется измерение  $\Delta U_2$ . Последовательно переходя к следующему контуру, повторяют измерение  $\Delta U_2$  и данные записывают в таблицу 2. При подключении  $i$ -го контура штекеры должны находиться на клеммах с номерами  $i$  и  $i+1$ .

Таблица 2

r, mm	10	15	20	25	30	40	50	60	70
$\Delta U_2$ , дел.									
цена дел. по $Y_2$ , мВ/дел.									
$2\pi Nr$									
$E_m$ , мВ/м.									

Напряженность вихревого электрического поля в соответствии с теоремой о циркуляции рассчитывается по формуле

$$E(r) = \frac{\Delta U_2}{4\pi Nr} , \quad (13)$$

где  $r$  - радиус соответствующего контура (см. таблицу 2),  $N = 50$  - число витков в каждом контуре. Построить график зависимости напряженности вихревого электрического поля от радиуса контура  $E(r)$  и объяснить полученный результат. Радиус соленоида  $R_c = 26 \text{ мм}$ .

## Контрольные вопросы

1. Что такое явление электромагнитной индукции?
2. Сформулировать закон ЭМИ и правило Ленца.
3. Какова природа ЭДС индукции?
4. Что такое вихревое электрическое поле и каковы его свойства?
5. Что такое поток и циркуляция вектора?
6. Используя наблюдаемые зависимости  $\Delta U_1(t)$  и  $\Delta U_2(t)$ , вывести самостоятельно формулы (9), (10), (11), (12), (13).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учебное пособие. Книга 2 “Электричество и магнетизм”, Издание 4-е, переработанное. Москва. Наука. Физматлит. 1998.  
Глава 8. Электромагнитная индукция.  
8.1. Явление электромагнитной индукции.  
8.2. Электродвижущая сила индукции.  
8.3. Методы измерения электромагнитной индукции.  
Глава 9. Уравнения Максвелла.  
9.1. Вихревое электрическое поле.