

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЗАИМНОЙ МАГНИТНОЙ
ИНДУКЦИИ ДВУХ КОАКСИАЛЬНО
РАСПОЛОЖЕННЫХ КАТУШЕК

Лабораторная работа разработана профессором Саврухиным А.П.

1. Цель работы

Изучение явления взаимной магнитной индукции двух коаксиально расположенных катушек.

2. Содержание работы

Измерение коэффициента взаимной индукции двух коаксиально расположенных катушек и расчёт параметров катушек индуктивности.

3. Краткие сведения о магнитном поле и взаимной индукции

(Основные сведения из теории изложены в описании к лабораторной работе №2. Здесь описывается только взаимная индукция.)

Наличие магнитного поля вокруг проводника с током обнаружено Х.Эрстедом. Силовое действие магнитного поля (индукция B) проявляется в том, что оно приводит в движение намагниченные тела и проводники с током (опыты А.Ампера). При постоянном токе в контуре вызывающее этот ток напряжение источника мало, поскольку мало омическое сопротивление проводника, а чтобы создать переменный ток, требуется приложить большее по величине напряжение. Откуда возникает добавочное сопротивление? На компенсацию какой ЭДС требуется увеличение напряжения?

Опытным путём М.Фарадей обнаружил явление *электромагнитной индукции*, возникновение *электродвижущей силы* \mathcal{E} (ЭДС) индукции при изменении *магнитного потока* Φ через площадь, ограниченную контуром. В замкнутом контуре это вызывает появление тока. Причиной появления тока, по гипотезе Дж. Максвелла, является возбуждение электрического поля в проводнике, приводящее свободные заряды в движение. По Х.Лоренцу, изменение магнитного поля напрямую воздействует на заряды.

Согласно *правилу Э. Ленца*, индукционный ток, возникающий в замкнутом проводящем контуре, имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле противодействует тому изменению магнитного потока, которым был вызван данный ток.

Закон электромагнитной индукции: величина электродвижущей силы индукции \mathcal{E} в контуре пропорциональна скорости изменения магнитного потока Φ через площадь поверхности, охватываемой контуром. $\mathcal{E} = - d\Phi/dt$. Знак «минус» в формуле отражает правило Ленца.

Ответ на заданные выше вопросы состоит в том, что задаваемый в контуре ток вызывает, индуцирует *магнитный поток самоиндукции* и, соответственно, ЭДС *самоиндукции*.

В простом случае, когда поле однородно, контур плоский, а *вектор В индукции поля* перпендикулярен плоскости контура, магнитный поток Φ численно равен произведению модуля индукции B магнитного поля на площадь S поверхности: $\Phi = B \cdot S$. Если поле не однородно, то вычисляется интеграл от B по поверхности.

Опытно установлено, что магнитный поток пропорционален току: $\Phi=L\cdot I$, где L – коэффициент пропорциональности, называемый *собственной индуктивностью* контура. Индуктивность L полностью определяется геометрией контура, она численно равна потоку индукции при единичном токе, измеряется в единицах Гн (*генри*) и может быть рассчитана или измерена. Для ряда контуров и катушек составлены таблицы величин индуктивности.

Если в контуре задаётся извне переменный магнитный поток Φ , чаще всего, синусоидальный $\Phi(t)=\Phi\cdot\sin(\omega t)$, то, согласно закону электромагнитной индукции, в контуре будет наводиться ЭДС *индукции* величиной $\mathcal{E}_и = -d\Phi/dt = -\Phi\cdot\omega$, где $\omega=2\pi f$ есть круговая частота, f – частота изменения тока.

Рассмотрим коаксиальную систему, состоящую из соленоида C (рис. 1) и измерительной катушки K .

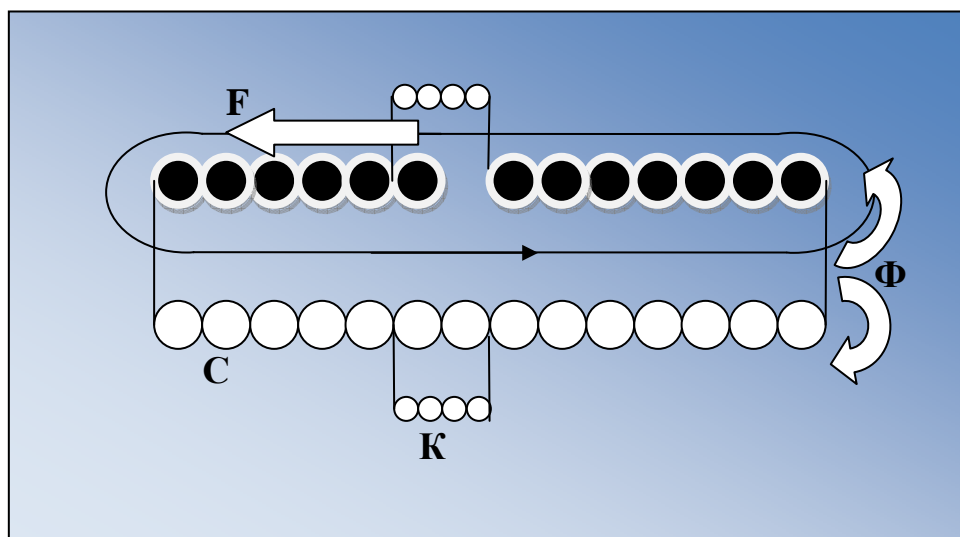


Рис. 1. Направление магнитного потока: Φ внутри соленоида, и F вне его .

Зададим в соленоиде ток $i_1(t)=I_1\sin(\omega t)$, что приведёт к появлению магнитного потока $\Phi(t)$ в поперечном сечении соленоида C и $\Phi_K(t)$ в поперечном сечении катушки K . Наведенная в катушке ЭДС индукции будет равна $\mathcal{E}_K = -d\Phi_K(t)/dt = -M_{кс}di_1(t)/dt$, поскольку $\Phi_K(t)$ пропорционален Φ , а Φ пропорционален $i_1(t)$. Здесь вместо собственной индуктивности L_K , равной отношению магнитного потока в ней к току самой катушки, используют коэффициент $M_{кс}$, называемый *взаимной индуктивностью* катушки относительно соленоида. Он определяется как отношение магнитного потока Φ_K в катушке к току i_1 в соленоиде. Его можно вычислить, если известны все параметры системы, в противном случае он находится путём измерений.

4. Описание измерительной установки

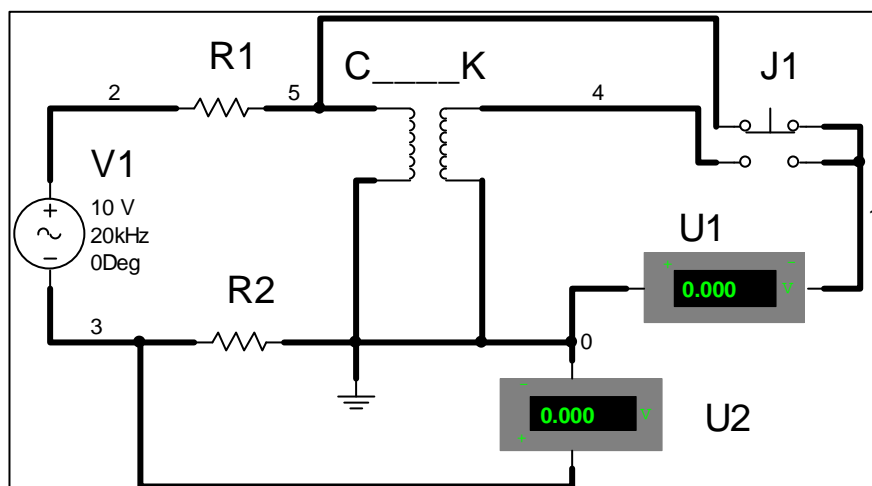


Рис. 2. Электрическая схема измерений

Схема измерений дана на рис. 2, где приняты следующие обозначения: V1 – источник переменного напряжения, R1 – резистор, ограничивающий ток, U1, U2 – вольтметры переменного тока, C – исследуемый соленоид (слева) и K – измерительная катушка (справа), J1 – переключатель, который в нижнем положении подключает вольтметр U1 к измерительной катушке, а в верхнем – к соленоиду. Вольтметр U2 подключён к измерительному резистору R2, что позволяет вычислить ток в цепи.

5. Приборы для выполнения работы

1. Генератор синусоидального переменного тока. 2. Милливольтметр. 3. Система из двух катушек с индуктивной связью.



Рис. 3. Генератор

Соленоид изготовлен путём намотки медного изолированного провода на трубку из диэлектрика. Измерительная катушка коаксиально

установлена на горизонтальном стержне с возможностью перемещаться вдоль соленоида. Переключатель внизу выполняет функции переключателя J1: « U_C » соответствует верхнему положению J1, а « U_K » – нижнему.



Рис. 4. Катушки с индуктивной связью.

6. Порядок выполнения работы

Собрать электрическую схему: при помощи кабеля соединить гнездо «выход 1» генератора с клеммами « $U_{ген}$ » (вверху слева на рис. 4) подключить милливольтметр U_1 к клеммам « U_C / U_K », а милливольтметр U_2 к клеммам « U_{R2} »; установить катушку по центру соленоида.

Опыт 1. Измерение взаимной индуктивности при различных относительных положениях катушек. Получив разрешение преподавателя, установить выходное напряжение генератора 10 В и частоту 20 кГц; произвести измерение при указанных в таблице 1 положениях P катушки. Занести результаты измерений в таблицу 1.

Обозначения: P – расстояние центра катушки от центра соленоида, f – частота генератора, U_{R2} – напряжение на измерительном сопротивлении, I – ток соленоида, $U_{ген}$ – напряжение генератора, U_C – напряжение на соленоиде, U_K – напряжение на катушке, круговая частота $\omega = 2\pi f$.

Таблица 1.

измерение				расчёт					
P , см	U_{R2} В	U_C В	U_K В	I мА	$L_C^{изм}$ Гн		$B_{центр}$ мТл	$B_{край}$ мТл	
0									
6									
12									
18									

Опыт 2. Измерение взаимной индуктивности на различных частотах.

Произвести измерения при указанных в таблице 2 частотах при положении $P=0$ катушки. Занести результаты измерений и расчётов в таблицу 2.

Таблица 2.

измерение				расчёт					
f кГц	U_{R2} В	U_C В	U_K В	I мА	$L_c^{изм}$ мГн	Φ_c Вб	B_c мТл	$M_{кк}$ мГн	F_K Вб
15									
20									
25									
30									
	среднее								

7. Обработка результатов измерений

Данные для расчёта. Соленоид: длина $l_c=360\pm 3$ мм, площадь поперечного сечения $S_c=820\pm 30$ мм², число витков $N_c=650$, сопротивление омическое $R_c=6.6\pm 0.3$ Ом. Измерительная катушка диаметр $D_k=55\pm 1$ мм, число витков $N_k=150$, длина $l_k=23\pm 1$ мм. $R_1=319\pm 2$ Ом, $R_2=10,49\pm$ Ом.

$\mu_0=4\pi 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума), для воздуха $\mu=1$, B - индукция магнитного поля на оси соленоида

Расчёт. 1. Ток соленоида $I=U_{R2}/R_2$, полное сопротивление соленоида $Z=(R_c^2+X_C^2)^{1/2}$, реактивное сопротивление соленоида $X_C=\omega L_c^{изм}$, $Z=U_C/I$. Отсюда по результатам измерений величина индуктивности соленоида равна $L_c^{изм}=[(U_C/I)^2-R_c^2]^{1/2}/\omega$.

2. Численно $U_C=L_c^{изм} di_c(t)/dt=L_c^{изм} I\omega$, где $i_c(t)=I\sin(\omega t)$. Отсюда приближенно, поскольку $X_C \gg R_c$, $U_C=I X_C$, и $L_c^{изм}=U_C R_2/\omega U_{R2}$.

3. Имея $U_C=d\Phi(t)/dt$, найдём величину магнитного потока $\Phi_c=U_C/\omega$ и среднюю индукцию в центре на оси соленоида $B_c=\Phi_c/S$.

4. Взаимная индуктивность: $U_K=M_{кк} di_1(t)/dt=M_{кк} \omega I$, отсюда $M_{кк}=U_K/\omega I$.

5. Магнитный поток катушки: $U_K=dF_K(t)/dt$, отсюда $F_K=U_K/\omega$.

Задание для продвинутых. Рассчитать и сравнить с результатами измерений:

$L_c^{расч}=\mu_0 N_c^2 S k / l_c$ ($k=0.27$); $B_{расч}^{центр}=\mu\mu_0 N_c I / (d_c^2+l_c^2)^{1/2}$, где $d_c^2=4S/\pi$;

$M_{кк}=\kappa 0.25\pi\mu_0 S N_c N_k / l_c l_k$ при $\kappa=0.022$.

8. Вопросы для самопроверки

1. В чём состоит явление электромагнитной индукции и самоиндукции?
2. Что такое индуктивность, как она определяется?
3. Каков физический смысл μ - относительной магнитной проницаемости магнетика μ ?
4. Как определяется магнитное поле?
5. Какие существуют источники магнитного поля?

6. Что такое магнитный поток, как он измеряется?
7. Дайте определение взаимной индукции. Как её измеряют?
9. Литература
1. Савельев И.В. Курс физики, кн.2. Электричество и магнетизм. – М.: Высшая школа, 2003.
 2. Калашников С.Г. Электричество. - М.: Наука, 2004.
 3. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.
Фейнмановские лекции по физике. Выпуск 5. "Электричество и магнетизмом". Изд.: Едиториал УРСС, 2004 г.
 4. Сивухин Д.В. Общий курс физики.Т.3,-М.:ФИЗМАТЛИТ;Изд. МИФИ,2002.