

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ИНДУКЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

Методические указания  
по выполнению лабораторной работы № 1  
по курсу “Физические основы получения информации”

ТОМСК 2011

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

### "ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДУКЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ"

#### 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Для реализации многих измерительных преобразований требуется создавать в некоторой области пространства постоянное или переменное магнитное поле. Наибольшее распространение получил источник магнитного поля, представляющий собой обмотку с электрическим током.

При использовании магнитного поля для измерительных преобразований важно знать не только значения напряженности или индукции магнитного поля в некоторой точке пространства в определенный момент времени, но и пространственно-временное распределение этих величин, что дает возможность получать дополнительную информацию об объекте измерения.

В данной работе исследуется пространственное распределение напряженности магнитного поля круглой и вытянутой прямоугольной плоских обмоток, по которым протекает переменный электрический ток. В общем случае, для произвольной точки пространства с координатами  $X, Y, Z$  (рис. 1), вектор напряженности магнитного поля обмотки с током имеет три пространственные составляющие  $\vec{H}_x, \vec{H}_y, \vec{H}_z$ , описываемые достаточно сложными и громоздкими уравнениями.

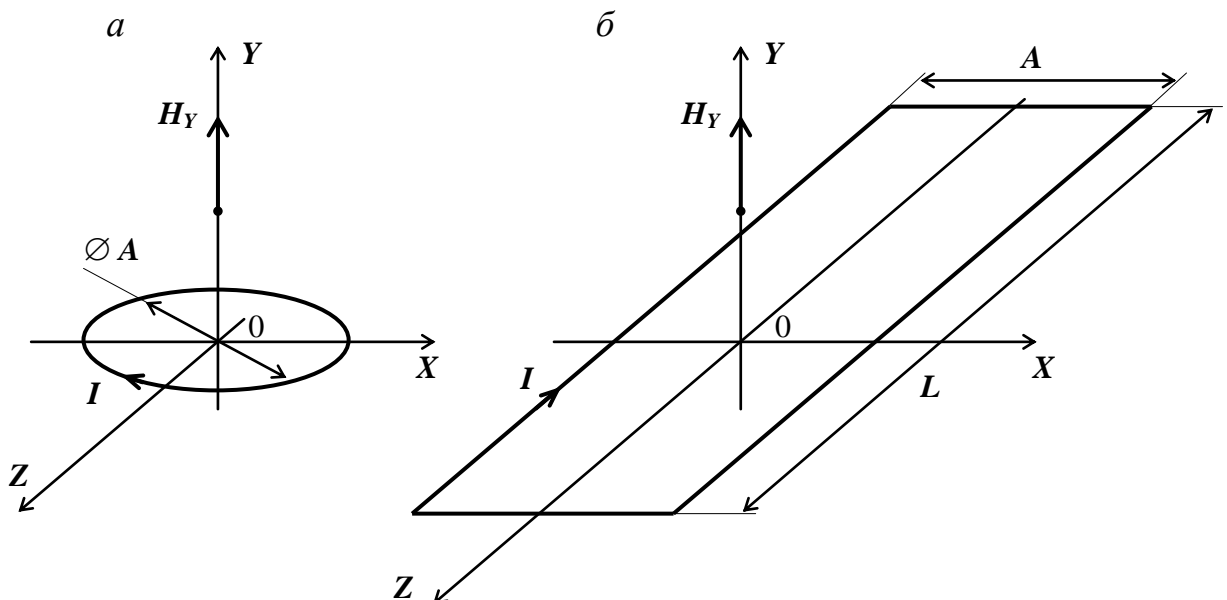


Рис. 1. Круглая (а) и прямоугольная (б) обмотки с током:  $I$  – ток в обмотке;  $\varnothing A$  – диаметр круглой обмотки;  $A \times L$  – размеры прямоугольной обмотки;  $X, Y, Z$  – оси координат.

На оси  $OY$  магнитные поля обмоток имеют только одну пространственную составляющую  $H_y$ , зависимости которой от координаты  $Y$  для той и другой обмоток описываются относительно простыми выражениями, приводимыми ниже. Здесь и далее для исключения влияния на результат тока обмотки будем определять не абсолютные значения напряженности магнитного поля, а нормированные относительные значения  $h = H/H_A$ . В качестве нормирующего значения напряженности удобно использовать ее значение  $H_A$  в точке с координатами  $X = 0; Y = A; Z = 0$ , где  $A$  - диаметр круглой обмотки или ширина прямоугольной обмотки. Значение  $A$  будем использовать для нормирования значений координат:  $x = X/A; y = Y/A; z = Z/A$ .

Для круглой обмотки на ее оси:

$$h = \frac{H_y}{H_A} = \frac{5\sqrt{5}}{\left[1 + (2y)^2\right]^{3/2}}. \quad (1)$$

Для прямоугольной обмотки при условии  $L \gg A$  и  $Y \gg L$  можно воспользоваться выражениями для двухпроводной линии:

$$h = \frac{H_y}{H_A} = \frac{5}{1 + (2y)^2}. \quad (2)$$

В случае если расстояние  $R$  от центра обмотки до точки в пространстве, где определяется напряженность магнитного поля, значительно превышает размеры обмотки (рис.2) можно воспользоваться для определения пространственных составляющих вектора напряженности возбуждающего магнитного поля в плоскости  $Z = 0$  приближенными выражениями:

$$\begin{aligned} h_x &= \frac{H_x}{H_A} = \frac{3}{2} \cdot \frac{x \cdot y}{r^5}, \\ h_y &= \frac{H_y}{H_A} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{r^3} \cdot \left( \frac{3y^2}{r^2} - 1 \right), \\ r &= R/A = \sqrt{x^2 + y^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Данные выражения позволяют осуществить анализ топографии магнитного поля.

На рис.5 приведены полученные на основе (3) зависимости  $h_x(x)$  и  $h_y(x)$  для некоторого значения  $y$ . Можно показать, что значение  $x = x_0$ , при котором функция  $h_y(x)$  равна нулю, и значение  $x = x_m$ , при котором функция  $h_x(x)$  принимает экстремальные значения, являются функциями координаты  $y$ :

$$\begin{aligned} x_0 &= \pm\sqrt{2} \cdot y, \\ x_m &= \pm\frac{1}{2} \cdot y. \end{aligned} \quad (4)$$

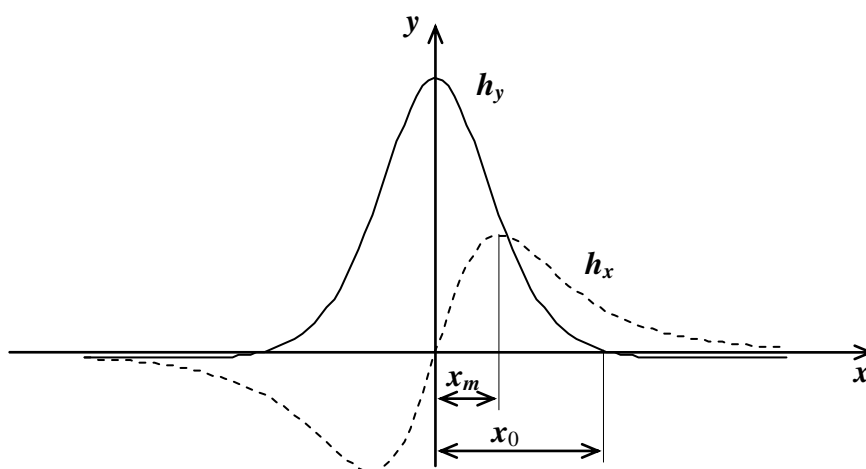


Рис. 3. Координатные зависимости пространственных составляющих вектора напряженности магнитного поля.

Напряженность магнитного поля может быть измерена с использованием индукционного измерительного преобразования, основанного на явлении электромагнитной индукции, суть которого заключается в возникновении в замкнутом контуре, пронизываемом изменяющимся во времени потоком магнитной индукции  $\Phi$ , эдс. индукции  $e$ , равной скорости изменения магнитного потока:  $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ . Для обмотки с числом витков  $w$ , площадью

среднего витка  $S$  (рис. 2) в случае синусоидального характера изменения напряженности магнитного поля ( $\mathbf{H}(t) = \mathbf{H}_m \sin \omega t$ ) и при условии, что поле в плоскости витков можно считать однородным (данное допущение справедливо при относительно малых размерах индукционной обмотки):

$$e(t) = -\mu_0 w_2 S \omega \cos \alpha \cdot \mathbf{H}_m \cos \omega t, \quad (5)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м - магнитная постоянная;

$\omega$  - угловая частота тока, 1/с;

$\alpha$  - угол между нормалью к плоскости витков обмотки и вектором  $\bar{\mathbf{H}}$ ;

$\mathbf{H}_m$  - амплитуда напряженности магнитного поля.

Действующее  $\mathbf{H}$  и амплитудное  $\mathbf{H}_m$  значения напряженности магнитного поля определяется из (5) по формуле:

$$\mathbf{H} = \frac{E}{\mu_0 w S \omega \cos \alpha}; \quad \mathbf{H}_m = \frac{E_m}{\mu_0 w S \omega \cos \alpha}, \quad (6)$$

где  $E$  и  $E_m$  – соответственно действующее и амплитудное значения эдс индукционной обмотки.

Пространственные составляющие напряженности магнитного поля в плоскости  $Z = 0$   $H_x$  и  $H_y$  измеряются при ориентациях нормали индукционной обмотки соответственно вдоль осей  $OX$  и  $OY$ . Угол  $\alpha$  в выражении (6) берется при этом равным нулю. Нормированные значения составляющих напряженности находятся по формулам:

$$h_x = \frac{H_x}{H_A} = \frac{E_x}{E_A}; \quad h_y = \frac{H_y}{H_A} = \frac{E_y}{E_A}, \quad (7)$$

где  $E_x$  и  $E_y$  - действующие (амплитудные) значения эдс индукционной обмотки при ориентации ее нормали соответственно вдоль осей  $OX$  и  $OY$ ;

$E_A$  - действующее (амплитудное) значение эдс обмотки в точке  $x = 0$ ,  $y = A$ ,  $z = 0$  при ориентации нормали обмотки вдоль  $OY$ .

## 2. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

2.1. Как сделать магнитное поле круглой обмотки более однородным?

2.2. Поле какой из обмоток - круглой или вытянутой - при одинаковых значениях  $A$  более однородно?

2.3. Какие пространственные составляющие имеет вектор напряженности магнитного поля обмоток с током в плоскостях  $X = 0$ ;  $Y = 0$ ;  $Z = 0$ ?

2.4. Чему равен фазовый сдвиг между напряженностью магнитного поля и эдс индукционной обмотки?

2.5. Как экспериментально определить направление вектора напряженности магнитного поля?

## 3. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование пространственного распределения напряженности магнитных полей различных по конфигурации обмоток с токами. Ознакомление с теоретическими основами и практическим применением для измерения напряженности магнитного поля индукционного измерительного преобразования.

## 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. Определить экспериментально зависимости относительных значений напряженностей магнитных полей круглой и прямоугольной обмоток на оси  $OY$  от значения относительной координаты  $y$  и сравнить с теоретическими зависимостями (1), (2), (3). Определить абсолютные значения напряженностей магнитных полей круглой и прямоугольной обмоток в точке  $X = 0$ ;  $Y = A$ ;  $Z = 0$ .

4.2. Определить экспериментально для круглой обмотки зависимости  $h_x(x)$  и  $h_y(x)$  при различных значениях  $y$  ( $Z = 0$ ). Сравнить с теоретическими зависимостями (3).

4.3. Определить экспериментально для круглой обмотки зависимости значений  $x = x_0$ , при которых функция  $h_y(x)$  равна нулю, и значений  $x = x_m$ , при которых функция  $h_x(x)$  достигает экстремальных значений, от координаты  $y$ . Сравнить полученные экспериментальные зависимости  $x_0(y)$  и  $x_m(y)$  с теоретическими (4).

4.4. Определить экспериментально для прямоугольной обмотки зависимости  $h_x(x)$  и  $h_y(x)$  при различных значениях  $y$  ( $Z = 0$ ).

4.5. Определить экспериментально для прямоугольной обмотки зависимости значений  $x = x_0$ , при которых функция  $h_y(x)$  равна нулю, и значений  $x = x_m$ , при которых функция  $h_x(x)$  достигает экстремальных значений, от координаты  $y$ .

## 5. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

В настоящей работе исследуются магнитные поля двух обмоток - круглой и прямоугольной вытянутой. Диаметр круглой обмотки и ширина прямоугольной равны:  $A = 50$  мм. Для задания системы координат служит специальный планшет с прорезью для крепления той или другой обмотки. Питание обмоток переменным током частоты  $f = 16$  кГц осуществляется с коммутационно-измерительной панели (КИП) коаксиальным кабелем. Для

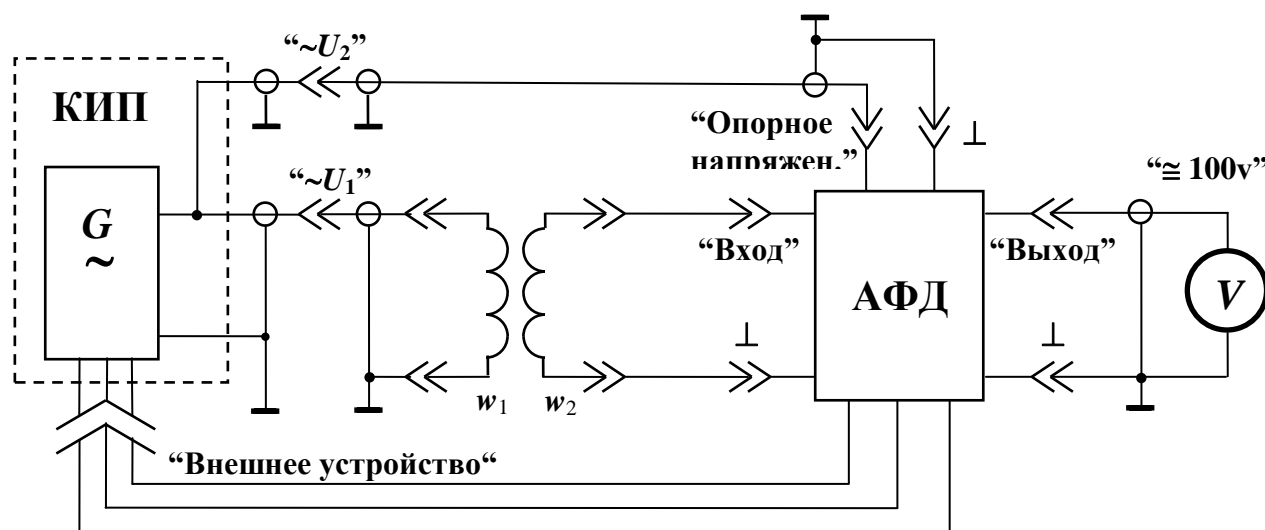


Рис. 4. Схема измерения напряженности магнитного поля с использованием амплитудно-фазового детектора и вольтметра постоянного напряжения:  $w_1$ - обмотка с током;  $w_2$ -индукционная обмотка; КИП - контрольно-измерительная панель; АФД – амплитудно-фазовый детектор;  $G$  - источник переменного напряжения;  $V$  – вольтметр постоянного напряжения.

измерения составляющих напряженности магнитного поля используется индукционная обмотка меньших размеров, имеющая площадку для установки на координатную сетку планшета. Ориентация индукционной обмотки осуществляется с помощью нанесенных на площадку ортогональных осей. Параметры обмотки: число витков  $w = 300$ ; диаметр среднего витка  $d = 30$  мм.

Измерение эдс измерительной обмотки осуществляется с использованием амплитудно-фазового детектора и вольтметра постоянного напряжения (рис. 4). В качестве измерительного прибора используется мультиметр МУ-62 (МУ-65) в режиме измерения постоянного напряжения. Детектирование сигнала индукционной обмотки осуществляется электронным амплитудно-фазовым детектором (АФД). Конструктивно АФД выполнен отдельным блоком (рис. 5), имеющим гнезда подключения индукционной обмотки - "Вход" и "⊥", гнезда подключения измерительного прибора - "Выход" и "⊥", гнезда подключения опорного напряжения - "Опорное напряжение" и "⊥", шнур с разъемом для подключения цепей питания электронной схемы детектора к разъему КИП "Внешнее устройство"(на рисунке не показан). Эдс индукционной обмотки в зависимости от ориентации и местоположения последней в исследуемом магнитном поле может быть в фазе или противофазе с напряжением токовой обмотки (опорным напряжением). Принимается, что для точки с координатами  $X = 0$ ;  $Y = A$ ;  $Z = 0$ , фаза эдс совпадает с фазой опорного напряжения. Показание мультиметра при этом должно иметь знак



Рис. 5. Внешний вид АФД.

(+). В противном случае следует изменить полярность подключения индукционной обмотки к соединительному кабелю. В дальнейшем результат измерения эдс берется с учетом знака показаний вольтметра. При этом знак (+) соответствует совпадению по фазе эдс и опорного напряжения, знак (-) соответствует их противоположности по фазе. Показания мультиметра соответствуют амплитудному значению измеряемой эдс.

## 6. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

6.1. При измерении напряженности магнитного поля на оси  $OY$  обмоток следует учитывать, что в этом случае вектор  $\vec{H}$  имеет только одну составляющую  $\vec{H}_y$ . Для измерения  $H_y$  плоскости витков индукционной обмотки должны быть перпендикулярны  $OY$ , а нормаль к плоскости витков должна быть ориентирована навстречу  $OY$ . Измерение нормирующего значения  $E_A$  производится при установке индукционной обмотки в точку с координатами  $x = X/A = 0$ ,  $y = Y/A = 1$ . Для этой точки определяется абсолютное значение  $H$  по формуле (6). Для остальных точек определяется относительное значение  $h_y$  по формуле (7). Далее строится зависимость  $h_y(x)$ . Полученные экспериментально зависимости  $h_y(x)$  для круглой и прямоугольной обмоток сравниваются с теоретическими, построенными с использованием выражений (1), (2), (3).

6.2. Для измерения составляющих вектора напряженности магнитного поля  $h_x$  и  $h_y$  в точке с координатами  $x$ ,  $y$  центр основания индукционной обмотки совмещается с данной точкой на планшете. При измерении горизонтальной составляющей вектора напряженности магнитного поля нормаль к плоскости витков обмотки ориентируется параллельно  $OX$ , а при измерении вертикальной составляющей - параллельно  $OY$ . Стрелки осей, нанесенных на основание индукционной обмотки при этом ориентируются против положительных направлений осей координат планшета. Нормирование составляющих вектора напряженности магнитного поля производится по значению напряженности в точке с координатами  $x = X/A = 0$ ,  $y = Y/A = 1$ . Для заданного значения  $y$  определяются зависимости  $h_x(x)$  и  $h_y(x)$ . Полученные экспериментальные зависимости сравниваются с теоретическими (3).

6.3. Для определения местоположения на оси  $x$  экстремумов функции  $h_x(x)$  и нулей функции  $h_y(x)$  при фиксированном  $y$  производится перемещение индукционной обмотки вдоль оси  $x$ . Измерение каждой из ортогональных составляющих вектора напряженности магнитного поля производится по аналогии с 6.2. Таким образом находят значения  $x_0$  и  $x_m$  для различных значений  $y$ . Далее строятся зависимости  $x_0(y)$  и  $x_m(y)$ . Полученные зависимости сравниваются с теоретическими (4).



6.4. При выполнении п.4.4 и 4.5 программы работы используются методические рекомендации 6.2 и 6.3.

## 7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 7.1. Название работы.
- 7.2. Цель работы.
- 7.3. Программа работы.
- 7.4. Схема экспериментальной установки.
- 7.5. Основные соотношения, примеры расчетов.
- 7.6. Результаты экспериментов и расчетов, оформленные в виде таблиц.
- 7.7. Графики зависимостей.
- 7.8. Выводы.

## 8. ЛИТЕРАТУРА

- 8.1. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. - М.: Госэнергоиздат, 1960.- 464 с.
- 8.2. Электрические измерения неэлектрических величин. /Под ред. П.В. Новицкого. - Изд. 5-е. Л.: Энергия, 1975 - 576 с.
- 8.3. Неразрушающий контроль. Кн.3 Электромагнитный контроль. Под ред. В.В.Сухорукова. - М.: Высш.шк., 1991.

Кафедра информационно-измерительной техники

Составитель профессор, д.т.н. Гольдштейн А.Е.