

Министерство образования и науки Российской Федерации



УТВЕРЖДАЮ:
Директор ИШНКБ

_____ Баранов П.Ф.

“ _____ ” _____ 2024 г.

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

Методические указания по выполнению лабораторной работы № 4
по дисциплине “Физические основы получения информации”

ТОМСК 2024

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

"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.

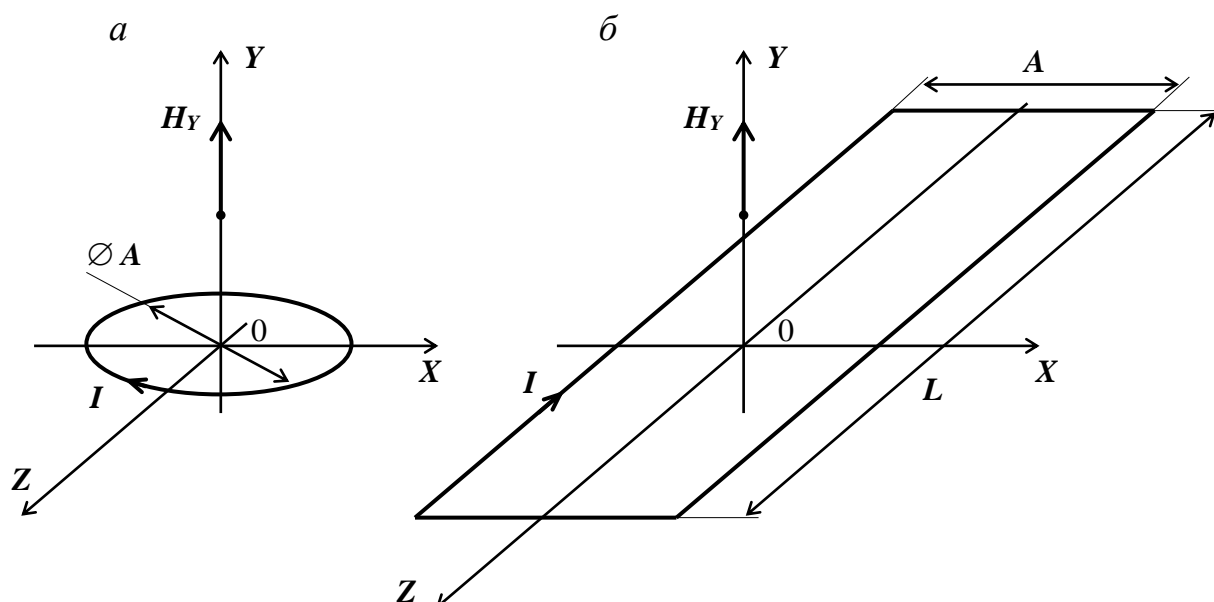


Рис. 1. Круглая (а) и прямоугольная (б) обмотки с током: I – ток в обмотке; $\varnothing A$ – диаметр круглой обмотки; $A \times L$ – размеры прямоугольной обмотки; X, Y, Z – оси координат.

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:

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

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 :

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

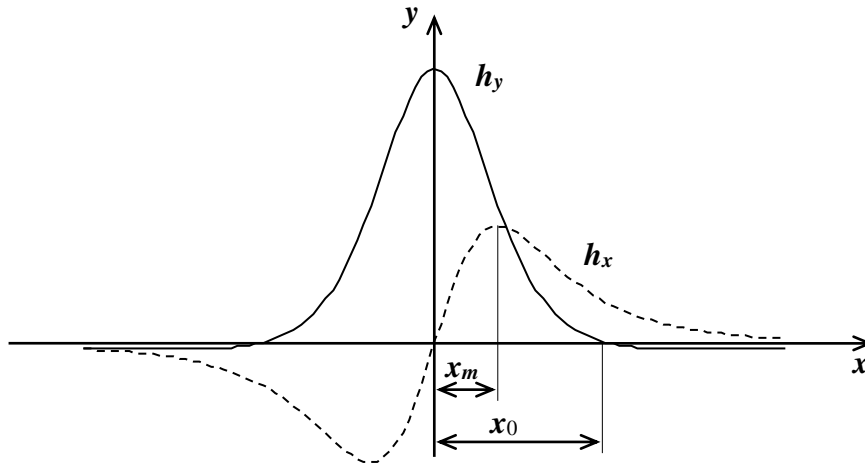


Рис. 3. Координатные зависимости пространственных составляющих вектора напряженности магнитного поля.

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 Φ , 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):

$$e(t) = -\mu_0 w_2 S \omega \cos \alpha \cdot H_m \cos \omega t,\tag{5}$$

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

ω - угловая частота тока, 1/с;

α - угол между нормалью к плоскости витков обмотки и вектором \vec{H} ;

H_m - амплитуда напряженности магнитного поля.

Действующее H и амплитудное H_m значения напряженности магнитного поля определяется из (5) по формуле:

$$H = \frac{E}{\mu_0 w S \omega \cos \alpha}; \quad H_m = \frac{E_m}{\mu_0 w S \omega \cos \alpha},\tag{6}$$

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 α 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

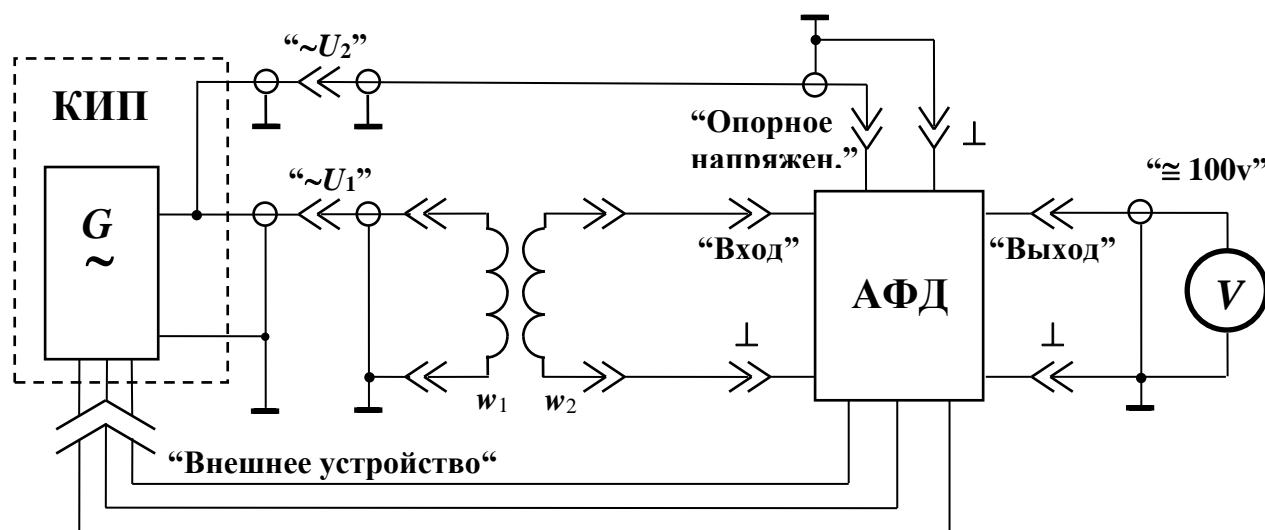


Рис. 4. Схема измерения напряженности магнитного поля с использованием амплитудно-фазового детектора и вольтметра постоянного напряжения: w_1 - обмотка с током; w_2 -индукционная обмотка; КИП - контрольно-измерительная панель; АФД – амплитудно-фазовый детектор; G - источник переменного напряжения; V – 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 (+). В противном случае следует изменить полярность подключения индукционной обмотки к



Рис. 5. Внешний вид АФД.

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. Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации: учебник
Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 292 с.
- 8.2. Гольдштейн А.Е. Физические основы измерительных преобразований:
учебн. пособие Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 253 с.
- 8.3. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. - М.: Госэнергоиздат,
1960.- 464 с.
- 8.4. Электрические измерения неэлектрических величин. /Под ред. П.В.
Новицкого. - Изд. 5-е. Л.: Энергия, 1975 - 576 с.
- 8.5. Неразрушающий контроль. Кн.3 Электромагнитный контроль. Под
ред. В.В.Сухорукова. - М.: Высш.шк., 1991.

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