

Аннотация

Целью работы являлось исследование зависимости распределения магнитного поля в системе из двух кольцевых катушек от расстояния между ними. Для этой цели была собрана установка, состоящая из 2 тонких кольцевых катушек, закрепленных на одной оси и соединенных последовательно между собой и резистором, измерительного индуктивного зонда, генератора переменного напряжения, осциллографа. С помощью зонда были получены осциллограммы, по которым определялось значение магнитного поля на оси катушек. В результате были получены распределения магнитного поля в системе катушек при различных расстояниях между ними. Проведено сравнение полученных данных с теоретическими и объяснено их расхождение.

Содержание

1. Введение	3
2. Теоретическая часть	4
2.1. Основные сведения о магнитном поле	4
2.2. Магнитное поле системы из двух тонких кольцевых катушек	5
2.3. Метод измерения	8
3. Описание установки	8
4. Результаты и обсуждение	9
4.1. Калибровка индуктивного зонда	9
4.2. Результаты измерений	9
5. Заключение	12
6. Список литературы	12

1. Введение

В наше время магнитные поля широко используются в различных сферах деятельности. Они эффективно применяются в науке при создании и использовании ядерного магнитного резонанса, электронно-парамагнитного резонанса, для удержания плазмы. Также магнитное поле применяется в технике различных магнитных сепараторов, магнитных подъемных устройств, магнитных методов неразрушающего контроля качества изделий. Кроме того, магнитное поле успешно используется и в медицине - для терапии, диагностики.

Существуют различные методы получения магнитных полей. Так, например, для получения стационарного магнитного поля используются электромагниты (обычно состоящие из соленоида и ферромагнитного сердечника), резистивные и сверхпроводящие соленоиды различных типов (многовитковые многослойные катушки, спирали плоские и геликоидальные, набранные из дисков, одновитковые и др.). В данной работе исследовалось магнитное поле в системе из двух тонких кольцевых катушек, закрепленных на одной оси.

Для изучения магнитных полей существует много методов, отличающихся как по физическим принципам, так и по области применения. Наиболее распространенным является измерение магнитного поля с помощью датчика Холла. Это довольно простые устройства (полупроводниковый датчик и электронная схема управления/регистрации). Датчик имеет малые размеры (порядка 1 мм³), довольно высокую чувствительность (как правило, минимальная величина измеряемого поля около 0,1-0,01 Гс), но имеет нелинейную характеристику в области полей более 1000-3000 Гс и довольно узкий частотный диапазон (от единиц Гц до десятков кГц). Датчик Холла не позволяет с высокой точностью измерять абсолютные значения поля из-за "дрейфа нуля", обусловленного как изменением температуры, так и другими причинами. Более высокими измерительными параметрами обладают датчики, использующие явление магнитного резонанса. Это электронное устройство,

содержащее генератор, частота колебаний которого прямо пропорциональна напряженности поля. Такой датчик позволяет измерять абсолютное значение магнитного поля от десятков Гс до десятков тысяч Гс с точностью около 10^{-7} - 10^{-9} Гс. К недостаткам датчика можно отнести довольно сложное устройство, и то, что измерять он может только поля с высокой однородностью.

Для оценки величины и распределения магнитного поля простейшим можно считать индуктивный зонд – небольшую катушку, помещаемую в область измерений. Как и датчик Холла, зонд имеет не очень широкую полосу частот измерения (от единиц Гц до сотен кГц). Чувствительность датчика определяется, в основном, чувствительностью электронной схемы регистрации, и тысячных долей Гс.

В данной работе измерение магнитного поля проводилось с помощью индуктивного зонда в силу простоты проведения измерений и изготовления зонда достаточно высокой точности, необходимой для оценки распределения магнитного поля в катушках.

Таким образом, целью работы являлось исследование зависимости распределения магнитного поля в системе из двух кольцевых катушек от расстояния между ними. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Экспериментально с помощью индуктивного зонда определить поле в системе из двух кольцевых катушек при различных расстояниях между ними
2. Сравнить полученные результаты с теоретическими.

2. Теоретическая часть

2.1. Основные сведения о магнитном поле

Движущиеся заряды (проводники с токами) создают в пространстве магнитное поле. В результате чего со стороны поля возникает сила, действующая на движущиеся в нем заряды. Основной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции **В** и вектор напряженности магнитного поля **Н**.

Закон Био-Савара-Лапласа, являющийся обобщением экспериментальных фактов, позволяет описать магнитное поле, создаваемое линейным элементом тока $I d\mathbf{l}$:

$$\mathbf{B} = \frac{I}{c} \frac{[d\mathbf{l} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')]}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3}, \text{ где } \mathbf{r} - \text{радиус-вектор точки наблюдения, } \mathbf{r}' - \text{радиус-вектор}$$

элемента с током.

Также для магнитного поля справедлив принцип суперпозиции: $\mathbf{B} = \sum_i \mathbf{B}_i$.

2.2. Магнитное поле системы из двух тонких кольцевых катушек

Для нахождения поля в системе из двух катушек рассмотрим круговой виток радиуса R с током I (рис. 1).

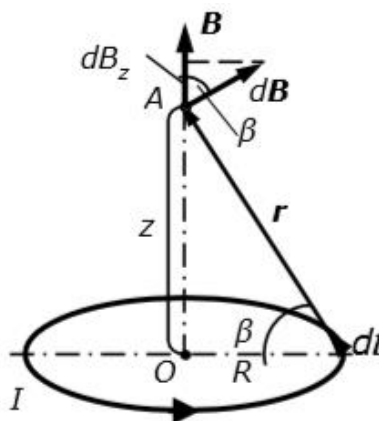


Рисунок 1. Магнитное поле $\mathbf{B}$ от одиночного витка

В силу симметрии задачи магнитное поле $\mathbf{B}$ будет направлено только по оси Oz . Значит для расчета поля нужно сложить проекции вектора $\mathbf{B}$ на ось Oz .

$$dB_z = \cos \beta \, dB$$

$$\cos \beta = \frac{R}{r} = \frac{R}{\sqrt{z^2 + R^2}} \quad (\text{см. рис.1})$$

Выделим элемент длины кольца $|d\mathbf{l}| = R \cdot d\alpha$.

Согласно закону Био-Савара-Лапласа:

$$dB_z = \frac{I}{c} \frac{[d\mathbf{l} \times \mathbf{r}]}{r^3} \cdot \cos \beta$$

$$B_z = \int \frac{I}{c} \cdot \frac{[d\mathbf{l} \times \mathbf{r}]}{r^3} \cdot \frac{R}{\sqrt{z^2 + R^2}} = \frac{I}{c} \int \frac{|d\mathbf{l}| \cdot |\mathbf{r}|}{r^3} \cdot \frac{R}{\sqrt{z^2 + R^2}} = \frac{I}{c} \int_0^{2\pi} \frac{R \cdot d\alpha}{r^2} \cdot \frac{R}{\sqrt{z^2 + R^2}} = \frac{I}{c} \int_0^{2\pi} \frac{R^2}{z^2 + R^2} \cdot d\alpha$$

$$\frac{d\alpha}{\sqrt{z^2 + R^2}} = \frac{I}{c} \int_0^{2\pi} \frac{R^2 \cdot d\alpha}{(z^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{2\pi R^2 I}{c(z^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Теперь рассмотрим систему из двух витков, находящихся на одной оси на расстоянии h друг от друга (см. рисунок 2).

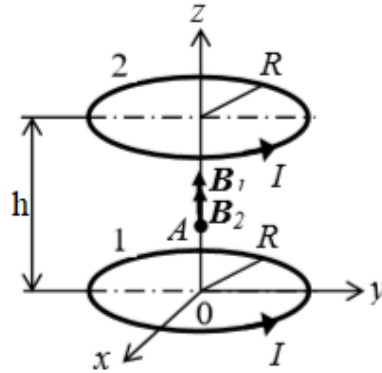


Рисунок 2. Результирующее магнитное поле $\mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2$ от двух витков

Согласно принципу суперпозиции, результирующее поле от двух витков:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2 = \frac{2\pi R^2 I}{c(z^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{2\pi R^2 I}{c((z-h)^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}}, \text{ где } \mathbf{B}_1 - \text{ поле от нижнего кольца, а } \mathbf{B}_2$$

от верхнего (см. рис.2)

Если два витка заменить двумя "тонкими" катушками (т.е. катушками, поперечные размеры обмотки которых пренебрежимо малы по сравнению с диаметром катушек) из N витков, то в силу принципа суперпозиции магнитное поле такой системы есть:

$$\mathbf{B} = \frac{2\pi R^2 IN}{c} \left(\frac{1}{(z^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{((z-h)^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \right)$$

Графически распределение магнитного поля для $h > R$ изображено на рисунке 3.

Неоднородность $\mathbf{B}$ в первом приближении характеризуется первой производной ($\mathbf{B}$ направлен вдоль оси z):

$$\frac{\partial B}{\partial z} = \frac{3\pi R^2 IN}{c} \left(-\frac{z}{(z^2 + R^2)^{\frac{5}{2}}} - \frac{(z-h)}{((z-h)^2 + R^2)^{\frac{5}{2}}} \right)$$

$$\text{Т.е. } \frac{\partial B}{\partial z} = 0 \text{ при } z = \frac{h}{2}$$

$$\frac{\partial^2 B}{\partial z^2} = \frac{3\pi R^2 IN}{c} \left(-\frac{(z^2 + R^2)^{\frac{5}{2}} - 5z^2(z^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}}{(z^2 + R^2)^5} - \frac{((z-h)^2 + R^2)^{\frac{5}{2}} - 5(z-h)^2((z-h)^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}}{((z-h)^2 + R^2)^5} \right)$$

Таким образом $\frac{\partial^2 B}{\partial z^2} = 0$ в точке $z = \frac{h}{2}$ при $h = R$. Это означает, что если катушки находятся друг от друга на расстоянии R то, создаваемое ими поле будет наиболее однородно. Такая система катушек называется системой Гельмгольца. Распределение поля для такой системы изображено на рисунке 4.

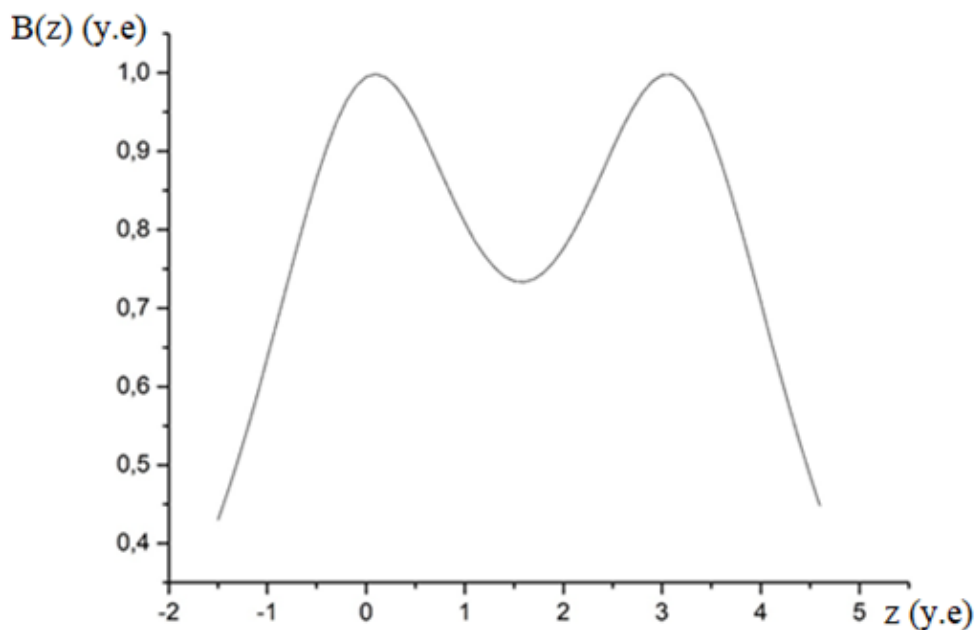


Рисунок 3. Распределение магнитного поля в системе из двух катушек при $h > R$.

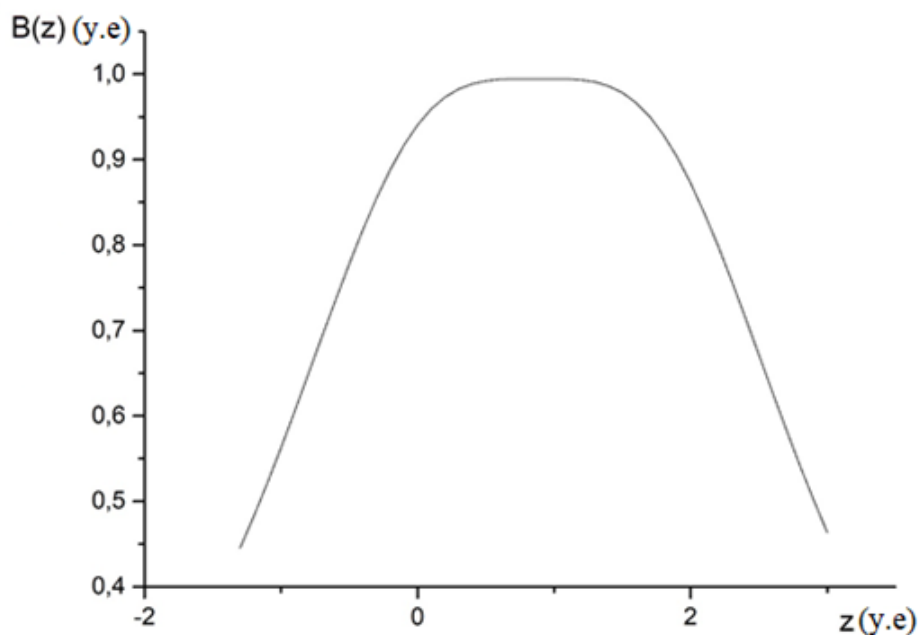


Рисунок 4. Распределение магнитного поля для системы Гельмгольца

2.3. Метод измерения

В данной работе магнитное поле системы из двух катушек исследовалось с помощью индуктивного зонда. Индуктивный зонд – это катушка которая помещается в зону исследуемого магнитного поля (в данном случае по оси катушек, плоскость катушки зонда перпендикулярна оси исследуемых катушек). Через катушки пропускался переменный ток, изменяющийся по синусоидальному закону с постоянной амплитудой, в результате чего вокруг катушек (как внутри, так и снаружи) образовывалось магнитное поле, а т.к. магнитное поле в катушках пропорционально току, то и изменяться оно будет по тому же закону. При этом переменное магнитное поле наводило в зондирующей катушке переменное вихревое электрическое поле. В результате чего на катушке образовывалась регистрируемая ЭДС. Т.к. ЭДС пропорциональна изменению магнитного поля, то её амплитудное значение будет пропорционально амплитудному значению измеряемого магнитного поля.

3. Описание установки

Экспериментальная установка (см. рис.5) состояла из генератора переменного напряжения ГЗ-118 (G1 на рис.5); осциллографа Tektronix TDS2002B; двух одинаковых последовательно соединенных катушек L1 и L2 из 40 витков с радиусом 1,75(см), закрепленных на одной оси на расстоянии h друг от друга; последовательно подключенного к ним резистора с сопротивлением $r = 27(\text{Ом})$; индуктивного зонда L3 со следующими параметрами: диаметр катушки - 6.4(мм), количество витков – 50; штатива на котором закреплялись катушки с индуктивным зондом.

Зонд закреплен на штативе так, чтобы он мог перемещаться по центральной оси катушек.

Одновременно регистрировались сигналы с каналов 1 и 2. На канале 1 регистрировалось напряжение на резисторе, с помощью которого определялся

ток в цепи. А на канале 2 регистрировалось ЭДС, возникшая на индуктивном зонде.

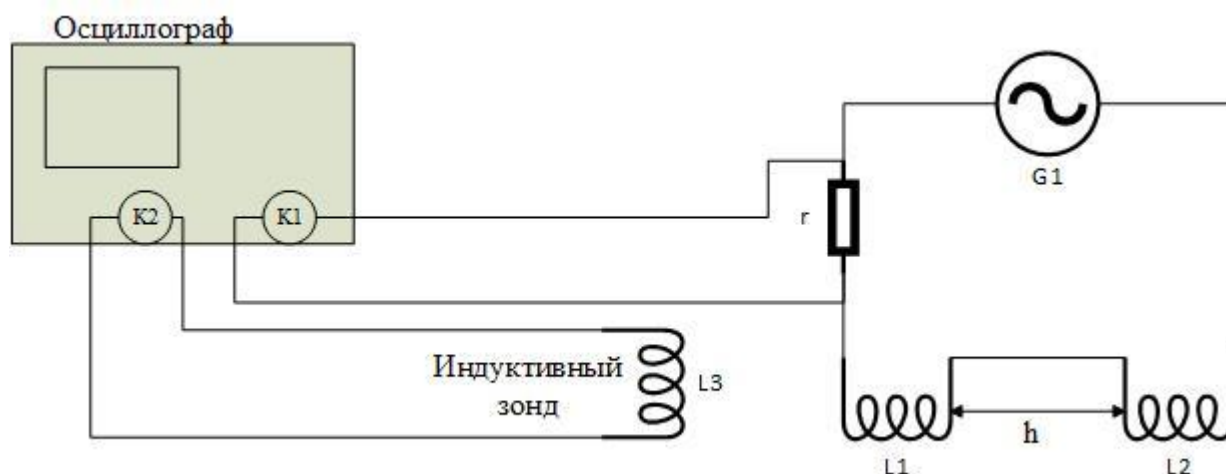


Рисунок 5. Схема экспериментальной установки

4. Результаты и обсуждение

4.1. Калибровка индуктивного зонда

Было проведено измерение при частоте генератора 50 кГц и амплитуде напряжения на выходе генератора 0,51 V в центре одной катушки из 40 витков. На осциллографе было зарегистрировано значение ЭДС возникшей на зонде: $U_3 = 36 \text{ мВ}$. Далее был проведен теоретический расчет индукции магнитного поля B в центре катушки: $B = 0,35 \text{ Гс}$. Коэффициент перевода k из ЭДС в индукцию магнитного поля был определен следующим образом: $k = \frac{B}{U_3} \approx 0,1$. Так, после умножения измеренного ЭДС на данный коэффициент, получалось определяемое магнитное поле. Данный коэффициент справедлив для всех проделанных измерений, т.к. все они проводились на той же частоте.

4.2. Результаты измерений

Графики теоретического и экспериментального распределения магнитного поля для различных расстояний между катушками приведены на рисунках 6-8.

Полученные результаты качественно согласуются с теорией. Но анализируя полученные данные можно заметить некоторые расхождения между теоретически и экспериментально определенным распределением поля. Это

связанно с тем, что при теоретическом расчете не учитывалась толщина намотки катушки (катушка считалась тонкой), размеры катушек сопоставимы с

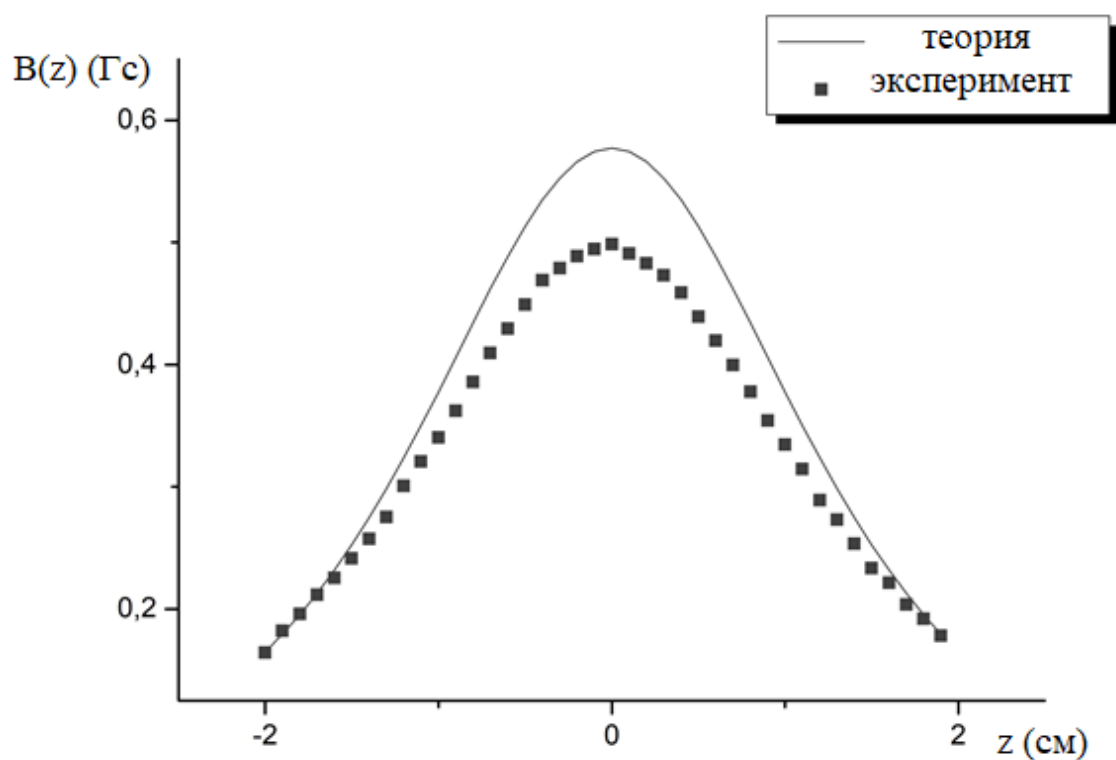


Рисунок 6. Распределение поля для одной катушки

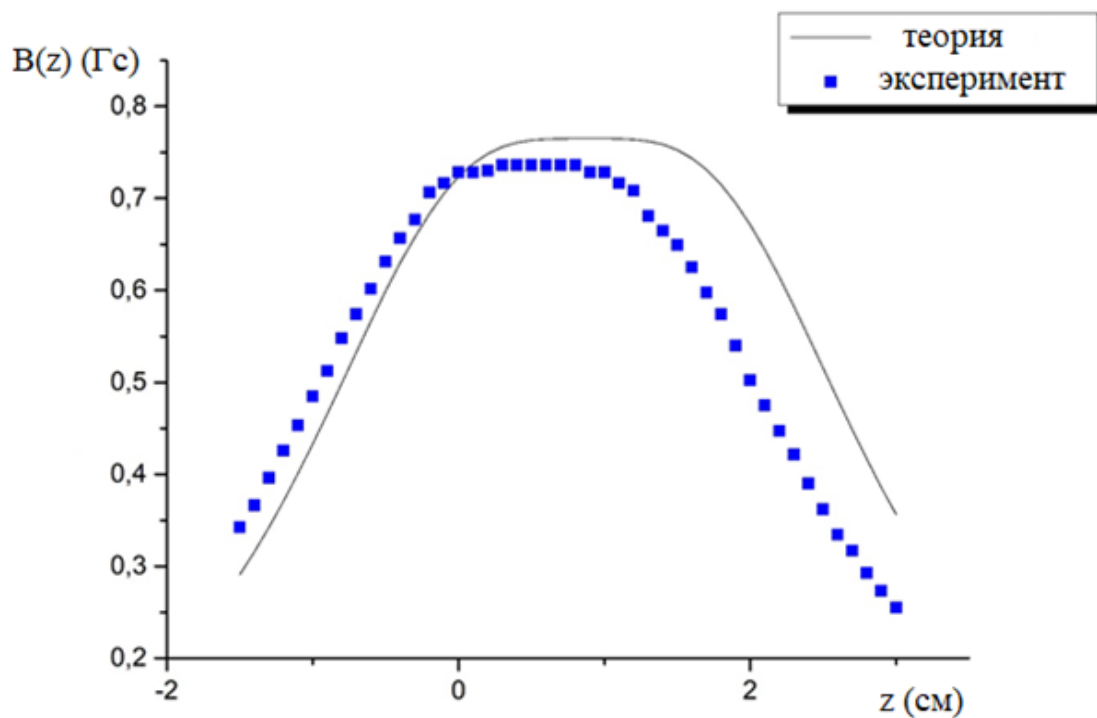


Рисунок 7. Распределение поля для системы Гельмгольца

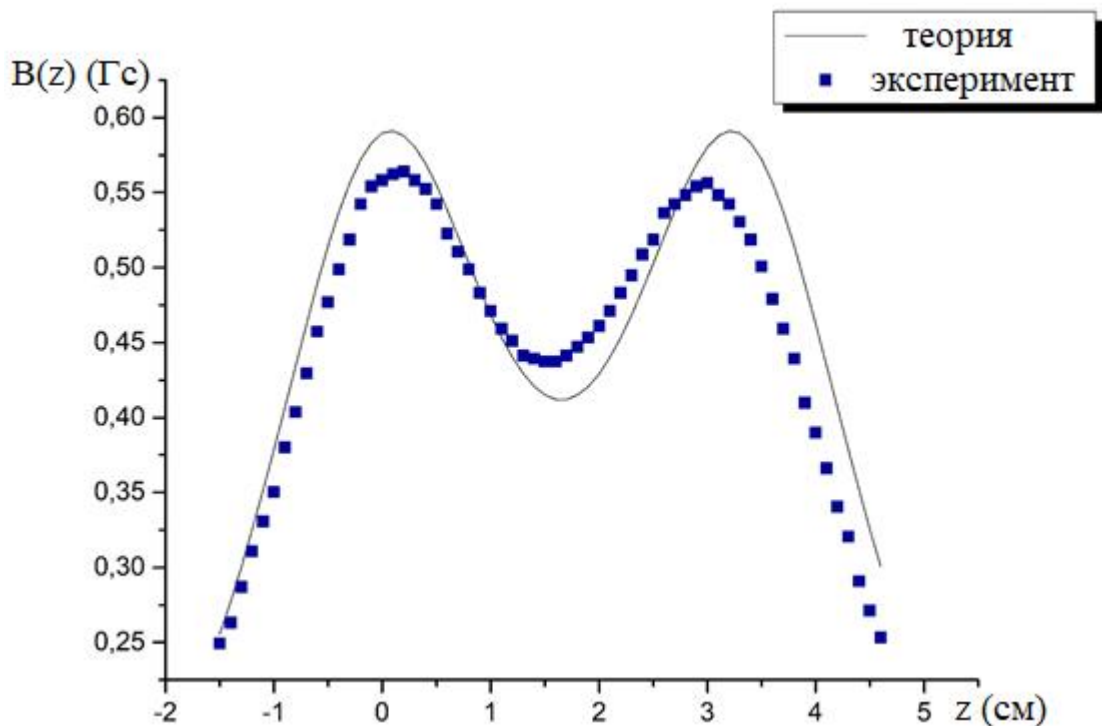


Рисунок 8. Распределение поля при расстоянии между катушками $h > R$ ($h = 3,3$ см, $R = 1,75$ см).

размером измерительного зонда, а калибровка зонда (в соответствии с законом Био-Савара-Лапласа) проводилась в предположении, что размер зонда гораздо меньше размера исследуемых катушек, так что магнитный поток через плоскость зонда однородный. Для изготовленного зонда эти условия выполняются только приблизительно. Кроме того, зондирующая катушка имеет довольно большой диаметр, так что магнитное поле, как и магнитный поток, проходящие через сечение зонда, уже не могут считаться однородными, как это предполагается в формуле, описывающей закон Био-Савара-Лапласа. Уменьшение площади зонда приводит к пропорциональному уменьшению ЭДС, и точности измерения (у применяемого осциллографа это $\pm 0,2$ мВ) уже было бы недостаточно даже для качественных оценок.

Можно заметить также, что пики у экспериментальных кривых смещены относительно теоретических. Причиной этого может являться то, что реально зонд был под некоторым углом к оси катушек и/или в том, что катушки, создающие магнитное поле, имеют конечные размеры (ширина – 4 мм и высота

2 мм), также причиной могла являться неточность определения точки, в которой измерялось поле.

Расхождения амплитуд полей можно объяснить тем, что зонд во время измерений был смещен относительно оси катушек, в результате чего было записано значение поля не на центральной оси катушек, а немного смещенной.

Также на рисунке 8 видно, что пики экспериментальной кривой немного не симметричны, причина может быть в том, что одна из катушек была наклонена к оси.

5. Заключение

В результате исследований было изучено распределение поля для одной тонкой кольцевой катушки и системы из 2-х тонких кольцевых катушек при расстоянии большем радиуса катушек и равном ему. Полученные результаты качественно согласуются с теоретическими расчетами, но расходятся численно, что может быть связано с не идеальностью измерительной установки, неточностями, возникшими при проведении измерений.

6. Список литературы

1. Плетнев С. В. Магнитное поле, свойства, применение: Научное и учебно-методическое справочное пособие. — СПб.: Гуманистика, 2004, 624 с.
2. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, М., 1951, 341 с.