

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Новоселов Кирилл Васильевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Изучение распределения магнитного поля в тонком прямом
соленоиде**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18301

Научный руководитель:

Гришин Ю. А.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Судников А.В.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Рекомендуется к публикации в сборнике избранных курсовых работ
Научный руководитель
Преподаватель практикума
Куратор практикума

Аннотация

Целью работы являлось изучение распределения магнитного поля в прямом соленоиде с тонкой намоткой. Для измерения амплитуды магнитного поля был изготовлен измерительный зонд и проведена его калибровка. Было проведено измерение напряжения на измерительном зонде на оси соленоида в зависимости от координаты. На основании полученных данных построен график напряженности магнитного поля. Оценены погрешности полученных величин. Было проведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими.

Ключевые слова: магнитное поле, тонкий прямой соленоид, измерительный зонд.

Оглавление

Введение.....	4
Теоретическая часть.....	5
Магнитное поле.	5
Закон Био-Савара-Лапласа. Магнитное поле витка с током. Магнитное поле соленоида.	6
Экспериментальная часть.....	9
Заключение	14
Список литературы	15

Введение

С каждым годом выходят все более и более усовершенствованные электронные приборы, а, как известно, везде, где есть потоки заряженных частиц, возникает магнитное поле. Знание величины и распределения магнитного поля можно использовать по-разному. Самый древний пример использования – это навигация с помощью компаса. По тому, как стрелка компаса отклоняется во внешнем магнитном поле Земли, можно определить, где север, а где юг. Еще знание распределения магнитного поля применяют в медицине для диагностики (МРТ). Также магнитное поле используют в ускорителях и других электровакуумных приборах для управления потоком заряженных частиц. Так как явления, связанные с магнитными полями, находят широкое применение и в прикладных и в научных задачах, знание распределения магнитного поля является очень важной задачей, однако теоретический расчет магнитного поля в практических магнитных системах очень сложен. Поэтому в данной работе было проведено исследование распределения магнитного поля на модельной системе – прямом соленоиде с тонкой намоткой (тонком прямом соленоиде) прямым методом (с помощью катушки-зонда).

Теоретическая часть

Магнитное поле.

Магнитное поле создается проводником с током, движущимися зарядами, намагниченными телами, а также переменным электрическим полем.

Свойства магнитного поля:

- Магнитное поле действует на движущиеся в нем электрические заряды с некоторой силой.
- Переменное магнитное поле порождает в окружающем пространстве переменное электрическое поле, т. е. эти поля всегда взаимосвязаны и, изменяясь, порождают друг друга.
- Линии магнитной индукции всегда замкнуты, что говорит об отсутствии в природе магнитных зарядов и вихревом характере магнитного поля.

В любой своей точке магнитное поле характеризуется вектором физической величины – вектором магнитной индукции. Принято, что направление вектора магнитной индукции $\vec{B}$ совпадает с направлением северного полюса магнитной стрелки, которая помещена в данную точку поля.

Магнитное поле может быть однородным и неоднородным. Если векторы магнитной индукции $\vec{B}$ в любой точке поля одинаковы и направлены в одну сторону, то поле однородное, если же векторы магнитной индукции в различных точках поля различны по амплитуде, либо имеют различное направление, то поле неоднородное. Интенсивность магнитного поля, т. е. способность его производить работу, определяется величиной, называемой магнитной индукцией. Единицей магнитной индукции в системе единиц СИ [2] является тесла (Тл) - магнитная индукция такого однородного магнитного поля, которое действует с силой в 1 Н на каждый метр прямолинейного проводника с током в 1 А, расположенного

перпендикулярно направлению поля: $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс} = 1 \text{ Н} / (\text{А} \cdot \text{м}) = 1 \text{ Дж} / (\text{А} \cdot \text{м}^2) = 1 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{м}^2$.

Характер распределения магнитного поля в пространстве зависит от формы и расположения проводника, по которому течет ток. Давайте рассмотрим простейший случай - кольцо с током.

Закон Био-Савара-Лапласа. Магнитное поле витка с током. Магнитное поле соленоида.

По закону Био-Савара-Лапласа магнитное поле, создаваемое элементом линейного тока $I d\vec{l}$ в точке с радиус-вектором $\vec{r}$, будет иметь вид [2]:

$$d\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{[d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3}, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

Тогда суммарное магнитное поле замкнутого контура определяется из принципа суперпозиции контурным интегралом:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{[d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3} \quad (2)$$

Используя формулу (2) вычислим вектор магнитной индукции на оси кольцевого тока (рис.1).

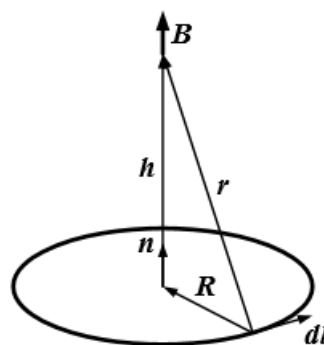


Рис.1. Виток с током

Представим радиус-вектор $\vec{r}$ как $\vec{r} = \vec{R} + \vec{h}$, $\vec{h}$ -единичный вектор, перпендикулярный плоскости витка. Модуль $r = \sqrt{R^2 + h^2}$ при интегрировании не изменяется. В результате получим [3]:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2} \cdot \frac{R^2}{(R^2 + h^2)^{3/2}} \cdot \vec{h} \quad (3)$$

Найдем теперь индукцию магнитного поля на оси прямого тонкого соленоида длины L , радиуса R , содержащего N витков, по которым течет ток I . На рис.2 показано сечение катушки.

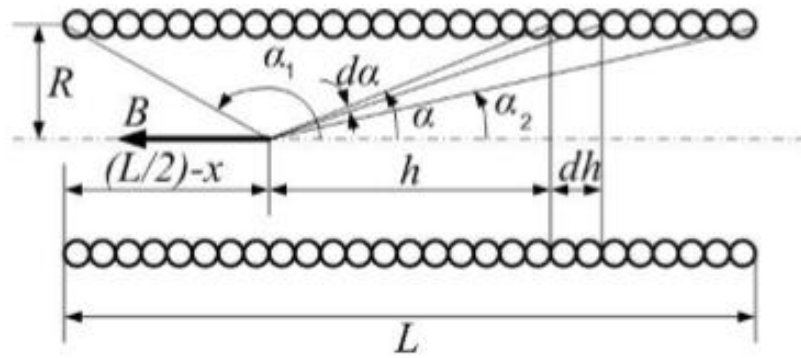


Рис. 2. Сечение соленоида.

Каждый виток создает поле, индукция которого на оси вычисляется по формуле (3). Плотность намотки равна N/L . На малый участок соленоида dh приходится $(N/L) \cdot dh$ витков, индукция поля которых на расстоянии h от них вычисляется как

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 NI}{2L} \cdot \frac{R^2 dh}{(R^2 + h^2)^{3/2}} \cdot \vec{h} \quad (4)$$

Так как $h = R / \tan \alpha$ и $\sqrt{h^2 + R^2} = R / \sin \alpha$, то $dh = -R d\alpha / \sin^2 \alpha$ и

$$d\vec{B} = -\frac{\mu_0 NI}{2L} \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha \cdot \vec{h} \quad (5)$$

В пределах катушки угол α меняется от α_1 до α_2 , так что магнитная индукция внутри катушки вдоль ее оси равна

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 NI}{2L} \cdot (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \cdot \vec{h}, \quad (6)$$

где

$$\cos \alpha_1 = -\frac{(L/2 - x)}{\sqrt{R^2 + (L/2 - x)^2}}, \quad (7)$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{(L/2 + x)}{\sqrt{R^2 + (L/2 + x)^2}}, \quad (8)$$

где x - координата, отсчитанная от центра соленоида.

Таким образом величина магнитной индукции на оси соленоида равна

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2L} \cdot \left(\frac{(L/2 + x)}{\sqrt{R^2 + (L/2 + x)^2}} + \frac{(L/2 - x)}{\sqrt{R^2 + (L/2 - x)^2}} \right) \quad (9)$$

В середине соленоида ($x=0$) магнитная индукция достигает максимального значения

$$B_{\max} = \frac{\mu_0 NI}{L} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (2R/L)^2}} \quad (10)$$

Экспериментальная часть

В данной работе измерение магнитного поля основаны на законе электромагнитной индукции. При протекании переменного тока через катушку возникает магнитный поток Φ . Введем дополнительную катушку-измерительный зонд. В зависимости от геометрии системы поток вектора магнитной индукции измеряемой катушки может создавать ЭДС на измерительной катушке, величина которой меняется в соответствии с законом Фарадея

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}(\text{СИ}) \quad (11)$$

и, при подключении концов зондирующей катушки к нагрузке в ней протекает индукционный ток.

При пропускании тока через тонкий соленоид внутри него образуется довольно однородное магнитное поле с модулем индукции B . В это поле была помещена измерительная катушка, содержащая N витков (площадь каждого витка S). Магнитное поле соленоида входит в зонд перпендикулярно их плоскости, поэтому поток магнитной индукции можно записать как

$$\Phi = BS \quad (12)$$

При помещении измерительной катушки в переменное магнитное поле в ней возникает ЭДС самоиндукции, величина которой равна

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NS \frac{dB}{dt}, \quad (13)$$

где N – число витков измерительной катушки, S – площадь витка измерительной катушки, Φ – магнитный поток, проходящий через измерительную катушку, B – модуль вектора индукции магнитного поля.

Так как на соленоид подается переменный ток, а магнитное поле в соленоиде пропорционально току, то если ток меняется по закону

$$I = I_0 \cos(\omega t), \quad (12)$$

тогда магнитное поле меняется по тому же закону

$$B = B_0 \cos(\omega t), \quad (13)$$

где B_0 – амплитудное значение модуля вектора индукции магнитного поля, ω – угловая частота переменного тока, создающего магнитное поле.

Следовательно,

$$\varepsilon = B_0 S N \omega \sin(\omega t) \quad (14)$$

Если еще учесть, что $\omega = 2\pi f$, где f – частота генератора, а $S = \pi \frac{d^2}{4}$ то получим формулу для амплитудного значения ЭДС

$$\varepsilon_0 = \frac{\pi^2}{2} f B_0 N \quad (15)$$

Из формулы (15) выражаем B_0 и получаем окончательную формулу для амплитудного значения напряженности поля

$$B_0 = \frac{2\varepsilon_0}{\pi^2 N f} \text{ (СИ)} \quad (16)$$

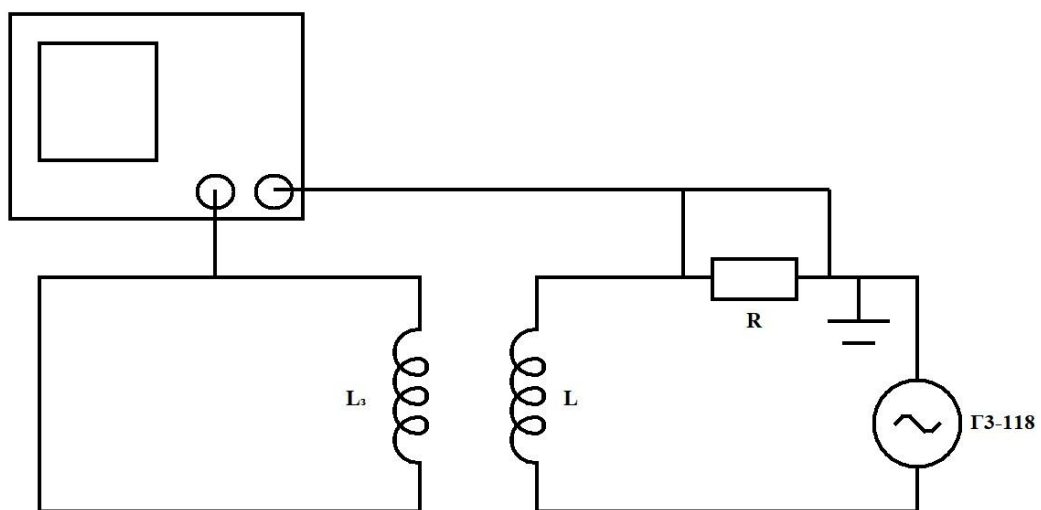


Рис.3. Схема установки

Для эксперимента был создан соленоид (L) со следующими параметрами: длина соленоида – 6 см, количество витков – 120, диаметр витка – 3,5 см. Также была создана измерительная катушка (L_3) с параметрами: количество витков – 50, диаметр витка – 0,6 см. Была проведена ее калибровка (рис. 4), согласно которой был найден коэффициент перевода напряжения в магнитное поле на частоте 200 кГц:

$$1\text{mV} = 0,0056\text{Gs}$$

(17)

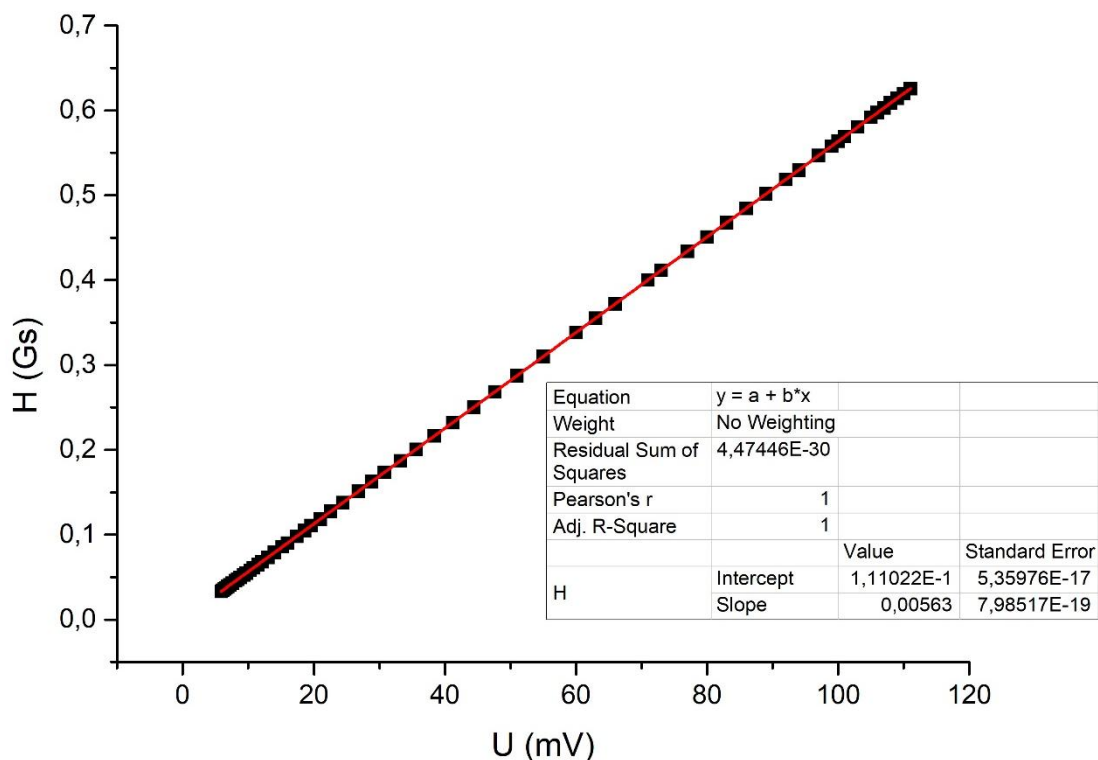


Рис.4. Калибровочная кривая измерительного зонда.

На соленоид подавалось переменное напряжение от генератора напряжения ГЗ-118.

Последовательно с соленоидом был подключен резистор (R) сопротивлением 27 Ом, падение напряжения на котором измеряли с помощью осциллографа Tektronix TDS2002B для определения силы тока в цепи. После размещения измерительной катушки по оси соленоида были проведены измерения напряжения на выходе измерительного зонда в зависимости от координаты (вдоль оси соленоида) с шагом в 1 мм на частоте 200 кГц. Далее по формуле (16) был построен график зависимости напряженности магнитного поля от координаты (рис.5), который мы сравнили с теоретическим расчетом поля в соленоиде, рассчитанным по формуле

(9).

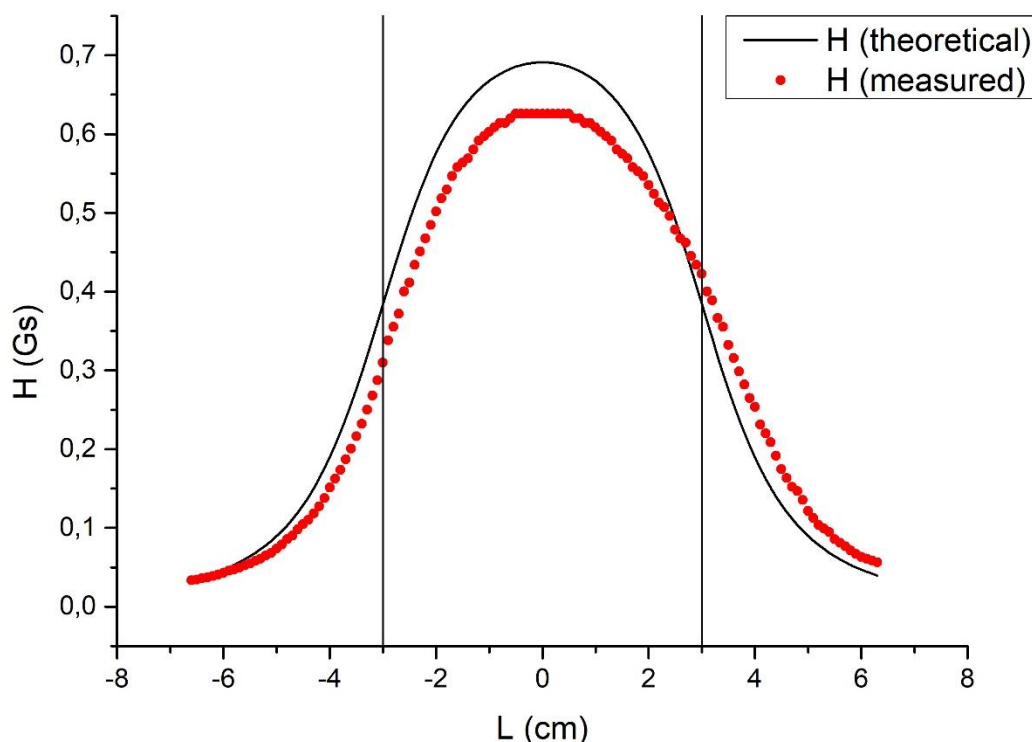


Рис.5.График напряженности магнитного поля вдоль оси соленоида. Вертикальные линии обозначают границы соленоида.

Как видно на рис.5 теоретическое и измеренное распределение магнитного поля отличаются количественно, однако характер кривых одинаков: в центре тонкого соленоида амплитуда магнитного поля более однородна, а на краях соленоида спадает. Различие с теорией можно обосновать следующими фактами: неидеально соосное положение измерительного зонда и соленоида (формулы (3 – 10) справедливы только для поля на оси соленоида), диаметр измерительного зонда сопоставим с диаметром соленоида. Все это влечет за собой погрешность в измерении амплитудного значения магнитного поля (измеренная величина меньше, чем поле на оси на самом деле). Качественные отличия в характере распределения магнитного поля может быть связано с тем, измеряемая катушка и/или измерительный зонд имели небольшой наклон - видно, что на левом и правом краю соленоида (отрицательные и положительные значения на оси абсцисс соответственно), амплитуда магнитного поля отличается от

теории на 10%, а само распределение поля имеет асимметрию относительно центра. Еще свой вклад в различие с теорией дают погрешность измерительной линейки и погрешность осциллографа, но их вклад, по сравнению с вышеперечисленными источниками ошибок, минимален.

Заключение

В работе было изучено распределение магнитного поля в тонком прямом соленоиде с помощью измерительного индуктивного зонда. Было проведено измерение напряжения на измерительном зонде на оси соленоида в зависимости от координаты. На основании полученных данных была построена зависимость напряженности магнитного поля. Характер распределения магнитного поля согласуется с теоретическими данными, однако отличается по величине. Различия вызваны не идеальностью экспериментальной установки и не превышают 10 %.

Список литературы

1. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, М., 1951, 341 с.
2. Яковлев В.И. Классическая электродинамика: Часть 1. Электричество и магнетизм. Изд. 2-е, испр. и доп. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2016, 348 с.