



**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

**С.Н. Спасибкина, А.Н. Разумовский,
М.А. Бутюгин**

ФИЗИКА

**Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторной работы ЭМ-4**

«Исследование магнитного поля»

*для студентов I-II курса
всех специальностей и направлений
всех форм обучения*

**Москва
2017**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

Кафедра физики

С.Н. Спасибкина, А.Н. Разумовский, М.А. Бутюгин

ФИЗИКА

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторной работы ЭМ-4

«Исследование магнитного поля»

*для студентов I-II курса
всех специальностей и направлений
всех форм обучения*

Москва – 2017

ББК 537
С71

Рецензент канд. техн. наук, проф. С.М. Новиков

Спасибкина С.Н., Разумовский А.Н., Бутюгин М.А.

С71 Физика: учебно-методическое пособие по выполнению лабораторной работы ЭМ-4 «Исследование магнитного поля». – М.: МГТУ ГА, 2017. – 12 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Физика» по Учебному плану для студентов I-II курса всех специальностей и направлений всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 09.03.2017 г. и методического совета 12.03.2017 г.

Подписано в печать 17.03.2017 г.

Печать офсетная
1,06 усл.печ.л.

Формат 60x84/16
Заказ №1725/156

0,5 уч.-изд. л.
Тираж 100 экз.

*Московский государственный технический университет ГА
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20*

ООО «ИПП «ИНСОФТ»

107140, Москва, 3-й Красносельский переулок, д. 21, стр. 1

© Московский государственный
технический университет ГА, 2017

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ЭМ-4 «Исследование магнитного поля»

1. Цель работы

Целью работы является изучение пространственного распределения магнитного поля на примере экспериментального исследования поля соленоида и кольцевого проводника с током и сравнение полученных экспериментальных результатов с теоретическими расчетами.

2. Подготовка к работе

Изучите теоретический материал по теме "Магнитное поле в вакууме" по материалу лекций и учебников [1, 2]. Ознакомьтесь с устройством лабораторного стенда и методикой проведения эксперимента по разделу 4 данного описания. Подготовьте ответы на вопросы к допуску раздела 7. Оформите проект отчета по лабораторной работе.

3. Краткая теория

Магнитное поле является частью электромагнитного поля, порождаемого движущимися электрическими зарядами, имеет направленный характер и характеризуется вектором магнитной индукции \vec{B} . Силовые линии магнитного поля всегда замкнуты. Магнитное поле действует на движущиеся электрические заряды, проводник или рамку с током, а также на постоянные магниты. Источниками магнитного поля являются проводники с током, движущиеся электрические заряды, постоянные магниты и переменные электрические поля. В данной лабораторной работе исследуется магнитное поле, создаваемое проводниками, по которым протекает переменный электрический ток.

Закон Био – Савара – Лапласа позволяет рассчитать индукцию магнитного поля $d\vec{B}_A$ в данной точке пространства А, создаваемое элементом проводника длины $d\vec{l}$, по которому течет ток I (рис. 1). Согласно закону Био – Савара – Лапласа:

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

где $d\vec{l}$ – элемент длины проводника, сонаправленный с током, \vec{r} – вектор, проведенный из начала вектора $d\vec{l}$ в точку А, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн / м – магнитная постоянная. Направление вектора $d\vec{B}_A$ определяется согласно направлению векторного произведения $d\vec{l} \times \vec{r}$ (или по правилу правого винта).

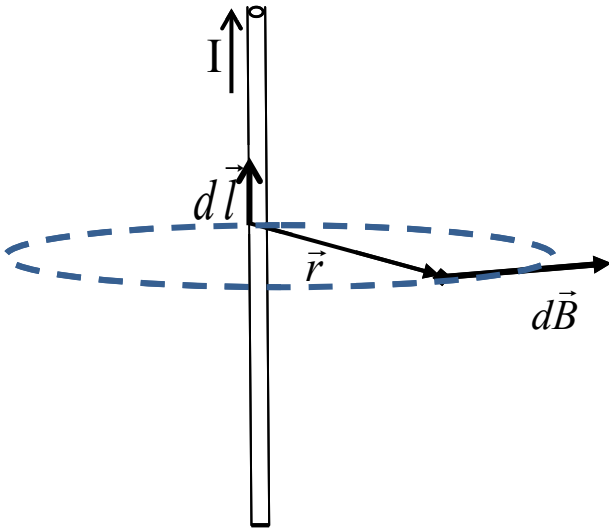


Рис.1 Кольцевой проводник с током.

На основе формулы (1) можно рассчитать индукцию магнитного поля для проводника с током произвольной формы, разбивая его на элементы $d\vec{l}$ и суммируя вклады от всех элементов, что достигается интегрированием по длине проводника L :

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

Например, таким способом можно рассчитать индукцию магнитного поля прямого бесконечно длинного проводника с током на расстоянии r (рис.1):

$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$

Кольцевой проводник с током

Величина вектора индукции магнитного поля на оси кольцевого проводника радиуса R (рис. 2) убывает в зависимости от расстояния r до центра витка согласно формуле:

$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + r^2)^{3/2}}. \quad (3)$$

Согласно формуле (3), в центре витка (при $r = 0$) индукция магнитного поля максимальна и равна:

$$B_{\max}(0) = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad (4)$$

Из формул (3) и (4) следует, что отношение $\frac{B(r)}{B_{\max}}$ не зависит от величины силы тока I и определяется только радиусом витка R и расстоянием r от центра:

$$\frac{B(r)}{B_{\max}} = \frac{R^3}{(R^2 + r^2)^{3/2}}. \quad (5)$$

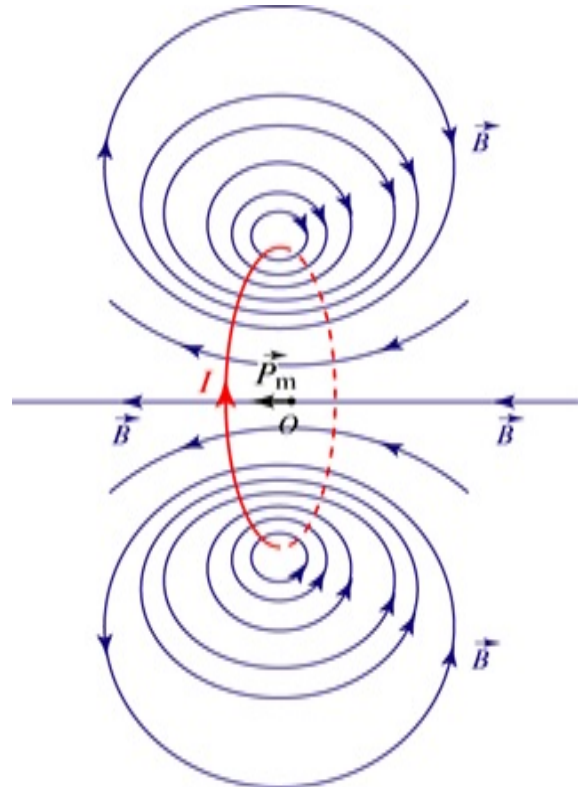


Рис.2 Магнитное поле витка с током

Таким образом, магнитное поле кольцевого проводника с током быстро убывает по мере удаления от его центра, что соответствует полученному соотношению (5). Это соотношение остается справедливым также в случае, если ток, протекающий по проводнику, является переменным.

Соленоид

Соленоид представляет собой длинную цилиндрическую катушку с большим количеством плотно намотанных витков провода. Соленоид используется для получения однородного магнитного поля. Как правило, длина соленоида во много раз больше, чем его диаметр. Экспериментальное изучение магнитного поля соленоида показывает, что внутри идеального соленоида поле является практически однородным, а вне соленоида быстро убывает (рис. 3).

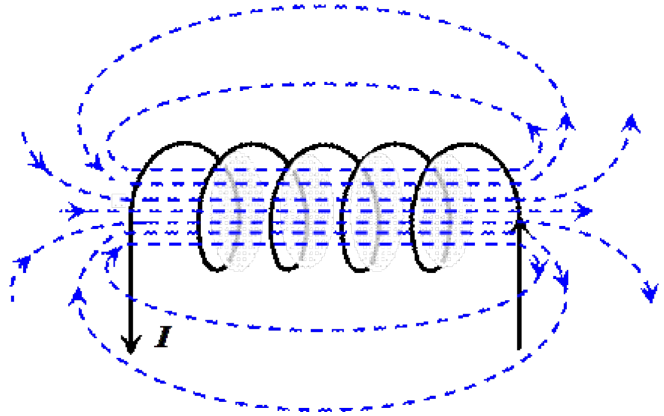


Рис. 3. Магнитное поле соленоида.

На рис. 4 представлено сечение соленоида в разрезе вдоль его оси. Расчеты, проведенные на основе закона Био – Савара – Лапласа, показывают, что индукцию магнитного поля на оси соленоида на расстоянии r от его центра можно рассчитать по формуле:

$$B(r) = \frac{1}{2} \mu_0 I n (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2), \quad (6)$$

где I – сила тока, протекающего в обмотке соленоида, n – число витков на единицу длины соленоида, α_1 и α_2 – граничные углы – углы между образующей соленоида и прямыми линиями, проведенными из данной точки к краям соленоида (рис. 4).

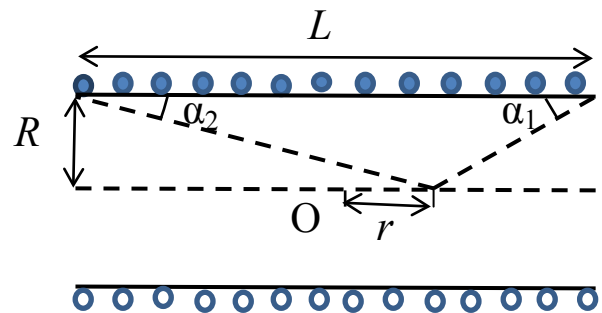


Рис. 4. Соленоид в разрезе.

Таким образом, косинусы граничных углов α_1 и α_2 определяются выражениями:

$$\cos \alpha_1 = \frac{\frac{L}{2} - r}{\sqrt{R^2 + (\frac{L}{2} - r)^2}}, \quad \cos \alpha_2 = \frac{\frac{L}{2} + r}{\sqrt{R^2 + (\frac{L}{2} + r)^2}},$$

где L – длина соленоида, R – его радиус. Индукция магнитного поля максимальна в центре соленоида и равна

$$B_{\max} = \frac{\mu_0 I n L}{\sqrt{L^2 + 4R^2}}. \quad (7)$$

Из формул (6) и (7) следует, что отношение $\frac{B(r)}{B_{\max}}$ на оси соленоида не зависит от величины силы тока I в обмотке и определяется формулой «граничных косинусов»:

$$\frac{B(r)}{B_{\max}} = \frac{\sqrt{4R^2 + L^2}}{2L} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \quad (8)$$

Формула (8) также остается справедливой, если ток, протекающий по обмотке соленоида, является переменным.

В отличие от идеального соленоида магнитное поле внутри соленоида конечной длины в целом является неоднородным и зависит от расстояния r до центра соленоида (6). Однако, часто требование однородности поля заменяется требованием относительной однородности: чтобы в данной области пространства величина магнитного поля изменялась по сравнению с максимальным значением не более чем на определенную величину $\frac{\Delta B}{B_{\max}} = \gamma$, где величина γ определяется условиями эксперимента. Например, можно задать отклонение от условия однородности $\gamma=10\%$.

Длиной области однородности для соленоида называется протяженность области ΔL , отсчитываемая вдоль оси соленоида от его центра, в пределах которой индукция магнитного поля отклоняется от B_{\max} не более чем на величину γ (например, на 10%). Практически длина области однородности определяется по экспериментальному графику зависимости $B(r)$.

4. Методика проведения эксперимента и описание установки

Соленоид

Для экспериментального измерения индукции магнитного поля \vec{B} соленоида используется установка, схема которой приведена на рис. 5.

Соленоид 1 подключается к сети переменного напряжения $U = 220$ В. Для измерения магнитного поля соленоида внутрь соленоида вводится датчик – измерительная катушка 2, которую можно перемещать вдоль оси соленоида при помощи штока 3, на который нанесена измерительная шкала, по которой можно определить расстояние от центра соленоида до измерительной катушки 2.

Измерительная катушка подсоединена к электронному вольтметру 4, измеряющему ЭДС индукции, возникающей в катушке.

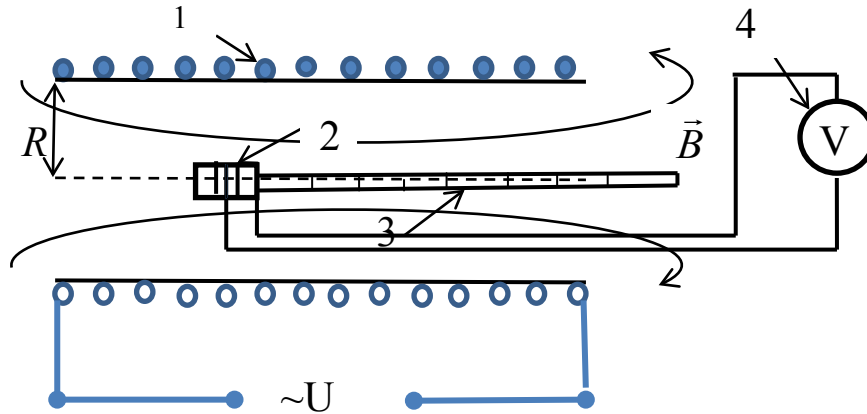


Рис. 5. Схема экспериментальной установки.

Покажем, что показания вольтметра 4 измерительной катушки прямо пропорциональны величине индукции магнитного поля \vec{B} внутри соленоида.

Так как соленоид подключен к сети переменного напряжения, электрический ток, проходящий через обмотку соленоида изменяется по гармоническому закону:

$$I(t) = I_0 \cos \omega t, \quad (9)$$

где I_0 – амплитуда тока, ω – циклическая частота. При прохождении переменного электрического тока по обмотке внутри соленоида возникает переменное магнитное поле, величина которого пропорциональна силе тока $B \sim I$.

Поэтому индукция магнитного поля на оси соленоида будет также изменяться по гармоническому закону:

$$B(r, t) = B_0(r) \cos \omega t.$$

Поток индукции магнитного поля внутри соленоида, пронизывающий измерительную катушку, помещенную внутрь соленоида, равен

$$\Phi(r, t) = B(r, t)SN = B_0(r)SN \cos \omega t,$$

где S – площадь поперечного сечения катушки, N – количество витков в катушке.

Согласно закону электромагнитной индукции на выводах измерительной катушки возникает ЭДС индукции $\xi(r, t)$:

$$\xi(r, t) = -\frac{d\Phi(r, t)}{dt} = \omega B_0(r)SN \sin \omega t = \xi_0(r) \sin \omega t, \quad (10)$$

где $\xi_0(r) = B_0 \omega SN$ – амплитудное значение ЭДС индукции в измерительной катушке.

Вольтметр, подключенный к выводам катушки, измеряет эффективное значение ЭДС:

$$U(r) = \frac{\xi_0(r)}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega B_0(r) SN. \quad (11)$$

Таким образом, согласно формуле (11) экспериментальные показания вольтметра, подсоединенного к измерительной катушке, прямо пропорциональны амплитуде индукции магнитного поля $B_0(r)$. Для центральной точки соленоида при $r = 0$ измеряемое значение напряжения будет максимальным:

$$U_{\max}(0) = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega B_{0\max}(0) SN. \quad (12)$$

Следовательно, для отношения $\frac{B_0(r)}{B_{0\max}(0)}$ можно получить следующую формулу:

$$\frac{B_0(r)}{B_{0\max}(0)} = \frac{U_0(r)}{U_{0\max}(0)}. \quad (13)$$

Кольцевой проводник с током

При исследовании магнитного поля кольцевого проводника с током используется аналогичный способ измерения магнитного поля основанный на измерении ЭДС индукции. В этом случае применяется дополнительный датчик с измерительной катушкой, перемещаемый вдоль стержня, закрепленного на оси кольцевого проводника. На стержень нанесена измерительная шкала, по которой можно определить расстояние от центра витка. При расчетах относительных величин индукции магнитного поля $\frac{B_0(r)}{B_{0\max}(0)}$ для кольцевого проводника с током используется формула (13), где расстояние r отсчитывается от центра кольцевого витка.

5. Порядок выполнения работы

5.1. Подготовка установки к работе (выполняет лаборант).

Подключить установку к сети $U = 220$ В. Подключить датчик для измерения ЭДС индукции к вольтметру. Включить питание вольтметра и установить предел шкалы вольтметра на 10 мВ.

Кольцевой проводник с током

5.2. Измерение индукции магнитного поля на оси кольцевого проводника с током.

1. Для выбранного предела шкалы рассчитайте цену деления вольтметра ΔU и запишите результат в таблицу 1.

2. Переведите переключатель на стенде установки в положение "виток", подключив, таким образом, кольцевой проводник к сети $U = 220$ В.

3. Установите датчик в центр кольцевого проводника ($r = 0$), прижав его к изолирующему стержню (ось датчика должна быть параллельна оси кольца).

4. Показания вольтметра $U(0)$ при $r = 0$ запишите в таблицу 1.

5. Перемещая датчик вдоль оси стержня с шагом $\Delta r = 2$ см, произведите дальнейшие измерения $U(r)$ с помощью вольтметра. Полученные данные занесите в таблицу 1. **При перемещении датчика вдоль стержня ось датчика должна оставаться параллельной оси стержня!**

Таблица

Результаты измерений и теоретических расчетов

1. для кольцевого проводника с током ($R = \underline{\hspace{2cm}}$ см)

2. для соленоида с током ($L = \underline{\hspace{2cm}}$ см, $R = \underline{\hspace{2cm}}$ см)

$\Delta U = \underline{\hspace{2cm}}$ мВ

r , см	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$U(r)$, мВ											
$\frac{U(r)}{U_{\max}(0)}$											
$\frac{B_0(r)}{B_{0\max}(0)}$											

Соленоид

5.3. Измерение индукции магнитного поля на оси соленоида.

1. Выключите вольтметр, отсоедините от него измерительный датчик для кольцевого проводника.

2. Переведите переключатель на стенде установки в положение "соленоид", подключив таким образом соленоид к сети $U = 220$ В.

3. Подключите к вольтметру измерительную катушку соленоида.

4. Установите предел шкалы вольтметра на 300 мВ. Включите питание вольтметра.

5. Для данного предела шкалы рассчитайте цену деления вольтметра ΔU и запишите результат в таблицу 2.

6. Вдвиньте шток с измерительной катушкой в крайнее правое положение, поместив, таким образом, измерительную катушку в центр соленоида ($r = 0$).

7. Показания вольтметра $U(0)$ при $r = 0$ запишите в таблицу 2.

8. Перемещая шток влево с шагом $\Delta r = 2$ см вплоть до полного выдвижения штока, произведите дальнейшие измерения $U(r)$ с помощью вольтметра. Полученные данные занесите в таблицу 2.

9. Переведите переключатель на стенде установки в нейтральное положение.

10. Выключите все приборы.

6. Обработка результатов измерений и оформление отчета

6.1. По данным таблиц 1 и 2 рассчитайте нормированные (относительные) значения $\frac{U(r)}{U_{\max}}$, соответствующие амплитудным значениям ЭДС индукции в измерительной катушке. Полученные результаты запишите во вторую строку

таблицы. Согласно формуле (13), отношения $\frac{U(r)}{U_{\max}}$ совпадают с экспериментальными нормированными значениями $\frac{B_0(r)}{B_{0\max}(0)}$ амплитуды индукции магнитного поля.

6.2. Согласуйте полученные результаты с преподавателем.

Кольцевой проводник с током

6.3. Используя известное значение радиуса кольцевого проводника R , рассчитайте теоретические значения величин $\frac{B_0(r)}{B_{0\max}(0)}$ для витка с током. Расчет можно произвести по формуле (5) вручную или воспользоваться компьютерной программой для данной лабораторной работы, приведенной на Рабочем столе компьютера.

6.4. Откройте папку «Обработка результатов ЛР», расположенную на рабочем столе компьютера, и запустите файл «Расчет ЛР ЭМ-4.xls». Введите в соответствующую таблицу на экране ПК значения радиуса R кольцевого проводника и значения r в см. Программа пересчитает значения $\frac{B_0(r)}{B_{0\max}(0)}$ согласно формуле (5).

Полученные результаты занесите в третью строку таблицы 1.

6.5. По данным таблицы 1 на одном поле постройте графики экспериментальной $\frac{U(r)}{U_{\max}}$ и теоретической $\frac{B_0(r)}{B_{0\max}(0)}$ зависимостей нормированной амплитуды индукции магнитного поля от расстояния r , измеряемого вдоль оси кольцевого проводника.

Экспериментальная $\frac{U(r)}{U_{\max}} = f(r)$ и теоретическая $\frac{B_0(r)}{B_{0\max}(0)} = f(r)$

кривые должны представлять собой плавные линии выходящие из точки $f(0) = 1$ при $r = 0$ и проходящие между экспериментальными (или теоретическими) точками так, чтобы точки находились по обе стороны от кривой и расстояние от них до линии было минимально (см. файл «Расчет ЛР ЭМ-4.xls»).

6.6. Сделайте выводы по полученным экспериментальному и теоретическому графикам для зависимости индукции магнитного поля на оси кольцевого проводника. Качественно оцените совпадение (или отклонение) экспериментального графика распределения магнитного поля по оси кольцевого проводника с током с теоретической зависимостью, описываемой формулой (5).

Соленоид

6.7. Используя известные значения длины соленоида L и радиуса соленоида R , рассчитайте теоретические значения величин $\frac{B_0(r)}{B_{0\max}(0)}$ для магнитного поля на оси соленоида. Расчет можно произвести по формуле (8) вручную или воспользоваться компьютерной программой (см. п.6.4). Введите в соответствующую таблицу на экране ПК значения длины соленоида L , радиуса соленоида R и значения r в см. Программа пересчитает значения $\frac{B_0(r)}{B_{0\max}(0)}$ согласно формуле (8).

Полученные результаты занесите в третью строку таблицы 2.

6.8. По данным таблицы 2 на одном поле постройте графики экспериментальной $\frac{U(r)}{U_{\max}}$ и теоретической $\frac{B_0(r)}{B_{0\max}(0)}$ зависимостей нормированной амплитуды индукции магнитного поля от расстояния r , измеряемого вдоль оси соленоида от его центра.

Экспериментальная $\frac{U(r)}{U_{\max}} = f(r)$ и теоретическая $\frac{B_0(r)}{B_{0\max}(0)} = f(r)$

кривые должны представлять собой плавные линии, выходящие из точки $f(0) = 1$ при $r = 0$ и и проходящие между экспериментальными (или теоретическими) точками так, чтобы точки находились по обе стороны от кривой и расстояние от них до линии было минимально (см. файл «Расчет ЛР ЭМ-4.xls»).

6.9. Оцените длину области однородности ΔL магнитного поля внутри соленоида. Для этого укажите на построенном для соленоида эксперименталь-

ном графике $\frac{U(r)}{U_{\max}} = f(r)$ область пространства внутри соленоида, в пределах которой отклонения $U(r)$ от максимального значения $U_{\max} = U(0)$ не превышают величины $\gamma = 10\%$. Запишите значение длины области однородности ΔL и величину $\frac{\Delta L}{L} = \text{---}\%$ для соленоида в отчет.

6.10. Сделайте выводы по полученным экспериментальному и теоретическому графикам для зависимости индукции магнитного поля на оси соленоида. Качественно оцените совпадение (или отклонение) экспериментального графика распределения магнитного поля по оси соленоида с теоретической зависимостью, описываемой формулой (8).

7. Вопросы для подготовки к допуску

1. Сформулируйте закон Био – Савара – Лапласа.
2. Изобразите силовые линии индукции магнитного поля для прямолинейного бесконечного проводника с током. Запишите конечную формулу для индукции магнитного поля бесконечного прямолинейного проводника
3. Изобразите силовые линии индукции магнитного поля для кольцевого проводника с током. Запишите конечную формулу для индукции магнитного поля на оси кольцевого проводника.
4. Изобразите силовые линии индукции магнитного поля соленоида конечной длины. Запишите формулу для индукции магнитного поля на оси соленоида.
5. Сформулируйте закон электромагнитной индукции Фарадея – Ленца. Каким образом этот метод применяется для измерения индукции магнитного поля \vec{B} соленоида и кругового витка с током в данной лабораторной работе?

8. Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М: Академия, 2008-2015.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 2008-2015.