

Ярославский государственный педагогический  
университет им. К. Д. Ушинского

**Лабораторная работа № 12**  
**Исследование магнитного**  
**поля соленоида**

Ярославль  
2007

---

## Оглавление

1. Краткая теория . . . . .	3
Задание 1. . . . .	7
Задание 2. . . . .	7
Задание 3. . . . .	11
2. Содержание отчета . . . . .	12
3. Контрольные вопросы . . . . .	12

## Лабораторная работа № 12

### Исследование магнитного поля соленоида

**Цель работы:** экспериментальное исследование напряженности магнитного поля соленоида и сопоставление результатов с теоретическими расчетами, измерение индуктивности соленоида и сравнение с расчетами для бесконечно длинного соленоида и соленоида конечной длины.

**Приборы и принадлежности:** исследуемый соленоид, измерительная катушка, амперметр на 3 А, баллистический гальванометр с добавочным сопротивлением 124 Ом, реостат на 6 Ом, источник постоянного напряжения — стабилизированный выпрямитель на 8 – 11 В, выключатель кнопочный, измеритель индуктивности и емкости — прибор Е7-9, соединительные провода.

**При подготовке к работе** необходимо изучить следующие теоретические вопросы:

характеристики магнитного поля тока и единицы их измерения, содержание закона Био - Савара - Лапласа и его применение к расчету  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  кругового тока (в центре и на оси), закон электромагнитной индукции Фарадея, физический смысл и единицы измерения индуктивности, выражения для расчета индуктивности бесконечно длинного соленоида и соленоида конечной длины.

## 1. Краткая теория

Соленоид (от греч. solen — трубка и eidos — вид) представляет собой свернутый в спираль изолированный проводник, обладающий значительной индуктивностью и малыми активным сопротивлением и емкостью. Соленоидальное поле — это векторное поле, не имеющее источников в смысле зарядов ( $div \vec{B} = 0$ ); линии векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  замкнуты или обоими концами уходят в бесконечность.

Индуктивность (от лат. inductio — наведение, побуждение) — одна из характеристик магнитных свойств электрических цепей, зависящая от их параметров и от магнитных свойств окружающей среды.

На рис. 1 соленоид представлен в виде цилиндрической катушки длиной  $\ell$  состоящей из  $N$  витков радиусами  $R$ , которые образуют систему последовательно соединенных круговых токов. Для наглядности витки на

---

рисунке показаны на некотором расстоянии, в действительности они могут располагаться вплотную друг к другу.

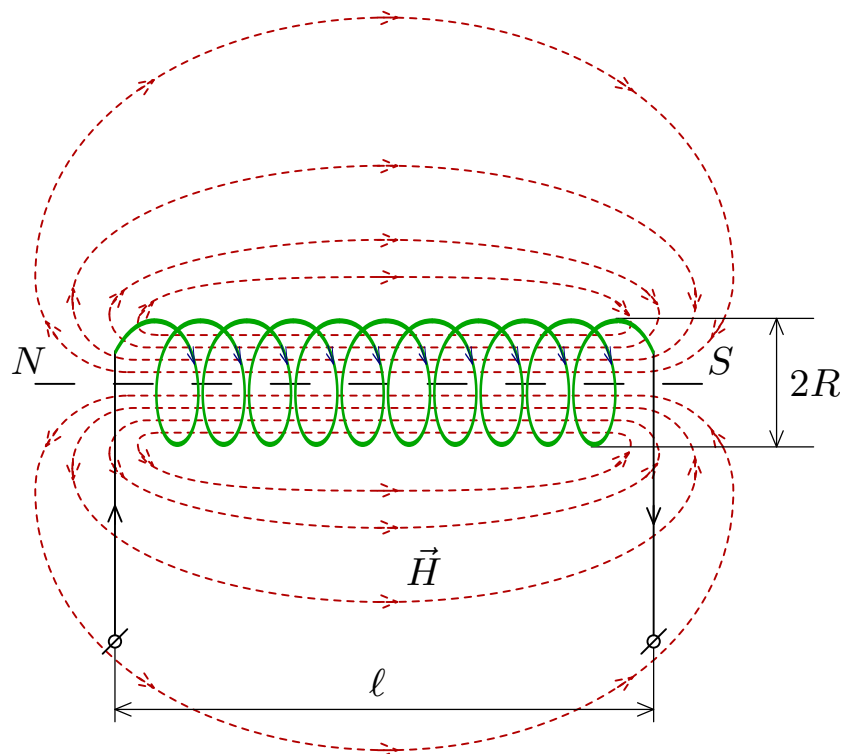


Рис. 1

Особенности магнитного поля соленоида представлены качественно с помощью линий напряженности  $\vec{H}$ . Внутри соленоида напряженность магнитного поля значительно больше (примерно в  $\frac{\ell^2}{R^2}$  раз) напряженности вне его, поэтому линии внутри расположены ближе друг к другу. При этом в случае  $\ell \gg R$  они располагаются параллельно друг другу и проходят в направлении оси практически с постоянной плотностью. Магнитное поле **внутри** соленоида является однородным всюду, кроме пространства вблизи концов, где оно ослабевает, а линии напряженности начинают расходиться. **Вне** соленоида напряженность поля при  $\ell \gg R$  почти равна нулю. Таким образом, магнитное поле достаточно длинного соленоида (в пределе — бесконечно длинного) сосредоточено в объеме, ограниченном его внешней поверхностью. Эта особенность соленоидов используется для получения однородных магнитных полей.

С помощью закона Био - Савара - Лапласа можно получить выражение для расчета напряженности магнитного поля соленоида как суперпо-

зиции полей системы элементарных круговых токов:

$$|\vec{H}| = \frac{In}{2} \left( \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} + \frac{\ell - x}{\sqrt{R^2 + (\ell - x)^2}} \right), \quad (1.1)$$

где  $I$  — сила тока,  
 $n$  — число витков на единицу длины:  $n = \frac{N}{\ell}$ ,  
 $x$  — координата точки на оси соленоида.

Из этого выражения следуют два частных случая:

1) напряженность поля внутри соленоида **в начале и в конце его оси**, то есть при  $X = 0$  и  $X = \ell$  оказывается равной:

$$|\vec{H}| = \frac{In}{2} \cdot \frac{\ell}{\sqrt{R^2 + \ell^2}} < \frac{In}{2}, \quad (1.2)$$

при этом в случае  $\ell \gg R$   $|\vec{H}| \approx \frac{In}{2}$ , а при  $\ell \rightarrow \infty$ , т.е. для бесконечно длинного соленоида:

$$|\vec{H}| = \frac{In}{2}. \quad (1.3)$$

2) напряженность поля внутри соленоида, **в середине оси**, то есть при  $X = \frac{\ell}{2}$  оказывается равной:

$$|\vec{H}| = \frac{In}{2} \frac{\ell}{\sqrt{R^2 + \frac{\ell^2}{4}}} < In, \quad (1.4)$$

при этом для случая  $\ell \gg R$   $|\vec{H}| \approx In$ , а при  $\ell \rightarrow \infty$ , т.е. для бесконечно длинного соленоида:

$$|\vec{H}| = In. \quad (1.5)$$

В соответствии с законом Био - Савара - Лапласа между полным магнитным потоком и силой тока существует прямопропорциональная зависимость:

$$\Psi = LI, \quad (1.6)$$

---

где  $\psi$  — полный магнитный поток (потокосцепление):

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \Phi_i,$$

$\Phi_i$  — магнитный поток  $i$ -го витка соленоида,  $L$  — индуктивность.

Это общее выражение позволяет рассчитать **ИНДУКТИВНОСТЬ** соленоида. Для однородного магнитного поля полный магнитный поток соленоида выражается следующим образом:

$$\Psi = BSN = \mu_o \mu HSN = \mu_o \mu HSn\ell,$$

где  $S$  — площадь витка:  $S = \pi R^2$ .

С учетом зависимости напряженности поля соленоида от координаты выражение для магнитного потока получается методом дифференцирования и последующего интегрирования по всей длине соленоида:

$$d\Psi = \mu_o \mu HSn dl,$$

где  $H$  следует подставить из выражения (1.1). Тогда

$$\Psi = \int_0^{\ell} \mu_o \mu HSn dl = \mu_o \mu Sn^2 (\sqrt{R^2 + \ell^2} - R)I$$

и на основании выражения (1.6) индуктивность соленоида:

$$L = \mu_o \mu Sn^2 (\sqrt{R^2 + \ell^2} - R) \quad (1.7)$$

определяется его параметрами и магнитными свойствами окружающей среды.

Для достаточно длинного соленоида ( $\ell \gg R$ ) его индуктивность выражается проще:

$$L = \mu_o \mu Sn^2 \ell, \quad (1.8)$$

но при этом получается завышенное значение.

Соотношения (1.1-1.4), (1.7) и (1.8) в данной работе проверяются экспериментально.

## Задание 1. Расчет теоретических значений напряженности $H_T$ магнитного поля и индуктивности соленоида.

1. Рассчитать из выражений (1.1-1.4) значения напряженности поля внутри соленоида при значениях  $X$  от нуля до  $\ell$ . Результаты расчетов привести в таблице 1 (см. ниже) и представить графически зависимость  $H_T$  от координаты  $X$ .
2. Рассчитать из выражения (1.4) значения напряженности в середине соленоида при различных значениях тока от нуля до 1,2 А (через 0,1 А). Результаты занести в таблицу 2 и представить графически зависимость напряженности в этой точке от величины тока  $I$ .
3. Рассчитать индуктивность исследуемого соленоида согласно выражениям (1.7) и (1.8) с учетом его параметров:  $n = 1100 \text{ м}^{-1}$ ;  $\ell = 0,38 \text{ м}$ ;  $R = 33,92 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

## Задание 2. Экспериментальное исследование напряженности магнитного поля соленоида.

Измерение напряженности проводится на основании закона электромагнитной индукции с помощью специальной (измерительной) катушки и баллистического гальванометра, используемого в качестве **веберметра**.

На рис. 2 представлена принципиальная схема установки.

Для измерений напряженности поля  $H_z$  внутри соленоида измерительная катушка, укрепленная на стержне квадратного сечения, фиксируется в определенной точке с координатой  $X$  на оси соленоида. Детали отсчета координаты показаны на рис. 3.

При протекании постоянного тока в соленоиде создается магнитный поток, пронизывающий витки измерительной катушки. При замыкании или размыкании цепи соленоида магнитный поток изменяется, в измерительной катушке возникает эдс индукции:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt}.$$

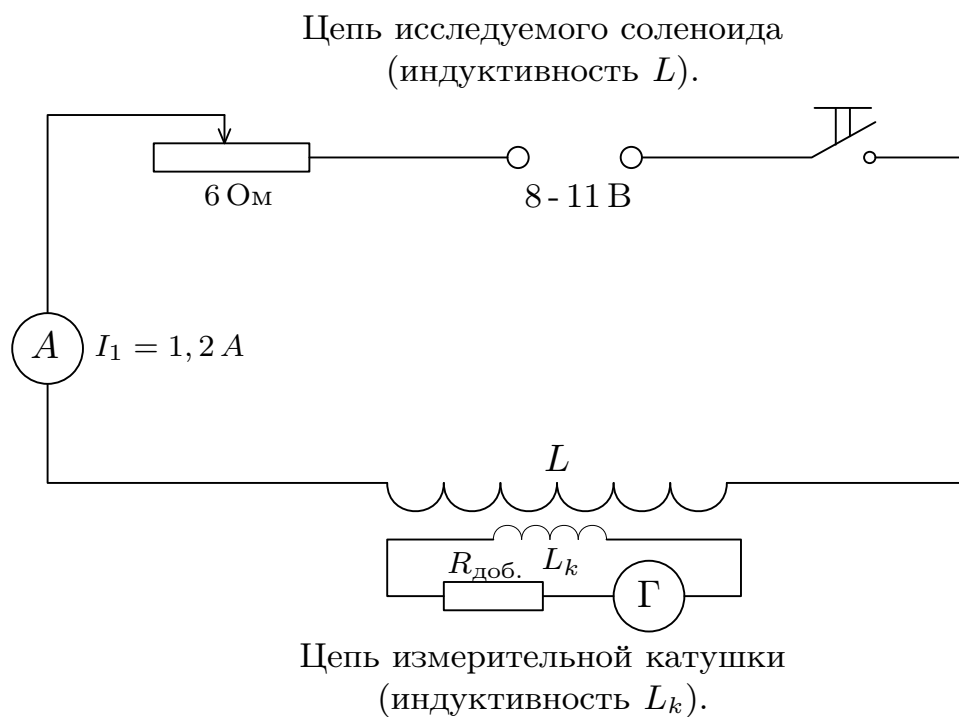


Рис. 2

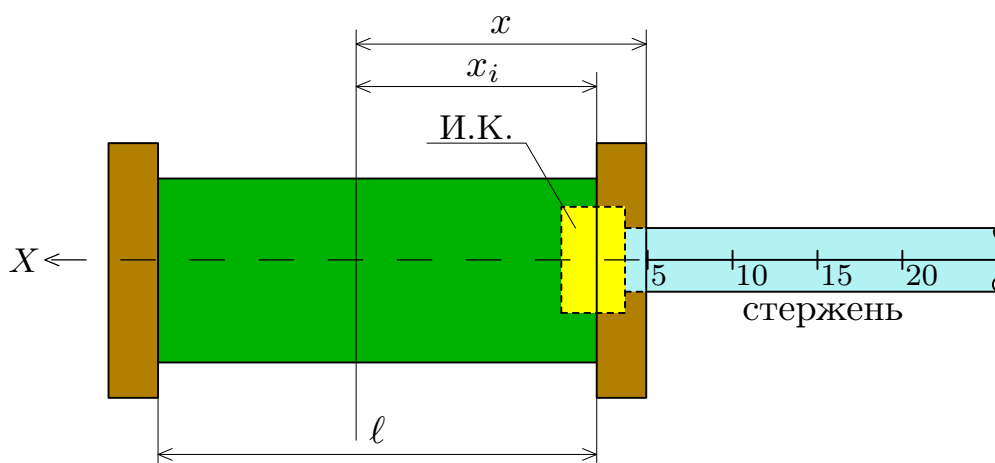


Рис. 3

Измерительная катушка соединена последовательно с обмоткой рамки измерительного механизма веберметра или баллистического гальванометра. Если не учитывать индуктивность обмотки, в первом приближении ток в цепи измерительной катушки определяется выражением:

$$i_k = \frac{\varepsilon_i}{R_k},$$

где  $R_k$  — сопротивление этой цепи.



Баллистический гальванометр фиксирует электрический заряд, прошедший в цепи измерительной катушки за время изменения магнитного потока:

$$q = \int_0^t i_k dt = \frac{1}{R_k} \int_0^t \varepsilon_i dt = -\frac{1}{R_k} \int_0^t \frac{d\Psi}{dt} dt = -\frac{1}{R_k} \int_{\Psi_0}^{\Psi_t} d\Psi = \frac{1}{R_k} (\Psi_0 - \Psi_t).$$

Если конечное значение магнитного потока равно нулю, между зарядом, прошедшим в цепи, и начальным значением магнитного потока получается простое соотношение:

$$q = \frac{\Psi_0}{R_k},$$

позволяющее проградуировать баллистический гальванометр в единицах магнитного потока, то есть использовать его в качестве **веберметра**. Полный магнитный поток рассчитывается как произведение цены деления гальванометра по магнитному потоку  $C_\Phi$  на число делений шкалы:

$$\Psi_0 = C_\Phi \cdot n_g.$$

С другой стороны полный магнитный поток в начальный момент времени зависит от напряженности магнитного поля:

$$\Psi_0 = \mu_0 \mu H S_k N_k.$$

С учетом вышесказанного расчетная формула для экспериментальных значений напряженности магнитного поля соленоида принимает вид:

$$|\vec{H}_3| = \frac{C_\Phi n_g}{\mu_0 \mu S_k N_k}, \quad (1.9)$$

- где  $H_3$  — экспериментальное значение напряженности,  
 $S_k$  — площадь витка измерительной катушки,  
 $N_k$  — число витков катушки.

2.1. Собрать цепь соленоида, установить ток 1,2 А. Помещая измерительную катушку в точки с координатами  $X$ , указанными в таблице 1, снять показания баллистического гальванометра в каждой точке при размыкании цепи соленоида. Результаты измерений и расчетов напряженности магнитного поля  $H_z$  занести в таблицу 1. Представить зависимость  $H_z$  от координаты  $X$  графически на том же графике, что и  $H_T(X)$ . Сопоставить результаты.

Параметры измерительной катушки:  $N_k = 586$ ,  $S_k = 1,075 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ .

Цена деления баллистического гальванометра  $C_\phi$  по магнитному потоку в положении переключателя "× 10" с добавочным сопротивлением 124 Ом равна  $2,028 \cdot 10^{-5} \text{ Вб/дел}$ .

**Таблица 1.** Теоретические и экспериментальные значения напряженности магнитного поля внутри соленоида

Координаты точек, см	0	...	...	38
$H_T$ , А/м				
$n$ , дел.				
$H_z$ , А/м				

2.2. Поместить измерительную катушку в середину соленоида. Описанным выше методом измерить экспериментальные значения напряженности в данной точке как функцию величины тока в цепи, изменяя его от 1,2 А до нуля через 0,1 А. Результаты измерений и вычислений  $H_z$  занести в таблицу 2, представить зависимость  $H_z$  от тока на том же графике, что и  $H_T(I)$ . Сопоставить результаты.

**Таблица 2.** Теоретические и экспериментальные значения напряженности магнитного поля в центре соленоида в зависимости от величины тока

$$x = \frac{\ell}{2}$$

Величина тока, А	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5 ...	...	1,2
$H_T$ , А/м								
$n$ , дел.								
$H_э$ , А/м								

2.3. **Извлечь измерительную катушку из соленоида.** Провести несколько измерений напряженности магнитного поля вне соленоида по описанной выше методике, изменив положение переключателя баллистического гальванометра на "  $\times 1$  ", при этом цена деления  $C_\Phi$  по магнитному потоку равна  $2,028 \cdot 10^{-6}$  Вб/дел.

Провести несколько измерений вблизи внешней поверхности соленоида в точках, расположенных параллельно его оси, а также в нескольких точках по мере удаления от середины соленоида в  $\perp$  направлении. Анализируя полученные значения напряженности, сделать вывод о величине напряженности магнитного поля вне соленоида.

### **Задание 3. Измерение индуктивности соленоида, сравнение с расчетами для соленоида конечной длины $\ell$ и для бесконечно длинного соленоида.**

В работе используется измеритель индуктивности и емкости — прибор Е7-9, принципиальная схема которого и порядок действий содержатся в приложении к методическим указаниям.

---

Измерение индуктивности и емкости основано на одном и том же принципе. Для измерения  $L$  на низких и средних частотах (до 20 кГц) применяются измерители на основе мостовой схемы, на высоких частотах (ВЧ) используются измерители на основе резонансных методов измерения.

При выполнении данного задания следует:

- ознакомиться с инструкцией к прибору Е7-9;
- провести измерения индуктивности соленоида;
- сравнить полученное значение с расчетами из выражений (1.7), (1.8) задания 1;
- сделать вывод о возможности принять исследуемый соленоид за бесконечно длинный.

## 2. Содержание отчета

Отчет должен содержать название работы, цель, перечень приборов и принадлежностей, схему лабораторной установки, таблицы и графики, указанные в заданиях, и выводы.

## 3. Контрольные вопросы

1. Физический смысл и единицы измерения напряженности и индукции магнитного поля тока, магнитного потока и индуктивности.
2. Сущность экспериментальных методов, использованных в работе, вывод расчетной формулы для напряженности магнитного поля с помощью баллистического гальванометра.
3. Особенности магнитного поля соленоида, аналогия с электростатическим полем конденсатора.
4. Сопоставление индуктивности соленоида и емкости конденсатора.
5. Как изменится индуктивность при введении сердечника?
6. Как на основании имеющихся данных и результатов измерений можно рассчитать индуктивность измерительной катушки?

**Примечание.** Данная работа была усовершенствована ст. преподавателем кафедры общей физики М.Л. Игольниковым, составившим ее подробное описание.

Предлагаемый вариант описания отличается некоторыми сокращениями в теоретических вопросах и структурированием выполнения работы (последовательности заданий студентам). Составила доцент кафедры общей физики Т.Н. Спиридонова. 2007 г.