

Министерство образования Российской Федерации

Томский политехнический университет

---

УТВЕРЖДАЮ:  
Декан ЭФФ

\_\_\_\_\_ Евтушенко Г.С.

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2003г.

407-Vi

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЗАДАЮЩИХ СИСТЕМ

Методические указания по подготовке и выполнению  
лабораторной работы № 407-Vi (Virtual)  
по курсу «Методы и средства измерений»  
для студентов специальности  
19.09.-Информационно-измерительная техника и технологии

Томск – 2003 г.

УДК 621.317.39 (075.8)

Исследование полезадающих систем.

Методические указания к выполнению лабораторной работы № 407-Vi для студентов специальности 19.09 - "Информационно-измерительная техника и технологии" всех форм обучения. - Томск: изд. ТПУ. 2003.-20 с.

Составитель: Б.Б.Винокуров

Рецензент: доцент, к.т.н. В.Ф. Вотяков

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры информационно-измерительной техники 6 марта 2003 г.

Зав. кафедрой ИИТ, профессор

\_\_\_\_\_ Жуков В.К.

© Томский политехнический университет

© Винокуров Б.Б.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЗАДАЮЩИХ СИСТЕМ

Методические указания по подготовке и выполнению лабораторной работы № 407-V (Virtual) по курсу «Методы и средства измерений»

### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЯХ:

- $B_x$  – значение магнитной индукции, Тл;
- $H_x$  – значение напряженности магнитного поля, А/м;
- $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;
- $W$  – число витков намагничивающей катушки;
- $L$  – длина полезадающей катушки, м;
- $l = L/2$  – полудлина катушки;
- $I$  – значение тока в катушке, А;
- $d$  – толщина обмотки катушки, м;
- $a$  – расстояние от торца (края) катушки до точки наблюдения, м;
- $M$  – обозначение точки наблюдения;
- $X$  –  $x$  - я координата точки наблюдения, м.

### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Штамбергер Г.А. Устройства для создания слабых магнитных полей. – Новосибирск: Наука – Сибирское отд., 1972. – 175 с.
2. Брунов Б.Я., Гольдберг Л.М., Кляцкин И.Г., Цейтлин Л.А. Теория электромагнитного поля. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 512с.
3. Средства измерений параметров магнитного поля/ Ю.В.Афанасьев, Н.В.Студенцов, В.Н.Хорев и др. – Л.: Энергия – Ленинградское отд., 1979. – 320 с.
4. Магнитометрические преобразователи, приборы, установки/ Ю.В.Афанасьев, Н.В.Студенцов, А.П.Щелкин. - Л.: Энергия – Ленинградское отд., 1972. – 272 с.
5. Жарков Ф.П., Каратаев В.В., Никифоров В.Ф. и др. Использование виртуальных инструментов Lab View / под ред. К.С.Демирчана и В.Г.Миронова. – М.: Солон-Р, Радио и связь, 1999. – 268 с.

### ЗАДАНИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ:

1. Ознакомиться с основными магнитными величинами, характеризующими магнитное поле.
2. Ознакомиться с видами полезадающих систем, воспроизводящих значения индукции (напряженности) в широких пределах.
3. Ознакомиться со способами синтеза полезадающих систем для получения полей с заданными метрологическими параметрами (значение магнитной индукции, степень однородности поля в заданном объеме пространства, степень достоверности воспроизведения заданного значения индукции или напряженности магнитного поля).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЗАДАЮЩИХ СИСТЕМ

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 1.1. Получить представление о возможностях использования пакетов прикладных программ для создания макетов лабораторных работ в виртуальной среде
- 1.2. Получить знания об источниках магнитных полей, способах синтеза различных полезадающих систем с целью получения нужных метрологических характеристик.
- 1.3. Приобрести практические навыки и умения использования виртуальной среды для моделирования различных источников магнитного поля.
- 1.4. Приобрести практические навыки исследований, получения результатов экспериментов и их обработки.

### 2. ПРОГРАММА РАБОТЫ

- 2.1. Ознакомиться с интерфейсом виртуальной лабораторной работы, с назначением основных элементов управления и регулирования.
- 2.2. Провести ознакомительное включение виртуальной работы. Опробовать функциональную достаточность элементов регулирования и индикации.
- 2.3. Провести исследование топографии магнитного поля источника поля в виде соленоида при различных установленных электрических и геометрических параметрах.
- 2.4. Провести исследование топографии магнитного поля источника поля в виде пары коротких катушек при различных установленных электрических и геометрических параметрах.
- 2.5. Провести исследование топографии магнитного поля системы в виде двух пар коротких катушек при различных установленных электрических и геометрических параметрах.
- 2.6. Провести исследование топографии магнитного поля источника поля в виде системы, состоящей из соленоида и пары корректирующих катушек при различных установленных электрических и геометрических параметрах.
- 2.7. Провести исследование топографии магнитного поля источника поля в виде системы, состоящей из соленоида и двух пар корректирующих катушек при различных установленных электрических и геометрических параметрах.
- 2.8. Провести дополнительные исследования полезадающих систем по предложению и усмотрению студентов-экспериментаторов.
- 2.9. Подготовить отчет о проделанной работе с включением в него экспериментальных данных в виде таблиц, графиков и выводов по отдельным пунктам программы работы и общие выводы.

### 3. ОПИСАНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Виртуальная лабораторная работа является исполнительным модулем, предназначенным для работы в среде операционных систем: Windows'95, Windows'98, Windows'NT 2000.

После загрузки исполняемого модуля на экране монитора появится «окно» - лицевая панель виртуальной лабораторной работы (рис.1).

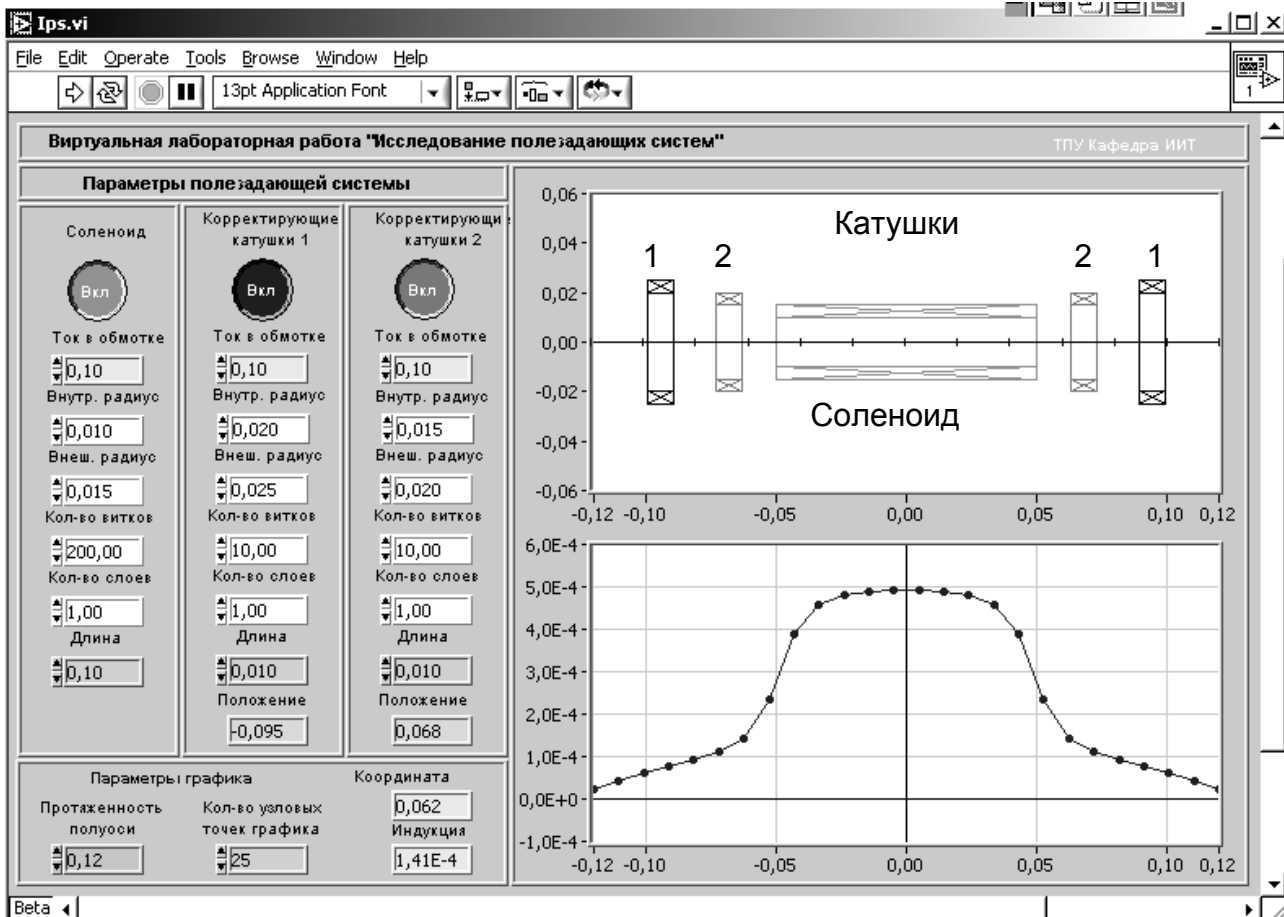






Рис.1. Общий вид интерфейса виртуальной лабораторной работы.

В верхней левой части окна расположены кнопки управления работой программы     , где слева направо:

- кнопка «старт» - для выполнения одного цикла работы алгоритма программы;
- кнопка «старт» - для непрерывного выполнения алгоритма программы;
- кнопка «стоп» - для завершения работы программы;
- кнопка временной остановки – «пауза».

В левой части окна программы расположены элементы управления и задания параметров – поле «Параметры полезадающей системы»:

- кнопки «Вкл/Выкл» - для включения и выключения питания обмоток представленных в работе полезадающих систем – соленоида и двух пар корректирующих катушек (1-1) и (2-2);

- регуляторы – индикаторы «Ток в обмотке» значений токов в обмотках соленоида и корректирующих катушек;
- регуляторы – индикаторы «Внутр. радиус» для установки значений внутреннего радиуса обмоток;
- регуляторы – индикаторы «Внешн. радиус» для установки значений внешнего радиуса обмоток;
- регуляторы – индикаторы «Кол-во витков» для установки количества витков в обмотках;
- регуляторы – индикаторы «Кол-во слоев» для установки числа слоев намотки катушек;
- регуляторы – индикаторы «Длина» для установки длины обмоток катушек;
- регуляторы – индикаторы «Положение» (только для пар корректирующих катушек) - показывает координаты «х» центров катушек относительно начала координат системы в целом.

В левой нижней части окна программы расположены элементы управления графиком распределения аксиальной (х-вой) составляющей индукции полезадающей системы:

- регулятор – индикатор «Протяженность оси» для изменения диапазона вдоль оси системы, в котором рассчитываются и индицируются значения магнитной индукции;
- регулятор – индикатор «Кол-во узловых точек графика» - для выбора количества узловых точек графика распределения индукции магнитного поля;
- индикатор «Координата точки» - показывает координату выделенной курсором точки на кривой, отображающей распределение значений индукции магнитного поля вдоль оси системы;
- индикатор «Индукция» - показывает значение магнитной индукции в выделенной курсором точке наблюдения.

В правой части окна программы расположены два поля графической индикации – форма и расположение выбранных полезадающих систем – поле объектов, используемых по отдельности или совместно, и график распределения аксиальной составляющей магнитной индукции вдоль оси системы. Запуск программы и работа с ней – см. ниже, в разделе «Методические указания...»

## 4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЛЕЗАДАЮЩИХ СИСТЕМАХ

### 4.1. Магнитные величины, характеризующие магнитное поле.

*Магнитное поле* - прежде всего силовое поле. Это его качество проявляется в силовом взаимодействии с элементом тока или намагниченным телом. Следует отметить, что силовое проявление магнитного поля, являясь одним из основных, положено в основу определения ряда параметров магнитного поля.

Основной физической величиной, характеризующей интенсивность или силу в каждой точке пространства, служит *вектор магнитной индукции*  $\vec{B}_0$ .

В СИ величина  $\bar{B}_0$  измеряется в теслах (Тл), причем  $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$  (в системе СГС).

Часто для характеристики магнитного эффекта тока, вне зависимости от магнитных свойств среды, используют величину

$$H = B_0 / \mu_0 ,$$

называемую *напряженностью магнитного поля*, где  $\mu_0$  - *магнитная постоянная*, значение которой зависит от выбранной системы единиц, в частности, в СИ  $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ . Поэтому, для описания структуры поля вне намагничиваемых сред равно можно использовать как вектор  $\bar{B}_0$ , так и вектор  $\bar{H}$ .

В практике магнитных измерений используют еще одну величину, также характеризующую интенсивность источника магнитного поля и называемую *магнитным моментом M*. Магнитный момент контура с током  $\bar{M} = I \cdot S$ , где  $S$  - площадь, ограниченная контуром с током  $I$ . Магнитный момент для однослойной катушки

$$\bar{M} = \bar{K}_M \cdot I , \text{ где } \bar{K}_M = WS ,$$

а  $\bar{K}_M$  - постоянная катушки с  $W$  числом витков.

Если магнитный момент источника  $M$ , то напряженность, создаваемого им поля

$$\bar{H} = -grad \frac{(\bar{M} \cdot \bar{R})}{R^3} ,$$

где  $\bar{R}$  - радиус-вектор от источника поля до точки наблюдения.

Поэтому наравне с такими величинами как  $B$  и  $H$  магнитный момент  $M$  является характеристикой источника поля. Напряженность магнитного поля и магнитный момент являются удобными расчетными величинами и измеряются, соответственно, в  $A/m$  ( $1 A/m = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Э}$ ) и  $A \cdot m^2$ .

Интегральной величиной, характеризующей магнитное поле, является *поток  $\Phi$  вектора магнитной индукции  $B$*  через конечную площадь, который определяется интегралом

$$\Phi = \int_S \bar{B} \cdot d\bar{S}$$

Для однородных полей эта зависимость принимает вид  $\Phi = B \cdot S$ .

Магнитный поток является скалярной величиной и измеряется в веберах (Вб), причем  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл/м}^2 = 10^8 \text{ Мкс}$ .

Для оценки неоднородности магнитного поля используют ряд дифференциальных величин. Это *градиент вектора магнитной индукции  $grad \bar{B}$*  или *градиент вектора напряженности магнитного поля  $grad \bar{H}$* .

Градиенты индукции и напряженности характеризуют скорость изменения соответствующих параметров ( $B$  или  $H$ ) в заданном направлении.

В зависимости от рода поля различают *постоянные и переменные* во времени магнитные поля. Временные характеристики магнитного поля могут

обуславливаться либо изменением модуля вектора магнитной величины, либо изменением его направления, либо и тем и другим вместе. В практике магнитных измерений приходится иметь дело с полями, описываемыми как простыми, так и сложными функциями.

В общем случае, например, для вектора функции  $\overline{H}(t)$  (аналогично для  $\overline{B}(t)$ ) можно записать

$$\overline{H}(t) = \overline{H}_0^0 (H)_0 + \sum_{n=0}^{\infty} \overline{H}_n^0 H_{mn} \sin(\omega_n t + \varphi_n),$$

где  $(H)_0$  - постоянная составляющая напряженности магнитного поля;

$\overline{H}_0^0$  - единичный вектор, определяющий направление постоянной составляющей магнитного поля;

$\omega_n$  и  $\varphi_n$  - круговая частота и начальная фаза  $n$ -й гармонической слагающей суммарного поля;

$H_{mn}$  и  $\overline{H}_n^0$  - амплитуда и единичный вектор  $n$ -й гармонической слагающей суммарного поля.

Из выражения (3.6) видно, например, что при  $\overline{H}_n^0 = const$  и  $\omega_n = n\omega_1$  выражение представляет ряд Фурье. В практике этот случай встречается при испытаниях воздействием на испытуемый ферромагнитный образец составляющими напряженности поля кратных частот.

Часто пользуются величинами  $dH/dt$  и  $dB/dt$ , характеризующими скорость изменения интенсивности магнитного поля во времени.

#### 4.2. Полезадающие устройства и системы.

Для воспроизведения и передачи значений единиц напряженности и индукции магнитного поля необходимы рабочие, образцовые меры и эталоны, а в целом ряде экспериментов нужно просто иметь источники магнитного поля. Необходимость в них возникает при разработке, конструировании различной аппаратуры, при поверке магнитоизмерительной аппаратуры, при исследовании магнитных свойств материалов и в физическом эксперименте. Во всех случаях приходится искусственно создавать поля заданного направления, конфигурации и заданной напряженности или индукции в некотором ограниченном пространстве.

Конструкции мер и источников напряженности или индукции магнитного поля в зависимости от их диапазона, требуемой степени однородности, могут существенно отличаться. Для создания относительно слабых магнитных полей с индукцией от  $10^{-8}$  до  $10^{-2}$  Тл (напряженность поля  $H$  будет соответственно равна от  $8 \cdot 10^{-3}$  до  $8 \cdot 10^3$  А/м) применяются отдельные катушки различных модификаций или системы, состоящие из нескольких катушек. Такие системы позволяют получать однородные магнитные поля в значительных объемах, что, в свою очередь, обеспечивает свободный доступ в рабочее пространство и позволяет размещать в нем объект исследования.

Цилиндрические *однослойные катушки* со сплошной намоткой или секционированные широко применяются для получения полей с



индукцией в несколько десятков миллитесла (мТл). Такие ползадающие системы просты в изготовлении и используются для создания наиболее точных мер

Для создания сильных магнитных полей используются многослойные соленоиды, а для создания еще более сильных – постоянные магниты и электромагниты. Необходимость получения сверхсильных стационарных магнитных полей размером в  $10^1$ - $10^2$  Тл, используемых в фундаментальных научных исследованиях, привела к созданию соленоидов с интенсивным охлаждением и сверхпроводящих соленоидов

Последние типы источников сильных полей в данной работе в силу специфики не рассматриваются.

Рассмотрим некоторые источники поля, выполненные как совокупность проводников с током (с токами).

*Длинный проводник с током (Рис.2). Магнитное поле проводника с током.*

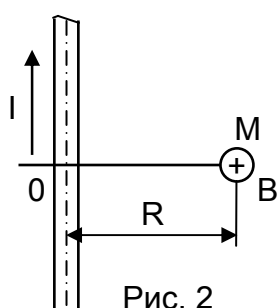


Рис. 2

Магнитная индукция  $B$ [Тл] в произвольной точке  $M$  пространства на расстоянии  $R$ [м] от проводника с током  $I$ [А] направлена перпендикулярно к плоскости чертежа и численно равна

$$B = \frac{\mu_0 2I}{4\pi R}$$

*Одиночный круговой контур с током (Рис.3). Магнитное поле кругового контура с током.*

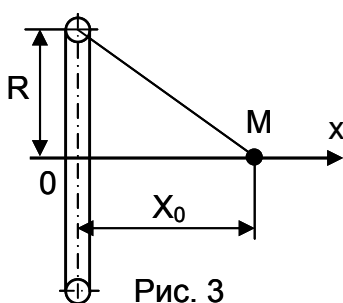


Рис. 3

Предполагается, что сечение проводника пренебрежительно мало. Магнитная индукция поля  $B$  [Тл] в любой точке  $M$  на его оси, отстоящей от центра витка на расстоянии  $X_0$  [м] равна

$$B = \frac{\mu}{2} \frac{IR^2}{(R^2 + X_0^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 IS}{2\pi(R^2 + X_0^2)^{3/2}}, \text{ где } S = \pi R^2.$$

Магнитная индукция поля в центре кругового витка с током равна

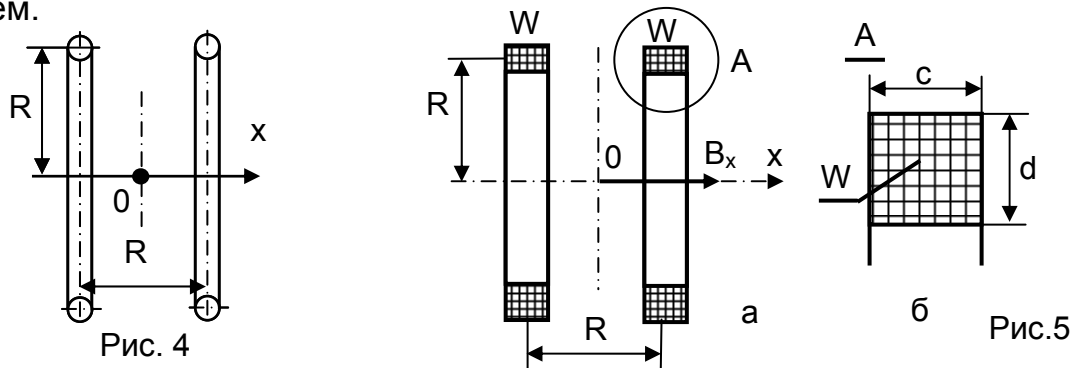
$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

На больших удалениях от плоскости витка значение магнитной индукции убывает вместе с кубом расстояния от витка. Так, при  $X_0 \gg R$   $B_x = \frac{\mu_0 IR^2}{2X_0^3}$  [Тл]

Указанные формулы позволяют определять значения магнитной индукции или напряженности поля, создаваемого идеальным витком, только на его оси. Используя более сложные выражения, например в [1], можно рассчитать значение индукции или напряженности в любой точке пространства.

Система из двух одиночных контуров с током. Магнитное поле двухконтурной системы катушек (рис.4,5).

В ряде практических задач первостепенное значение имеет однородность магнитного поля, создаваемого системой контуров с током. Поле, создаваемое одиночным контуром, нельзя считать в достаточной степени однородным, за исключением точек, значительно удаленных от контур. Однако полученные выше для одиночного контура соотношения являются исходными для исследования однородности поля более сложных систем.



Система, состоящая из двух контуров одинакового диаметра с плоскостями, параллельными друг другу, центрами на общей оси и расстоянием между контурами, равным радиусу контура, получила широкое применение как источник однородного магнитного поля. Расположение контуров на расстоянии, равном их радиусу, соответствует условию, предложенному Гельмгольцем, поэтому такая система известна под названием *колец Гельмгольца* (рис.4) или *катушек Гельмгольца* (рис.5).

Особенностью колец (катушек) Гельмгольца является высокая степень однородности создаваемого ими магнитного поля и возможность свободно использовать пространство с однородным полем, например, для поверки или градуировки в нем магнитоизмерительных преобразователей и устройств.

В пространстве между катушками, занимаемом воображаемым цилиндром с диаметром основания и образующей, равной  $0,2R$  и при выполнении условия  $c/d = \sqrt{31/36}$ , неоднородность поля не будет превышать 0,02%, а значение магнитной индукции будет равно

$$B_x = \frac{8\mu_0 WI}{5\sqrt{5}R} \left[ 1 - 0,144 \frac{1}{R^4} (8x^4 - 24x^2 y^2 + 3y^4) + \dots \right].$$

В центре системы ( $x=0, y=0$ )  $B_x = 0.7155 \frac{\mu_0 WI}{R}$ , Тл.

Двухконтурная система является частным случаем более общего, когда число пар колец (катушек), имеющих общую ось, может быть достаточно большим. В практике измерений наибольшее распространение получили 3 - и 4 - контурные системы. Однако, большее число пар контуров (катушек) значительно усложняет систему и только незначительно увеличивает степень ее однородности.

*Однослойный соленоид с током. Магнитное поле однослойного соленоида с током.*

При создании магнитных полей большей напряженности широкое распространение получили *соленоиды* – катушки, длина которых для достижения однородности поля выбирается значительно больше диаметра сечения витка обмотки. Соленоидом называется цилиндрическая катушка с током, состоящая из относительно большого числа витков проволоки, которые образуют винтовую линию. Если витки расположены вплотную или очень близко друг к другу, то соленоид можно рассматривать как систему последовательно соединенных круговых токов одинакового радиуса с общей осью. Обмотка соленоида наносится на каркас из немагнитных материалов.

Применение соленоидов не всегда удобно, так как они не обеспечивают столь свободного доступа к области пространства, характеризующегося высокой степенью однородности поля. В то же время интенсивность поля, создаваемого соленоидом, может значительно превышать поле, создаваемое ранее рассмотренными системами, при значительно меньших размерах его по сравнению с размерами систем круговых токов. Поэтому соленоиды применяются в основном в тех случаях, когда необходимо создать достаточно интенсивное поле, а размеры устройства, создающего это поле, ограничены.

Соленоиды целесообразно использовать и в тех случаях, когда необходимо иметь достаточно однородное поле на большом участке вблизи его оси.

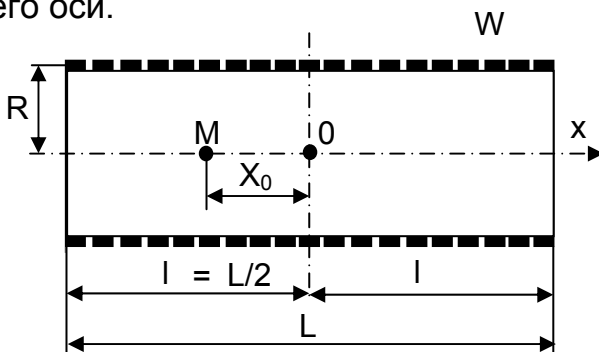


Рис. 6

Значение магнитной индукции поля в любой точке М, лежащей на оси *x* однослойного соленоида (Рис.6), равно алгебраической сумме индукций магнитного поля, создаваемых в точке М всеми витками.

Если число витков соленоида равно *W*, а ток в нем *I*, то индукция поля в любой точке наблюдения, лежащей на оси соленоида можно рассчитать как

$$B_x = \frac{\mu_0 W I}{2L} \left[ \frac{(l - x_0)}{\sqrt{R^2 + (l - x_0)^2}} + \frac{(l + x_0)}{\sqrt{R^2 + (l + x_0)^2}} \right],$$

а при  $x_0=0$ , т.е. в центре соленоида  $B_x = \frac{\mu_0 W I}{L} \frac{l}{\sqrt{R^2 + l^2}}$ .

Для точек, лежащих на конце соленоида ( $x_0=l$ ), индукция в два раза меньше, чем в его центре и равна  $B_x = \frac{\mu_0 W I}{2L} \frac{2l}{\sqrt{R^2 + 4l^2}}$ .

В некоторых случаях требуется иметь возможность определить интенсивность поля на оси соленоида в точке, удаленной на расстоянии  $a$  от одного из его торцов. Выражение для  $x$ -й компоненты поля в этой точке будет иметь вид

$$B_x = \frac{\mu_0 WI}{2L} \left[ \frac{l+a}{\sqrt{R^2 + (l+a)^2}} - \frac{a}{\sqrt{R^2 + a^2}} \right].$$

*Многослойный соленоид с током. Магнитное поле многослойного соленоида (Рис.7).*

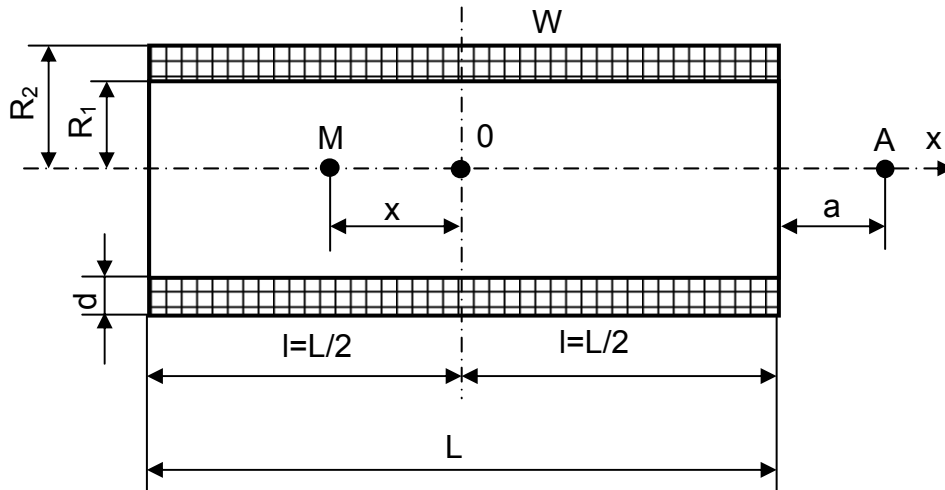


Рис.7

$$B_x = \frac{\mu_0 WI}{2Ld} \left[ (l+x) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (l+x)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (l+x)^2}} + (l-x) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (l-x)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (l-x)^2}} \right],$$

где  $d$  – толщина намотки.

В точках на оси вне соленоида  $X$  - я компонента магнитной индукции будет определяться соотношением

$$B_x = \frac{\mu_0 WI}{2Ld} \left[ (L+a) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (L+a)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (L+a)^2}} - a \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + a^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + a^2}} \right].$$

Анализируя приводимые соотношения для магнитной индукции поля, создаваемого соленоидом, можно видеть, что поле вдоль его оси сравнительно быстро изменяется, приводя тем самым к значительной степени неоднородности. Попытки улучшить степень однородности  $x$  – й компоненты поля вдоль его оси привели к приданию соленоиду такой формы, которая бы обеспечивала меньшую зависимость  $B_x$  от расстояния, либо компенсации изменения  $B_x$  путем включения дополнительных компенсационных катушек, как правило, на краях соленоида, улучшающих степень однородности этой компоненты. При этом заданная степень однородности на заданном участке оси может быть получена при меньшей общей длине соленоида.

*Система «Соленоид – пара корректирующих катушек».*

Конструкция такой системы приведена на рис.8. Суммарное аксиальное поле в рассматриваемой точке пространства складывается из поля соленоида (см. выше) и дополнительного поля, создаваемого парой корректирующих катушек, расположенных симметрично относительно центра на его краях. При этом  $B_x = B_{x1} + B_{x2}$

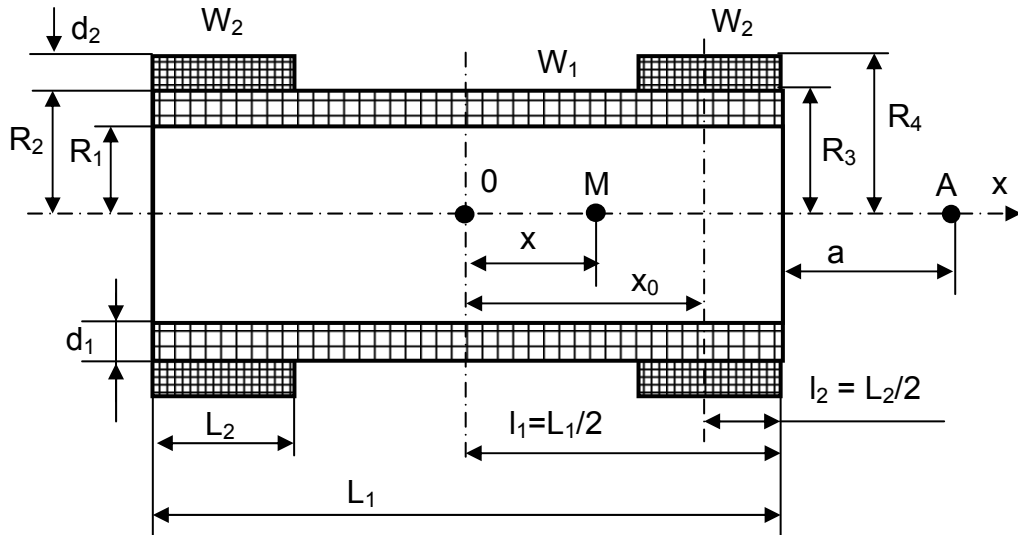


Рис.8

Поле  $B_{x2}$ , создаваемое корректирующими катушками на его оси, получается, в свою очередь, путем суммирования полей двух дополнительных соленоидов  $W_2 - W_2$  в т. М и может быть выражено следующим образом:

$$B_{x2} = \frac{\mu_0 IW}{4L_2 d_2} \left\{ A_2 \ln \frac{R_4 + \sqrt{R_4^2 + A_2^2}}{R_3 + \sqrt{R_3^2 + A_2^2}} - B_2 \ln \frac{R_4 + \sqrt{R_4^2 + B_2^2}}{R_3 + \sqrt{R_3^2 + B_2^2}} + C_2 \ln \frac{R_4 + \sqrt{R_4^2 + C_2^2}}{R_3 + \sqrt{R_3^2 + C_2^2}} + D_2 \ln \frac{R_4 + \sqrt{R_4^2 + D_2^2}}{R_3 + \sqrt{R_3^2 + D_2^2}} \right\}$$

где  $A_2 = x_{02} + l_2 - x$ ,  $B_2 = x_{02} - l_2 - x$ ,  $C_2 = x_{02} + l_2 + x$ ,  $D_2 = x_{02} - l_2 + x$ .

*Система «Соленоид – две пары корректирующих катушек» (Рис.9).*

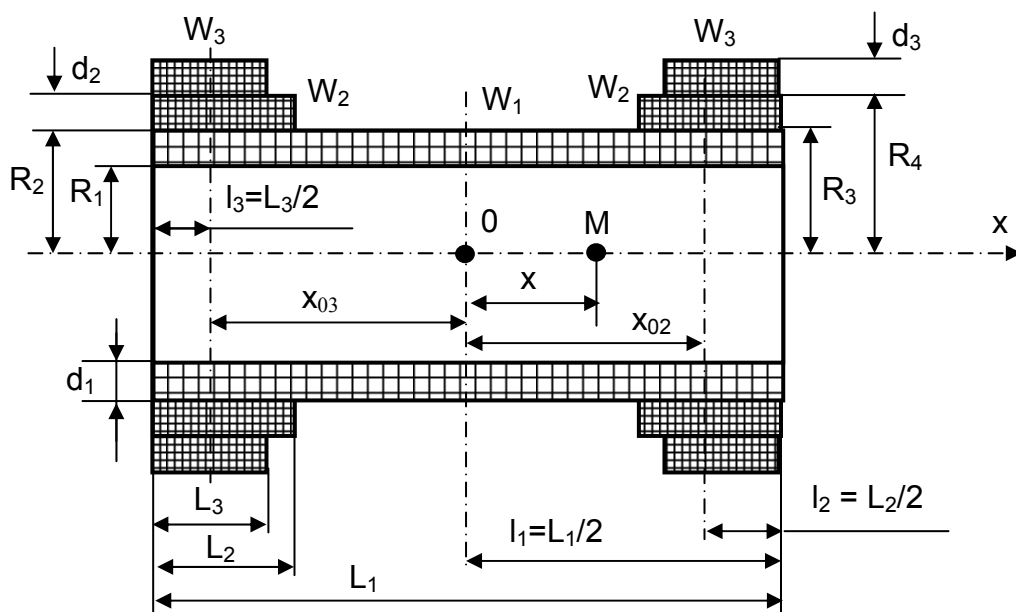


Рис.9

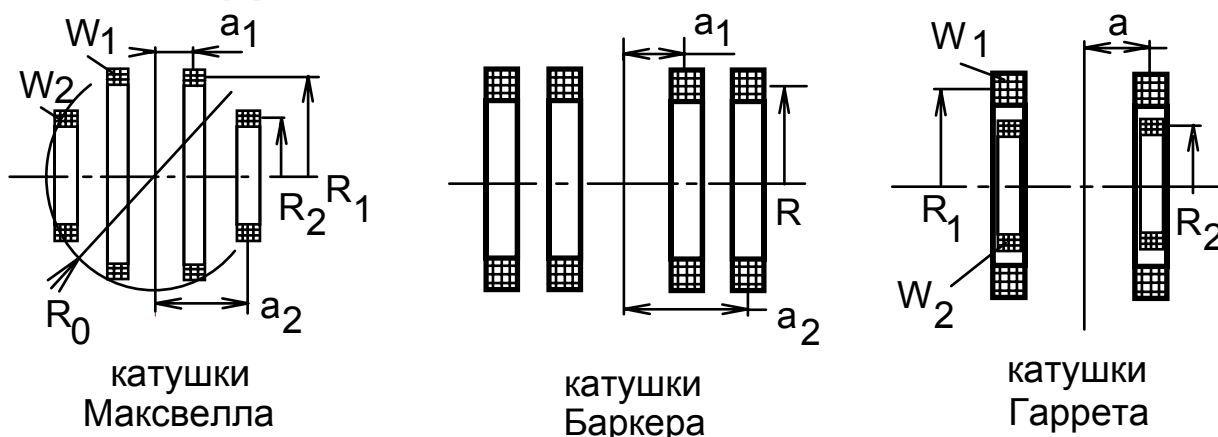
Суммарное аксиальное поле системы, показанной на рис.9, имеет вид  $B_x = B_{x1} + B_{x2} + B_{x3}$ .  $B_{x3}$  – поле, создаваемое второй парой корректирующих катушек. По аналогии с предыдущим вариантом значения  $B_{x3}$  могут быть найдены как

$$B_{x3} = \frac{\mu_0 IW}{4L_3 d_3} \left\{ A_3 \ln \frac{R_6 + \sqrt{R_6^2 + A_3^2}}{R_5 + \sqrt{R_5^2 + A_3^2}} - B_3 \ln \frac{R_6 + \sqrt{R_6^2 + B_3^2}}{R_5 + \sqrt{R_5^2 + B_3^2}} + C_3 \ln \frac{R_6 + \sqrt{R_6^2 + C_3^2}}{R_5 + \sqrt{R_5^2 + C_3^2}} + D_3 \ln \frac{R_6 + \sqrt{R_6^2 + D_3^2}}{R_5 + \sqrt{R_5^2 + D_3^2}} \right\}$$

где  $A_3 = x_{03} + l_3 - x$ ,  $B_3 = x_{03} - l_3 - x$ ,  $C_3 = x_{03} + l_3 + x$ ,  $D_3 = x_{03} - l_3 + x$ .

#### Другие примеры полезадающих систем.

В качестве образцовых и рабочих мер магнитной индукции (напряженности) используют катушки различной конфигурации, по которым протекает ток. Для создания относительно слабых (до 2мТл) однородных полей распространение получили катушки, выполненные в виде соосно расположенных кольцевых секций, взаиморасположение и размеры которых выбирают из условия однородности поля в рабочем пространстве. На рис.10. в качестве примеров показаны некоторые из таких систем [3].



катушки  
Максвелла

катушки  
Баркера

катушки  
Гаррета

#### Основные геометрические соотношения

$R_2/R_1 = 0.6719,$	$R_2/R_1 = 1.0000,$	$R_2/R_1 = 0.2652,$
$a_1/R_1 = 0.2976,$	$a_1/R_1 = 0.2432,$	$a_1/R_1 = 0.4347,$
$a_2/R_2 = 1.1880,$	$a_2/R_2 = 0.9407,$	$a_2 = a_1,$
$W_2/W_1 = 0.6821.$	$W_2/W_1 = 2.2606.$	$W_2/W_1 = 0.245.$

Рис.10

### 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К РАБОТЕ (для самопроверки)

5.1 Дать обоснование и применимость использования виртуальной среды для исследования топографии магнитного поля различных источников магнитного поля.

5.2 Объяснить назначение элементов управления при выполнении виртуальной лабораторной работы «Исследование полезадающих систем».

5.3 Проводник с током как исходный элемент для построения сложных полезадающих систем.


5.4 Способы увеличения однородности магнитного поля

полезадающих систем.

5.5 Наметить возможные варианты построения и исследования полезадающих систем, рассмотренных в разделе 4.2 настоящих МУ, на базе имеющихся в предлагаемой работе элементов – соленоида и двух пар коротких катушек.

## 6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ПРОГРАММЫ РАБОТЫ

Для загрузки лабораторной работы в память ЭВМ необходимо запустить программу «IPS.exe». Запуск программы можно провести либо с рабочего стола, либо из каталога, указанного преподавателем. После загрузки модуля на экране появляется «окно» - лицевая панель виртуальной лабораторной работы, элементы которой подробно описаны выше.

Для запуска программы нажимаем кнопку «старт» - непрерывного выполнения программы .

Кнопками «Вкл/Выкл» выбираем нужные компоненты полезадающей систем, либо по отдельности, либо комбинированно – в зависимости от программы виртуального эксперимента. Неподключенные компоненты системы не отображаются в поле объектов.



Рис.11

С помощью управляющих регуляторов поля «Параметры полезадающей системы» задаются и устанавливаются необходимые параметры системы. При этом на графике отображается расчетная кривая распределения магнитной индукции вдоль оси установленной полезадающей системы.

Все манипуляции по установке параметров проводить с помощью «мышки» с курсорами вида «Стрелка» и «Палец» (см. на рис. 11 «Панель инструментов»).

Если в соответствии с программой работы подключены пары корректирующих катушек, то их положение вдоль оси системы можно изменять с помощью «мыши», используя курсор типа «Палец». Для изменения положения катушек необходимо навести «палец» на катушку, расположенную в положительной области координат и переместить катушку в заданное место. При этом вторая из пары катушек симметрично изменит свое расположение в отрицательной области координат.

График, отображающий кривую распределения магнитной индукции, почти синхронно изменяется после любого изменения параметров полезадающей системы. График отображается в виде совокупности расчетных точек, каждая из которых имеет свои координаты. Показания на индикаторе «Индукция» соответствуют точке, выделенной отличным от остальных цветом, например, красным. Координаты этой точки можно задавать в поле «Координата», либо воспользоваться «мышью» с курсором типа «Палец».

Прежде, чем переходить к «серьезным» исследованиям, необходимо немного потренироваться на виртуальном макете, для чего пока произвольно выбирать к-либо полезадающую систему и, изменяя электрические и геометрические ее параметры и расположение в пространстве, наблюдать распределение аксиальной составляющей индукции на графике. Ниже, на рис.12, 13, 14 и 15 показан ряд примеров для разных систем катушек.

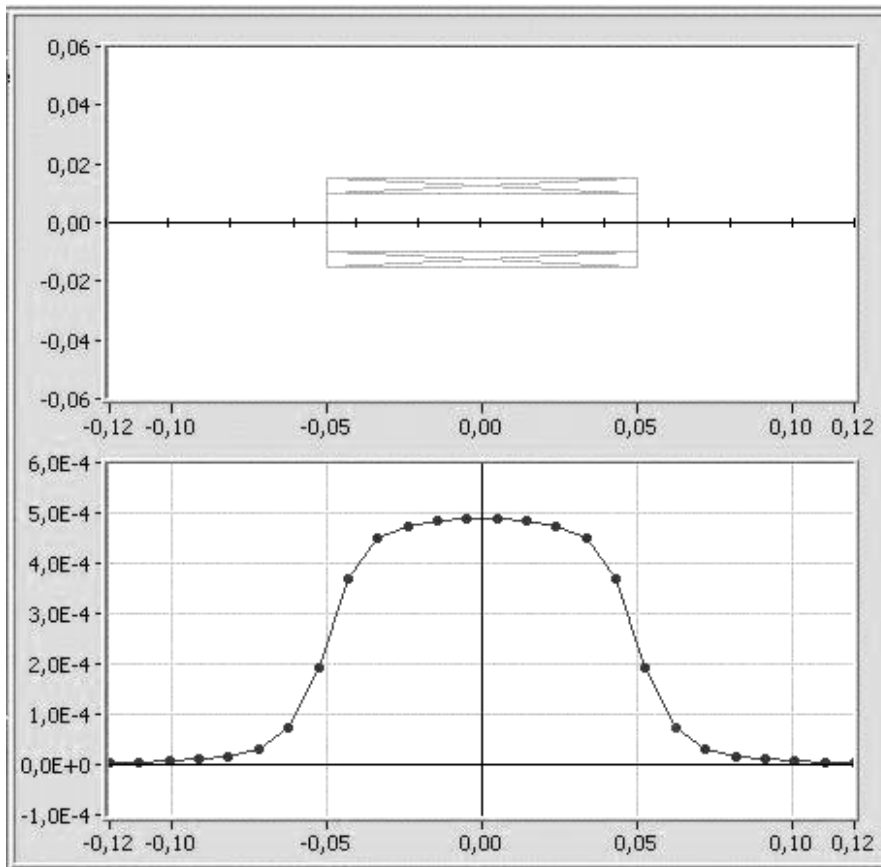


Рис.12. Поле многослойного соленоида

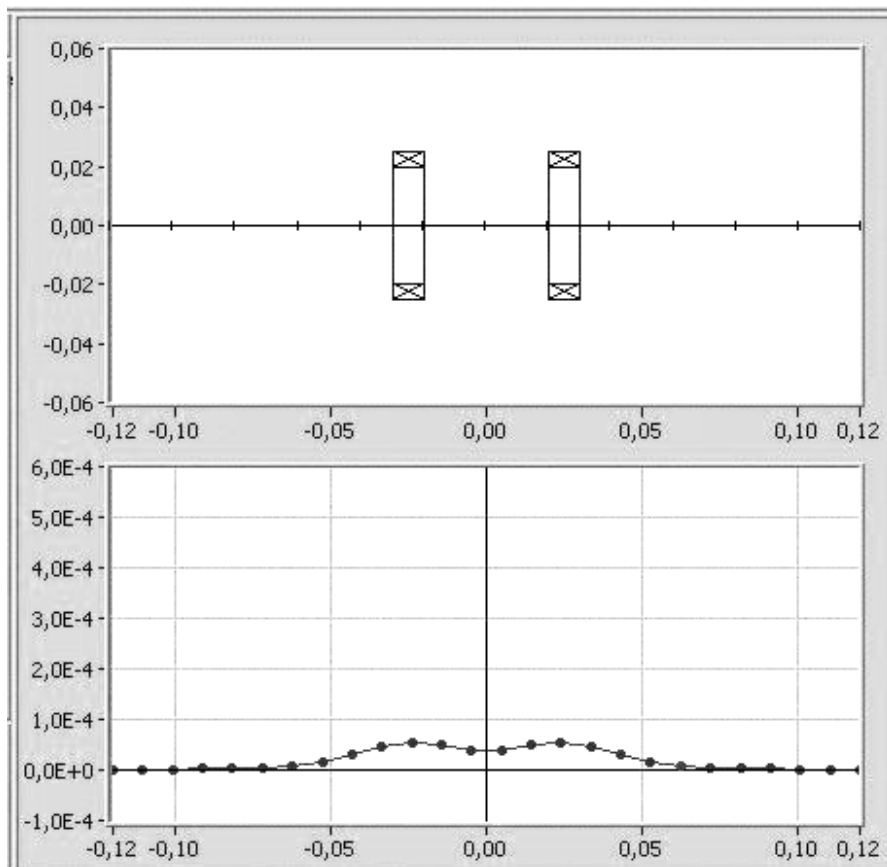


Рис.13. Поле системы 2-х коротких катушек



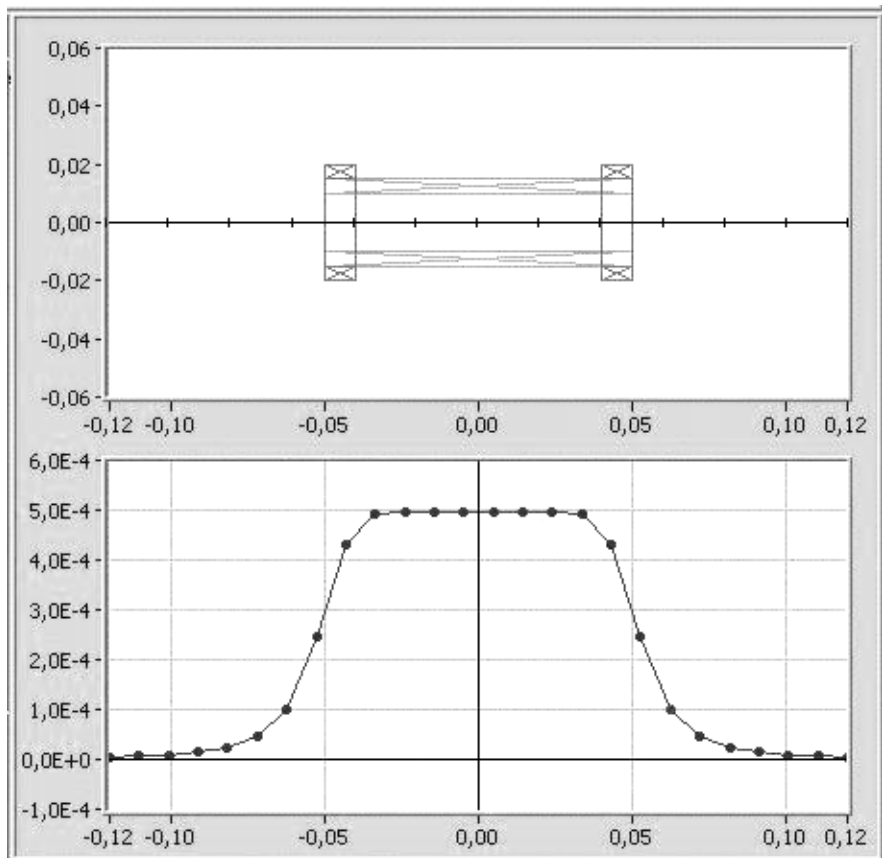


Рис.14. Поле системы катушек (соленоид плюс 2 корректирующие катушки)

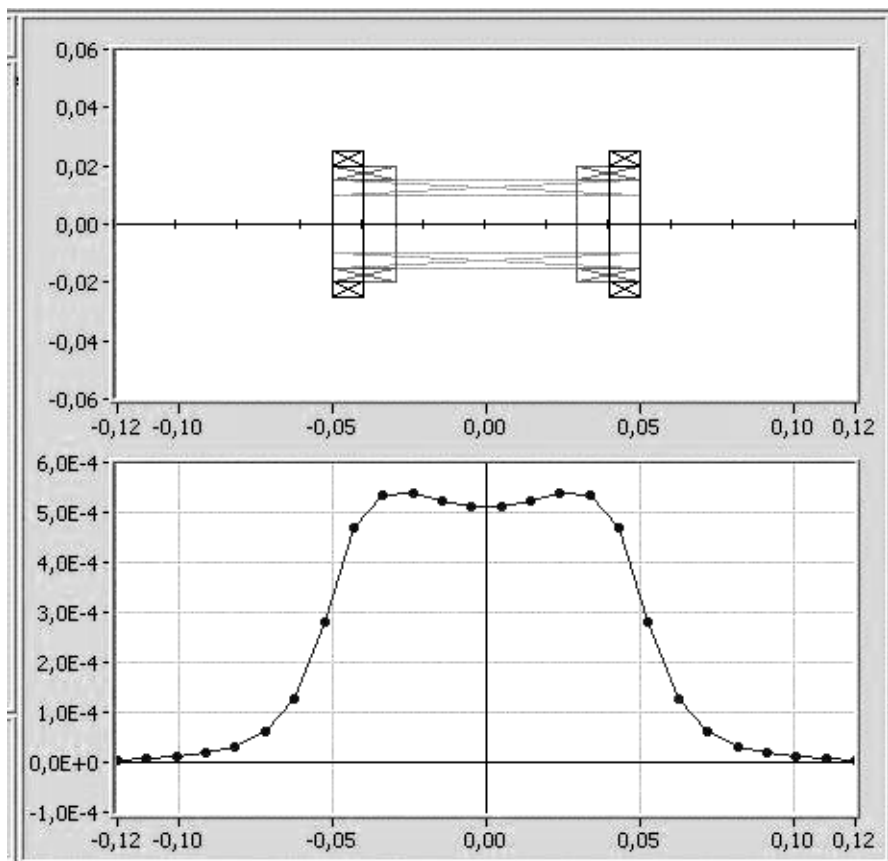


Рис.15. Поле системы катушек (соленоид плюс 4 корректирующие катушки)

Понятно, что приведенные примеры не исчерпывают всех вариантов построения и исследования ползающих систем, которые можно синтезировать из элементов, представленных в данной работе.

Итак, выбираем для исследования объект заданной конфигурации и состава и назначаем программу исследования. Устанавливаем определенные электрические и геометрические параметры системы в поле «Параметры ползающих систем». Получаемый график распределения индукции в правом нижнем окне программы, хотя и имеет градуировку по осям координат в единицах пространства и индукции, пригоден скорее для качественного анализа. Для точной оценки значений координаты «х» и магнитной индукции  $B$  необходимо воспользоваться индикаторами «Координата» и «Индукция». Данные виртуальных измерений заносить в таблицу, например, вида табл.1 с указанием установленных параметров и по ним строить семейства графиков.

Таблица 1

X, см	0	1	2	3	.....			n-1	n
B, Тл									
grad <sub>x</sub> B <sub>x</sub> , Тл/см									

Вид семейства кривых распределения индукции позволит оценить динамику изменения распределения аксиальной составляющей поля и градиента поля при изменении одного или нескольких параметров (электрических и конструктивных) ползающей системы.

Параметр неоднородности – градиент рассчитывается как  $grad_x B_x = \frac{B_{x2} - B_{x1}}{X}$ , где  $B_{x2}$  и  $B_{x1}$  – значения магнитной индукции в соседних точках наблюдения, а  $X$  – расстояние между ними.

Важным итогом работы должно стать определение условий получения как можно более однородного поля в пространстве, ограниченном геометрией исследуемой ползающей системы. Т.е. дать рекомендации по выбору соотношений геометрических параметров для получения поля с заданной степенью однородности (или неоднородности).

Можно поступить иначе. Правда, это требует больших затрат времени. Выбрав для исследования к-либо объект, используя соотношения, представленные в п.4.2 настоящих МУ, находят теоретически геометрические соотношения, которые бы удовлетворяли критерию однородности поля (степень неоднородности в заданном объеме пространства внутри ползающей системы). Теперь только остается установить эти параметры в поле «Параметры ползающих систем» и проверить правильность Ваших предположений. При несовпадении теории с «практикой» внести коррекцию в установку параметров и добиться желаемых результатов. Сделать выводы, где изложить свое мнение о причинах несовпадения результатов теории и «практики».

В целом же надо сделать общее заключение о самой работе, удобстве исследований, правомочности исследований подобных объектов в виртуальной среде, границы применимости таких исследований.

Положительно будут восприняты предложения по модификации рассматриваемой виртуальной работы по принципу что? и как?

Виртуальная лабораторная работа выполнена, что называется, «с запасом», т.е. содержит такие элементы, которые позволяют моделировать как простые, так и сколько угодно сложные полезающие системы. Поэтому студенту – экспериментатору представляется возможность отойти от шаблона и исследовать построенную им самостоятельно еще никому неизвестную или почти неизвестную полезающую систему. Простор для творчества есть!

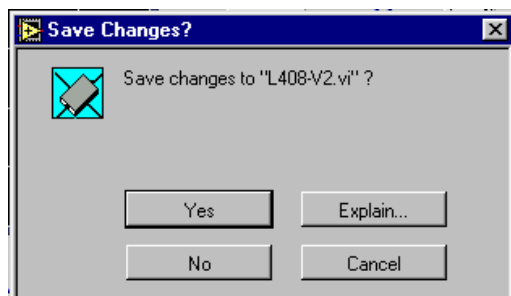


Рис.16

После выполнения пунктов лабораторной работы необходимо завершить работу программы нажатием кнопки «стоп», после чего выйти из программы. При появлении, например, такого окна (рис.16), не сомневаясь нажать **“No”**.

## 7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Титульный лист с указанием названия института, название кафедры, номер и наименование работы, исполнители, дата выполнения работы.

- Цель работы;
- Программа работы;
- Таблицы, графики зависимостей;
- Примеры расчетов;
- Выводы по отдельным пунктам работы.
- Выводы по работе в целом.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЗАДАЮЩИХ СИСТЕМ

Методические указания по подготовке и выполнению лабораторной работы № 407-Vi (Virtual) по курсу «Методы и средства измерений» для студентов специальности 19.09. - Информационно-измерительная техника и технологии

Составитель: Б.Б.Винокуров

Рецензент: В.Ф.Вотяков

Подписано к печати \_\_\_\_\_ Формат 60x84/16. Бумага офсетная №1.  
Печать НISO . Усл. печ. л. \_\_\_ Уч. – изд. л. \_\_\_\_\_ Тираж \_\_\_\_\_ экз. Заказ № \_\_\_  
ИПФ ТПУ. Лицензия №1 от 18.08.94. Типография ТПУ  
634050, Томск, пр. Ленина, 30