

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение**
высшего профессионального образования
<<МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ЛЕСА>>

И.И. Усатов, Ю.П. Царьгородцев, Н.П. Полуэктов, А.П. Саврухин

ИЗУЧЕНИЕ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебно-методического пособия
для студентов технических специальностей МГУЛ

Москва

Издательство Московского государственного университета леса
2013

Разработано для направлений подготовки бакалавров в соответствии с ФГОС ВПО, реализуемых на 1-ом и 2-ом курсах МГУЛ.

Рецензенты: профессор кафедры высшей математики МГУЛ
доктор технических наук О. М. Полещук;
профессор кафедры физики МГУЛ
доктор технических наук Ю.С.Галкин

Работа подготовлена на кафедре физики

Усатов И.И.

К 59 Изучение гистерезиса ферромагнитных материалов: учеб.-методич. пособие / И.И. Усатов, Ю.П. Царьгородцев, Н.П. Полуэктов, -М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2013. - 24 с.

В данном учебно-методическом пособии представлена лабораторная работа по электромагнитным свойствам вещества, в которой рассматриваются свойства ферромагнитных материалов.

.Сборник предназначен для студентов технических специальностей Московского государственного университета леса.

Учебное издание

Усатов Игорь Игоревич
Царьгородцев Юрий Петрович
Полуэктов Николай Павлович
Саврухин Анатолий Петрович

ИЗУЧЕНИЕ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

В авторской редакции. Компьютерный набор и верстка авторов

По тематическому плану внутривузовских изданий учебной и научной литературы на 2013 г.

Подписано в печать 2013. Формат 60x90 1/16. Бумага 80 г/м². Ризография. Усл. печ. л. , . Тираж экз. Заказ № .

Издательство Московского государственного университета леса. 141005, Мытищи-5, Московская обл., 1-я Институтская, 1, МГУЛ. E-mail: izdat@mgul.ac.ru

По Вопросам приобретения литературы издательства ФГБОУ ВПО МГУЛ

обращаться в отдел реализации. Телефон: (498) 687-41-33, E-mail: kurilkina@mgul.ac.ru

© И.И. Усатов, Ю.П. Царьгородцев, Н.П. Полуэктов, А.П. Саврухин 2013 © ФГБОУ ВПО МГУЛ

1. Цель работы. Изучение явления гистерезиса ферромагнитных материалов.

2. Содержание работы. Снятие основной кривой намагничивания и максимальной петли гистерезиса, определение ее параметров.

3. Краткие сведения о явлении гистерезиса ферромагнитных материалов.

Экспериментально установлено, что все вещества в той или иной степени обладают магнитными свойствами. Поэтому сила магнитного взаимодействия между токами изменяется в зависимости от того, в какой среде они находятся. Это означает, что индукция магнитного поля, создаваемого электрическими токами в веществе, отличается от индукции магнитного поля, создаваемого теми же токами в вакууме.

Физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля B в однородной среде отличается по модулю от индукции B_0 магнитного поля в вакууме, называется магнитной проницаемостью μ :

$$\mu = B/B_0.$$

Магнитные свойства веществ определяются магнитными свойствами элементарных частиц (электронов, протонов и нейтронов), входящих в состав атомов. Поскольку магнитные свойства протонов и нейтронов, конкретно это их магнитные моменты, на три порядка слабее магнитных свойств электронов, именно последние определяют магнитные свойства веществ. Именно спиновые поля электронов и магнитные поля, обусловленные их орбитальными движениями в атоме, определяют широкий спектр магнитных свойств веществ.

Слабромагнитные вещества делятся на две большие группы – парамагнетики и диамагнетики. Парамагнитные образцы при внесении во внешнее магнитное поле намагничиваются так, что их собственное магнитное поле оказывается направленным по внешнему полю, а диамагнитные образцы намагничиваются против внешнего поля. Поэтому у парамагнетиков $\mu > 1$, а у диамагнетиков $\mu < 1$. Отличие μ от единицы у пара- и диамагнетиков весьма мало. Будучи помещенными в неоднородное магнитное поле, образцы из пара- и диамагнетика, между полюсами электромагнита, ведут себя по-разному – парамагнетики втягиваются в область сильного поля, а диамагнетики выталкиваются. Пара- и диамагнетизм объясняется поведением электронных орбит во внешнем магнитном поле. Диамагнитными свойствами обладают атомы любых веществ. Однако во многих случаях диамагнетизм атомов маскируется более сильным парамагнитным эффектом.

Вещества, способные сильно намагничиваться в магнитном поле, называются ферромагнетиками. Магнитная проницаемость ферромагнетиков по порядку величины лежит в пределах 10^2 – 10^5 . К группе ферромагнетиков относятся четыре химических элемента: железо, никель, кобальт, гадолиний. Из них наибольшей магнитной проницаемостью обладает железо. Поэтому вся эта группа и получила название ферромагнетиков. В эту группу входят также многочисленные сплавы названных выше некоторых других химических элементов. Ферромагнитные материалы делятся на две большие группы – на магнито-мягкие и магнито-жесткие материалы. Магнито-мягкие ферромагнитные материалы почти полностью размагничиваются, когда

внешнее магнитное поле становится равным нулю. Магнито-жесткие материалы сохраняют в значительной мере свою намагниченность и после удаления их из магнитного поля.

Магнитная индукция B в веществе характеризует результирующее магнитное поле, созданное как внешними по отношению к веществу источниками, так и созданное спиновым и орбитальным движениями электронов в атомах вещества.

Магнитное поле исключительных внешних источников удобно описывать величиной напряженности H . Тогда для однородного изотропного вещества индукция магнитного поля B связана с напряженностью H соотношением $B = \mu\mu_0 H$.

Магнитная проницаемость μ ферромагнетиков не является постоянной величиной; она сильно зависит от внешнего поля, то есть от напряженности H . Типичная зависимость $\mu(H)$ приведена на рис. 1.

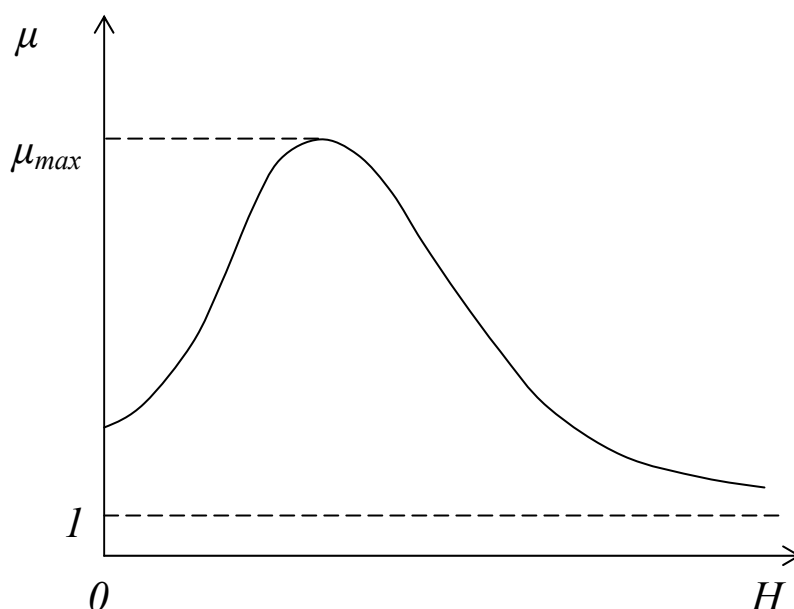


Рис. 1. Зависимость магнитной проницаемости μ ферромагнетиков от напряженности поля.

В таблицах обычно приводятся значения максимальной магнитной проницаемости. Непостоянство магнитной проницаемости приводит к сложной нелинейной зависимости индукции B магнитного поля в ферромагнетике от внешнего магнитного поля. Кривая намагничивания ферромагнетиков называется петлей гистерезиса (запаздывания) в том смысле, что при росте напряженности H магнитного поля уменьшается скорость роста суммарного поля, слагающегося из внешнего магнитного поля и созданного магнетиком в результате его намагничивания. Так называемая предельная петля гистерезиса изображена на рис. 2.

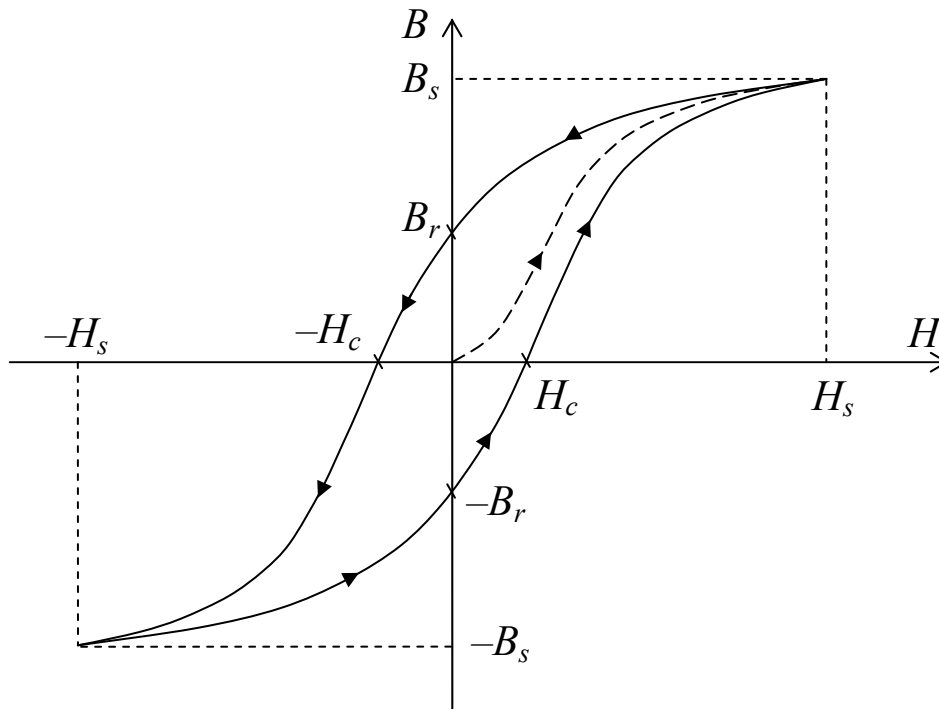


Рис.2. Петля гистерезиса ферромагнетика.

Пунктир – линия первоначального намагничивания; сплошная линия – предельный цикл перемагничивания.

При увеличении напряженности поля H от нуля, полная индукция B поля растёт по линии первоначального намагничивания (пунктирная кривая) с уменьшающейся скоростью до состояния насыщения B_s . Здесь намагниченность образца достигает максимального значения. Если теперь уменьшать напряженность (левая кривая) и довести ее вновь до нулевого значения, то ферромагнетик сохранит остаточную намагниченность – поле внутри образца будет равно B_r . Эта остаточная намагниченность превращает образец в постоянный магнит. Чтобы полностью размагнитить образец, необходимо, изменив знак внешнего поля, довести напряженность до значения $(-H_c)$, которое принято называть коэрцитивной силой. Дальнейшее увеличение по модулю напряженности $(-H_c)$ вновь приведет к насыщению ферромагнетика, но уже с противоположным направлением индукции магнитного поля $(-B_s)$. Дальше процесс перемагничивания продолжается по стрелкам вверх.

У магнито-мягких материалов значения коэрцитивной силы H_c невелико, и петля гистерезиса таких материалов узкая. Материалы с большим значением коэрцитивной силы, то есть имеющие широкую петлю гистерезиса, относятся к магнито-жестким.

Качественно ферромагнетизм объясняется наличием собственных (спиновых) магнитных полей у электронов. В кристаллах ферромагнитных материалов возникают условия, при которых, вследствие сильного взаимодействия спиновых магнитных полей соседних электронов, энергетически выгодной становится их параллельная ориентация. В результате такого взаимодействия внутри кристалла ферромагнетика возникают

самопроизвольно намагниченные области размером порядка 10^{-2} – 10^{-4} см, называемые доменами (рис.3). Каждый домен представляет собой небольшой постоянный магнит, состоящий из 10^4 – 10^5 атомов, магнитные моменты которых ориентированы в одном направлении.

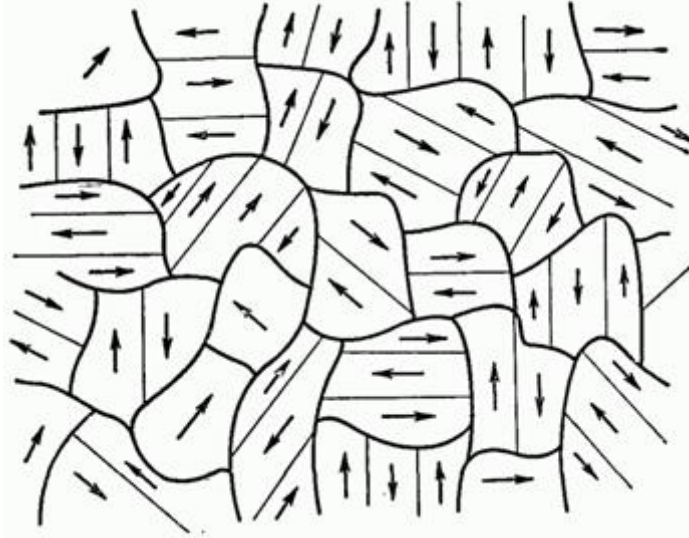


Рис.3. Доменная структура ферромагнетиков в размагниченном состоянии.

Стрелками обозначены магнитные моменты доменов.

4. Описание измерительной установки и методика измерений.

Схема установки приведена на рис. 4.

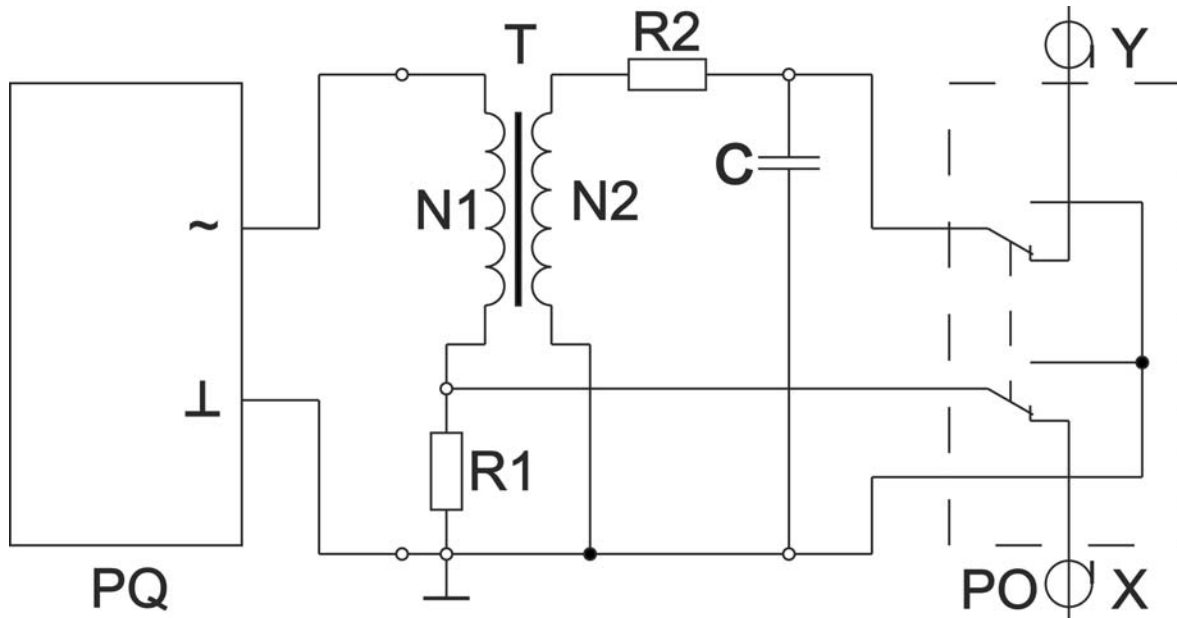


Рис. 4. Электрическая схема измерений.

Исследуемый образец представляет собой ферритовое кольцо прямоугольного сечения размерами: $D=31$ мм – внешний диаметр; $d=18,5$ мм – внутренний диаметр; $h=7$ мм – высота. На кольцо равномерно по длине намотаны две обмотки с одинаковым количеством $N_1=N_2=250$ витков провода.

Таким образом, образец с двумя обмотками представляет собой трансформатор T .

Напряжение на первичную обмотку трансформатора подается с выхода звукового генератора PQ через сопротивление $R_1=0,51$ Ом. А напряжение на этом сопротивлении U_X пропорционально току I_1 , протекающему через первичную обмотку трансформатора

$$U_X = I_1 R_1. \quad (1)$$

Известно, что индукция магнитного поля внутри тороидального (кольцевого) трансформатора связана с током через первичную обмотку соотношением

$$H = N_1 I_1 / \langle l \rangle, \quad (2)$$

где

$$\langle l \rangle = 0.5\pi(D + d) \quad (3)$$

- средняя длина линии напряженности внутри кольца. Комбинируя эти три формулы, получим связь напряженности внутри кольца с напряжением U_X :

$$H = \frac{N_1}{\langle l \rangle R_1} \cdot U_X = K_H U_X, \text{ где} \quad (4)$$

$$K_H = \frac{N_1}{\langle l \rangle R_1} = 6308 \frac{A/m}{B} \quad (5)$$

Переменный ток в первичной обмотке создает в образце переменное магнитное поле и, как следствие, переменный магнитный поток. Он пронизывает все витки вторичной обмотки и по закону электромагнитной индукции наводит в ней ЭДС. Согласно этому, напряжение на вторичной обмотке равно

$$U_2 = N_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (6)$$

где

$$S = 0.5(D - d)h \quad (7)$$

- площадь поперечного сечения кольца (и площадь витков обмоток).

Напряжение U_2 на вторичной обмотке, таким образом, пропорционально не индукции магнитного поля в образце, а ее производной по времени. Для нахождения индукции поля в образце нужно проинтегрировать напряжение на вторичной обмотке. Эту функцию с достаточной точностью выполняет подключенная к вторичной обмотке цепочка $R_2 C$, называемая интегрирующей. Известно, что при выполнении условия $\tau = R_2 \cdot C \gg \nu^{-1}$, где ν – частота переменного напряжения, выполняется также условие $U_{R_2} \gg U_C$. Поэтому можно считать, что $U_2 \approx U_{R_2} = I_2 R_2$. И заряд на конденсаторе C оказывается связан с током во вторичной обмотке трансформатора T соотношением $q = \int I_2 dt = \int (U_2 / R_2) dt = N_2 S B / R_2$. Напряжение на конденсаторе C оказывается пропорциональным индукции магнитного поля B

$$U_Y = U_C = \frac{q}{C} = \frac{N_2 S}{R_2 \cdot C} \cdot B = K_B B, \text{ где} \quad (8)$$

$$K_B = \frac{N_2 S}{R_2 \cdot C} = 1,554 \frac{Tл}{B} \quad (9)$$

Обобщая описание метода измерения, можно сказать, что напряжение U_X на резисторе R_1 пропорционально индукции магнитного поля H в образце с коэффициентом пропорциональности K_H , а напряжение на конденсаторе U_Y пропорционально индукции магнитного поля в образце с коэффициентом пропорциональности K_B . Эти напряжения подаются соответственно на входы горизонтальной (X) и вертикальной (Y) разверток осциллографа через модуль разводки проводов PO .

Представленные соотношения позволяют определить с достаточной точностью магнитные свойства ферромагнитного материала по полученной экранные осциллографа экспериментальной зависимости B от H (петле гистерезиса):

1. индукцию насыщения B_S ;
2. остаточную магнитную индукцию B_r ;
3. коэрцитивную силу H_c ;
4. максимальное значение магнитной проницаемости μ_{max} ;
5. объемную плотность потерь энергии на перемагничивание w , Дж/м³.

5. Приборы для выполнения работы.

1. модуль образца с интегрирующей цепочкой;
2. модуль разводки проводов PO ;
3. генератор звуковых и ультразвуковых частот ГЗ-48;
4. персональный компьютер со встроенной звуковой картой;
5. соединительные провода.

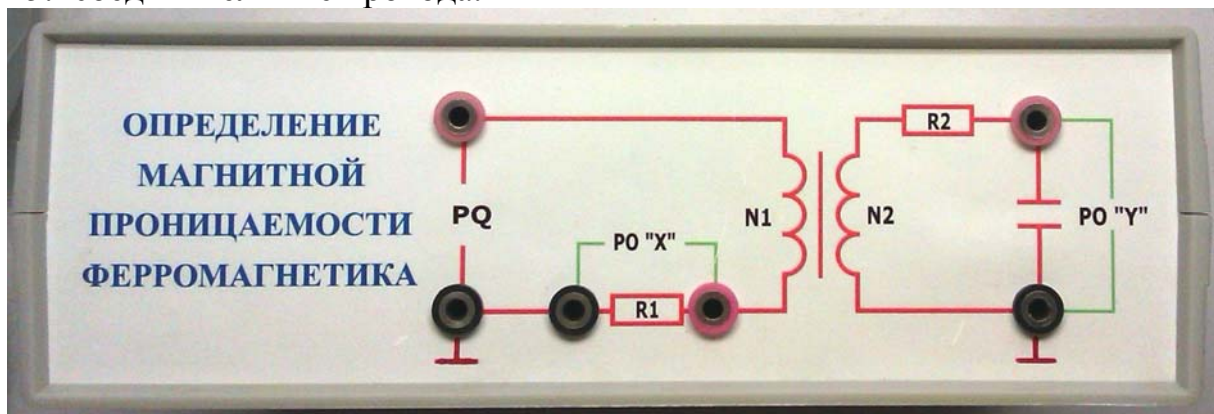


Рис.5. Передняя панель модуля образца

В качестве электронного осциллографа используется персональный компьютер, а указанные сигналы поступают на два входа его звуковой карты. Звуковая карта в своем составе имеет пару аналого-цифровых преобразователей, преобразующих напряжения U_X и U_Y в цифровой код. Весь процесс управления экспериментом, визуализации данных и их сохранения контролирует программа *gister.exe*. Графический интерфейс программы представлен на рис. 6.

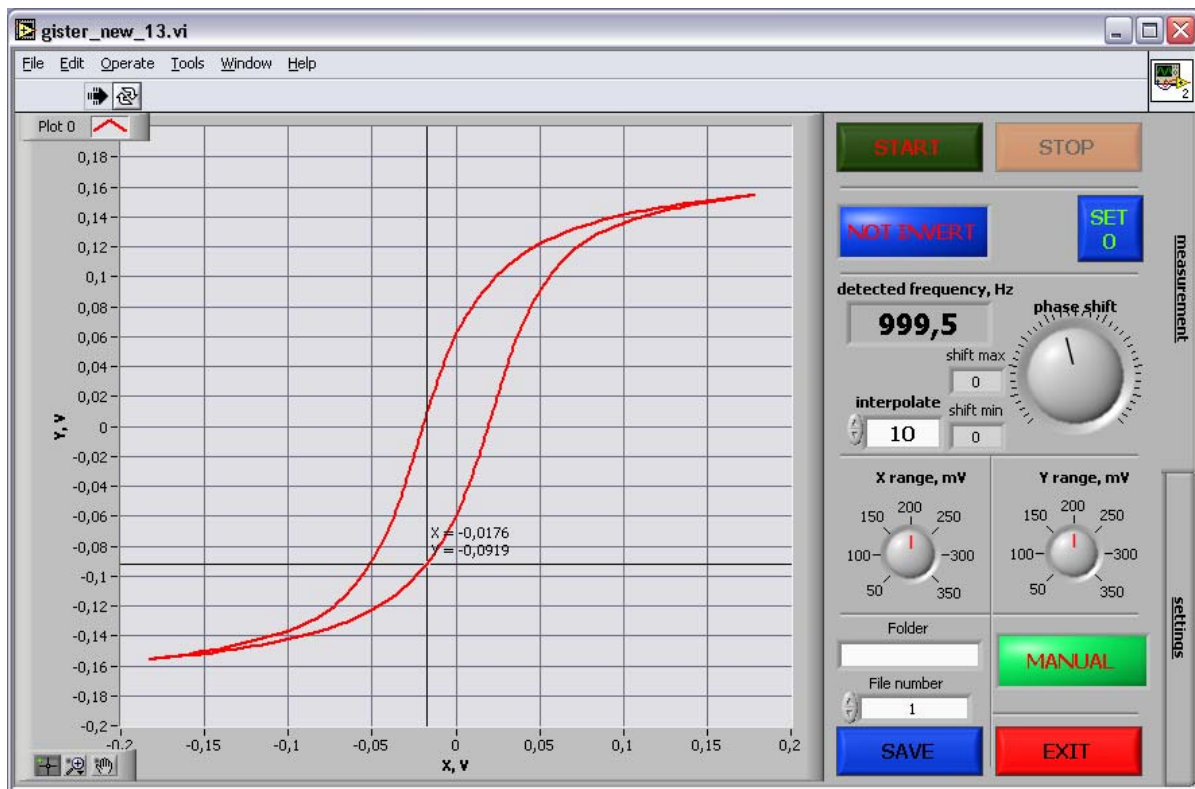


Рис.6. Интерфейс программы *gister.exe* в режиме «Измерение».

На графической панели – предельная (с насыщением) петля гистерезиса и курсор с координатами точки.

№	Элемент	управ индик	Функция
1.	START	кнопка	запускает программу
2.	STOP	кнопка	останавливает программу
3.	NOT INVERT	кнопка	меняет местами X и Y входы (INVERT)
4.	SET 0	кнопка	установка нуля входов X и Y
5.	detected frequency	индик	индикатор измеренной частоты
6.	shift max(min)	индик	индикаторы сдвига фазы по максимумам (минимумам) сигнала каналов X и Y
7.	phase shift	регулят	коррекция сдвига фазы по входам X и Y
8.	interpolate	перекл	число точек интерполяции графика
9.	X (Y) range	перекл	регулировка масштаба по осям X и Y ^(п.1)
10.	folder	строка ввода	сюда вводится имя папки для сохраняемых данных ^(п.2)
11.	MANUAL	кнопка	переключатель способа регулировки масштаба по осям X и Y ^(п.1)
12.	File number	перекл	номер записываемого файла ^(п.3) .
13.	SAVE	кнопка	сохраняет файл ^(п.2)
14.	EXIT	кнопка	закрывает программу

Интерфейс состоит из графической панели (слева) и панели управления (справа). Панель управления имеет две вкладки «measurement» (измерение) и «settings» (настройки). Последняя применяется для системных установок и в работе не используется. Функции кнопок и индикаторов представлены в таблице.

Примечания.

1. Если кнопка в состоянии «MANUAL», то масштаб по осям можно регулировать переключателем «X (Y) range». Если кнопка в состоянии «АUTOMATIC», то масштаб устанавливается автоматически и не регулируется.
2. В строку «folder» необходимо ввести инициалы студентов, выполняющих данную работу. При этом будет создана папка с данным именем, в которую будут сохраняться измеренные данные. Если строку оставить пустой, то будет выдано сообщение об ошибке и данные не сохранятся. К папке данных можно перейти по ярлыку SAVES на рабочем столе компьютера.
3. При сохранение в папку с данными каждый раз записывается файл, имя которого имеет формат: {дата}_{_}{номер}{.dat}. Номер соответствует значению элемента управления «File number».

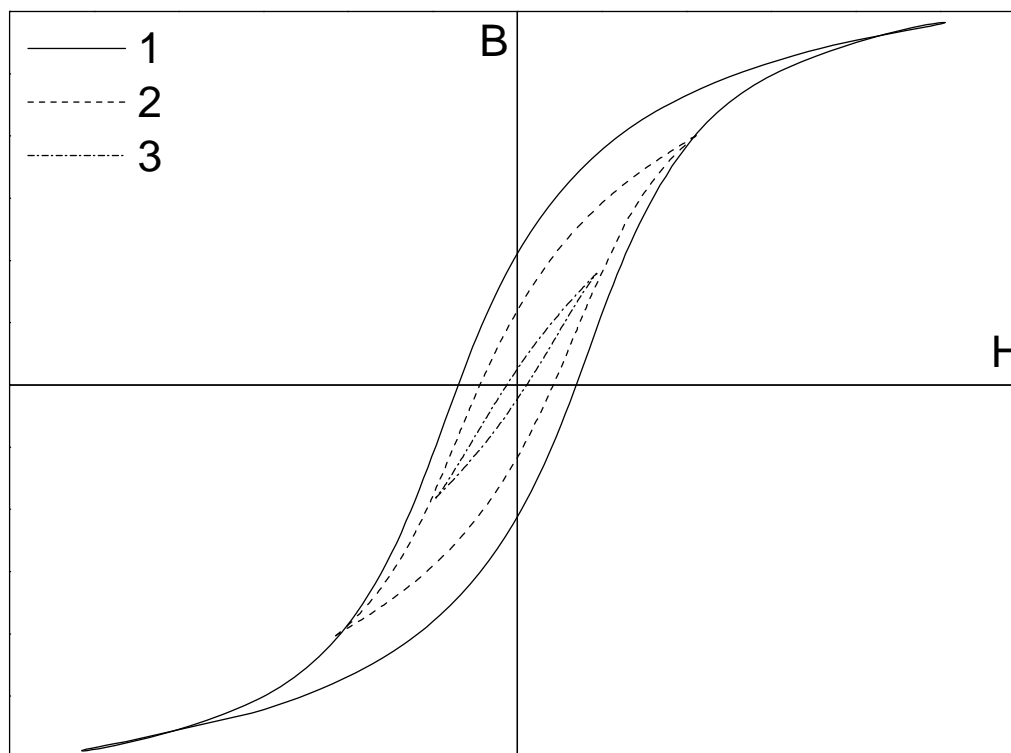


Рис.7. Семейство петель гистерезиса.

1 – предельная (с насыщением); 2 и 3 – неопределенные (без насыщения).

6. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений.

Задание 1. Построение основной кривой намагничивания.

- 1.1. Ознакомившись с описанием установки и методом измерения, проверить соединение приборов в соответствии со схемой, изображенной на рис. 4.
- 1.2. Подготовить приборы к работе. Установить следующие параметры выходного сигнала генератора: форма сигнала – синусоидальная, частота сигнала в диапазоне – 0.8 – 1.1 кГц, выходное напряжение - 0 В.
- 1.3. Включить генератор, запустить программу *gister.exe* (ярлык на Рабочем столе) и развернуть интерфейс программы на весь экран. Запустить измерения кнопкой «START».
- 1.4. Произвести калибровку нулей АЦП. Для этого на модуле разводки проводов *PO* переключатель перевести в положение «Калибр. 0», нажать кнопку «SET 0» и вернуть переключатель в положение «Измерение».
- 1.5. Увеличивая выходное напряжение генератора, получить в графическом окне предельную петлю гистерезиса (кривая 1 на рис.7).
- 1.6. Регулировкой масштаба по осям X и Y « X (Y) range» развернуть график на все графическое окно.
- 1.7. Остановить измерения кнопкой «STOP». При помощи курсора снять X и Y координаты верхней правой вершины. Эти координаты равны напряжениям на соответствующих входах: $X=U_x$; $Y=U_y$. Занесите значения напряжений в таблицу.

№ петли	$U_x, В$	$K_H, А/(м·В)$	$H, А/м$	$U_y, В$	$K_B, Тл/В$	$B, Тл$
1		6308			1,554	
2						
3						
4						
5						
6						
7						

- 1.8. Запустить измерения кнопкой «START».
- 1.9. Уменьшая величину выходного напряжения, получить семейство петель гистерезиса (см. рис. 7) – не менее 7 петель. Для каждой петли снять координаты X и Y ее вершины, повторяя пункты 1.6–1.8.
- 1.10. Используя коэффициенты пересчета K_H и K_B , рассчитать значения H и B вершин каждой петли гистерезиса и записать их в таблицу.
- 1.11. По полученным данным построить кривую намагничивания для данного образца $B=f(H)$ (пунктирная кривая на рисунке 2). График строить в EXCEL.

Задание 2. Изучение максимальной петли гистерезиса.

Цель опыта – определение характерных точек петли гистерезиса образца (см. рис.2) на частоте 1 кГц:

- B_S - индукции насыщения, Тл
 H_S - напряженности насыщения, А/м

- B_r - остаточной индукции, Тл
 H_C - коэрцитивной силы, А/м
 μ_{max} - максимальной магнитной проницаемости

- 2.1. Получить в графическом окне максимальную петлю гистерезиса (кривая 1 на рис. 5), повторив пункты 1.5 и 1.6 (если вы не выполняли *Задание 1*, то необходимо выполнить пункты 1.1 – 1.6).
- 2.2. Остановить измерения кнопкой «STOP». При помощи курсора снять нужные координаты характерных точек петли. Эти координаты равны напряжениям на входах: $X=U_x$; $Y=U_y$. Занесите значения напряжений в таблицу, колонки 3 и 4.

парам	K	положитель н	отрицатель н	среднее	значение
		U_+ , Вольт	U_- , Вольт	$0,5(U_+ - U_-)$	В или Н
B_S	1,554 Тл/В				
H_S	6308 А/(м·В)				
B_r	1,554 Тл/В				
H_C	6308 А/(м·В)				

- 2.3. Рассчитать среднее значение напряжений и занести в 5 колонку. Умножая средние значения напряжения на соответствующий коэффициент пересчета K , вычислить значения магнитного поля B или H в характерных точках петли.
- 2.4. Максимальное значение магнитной проницаемости среды определить следующим образом. Учитывая связь индукции магнитного поля с напряженностью

$$dB = \mu\mu_0 dH, \quad (10)$$

выражаем магнитную проницаемость

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{dB}{dH} \right). \quad (11)$$

Таким образом, магнитная проницаемость образца пропорциональна производной индукции по напряженности. Далее, произвести следующие действия.

2.4.1. Записать файл данных предельной петли гистерезиса (в строку «Folder» ввести инициалы всех исполнителей работы и нажать кнопку «SAVE»).

2.4.2. Открыть приложение EXCEL.

2.4.3. Открыть файл: «Файл»→»Открыть». В открывшемся окне выбрать «Рабочий стол», войти в ярлык «SAVES», в котором найти папку с вашими инициалами. Во вкладке «Тип файла:» выбрать «Все файлы». В появившемся списке ваших файлов выбрать файл. В появившемся окне «Мастер импорт» выбрать «Готово».

2.4.4. Пересчитать вольты в значения H и B : первый столбец (U_X) и второй столбец (U_Y) умножить соответственно на K_H и K_B . Таким образом, в первом столбце окажутся значения H , а во втором B .

2.4.5. Произвести численное дифференцирование, заноса данные в третий столбец:

$$\frac{dB}{dH} \approx \left(\frac{\Delta B}{\Delta H} \right)_i = \frac{B_{i+1} - B_i}{H_{i+1} - H_i}, \quad i \in [1, N-1], \quad (12)$$

где N – число строк таблицы. Для этого в первую ячейку пустой колонки введите формулу $(B_2 - B_1)/(H_2 - H_1)$ и растяните формулу до предпоследней строки. **Напоминаем, что обозначения H и B относятся к физическим величинам, а не к именам колонок!**

2.4.6. Построить график производной от напряженности поля и предъявить его преподавателю.

2.4.7. Определить максимальное значение производной, используя функцию *МАКС* для третьего столбца (эта функция в категории *Статистические*).

2.4.8. По формуле (11) рассчитать максимальное значение магнитной проницаемости образца.

Задание 3. Определение потерь на перемагничивание ферромагнетика

Известно, что площадь внутри петли гистерезиса равна энергии, затраченной на перемагничивания 1 м^3 ферромагнетика за один цикл:

$$\oint B dH = \frac{W}{V}, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \quad (13)$$

Таким образом, определение потерь на перемагничивание сводится к расчету площади петли.

Внимание! Для студентов, уже выполнивших *Задание 2*, данное *Задание* выполнять, начиная с пункта 3.7.

- 3.1. Получить в графическом окне максимальную петлю гистерезиса (кривая 1 на рис. 5), выполнив пункты пункты 1.1 – 1.6.
- 3.2. Остановить измерения кнопкой «STOP».
- 3.3. Записать файл данных предельной петли гистерезиса: в строку «Folder» ввести инициалы всех исполнителей работы и нажать кнопку «SAVE».
- 3.4. Открыть приложение EXCEL.
- 3.5. Открыть файл: «Файл»→»Открыть». В открывшемся окне выбрать «Рабочий стол», войти в ярлык «SAVES», в котором найти папку с вашими инициалами. Во вкладке «Тип файла:» выбрать «Все файлы». В появившемся списке ваших файлов выбрать файл. В появившемся окне «Мастер импорт» выбрать «Готово».
- 3.6. Пересчитать вольты в значения H и B : первый столбец (U_X) и второй столбец (U_Y) умножить соответственно на K_H и K_B . Таким образом, в первом столбце окажутся значения H , а во втором B .

- 3.7. Произвести интегрирование зависимости $B(H)$. Известно, что графическим представлением интеграла является площадь под графиком данной функции (см. рис. 8).

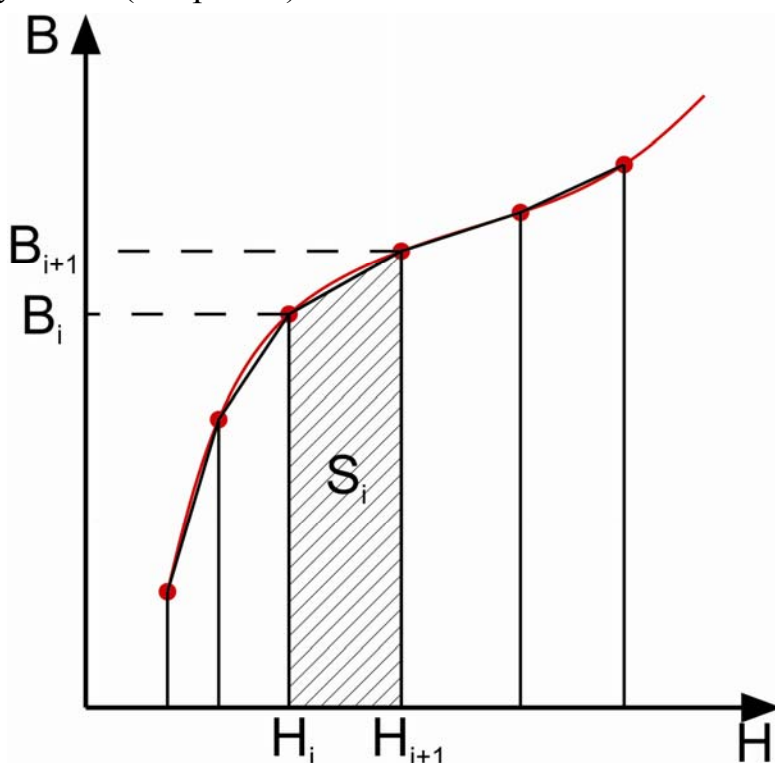


Рис.8. Участок графика с разбиением его площади на трапеции.

График функции в численном виде представлен точками с координатами (H_i, B_i) . Площадь под всем графиком приблизительно равна сумме площадей трапеций S_i , построенных между соседними точками. Поэтому интеграл функции может быть вычислен по формуле

$$S = S_1 + \dots + S_{N-1} = \frac{B_1 + B_2}{2} (H_2 - H_1) + \dots + \frac{B_{N-1} + B_N}{2} (H_N - H_{N-1}) \quad (14)$$

или в компактном виде

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} S_i = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{B_i + B_{i+1}}{2} (H_{i+1} - H_i). \quad (15)$$

Для вычисления интеграла в первую ячейку пустой колонки введите формулу $0,5 * (B_1 + B_2) * (H_2 - H_1)$ и растяните формулу до предпоследней строки. **Напоминаем, что обозначения H и B относятся к физическим величинам, а не к именам колонок!**

Затем просуммируйте получившиеся значения в столбце функцией СУММ (эта функция в категории *Математические*).

- 3.8. Полученное значение интеграла будет отрицательным из-за неоднозначности функции петли $B=B(H)$. Необходимо взять его по модулю. Таким образом, вы определили потери энергии на перемагничивание за один цикл для ферромагнетика единичного объема. На том же листе необходимо для отчета построить график предельной

петли гистерезиса.

7. Контрольные вопросы

1. Покажите вид основной кривой намагничивания $B = f(H)$ и графика зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля $\mu = f(H)$ для ферромагнетиков.
2. Какой вид имеет основная кривая намагничивания ферромагнетика?
3. Назовите характерные свойства ферромагнетиков и особенности их намагничивания.
4. От каких величин зависит: а) напряженность H магнитного поля сердечника; б) индукция B магнитного поля ферромагнитного сердечника; в) магнитная проницаемость μ сердечника тороида?
5. Какие измеряемые величины и какие формулы используют для определения следующих величин: а) напряженности H магнитного поля в сердечнике; б) магнитной индукции насыщения B_S ?
6. Укажите способ включения и назначение следующих элементов:
а) сопротивления R_1 в цепи первичной обмотки; б) интегратора в цепи вторичной обмотки.
7. Назовите величины, пропорционально которым изменяются значения напряжений U_x и U_y .

8. Литература

1. Савельев И.В. Курс физики, кн.2. Электричество и магнетизм. – М.: Высшая школа, 2003. – §§ 7.7, 7.8, 7.9.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2003. – §§ 131, 132, 133, 135, 136.