

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

**ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА
В ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ**

Методические указания к лабораторной работе № 19
по курсу «Физика»

Екатеринбург
УрФУ
2018

УДК 537.67(076.5)

Составители: А.Ф.Ермаков, А.Ю.Бункин, О.В.Михалева

Научный редактор – канд. физ.-мат. наук, доцент А.Г.Волков

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА В ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ: Методические указания к лабораторной работе №19 по физике/ сост. А.Ф. Ермаков, А.Ю.Бункин, О.В.Михалева – Екатеринбург : УрФУ, 2018. – 25 с.

В методических указаниях описаны основные свойства ферромагнитных материалов, кратко рассмотрена природа ферромагнетизма. Изложен метод исследования зависимостей магнитной проницаемости от величины намагничивающего поля и от температуры. Приведены описание экспериментальной установки, электрические схемы, порядок выполнения работы и расчетов. Продемонстрированы пример входного теста и ответа на него. Дана форма отчета.

Указания предназначены для студентов всех технических специальностей всех форм обучения.

Табл. 2. Рис.7. Прил. 2.

Подготовлено кафедрой физики

© Уральский федеральный университет, 2018

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА В ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Введение. Применения магнетизма в наши дни столь обширны и разнообразны, что делают физику магнитных явлений одним из важнейших разделов естествознания, имеющим большие практические применения в ведущих отраслях современной техники. Универсальность магнетизма открыла широкие возможности для его применений в технике. Во-первых, на основе изучения магнитных свойств вещества можно создавать технические магнитные материалы, играющие важнейшую роль в современной энергетике, электротехнике, радиотехнике, радиоэлектронике и т. п. Во-вторых, используя «информационный» аспект магнетизма, можно, измеряя магнитные характеристики, получить детальные сведения о других физических свойствах тел, которые зачастую оказываются труднодоступными для непосредственного изучения. Это «информационное» использование магнитных измерений положено в основу широко применяемых в технике методов магнитно-структурного анализа и магнитной дефектоскопии, важнейших неповреждающих методов контроля качества промышленной продукции [1].

Некоторые вопросы теории. Магнетизм можно определить как особую форму материальных взаимодействий, возникающих между движущимися, электрически заряженными частицами. Передача магнитного взаимодействия, реализующая связь между пространственно разделенными материальными объектами, осуществляется особым материальным носителем — магнитным полем. Источником магнитного поля является движущийся электрический заряд, т. е. электрический ток. В атомных масштабах для электронов и нуклонов имеются два типа микроскопических токов — орбитальные, связанные с переносным движением центров тяжести этих частиц, и спиновые, связанные с внутренними степенями свободы их движения.

Количественной характеристикой магнетизма частицы является так называемый магнитный момент \mathbf{p}_m . В случае элементарного замкнутого контура, в котором течет ток силой I , величина вектора магнитного момента \mathbf{p}_m равна произведению силы тока на площадь

S контура: $\mathbf{p}_m = \mathbf{IS}$. Направление вектора магнитного момента \mathbf{p}_m определяется правилом буравчика (правого винта). Поскольку все микроструктурные элементы веществ — электроны, протоны и нейтроны — элементарные носители магнитного момента, то и любые их комбинации, т. е. атомы, молекулы и макроскопические тела, в принципе являются источниками магнетизма. Сложность атомной структуры веществ, построенных из огромного числа атомов, приводит к практически неисчерпаемому разнообразию их магнитных свойств.

Магнитные свойства присущи всем веществам, т. е. все они магнетики. Внешнее магнитное поле оказывает влияние на эти атомные орбитальные и спиновые токи (моменты). Известны два основных эффекта внешнего магнитного поля. Во-первых, диамагнитный эффект, являющийся следствием закона индукции Фарадея. По правилу Ленца магнитное поле всегда создает такой индукционный ток, магнитное поле которого направлено против изменения начального поля. Поэтому создаваемый внешним полем диамагнитный момент всегда отрицателен по отношению к этому полю. Во-вторых, если в атоме существует результирующий отличный от нуля магнитный момент (спиновый, орбитальный или оба), то внешнее поле будет стремиться ориентировать этот собственный атомный магнитный момент вдоль своего направления. В результате возникает параллельный полю положительный момент, который называют парамагнитным. Из-за универсальности диамагнитного эффекта все вещества обладают диамагнетизмом. Однако фактически диамагнетизм наблюдается далеко не у всех веществ. Это объясняется тем, что во многих случаях диамагнитный эффект перекрывается более сильным парамагнитным эффектом. Таким образом, в веществах, называемых парамагнетиками, мы фактически всегда наблюдаем разностный магнитный эффект между преобладающим парамагнетизмом и меньшим диамагнетизмом [1].

Хаотическое тепловое движение атомов всегда стремится разрушить упорядоченное расположение атомных магнитных моментов. Магнитное поле, например, в случае парамагнитного эффекта будет производить тем большее упорядочивающее действие, чем больше абсолютная величина энергии атомного момента в поле (пропорциональная, как известно, произведению атомного магнитного момента \mathbf{p}_m на напряженность магнитного поля H) по сравнению со средней тепловой энергией kT (k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура). Следовательно, магнитная восприимчивость парамагнетика обратно

пропорциональна температуре.

Существенное влияние на магнитные свойства вещества может оказать также внутреннее взаимодействие между атомными магнитными моментами. Так, ферромагнетиками называются вещества, атомные магнитные моменты расположены параллельно друг другу, а антиферромагнетиками, вещества, атомные моменты которых, расположены антипараллельно, например, в шахматном порядке [1].

Магнитная индукция B и напряженность магнитного поля H у ферромагнетиков неоднозначно связаны друг с другом: индукция B зависит не только от напряженности магнитного поля H , но и от «истории» образца. Связь между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля типичного ферромагнетика иллюстрирует рис. 1.

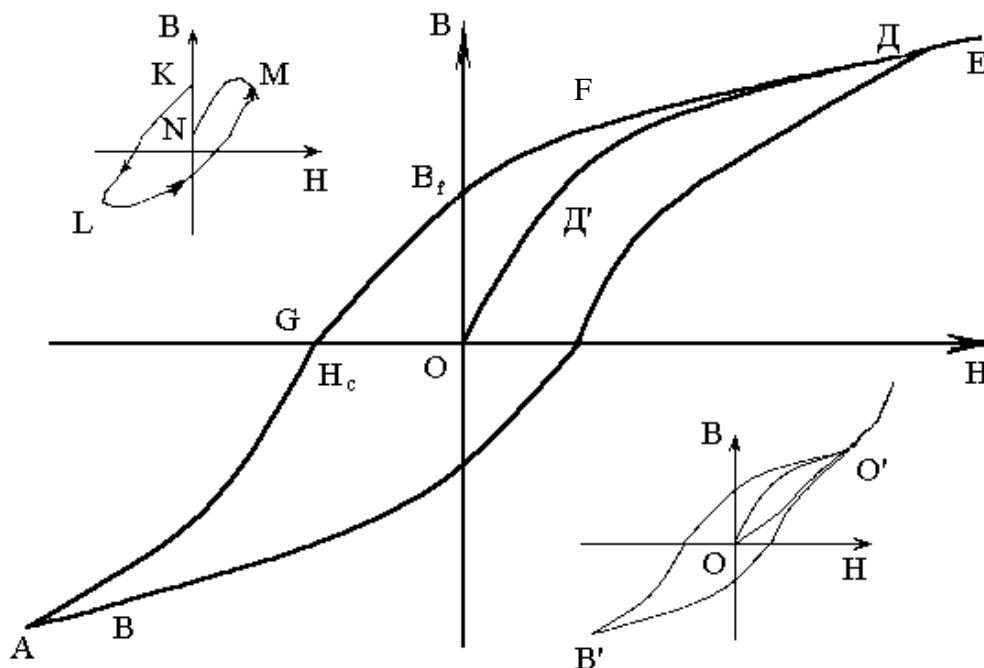


Рис. 1. Кривые гистерезиса. Центр рисунка — предельный цикл гистерезиса, в левом верхнем и правом нижнем углу - частные циклы (незамкнутый и замкнутый).

Если прикладывать магнитное поле к размагниченному образцу (т.О), то его намагничивание следует кривой $ODDE$, выходящей из начала координат. Эту кривую называют основной кривой намагничивания. Индукция B в образце состоит из индукции, связанной с внешним намагничивающим полем H , и индукции, создаваемой самим намагниченым образцом.

Для индукции в веществе можно записать формулу в виде

$$B = \mu_0 (H + J), \text{ где}$$

J - намагниченность - магнитный момент единичного объема вещества, μ_0 - магнитная постоянная, равная в системе СИ - $4\pi * 10^{-7}$ Гн/м.

Магнитной проницаемостью μ называют либо отношение B/H , либо производную B по H ; в первом случае говорят о полной, а во втором - о дифференциальной магнитной проницаемости вещества:

$$\mu_{\text{полн}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B}{H}, \quad \mu_{\text{диф}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH};$$

Магнитная проницаемость ферромагнетиков зависит от поля и, следовательно, начальной магнитной проницаемостью называется величина μ , измеренная при небольших H .

Кривая намагничивания $OD'DE$, изображающая зависимость $B(H)$, практически совпадает с зависимостью $J(H)$, поскольку второй член в этом выражении в обычном диапазоне изменения полей существенно превосходит первый. В точке E намагниченность J достигает насыщения, и дальнейшее медленное увеличение индукции происходит, в основном, вследствие роста H . При небольших H магнитная проницаемость (наклон кривой $OD'DE$) - возрастает, достигает максимума и затем уменьшается (насыщение), постепенно приближаясь к единице при очень больших полях, когда первый член в этом выражении становится больше второго. У металлических ферромагнетиков насыщение наступает в диапазоне 1,5—2,5 Тл. Намагничивание образца происходит до насыщения - до точки E . При уменьшении напряженности магнитного поля H состояния образца характеризуются точками, лежащими на кривой EDF , и при нулевом поле образец имеет ненулевую индукцию B_r (остаточная индукция). Величина остаточной индукции сильно зависит от состава и термообработки ферромагнетика. У магнитно-жестких образцов, из которых изготавливаются постоянные магниты, B_r может мало отличаться от индукции насыщения. Чтобы привести к нулю магнитную индукцию B_r в образце, т. е. перевести его в точку G , необходимо приложить «обратное» магнитное поле. Величина этого поля H_c носит название коэрцитивной силы. У магнитно-жестких образцов H_c превосходит 10^3 А/м, а магнитно-мягкие материалы обладают небольшой коэрцитивной силой. Замкнутая кривая $EDFGVABCDE$, возникающая при циклическом перемагничивании образца, называется предельной петлей гистерезиса. Площадь петли

гистерезиса $\oint HdB$ выражает работу, совершаемую внешним телом при перемагничивании единицы объема образца. Эта работа полностью переходит в теплоту, так что при перемагничивании образец нагревается. Если поместить образец в небольшое переменное магнитное поле, не способное довести его до насыщения, то кривая, характеризующая изменение B в зависимости от H , имеет сложный вид и, вообще говоря, не является замкнутой (кривая KLMN в верхнем левом углу рис. 1). Она является одной из бесчисленных частных петель или частных циклов гистерезиса. При длительном перемагничивании в поле, обладающем постоянной частотой и амплитудой, эти кривые постепенно приобретают замкнутую форму, например, форму кривой $B'O'$ (правый нижний угол рисунка). Такие кривые также носят название частных циклов. Предельный цикл получается из частного при достаточно большой амплитуде напряженности магнитного поля. Форма кривых, изображающих как частные циклы, так и предельный цикл, зависит от частоты переменного магнитного поля.

В отсутствие внешнего магнитного поля ферромагнитный образец разбит на домены – области однородной намагниченности. В простейшем случае доменная структура представляет собой чередующиеся слои с взаимно противоположным направлением намагниченности. Образование доменов - результат конкуренции двух типов взаимодействия: обменного и магнитного. Первое - ближкодействующее, оно стремится установить магнитные моменты параллельно и ответственно за однородную намагниченность в домене. Второе, дальнедействующее, ориентирует антипараллельно векторы намагниченности соседних доменов. В ферромагнетиках существуют силы, которые приводят к тому, что механические, а вместе с ними и магнитные моменты соседних атомов ориентируются параллельно друг другу. Эти силы имеют квантово-механическую природу и не имеют классического аналога. Они носят название обменных сил. Вещества, у которых соседние атомные магнитные моменты ориентируются в противоположные стороны, называются антиферромагнетиками.

Типичная зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля представлена на рис.2. Для ферромагнетиков характерна нелинейная зависимость индукции B от напряженности поля H и четко выраженный максимум для магнитной проницаемости.

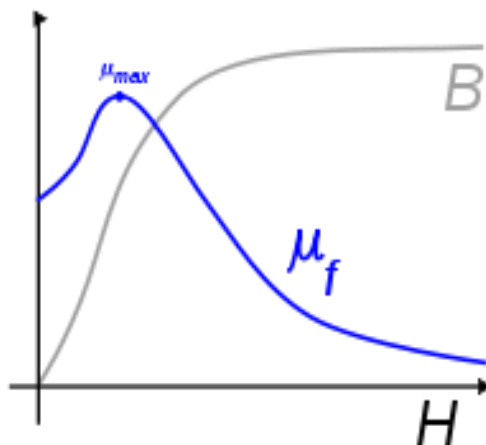


Рис.2. Типичные зависимости магнитной проницаемости μ_f и индукции поля B от напряженности H .

Тепловое движение препятствует действию обменных сил. Поэтому ферромагнитные вещества при высоких температурах теряют свои ферромагнитные свойства и превращаются в обычные парамагнетики. Переход из ферро - в парамагнитное состояние происходит резко при определенной для каждого вещества температуре, которая носит название температуры Кюри T_K . При температуре равной или выше T_K . интенсивное тепловое движение ионов, находящихся в узлах кристаллической решетки, начинает изменять параметры этой решетки. В результате разрушается спонтанная намагниченность, домены перестают существовать, и материал переходит из ферромагнитного состояния в парамагнитное. При этом магнитная проницаемость материала μ приблизится к единице (рис.3).

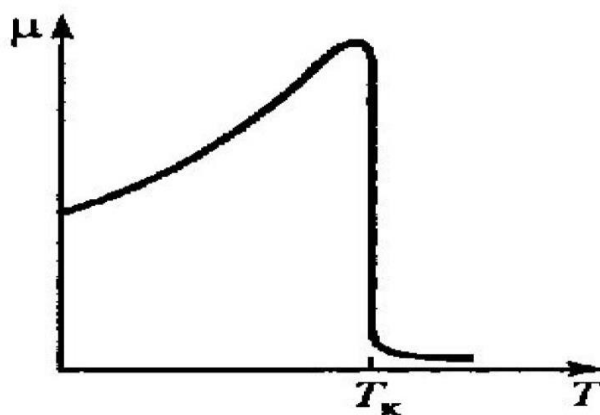


Рис. 3. Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетиков от температуры

Для парамагнитных веществ, которые при понижении температуры становятся ферромагнитными, формула

$$\chi \sim 1/T$$

должна быть видоизменена. Эта формула показывает, что температура $T = 0$ является особой точкой температурной кривой, в которой χ неограниченно возрастает. При $T \rightarrow 0$ тепловое движение не препятствует магнитным моментам атомов ориентироваться в одном направлении при сколь угодно слабом внешнем поле. В ферромагнетиках под влиянием обменных сил это происходит при понижении температуры не до абсолютного нуля, а до температуры Кюри. Поэтому у ферромагнетиков закон Кюри должен быть заменен законом Кюри — Вейсса:

$$\chi \sim 1/(T - T_K)$$

где T_K — температура Кюри. Эта формула справедлива при $T > T_K$. К примеру, среди элементов таблицы Менделеева ферромагнитны 3d-переходные элементы Fe ($T_K = 1043$ К; $J_s = 1735$ Гс), Co ($T_K = 1403$ К; $J_s = 1445$ Гс), Ni ($T_K = 631$ К; $J_s = 508.8$ Гс); или их сплавы (Fe₃Al ($T_K = 743$ К), Ni₃Mn ($T_K = 773$ К)).

ВЫВОД РАСЧЕТНЫХ ФОРМУЛ

Электрическая схема модуля «Ферромагнетик» приведена на рис 4. Источник переменного напряжения подключается к точкам 2 и 4 схемы.

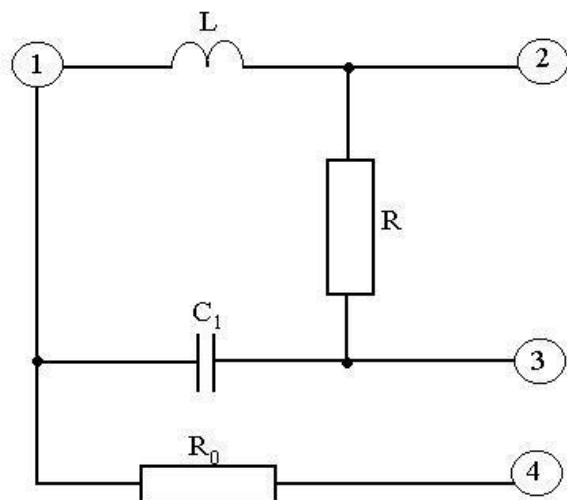


Рис. 4. Электрическая схема модуля «Ферромагнетик»: L - исследуемая катушка с ферритовым сердечником, R- резистор; R₀ - токозадающий резистор; C₁ - конденсатор

Чтобы определить индуктивность катушки, воспользуемся тем, что сила тока, текущего и по катушке, и по резистору R₀, одинакова, т.к. они соединены последовательно. По закону Ома действующее значение силы тока в резисторе R₀ определяется как $I = U_R / R_0$, силы тока в катушке $I = U_L / \omega L$ (здесь ω – циклическая частота переменного тока). Приравняв правые части этих соотношений, получаем формулу для расчета индуктивности:

$$L = R_0 U_L / \omega U_R \quad (1)$$

Индуктивность тороидальной катушки определяется [2] соотношением

$$L = \mu \mu_0 S n^2 l, \text{ где} \quad (2)$$

S – площадь сечения,
 l – длина средней линии катушки,
 n – плотность намотки, т.е. число витков на единицу длины,
 μ_0 – магнитная постоянная ($4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м.),
 μ – относительная магнитная проницаемость вещества сердечника.

Следовательно, формула для расчета магнитной проницаемости будет иметь вид

$$\mu = \frac{L_b}{\mu_0 S N^2}, \text{ где} \quad (3)$$

N – число витков катушки, l_m – длина магнитной линии.

Наконец, напряженность магнитного поля в катушке с замкнутым сердечником определяется [2] соотношением

$$H = nI \quad (4)$$

Поэтому для получения зависимости магнитной проницаемости в переменном поле от амплитуды H_m напряженности магнитного поля последняя рассчитывается по формуле

$$H_m = N \frac{I_m}{H_m} = N \frac{U_{Rm}}{R_0 I_m} = \sqrt{2} \frac{NU_R}{R_0} I_m \quad (5)$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Лабораторная работа выполняется при помощи установки ЛТК-3. Комплекс включает в себя: измерительную систему ИСТ-2 (рис.5), печь-термостат и модуль «ферромагнетик» (рис.6).

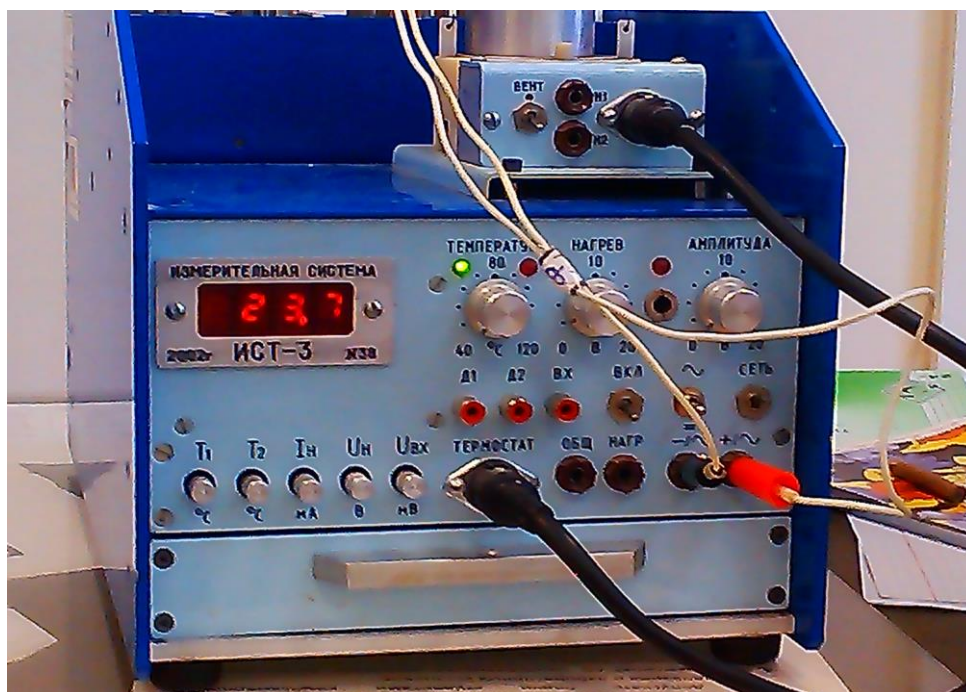


Рис.5. Измерительная система с печью – термостатом



Рис. 6. Модуль «Ферромагнетик»

4. Соберите электрическую схему при помощи жгута проводов:
 - а) подключите источник питания (- / ~) к модулю «Ф» (контакты 2 и 4);
5. б) этим же жгутом подключите источник питания (- / ~) к **левому** мультиметру (контакты «com» и «VΩmA») Этот мультиметр измеряет напряжение на резисторе R₀.;
 - в) установите переключатель режимов мультиметра в положение «200 ACV».
 - г) подключите **измерительные провода** к **правому** мультиметру и установите переключатель режимов этого мультиметра в положение «200 ACV». Этот мультиметр измеряет напряжение на катушке L.
6. Переключите тумблер (~/=) в положение ~ (измерения проводятся на переменном токе).
7. Включите тумблер «Сеть».
8. Рукояткой «Амплитуда» установите выходное напряжение 1 В (контроль – по левому мультиметру).
9. Щупами правого мультиметра измерьте напряжение на резисторе R₀ (контакты 1-4) и на индуктивности L (контакты 1 – 2). Результаты занесите в таблицу 1 Вашего отчета.
10. Увеличивайте выходное напряжение рукояткой «Амплитуда» с шагом примерно 1,5 В до 14 В, измеряя напряжения на резисторе и индуктивности, заносите результаты в таблицу 1 Вашего отчета.
11. Для каждого из результатов измерений рассчитайте индуктивность катушки и магнитную проницаемость по формулам:

$$L=R_0U_L/(\omega U_R);$$

$$\mu=LI_M/(\mu_0SN^2);$$

12. Результаты расчетов занесите в таблицу 1 Вашего отчета.
13. Рассчитайте напряженность магнитного поля по формуле:

$$H_m = \sqrt{2} \frac{NU_R}{R_0} l_m$$

Рассчитанные значения занесите в таблицу 1.

По полученным данным из таблицы постройте на миллиметровой бумаге или при помощи компьютера график зависимости магнитной проницаемости в переменном поле от амплитуды H_m напряженности магнитного поля и сделайте соответствующие выводы.

ЗАДАЧА 2. ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРОМАГНЕТИКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.

Порядок выполнения измерений:

1. Установите ручки всех регуляторов на панели измерительной системы в положение «0», включите тумблер «Сеть».
2. Установите рукояткой «Амплитуда» амплитуду выходного сигнала источника питания равной 2 В. Контроль – по левому мультиметру.
3. Нажмите кнопку T_1 (индикатор ИСТ-3 покажет температуру в модуле «Ф»), включите тумблер «Нагрев» и переведите регулятор температуры в положение «10».
4. Снимите зависимость напряжений U_L и U_R от температуры в диапазоне от 40°C до 100°C с шагом около 10 градусов, в диапазоне от 100°C до 120°C – с шагом 2°C (щупами правого мультиметра измеряйте напряжение на резисторе R_0 (контакты 1-4) и на индуктивности L (контакты 1 – 2), как в задаче №1). Результаты занесите в таблицу 2 отчета.
5. Для каждого результата измерения рассчитайте индуктивность и магнитную проницаемость:

$$L=R_0U_L/(\omega U_R);$$

$$\mu=LI_M/(\mu_0 S N^2);$$

Результаты занесите в таблицу 2 отчета.

По полученным данным постройте на миллиметровой бумаге или при помощи компьютера график зависимости магнитной проницаемости в переменном поле от температуры. Определите точку Кюри и сделайте выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ.

1. Сформулируйте цель работы.
2. Что может являться источником магнитного поля?
3. Что такое магнитный момент витка с током p_m ?
4. Что такое вектор намагниченности?
5. Что такое магнитная восприимчивость вещества?
6. Что такое магнитная проницаемость вещества?
7. Перечислите известные Вам типы магнетиков.
8. В чем заключается диамагнитный эффект воздействия внешнего магнитного поля?

9. В чем заключается парамагнитный эффект воздействия внешнего магнитного поля?
10. Какие вещества называются ферромагнетиками?
11. Опишите явление ферромагнетизма и основные причины его возникновения.
12. Назовите известные Вам ферромагнетики.
13. Как выглядят температурные зависимости основных свойств ферромагнетиков (магнитной проницаемости и восприимчивости)?

Литература

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.:Наука,1971.,1032с.
2. Валишев М.Г., Повзнер А.А. Физика: учебное пособие. СПб : Издательство «Лань», 2010. 576 с.

ПРИМЕР ОТВЕТА НА ТЕСТ

0.1. К ферромагнетикам относятся вещества ...

- 1) с магнитной проницаемостью $\mu < 1$;
- 2) с магнитной проницаемостью $\mu > 1$ (немного больше 1);
- 4) с магнитной проницаемостью $\mu \gg 1$ (гораздо больше 1);
- 8) с отрицательной магнитной восприимчивостью.

Выберите номер правильного утверждения.

Индукция B в образце состоит из индукции, связанной с внешним намагничивающим полем напряженностью H , и индукции, создаваемой самим намагниченным образцом.

Для индукции в веществе можно записать формулу в виде

$$B = \mu_0 (H + J), \text{ где}$$

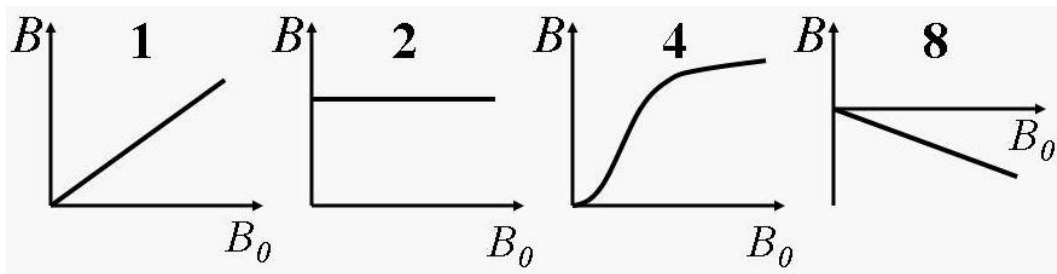
*J - намагниченность - магнитный момент единичного объема вещества, μ_0 - магнитная постоянная, равная в системе СИ - $4\pi * 10^{-7}$ Гн/м.*

Магнитной проницаемостью μ называют либо отношение B/H , либо производную B по H ; в первом случае говорят о полной, а во втором - о дифференциальной магнитной проницаемости вещества;

$$\mu_{\text{полн}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B}{H}, \quad \mu_{\text{диф}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH};$$

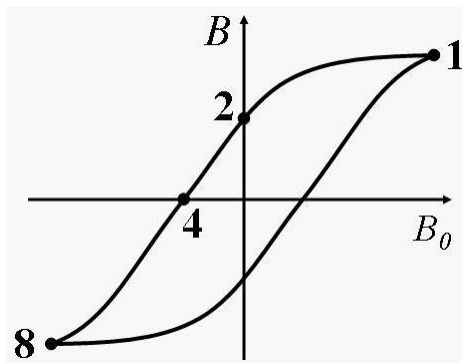
Ферромагнетики – это вещества и соединения, обладающие доменной магнитной структурой, т.е. состоящие из областей с самопроизвольной намагниченностью. Во внешнем магнитном поле магнитные моменты доменов ориентируются по направлению внешнего поля, многократно его усиливая. Таким образом, правильный ответ: - 4

0.2. На рисунке приведены зависимости индукции B в образце от величины индукции намагничивающего поля B_0 для различных веществ. Укажите номер зависимости, соответствующей ферромагнетику.



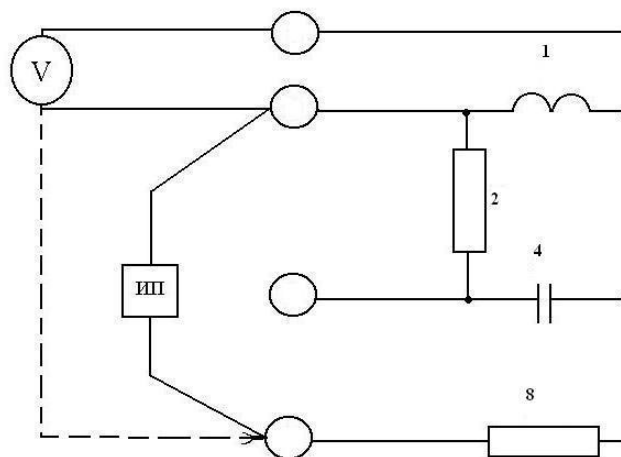
Для ферромагнетиков характерна нелинейная зависимость индукции от величины намагничивающего поля (в слабых полях). В достаточно сильном внешнем поле, когда все магнитные моменты доменов ориентированы по полю, зависимость становится линейной (образец намагничен до насыщения). **Правильный ответ : 4.**

0.3. На рисунке приведена петля гистерезиса ферромагнетика. Какими цифрами обозначены на рисунке остаточная индукция и коэрцитивная сила? Укажите сумму этих цифр.



При уменьшении индукции внешнего поля B_0 индукция поля в образце, предварительно намагниченном до насыщения, уменьшается, но и при «нулевом» внешнем поле образец остается намагниченным (остаточная индукция, точка 2). Чтобы полностью размагнитить образец, нужно приложить «обратное» поле (точка 4). Эта величина называется коэрцитивной силой. **Правильный ответ: $2+4=6$**

0.4. На рисунке приведена схема модуля «Ферромагнетик». Какими цифрами обозначены: а) исследуемый ферромагнетик; б) токозадающий резистор? Укажите сумму этих цифр.



Исследуемый ферромагнетик представляет собой ферритовое кольцо, на которое намотана катушка L (цифра «1»). Резистор, ограничивающий ток в цепи, должен быть включен в цепь последовательно. Этому условию удовлетворяет резистор, обозначенный цифрой «8».

Правильный ответ: $1+8=9$

0.5. Что называется точкой Кюри ферромагнетика?

- 1) температура, выше которой резко увеличивается магнитная проницаемость;
- 2) температура, выше которой резко падает магнитная проницаемость;
- 4) температура, выше которой разрушается доменная структура;
- 8) температура, выше которой формируется доменная структура.

Укажите сумму номеров правильных ответов

Тепловое движение препятствует действию обменных сил и приводит к разупорядочению доменной структуры. Поэтому ферромагнитные вещества при высоких температурах теряют свои специфические свойства и превращаются в обычные парамагнетики с магнитной проницаемостью чуть больше единицы. Переход из ферро - в парамагнитное состояние происходит скачком при определенной для каждого вещества температуре, которая носит название температуры Кюри T_k .

Правильный ответ: $2+4=6$

ФОРМА ОТЧЕТА

Министерство образования и науки Российской Федерации
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Кафедра физики

ОТЧЁТ

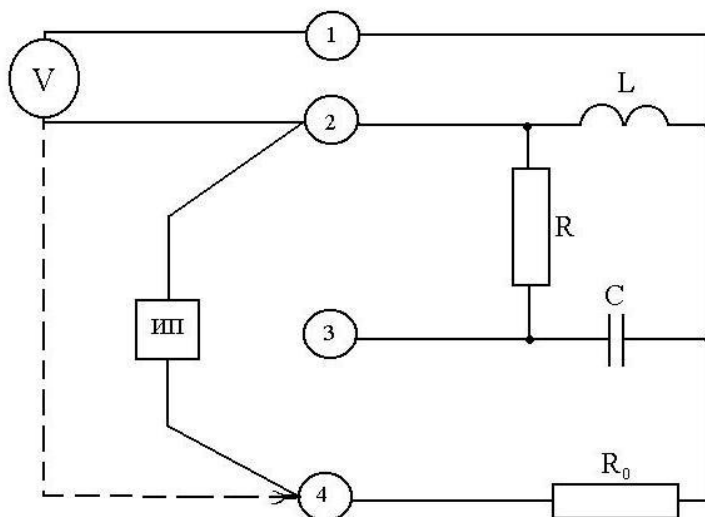
По лабораторной работе № 19

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА
В ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ

Студент(ка).....
Группа.....
Преподаватель.....
Дата.....

1. Цель работы. _____

Эскиз установки (электрическая схема измерений).



2. Средства измерения и их характеристики

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления шкалы	Класс точности, δ	Предел основной погрешности, $\theta_{осн}$
Вольтметр 1 (Мультиметр левый)			—	—
Вольтметр 2 (Мультиметр правый)			—	—
Термометр электронный			—	—

3. Характеристики установки:

Параметры сердечника: кольцо прямоугольного сечения из феррита марки М2000НН с площадью сечения $S = 14 \text{ мм}^2$ с длиной магнитной силовой линии $l_M = 30 \text{ мм}$. Номинальная магнитная проницаемость $\mu = 2000$. Число витков $N = 250$. Токозадающее сопротивление $R_0 = 1,0 \text{ кОм}$.

4. Результаты исследования зависимости магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности магнитного поля.

Основные расчетные формулы:

$$L = R_0 U_L / (\omega U_R);$$

$$\mu = L l_M / (\mu_0 S N^2);$$

где

L - _____

U_L - _____

U_R - _____

$$H_m = N I_m / l_m = N U_{Rm} / (R_0 l_m) = \sqrt{2} N U_R / (R_0 l_m).$$

где

H_m - _____

Таблица.1.

$$R_0 = 1000 \text{ Ом}; \quad T = \text{_____} \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \nu = 980 \text{ Гц}; \quad \omega = \text{_____} \text{ с}^{-1};$$

$U_R, \text{ В}$									
$U_L, \text{ В}$									
$H_m, \text{ А/м}$									
$L, \text{ мГн}$									
$\mu, 10^3$									

Примеры расчетов:

$$L = R_0 U_L / (\omega U_R) = \text{_____} =$$

$$\mu = L l_M / (\mu_0 S N^2) = \text{_____} =$$

$$H_m = \sqrt{2} N U_R / (R_0 l_m) = \text{_____} =$$

5. График зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля прилагается.

6. Выводы:

7. Результаты исследования зависимости магнитной проницаемости от температуры.

Таблица.2.

$R_0 = 1000 \text{ Ом}; U_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мВ}; \nu = 980 \text{ Гц}; \omega = \underline{\hspace{2cm}} \text{ с}^{-1};$

$T, ^\circ\text{C}$											
$U_R, \text{ мВ}$											
$U_L, \text{ мВ}$											
$L, \text{ мГн}$											
$\mu, 10^3$											

Пример расчета:

$$\mu = L l_M / (\mu_0 S N^2) = \underline{\hspace{10cm}} =$$

8. График зависимости магнитной проницаемости ферромагнетика в переменном поле от температуры прилагается
9. Точка Кюри, согласно графику, составляет величину _____

10. Выводы: