

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Исследование магнитных материалов

Цель работы

Изучение стандартного метода измерения начальной $\mu_{нач}$ магнитной проницаемости и тангенса угла магнитных потерь $tg\delta_m$ магнитомягких материалов резонансным методом. Определение зависимостей $\mu_{нач}$, $tg\delta_m$ магнитных материалов от частоты и температуры.

Домашнее задание

- 1) Изучить физические основы и характерные черты явления намагничивания ферромагнитных и ферримагнитных материалов и их характеристики;
- 2) Изучить физические основы влияния различных факторов на процесс намагничивания;
- 3) Изучить резонансный метод измерения индуктивности катушки с кольцевым сердечником из исследуемого ферромагнитного материала и порядок расчета значений его параметров – $\mu_{нач}$, $tg\delta_m$;
- 4) Порядок проведения обработки результатов испытаний и оформления протокола о работе.

Общие положения

Магнитомягкие материалы обладают высокой магнитной проницаемостью и способностью легко перемагничиваться при работе в переменных магнитных полях. Малые потери перемагничивания связаны с малой коэрцитивной силой – узкой петлей гистерезиса. При работе на повышенных частотах применяются металлические магнитомягкие материалы в виде очень тонкой ленты, а также ферриты и магнитодиэлектрики. Как правило, на таких частотах, эти материалы обычно работают в слабых магнитных полях, когда их магнитная проницаемость близка практически к начальной магнитной проницаемости.

С увеличением частоты переменного магнитного магнитная проницаемость вследствие инерционности магнитных процессов уменьшается.

При работе в переменных магнитных полях в магнитных материалах возникают потери энергии, обусловленные, главным образом, потерями на гистерезис и на вихревые токи. Потери на гистерезис за один цикл перемагничивания определяются площадью статической петли гистерезиса, полученной при медленном изменении магнитного поля, Потери на вихревые токи определяются величиной электрического сопротивления магнитного материала и зависят от частоты перемагничивания, возрастая пропорционально квадрату увеличения частоты изменения магнитного поля. Поэтому для работы на высоких частотах выбирают материалы с большим удельным сопротивлением. Рассеяние мощности – потери в магнитном материале, работающем в переменном поле, можно оценивать с помощью тангенса угла магнитных потерь $tg\delta_m$. Катушку индуктивности с тороидальным магнитным сердечником, сопротивлением обмотки которой и собственной емкостью можно пренебречь, можно представить в виде схемы замещения, состоящей из последовательно соединенных индуктивности L и активного

сопротивления R_n , потери энергии в котором эквивалентны всем видам потерь в магнитном материале (рис. 1).

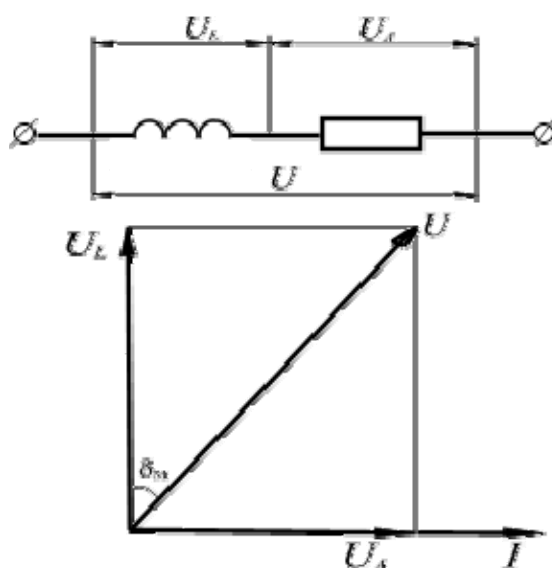


Рис. 1. Схема замещения катушки индуктивности с магнитным сердечником и соответствующая ей векторная диаграмма: L — индуктивность катушки; R_n , активное сопротивление, потери в котором эквивалентны потерям в сердечнике

Из векторной диаграммы для этой схемы, представленной рисунке, получаем, что

$$\operatorname{tg} \delta_m = \frac{R_n}{\omega L} \quad (1)$$

где R_n — сопротивление магнитных потерь, Ом;

L — индуктивность катушки, Гн;

ω — угловая частота ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$); f — циклическая частота, Гц.

Величина Q , обратная $\operatorname{tg} \delta_m$ носит название добротности и определяется как

$$Q = \frac{\omega L}{R_n} \quad (2)$$

Ферромагнетики обладают ярко выраженными магнитными свойствами только в определенном температурном диапазоне. При температуре, называемой точкой Кюри, области самопроизвольного намагничивания (домены) разрушаются, и материал утрачивает ферромагнитные свойства. Магнитная проницаемость ферромагнетиков изменяется с температурой, проходя через максимум вблизи точки Кюри.

Описание лабораторной установки

Измерение магнитных характеристик образцов в настоящей работе производится резонансным методом при помощи прибора, называемого измерителем добротности или куметром (рис. 2).

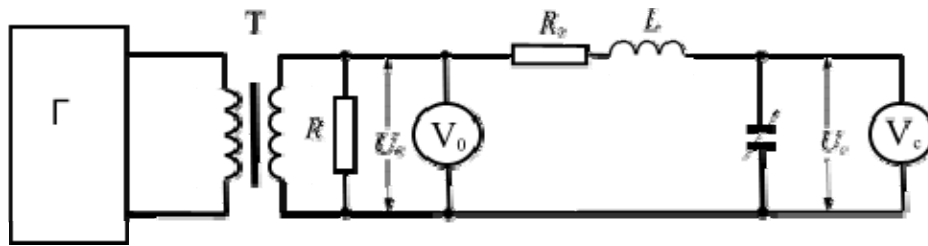


Рис. 2. Принципиальная схема измерителя добротности: Г – задающий генератор; Т – согласующий трансформатор; R – безреактивное сопротивление малой величины; V_0 – индикатор входного напряжения; L – индуктивность катушки; R_3 – эквивалентное активное сопротивление катушки; C – измерительный конденсатор; V_C – Q – вольтметр

Принцип работы этого прибора основан на свойстве последовательного контура, состоящего из активного сопротивления R_3 , индуктивности L и емкости C, настроенного в резонанс, увеличивать напряжение на емкости U_c в Q раз по сравнению с входным напряжением контура U_0 . Исследуемые образцы представляют собой однослойные катушки индуктивности с тороидальным сердечником, изготовленным из исследуемого материала.

На выходе задающего генератора Г включен согласующий трансформатор Т, вторичная обмотка которого нагружена на безреактивное сопротивление R малой величины. Падение напряжения на этом сопротивлении U_0 является входным напряжением измерительного контура. Оно измеряется вольтметром V_0 (индикатором входного напряжения). Измерительный контур состоит из испытуемого образца – катушки с индуктивностью L и эквивалентным активным сопротивлением R_3 и конденсатора переменной емкости C для настройки контура в резонанс. Напряжение на емкости U_c измеряется вольтметром V_c с большим входным сопротивлением.

Изменением емкости C контур настраивается в резонанс. При резонансе, когда $C=C_p$, имеет место равенство индуктивного и емкостного сопротивления

$$\omega L = \frac{1}{\omega C_p} \quad (3)$$

При резонансе полное сопротивление Z контура минимально и равно R_3

$$Z = R_3 + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C_p}\right) = R_3 \quad (4)$$

При этом ток, протекающий в контуре будет максимален и ограничен величиной активного сопротивления R_3 , соответственно падение напряжения на индуктивности и емкости будет достигать максимальной величины. Таким образом, резонанс можно зафиксировать по максимальному показанию вольтметра, измеряющего величину U_c . При резонансе ток в контуре равен

$$I = \frac{U_0}{R_3} \quad (5)$$

Для напряжения на емкости при резонансе в свою очередь имеем

$$U_c = I \cdot \frac{1}{\omega C_p} = I \cdot \omega L = U_0 \cdot \frac{\omega L}{R_3} \quad (6)$$

Принимая во внимание (2), последнее выражение можно переписать в виде

$$U_c = U_0 \cdot Q \quad (7)$$

или

$$Q = \frac{U_c}{U_0} \quad (8)$$

Если при проведении измерений величину входного напряжения измерительного контура U_0 поддерживать неизменной, то в момент резонанса напряжение на емкости U_c будет пропорционально величине добротности измеряемого образца. В этом случае показания вольтметра можно отградуировать в единицах добротности.

При резонансе, когда прибор, измеряющий добротность, показывает максимальное показание, необходимо снять значение Q испытуемой катушки и зафиксировать величину резонансной емкости контура C_p .

Зная величину резонансной емкости, определяем индуктивность измеряемой катушки по формуле (3)

$$L = \frac{1}{\omega^2 \cdot C_p} \quad (9)$$

Кроме того, измеренная добротность катушки Q связана с индуктивностью и эквивалентным активным сопротивлением, учитывающем омические потери в катушке, для последовательной схемы замещения соотношением

$$Q = \frac{\omega L}{R_3} = \frac{2\pi \cdot f \cdot L}{R_3} \quad (10)$$

где L – индуктивность катушки, Гн;

f – частота, Гц;

R_3 – эквивалентное активное сопротивление катушки, Ом.

Это эквивалентное активное сопротивление состоит из активного (омического) сопротивления обмотки катушки $R_{обм}$ и сопротивления магнитных потерь R_n , то есть

$$R_3 = R_{обм} + R_n \quad (11)$$

Рассчитав индуктивность катушки по формуле (9), зная ее геометрические размеры и обмоточные данные можно определить величину магнитной проницаемости материала сердечника. Поскольку при измерении индуктивности на куметре в сердечнике создается слабое магнитное поле, полученное значение магнитной проницаемости можно считать практически равным начальной магнитной проницаемости – $\mu_{нач}$. Расчет – $\mu_{нач}$ для рассматриваемого случая производится по формуле:

$$\mu_{нач} = \frac{L \cdot \pi \cdot D_\Gamma}{\mu_0 \cdot W^2 \cdot S} \quad (12)$$

где L – индуктивность катушки, Гн;

D_Γ – гармонический диаметр, рассчитываемый по формуле;

$$D_\Gamma = \frac{D_{внешн} - D_{внутр}}{\ln\left(\frac{D_{внешн}}{D_{внутр}}\right)} \quad (13)$$

где $D_{внешн}$, $D_{внутр}$ – внешний и внутренний диаметры сердечника, м;

в приближенных расчетах гармонический диаметр можно заменить на средний $D_{ср}$

$$D_{ср} = \frac{D_{внешн} + D_{внутр}}{2} \quad (14)$$

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м;

W – число витков катушки;

S – площадь сечения сердечника, м².

$$S = \frac{D_{\text{внешн}} - D_{\text{внутр}}}{2} \cdot h \quad (15)$$

где h – высота сердечника, м.

Определив одновременно с индуктивностью катушки L величину ее добротности Q , при помощи соотношения (10) можно рассчитать эквивалентное активное сопротивление катушки R_3 :

$$R_3 = \frac{2\pi \cdot f \cdot L}{Q} \quad (16)$$

Принимая во внимание соотношение (11) по известным значениям R_3 и $R_{\text{обм}}$ определяем сопротивление магнитных потерь $R_n = R_3 - R_{\text{обм}}$, что дает возможность по формуле (1) вычислить значение тангенса угла магнитных потерь.

Виртуальная лабораторная работа состоит из вкладки «Задание» (рис. 3), на которой размещается информация об образцах и условиях проведения эксперимента и вкладок виртуальных стендов с виртуальными приборами (рис. 4).

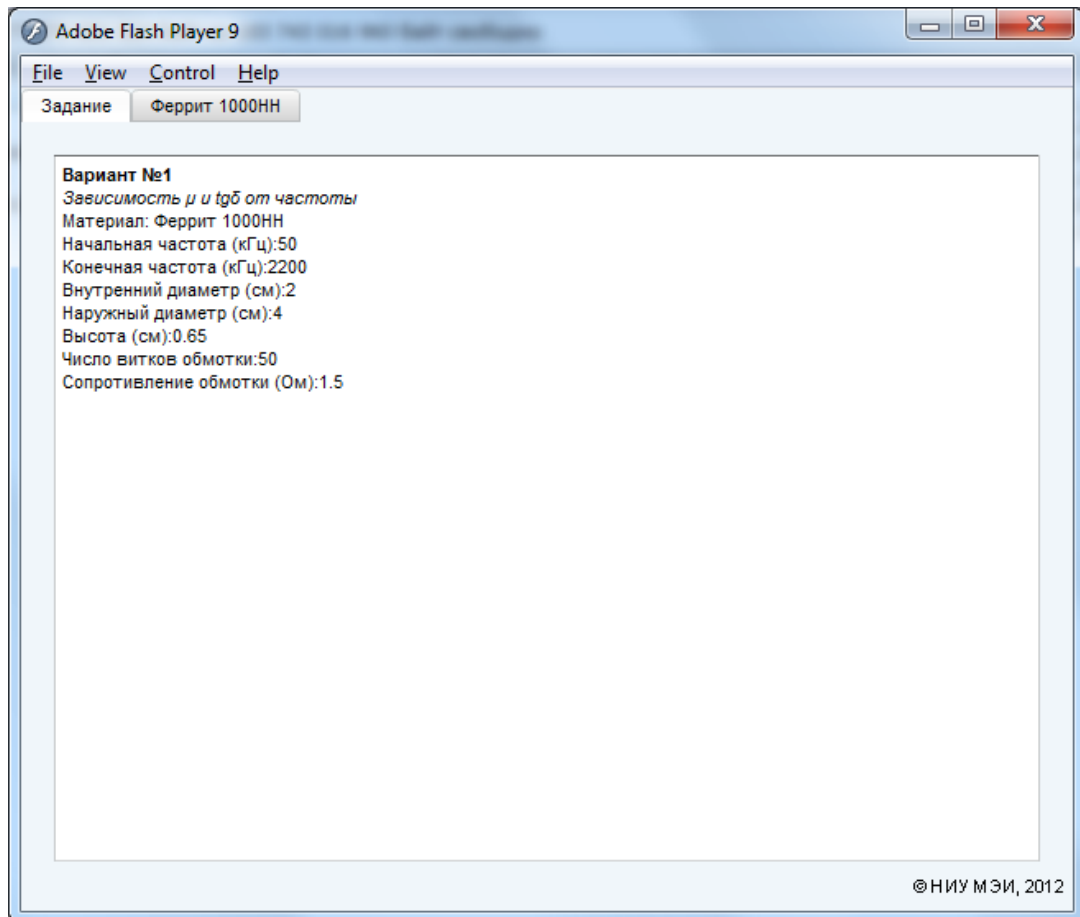


Рис. 3. Вкладка «Задание» виртуальной лабораторной работы (зависимость начальной магнитной проницаемости и тангенса угла магнитных потерь от частоты)

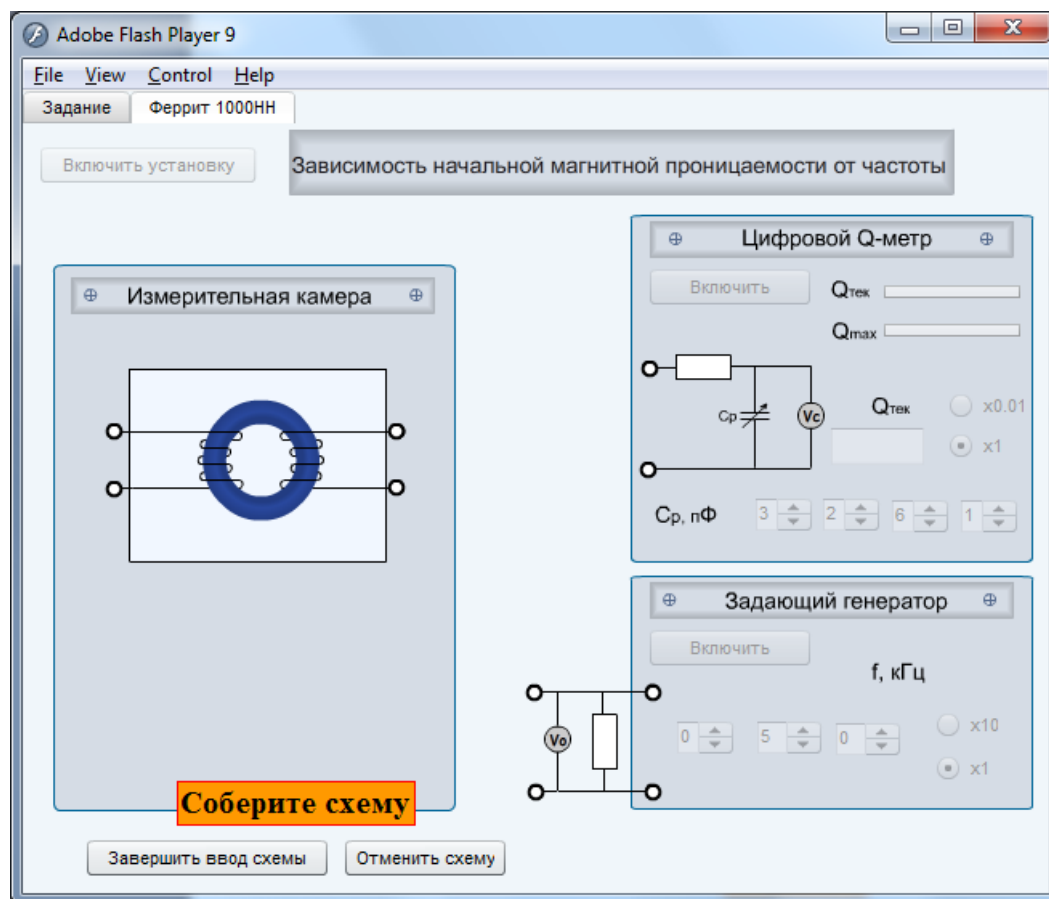


Рис. 4. Виртуальный лабораторный стенд для измерения частотных зависимостей начальной магнитной проницаемости и тангенса угла магнитных потерь

Виртуальный лабораторный стенд включает в себя: измерительную камеру с испытуемым магнитным образцом, цифровой Q -метр, задающий генератор, а также клеммы для создания электрических соединений. На Q -метре имеется четырехдекадный переключатель, с помощью которого осуществляется настройка резонансной емкости. Для расширения диапазонов измеряемых емкостей имеются переключатели – $\times 0.01$, $\times 1$. Для фиксации резонанса имеются элементы индикации: слайдеры отображения текущей $Q_{тек}$ и максимальной Q_{max} добротностей и дисплей для отображения текущего значения добротности. Для расширения диапазонов частот задающего генератора имеются переключатели $\times 10$ и $\times 1$.

Для выполнения измерений необходимо собрать схему соединений приборов стенда. Соединения осуществляются с помощью мыши перетаскиванием контактов. Позиционируем указатель мыши на первый контакт соединения, кликаем левую кнопку мыши и удерживая ее, перетаскиваем указатель мыши на второй контакт соединения, отпускаем левую кнопку. В случае правильного соединения появляется электрическое соединение. Для завершения сборки схемы необходимо нажать кнопку «Завершить ввод схемы». Если схема собрана неправильно, то появляется сообщение «Схема собрана неправильно», необходимо отменить собранную схему, нажав кнопку «Отменить схему» и повторить процедуру сборки вновь. После того, как собрана схема следует включить лабораторный стенд, куметр и задающий генератор. Следует задать частоту, при которой будет проводиться измерение (рис. 5).

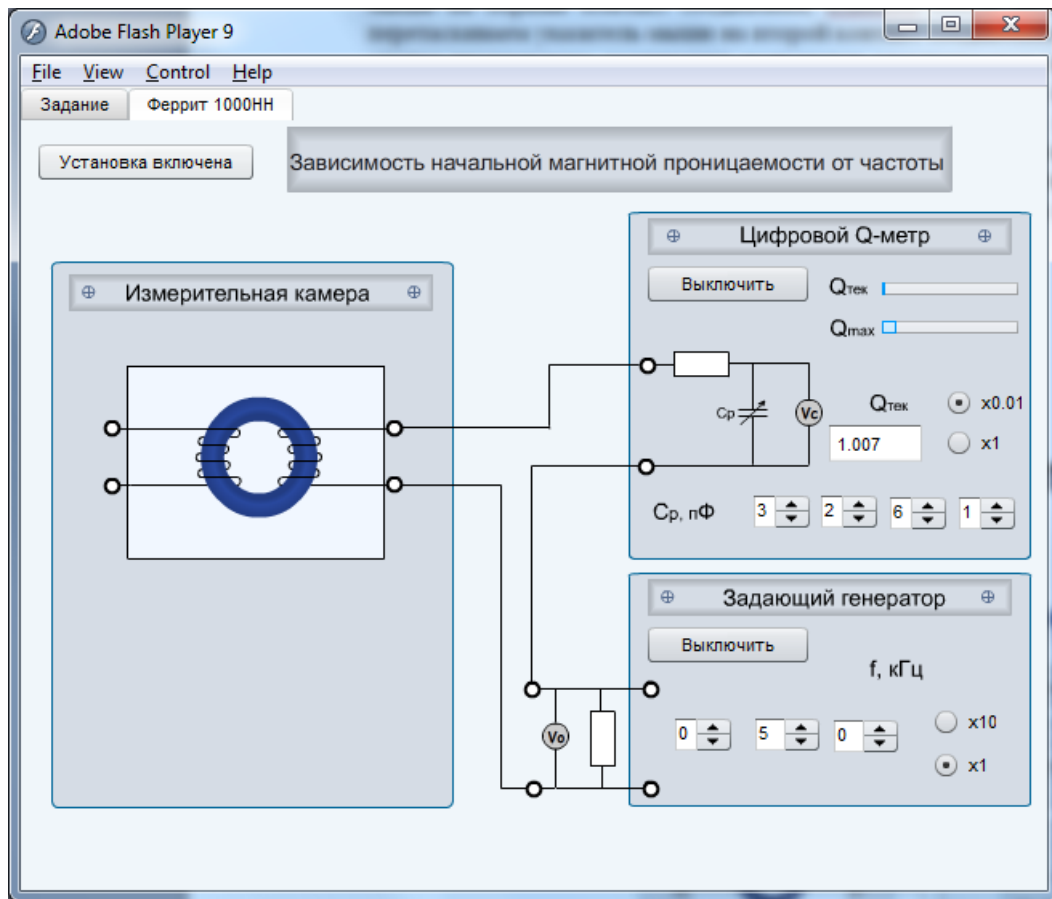


Рис. 5. Виртуальный лабораторный стенд подготовлен для проведения измерений частотных зависимостей начальной магнитной проницаемости и тангенса угла магнитных потерь

Рассмотрим процедуру измерения с помощью куметра. При включении прибора значение емкости принимает случайное значение. На слайдере Q_{max} отображается значение резонансной добротности, соответствующей резонансу. На слайдере $Q_{тек}$, значение добротности, соответствующее установленному значению емкости. При значении емкости, равной резонансной текущее значение добротности равно резонансной добротности (длина указателя слайдера $Q_{тек}$ равна Q_{max}). Для более тонкой настройки резонансной емкости и фиксации значения резонансной добротности на куметре имеется дисплей $Q_{тек}$.

Вначале осуществляется «грубая» настройка. Настраиваем емкость куметра так, чтобы длины указателей слайдеров $Q_{тек}$ и Q_{max} совпадали. Далее осуществляем «тонкую» настройку. Варьируем емкость и контролируем в окне $Q_{тек}$ текущее значение добротности. Подбираем емкость так, чтобы значение добротности было максимально. Это значение и есть резонансная добротность. При этом фиксируем значение резонансной емкости, которая необходима для расчета.

Рабочее задание и порядок проведения работы

Лабораторная работа проводится по следующей схеме:

1. Авторизоваться на учебно-методическом комплексе «Виртуальные лабораторные работы по курсу ЭТМ» (<http://etm.mpei.ru>). Загрузить виртуальную лабораторную работу «Исследование магнитных материалов». Перейти к вкладке «Задание» на виртуальном лабораторном стенде и ознакомиться с выданным для выполнения заданием.

2. Собрать схему, перетаскивая соответствующие клеммы на виртуальном стенде. Помнить, что до тех пор, пока Вы правильно не соберете схему кнопки включения приборов на стенде будут заблокированы и Вы не сможете приступить к измерениям. После успешной сборки схемы необходимо включить стенд, куметр и задающий генератор.
3. Рассчитать зависимости тангенса угла магнитных потерь и начальной магнитной проницаемости от частоты, измерив значения резонансной емкости и добротности для 8 – 10 значений частот в интервале, указанном в задании. Внести в таблицу отчета измеренные резонансные емкость и добротность и рассчитанные тангенс угла магнитных потерь и начальную магнитную проницаемость. Построить график зависимости тангенса угла магнитных потерь и начальной магнитной проницаемости от частоты.
4. Сделать письменные выводы по проделанной работе, объяснив полученные зависимости. Подготовить отчет в формате текстового процессора Microsoft Word по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями. Отчет должен включать в себя:
 - титульный лист с наименованием лабораторной работы, названием кафедры, Ф.И.О. студента и преподавателя;
 - конкретное задание, номер варианта;
 - основные формулы и соотношения, по которым проводился расчет;
 - таблицы (протоколы) с результатами экспериментов и рассчитанными тангенсом угла магнитных потерь и начальной магнитной проницаемости;
 - графики, полученных зависимостей;
 - краткие письменные выводы, объясняющие соответствие (или несоответствие) полученных зависимостей теоретическим.

Графические зависимости оформляются с помощью средств построения графиков Excel, либо с помощью любых программ построения графиков.

Контрольные вопросы

5. Кривая намагничивания магнитных материалов. Процессы протекающие при намагничивании магнитных материалов.
6. Объяснить основные характеристики магнитных материалов: индукция насыщения, остаточная индукция, коэрцитивная сила, начальная, максимальная и реверсивная магнитная проницаемость.
7. Поясните зависимости начальной магнитной проницаемости от частоты и температуры.
8. Назовите виды потерь в магнитных материалах и объясните их зависимость от частоты и температуры.
9. Назовите состав, свойства и области применения ферритов, аморфных магнитных материалов, пермаллоев и электротехнических сталей.

Литература

1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. Учебник. Лань. 2001, 185 с.
2. Конструкционные и электротехнические материалы / под ред. В.А.Филикова. М.:Высшая школа, 1990, 294 с.
3. Преображенский А.А., Бишард Е.Г. Магнитные материалы и элементы. М.: Высшая школа, 1986, 352 с.
4. Электронные учебники по курсу «Электротехническое материаловедение». НИУ МЭИ, <http://ftemk.mpei.ac.ru/ctlw/LocalContent.aspx?id=etmTut>

5. Бородулин В.Н., К.В.Елизаров К.В., Сутченков А.А., Тихонов А.И. Методические указания по курсу Электротехническое материаловедение. Под ред А.И. Тихонова; М.: Изд-во МЭИ, 1997. 32с. Электронное учебное пособие.
6. Бородулин В.Н., К.В.Елизаров К.В., Сутченков А.А., Тихонов А.И. Задачи компьютерного учебно-контролирующего комплекса. Учебное пособие по курсу Электротехническое Материаловедение. М.: Изд-во МЭИ, 1999. 42с. Электронное учебное пособие.