

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Мошкин Мирон Евгеньевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение потерь энергии при перемагничивании образцов железа
разной длины**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19305

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. И.А. Иванов

Оценка научного руководителя

Хорошо

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

А. С. Матвеев

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Цель данной работы – измерение потерь энергии в образцах железа при перемагничивании. Потери энергии были измерены следующим образом. Образец помещался внутрь длинной сдвоенной катушки: через первую протекал заданный ток, вторая (измерительная) катушка использовалась для измерения магнитной индукции. В ходе выполнения работы были измерены зависимости $B(H)$ для образцов разной длины, построены петли гистерезиса и найдены потери энергии. Также определены остаточная намагниченность и коэрцитивное поле для каждого образца. Результаты согласуются с табличными значениями для железа.

Оглавление

1. Введение3
2. Экспериментальная установка3
3. Описание эксперимента4
4. Основные результаты6
5. Выводы10
6. Литература11

1. Введение

Как известно, при помещении магнетика во внешнее магнитное поле происходит намагничивание магнетика – магнетик сам становится источником магнитного поля. В зависимости от типа магнетика, зависимость магнитной индукции от поля в соленоиде может быть разной. В нашем случае, т.к. изучаются свойства ферромагнетиков, зависимость будет представлять собой петлю гистерезиса. Таким образом, зная зависимость $B(H)$ несложно по петле гистерезиса найти потерю энергии за цикл, исходя из формулы.

$$W = \int_{\square} HdB \quad (1)$$

2. Экспериментальная установка

Список оборудования: исследуемые образцы, трансформатор, лабораторный автотрансформатор, сопротивление на 5.6 Ом, соленоид (1558 витков, диаметр 0.83 см), измерительная катушка (300 витков, диаметр 0.15 см), RC-цепочка с заданными параметрами ($R = 6.8$ кОм, $C = 22$ мкФ), переходной модуль, персональный компьютер.

Установка состоит из двух цепей, связанных магнитный поток через соленоид и измерительную катушку. В первую цепь входит ЛАТР, сопротивление и соленоид. Во вторую – RC-цепь и измерительная катушка. Схема данной установки представлена ниже.

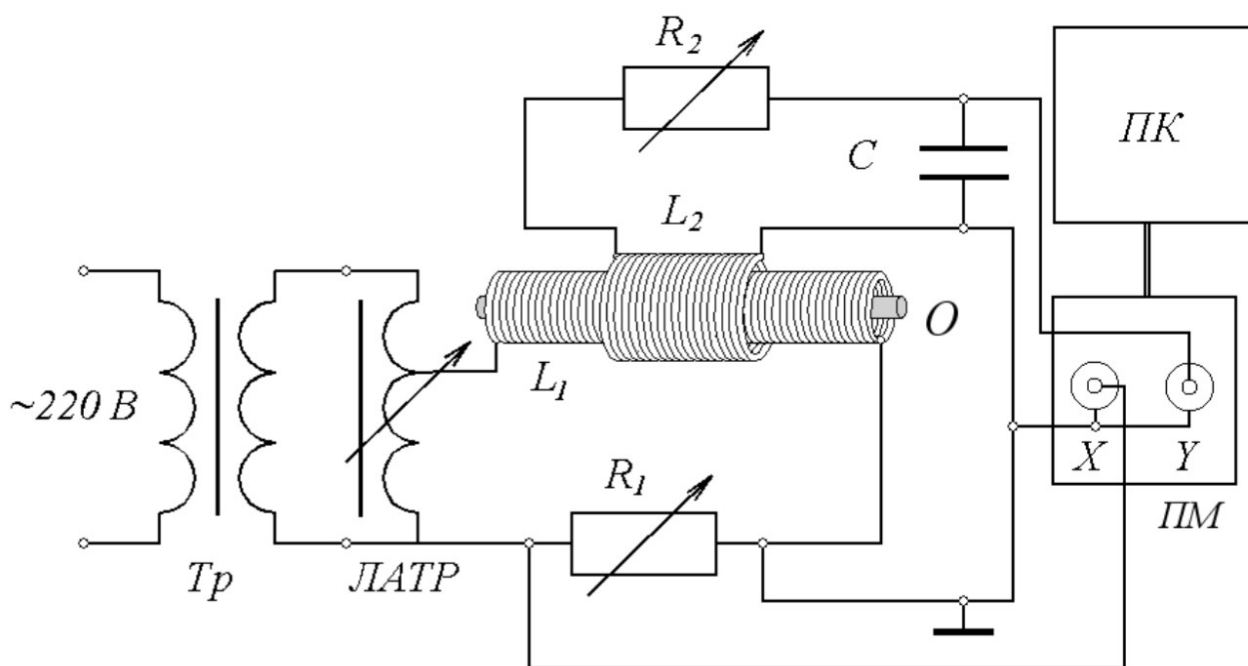


Рис.1. Схема измерительной установки

3. Описание эксперимента

Исследуемый образец помещается в экспериментальную установку. Через соленоид пропускают ток I , который создает поле H . Поле внутри бесконечно длинного соленоида – однородное, а снаружи нулевое. С хорошей точностью, у достаточно длинного соленоида, магнитное поле внутри, также будет однородным. Говоря о границах применимости выше изложенных рассуждений, в нашем случае, считая поле внутри однородным, мы также говорим, что это должно работать, при размерах образца либо меньших порядка длины соленоида, либо просто порядка соленоида. В данном эксперименте нет образцов длиной больше длины соленоида, поэтому все ниже приведенные рассуждения будут справедливы в нашем случае.

Поле внутри соленоида:

$$H = \frac{N_1}{2\pi r} I_1 \quad (2)$$

Где N_1 – число витков, r – радиус, I_1 – протекающий ток.

Согласно закону Фарадея в измерительной катушке возникнет ЭДС:

$$\varepsilon = -N_2 \left(\frac{d\Phi}{dt} \right) = -N_2 S \left(\frac{dB}{dt} \right) \quad (3)$$

Где N_2 – число витков измерительной катушки.

В нашем эксперименте, во вторую цепь входит RC-цепь и катушка. Запишем закон Кирхгофа для второй цепи:

$$\varepsilon = I_2 R_2 + \frac{1}{C} \int_0^T I_2 dt + L_2 \frac{dI_2}{dt} = I_2 R_2 + U_c + U_L \quad (4)$$

Где U_c и U_L – падение напряжения на конденсаторе и катушке при переменном токе соответственно.

При наших заранее заданных параметрах цепи, подобранных таким образом, что $U_c \ll \varepsilon$ и $U_L \ll \varepsilon$:

$$\varepsilon \approx I_2 R_2 \quad (5)$$

То есть ток во второй цепи пропорционален наведенной в измерительной катушке ЭДС.

$$I_2 = \frac{\varepsilon(t)}{R_2} \quad (6)$$

Напряжение на конденсаторе получается равным интегралу входного напряжения по периоду:

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^T I_2 dt = \frac{1}{C} \int_0^T \frac{\varepsilon(t)}{R_2} dt = \frac{-N_2 S}{R_2 C} B \quad (7)$$

Таким образом, помещая образец в соленоид с индуктивностью по которому течет ток I_1 , создается поле H :

$$H = \frac{N_1 I_1}{l} \quad (8)$$

Где l – длина соленоида.

Падение напряжения на R_1 :

$$U_{R_1} = I_1 R_1 = \frac{R_1 l H}{N_1}$$

Это напряжение подадим на вход осциллографа. (9)

Отношение (7) определяет связь магнитной индукции внутри измерительной катушки и напряжения на емкости, которое мы подаем на второй вход осциллографа:

$$B = \frac{-R_2 C}{N_2 S} U_c \quad (10)$$

4. Основные результаты

4.1. Построение петли гистерезиса предельного цикла перемагничивания и определение потерь энергии на перемагничивание

Графики петель гистерезиса для образца железа разной длины представлены ниже.

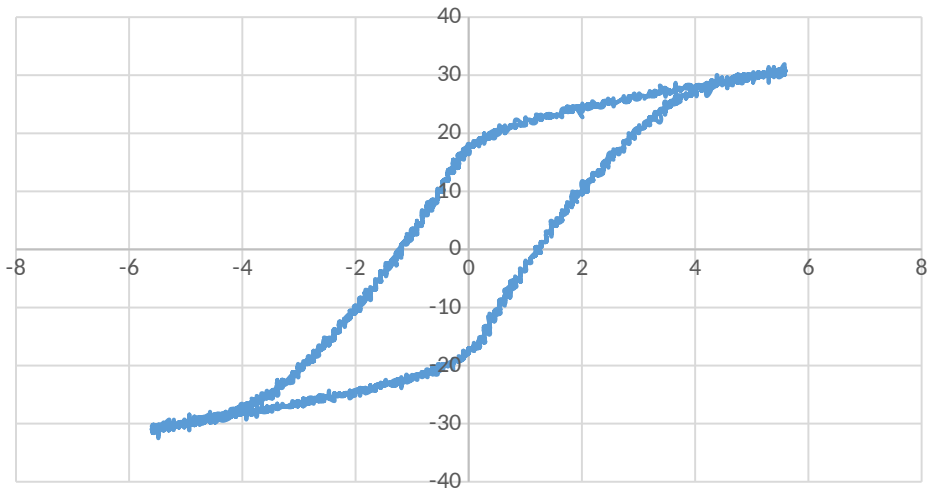


Рис. 2. График петли гистерезиса для стержня длиной 30,3 см

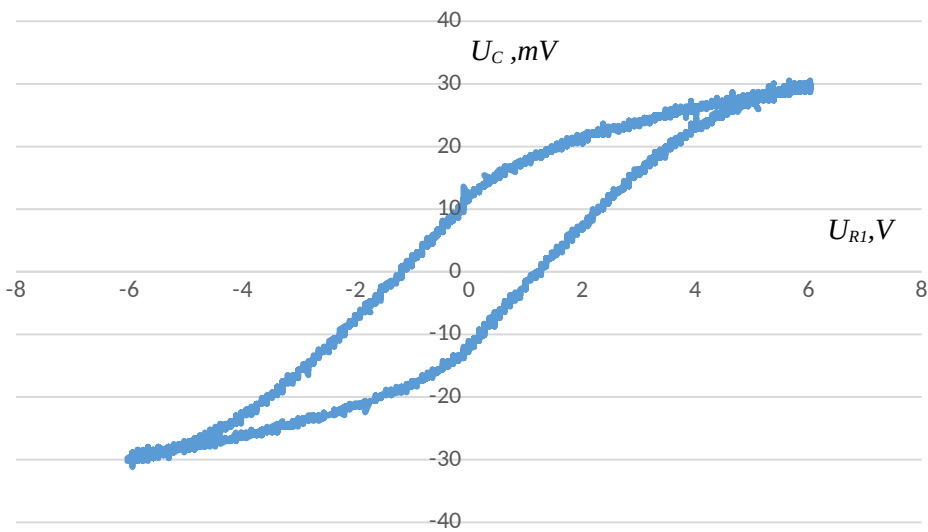


Рис. 3. График петли гистерезиса для стержня длиной 20,2 см

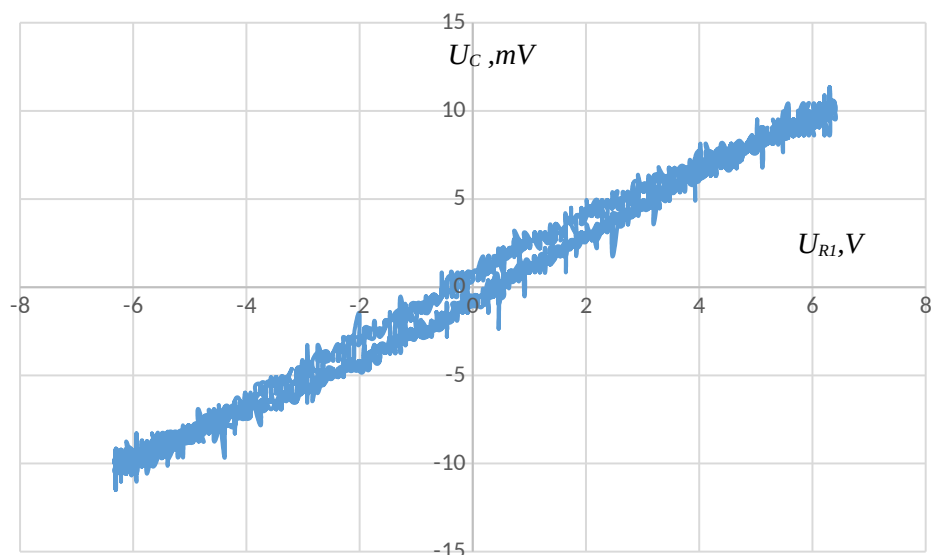


Рис. 4. График петли гистерезиса для стержня длиной 10,1 см
Семейство петель гистерезиса для образцов разной длины представлены ниже:

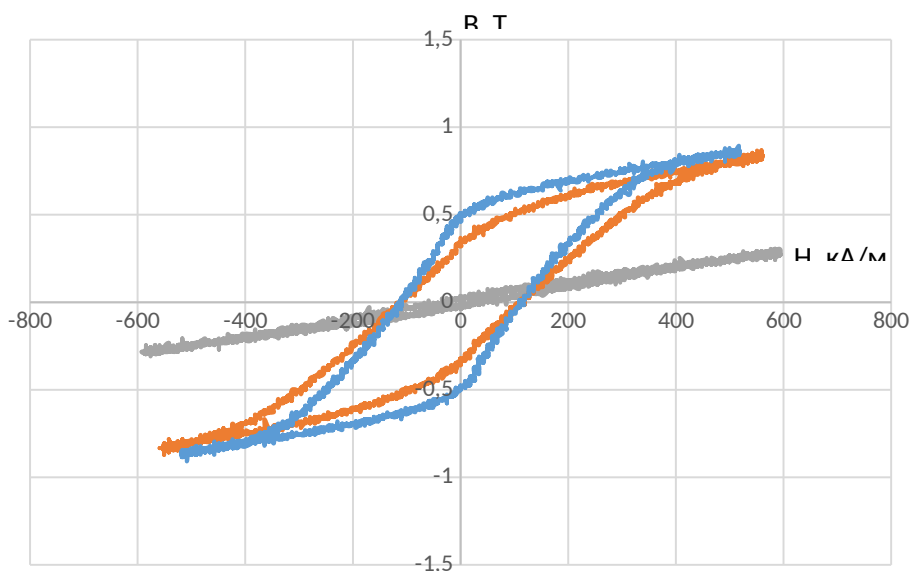


Рис. 5. Семейство петель гистерезиса образцов железа разной длины

График петли гистерезиса позволяет нам найти коэрцитивную силу (когда $U_C = 0$) и остаточное магнитное поле (когда U_{R1}). Соответствующие точки

$$U_{R1} = 1,27 \text{ V}, U_C = 0,17 \text{ V}$$

Тогда по формулам (9) и (10) найдем коэрцитивную силу и остаточное поле:

$$H_c = 110 \frac{\text{kA}}{\text{M}}$$

$$B_r = 0,47 \text{ T}$$

Площадь гистерезисной петли - энергия, выделяющаяся в единице объема ферромагнетика за один цикл перемагничивания. Найдем эту площадь методом численного интегрирования по трапециям. Площадь гистерезисной петли, $S = 0,13 \text{ V}^2$. Переведем площадь V^2 в $(\text{А*Т/м})^2$. По формулам (9) и (10) найдем коэффициент перехода от U_c и U_{R1} к $B(H)$ и H :

$$k = \frac{N_1}{R_1 l} \frac{R_2 C}{N_2 S} \approx 261828 \frac{\Phi}{\text{м}^3}$$

Тогда удельная потеря энергии за период определяется как

$$W = kS \approx 34037,6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \approx 34 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \quad (11)$$

$$W = 34 * 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{см}^3}$$

Эти данные были получены для длинного стержня длиной $l = 30,3 \text{ см}$ – равной длине соленоида.

Аналогично длинному стержню, найдем коэрцитивную силу и остаточное поля для среднего стержня.

$$U_{R1} = 1,27 \text{ V}, U_c = 0,07 \text{ V}$$

$$H_c = 110 \frac{\text{кА}}{\text{м}}$$

$$B_r = 0,19 \text{ T}$$

Площадь петли гистерезиса в единицах измерения графика $S = 0,12 \text{ V}^2$.

Коэффициент преобразования останется прежним. Тогда потери энергии на перемагничивание

$$W = 31,41 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

$$W = 31,41 * 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{см}^3}$$

4.2 Построение основной кривой намагничивания и зависимости $\mu(H)$

По определению основная кривая намагничивания является геометрическим местом точек вершин семейства гистерезисных петель при различных значениях поля H . Из-за определенной симметрии петли гистерезиса, множество вершин петель можно снимать лишь одного знака. В нашем случае, допустим, это каждый раз будет правая верхняя вершина. График основной кривой намагничивания представлен ниже.

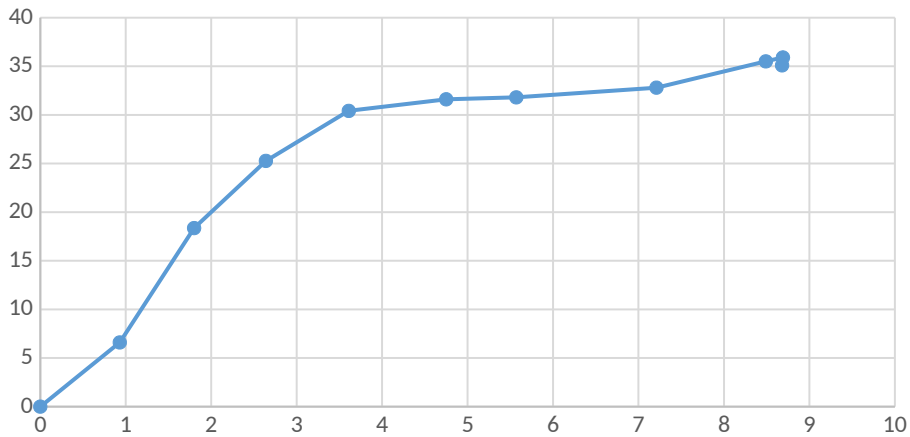


Рис. 6. График зависимости $B(H)$, основная кривая намагниченности

По основной кривой намагничивания, можно построить зависимость магнитной проницаемости $\mu(H)$ по формуле:

$$\mu(H) = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \quad (12)$$

Производную найдем методом численного дифференцирования, используя следующую формулу симметричной разности:

$$f'_i = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (13)$$

Где f_i и x_i – значение функции и ее аргумент в i точке.

В данном случае переходным коэффициентом k от dU_y/dU_x является

$$k = \frac{-R_2 C R_1 l}{N_2 S N_1} \approx 0,95 \frac{Oм^2 \Phi}{см}$$

Полученная зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля представлена на рис. 7.

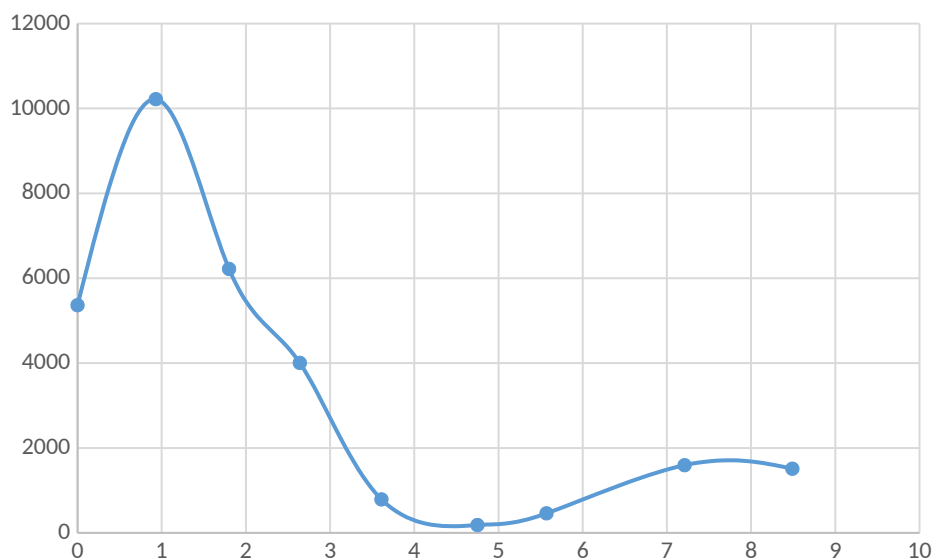


Рис. 7. График зависимости $\mu(H)$

5. Выводы

Сравним полученные данные, с табличными значениями для железа:

	Длинный стержень	Средний стержень	Т.З. Железо
H_c , кА/м	110	110	90
B_r , Т	0,47	0,19	0,9
W , кДж/м ³	34	31	14

Табл. 1. Сравнение полученных основных характеристик железа их табличными значениями

Сильные разбросы данных для короткого стержня помешали измерить основные характеристики магнетика, несмотря на это можно все равно заметить общую тенденцию: при уменьшении длины стержня закономерно уменьшается площадь петли гистерезиса. Однако из общих соображений удельные потери энергии для одного и того же материала должны оставаться неизменными. Уменьшение площади петли гистерезиса связано с тем, что при определении ЭДС говорится, что В пронизывает все витки соленоида. На деле,

если образец имеет длину меньшую длины соленоида, то в местах, где поле не усилено магнетиком, оно равняется просто внешнему полю H , из-за чего и происходит уменьшение площади гистерезисной петли.

Стоит отметить, что помимо потерь на гистерезис, также существуют динамические потери, связанные с созданием вихревых токов в образце. Эти потери, так же как и гистерезисные потери, являются нежелательными. В случае, когда требуется уменьшить гистерезисные потери, следует подбирать материал с маленькой коэрцитивной силой, т.е. такой, чтобы площадь петли гистерезиса для образца была как можно меньшей. Если же требуется уменьшить динамические потери, то достаточно просто проводить эксперимент на низких частотах, так как величина создаваемых вихревых токов зависит от квадрата частоты, таким образом, обычно лишь на больших частотах учитывают динамические потери.

6. Литература

1. Сивухин Д.В. *Общий курс физики*. М.: Физматлит: Изд-во МФТИ 2002. Т. 3: Электричество
2. Таблицы физических величин: Справочник/ Под ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат 1976
3. Харкевич А.А. *Основы радиотехники*, ФИЗМАТЛИТ, 3-е издание, 2007