

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

Физический факультет
Кафедра общей физики
Апрелов Николай Андреевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

Исследование свойств ферромагнитных материалов

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19307

Научный руководитель:

д.ф.-м.н. в.н.с. ИФП СО РАН
Терещенко О.Е.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Солдаткина Е. И.
Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин
Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Исследование свойств ферромагнитных материалов

Апрелов Николай Андреевич

Физический факультет. Электромагнитный практикум. Курсовая работа.

Группа № 19307, 3 семестр, 2020 год.

Научный руководитель:

д. ф.-м. н. **Терещенко Олег Евгеньевич**

Аннотация

Целью данной работы являлось изучение явления перемагничивания магнетиков и определение их основных характеристик. Эксперимент проводился на установке, состоящей из двух цепей, связанных магнитным потоком через соленоид и измерительную катушку. На основе снятых с помощью виртуального осциллографа падений напряжения на сопротивлении первой цепи и на конденсаторе второй цепи, по соответствующим формулам были найдены поля B и H , по которым были построены соответствующие петли гистерезиса и найдены основные характеристики материалов. Также был построен график основной кривой намагничивания по семейству петель гистерезиса. По графику основной кривой намагничивания была определена зависимость коэффициента магнитной проницаемости μ от поля H . Эксперимент был проведён с образцами различных длин и различных материалов. Результаты были сравнены с табличными, по которым удалось установить справедливость данной методики проведения эксперимента.

Ключевые слова: гистерезис, основная кривая намагничивания, магнитная проницаемость, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, потер на перемагничивание.

Содержание

Введение	4
1. Теоретическая часть.....	5
1.1. Классификация магнетиков.....	5
1.2. Магнитное упорядочение	5
1.3. Механизм намагничивания	7
1.4. Процесс перемагничивания.....	10
2. Экспериментальная часть.....	12
2.1. Описание установки и методики измерения	12
2.2. Результаты измерений для ферромагнетиков	14
2.3. Результаты измерений для феррита	16
2.4. Оценка погрешностей.....	17
3. Обсуждение результатов и выводы	18
4. Список литературы	18

Введение

По природе микроносителей магнетизма и характера взаимодействия их между собой и внешним полем, все вещества можно разделить на диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики. Для ферромагнитных материалов (ферромагнетиков) характерна самопроизвольная намагниченность, значительно изменяемая в процессе воздействия внешних факторов таких, как магнитное поле, деформация или температура. Также особенностью ферромагнетиков является значительное превышение внутреннего магнитного поля по сравнению с аналогичными характеристиками внешнего поля. Они играют огромную роль в самых различных областях современной техники. Используются в электротехнике при изготовлении трансформаторов, электромоторов, генераторов, также используются в слаботочной технике связи и радиотехнике, при изготовлении постоянных магнитов.

Если в магнитное поле, образованное токами внести то или иное вещество, то это магнитное поле изменится, так как всякое вещество является магнетиком и способно приобрести магнитный момент. Этот магнитный момент складывается из элементарных магнитных моментов, связанных с отдельными частицами тела. У ферромагнетиков наблюдается остаточная намагниченность: после внесения стержня из ферромагнитного материала в соленоид, по которому проходит ток, и намагнитить его до насыщения, а затем уменьшать ток в соленоиде, а вместе с ним и поле, то можно заметить, что индукция поля в стержне в процессе его размагничивания остаётся всё время большей, чем в процессе намагничивания. Стержень можно вынуть из соленоида и использовать как постоянный магнит. Чтобы размагнитить стержень, нужно пропустить по соленоиду ток противоположного направления, то есть приложить внешнее магнитное поле с противоположным направлением вектора индукции. Такое поле, позволяющее полностью размагнитить намагниченный ферромагнетик, называют коэрцитивным. Отставание внешнего поля B_0 от индукции B называется явлением гистерезиса. Если построить график кривой намагничивания, при внесении ферромагнитного образца в соленоид, то он образует симметричную гистерезисную петлю, которая характеризует потери энергии на перемагничивание. Данная работа посвящена изучению процессов намагничивания и перемагничивания ферромагнетиков, а также определению основных характеристик этих материалов при помощи петли гистерезиса предельного цикла перемагничивания.

1. Теоретическая часть

1.1. Классификация магнетиков

По природе микроносителей магнетизма и характера взаимодействия их между собой и с внешним полем все вещества можно разделить на

- диамагнетики,
- парамагнетики,
- ферромагнетики,
- антиферромагнетики
- ферримагнетики.

Обычно «диа–» и «парамагнетики» объединяются в группу **слабмагнитных** веществ, которые в отсутствие внешнего магнитного поля не намагничены.

В группу **сильномагнитных (магнитоупорядоченных)** веществ входят «ферро–» и «ферримагнетики», имеющие большую намагниченность даже в отсутствие внешнего магнитного поля, а также «антиферромагнетики», имеющие очень малую суммарную намагниченность. Они обладают следующими свойствами:

- кристаллическим строением;
- наличием самопроизвольной намагниченности;
- большим положительным значением магнитной восприимчивости χ , если для слабмагнитных веществ $\chi = (10^{-8} \div 10^{-3})$, то для сильномагнитных — магнитная восприимчивость достигает значений $10^4 \div 10^5$;
- нелинейной зависимостью магнитной восприимчивости от магнитного поля и температуры;
- способностью намагничиваться до насыщения при обычных температурах в слабых магнитных полях;
- гистерезисом — зависимостью магнитных свойств от «магнитной предыстории»;
- точкой Кюри (Нееля), т.е. температурой, выше которой вещество теряет ферромагнитные свойства.

1.2. Магнитное упорядочение

Главное отличие сильномагнитных веществ от слабомагнитных состоит в степени упорядоченности магнитных моментов. Магнитное упорядочение есть взаимное *самопроизвольное* (без участия внешнего магнитного поля) выстраивание магнитных моментов в веществе.

Различают следующие типы магнитного упорядочения:

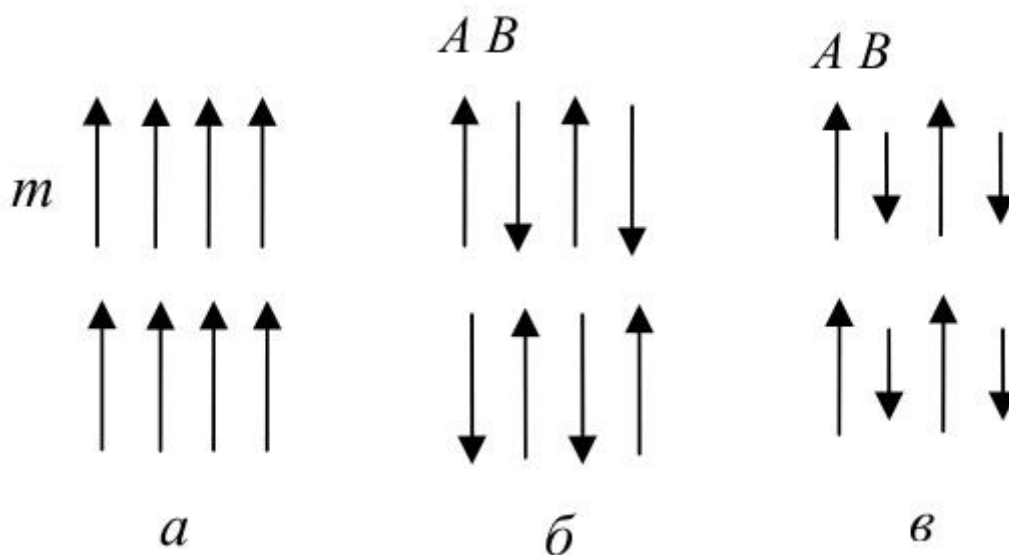


Рис. 1. Типы магнитного упорядочения: *a* – ферромагнитное; *б* – антиферромагнитное; *в* – ферримагнитное.

Ферромагнитное упорядочение характеризуется параллельным расположением магнитных моментов \vec{m} атомов и соответственно большой намагниченностью (рис. 1, а).

Антиферромагнитное коллинеарное упорядочение, при котором магнитные моменты атомов располагаются антипараллельно друг другу (рис. 1, б). Если объединить все магнитные моменты атомов, направленные вверх, в магнитную подрешетку А, а моменты, направленные вниз, — в подрешетку В, то суммарная самопроизвольная намагниченность окажется равной нулю. Несмотря на то, что каждая подрешетка имеет большую по величине спонтанную намагниченность, в целом вещество ведет себя как слабомагнитное (намагниченность антиферромагнетика составляет $\sim 0,1\%$ от намагниченности ферромагнетика).

Ферримагнетик, так же, как и антиферромагнетик, состоит из двух ферромагнитных подрешеток, магнитные моменты которых ориентированы навстречу друг другу (рис. 1, в). Однако в отличие от антиферромагнетиков эти магнитные моменты не равны друг другу, в результате чего образуется результирующая спонтанная намагниченность, которая исчезает выше температуры Кюри. Различие магнитных моментов подрешеток обусловлено

тем, что подрешетки образуются из ионов разных элементов либо из ионов одного и того же элемента, но с разной валентностью. Интересно отметить, что магнетит Fe_3O_4 , первое сильномагнитное вещество, известное в глубокой древности, является ферримагнетиком. Одна подрешетка магнетита образована узлами кристаллической решетки с тетраэдрическим кристаллическим окружением, в которых располагаются ионы Fe^{3+} , другая подрешетка - узлами с октаэдрическим окружением, занятыми в равной доле ионами Fe^{2+} и Fe^{3+} . Таким образом, спонтанная намагниченность ферримагнетика равна разности намагниченностей подрешеток.

1.3. Механизм намагничивания

Внесение ферромагнетика в магнитное поле приводит к его намагничиванию, т.е. увеличению средней намагниченности. Зависимость намагниченности \vec{M} от магнитного поля H для всех магнитоупорядоченных веществ нелинейная, соответственно магнитная восприимчивость χ не является константой.

Если ферромагнетик, находящийся в размагниченном состоянии ($\vec{M} = 0$), поместить в магнитное поле, а затем начать плавно увеличивать поле, то получим начальную кривую намагничивания, примерный вид которой представлен на рис. 2.

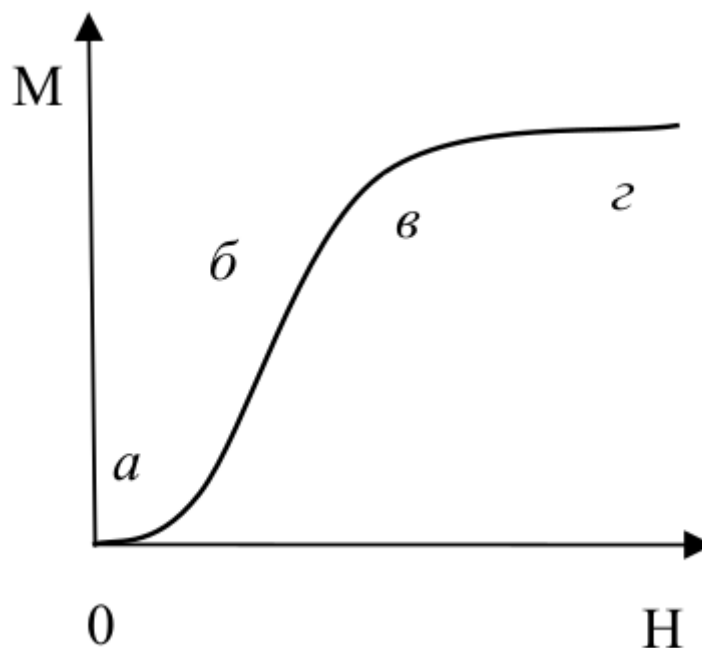


Рис. 2. Основная кривая намагничивания:
 0 – размагниченное состояние; $0a$ – область обратимого намагничивания; ab – необратимое смещение границ доменов; $бв$ – область вращения магнитных моментов; $вz$ – парапроцесс.

Исходное состояние ($\vec{H} = 0$, $\vec{M} = 0$) соответствует размагниченному состоянию тела, когда все домены ориентированы равномерно во всех направлениях (рис. 3, а)

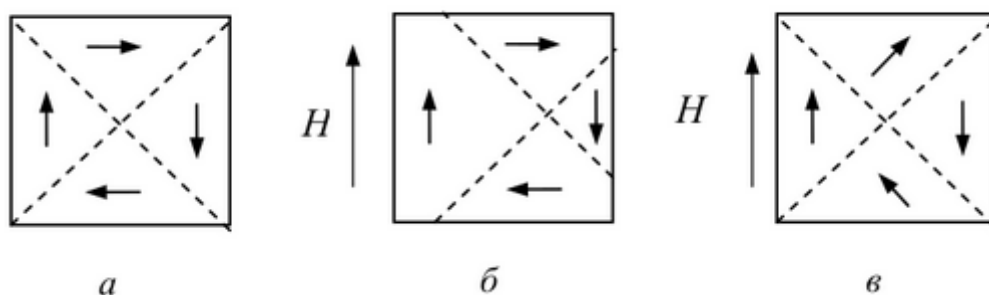


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая основные процессы намагничивания:
 a – ненамагниченное состояние; $б$ – процесс смещения границ; $в$ – процесс вращения.

Плавное увеличение магнитного поля приводит к упругому смещению границ доменов таким образом, что размеры доменов, магнитные моменты которых близки к направлению магнитного поля, увеличиваются за счет доменов с противоположным направлением магнитных моментов (рис. 8, б).

Процесс смещения границ в слабых полях (на начальном участке $0a$ кривой намагничивания) - обратимый. Это значит, что при увеличении поля границы доменов движутся в одну сторону, а при уменьшении поля смещение границ будет происходить в обратном направлении.

В более сильных полях движение границ перестает быть плавным. Отдельные участки границ изменяют свое положение скачкообразно, и кривая намагничивания круто идет вверх. На этом участке (ab) движение границ большей частью необратимо, что приводит к скачкообразному изменению намагниченности (эффект Баркгаузена). Скачкообразное движение границ приводит к быстрому изменению намагниченности образца, что вызывает появление вихревых токов, а следовательно, к нагреванию образца.

В достаточно сильных полях движение границ прекращается и энергетически выгодным становится поворот магнитных моментов к направлению вектора магнитного поля (см. рис.3, b). На этом участке (bc) процесс намагничивания протекает медленно. И, наконец, когда в результате вращения вектор спонтанной намагниченности максимально приблизится к вектору \vec{H} , намагниченность образца достигнет *технического насыщения*.

Если после достижения технического насыщения продолжать увеличивать магнитное поле, то намагниченность вещества будет слабо изменяться, возрастая почти линейно. Увеличение самопроизвольной намагниченности в этом случае происходит за счет ориентации магнитных моментов, дезориентированных тепловым движением. Этот участок кривой намагничивания (cd) носит название *истинного насыщения* и соответствует *парапроцессу* (название подчеркивает аналогию с линейной зависимостью от поля намагниченности парамагнетика).

Следовательно, принципиальным отличием парапроцесса от намагничивания на первых двух стадиях является то, что в этом случае *возрастает величина намагниченности спонтанных областей*, за счет подавления магнитным полем тепловых колебаний магнитных моментов атомов. Парапроцесс заметнее проявляется вблизи точки Кюри.

В ферромагнетиках, помимо рассмотренных трех стадий намагничивания, добавляется четвертая, суть которой состоит в индуцировании магнитным полем неколлинеарного расположения самопроизвольной намагниченности подрешеток А и В. Это приводит к увеличению магнитного момента подрешетки, направленной по магнитному полю. Этот эффект возникает в ферромагнетиках только при определенных значениях магнитного поля, называемых критическим, и характерен для ферритов с ослабленным подрешеточным обменным взаимодействием.

Для технических магнитных материалов решающее значение имеют первые две стадии процесса намагничивания.

1.4. Процесс перемагничивания

Уменьшение магнитного поля, намагнитившего ферровещество до технического насыщения, приводит к уменьшению намагниченности, но на меньшую величину по сравнению с первоначальной кривой намагничивания, т. е. кривая не пойдет по тому же пути (рис. 4). Эта необратимость процесса перемагничивания называется гистерезисом.

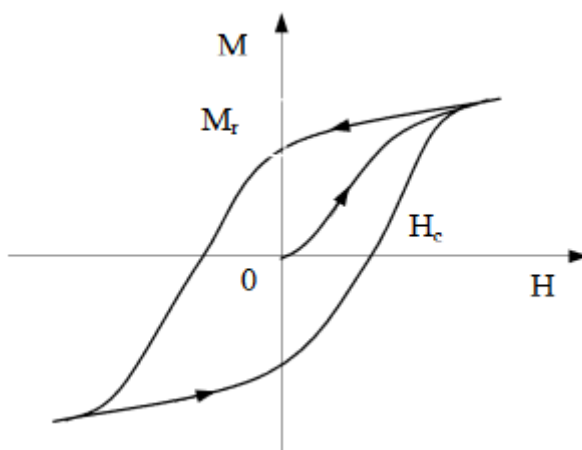


Рис. 4. Начальная кривая намагничивания и петля гистерезиса:
 H_c — коэрцитивное поле, M_r — остаточная намагниченность.

При достижении магнитным полем нулевого значения намагниченность образца не обращается в нуль, а принимает некоторое значение, называемое остаточной намагниченностью \vec{M}_r . Остаточная намагниченность будет существовать бесконечно долго, если вещество не подвергать действию сильных магнитных полей. Информация, записанная на магнитных пленках от музыки до вычислительных программ, сохраняется благодаря этому физическому явлению.

Для полного размагничивания образца необходимо приложить достаточно большое магнитное поле, называемое коэрцитивным \vec{H}_c , направленное противоположно полю намагничивания.

При циклическом перемагничивании кривая намагничивания образует симметричную гистерезисную петлю, которая характеризует потери энергии на перемагничивание, обусловленные следующими процессами.

1) Необратимое движение доменной границы

При наличии внутри магнетика неоднородностей, примесей, дефектов решетки, приводящих к местным изменениям магнитной энергии, движение границы домена начинается только тогда, когда внешнее магнитное поле достигает определенной (критической) величины, т.е. скачкообразно. Быстрое движение стенок влечет за собой быстрое изменение магнитного поля, которое в свою очередь создает вихревые токи, последние тратят энергию на нагревание магнетика. Другой эффект состоит в том, что когда домен резко изменяется, то часть кристаллов из-за магнитострикции изменяют свои размеры. Каждый быстрый сдвиг доменной стенки вызывает звуковую волну, которая тоже уносит энергию. Благодаря таким эффектам эта часть кривой намагничивания необратима, т. е. происходит потеря энергии.

2) Необратимое вращение магнитных моментов доменов

Это происходит в материалах, состоящих из мелких зерен или из порошка, т. е. в однодоменных структурах. В малых объемах образование доменной структуры энергетически невыгодно, так как слишком большую часть объема занимал бы междоменный слой, толщина которого от размера частиц не зависит. Поскольку вещество однодоменное, то вектор намагниченности должен перевернуться как целое в направлении трудного намагничивания, на что требуется большое поле и соответственно потери энергии на перемагничивание очень велики.

3) Задержка образования в образце центров перемагничивания

Этот тип потерь в чистом виде наблюдается в однородных материалах, имеющих одну ось легкого намагничивания. В них перемагничивание совершается одним необратимым скачком Баркгаузена. Обычно такие материалы имеют прямоугольную петлю гистерезиса.

Петля гистерезиса, полученная при условии насыщения, называется предельной петлей и является важнейшей характеристикой ферромагнетика. Из неё можно определить: остаточную намагниченность \vec{M}_r , коэрцитивное поле \vec{H}_c и потери энергии за один цикл перемагничивания в единице объема

$$Q = \frac{1}{4\pi} \oint H dM \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3},$$

где $\oint H dM$ – произведение площади петли на масштабы M и H (при условии $M \gg H$, что выполняется в ферромагнетиках). При постепенном уменьшении амплитуды циклов перемагничивания от H_{max} до 0, координаты вершины петли опишут основную кривую намагничивания, из которой можно определить магнитную восприимчивость χ вещества на разных участках

кривой намагничивания, т. е. зависимость $\chi(H)$, примерный вид которой приведен на рис. 5.

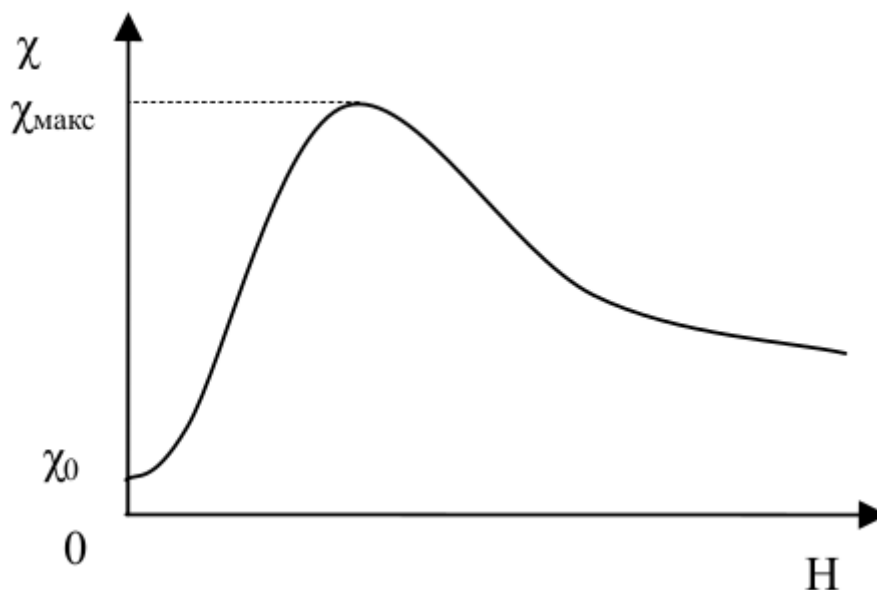


Рис. 5. Примерный вид зависимости магнитной восприимчивости ферромагнетика χ от магнитного поля H .

Поскольку связь между намагничённостью и магнитным полем нелинейная, то для характеристики ферровеществ пользуются несколькими видами магнитной восприимчивости. Наиболее часто используют понятия начальной, дифференциальной и максимальной магнитной восприимчивости.

Восприимчивость, соответствующая начальному участку кривой намагничивания (0а, рис. 2), называется *начальной* χ_0 , обычно на этом участке достаточно хорошо выполняется линейная зависимость \vec{M} от \vec{H} , тогда $\chi_0 = \frac{M_0}{H_0}$. Дифференциальную магнитную восприимчивость определяют как производную от намагничённости \vec{M} по магнитному полю \vec{H} ($\chi_{dif} = \frac{dM}{dH}$) для любой точки кривой намагничивания.

2. Экспериментальная часть

2.1. Описание установки и методики измерения

Основными элементами установки являлись трансформатор, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), соленоид, реостат, магазин сопротивлений, магазин ёмкостей, переходный модуль, персональный компьютер, генератор низких частот и осциллограф. Схема установки представлена на рис. 6.

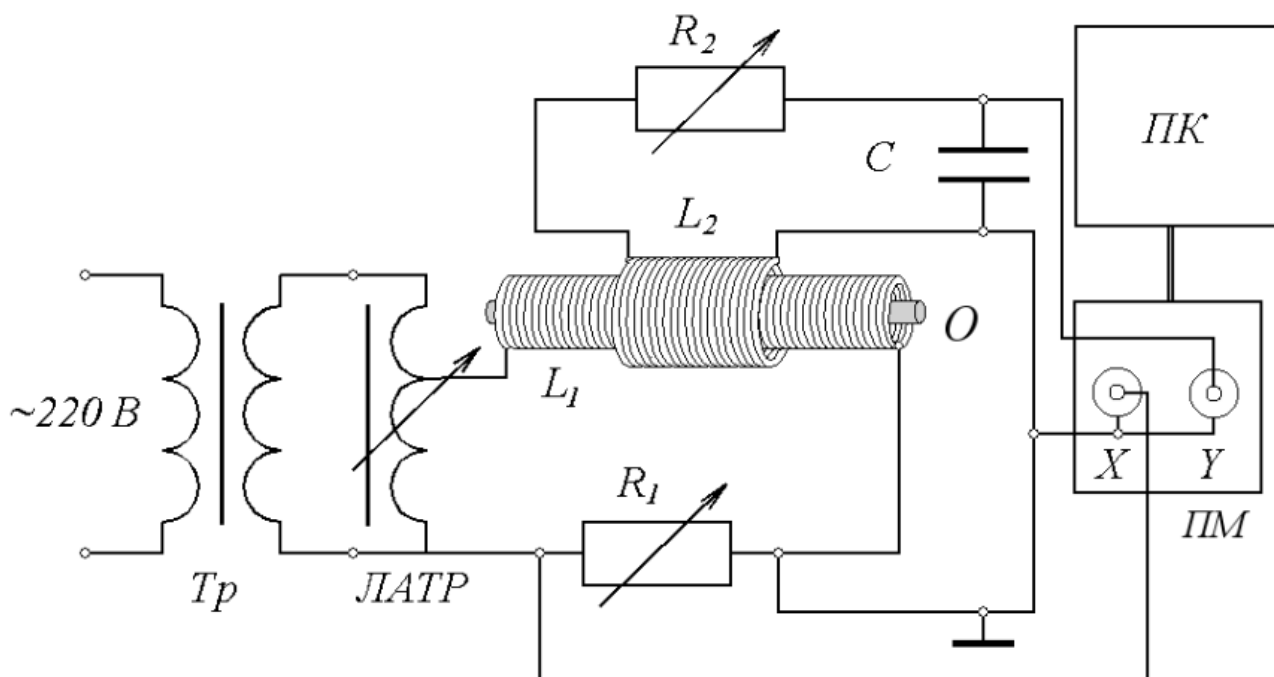


Рис. 6. Схема установки для наблюдения петли гистерезиса:
Tp – трансформатор; ЛАТР – лабораторный автотрансформатор; L_1 – намагничивающая катушка; L_2 – измерительная катушка; O – исследуемый образец; R_1 – измерительное сопротивление; R_2 и C – сопротивление и конденсатор интегрирующей цепочки; ПМ – переходной модуль виртуального осциллографа; ПК – персональный компьютер.

Исследуемый образец O помещается в длинную катушку; L_1 (соленоид), через которую протекает ток I_1 . Величина поля H , возбуждаемого этим током, равна $H = N_1 I_1 / l$, где l — длина соленоида. Если последовательно с первичной обмоткой включить известное сопротивление R_1 , то напряжение, снимаемое с этого сопротивления, будет пропорционально полю H

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

Если это напряжение подать на X вход осциллографа (регистратора), то отклонение луча по горизонтали будет пропорционально полю H .

В средней части соленоида намотана короткая измерительная катушка L_2 с числом витков N_2 , к которой подключена интегрирующая $R_2 C$ цепочка. Из соотношения

$$U_c = -\frac{N_2 S}{R_2 C} B,$$

где S – площадь витка, следует:

$$B = -\frac{R_2 C}{N_2 S} U_c$$

Если напряжение U_C подать на вход Y осциллографа (регистратора), то на экране осциллографа (монитора) получится зависимость $B(H)$.

Питание установки, предназначенной для изучения свойств ферромагнетиков, осуществляется переменным напряжением с частотой 50 Гц, что позволяет получить на экране осциллографа полную петлю гистерезиса.

Плавное изменение амплитуды тока, а следовательно, и поля H , от 0 до H_{max} , соответствующего насыщению образца, позволяют по координатам вершины петли получить основную зависимость $B(H)$. и построить график функции дифференциальной магнитной проницаемости от магнитного поля H :

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

В данной работе были использованы образцы из ферромагнетиков различной длины (10 см, 20 см, 30 см, радиус 2 мм) и феррита (длина 16 см, радиус 5 мм). Количество витков в соленоиде $N_1 = 1558$. Диаметр соленоида $d_c = 0,83$ см. Количество витков в измерительной катушке $N_2 = 300$. Диаметр катушки $d_k = 0,15$ см. $R_1 = 5,6$ Ом, $R_2 = 6,8$ кОм, $C = 22$ мкФ. Частота переменного тока $f = 50$ Гц.

2.2. Результаты измерений для ферромагнетиков

Данные, полученные с помощью виртуального осциллографа, были обработаны с помощью программы, написанной на языке Python. По ним были построены соответствующие графики, приведённые ниже:

Петля гистерезиса предельного цикла перемагничивания
и основная кривая намагничивания

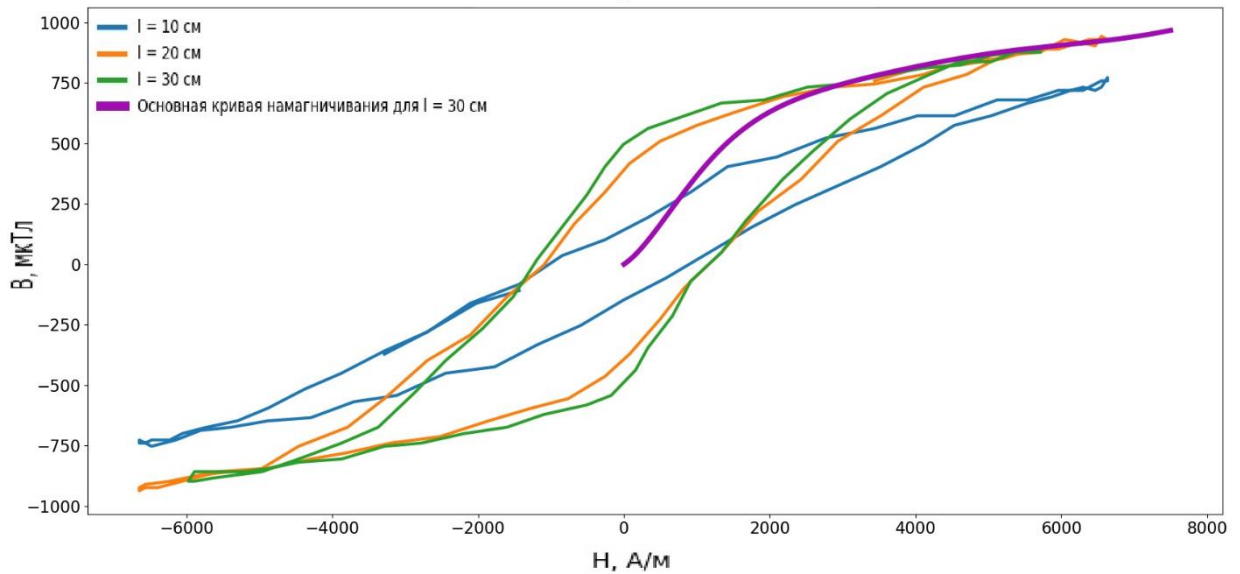


Рис. 7. Петля гистерезиса предельного цикла перемагничивания и основная кривая намагничивания ферромагнитных стержней из одного материала, но разной длины.

Зависимость $\mu(H)$

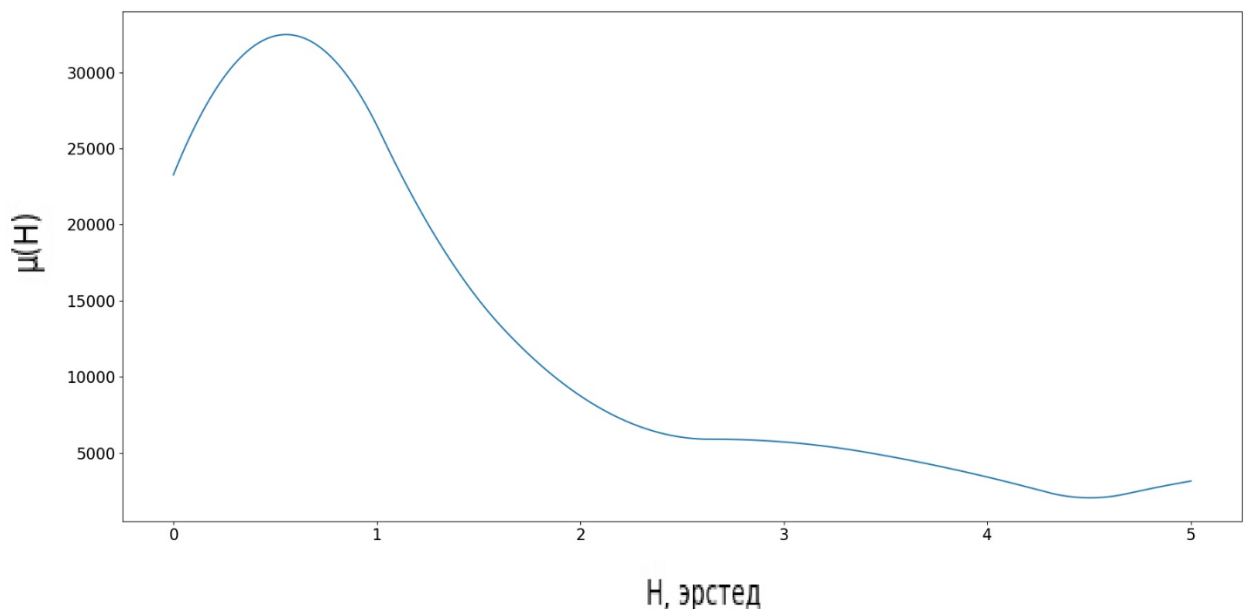


Рис. 8. Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от H .

Основная кривая намагничивания была найдена методом полиномиальной интерполяции. Площадь графика была определена методом численного интегрирования массива данных по трапециям, реализуемым библиотекой `scipy`. Потери на перемагничивание в единице объёма для стержня длиной 30 см и диаметром 3 мм составили $Q = 1,382 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$. Объём

образца был оценен, как объём цилиндра, значит $V = \pi r^2 l = 3.768 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Тогда $W = QVf = 0,87 \text{ Вт}$.

Коэрцитивное поле H_c и остаточное магнитное поле B_r были определены по графику как точки пересечения с соответствующими осями координат. $H_c = 1,228 \frac{\text{кА}}{\text{м}}$, $B_r = 547 \text{ мкТл}$.

С помощью метода дифференцирования массива из библиотеки numpy была получена зависимость $\mu(H)$.

2.3. Результаты измерений для феррита

Аналогичная работа была проведена для ферритового стержня:

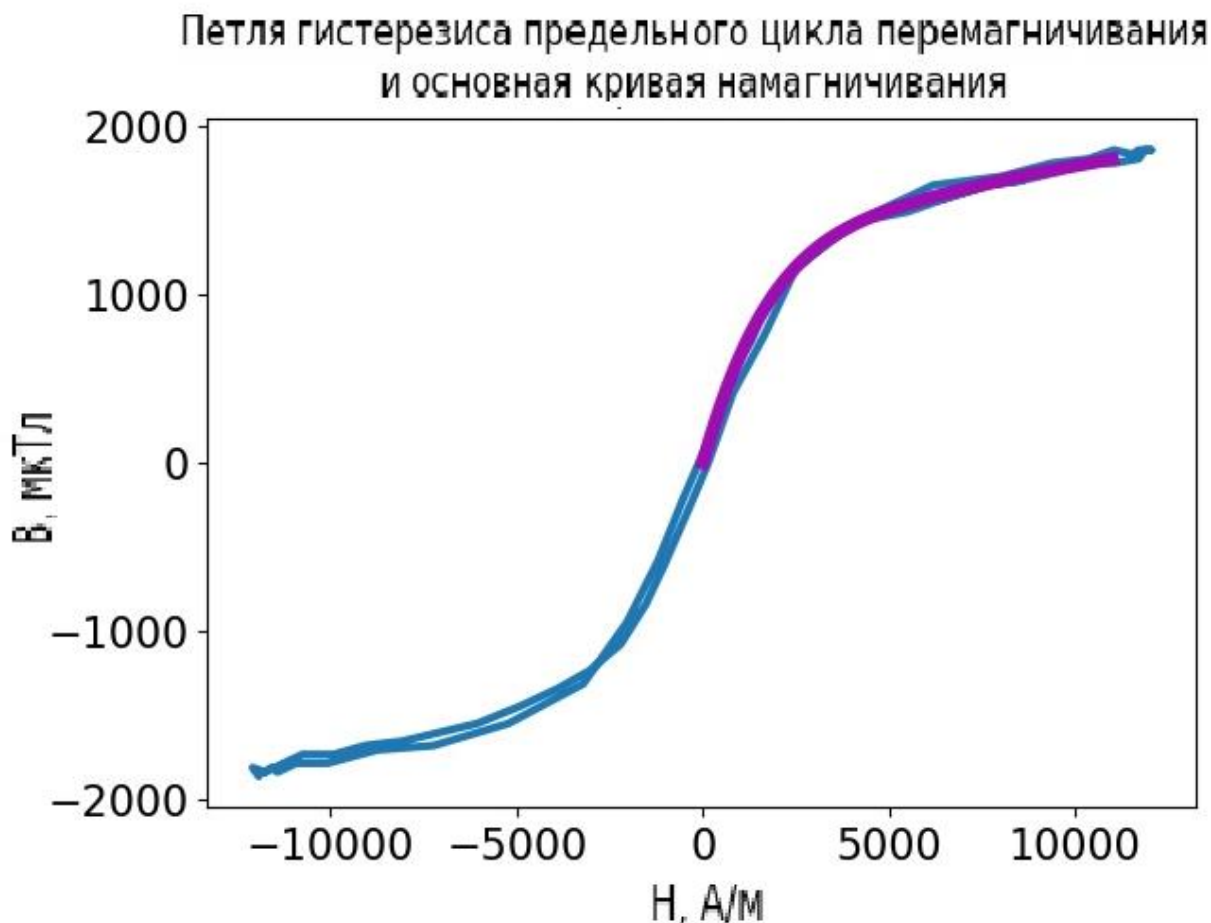


Рис. 9. Петля гистерезиса предельного цикла перемагничивания и основная кривая намагничивания феррита.

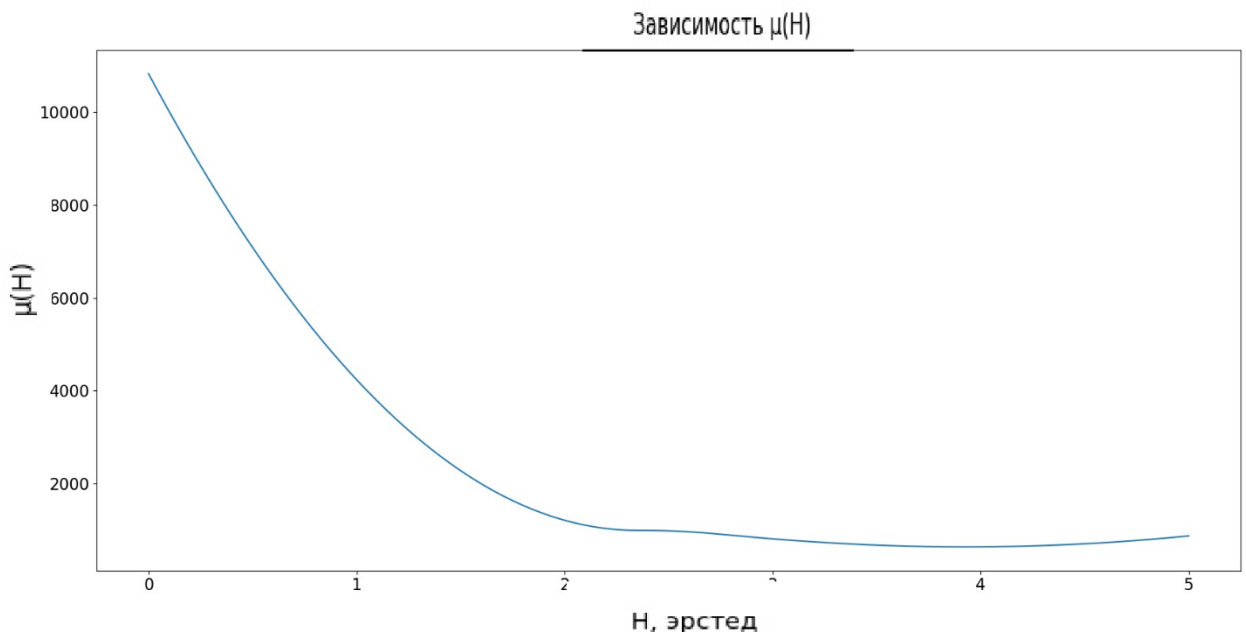


Рис. 10. Зависимость магнитной проницаемости феррита от H .

Таким же подходом были вычислены следующие величины для ферритового стержня длиной 16см и диаметром 5 мм: $Q = 47,4 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$, $W = 29,8 \text{ мВт}$, $H_c = 135 \frac{\text{А}}{\text{м}}$, $B_r = 20 \text{ мкТл}$.

2.4. Оценка погрешностей

Погрешности при данной методике измерений определяются погрешностью осциллографа, погрешностью прямых измерений и достоверностью аппроксимаций функциями в программе. Погрешность виртуального осциллографа составляет 3%.

Вычислим случайную погрешность косвенных измерений по следующей формуле:

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2},$$

где Δy – погрешность величины, определяемой по формуле, x_i – измеримая величина, Δx_i – абсолютная погрешность измеримой величины.

Для ферромагнетика: $\Delta B_r = 26,2 \text{ мкТл}$, $\Delta H_c = 74,2 \frac{\text{А}}{\text{м}}$.

Суммарная относительная погрешность: $\Delta = 5,37 \%$

Для феррита: $\Delta B_r = 1,64 \text{ мкТл}$, $\Delta H_c = 9,17 \frac{\text{А}}{\text{м}}$.

Суммарная относительная погрешность: $\Delta = 6,79 \%$

3. Обсуждение результатов и выводы

Сравнивая петли гистерезиса предельного цикла перемагничивания, можно сделать вывод что потери на перемагничивание прямо пропорциональны длине стержней. Для ферромагнетиков потери достаточно большие, в то время как потери в феррите почти незначительны. Это объясняется тем, что данный ферромагнетик относится к магнитотвёрдым материалам, в то время как феррит – к магнитомягким.

В подтверждение того, что ферромагнитный образец близок по характеристикам к железу, можно привести очень похожую зависимость магнитной проницаемости от поля H (рис. 8). Магнитная проницаемость достаточно большая, что характерно для некоторых типов железа.

Так же возникли потери и погрешности, связанные с вихревыми токами, т.к. помимо потерь энергии на гистерезис, также тратится энергия и на создание вихревых токов в проводнике. Данные потери нежелательны, но неизбежны. Чтобы минимизировать создание вихревых токов в проводнике, нужно чтобы материал обладал как можно меньшим удельным сопротивлением. Для уменьшения потерь на гистерезис нужно, чтобы петля была как можно тоньше, что соответствует малой коэрцитивной силе.

Таким образом было доказано, что ферромагнетики обладают большими потерями на перемагничивание, в связи с перестройкой доменной структуры, в то время как ферриты почти не имеют потерь на перемагничивание, что делает их незаменимым продуктом в электротехнике и радиотехнике.

4. Список литературы

- 1) *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. III. Электричество. (М.: издательство МФТИ, 2004. – 656 с. – ISBN 5-9221-0227-3; 5-89155-086-5.)
- 2) *А. А. Преображенский.* Магнитные материалы и элементы. (М.. Высшая школа, 1976.)
- 3) Ферримагнетики [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ферримагнетики> (дата обращения: 12.12.2020).

- 4) Ферромагнетики [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ферромагнетики> (дата обращения: 12.12.2020).
- 5) *Золкин А.С.* Как выполнить курсовую работу. От курсовой работы к диплому и диссертации: методическое пособие. (М.: Новосиб. Гос. Ун-т. Новосибирск, 2009. 116 с.)