

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Кузьмина Полина Олеговна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Определение коэффициента размагничивания ферритовых
сердечников**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19304

Научный руководитель:

С. В. Туманов

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

В. В. Максимов

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к. т. н. В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Целью работы являлось исследование коэффициента размагничивания ферромагнитных и ферритовых цилиндрических стержней, а также тора с разрезом, при их намагничивании. В ходе работы построены петли магнитного гистерезиса, основные кривые ферромагнетиков, определена магнитная проницаемость. Для определения магнитного поля и индукции в образце использовался индуктивный метод. Измерены магнитные проницаемости и коэффициенты размагничивания для имеющихся образцов, проведено сравнение с теоретическими расчётами. Показано, что магнитная проницаемость тел сильномагнитных материалов почти всегда оказывается значительно меньше магнитной проницаемости самого вещества, за исключением замкнутых (без зазоров) сердечников или линейных образцов с длиной, превышающей поперечный размер в сотни раз.

Ключевые слова: коэффициент размагничивания, ферромагнетики, магнитный гистерезис.

Оглавление

Введение.....	4
Часть 1. Измерение центрального коэффициента размагничивания стержней цилиндрической формы.....	6
1. Теоретическая часть	6
2. Описание эксперимента	9
1. Описание установки	9
2. Методика измерений КР	11
3. Результаты измерений	12
4. Ошибки измерений.	18
Часть 2. Измерение коэффициента размагничивания образцов тороидальной формы с зазором.....	19
1. Описание эксперимента	19
1. Описание установки	19
2. Методика измерений КР	20
2. Результаты измерений	21
3. Теоретическое дополнение	23
Выводы	25
Заключение	25
Приложение	26
Список литературы	26

Введение

В настоящее время известно, что магнитные свойства вещества обусловлены спиновым и орбитальным магнитными моментами электронов, а также магнитными моментами ядер атомов. По природе носителей магнетизма и характера взаимодействия их между собой и с внешним полем все вещества можно разделить на слабомагнитные – диамагнетики и парамагнетики, и сильномагнитные – ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики. Отличительным свойством сильномагнитных веществ является упорядоченность магнитных моментов атомов: внутреннее (обменное) взаимодействие приводит к параллельной ориентации магнитных моментов отдельных атомов в макроскопических областях, называемых доменами.

Ферримагнетик – кристаллическое вещество, магнитную структуру которого можно представить в виде двух и более подрешёток. Магнитные моменты атомов и ионов различных подрешёток находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения, причём результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля. По своим магнитным свойствам они аналогичны ферромагнетикам.

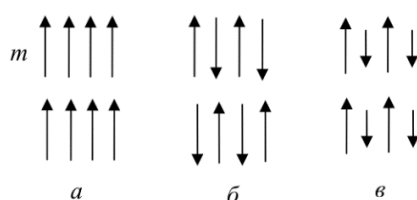


Рис. 1. Типы магнитной упорядоченности: а – ферромагнитные, б – антиферромагнитные, в – ферримагнитные.

Наибольший практический интерес представляют ферриты - соединения оксида железа Fe_2O_3 с более основными оксидами других металлов, являющиеся ферримагнетиками. Одним из основных достоинств ферритов является высокое удельное электрическое сопротивление в сочетании с достаточно высоким значением магнитной проницаемости. Особенно выгодно применение их на высоких частотах при малых индукциях. Ферриты используют в качестве магнитных материалов в радиотехнике, электронике, автоматике, вычислительной технике (ферритовые поглотители электромагнитных волн, антенны, сердечники, элементы памяти, постоянные магниты и т. д.).

Магнитные свойства ферромагнетиков характеризуются неоднозначной зависимостью магнитной индукции в веществе от напряженности внешнего

магнитного поля при его изменении – магнитным гистерезисом. Данная зависимость определяется предшествующей историей намагничивания ферромагнетика. На вид магнитного гистерезиса оказывает сильное влияние не только материал образца, но и его форма. Влияние формы учитывается коэффициентом размагничивания (размагничивающим фактором).

Коэффициенты размагничивания (КР) являются важной характеристикой «разомкнутых» в магнитном отношении тел из ферромагнитных материалов. В зависимости от формы магнитных тел КР могут быть константой, не зависящей от магнитных свойств материала, но во многих других случаях они зависят не только от формы, относительных размеров тел и магнитных свойств материала, но и от магнитного состояния вещества в процессе намагничивания тела. В практике магнитных измерений и контроля ферромагнитных изделий наиболее широкое распространение получили изделия и образцы в виде цилиндрического стержня.

Тема расчёта КР рассматривалась достаточно редко. В публикации [1] был подробно рассмотрен КР цилиндрических ферромагнитных стержней при насыщении магнетика, представлен вывод формул. В 2006 г. В. А. Зембеков написал диссертацию [2], в которой рассмотрел зависимость режима намагничивания цилиндрических стержней от КР. В 2015 г. С. Г. Сандомирский произвел подробные расчёты КР для тел различной формы [3]. Между тем, практически отсутствуют сведения о КР цилиндрических стержней небольшой относительной длины, каковыми являются многие образцы и изделия в практике магнитных измерений и контроля.

Все это определяет актуальность и необходимость дальнейших теоретических и экспериментальных исследований КР цилиндрических стержней в процессе их намагничивания.

Целью работы является исследование коэффициента размагничивания ферромагнитных цилиндрических стержней при их намагничивании. При этом решались следующие задачи:

1. Изучить процесс намагничивания разомкнутых в магнитном соотношении тел из ферромагнитного материала;
2. Ознакомиться с методикой измерения магнитной индукции в центральном сечении образца;
3. Экспериментально определить КР образцов цилиндрической и тороидальной формы;

4. Сопоставить измеренные значения с известными формулами расчёта КР.
5. Оценить погрешность измерений.

Часть 1. Измерение центрального коэффициента размагничивания стержней цилиндрической формы.

1. Теоретическая часть

Характерной особенностью ферромагнетиков является сложная нелинейная зависимость между индукцией и магнитным полем в веществе [8]. По мере возрастания поля намагниченность M сначала быстро растёт, а затем становится практически постоянной. Магнитная индукция также растёт с возрастанием поля, а в состоянии насыщения $B = H + M = H + const$, т. е. кривая $B(H)$ переходит в прямую под углом 45° . Здесь и далее все формулы приводятся в СГС.

Для ферромагнетиков из-за наличия спонтанной намагниченности обычное определение магнитной восприимчивости и проницаемости с помощью соотношений $M = \chi H$ и $B = \mu H$ лишено смысла. Величины χ и μ в этом случае определяются дифференциальными соотношениями

$$\chi = \frac{dM}{dH} \quad \mu = \frac{dB}{dH}$$

и являются функциями напряженности поля. Эти функции сначала возрастают с полем, затем проходят через максимум, и, наконец, в сильных полях, когда достигнуто состояние насыщения, магнитная проницаемость стремится к единице, а магнитная восприимчивость к нулю. Значение μ в максимуме у большинства ферромагнетиков при обычной температуре составляет многие сотни и тысячи единиц.

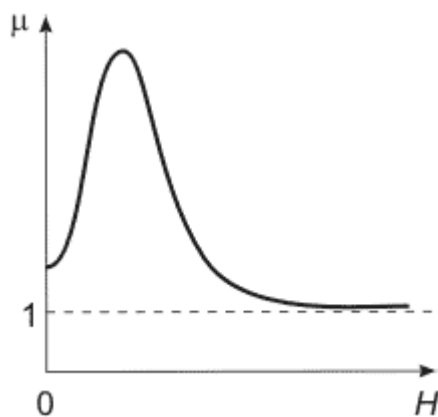


Рис. 2. Магнитная проницаемость ферромагнетиков.

Рассмотрим подробнее образец разомкнутой формы, помещённый во внешнее однородное поле H [4].

Воспользуемся определением КР по И. И. Киферу [5].

При намагничивании во внешнем поле образца из ферромагнитного материала разомкнутой формы (например, цилиндра) на его краях образуются магнитные полюсы, создающие внутри образца магнитное поле обратного по отношению к внешнему полю направления. Размагничивающее поле H_0 пропорционально и направлено противоположно намагниченности вещества M :

$$H_0 = -4\pi NM$$

Коэффициент N называется размагничивающим фактор, в общем случае является зависящим от координат тензором. В литературе также встречается определение КР, как $H_0 = -NM$. В таком случае КР увеличивается в 4π раза.

Если образец находится во внешнем магнитном поле напряжённостью H , то истинная напряжённость поля в образце равна:

$$H_i = H - 4\pi NM$$

Магнитная индукция ферромагнетика:

$$B = H_i + 4\pi M$$

Магнитная проницаемость тела:

$$\mu_T = \frac{dB}{dH} = \frac{\mu}{1 + N(\mu - 1)}$$

Где $\mu = \frac{dB}{dH_i}$ — магнитная проницаемость материала образца. Итак, магнитная проницаемость и восприимчивость тела зависят не только от физической природы материала, но и от формы тела. Обе эти величины для тела меньше, чем для вещества. При достаточно большой магнитной проницаемости образца μ_T определяется только КР:

$$\mu_T = \frac{dB}{dH} \approx \frac{1}{N}$$

Таким образом, для достижения магнитной индукции B в теле, характеризующимся размагничивающим фактором N , необходимо приложить внешнее поле:

$$H = H_i + N(B - H_i)$$

В практике магнитных измерений различают магнитометрический (N_m) и баллистический (центральный) КР (N_b). Первый применяется при измерении усредненной по объёму всего тела намагниченности M – магнитного момента единицы объёма. Вторым используется при баллистическом методе измерения намагниченности, когда определяется среднее по поперечному сечению в центральной части образца значение намагниченности.

КР может быть точно рассчитан только для эллипсоидов вращения. В силу однородности намагниченности для эллипсоида нет различия между N_m и N_b . КР можно рассчитать по формулам:

$$\begin{aligned} \lambda < 1 & \quad N = \frac{1 - \frac{\lambda}{\sqrt{1-\lambda^2}} \arccos \lambda}{1 - \lambda^2} \\ \lambda > 1 & \quad N = \frac{\frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2-1}} \ln(\lambda + \sqrt{\lambda^2-1}) - 1}{\lambda^2 - 1} \\ \lambda > 50 & \quad N = \frac{\ln 2\lambda - 1}{\lambda^2} \end{aligned}$$

Где λ – отношение полуосей b/a , если поле H направлено вдоль b .

В частности, для шара $N = 1/3$, для очень тонкой пластинки $N = 1$, для бесконечно длинного цилиндра в поперечном поле $N = 1/2$.

В случае цилиндрических образцов магнитометрический фактор больше баллистического, т. е. наименьшее значение КР принимает в центре стержня, причём оба зависят от магнитных свойств материала и характера распределения локальных значений намагниченности в образце.

Наиболее полно исследован случай $\chi \rightarrow \infty$, где χ – магнитная восприимчивость ($\mu = 1 + 4\pi\chi$) [6]. Баллистический КР сплошных и полых цилиндров и стержней прямоугольного сечения можно рассчитать по эмпирической формуле Розенблата [7]:

$$N_b = \frac{4S(\ln \frac{kl}{\delta + h} - 1)}{\pi l^2}$$

Где S – площадь поперечного сечения сердечника, l – длина сердечника, h и δ – поперечные размеры сердечника, k – коэффициент, зависящий от формы сердечника. Для цилиндров $k = 2,4$, $d = h = \delta$:

$$N_b = \frac{\ln(1,2\lambda) - 1}{\lambda^2}$$

Данная формула даёт хорошее совпадение с результатами экспериментов в широком диапазоне λ (10 – 250). По результатам измерений Томпсона–Мосса и Розенблата погрешность формулы не превышает 5%, при $\lambda > 40$ погрешность не превышает 1 %.

2. Описание эксперимента

1. Описание установки

Оборудование: стальные стержни, трансформатор, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), соленоид, реостат, магазин сопротивлений, магазин ёмкостей, переходной модуль, персональный компьютер, генератор низких частот, осциллограф, макетная плата с ферритами.

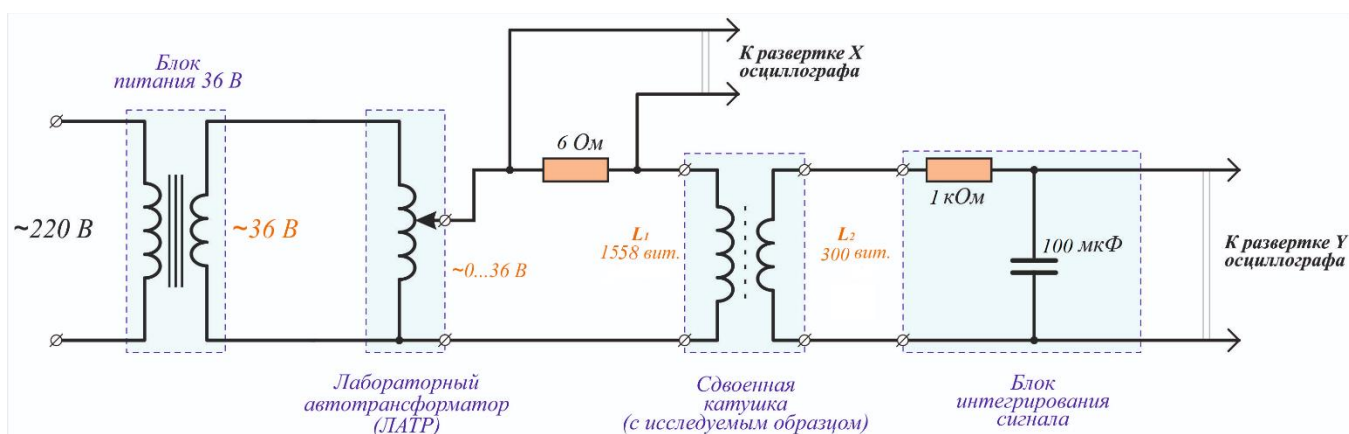


Рис. 3. Схема установки.

Исследуемые образцы выполнены в виде стальных стержней диаметром $d = 0,2$ см и длинами 10, 20 и 30 см, а также ферритового стержня марки 400 МН диаметра $d = 0,8$ см и длины 20 см. Помимо этого, в работе используются катушки индуктивности, содержащие $N_1 = 1558$ витков и $N_2 = 300$ витков, конденсатор ёмкости $C = 100$ мкФ и сопротивления $R_1 = 6$ Ом и $R_2 = 1$ кОм. Длина первичной катушки составляет 30 см. Сопротивление R_1 и конденсатор C представляют собой интегрирующую цепочку. Ток в цепи изменяется с частотой 50 Гц.

На экране осциллографа регистрируется петля гистерезиса в координатах U_x и U_y . Преобразование осей координат в величины B и H происходит следующим образом.

Поле на оси цилиндра, возбуждаемого током I_1 , проходящим по первичной обмотке равно:

$$H = \frac{4\pi}{c} n_1 I_1$$

Напряжение, снимаемое с сопротивления R_1 , составит:

$$U_x = I_1 R_1 = \frac{R_1 c}{4\pi n_1} H \Rightarrow H = \frac{4\pi n_1}{R_1 c} U_x$$

Для практических расчётов удобно использовать формулу:

$$H = \frac{0,4 \pi n_1}{R_1} U_x$$

Где H – в эрстедах, n_1 – число витков первой обмотки на единицу длины (на см), U_x – в вольтах, R_1 – в омах.

В средней части образца намотана вторичная обмотка, содержащая N_2 витков и занимающая малое расстояние по длине образца. Электродвижущая сила, наведённая во вторичной обмотке:

$$E = - \frac{1}{c} N_2 \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{1}{c} N_2 S \frac{dB}{dt}$$

Где S – площадь поперечного сечения образца, причём необходимо, чтобы в эксперименте использовалась катушка с площадью сечения $S_{\text{сеч}} \ll \mu_{\text{обр}} S_{\text{обр}}$. В цепь последовательно вторичной обмотки включено сопротивление R_2 и конденсатор C . По закону Ома:

$$E = \frac{1}{c^2} L \frac{dI_2}{dt} + \frac{1}{C} \int I_2 dt + R_2 I_2 = - \frac{1}{c} N_2 S \frac{dB}{dt}$$

При частоте $f = 50$ Гц величины $\frac{1}{c^2} L \frac{dI_2}{dt}$ и $\frac{1}{C} \int I_2 dt$ существенно меньше величины $R_2 I_2$ при имеющихся L и C . поэтому можно считать, что

$$I_2 = - \frac{1}{c} \frac{N_2 S}{R_2} \frac{dB}{dt}$$

Напряжение U_y , снимаемое с конденсатора, равно

$$U_y = \frac{1}{C} \int I_2 dt = - \frac{1}{c} \frac{N_2 S}{R_2 C} B$$

Таким образом

$$B = \frac{c R_2 C}{N_2 S} U_y$$

Для практических расчётов удобно использовать формулу:

$$B = 10^8 \frac{R_2 C}{N_2 S} U_y$$

Где B – в гауссах, R_2 – в омах, C – в фарадах, U_y – в вольтах, S - в см².

На персональном компьютере установлена специальная программа LabVIEW, позволяющая фиксировать петлю гистерезиса и её крайнюю точку, записывать получаемые данные в файлы для дальнейшей обработки

2. Методика измерений КР

В работе центральный коэффициент намагничивания находится по основной кривой намагничивания – индукционный метод [4]. Основная кривая намагничивания представляет собой геометрическое место вершин петель гистерезиса, полученных при циклическом перемагничивании, и отражает изменение магнитной индукции B от напряженности магнитного поля H , которое создается в материале.

Для достаточно длинного цилиндра, помещённого в продольное поле, поле торцов не оказывает сильного влияния на поле в середине цилиндра, а следовательно центральный КР стремится к нулю. Поэтому для цилиндров, выполненных из одного и того же материала, можно записать:

$$H_i^{(\text{идеал})} = H$$

$$H_i^{(\text{цил})} = H - H_0$$

Так как для ферромагнетиков $B \gg H$, то

$$H_0 = - 4\pi N M \approx - NB$$

При одной и той же индукции в цилиндрах:

$$H_i^{(\text{цил})} - H_i^{(\text{идеал})} = - 4\pi H_0 \approx NB$$

$$N = \frac{H_i^{(\text{цил})} - H_i^{(\text{идеал})}}{B}$$

Таким образом, для определения центрального КР необходимо построить основные кривые достаточно длинного цилиндра и исследуемого образца. Так как при выводе принято условие $-H_0 \approx NB$, то в расчётах следует пользоваться лишь прямолинейным участком кривых намагничивания.

Снимая ряд расстояний на кривых намагничивания и откладывая эти расстояния слева от оси OB ($ab = a'b'$, $cd = c'd'$), как показано на рисунке 3, получим прямую OA , тангенс угла наклона которой равен N .

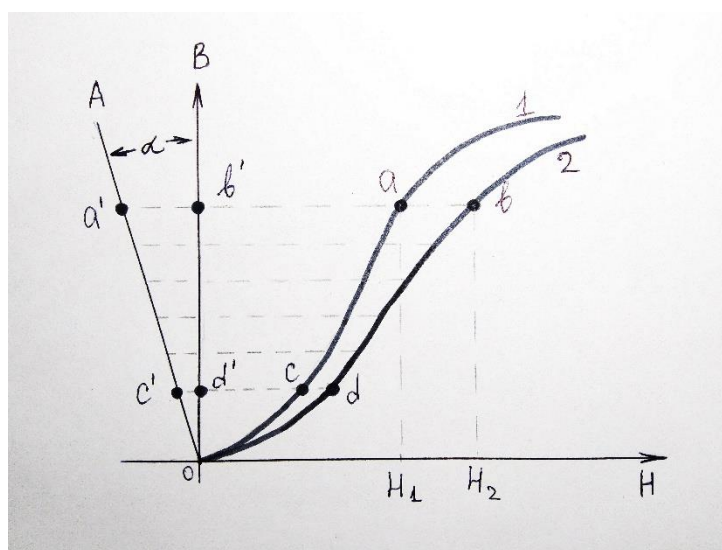


Рис. 4. Описание метода.

По основной кривой также можно определить магнитную проницаемость тела, как тангенс угла наклона малых участков кривой.

3. Результаты измерений

Эксперимент был проведён для стальных стержней различной длины. По преобразованным данным построены предельные петли гистерезиса в координатах B и H (рис. 5). С уменьшением длины образца уменьшается остаточная индукция (значение B при нулевом магнитном поле в веществе). Причём значение коэрцитивной силы (значение напряжённости магнитного поля в веществе, необходимое для полного размагничивания ферромагнитного вещества) практически не изменяется.



Рис. 5. Петли гистерезиса для стальных цилиндров.

Отслеживая вершины петли гистерезиса, при изменении магнитного поля, были зафиксированы основные кривые стержней (рис. 6).

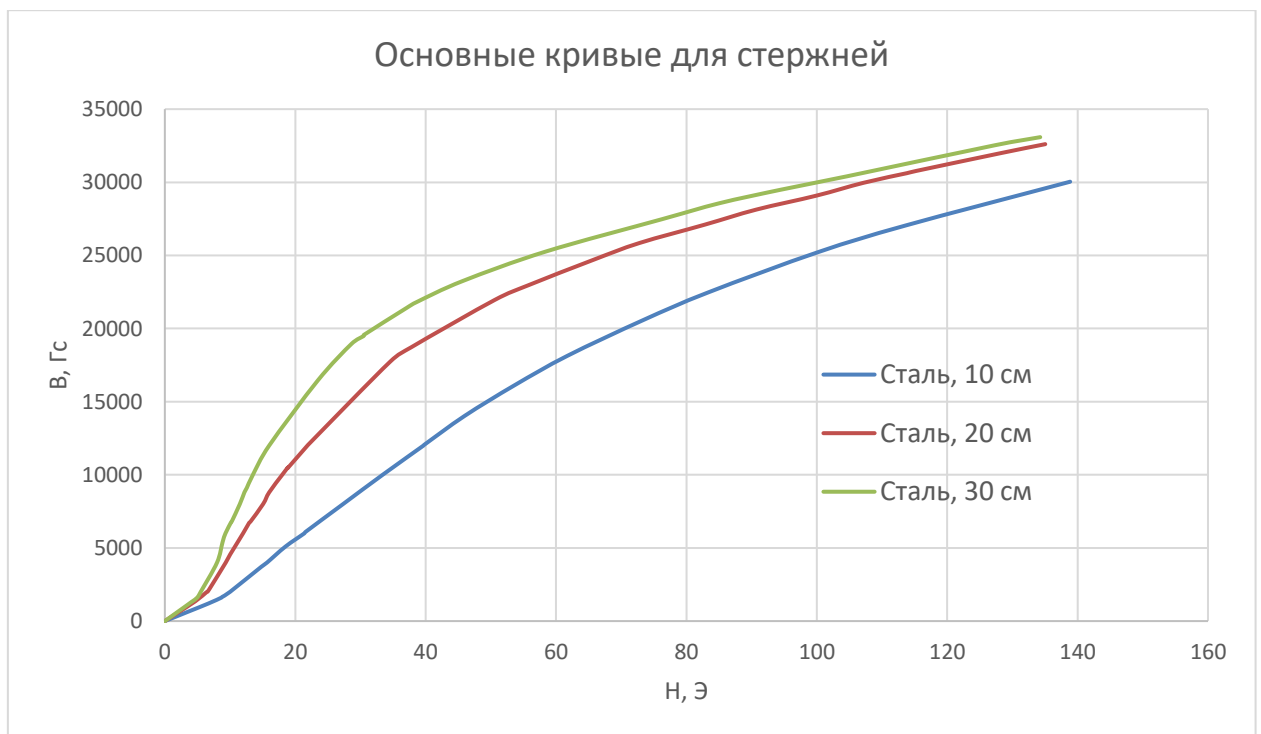


Рис. 6. Основные кривые цилиндрических стержней.

По полученным данным была определена магнитная проницаемость стержней (рис. 7). Поскольку все образцы изготовлены из одного и того же материала, можно определить влияние формы на магнитную проницаемость тела. По графикам видно, что уменьшение длины цилиндра приводит к уменьшению магнитной проницаемости, а следовательно, к росту КР.

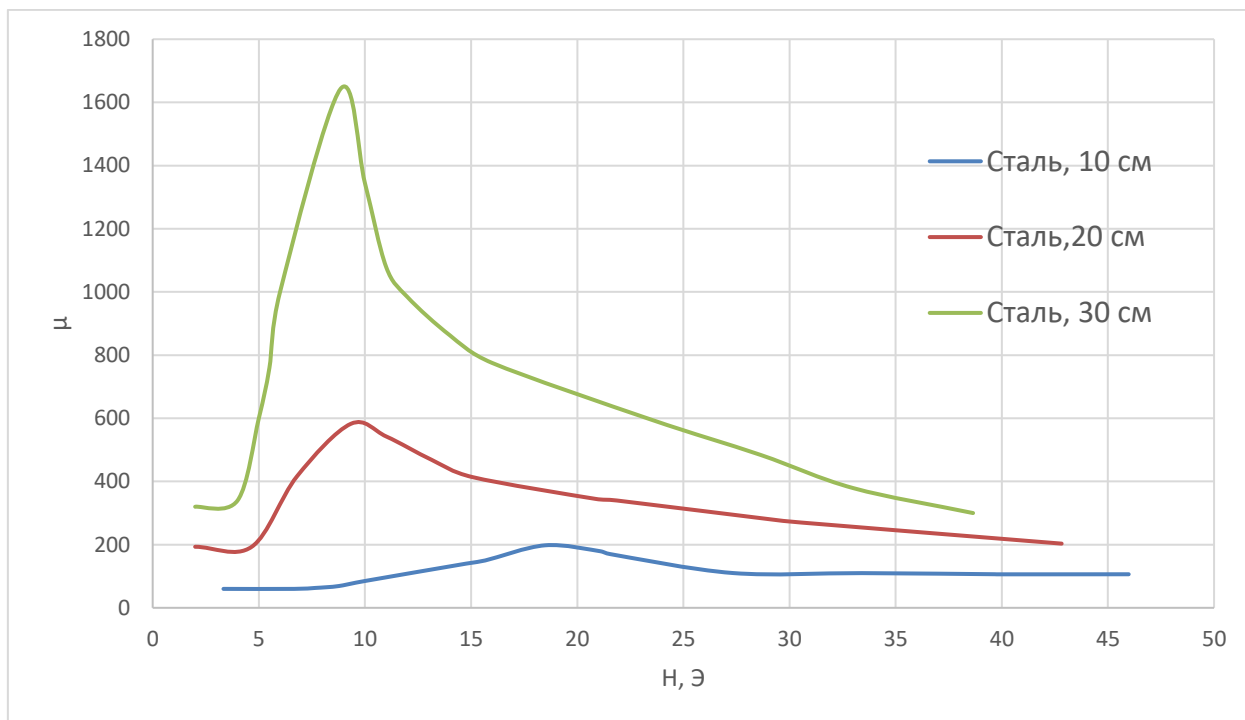


Рис. 7. Магнитные проницаемости цилиндрических стержней.

В предположении, что стержень длиной 30 см является достаточно длинным, были рассчитаны КР для стержней длиной 20 и 10 см. На рисунках 8 и 9 отображён графический метод определения КР. Как и было показано ранее, зависимость ΔH и B является прямой пропорциональностью. В таблицах 1 и 2 приведены значения магнитного поля в веществе при различных индукциях, определены тангенс угла α , КР и его среднеквадратичное отклонение.

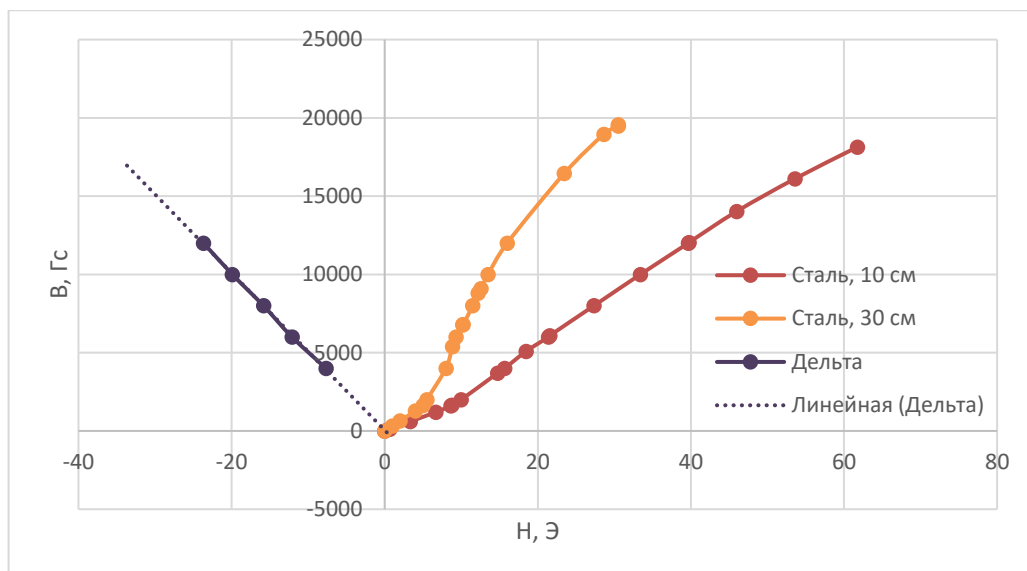


Рис. 8. Метод определения КР ($\text{tg } \alpha$) для стержня 10 см.

В, Гс	Н, Э сталь 30 см	Н, Э сталь 10 см	$N * 10^{-3}$
4000	8	15,67	1,92
6000	9,3	21,40	2,02
8000	11,5	27,33	1,98
10000	13,5	33,40	1,99
12000	16	39,67	1,97

Таблица 1. Измерение N для стержней 10 см.

Таким образом, для стали 10 см КР составил $(1,97 \pm 0,03) * 10^{-3}$.

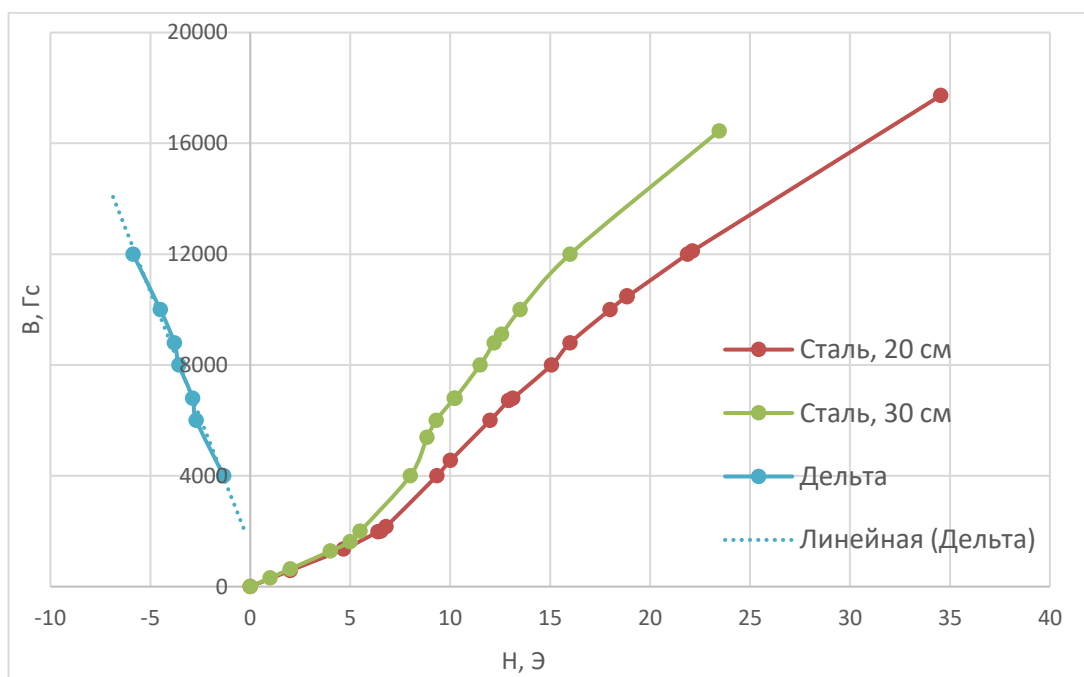


Рис. 9. Метод определения $\text{tg } \alpha$ для стержня 20 см.

В, Гс	Н, Э сталь 30 см	Н, Э сталь 20 см	$N * 10^{-3}$
4000	8	9,33	0,33
6000	9,3	12,00	0,45
6800	10,25	13,13	0,42
8000	11,5	15,07	0,45
8800	12,2	16,00	0,43
10000	13,5	18,00	0,45
12000	16	21,87	0,49

Таблица 2. Измерение $\text{tg } \alpha$ для стержней 20 см.

Таким образом, для стали 20 см КР составил $(0,43 \pm 0,04) * 10^{-3}$.

В таблице 3 приведены значения КР для цилиндров, полученные экспериментально и рассчитанные по формулам. В третьем столбце КР определён для эллипсоида вращения при той же λ , что и у цилиндров. В четвёртом столбце КР рассчитан по формуле Розенблата для цилиндров.

Стержень	N_v (эксперимент)	N (эллипс)	N_v (цилиндр - Розенблат)
Сталь, 10 см	$(1,97 \pm 0,03) * 10^{-3}$	$1,44 * 10^{-3}$	$1,24 * 10^{-3}$
Сталь, 20 см	$(0,43 \pm 0,04) * 10^{-3}$	$0,43 * 10^{-3}$	$0,38 * 10^{-3}$
Сталь, 30 см	-	$0,21 * 10^{-3}$	$0,19 * 10^{-3}$

Таблица 3. Значения КР.

КР стали 20 см является наиболее близким к расчётным значениям. Значения КР стали 10 см превышает расчётное значение на 60%.

Далее рассмотрим ферритовый стержень. Магнитная проницаемость материала, из которого изготовлен стержень, известна и равна 400.

Для сравнения приведены петли гистерезиса стального стержня ($\lambda = 50$) и ферритового ($\lambda = 25$)(рис. 10). Площадь петли гистерезиса для ферромагнетика значительно меньше площади для ферромагнетика, что подтверждает минимизацию потерь на тепло в ферритовых стержнях. Состояние насыщения для ферритов наступает в достаточно малом поле ≈ 45 Э.

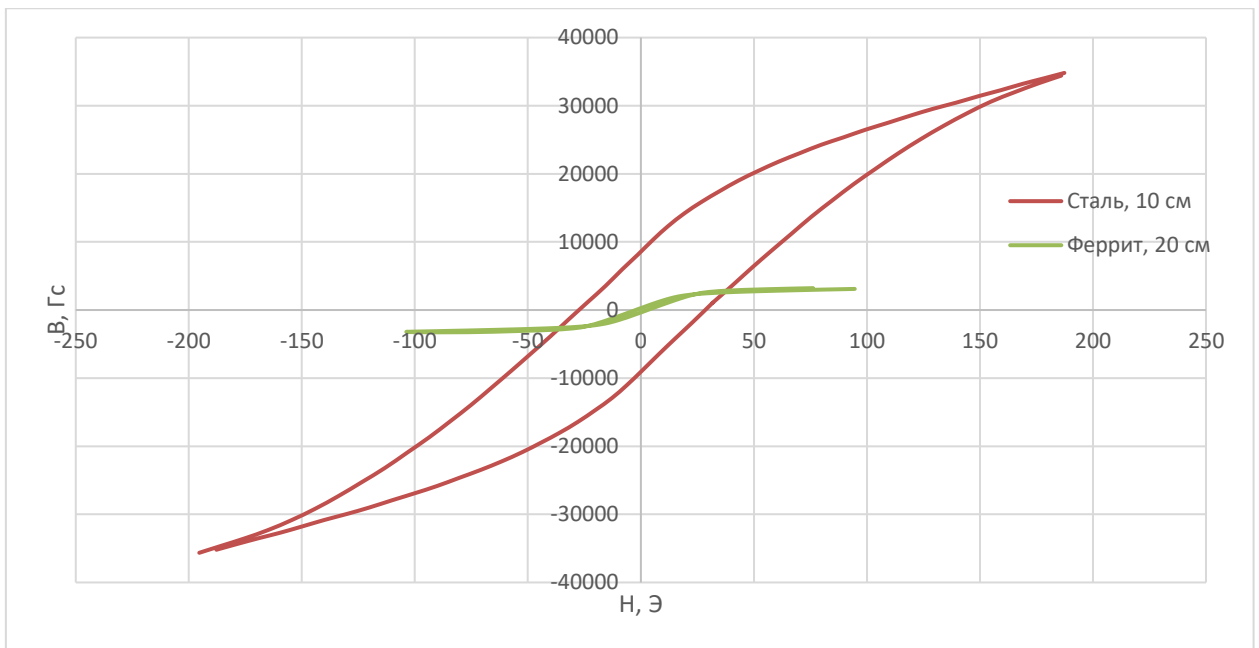


Рис. 10. Петли гистерезиса для стального и ферритового цилиндров.

По полученным данным была построена основная кривая для ферритового стержня (рис. 11). На графике также отложена прямая соответствует материалу, магнитная проницаемость которого равна 400. Участок основной кривой до момента насыщения феррита линеен и находится ниже прямой материала, а следовательно магнитная проницаемость тела меньше магнитной проницаемости вещества.

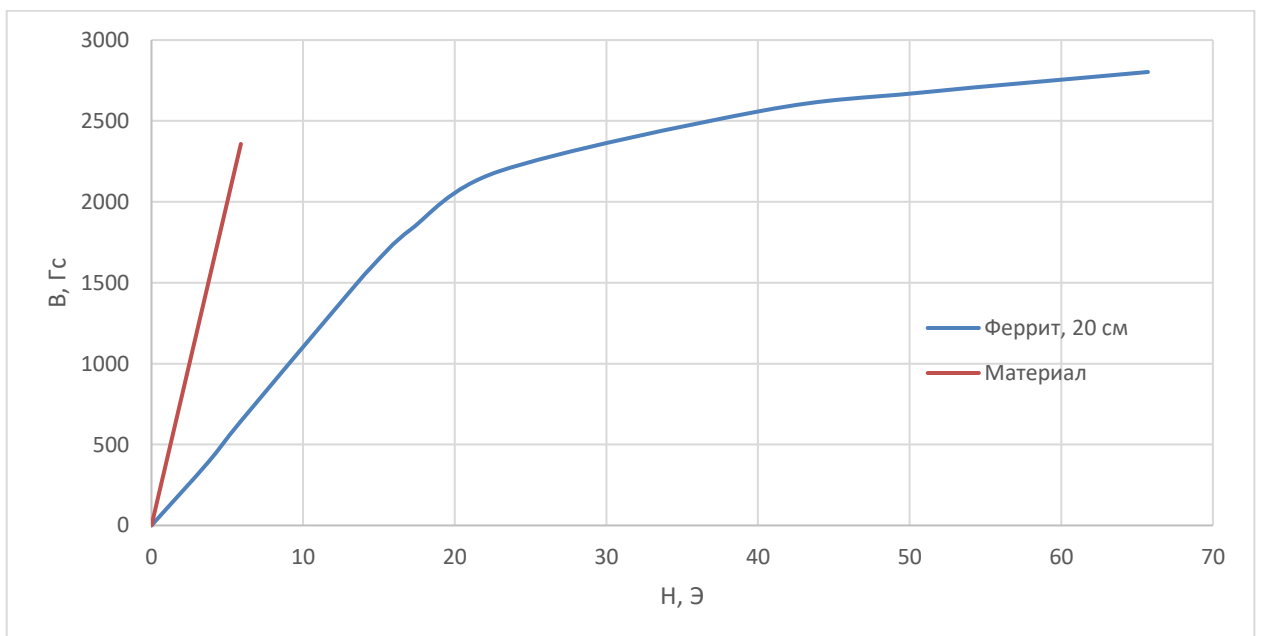


Рис. 11. Основная кривая ферритового стержня.

По основной кривой была рассчитана магнитная проницаемость стержня (рис. 12). Максимальное значение μ составляет 118.

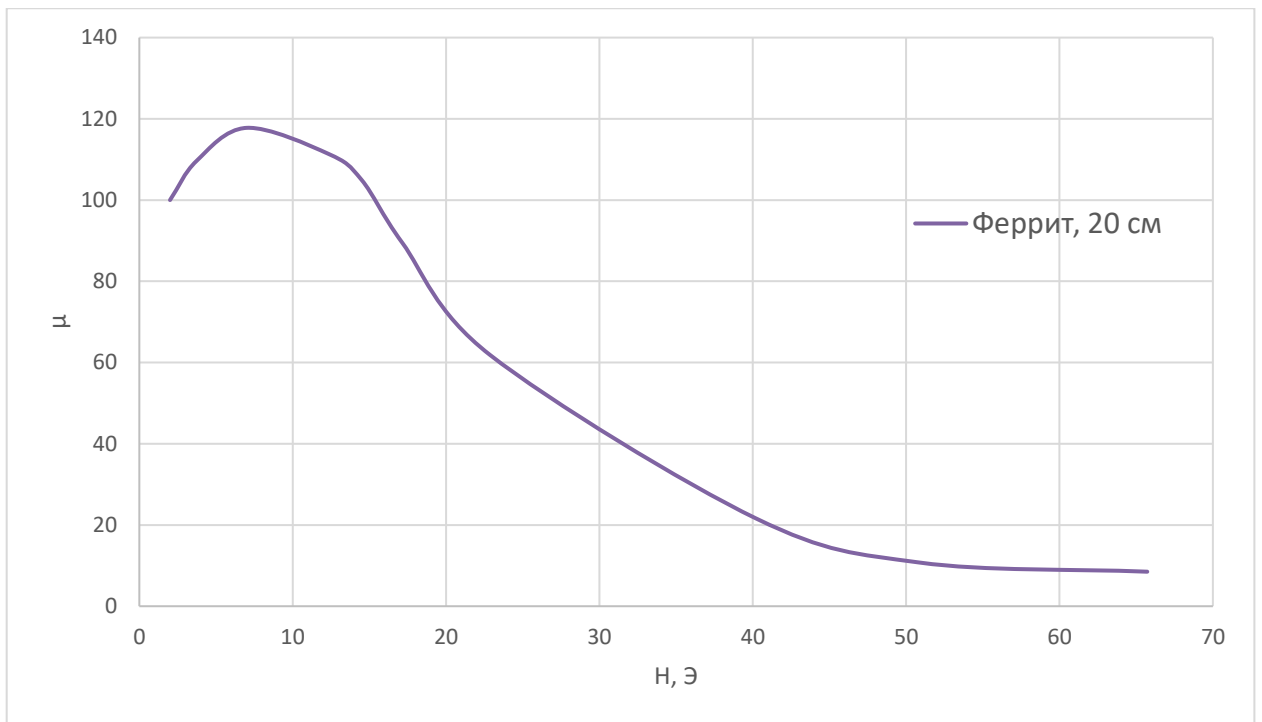


Рис. 12. Магнитная проницаемость ферритового стержня.

КР ферритового стержня был определён по формуле:

$$\mu_T = \frac{dB}{dH} = \frac{\mu}{1 + N(\mu - 1)}$$

Было получено значение $N = 5,99 \cdot 10^{-3}$. По формуле для эллипсоидов вращения получено значение $4,67 \cdot 10^{-3}$, по формуле Розенблата $N = 3,84 \cdot 10^{-3}$. Экспериментальное значение превышает расчётное на 60%.

4. Ошибки измерений.

Разница между полученными экспериментальными значениями и расчётными оказалась заметно больше оцениваемой нами погрешности измерений, что указывает на наличие систематических ошибок. Можно предположить, что ошибки были вызваны:

- 1) Пренебрежением площадью витка. Из выражения $S_{\text{сеч кат}} \ll \mu_{\text{обр}} S_{\text{обр}}$ следует, что для стальных цилиндров должно выполняться $\mu_{\text{обр}} \gg 225$, для ферритового – $\mu_{\text{обр}} \gg 14$.
- 2) Пренебрежением длиной вторичной катушки. Если катушка сравнима по длине со стальным стержнем 10 см, то вместо центрального КР, определяется магнитометрический.

- 3) Предположим, что КР стального стержня длины 30 см равен нулю. По расчётным значениям КР стали 30 см в 2 раза меньше КР стали 20 см и в 5 раз меньше КР стали 10 см.

Часть 2. Измерение коэффициента размагничивания образцов тороидальной формы с зазором.

1. Описание эксперимента

1. Описание установки

Для измерения КР используется схема аналогичная приведённой ранее.

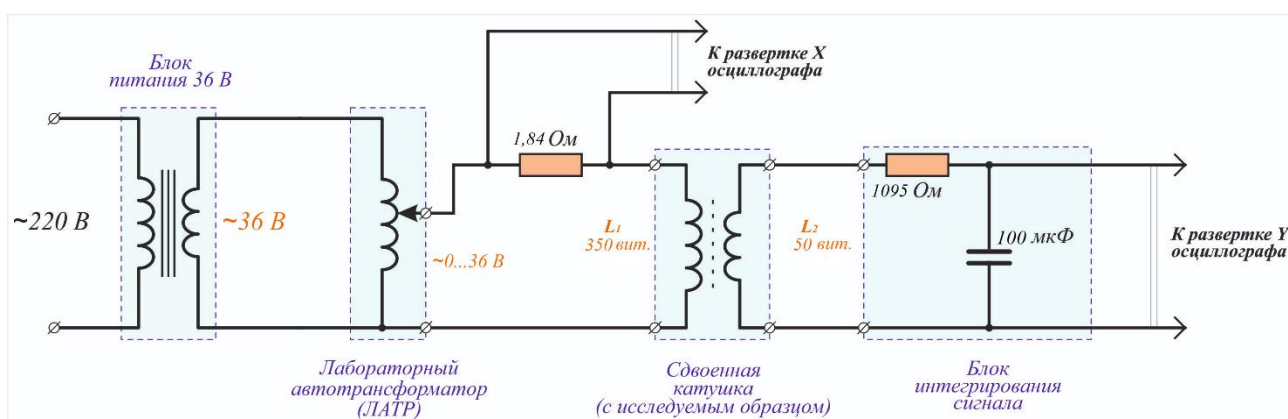


Рис. 13. Схема установки.

Исследуемые образцы представляют собой ферритовые кольца марки 3000 НМ прямоугольного сечения размерами: $D = 32$ мм – внешний диаметр, $d = 20$ мм – внутренний диаметр, $h = 6$ мм. Средняя длина кольца составляет 8,17 см. На кольцо равномерно по длине намотана обмотка ($N_1 = 350$ витков). Вторичная обмотка содержит $N_2 = 50$ витков. В одном из колец сделан разрез шириной 1 мм.

В работе используются конденсатор ёмкости $C = 100$ мкФ и сопротивления $R_1 = 1,84$ Ом и $R_2 = 1095$ Ом. Сопротивление R_1 и конденсатор представляют собой интегрирующую цепочку.

На экране осциллографа регистрируется петля гистерезиса в координатах U_x и U_y . Калибровка осей координат в величинах B и H происходит аналогично предыдущему случаю образом.

$$H = \frac{0,4 \pi n_1}{R_1} U_x$$

Где H – в эрстедах, n_1 – число витков первой обмотки на единицу длины (на см), U_x – в вольтах, R_1 – в омах.

$$B = 10^8 \frac{R_2 C}{N_2 S} U_y$$

Где B – в гауссах, R_2 – в омах, C – в фарадах, U_y – в вольтах, S – в см²

2. Методика измерений КР

Аналогично способу определения КР цилиндрических стержней будем определять КР для образцов тороидальной формы с разрезом.

Вместо достаточно длинного цилиндра будем использовать тор, толщина поперечного сечения которого существенно меньше радиуса тора ($r \ll R$). Поскольку тор имеет замкнутую форму, то магнитные полюсы и размагничивающее поле не возникают. КР тора равен нулю.

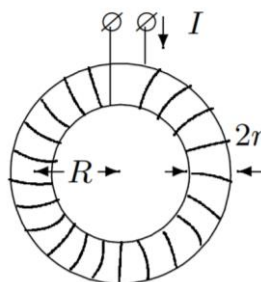


Рис. 14. Тороидальный образец с намагничивающей обмоткой.

В работе будем определять коэффициент размагничивания тора с поперечным разрезом. На концах тора возникнут магнитные полюса, в сердечнике появится размагничивающее поле.

Рассмотрим два тора выполненных из одного и того же материала. В одном торов сделан узкий разрез. При равной индукции в образцах:

$$H_i^{(\text{разрез})} - H_i^{(\text{идеал})} = -H_0 \approx NB$$

$$N = \frac{H_i^{(\text{разрез})} - H_i^{(\text{идеал})}}{B}$$

Так как было принято условие $-H_0 \approx NB$, то для определения КР используют только часть основной кривой.

2. Результаты измерений

Эксперимент был проведён для тора и тора с разрезом одинаковой геометрией и равным числом витков в обмотках. По преобразованным данным построены предельные петли гистерезиса в координатах B и H (рис. 15). Ферритовое кольцо без разреза переходит в состояние насыщения при довольно малом поле $1,2$ Э (рис. 16), магнитная индукция достигает 4 кГс. Петли гистерезиса отражают одно из основных достоинств ферромагнетиков – отсутствие потерь энергии в виде выделения теплоты (теплота гистерезиса, выделяющаяся в одном цикле намагничивания равна площади петли гистерезиса). Значение коэрцитивной силы для тора с разрезом очень мало ≈ 1 Э.

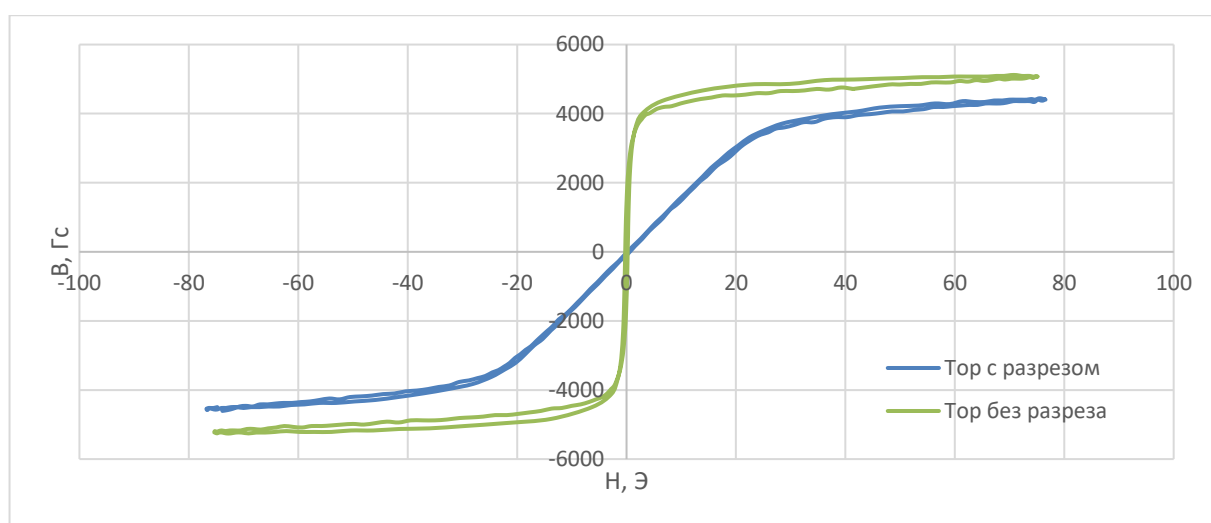


Рис. 15. Петли гистерезиса для образцов тороидальной формы.

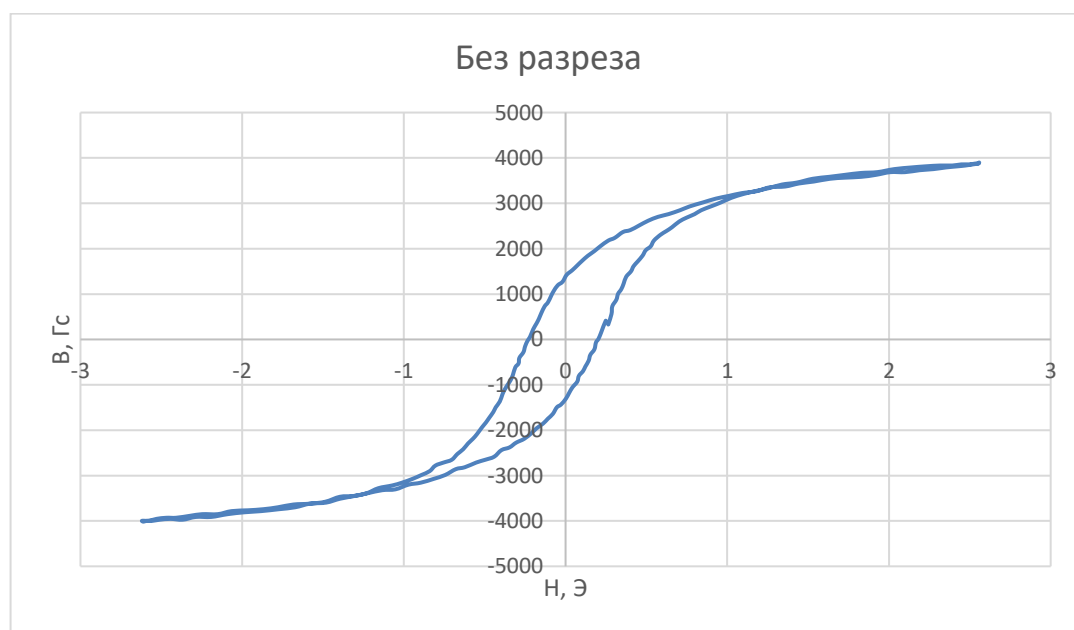


Рис. 16. Предельная петля гистерезиса для ферритового кольца.

Для определения коэффициента размагничивания были построены основные кривые торов (рис. 17). На рисунке 17 так же отображён графический метод определения КР. В таблице 4 приведены значения магнитного поля в веществе при различных индукциях, определены тангенс угла α , КР и его среднеквадратичное отклонение.

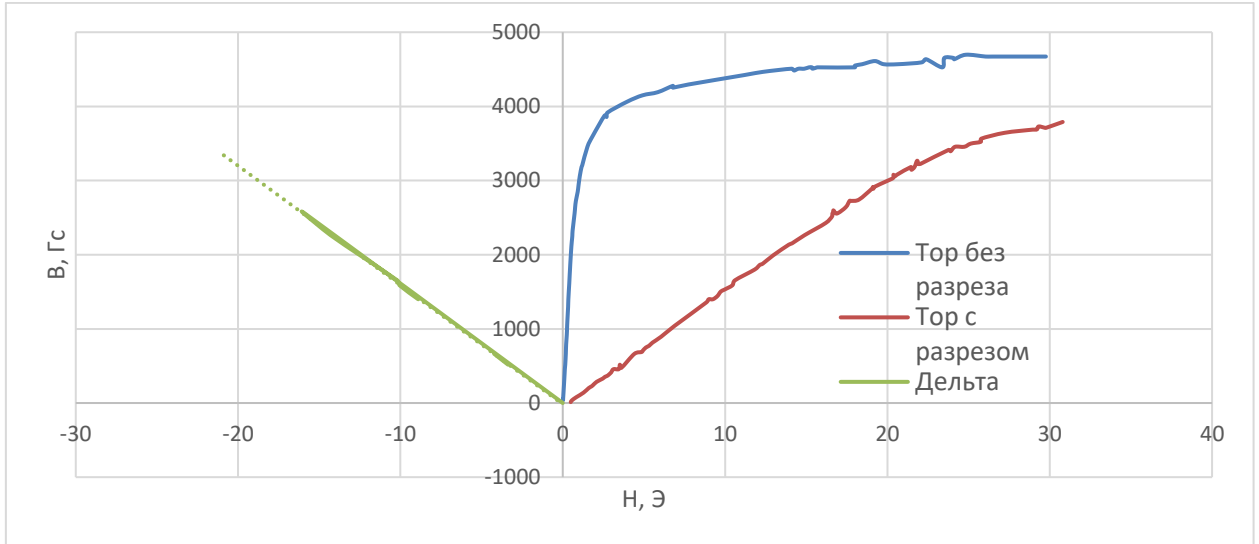


Рис. 17. Метод определения $\tan \alpha$ для тора с разрезом.

B, Гс	H, А без разреза	H, А с разрезом	$N \cdot 10^{-3}$
456,25	0,13	3,12	6,56
517,08	0,15	3,52	6,51
663,08	0,19	4,41	6,37
1399,17	0,34	9,25	6,36
1587,75	0,40	10,45	6,34
1654,67	0,41	10,61	6,16
2263,00	0,59	14,90	6,32
2555,00	0,73	16,61	6,22

Таблица 4. Измерение КР для тора с разрезом.

Определён коэффициент размагничивания $N = (6,36 \pm 0,13) \cdot 10^{-3}$.

КР тора с разрезом можно определить по формуле:

$$\mu_T = \frac{dB}{dH} = \frac{\mu}{1 + N(\mu - 1)}$$

По основным кривым были определены магнитные проницаемости торов (рис. 18). Магнитная проницаемость тора с разрезом почти в 26 раз меньше магнитной проницаемости тора без разреза.

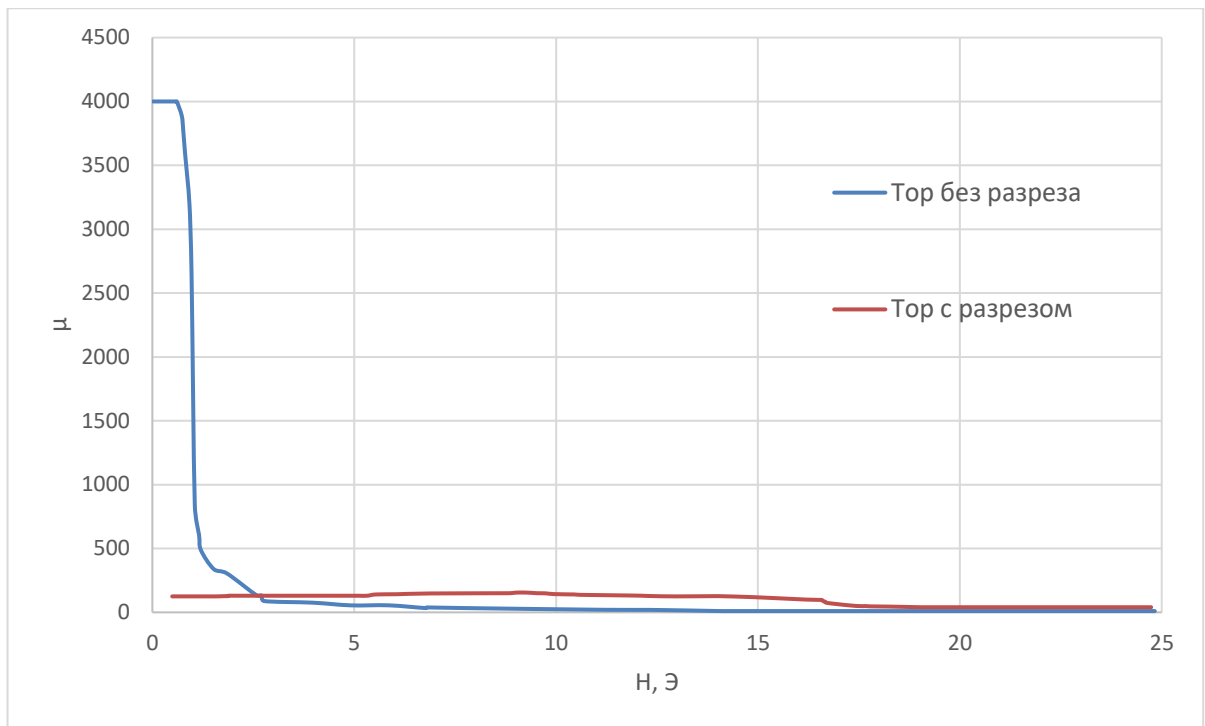


Рис. 18. Магнитная проницаемость торов.

Поскольку магнитная проницаемость вещества достигает 4000, можно использовать приближение:

$$N \approx \frac{1}{\mu_T}$$

КР тора с разрезом $6,45 \cdot 10^{-3}$, что находится в пределах погрешности значения, полученного ранее.

3. Теоретическое дополнение

Рассмотрим тороидальный соленоид с ферромагнитным сердечником, поперечные размеры которого существенно меньше радиуса тора. Пусть l – длина сердечника, n – число витков обмотки, μ – магнитная проницаемость ферромагнетика. Пропустим по проводу ток I . Исходя из граничных условий, магнитное поле не выходит за пределы сердечника. По теореме о циркуляции:

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = H * l = \frac{4\pi}{c} In$$

где H – поле в сердечнике. Найдём индукцию B в ферромагнетике:

$$B = \frac{4\pi}{c} In\mu$$

Далее рассмотрим сердечник с узким воздушным зазором толщины d . Применим теорему о циркуляции:

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = H_c * (l - d) + H_z * d = \frac{4\pi}{c} In$$

где H_c – поле в сердечнике, H_z – поле в зазоре.

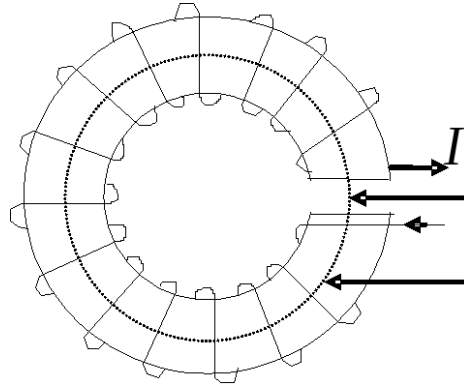


Рис. 17. Тор с зазором

В рамках нашей модели будем пренебрегать краевыми эффектами в узком зазоре. Так как поле в сердечнике перпендикулярно границе раздела и по граничным условиям нормальная компонента индукции непрерывна, то индукция в зазоре совпадает с индукцией в сердечнике ($B_z = B_c$). В зазоре индукция совпадает с полем ($\mu_z = 1$). Уравнение переписывается в виде:

$$\frac{B_z}{\mu} * (l - d) + B_z * d = \frac{4\pi}{c} In$$

$$H_z = B_z = \frac{4\pi}{c} In * \frac{1}{d * \frac{\mu - 1}{\mu} + \frac{l}{\mu}} \approx \frac{4\pi}{c} In * \frac{1}{d}$$

При достаточно больших магнитных проницаемостях тора с разрезом, можно получить большие магнитные поля в воздушных зазорах.

Определим магнитную проницаемость тела:

$$\mu_T = \frac{B_c}{H_c} = \frac{1}{H_c} * \frac{4\pi}{c} In * \frac{1}{d}$$

Поле в торе без разреза примерно равняется полю в торе без разреза $H = \frac{4\pi}{cl} In$, в силу малости d . Получаем:

$$\mu_T = \frac{l}{d}$$

Для нашего образца $l = 8,17$ см, $d = 1$ мм. Исходя из данной модели, магнитная проницаемость тела должна составлять 81,7, что существенно меньше полученного экспериментально значения. Данное расхождение можно объяснить тем, что в теории мы пренебрегали краевыми эффектами.

$$N \approx \frac{1}{\mu_T}$$

В соответствии с приведёнными рассуждениями КР тора с разрезом должен составлять 12,24, что в два раза больше экспериментального значения.

Выводы

В ходе работы мною был освоен метод измерения центрального (баллистического) коэффициента размагничивания.

При применении ферро- и ферромагнитных сердечников практически всегда необходимо учитывать эффект размагничивания. Существующие в литературе формулы позволяют с хорошей точностью рассчитывать коэффициент размагничивания длинных образцов ($\lambda > 40$). Для коротких тел необходимо проводить дополнительное исследование.

Магнитная проницаемость тел может быть существенно ниже магнитной проницаемости вещества, из которого оно сделано. Для измерения магнитной проницаемости вещества необходимо использовать тороидальный сердечник без зазоров или образцы $\mu N \ll 1$, что приводит, как правило, к требованию отношения длины к поперечному размеру $\lambda \geq 200$.

Таким образом, мною было рассчитано значение коэффициентов размагничивания цилиндров и тора с разрезом.

В ходе работы были освоены основы проведения измерений, обработки и анализа полученных данных. Сделаны оценки погрешностей и проведено сравнение с табличными значениями.

Заключение

Выполненную работу можно использовать как основу для дополнительной лабораторной работы электромагнитного практикума. При этом существующие катушки необходимо сделать меньшего диаметра и большей длины.

Приложение

В статье [9] предложены формулы для определения размагничивающего фактора стержней цилиндрической формы с произвольным отношением длины к диаметру.

$$N_b = 1 - \frac{2p}{\pi k} [K(k^2) - E(k^2)]$$

$$N_m = 1 - \frac{4}{3\pi\lambda} \left\{ (1 - \lambda^2)^{1/2} [\lambda^2 K(k^2) + (1 - \lambda^2) E(k^2)] - 1 \right\}$$

где $k = \sqrt{\frac{4}{4 + \lambda^2}}$ для баллистического фактора, $k = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda}}$ для магнитометрического, $K(k^2)$ и $E(k^2)$ - полные эллиптические интегралы первого и второго рода.

Список литературы

1. Захаров В.А., Зембеков Н.С., Захаров А.В., Русских И.Т. Расчет центральных коэффициентов намагничивания цилиндрических ферромагнитных стержней при насыщении магнетика. Известия вузов. Сер. Физика. – 2005. – Т. хх. – № 4. – с. 53 – 61.
2. Зембеков Н.С. Коэффициенты размагничивания ферромагнитных цилиндрических стержней при намагничивании: дис. канд. техн. наук. – Ижевск, 2001. – 111 с.
3. Сандомирский С.Г. Расчет и анализ размагничивающего фактора ферромагнитных тел. Национальная академия наук Беларуси, Объединенный институт машиностроения. - Минск: Беларуская наука, 2015. – 243 с.
4. Методы физических измерений. Новосибирск, Наука, 1975 год. Отв. ред. Солоухин Рем Иванович. – с. 154 – 159, 166 – 169.
5. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. – М.: Наука, 2000. – 544 с.
6. Коваленко А. П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. М. «Машиностроение», 1975. – 248 с.
7. Розенблат М. А. Коэффициенты размагничивания стержней высокой проницаемости. «Журнал технической физики», 24, № 4, 1954, с. 637 – 661.
8. Сивухин Д.В. Курс общей физики: Электричество. – М.: Наука, 1983. – 687 с.

9. Лаптева К.А., Толмачёв И.И. Расчёт размагничивающего фактора при продольном намагничивании в магнитопорошковой дефектоскопии. Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 2