

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ)
ФИЗТЕХ-ШКОЛА ЭЛЕКТРОНИКИ, ФОТОНИКИ
И МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

Лабораторная работа 3.4.5

Петля Гистерезиса

*выполнил студент 2 курса
группы Б04-006*
Белостоцкий Артемий

Долгопрудный, 2021

1. Цель работы.

Изучение петель гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных полях.

2. В работе используются.

Автотрансформатор, понижающий трансформатор, интегрирующая цепочка, амперметр, вольтметр, электронный осциллограф, делитель напряжения, тороидальные образцы с двумя обмотками.

3. Теоретические сведения.

Ферромагнитные материалы часто применяются в трансформаторах, дросселях, машинах переменного тока, то есть в устройствах, где они подвергаются периодическому перемагничиванию, — поэтому изучение магнитных характеристик ферромагнетиков в переменных полях представляет большой практический интерес. Основные характеристики ферромагнетиков — их коэрцитивное поле H_c , магнитная проницаемость μ , рассеиваемая в виде тепла при перемагничивании мощность — зависят от частоты перемагничивающего поля. В данной работе кривые гистерезиса ферромагнитных материалов изучаются в поле частоты $\nu_0 = 50$ Гц с помощью электронного осциллографа.

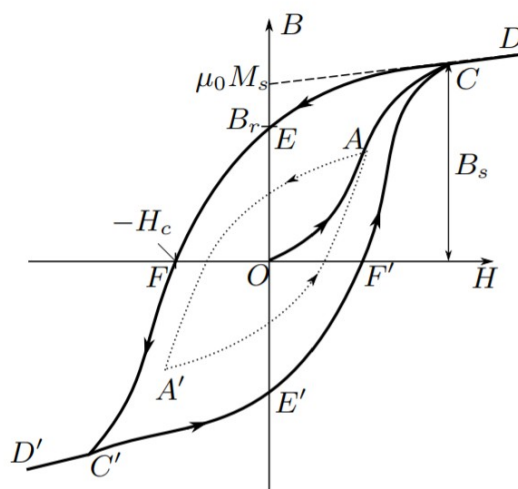


Рис.1. Петля гистерезиса ферромагнетика

Магнитная индукция B и напряжённость поля H в ферромагнитном материале неоднозначно связаны между собой: индукция зависит не только от напряжённости, но и от предыстории образца. Связь между B и H типичного ферромагнетика иллюстрирует рис. 1

Если к ферромагнитному образцу прикладывать переменное внешнее магнитное поле, то его состояние на плоскости H – B будет изменяться по замкнутой кривой — петле гистерезиса. Размер петли определяется максимальным значением напряжённости H в цикле (напр., петля AA' , обозначенная пунктиром на рис. 1). Если амплитуда напряжённости достаточно велика, то образец будет периодически достигать насыщения, что на рисунке соответствует кривой $CEFC'E'F'C$ (*предельная петля гистерезиса*). Пересечение предельной петли с вертикальной осью соответствует остаточной индукции Br , пересечение с горизонтальной осью — коэрцитивному полю H_c . Крайние точки петель, соответствующие амплитудным значениям H (например, точка A на рис. 1), лежат на начальной кривой намагничивания (ОАС).

Измерение магнитной индукции.

Магнитную индукцию B удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при изменении магнитного потока Φ в катушке, намотанной на образец. Пусть катушка с N витками плотно охватывает образец сечением S , и индукция B в образце однородна, тогда:

$$|B| = \frac{1}{SN} \int \varepsilon dt. \quad (1)$$

Таким образом, для определения B нужно проинтегрировать сигнал, наведённый меняющимся магнитным полем в измерительной катушке, намотанной на образец.

Для интегрирования в работе используется интегрирующая RC -цепочка (рис. 2). «Входное» напряжение от источника $U_{вх}(t)$ подаётся на последовательно соединённые резистор $R_{и}$ и конденсатор $C_{и}$. «Выходное» напряжение $U_{вых}(t)$ снимается с конденсатора. Предположим, что 1) сопротивление источника мало по сравнению с $R_{и}$, 2) выходное сопротивление (сопротивление на входе осциллографа), напротив, велико: $R_{вых} \gg R_{и}$ и, наконец, 3) сопротивление $R_{и}$ достаточно велико, так что почти всё падение напряжения приходится на него, а $U_{вых} \ll U_{вх}$. В таком случае ток цепи равен $I = (U_{вх} - U_{вых})/R_{и} \approx U_{вх}/R_{и}$, и входное и выходное сопротивление связаны соотношением

$$U_{вых} = \frac{q}{C_u} = \frac{1}{C_u} \int_0^t Idt \approx \frac{1}{T_u} \int_0^t U_{вх} dt. \quad (2)$$

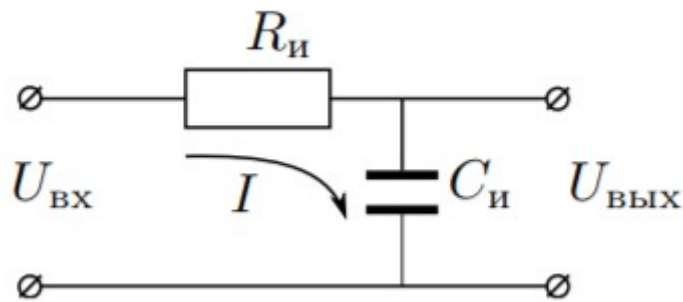


Рис.2. Интегрирующая ячейка

где $\tau_u = R_u C_u$ — постоянная времени RC -цепочки. Для индукции поля из (1) получаем:

$$|B| = \frac{1}{SN} \int U_{\text{вх}} dt = \frac{\tau_u}{SN} U_{\text{вых}}. \quad (3)$$

4. Экспериментальная установка.

Схема установки изображена на рис. 3. Напряжение сети (220 В, 50 Гц) с помощью трансформаторного блока Т, состоящего из регулировочного автотрансформатора и разделительного понижающего трансформатора, подаётся на намагничивающую обмотку N_0 исследуемого образца.

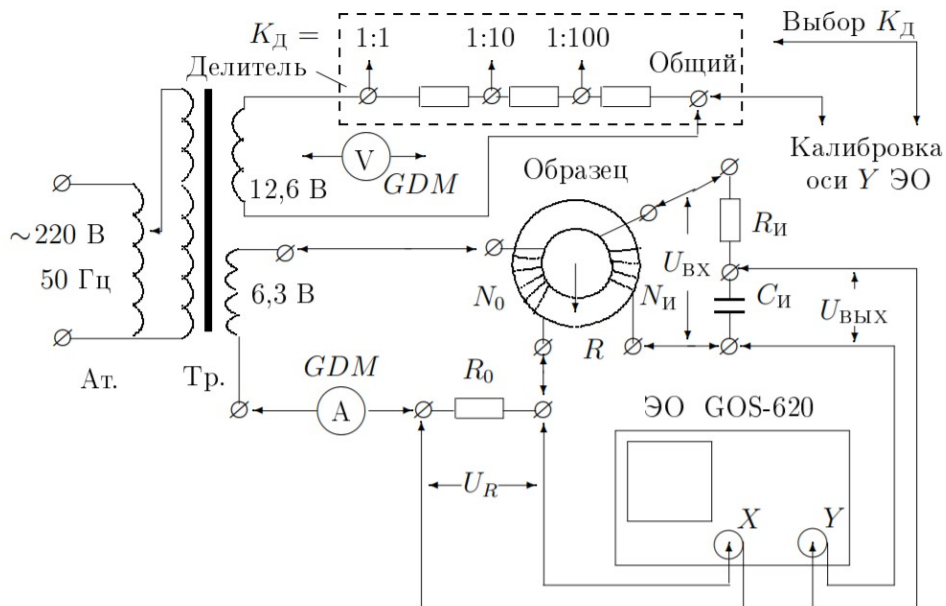


Рис.3. Схема установки для исследования намагниченности образцов

В цепь намагничивающей катушки, на которую подаётся некоторое напряжение U_0 , последовательно включено сопротивление R_0 . Напряжение на R_0 , равное $UR = R_0 I_0$, где I_0 — ток в намагничивающей обмотке N_0 , подаётся на канал X осциллографа. Связь напряжённости H в образце и тока I_0 рассчитывается по теореме о циркуляции. Действующее значение переменного тока в обмотке N_0 измеряется амперметром A .

Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмотки $N_{\text{и}}$ на вход RC -цепочки подаётся напряжение $U_{\text{и}}$ ($U_{\text{вх}}$), пропорциональное производной dB/dt . С интегрирующей ёмкости $C_{\text{и}}$ снимается напряжение U_c ($U_{\text{вых}}$), пропорциональное величине B , и подаётся на вход Y осциллографа. Значение индукции поля B рассчитывается по формуле (3).

Замкнутая кривая, возникающая на экране, воспроизводит в некотором масштабе (различном для осей X и Y) петлю гистерезиса. Чтобы придать этой кривой количественный смысл, необходимо установить масштабы изображения, т. е. провести калибровку каналов X и Y осциллографа

5. Ход работы.

Измерения для феррита.

Подберем ток питания и коэффициенты усиления ЭО так, чтобы предельная петля гистерезиса занимала большую часть экрана.

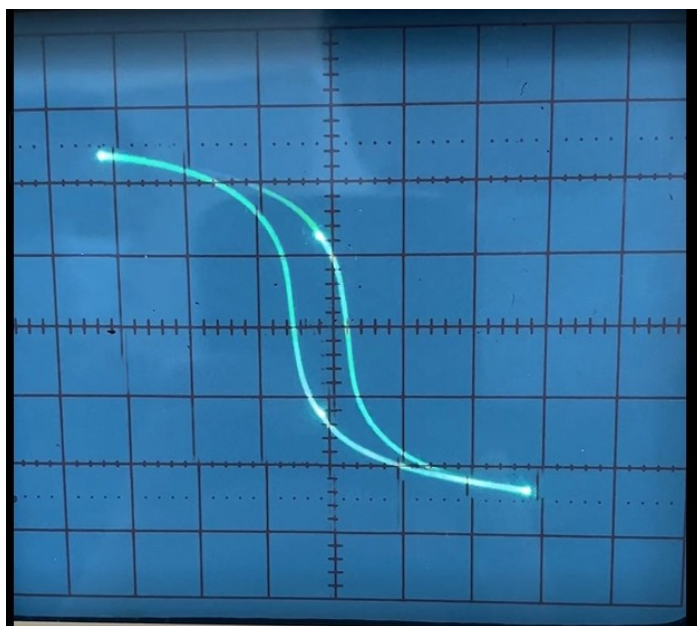


Рис.4. Предельная петля гистерезиса для Феррита

Измерим двойные амплитуды для коэрцитивной силы (2х) и индукционного насыщения (2у). Запишем соответствующие K_x и K_y . Рассчитаем цену деления ЭО для оси Х по формуле:

$$H = \frac{K_x N_0}{R_0 2 \pi R} = 23,3 \frac{A}{\text{м дел}}, \quad (1)$$

где $N_0=35$ витков, $R_0 = 0,3$ Ом, $2\pi R = 0,25$ м - определяются из данных образца.

$K_x = 50$ мВ/дел — горизонтальный масштаб ЭО.

Также рассчитаем цену деления для оси Y:

$$B = \frac{R_{II} C_{II} K_y}{S N_{II}} = 0,067 \frac{Tл}{\text{дел}}, \quad (2)$$

где $R_{II} = 20$ кОм, $S = 3$ см², $N_{II} = 400$ витков, $C_{II} = 20$ мкФ — также определяются из данных образца.

$K_y = 20$ мВ/дел — вертикальный масштаб ЭО.

Плавно уменьшая ток намагничивания до нуля, отметим точки вершин наблюдаемых частных петель. Данные занесем в Таблицу 1.

Таблица 1.

Н, дел	В, дел	Н, А/м	В, Тл
0	0	0	0
2,6	2,4	60,67	0,16
2	2,2	46,67	0,14667
1,5	2	35	0,13333
1	1,8	23,33	0,12
0,8	1,6	18,67	0,10667
0,6	1,4	14	0,09333
0,4	1	9,333	0,06667

По данным Таблицы 1 построим кривую намагничивания.

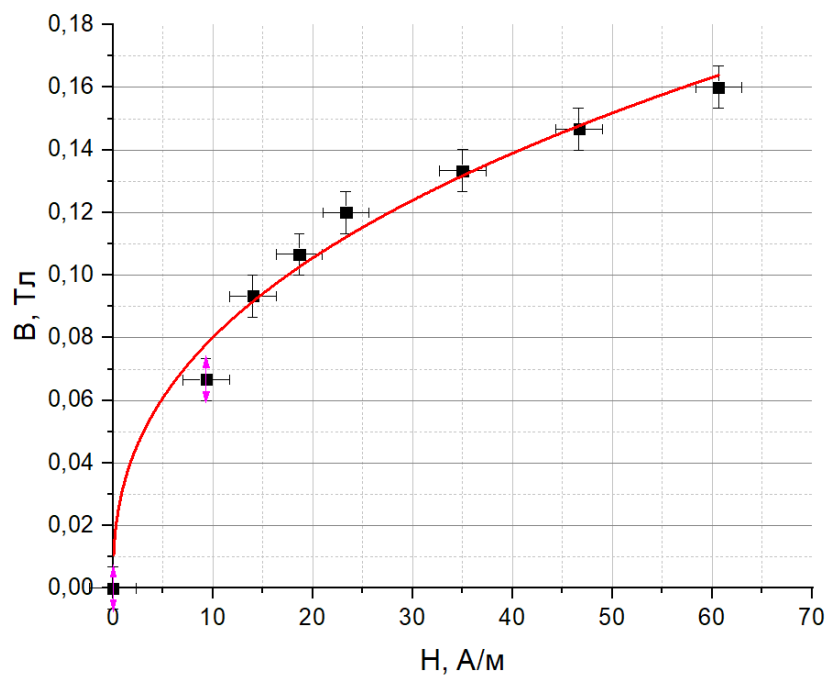


Рис.5. Кривая намагничивания для феррита

По графику оценим максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости:

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \quad (3)$$

Построим график dB/dH (H):

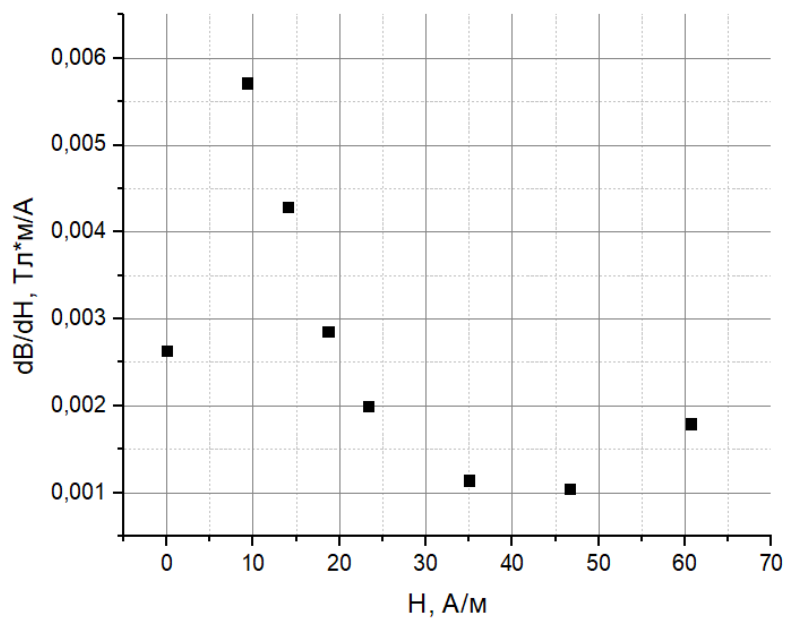


Рис.6. Зависимость dB/dH (H) для феррита

Из графика видно, что $\mu_{\max} \approx 4762$.

Рассчитаем коэрцитивную силу H_c по пересечению петли с осью X и индукцию насыщения B_s по пересечению петли с осью Y . Погрешность определяется половиной цены деления ЭО.

Полученные данные занесем в Таблицу 2 и сравним с табличными

Таблица 2

	Экспериментальное	Табличное
B_s , Тл	$0,16 \pm 0,01$	0,1-0,4
H_c , А/м	$7,47 \pm 2,33$	16-1600

Измерения для пермаллоя.

Проведем аналогичные измерения для образца из Пермоллоя.

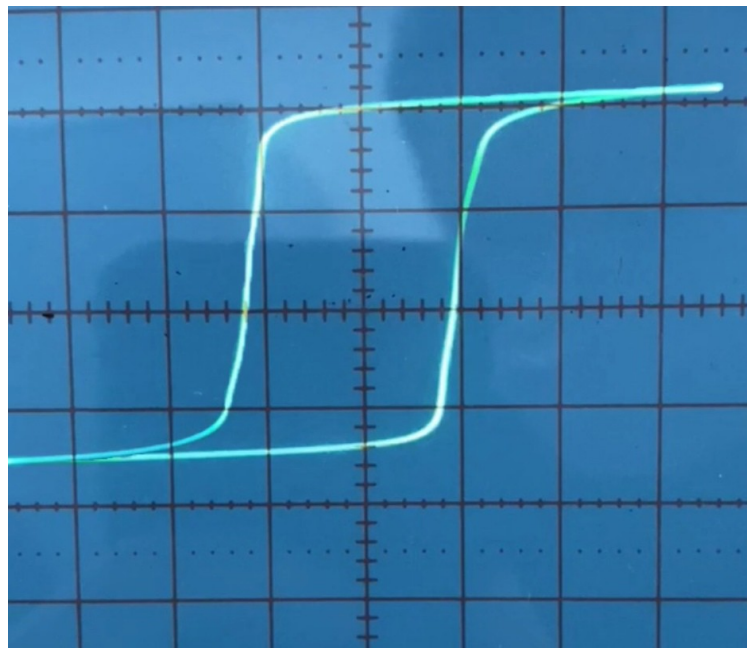


Рис.7.Предельная петля гистерезиса для Пермоллоя

Рассчитаем цену деления ЭО для оси X

$$H = \frac{K_x N_0}{R_0 2\pi R} = 27,78 \frac{A}{\text{м дел}}, \quad (4)$$

где $N_0=40$ витков, $R_0 = 0,3$ Ом, $2\pi R = 0,24$ м - определяются из данных образца.

$K_x = 50$ мВ/дел — горизонтальный масштаб ЭО.

Также рассчитаем цену деления для оси Y:

$$B = \frac{R_{и} C_{и} K_{у}}{S N_{и}} = 0,53 \frac{Tл}{дел}, \quad (5)$$

где $R_{и} = 20 \text{ кОм}$, $S = 3,8 \text{ см}^2$, $N_{и} = 400 \text{ витков}$, $C_{и} = 20 \text{ мкФ}$ — также определяются из данных образца.

Плавнo уменьшая ток намагничивания до нуля, отметим точки вершин наблюдаемых частных петель. Данные занесем в Таблицу 2.

Таблица 2

Н, дел	В, дел	Н, А/м	В, Тл
0	0	0	0
0,8	0,7	22,222	0,368
1	1	27,778	0,526
1,1	1,2	30,556	0,632
1,2	1,4	33,333	0,737
1,5	1,5	41,667	0,789

По данным Таблицы 2 построим кривую намагничивания.

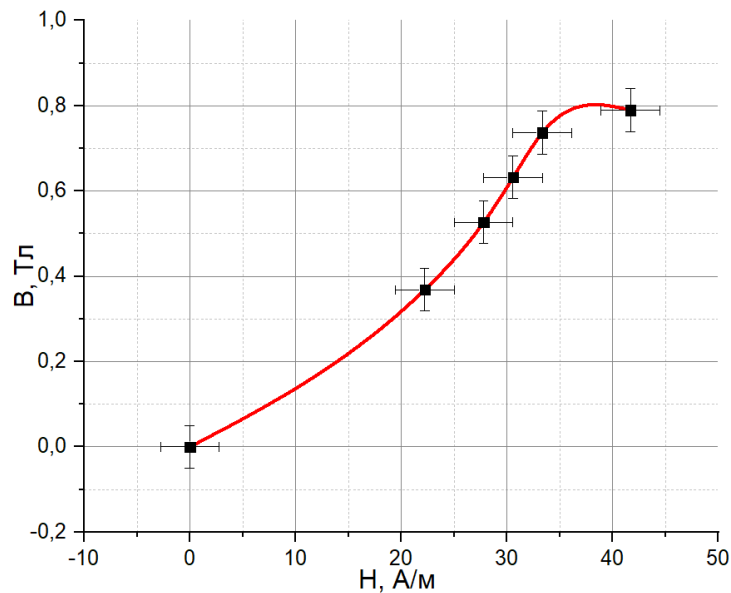


Рис.8. Кривая намагничивания для пермаллоя

Построим график $dB/dH(H)$:

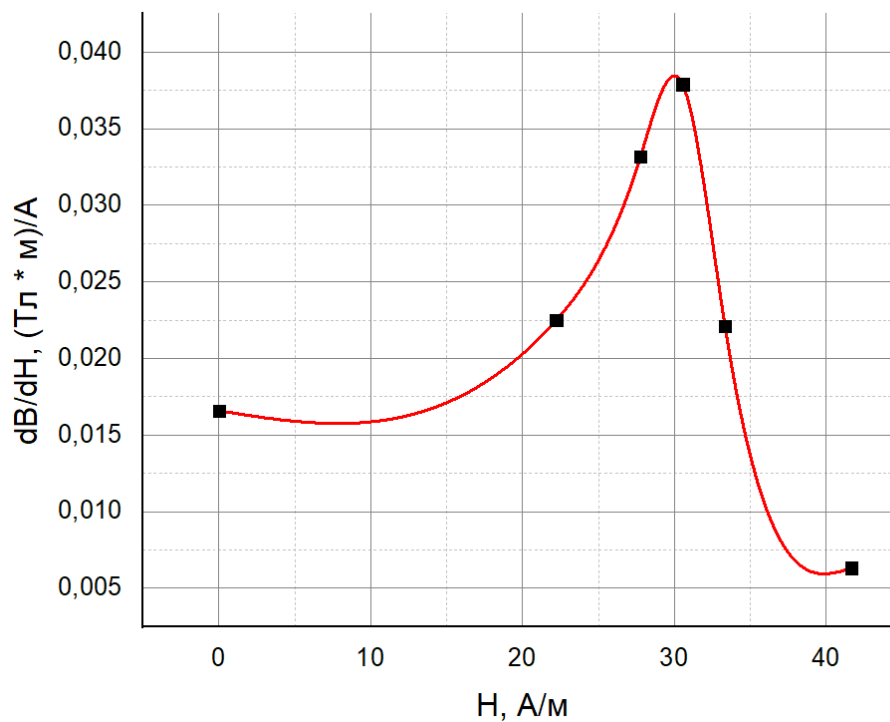


Рис.9. Зависимость $dB/dH(H)$ для пермаллоя

Оценим μ_{\max} по формуле (3), получим $\mu_{\max} \approx 30000$.

Рассчитаем коэрцитивную силу H_c по пересечению петли с осью X и индукцию насыщения B_s по пересечению петли с осью Y . Погрешность определяется половиной цены деления ЭО.

Полученные данные занесем в Таблицу 3 и сравним с табличными

Таблица 3

	Экспериментальное	Табличное
$B_s, Тл$	$1,00 \pm 0,05$	1,05
$H_c, А/м$	$27,78 \pm 2,78$	18 - 40

Измерения для кремнистого железа.

Проведем аналогичные измерения для кремнистого железа.

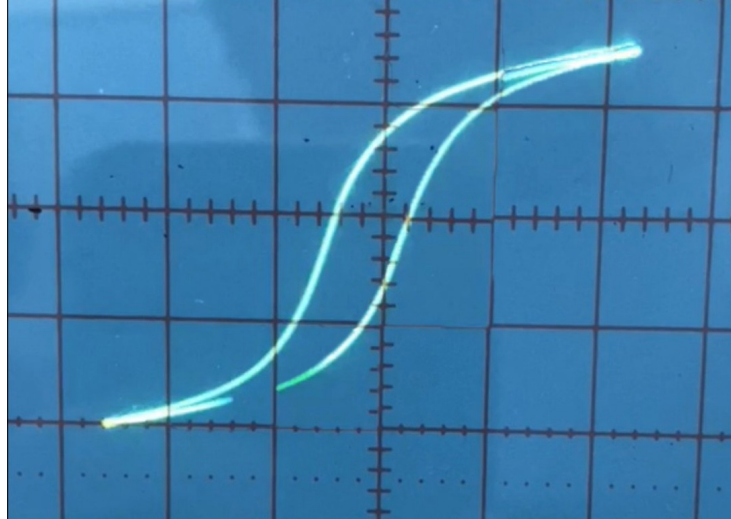


Рис.10.Предельная петля гистерезиса для кремнистого железа

Рассчитаем цену деления ЭО для оси X

$$H = \frac{K_x N_0}{R_0 2\pi R} = 58,33 \frac{A}{\text{м дел}}, \quad (4)$$

где $N_0 = 35$ витков, $R_0 = 0,3$ Ом, $2\pi R = 0,1$ м - определяются из данных образца.

$K_x = 50$ мВ/дел — горизонтальный масштаб ЭО.

Также рассчитаем цену деления для оси Y:

$$B = \frac{R_{\text{и}} C_{\text{и}} K_y}{S N_{\text{и}}} = 0,95 \frac{\text{Тл}}{\text{дел}}, \quad (5)$$

где $R_{\text{и}} = 20$ кОм, $S = 1,2$ см², $N_{\text{и}} = 350$ витков, $C_{\text{и}} = 20$ мкФ — также определяются из данных образца.

Плавно уменьшая ток намагничивания до нуля, отметим точки вершин наблюдаемых частных петель. Данные занесем в Таблицу 3.

Таблица 3

Н, дел	В, дел	Н, А/м	В, Тл
0	0	0	0
0,5	1	29,17	0,952
0,6	1,2	35	1,143
0,8	1,4	46,67	1,333
1	1,7	58,33	1,619
1,2	2	70	1,905
1,5	2,2	87,5	2,095
1,8	2,5	105	2,381

По данным Таблицы 3 построим кривую намагничивания.

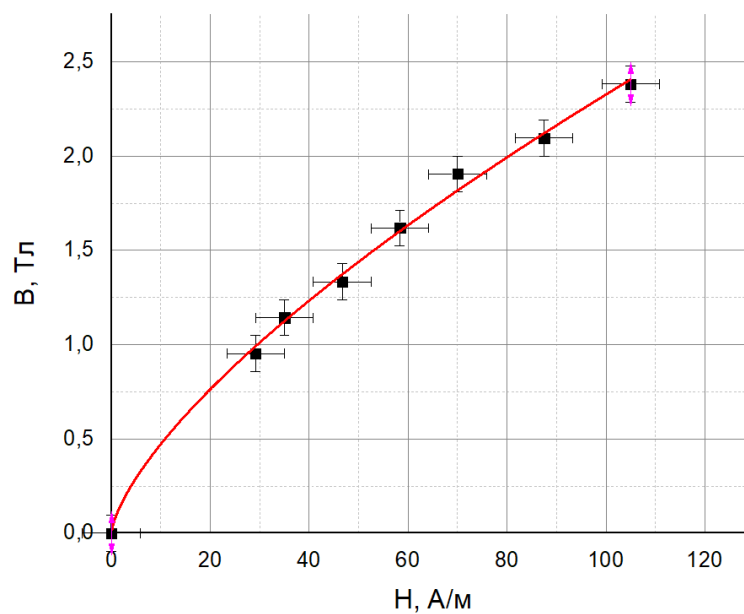


Рис.11. Кривая намагничивания для кремнистого железа

Построим график $dB/dH(H)$:

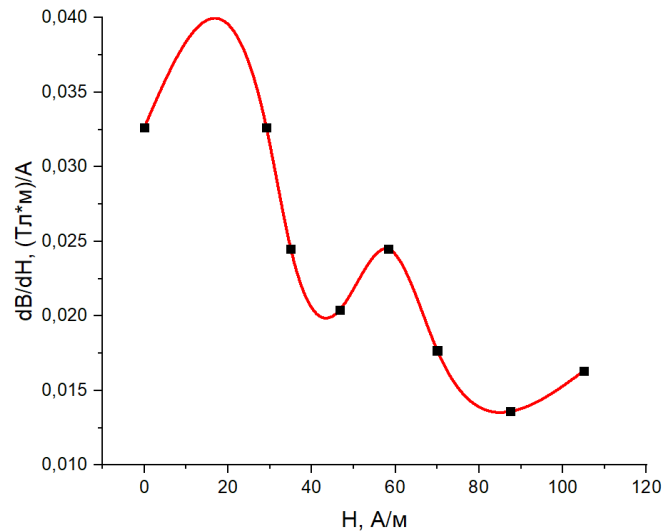


Рис.12. Зависимость $dB/dH(H)$ для кремнистого железа
Оценим μ_{\max} по формуле (3), получим $\mu_{\max} \approx 31800$.

Рассчитаем коэрцитивную силу H_c по пересечению петли с осью X и индукцию насыщения B_s по пересечению петли с осью Y . Погрешность определяется половиной цены деления ЭО.

Полученные данные занесем в Таблицу 3 и сравним с табличными

	Экспериментальное	Табличное
$B_s, \text{Тл}$	$1,71 \pm 0,1$	1,95 - 2,01
$H_c, \text{А/м}$	$40,83 \pm 5,83$	12 - 40

6. Выводы

1.Была оценена дифференциальная магнитная восприимчивость для трех образцов: совпавшая по порядку величины с табличными данными

2.Была вычислена коэрцитивная сила для трех образцов: для кремнистого железа и пермаллоя она совпала с табличными данными. Расхождения коэрцитивной силы феррита могут быть связаны с его геометрической формы и химического состава материала.

3.Также была вычислена индукция насыщения для трех образцов: для феррита и пермаллоя индукция насыщения совпадает с табличными значениями(в пределах погрешности). Расхождения индукции насыщения для кремнистого железа также могут быть связаны с его геометрической формой и химическим составом.