

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа физики и исследований им. Ландау

Лабораторная работа

Петня гистерезиса (динамический метод)

Выполнила:
Карасёва Таисия
Б02-001

Долгопрудный 2021

Цель работы: Исследование предельных петель гистерезиса и начальных кривых намагничивания для нескольких ферромагнитных образцов; определение магнитных характеристик материалов, чувствительность каналов X и Y осциллографа и постоянную времени τ интегрирующей цепочки.

В работе используются: автотрансформатор, понижающий трансформатор, амперметр и вольтметр, резистор, делитель напряжения, интегрирующая цепочка, электронный осциллограф, тороидальные образцы с двумя обмотками.

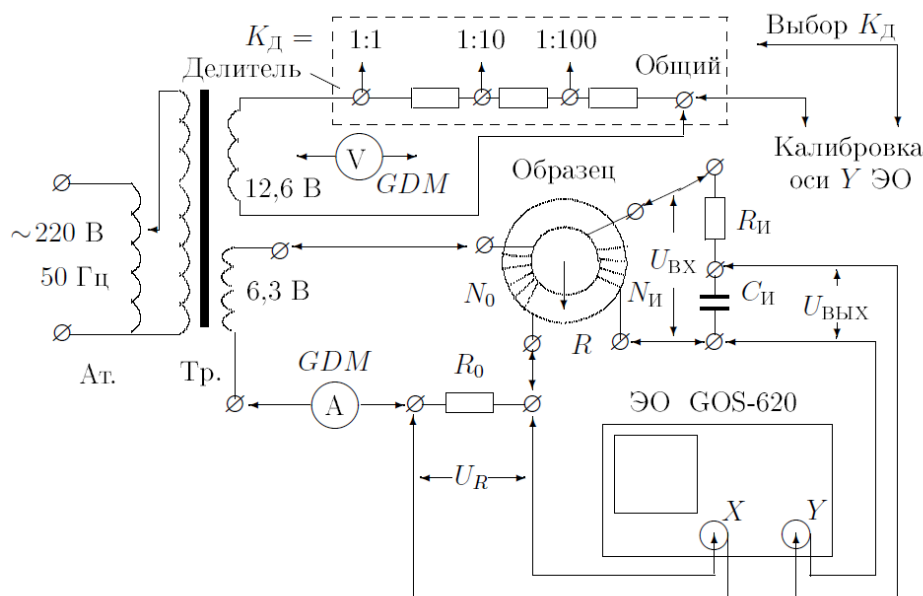


Рис. 1: Экспериментальная установка.

Схема установки приведена на рис. 1. Напряжение сети (220В, 50Гц) через разделительный понижающий трансформатор Тр. подается на реостат R_1 , включенный как потенциометр. Регулируемое напряжение $\sim 6,3$ В подведено к средним точкам переключателя K_0 : в положении "П" (петля) напряжение подводится к клеммам "6,3" на панели установки, В положении "Д" (делитель) - к клеммам делителя напряжения.

С клемм "6,3" регулируемое напряжение подается на намагничивающую обмотку N_0 исследуемого образца.

Ток в обмотке N_0 измеряется мультиметром А. Напряжение с сопротивления R_0 , включенного последовательно с обмоткой N_0 , подается на вход X электронного осциллографа (ЭО). Это напряжение пропорционально току в обмотке N_0 , а следовательно и напряженности H магнитного поля в образце.

Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмотки $N_{И}$ на вход интегрирующей RC -цепочки подается напряжение $U_{вх}$, пропорциональное производной \dot{B} , а с выхода снимается напряжение $U_{вых} = U_C$, пропорциональное величине B , и подается на вход Y .

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 ЭО. Для этого, во-первых, надо узнать, каким напряжениям (или токам) соответствуют амплитуды сигналов, видимых на экране, и во-вторых, - каким значениям B и H соответствуют эти напряжения (или току).

Измерение напряжения с помощью осциллографа. Исследуемый сигнал подается на вход X ЭО; длина $2x$ горизонтальной черты, наблюдаемой на экране, характеризует удвоенную амплитуду сигнала.

Если известна чувствительность усилителя K_X в вольтах на деление шкалы экрана (В/см),

то удвоенная амплитуда напряжения определяется произведени- еМ

$$2U_{X,0} = 2x \cdot K_X$$

Напряжение, подаваемое на ось Y , измеряется аналогично. Калибровку осей осциллографа (K_X и K_Y) можно использовать для построения кривой гистерезиса в координатах B и H :

Зная величину сопротивления R_0 , с которого снимается сигнал, можно рассчитать чувствительность канала по току $K_{XI} = K_X/R_0$ [А/ дел], затем определить цену деления шкалы ЭО в А/М Проверка калибровки горизонтальной оси ЭО с помощью амперметра проводится при закороченной обмотке N_0 . Эта обмотка с помещённым В неё ферромагнитным образцом является нелинейным элементом, так что ток в ней не имеет синусоидальной формы, и это не позволяет связать амплитуду тока с показаниями амперметра.

При закороченной обмотке N_0 амперметр А измеряет эффективное значение синусоидального тока $I_{эф}$, текущего через известное сопротивление R_0 . Сигнал с этого сопротивления подаётся на вход X ЭО. Измерив $2x$ длину горизонтальной прямой на экране, можно рассчитать m_X - чувствительность канала X :

$$m_X = 2R_0\sqrt{2}I_{эф}/(2x) \quad [В/ Дел] \quad (1)$$

Проверка калибровки вертикальной оси ЭО с помощью вольтметра. Сигнал с потенциометра R_1 подаётся на вход делителя напряжения (K_0 в положении "Д". Часть этого напряжения снимается с делителя с коэффициентом деления K_D (1/10 или 1/100) и подаётся на вход Y ЭО (вместо напряжения U_C). Цифровой вольтметр V измеряет напряжение $U_{эф}$ на этих же клеммах делителя. Измерив $2y$ - длину вертикальной прямой на экране, можно рассчитать чувствительность канала Y :

$$m_Y = 2\sqrt{2}U_{эф}/(2y) \quad [В/ дел] \quad (2)$$

При калибровке тороид должен быть отключён, так как несинусои Дальний ток нагрузки в первичной обмотке тороида приводит к искажению формы кривой напряжения и на обмотке трансформатора, питающей делитель.

Постоянную времени RC-цепочки можно определить экспериментально. С клемм "6,3"на вход интегрирующей цепочки подаётся синусоидальное напряжение $U_{вх}$. На вход Y осциллографа поочередно подаются сигналы со входа ($U_{вх}$) и выхода ($U_{вых} = U_C$) RC -цепочки. Измерив амплитуды этих сигналов с помощью осциллографа, можно рассчитать постоянную времени $\tau = RC$.

$$RC = \frac{U_{вх}}{\Omega U_{вых}} \quad (3)$$

Данные установки: $R_0 = 0.22$ Ом, $R_{и} = 20$ кОм, $C_{и} = 20$ мкФ.

Таблица 1: Параметры исследуемых образцов.

	N_0	$N_{и}$	$S, \text{см}^2$	$2\pi R \text{ см}$
Феррит	45	400	3.0	25
Пермаллой	15	300	0.66	14.1
Кремнистое железо	25	250	2.0	11

Теория

Измерение напряжения с помощью осциллографа

Исследуемый сигнал подается на вход X ; длина $2x$ горизонтальной черты, наблюдаемой на экране, характеризует удвоенную амплитуду сигнала.

Если известна чувствительность усилителя K_x в вольтах на деление шкалы экрана, то удвоенная амплитуда напряжения определяется произведением

$$2U_{X,0} = 2x \cdot K_x$$

Напряжение, подаваемое на вход Y определяется аналогично.

Калибровку осей осциллографа можно использовать для построения кривой гистерезиса в координатах B и H :

Зная величину сопротивления R_0 , с которого снимается сигнал, можно определить чувствительность канала по току $I = \frac{K_x}{R_0}$ [А/дел]; затем, используя формулу

$$H = \frac{IN_0}{2\pi R} \quad (4)$$

определить цену деления шкалы в А/м.

Используя формулу

$$B = \frac{R_{\text{и}} C_{\text{и}} U_{\text{вых}}}{SN_{\text{и}}} \quad (5)$$

можно рассчитать цену деления вертикальной шкалы в теслах.

Ход работы

1. Измерим полную ширину и высоту предельной петли ($2X_s$ и $2Y_s$), соответствующие удвоенной амплитуде колебания напряжённости H_s и индукции B_s поля в образце в состоянии насыщения. Измерим двойные амплитуды для коэрцитивного поля ($2X_c$) и остаточной индукции ($2Y_r$) как расстояния между точками пересечения петли с соответствующими осями.

Погрешность измерений = 0.1 дел.

Таблица 2: Амплитуды в делениях

	K_x , мВ/дел	K_y , мВ/дел	$2X_s$, дел	$2Y_s$, дел	$2X_c$, дел	$2Y_r$, дел
Феррит	10	20	10	4.4	1.8	2.2
Пермаллой	20	50	9.6	3.6	4.8	3.6
Кремнистое железо	10	5	9.6	8.0	4.8	3.6

2. Рассчитаем цену деления для петли по формулам (4) и (5)

Таблица 3: Цена деления

	I , мА	U , мВ	H , А/м	B , мТл
Феррит	45.5	20.0	8.2	66.7
Пермаллой	90.9	50.0	9.7	1010.1
Кремнистое железо	45.5	5.0	10.3	40.0

3. Рассчитаем амплитуду H_{max} , индукцию насыщения B_s , коэрцитивное поле H_c и остаточную индукцию B_r .

Таблица 4: Амплитуды

	H_{max} , А/м	B_s , мТл	H_c , А/м	B_r , мТл
Феррит	18.0 ± 0.4	334 ± 3	9.0 ± 0.4	61 ± 3
Пермаллой	17.5 ± 0.5	4850 ± 50	17.5 ± 0.5	2420 ± 50
Кремнистое железо	41.2 ± 0.5	192 ± 2	18.5 ± 0.5	96 ± 2

Таблица 5: Амплитуды, сравнение с табличными

	H_{max} , А/м	H_{max} , (табл) А/м	B_s , мТл	B_s , (табл) мТл
Феррит	18.0 ± 0.4	20	334 ± 3	0 – 150
Пермаллой	17.5 ± 0.5	18 – 20	4850 ± 50	0 – 1080
Кремнистое железо	41.2 ± 0.5	44	192 ± 2	0 – 2800

4. Снимем начальную кривую намагничивания: плавно уменьшая ток намагничивания от насыщения до нуля, отметим вершины наблюдаемых частных петель.

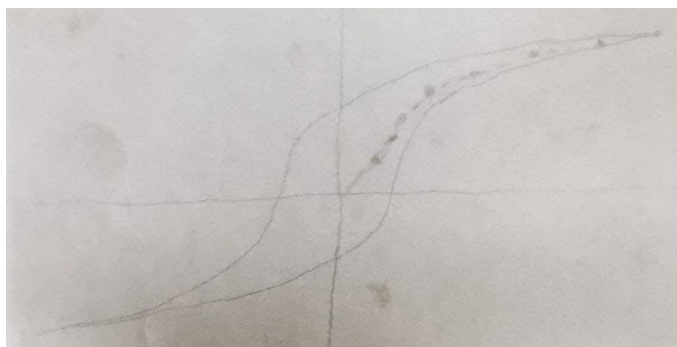


Рис. 2: Петля гистерезиса и кривая намагничивания для феррита.

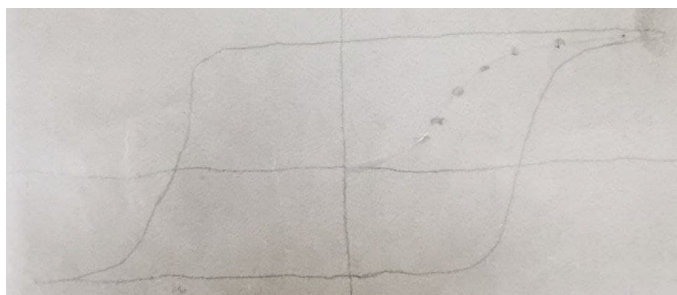


Рис. 3: Петля гистерезиса и кривая намагничивания для пермаллоя.

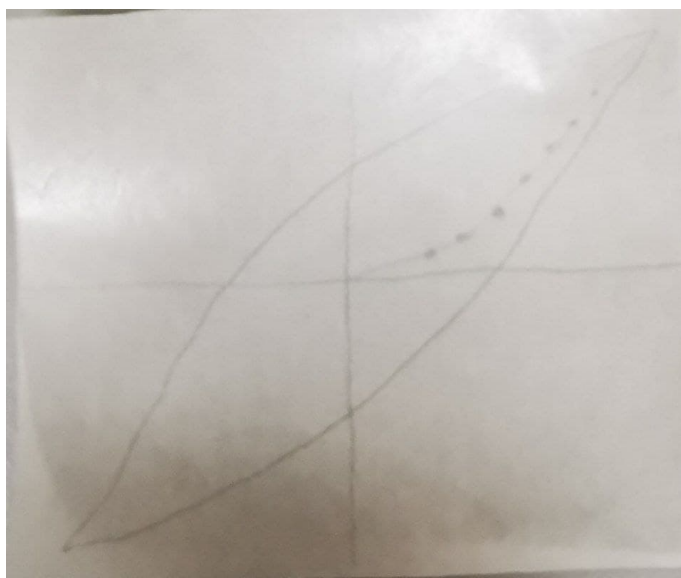


Рис. 4: Петля гистерезиса и кривая намагничивания для кремнистого железа.

5. По начальным кривым намагничивания оценим начальные и максимальные значения дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}} = \frac{dB}{dH}$

Таблица 6: Магнитная проницаемость

	$\mu_{\text{нач}}, 10^3$	$\mu_{\text{нач}}, 10^3$ (табл)	$\mu_{\text{max}}, 10^3$	$\mu_{\text{max}}, 10^3$ (табл)
Феррит	6.5 ± 0.2	≤ 3	17.9 ± 0.4	7
Пермаллой	141.7 ± 0.1	≤ 35	952.1 ± 0.6	100
Кремнистое железо	8.5 ± 0.1	≤ 7	--	15

$$\sigma_{dB/dH} = \frac{dB}{dH} \sqrt{\epsilon_B^2 + \epsilon_H^2}$$

6. Проверим калибровки по осям X и Y с помощью формул (1) и (2)

Таблица 7: Калибровка ЭО

	K_x , мВ/дел	K_y , мВ/дел	$I_{\text{ЭФ}}$, мА	$U_{\text{ЭФ}}$	m_X , мВ/дел	m_Y , мВ/дел
Феррит	10	20	127	0.01	10.0	18.9
Пермаллой	20	50	249	0.04	19.8	48.6
Кремнистое железо	10	5	140	0.11	0.01	4.7

7. Рассчитаем постоянную времени по формуле (3)

$$U_{\text{вх}} = 300 \pm 20 \text{ мВ}; \Omega = 100\pi; U_{\text{вых}} = 3 \pm 0.05 \text{ мВ} \Rightarrow \tau = 0.32 \text{ с}$$

$$\sigma_\tau = \tau \sqrt{\epsilon_{U_{\text{вх}}}^2 + \epsilon_{U_{\text{вых}}}^2} = 0.02$$

Теоретическое значение $RC = 0.4 \text{ с}$

Вывод

В данной работе

1. были определены параметры петли гистерезиса для пермаллоя, феррита и кремнистого железа. Значения амплитуд напряжённости для феррита и кремнистого железа не совпадают с теоретическими в пределах погрешности. Значение для феррита отличается от теоретического на 10%, для кремнистого железа - на 7%. Значение амплитуды напряжённости для пермаллоя совпадает с теоретическим в пределах погрешности
2. были получены кривые намагничивания для этих 3х материалов, из них были определены значения начальной и максимальной магнитной проницаемости. Для всех материалов полученные значения сильно превышают теоретически предсказанные
3. была проведена проверка калибровки обеих осей, полученные значения чувствительности отличаются от коэффициентов усиления не более чем на 3%
4. Было получено значение постоянной времени из значений снимаемого с цепочки напряжения и напряжения, подающегося на её вход. Оно не совпадает с теоретическим в пределах погрешности, отличается от него на 20%