
**Московский Физико-Технический Институт
(государственный университет)**

Лабораторная работа по курсу общей физики № *labnum*

name of your labwork

Автор:
your name *groupname*



Долгопрудный, 2021

Цель работы: изучение петель гистерезиса ферромагнитных материалов с помощью осциллографа.

Оборудование: автотрансформатор, понижающий трансформатор, амперметр и вольтметр (мультиметры), резистор, делитель напряжения, интегрирующая цепочка, электронный осциллограф, торoidalные образцы с двумя обмотками..

1 Теоретическое введение

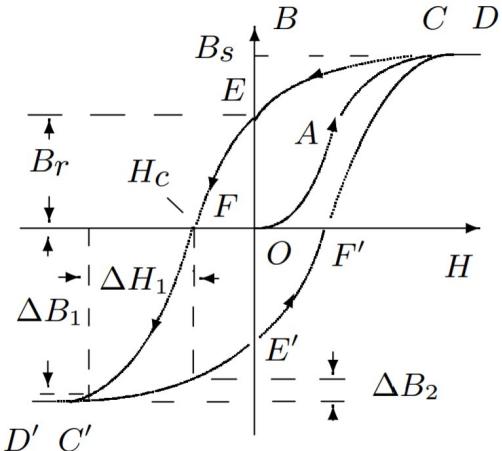


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

Индукция \vec{B} и напряженность магнитного поля \vec{H} в ферромагнитном материале неоднозначно связаны между собой: индукция зависит не только от напряженности, но и от предыстории образца. Связь между индукцией и напряженностью поля типичного ферромагнетика иллюстрирует рис. 1. Если к размагниченному образцу начинают прикладывать магнитное поле, то его намагничивание следует кривой $OACD$, выходящей из начала координат. Эту кривую называют *основной кривой намагничивания*.

Индукция \vec{B} в образце состоит

из индукции, связанной с намагничающим полем \vec{B} , и индукции, создаваемой самим намагниченным образцом. В системе СИ эта связь имеет вид

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}),$$

где \vec{M} - *намагченность* - магнитный момент единичного объема образца, а μ_0 - магнитная постоянная.

Намагнитим образец до насыщения - до точки D. Соответствующее значение индукции B_s называют индукцией насыщения. При уменьшении поля H до нуля зависимость $B(H)$ имеет вид кривой DCE , и при нулевом поле индукция имеет конечное ненулевое значение. Это остаточная индукция B_r . Чтобы размагнитить образец, то есть перевести его в состояние F, необходимо приложить "обратное" магнитное поле H_c , которое называют коэрцитивной силой.

Замкнутая кривая $DEF'D'E'F'D$, возникающая при циклическом перемагничивании образца, намагниченного до насыщения, называется *пределной петлей гистерезиса*.

1.1 Измерение магнитной индукции в образцах.

Магнитную индукцию удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при изменении магнитного потока Φ в катушке, намотанной на образец:

$$\mathcal{E} = -\frac{d}{dt}.$$

Тогда отсюда и из формулы $= BSN$ получаем:

$$|B| = \frac{1}{SN} \int \mathcal{E} dt.$$

Для интегрирования сигнала применяют интегрирующие схемы (рис. 2).

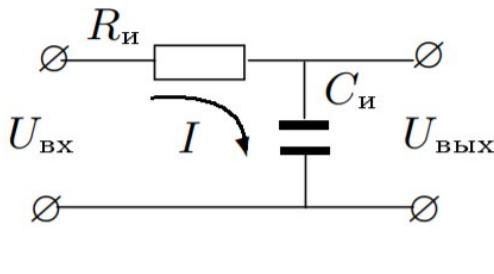


Рис. 2: Интегрирующая RC-цепь

Если выходной сигнал намного меньше входного ($U \ll U_i$) ток в цепи пропорционален входному напряжению: $I \simeq \frac{U}{R}$, а напряжение на емкости С

$$U \simeq \frac{1}{R} \int U dt.$$

Этот вывод тем ближе к истине, чем больше постоянная $\tau = RC$ превосходит характерное время процесса (например, его период). Для синусоидальных напряжений

$$U = \frac{U}{RC\Omega},$$

где Ω - частота сигнала.

В итоге, обозначив параметры интегрирующей цепи через R и C , получаем

$$|B| = \frac{1}{SN} \int U dt = \frac{R}{SN} U.$$

2 Экспериментальная установка.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 3.

Действующее значение переменного тока в обмотке N_0 измеряется амперметром А (мультиметром GDM). Последовательно с амперметром включено сопротивление R_0 , напряжение с которого 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 на вход интегрирующей RC-цепочки подается напряжение U (UBX), пропорциональное производной B , а с выхода снимается напряжение $U_C(U)$, пропорциональное величине B , и подается на вход Y осциллографа. 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 токи).

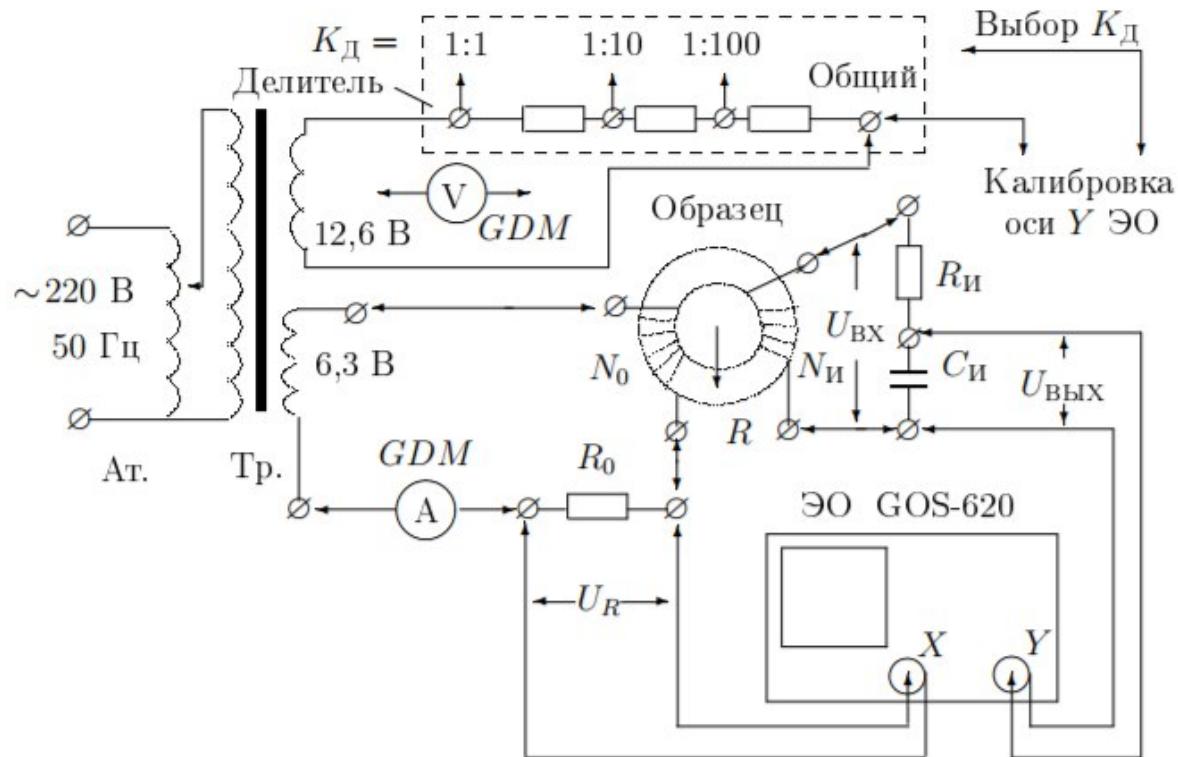


Рис. 3: Схема установки для исследования намагничивания образцов

3 Обработка данных

Экспериментальные данные собираем с трех образцов: феррита, пермаллоя (Fe-Ni) и кремнистого железа (Fe-Si). Для каждого из изучаемых образцов определим, при каких значениях тока и напряжения на осциллографе наблюдается предельная петля. После этого снимем зависимость тока и напряжения.

Для расчета напряженности магнитного поля воспользуемся формулой

$$H = \frac{IN_0}{2\pi r} \quad (1)$$

где r – радиус тороидального соленоида, N_0 – количество витков в первичной обмотке.

Индукцию магнитного поля найдем по формуле

$$B = \frac{RCU}{SN_u} \quad (2)$$

где R, C – параметры RC -цепи, N_u – количество витков во вторичной обмотке. По полученным данным построим графики зависимости $B(H)$, а так же найдем μ вещества

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$. Отметим, что поскольку мы используем цепь переменного тока, вольтметр и амперметр дают на выходе эффективные значение напряжения и силы тока. Для того, чтобы получить амплитудные значения, необходимо выходные значения умножить на $\sqrt{2}$.

$$U = \sqrt{2}U_{\text{эф}} \quad I = \sqrt{2}I_{\text{эф}} \quad (4)$$

3.1 Образец 1 (феррит)

Запишем параметры образца:

$$\begin{aligned} N_0 &= 35 \\ N_u &= 400 \\ S &= 3 \text{ см}^2 \\ 2\pi r &= 25 \text{ см} \end{aligned}$$

Предельная петля наблюдается при

$$\begin{aligned} I &= 132,38 \text{ mA} \\ U &= 36,62 \text{ мВ} \end{aligned}$$

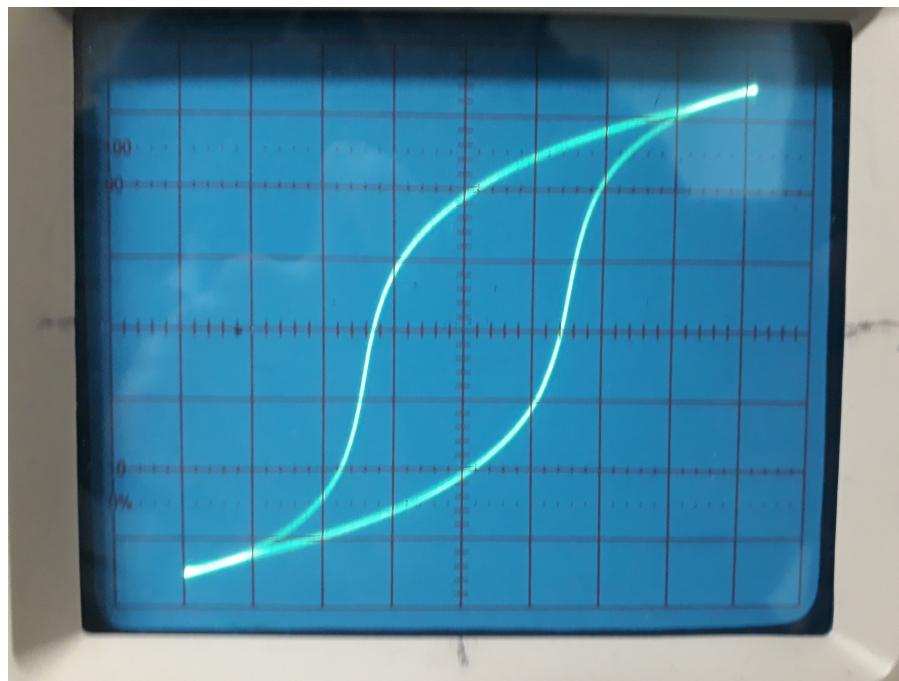


Рис. 4: Предельная петля, феррит

$I_{\text{эф}}, \text{ mA}$	$I, \text{ mA}$	$H, \text{ A/m}$	$U_{\text{эф}}, \text{ мВ}$	$U, \text{ мВ}$	$B, \text{ Тл}$	μ
24,05	34,01	4,76	3,00	4,24	0,01	2 363,46
27,33	38,65	5,41	4,60	6,51	0,02	3 189,04
29,92	42,31	5,92	6,10	8,63	0,03	3 862,86
32,06	45,34	6,35	7,60	10,75	0,04	4 491,50
34,33	48,55	6,80	9,10	12,87	0,04	5 022,37
36,36	51,42	7,20	10,60	14,99	0,05	5 523,61
38,60	54,59	7,64	12,00	16,97	0,06	5 890,27
41,32	58,44	8,18	13,70	19,37	0,06	6 282,05
44,22	62,54	8,76	15,00	21,21	0,07	6 427,08
50,87	71,94	10,07	17,50	24,75	0,08	6 518,05
57,80	81,74	11,44	19,00	26,87	0,09	6 228,26
63,85	90,30	12,64	20,50	28,99	0,10	6 083,23
70,10	99,14	13,88	22,00	31,11	0,10	5 946,29
78,40	110,87	15,52	23,50	33,23	0,11	5 679,28
88,17	124,69	17,46	25,00	35,36	0,12	5 372,30
99,10	140,15	19,62	26,50	37,48	0,12	5 066,56
111,70	157,97	22,12	28,00	39,60	0,13	4 749,48
126,30	178,62	25,01	29,50	41,72	0,14	4 425,47
144,15	203,86	28,54	31,00	43,84	0,15	4 074,63
164,30	232,36	32,53	32,50	45,96	0,15	3 747,89

Таблица 1: Феррит

По результатам эксперимента максимальное значение магнитной проницаемости для феррита $\mu_{max} = 6518$

$$H_c = 9,0 \text{ A/m}; B_s = 13,3 \text{ Тл}$$

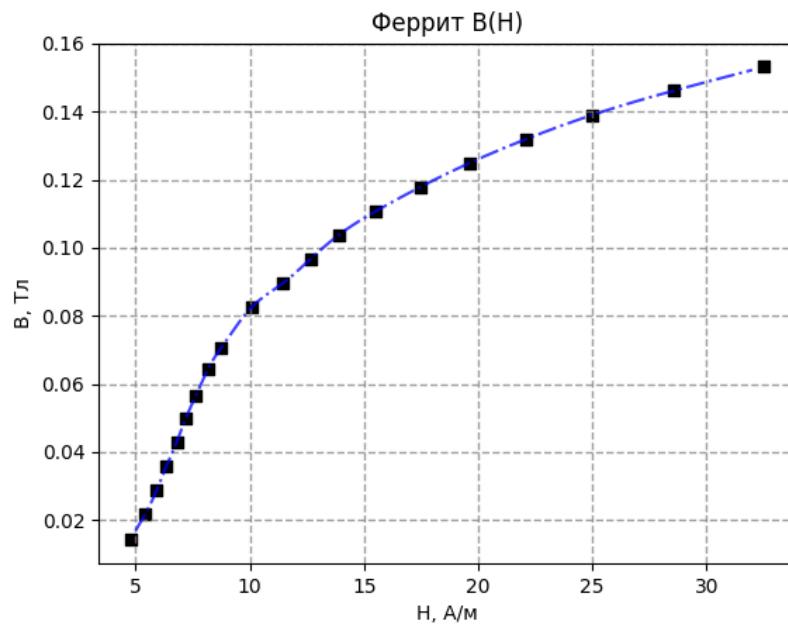


Рис. 5: Феррит, график зависимости $B(H)$

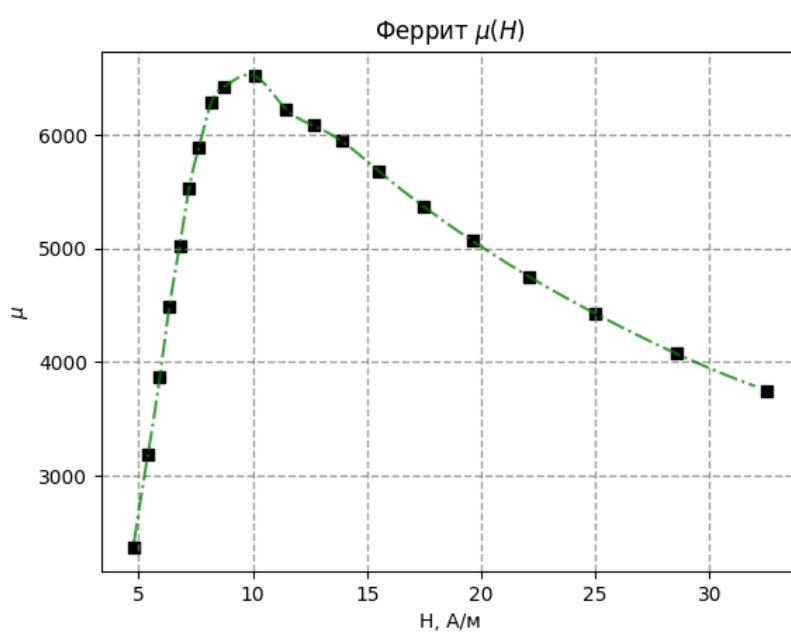


Рис. 6: Феррит, график зависимости $\mu(H)$

3.2 Образец 2 (permаллой)

Запишем параметры образца:

$$\begin{aligned}N_0 &= 40 \\N_u &= 200 \\S &= 3,8 \text{ см}^2 \\2\pi r &= 24 \text{ см}\end{aligned}$$

Предельная петля наблюдается при

$$\begin{aligned}I &= 233,54 \text{ mA} \\U &= 169,28 \text{ мВ}\end{aligned}$$

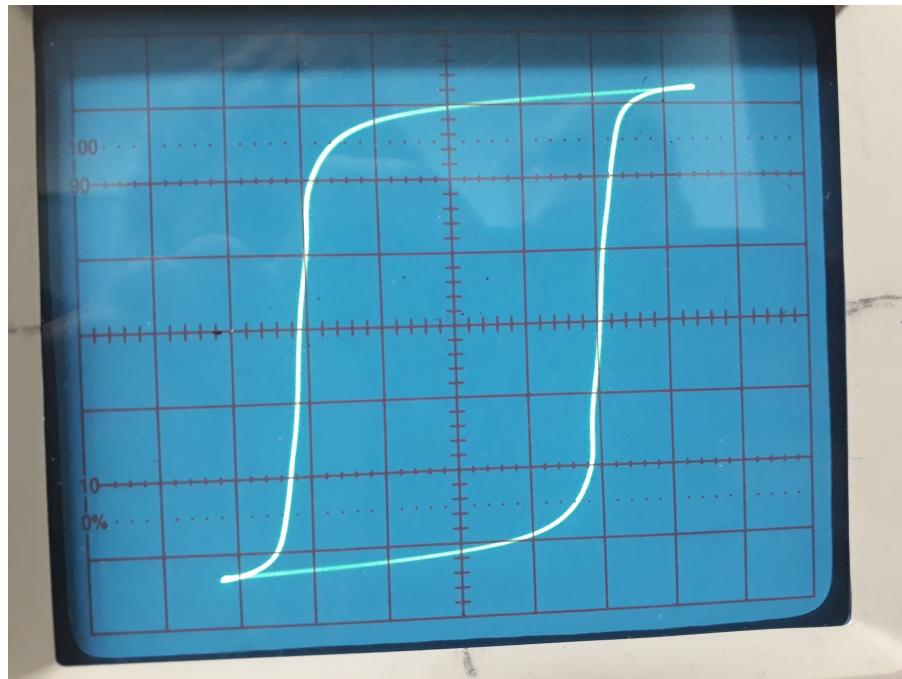


Рис. 7: Предельная петля, пермаллой

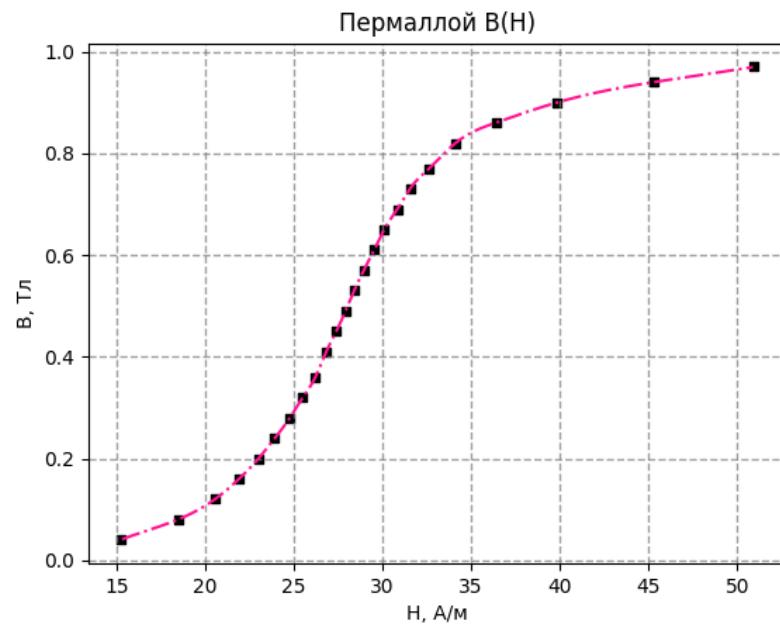


Рис. 8: Пермаллой, график зависимости $B(H)$

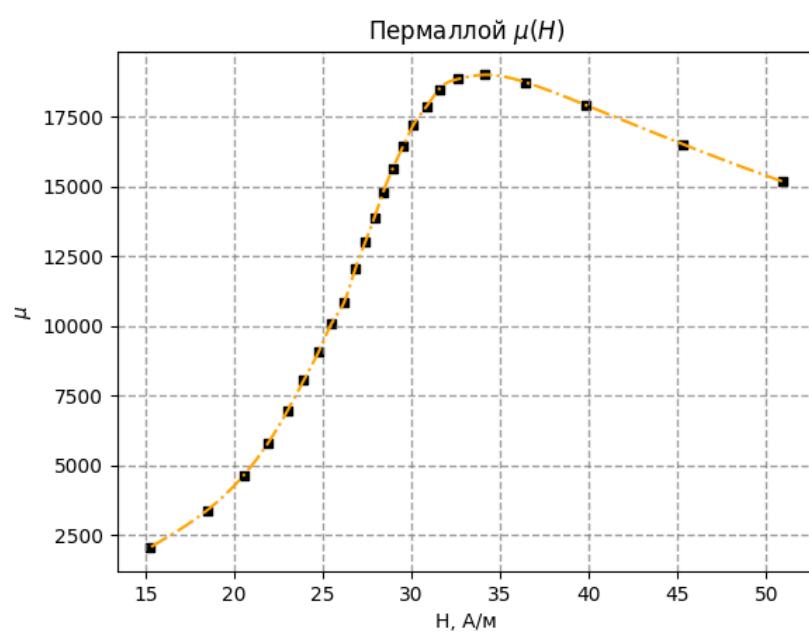


Рис. 9: Пермаллой, график зависимости $\mu(H)$

$I_{\text{эф}}, \text{mA}$	I, mA	$H, \text{A/m}$	$U_{\text{эф}}, \text{mV}$	U, mV	B, Tl	μ
64,50	91,22	15,20	5,20	7,35	0,04	2 025,96
78,28	110,70	18,45	10,50	14,85	0,08	3 370,75
87,16	123,26	20,54	16,10	22,77	0,12	4 641,91
92,90	131,38	21,90	21,40	30,26	0,16	5 788,77
97,60	138,03	23,00	27,00	38,18	0,20	6 951,88
101,49	143,53	23,92	32,50	45,96	0,24	8 047,26
105,10	148,63	24,77	38,00	53,74	0,28	9 085,92
108,20	153,02	25,50	43,50	61,52	0,32	10 103,00
111,20	157,26	26,21	48,10	68,02	0,36	10 869,97
113,77	160,90	26,82	54,50	77,07	0,41	12 038,07
116,22	164,36	27,39	60,20	85,14	0,45	13 016,79
118,40	167,44	27,91	65,50	92,63	0,49	13 902,01
120,50	170,41	28,40	71,00	100,41	0,53	14 806,74
122,80	173,67	28,94	76,50	108,19	0,57	15 654,93
125,28	177,17	29,53	82,10	116,11	0,61	16 468,33
127,66	180,54	30,09	87,40	123,60	0,65	17 204,61
130,80	184,98	30,83	93,00	131,52	0,69	17 867,48
133,83	189,26	31,54	98,50	139,30	0,73	18 495,71
138,40	195,73	32,62	103,90	146,94	0,77	18 865,47
144,70	204,64	34,11	109,50	154,86	0,82	19 016,64
154,34	218,27	36,38	115,20	162,92	0,86	18 756,95
169,10	239,14	39,86	120,60	170,55	0,90	17 922,22
192,30	271,95	45,33	126,40	178,76	0,94	16 517,94
216,24	305,81	50,97	130,60	184,70	0,97	15 177,33

Таблица 2: Пермаллои

По результатам эксперимента максимальное значение магнитной проницаемости для пермаллоя $\mu_{max} = 19016$

$$H_c = 19,2 \text{ A/m}; B_s = 1,2 \text{ Tl}$$

3.3 Образец 3 (кремнистое железо)

Запишем параметры образца:

$$\begin{aligned} N_0 &= 35 \\ N_u &= 350 \\ S &= 1,2 \text{ см}^2 \\ 2\pi r &= 10 \text{ см} \end{aligned}$$

Предельная петля наблюдается при

$$\begin{aligned} I &= 877,38 \text{ mA} \\ U &= 167,44 \text{ мВ} \end{aligned}$$

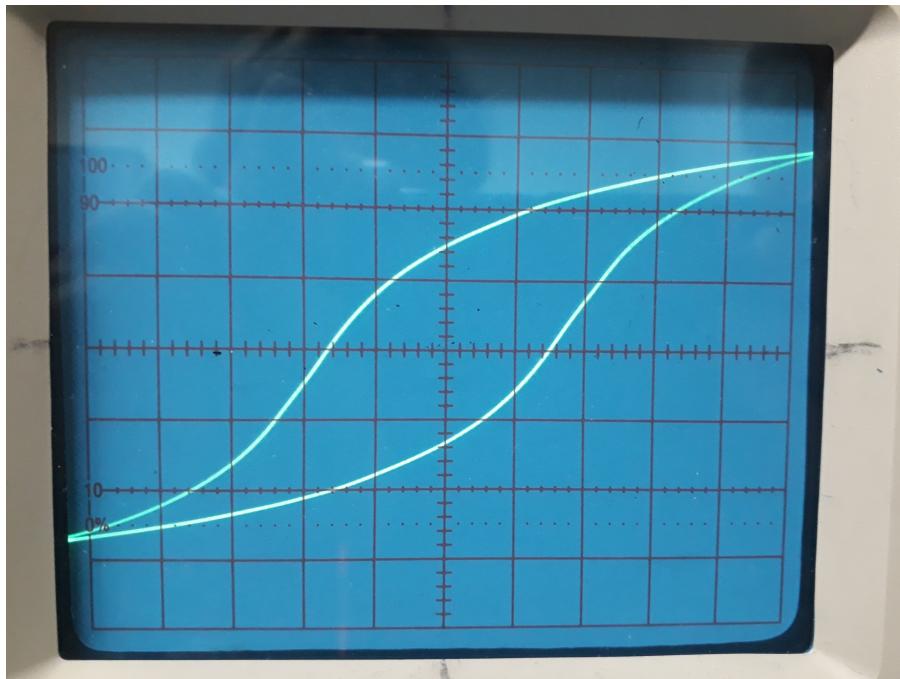


Рис. 10: Предельная петля, кремнистое железо

4 Вывод

Петля гистерезиса является качественной характеристикой намагничивания ферромагнетика, показывая такие эффекты, как домены, в том числе площадь петли пропорциональна энергии, теряемой в единице объёма вещества за время цикла.

5 Дополнительные вопросы к работе

1. Вывести формулу индуктивности тора L (длинного соленоида) с магнитным сердечником. Рассчитать L для первичной и вторичной обмоток.

Пусть есть тороидальная катушка с внутренним радиусом R и числом витков N . По теореме о циркуляции

$$B \cdot 2\pi r = \frac{4\pi}{c} I \Rightarrow B = \frac{2\mu N}{cr} I \quad (5)$$

Тогда поток вектора индукции через тороидальную катушку прямоугольного сечения

$$\int_R^{R+a} B(r) Nb dr = \int_R^{R+a} \frac{2\mu N^2}{cr} I b dr = \frac{2\mu N^2 I b}{c} \ln \frac{R+a}{R} \quad (6)$$

$$\Phi = \frac{2\mu N^2 I b}{c} \ln \frac{R+a}{R} = \frac{LI}{c} \quad (7)$$

Тогда индуктивность тороидальной катушки

$$L = 2\mu N^2 b \ln \frac{R+a}{R} \quad (8)$$

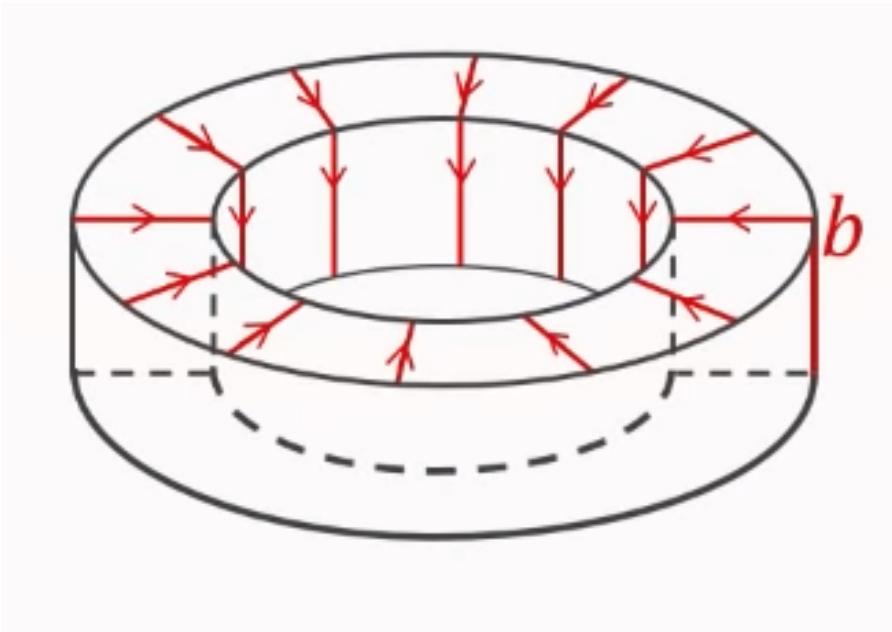


Рис. 11: Тороидальная катушка

Если проволака намотана тонким радиусом, то выполняется соотношение $\frac{a}{R} \ll 1$. В этом случае, раскладывая натуральный логарифм в ряд Тейлора получим¹

$$L = \frac{2\mu N^2 ba}{R} \quad (9)$$

	первичная обмотка L_0 , мГн	вторичная обмотка L_u , мГн
феррит	12,03	1572,18
пермаллой	60,53	1513,32

Таблица 3: индуктивность

2. Определить резонансную частоту контура на вторичной обмотке. Оценить его добротность.

Согласно схеме, мы имеем дело с параллельным RCL-контуром. Выражение для резонансной частоты

Параметры установки: $R_u = 200$ кОм, $C = 200$ мкФ.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (10)$$

Резонансная частота на феррите $\omega_0 = 56,39$ с⁻¹. Резонансная частота на пермаллое $\omega_0 = 57,49$ с⁻¹.

Добротность для последовательного контура

$$Q = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (11)$$

¹В данной задаче мы считали, что тороидальная катушка имеет прямоугольное сечение с площадью S , указанной в параметрах образца, поэтому получим расчетную формулу $L = \frac{2\mu N^2 S}{R}$

Добротность контура при исследовании феррита:

$$Q = 71,4$$

Добротность контура при исследовании пермаллоя:

$$Q = 72,8$$

3. Определить реактивные сопротивления катушки, емкости и сравнить их с активным сопротивлением.

$$X_L = \omega L \quad X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (12)$$

Значения реактивных сопротивлений для феррита: $X_L = 280,2$ Ом, $X_C = 280,1$ Ом;

Значения реактивных сопротивлений для пермаллоя: $X_L = 274,8$ Ом, $X_C = 274,7$ Ом;

Активное сопротивление схемы $R = 200000$ Ом. Можем убедиться в том, что для обоих образцов $X_L \ll R$ и $X_C \ll R$.

4. Пояснить качественно, как будет меняться резонансная частота контура в зависимости от тока через первичную обмотку.

При небольших токах вклад в общий поток, а с ним собственно и в индуктивность, дает как магнитное поле, создаваемое током, так и намагниченность сердечника.

При достаточно больших токах последнее слагаемое перестает вносить вклад, так как существует состояние насыщения. Следовательно, при достаточно больших токах при его увеличении общая индуктивность падает, а так как $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, то резонансная частота возрастает.