

# Лабораторная работа №3.4.5

## Петля гистерезиса (динамический метод)

Джокер Бэтмен, Б02-000, 18.09.2021

### Введение

**Цель работы:** изучение петель гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных токах.

**В работе используются:** автотрансформатор, понижающий трансформатор, интегрирующая цепочка, амперметр, вольтметр, электронный осциллограф, делитель напряжения, тороидальные образцы с двумя обмотками (с сердечниками из феррита, пермаллоя и кремнистого железа).

### Теоретическая справка

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 рисунок 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 (например, петля  $AA'$ , обозначенная пунктиром на рисунке 1). Если амплитуда напряжённости достаточно велика, то образец будет периодически достигать *насыщения*, что на рисунке соответствует кривой  $CERC'E'F'C$  (*предельная петля гистерезиса*). Пересечение предельной петли с вертикальной осью соответствует остаточной индукции  $B_r$ , пересечение с горизонтальной осью – коэрцитивному полю  $H_c$ . Крайние точки петель, соответствующие амплитудным значениям  $H$  (например, точка  $A$  на рисунке 1), лежат на *начальной кривой намагничивания* ( $OAC$ ).

**Измерение магнитной индукции.** Магнитную индукцию  $B$  удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при измерении магнитного потока  $\Phi$  в катушке, намотанной на образец. Пусть катушка с  $N$  витками плотно охватывает образец сечением  $S$ , и индукция  $B$  в образце однородна. Тогда

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

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*. Входное напряжение от источника  $U_{вх}(t)$  подаётся на последовательно соединённые резистор  $R_n$  и конденсатор  $C_n$ . Выходное напряжение  $U_{вых}(t)$

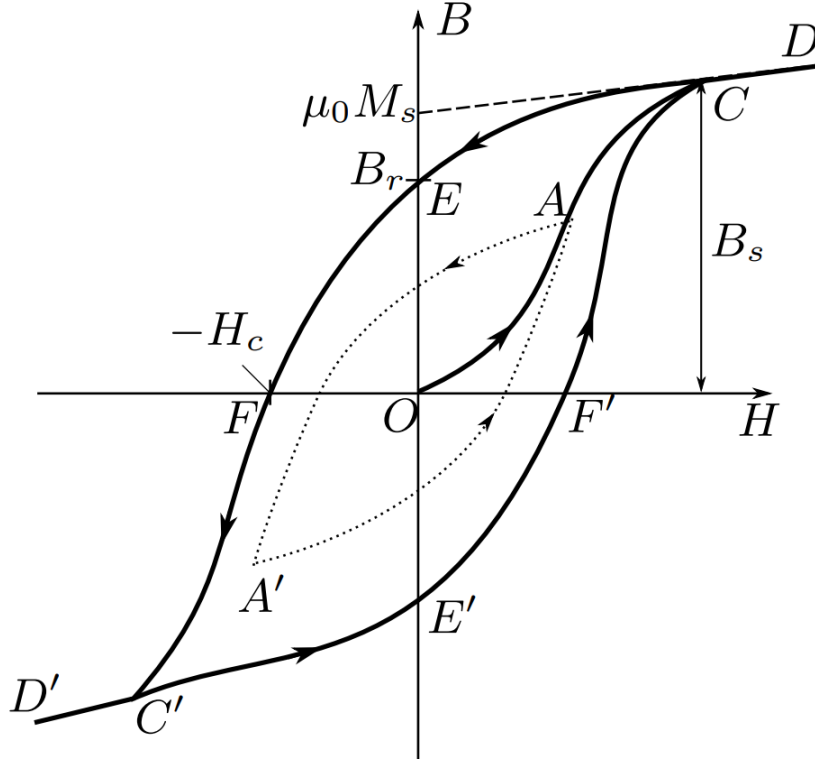


Рис. 1 — Петля гистерезиса ферромагнетика

снимается с конденсатора. Предположим, что (1) сопротивление источника мало по сравнению с  $R_{\text{и}}$ ; (2) выходное сопротивление (сопротивление на входе осциллографа), напротив, велико:  $R_{\text{вых}} \gg R_{\text{и}}$ ; и, наконец, (3) сопротивление  $R_{\text{и}}$  достаточно велико, так что почти всё падение напряжения приходится на него, а  $U_{\text{вых}} \ll U_{\text{вх}}$ . В таком случае ток цепи равен  $I = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}}{R_{\text{и}}} \approx \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{и}}}$ , и входное и выходное сопротивление связаны соотношением

$$U_{\text{вых}} \frac{q}{C_{\text{и}}} = \frac{1}{C_{\text{и}}} \int_0^t I dt \approx \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \int_0^t U_{\text{вх}} dt,$$

где  $\tau_{\text{и}} = R_{\text{и}} C_{\text{и}}$  — постоянная времени  $RC$ -цепочки. Для индукции поля получаем

$$|B| = \frac{1}{SN} \int U_{\text{вх}} dt = \frac{\tau_{\text{и}}}{SN} U_{\text{вх}}.$$

## Экспериментальная установка

Схема установки приведена на рисунке 2. Напряжение сети (220 В, 50 Гц) с помощью регулировочного автотрансформатора Ат через разделительный понижающий трансформатор Тр подаётся на намагничивающую обмотку  $N_0$  исследуемого образца.

Действующее значение переменного тока в обмотке  $N_0$  измеряется амперметром А (мультиметром GDM). Последовательно с амперметром вклю-

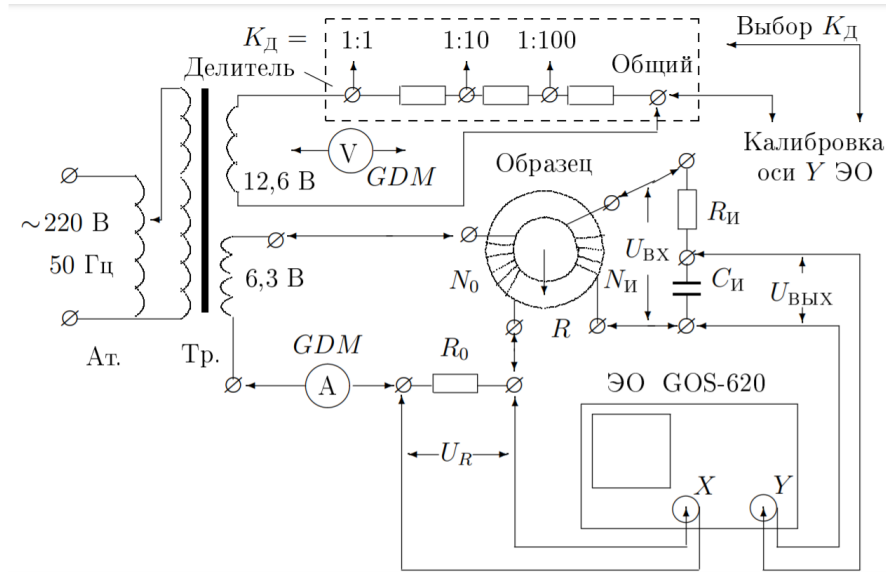


Рис. 2 — Схема установки для исследования намагничивания образцов

чено 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  $N_{\text{и}}$  на вход интегрирующей  $RC$ -цепочки подается напряжение  $U_{\text{и}}$  ( $U_{\text{вх}}$ ), пропорциональное производной  $\dot{B}$ , а с выхода снимается напряжение  $U_C$  ( $U_{\text{вых}}$ ), 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).

**Измерения 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 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 определить чувствительность канала по току  $K_{XI} = \frac{K_X}{R_0} \left[ \frac{\text{А}}{\text{дел}} \right]$  и затем определить цену деления

шкалы в  $\frac{\text{А}}{\text{м}}$ .

Зная чувствительность  $K_Y$ , можно рассчитать цену деления вертикальной шкалы ЭО в теслах.

Наличие в схеме амперметра и вольтметра позволяет провести *независимую калибровку* усилителей ЭО, т.е. проверить значения коэффициентов  $K_X$  и  $K_Y$  (ручки регулировки усиления ЭО могут быть сбиты).

**Проверка калибровки горизонтальной оси ЭО с помощью амперметра** проводится при закороченной обмотке  $N_0$ . Эта обмотка с помещённым в неё ферромагнитным образцом являясь 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  $A$  измеряет эффективное значение синусоидального тока  $I_{\text{эф}}$ , 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  $X$ :

$$m_X = \frac{2\sqrt{2}R_0I_{\text{эф}}}{2x} \left[ \frac{\text{В}}{\text{дел}} \right].$$

**Проверка калибровки вертикальной оси ЭО с помощью вольтметра.** Сигнал с обмотки 12,6 В понижающего трансформатора (2) подаётся на делитель напряжения. Часть этого напряжения снимается с делителя с коэффициентом деления  $K_d$  ( $\frac{1}{10}$  или  $\frac{1}{100}$ ) и подаётся на вход  $Y$  ЭО (вместо напряжения  $U_C$ ). Мультиметр  $V$  измеряет напряжение  $U_{\text{эф}}$  на этих же клеммах делителя. Измерив  $2y$  – длину вертикальной прямой на экране, можно рассчитать чувствительность канала  $Y$ :

$$m_Y = \frac{2\sqrt{2}R_0U_{\text{эф}}}{2x} \left[ \frac{\text{В}}{\text{дел}} \right].$$

При этом тороид должен быть отключен, так как несинусоидальный 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 обмотки 6,3 В на вход интегрирующей цепочки подаётся синусоидальное напряжения  $U_{\text{вх}}$ . На вход  $Y$  осциллографа поочерёдно подаются сигналы со входа ( $U_{\text{вх}}$ ) и выхода ( $U_{\text{вых}}$ ) RC-цепочки. Измерив амплитуды этих сигналов с помощью осциллографа, можно рассчитать постоянную времени  $\tau = RC$ . Тогда

$$RC = \frac{U_{\text{вх}}}{\Omega U_{\text{вых}}}.$$

## Ход работы

### I. Петля гистерезиса на экране ЭО

Соберём схему согласно 2 и подготовим приборы к работе. Подберём ток питания в намагничивающей обмотке с помощью реостата и коэффициенты усиления ЭО так, чтобы предельная петля гистерезиса занимала большую часть экрана. Получив предельную петлю, уменьшим ток до исчезновения

на ней "усов" – почти горизонтальных участков по краям. Отцентрируем вертикальный и горизонтальный лучи.

Для каждого образца сделаем фотографию предельной петли так, чтобы по ней можно было с хорошей точностью восстановить форму последней. Сфотографируем кривую при ещё двух различных значениях тока при его уменьшении, и полученные оттуда координаты концов частных петель используем для проведения кривой. Эта кривая будет проходить в непосредственной близости от начальной кривой намагничивания. Кривая намагничивания и предельная петля для каждого из образцов показаны на рисунках 3, 4 и 5. Кривые проведены с помощью кубических сплайнов.

Рассчитаем цену деления ЭО для петли в  $\frac{\text{А}}{\text{м}}$  для оси  $X$  по формуле

$$H = \frac{N_0 K_X}{2\pi R R_0}$$

и в Тл для оси  $Y$

$$B = \frac{R_n C_n K_Y}{S N_n}.$$

Измерим по предельной петле двойные амплитуды для коэрцитивной силы  $[2x(c)]$  и индукции насыщения  $[2y(s)]$ . Все измеренные и рассчитанные значения, равно как и параметры образца ( $N_0$ ,  $N_n$ ,  $S$  и  $2\pi R$ ), значения коэффициентов усиления  $K_X$  и  $K_Y$  и ток  $I_{\text{эф}}$  в намагничивающей обмотке для каждого образца занесём в сводную таблицу 1. Занесём туда также вычисленную из наклона кривых намагничивания дифференциальную магнитную проницаемость  $\mu_{\text{диф}}$  вблизи нуля и справочные величины для образцов.

Источником погрешностей в финальных ответах служат погрешности чувствительности каналов осциллографа и погрешности определения размеров по экранной сетке осциллографа. В погрешность магнитной проницаемости вносит вклад также неточность определения её по угловому коэффициенту касательной к графику. Опустим вычисление погрешностей ввиду его громоздкости, и приведём их непосредственно в таблице для последних трёх строк.

## II. Проверка калибровки оси $X$ ЭО с помощью амперметра

Отключим намагничивающую обмотку  $N_0$  от цепи, соединив оба провода, идущих к обмотке, на одной из её клемм. С помощью  $R_1$  подберём такой ток через сопротивление  $R_0$ , при котором горизонтальная прямая занимает большую часть экрана ЭО для рабочего коэффициента  $K_X = 50,0 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$ . Ток через амперметр при этом равен  $I_{\text{эф}} = (0,583 \pm 0,004) \text{ А}$ , сопротивление  $R_0 = 0,3 \Omega$ , а горизонтальная прямая на экране занимает  $(10,0 \pm 0,1) \text{ дел}$  (здесь погрешность определения размер прямой на экране осциллографа равна половине цены малых делений экранной сетки, то есть  $0,1 \text{ дел}$ , а погрешность мультиметра GDM равна  $0,005I + 15 \text{ ед. мл. разряда}$ ). Тогда чувствительность канала равна  $m_X = (49,5 \pm 0,6) \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$ , откуда можно заключить, что  $m_X = K_X$  в пределах погрешности  $\varepsilon_X = 1,3 \%$ .

Таблица 1 – Параметры образцов из (А) пермаллоя, (В) феррита и (С) кремнистого железа

	А	В	С
$N_0$	35	40	40
$N_{\text{и}}$	220	400	400
$S, \text{ см}^2$	3,8	3,0	1,2
$2\pi R, \text{ см}$	24	25	10
$I_{\text{эф}}, \text{ А}$	0,158	0,119	0,455
$K_X, \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$	20,0	20,0	50,0
$K_Y, \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$	100,0	10,0	50,0
$H, \frac{\text{А}}{\text{м}}$	9,72	10,67	66,7
$B, \text{ Тл}$	0,478	0,033	0,417
$2x (c)$	2,37	0,61	0,73
$2y (s)$	1,86	1,64	1,54
$H_c, \frac{\text{А}}{\text{м}}$	$3,89 \pm 0,15$	$8,20 \pm 0,23$	$8,01 \pm 0,18$
$B_s, \text{ Тл}$	$1,01 \pm 0,09$	$0,26 \pm 0,04$	$1,93 \pm 0,21$
$\mu_{\text{диф}}, 10^3$	$7,6 \pm 0,6$	$1,2 \pm 0,2$	$1,6 \pm 0,3$
$H_{c0}, \frac{\text{А}}{\text{м}}$	4,00	8,00	8,00
$B_{s0}, \text{ Тл}$	1,08	0,25	2,00
$\mu_{\text{диф}0}, 10^3$	8,00	1,00	1,50

### III. Проверка калибровки оси $Y$ ЭО с помощью вольтметра

Соединим вход  $Y$  ЭО с клеммами делителя " $\frac{1}{100}$ –земля". Не меняя рабочего коэффициента  $K_Y = 50,0 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$ , подберём с помощью потенциометра  $R_2$  напряжение, при котором вертикальная прямая занимает почти весь экран. Подключим вольтметр  $V$  к тем же точкам делителя и измерим эффективное значение напряжения. Получим  $U = (0,145 \pm 0,003) \text{ В}$  и длину вертикальной прямой  $(8,0 \pm 0,1) \text{ дел}$ , откуда  $m_Y = (50,4 \pm 1,0) \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$ , откуда можно заключить, что  $m_Y = K_Y$  в пределах погрешности  $\varepsilon_Y = 2,0 \%$ .

### IV. Определение $\tau$ – постоянной времени $RC$ -цепочки

Для определения напряжений на входе и выходе интегрирующей ячейки соединим вход ячейки с обмоткой 6,3 В трансформатора. Подключим  $Y$ -вход ЭО ко входу интегрирующей ячейки и отключим  $X$ -вход ЭО. Установим чувствительность  $K_Y = 2,00 \frac{\text{В}}{\text{дел}}$  и подберём с помощью реостата такой ток, при котором вертикальная прямая занимает большую часть экрана, и определим входное напряжение на  $RC$ -цепочке как  $U_{\text{вх}} = 2y \cdot K_Y = (16,0 \pm 0,2) \text{ В}$ .

Теперь, не изменяя тока, переключим  $Y$ -вход ЭО к выходу ячейки (конденсатору  $C$ ), установим  $K_Y = 20,0 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$  и аналогичным образом определим напряжение  $U_{\text{вых}} = (124,0 \pm 2,0) \text{ мВ}$ .

Рассчитаем постоянную времени, получим  $\tau = (0,408 \pm 0,008) \text{ с}$ . Ту же величину через указанные на установке параметры  $R_{\text{и}} = 20 \text{ к}\Omega$ ,  $C_{\text{и}} = 20 \text{ мкФ}$  найдём как  $\tau = 0,400 \text{ с}$ . Видим, что полученные значения совпадают

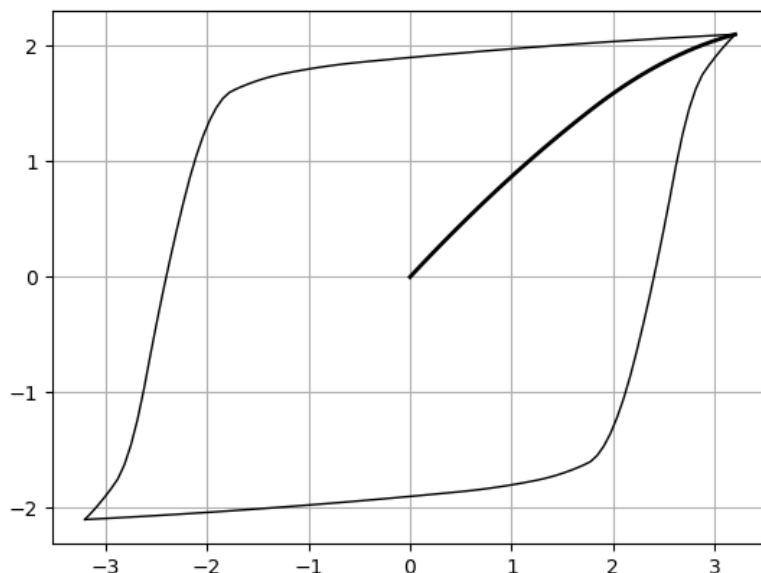


Рис. 3 — Предельная петля гистерезиса и начальная кривая намагничивания для образца из пермаллоя. Восстановлено по точкам, снятым с экрана ЭО, с помощью кубических сплайнов

в пределах погрешности.

Несложно заметить, что  $R = 20,0 \text{ к}\Omega$ ,  $\frac{1}{\Omega C} = 159,2 \text{ }\Omega$ , потому условие  $R \gg \frac{1}{\Omega C}$  выполняется.

## Вывод

В данной работе были изучены петли гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных токах.

В первой части работы были получены предельные петли и начальные кривые намагничивания для образцов из пермаллоя, феррита и кремнистого железа. По точкам, снятым с экрана ЭО, с помощью кубических сплайнов восстановлены петли и кривые (см. рисунки 3, 4 и 5). Были рассчитаны цены деления ЭО для петлей в  $\frac{\text{А}}{\text{м}}$  для оси  $X$  и в  $\text{Тл}$  для оси  $Y$ , откуда были найдены коэрцитивная сила  $H_c$ , индукция насыщения  $B_s$  и дифференциальная магнитная проницаемость  $\mu_{\text{диф}}$  образцов вблизи нуля (см. таблицу 1). Совпадение в пределах погрешности вычисленных значений со справочными для каждого из образцов говорит о хорошей точности используемого метода и корректности проведения эксперимента.

Во второй и третьей частях работы была проведена проверка калибровок осей ЭО с помощью вольтметра и амперметра. Для рабочих коэффициентов  $K_X = 50 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$  и  $K_Y = 50 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$  получены значения чувствительности каналов  $m_X = (49,5 \pm 0,6) \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$  и  $m_Y = (50,4 \pm 1,0) \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$  соответственно,

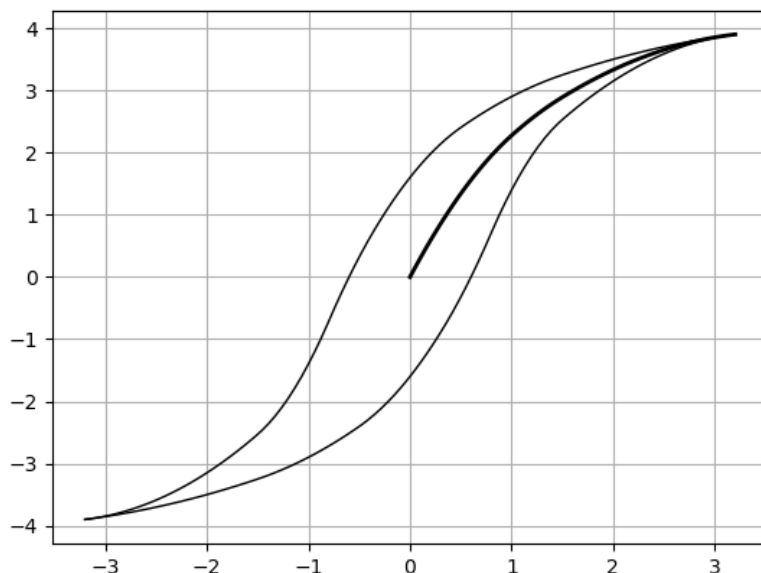


Рис. 4 — Предельная петля гистерезиса и начальная кривая намагничивания для образца из феррита. Восстановлено по точкам, снятым с экрана ЭО, с помощью кубических сплайнов

что означает, что в пределах погрешностей чувствительности каналов равны указанным на осциллографе, что ещё раз подтверждает исправность работы ЭО.

В последней части работы была экспериментально проверена постоянная времени интегрирующей цепочки, которая получилась равной  $\tau = (0,408 \pm 0,008)$  с, т.е. в пределах погрешности совпадающей с  $\tau = 0,400$  с, рассчитанной по указанным на установке величинам. Также было подтверждено условие применимости приближений, в которых работает  $RC$ -цепочка. Полученный результат и его относительно невысокая погрешность подтверждают исправность работы цепочки.



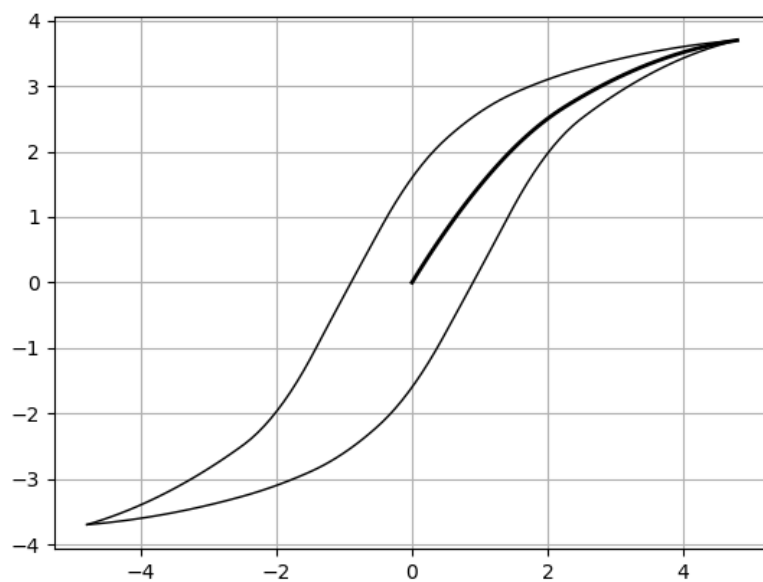


Рис. 5 — Предельная петля гистерезиса и начальная кривая намагничивания для образца из кремнистого железа. Восстановлено по точкам, снятым с экрана ЭО, с помощью кубических сплайнов