

Лабораторная работа №3.4.5
Петля гистерезиса (динамический метод)
Хвосточенко Константин и Всеволод
Мещеряков, Б02-001, 28.09.2021

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.

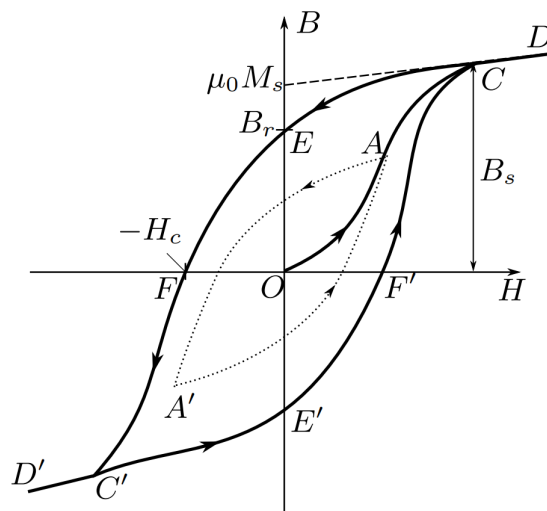


Рис. 1 — Петля гистерезиса ферромагнетика

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* (ОАС).

Измерение магнитной индукции. Магнитную индукцию B удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при измерении 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

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

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 $R_{и}$ 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 $I = \frac{U_{вх} - U_{вых}}{R_{и}} \approx \frac{U_{вх}}{R_{и}}$, и входное и выходное сопротивление связаны соотношением

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

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

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

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 включено сопротивление R_0 , напряжение с которого подаётся на вход X электронного осциллографа (ЭО). Это напряжение пропорционально току в обмотке N_0 , а следовательно и напряжённости H магнитного поля в образце.

Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмотки $N_{и}$ на вход интегрирующей RC-цепочки подаётся напряжение $U_{и}$ ($U_{вх}$), пропор-

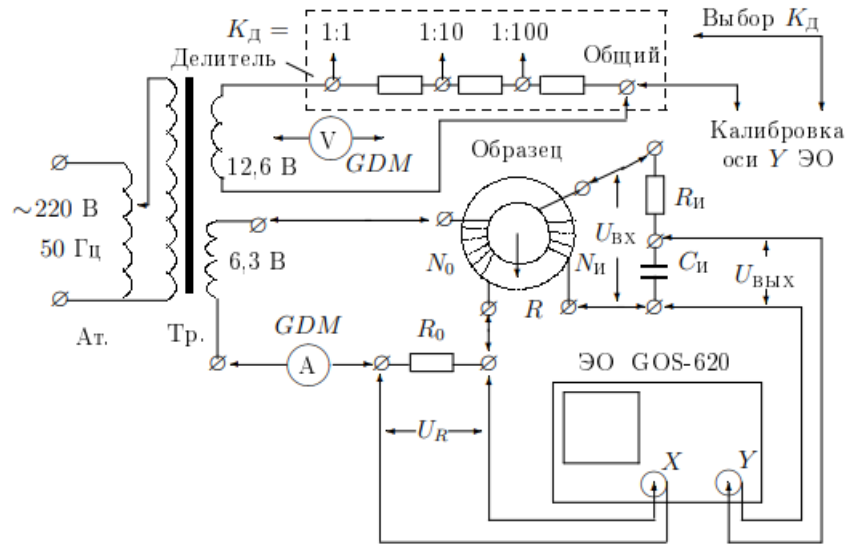


Рис. 2 — Схема установки для исследования намагничивания образцов

циональное производной \dot{B} , а с выхода снимается напряжение U_C ($U_{\text{вых}}$), пропорциональное величине B , и подаётся 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 подаётся 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 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 A 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 :

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

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 $U_{эф}$ на этих же клеммах делителя. Измерив $2y$ – длину вертикальной прямой на экране, можно рассчитать чувствительность канала Y :

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

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 $U_{вх}$. На вход Y осциллографа поочерёдно подаются сигналы со входа ($U_{вх}$) и выхода ($U_{вых}$) RC-цепочки. Измерив амплитуды этих сигналов с помощью осциллографа, можно рассчитать постоянную времени $\tau = RC$. Тогда

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

Ход работы

1. Петля гистерезиса на экране ЭО

Перед началом работы запишем необходимую информацию о каждом исследуемом образце в таблицу 1.

Таблица 1 – Параметры исследуемых образцов

Название материала образца	N_0	N_u	S см ²	$2\pi R$ см
Кремнистое железо	35	350	1,2	10
Феррит	35	400	3,0	25
Пермалой	40	200	3,8	24

Теперь соберём схему согласно рисунку 2 и подготовим приборы к работе. Подберём ток питания в намагничивающей обмотке и коэффициенты усиления ЭО так, чтобы предельная петля гистерезиса занимала большую часть экрана. Получив предельную петлю, уменьшим ток до исчезновения горизонтальных "усов". Отцентрируем вертикальный и горизонтальный лучи.

Для каждого образца сделаем фотографию предельной петли. Сфотографируем кривую при ещё двух различных значениях тока при его уменьшении, и полученные отсюда 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.

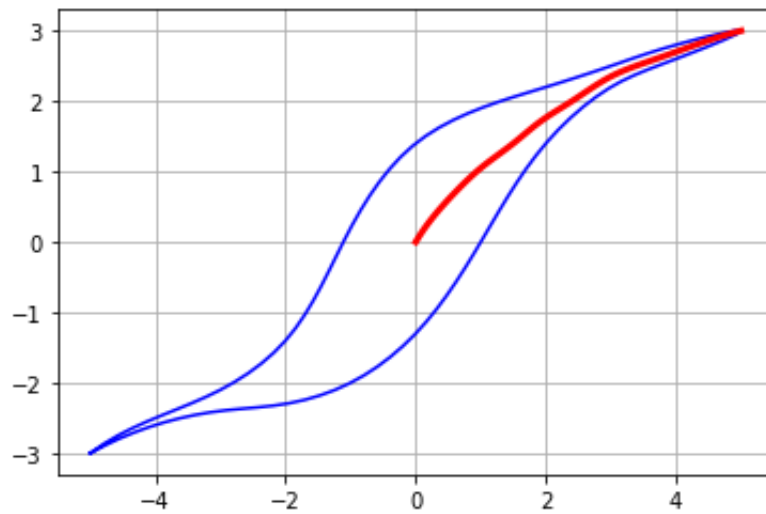


Рис. 3 — Предельная петля гистерезиса и начальная кривая намагничивания для образца из кремнистого железа

Рассчитаем цену деления ЭО для петли в $\frac{A}{m}$ 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 $[2y(s)]$. Данные значения вместе с коэффициентами усиления K_x и K_y , током $I_{эф}$ и ценами деления H и B занесем в таблицу 2. Будем считать, что погрешность определения $2x$ и $2y$ равна 1 делению.

Отсюда и из начальной кривой намагничивания можно найти коэрцитивное поле H_c и намагниченность насыщения B_s . Результаты вычисления для каждого образца в их справочные значения приведены в таблице 3.

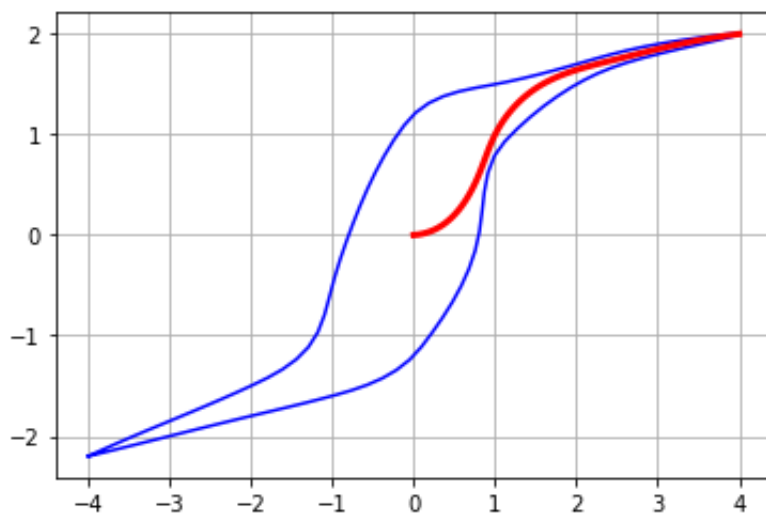


Рис. 4 — Предельная петля гистерезиса и начальная кривая намагничивания для образца из феррита

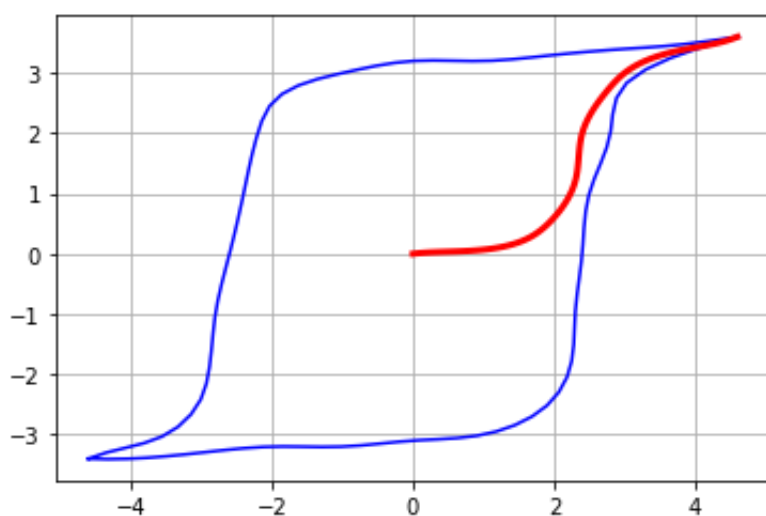


Рис. 5 — Предельная петля гистерезиса и начальная кривая намагничивания для образца из пермаллоя

Таблица 2 – Измеренные данные

Название материала образца	$K_x, \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$	$K_y, \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$	$2x, \text{ дел}$	$2y, \text{ дел}$	$I_{\text{эф}}, \text{ А}$	$H, \frac{\text{А}}{\text{м}}$	$B, \text{ Тл}$
Кремнистое железо	50	50	50	30	0,620	58,33	0,476
Феррит	20	20	40	20	0,208	9,33	0,067
Пермаллой	20	50	40	32	0,677	11,11	0,263

Таблица 3 – Проверка калибровки оси X

Название материала образца	$H_c, \frac{A}{M}$	$B_s, \text{Тл}$	$H_0, \frac{A}{M}$	$B_0, \text{Тл}$
Кремнистое железо	64 ± 6	$0,67 \pm 0,05$	$32-72[1]$	≤ 1
Феррит	$7,5 \pm 0,9$	$0,080 \pm 0,007$	$1,2-16[2]$	$0,05-0,4$
Пермалой	$26,7 \pm 1,1$	$0,82 \pm 0,03$	$8-80 [3]$	$0,73-0,85$

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 автотрансформатора подберём такой ток через сопротивление R_0 , при котором горизонтальная прямая занимает большую часть экрана ЭО. Вычислим m_x для каждого K_x . Результаты занесем в таблицу 4

Таблица 4 – Проверка калибровки оси X

	$I_{эф}, \text{мА}$	$2x, \text{дел}$	$m_x \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$
$K_x = 20 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$	$186,1 \pm 0,5$	$8,2 \pm 0,2$	$19,3 \pm 0,5$
$K_x = 50 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$	508 ± 5	$8,6 \pm 0,2$	$50,1 \pm 1,3$

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 , подберём с помощью автотрансформатора напряжение, при котором вертикальная прямая занимает почти весь экран. Подключим вольтметр V к тем же точкам делителя и измерим эффективное значение напряжения. Затем рассчитаем m_y для каждого K_y . Результаты представим в таблице 5.

Таблица 5 – Проверка калибровки оси Y

	$U_{эф}, \text{мВ}$	$2y, \text{дел}$	$m_y \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$
$K_y = 20 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$	$40 \pm 0,1$	$6 \pm 0,2$	$18,9 \pm 0,6$
$K_y = 50 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$	$98,5 \pm 0,4$	$6 \pm 0,2$	$46,4 \pm 1,6$

IV. Определение τ – 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 $K_Y = 2 \frac{\text{В}}{\text{дел}}$ и подберём с помощью автотрансформатора такой ток, при котором вертикальная прямая занимает большую часть экрана, и определим входное напряжение на RC -цепочке как

$U_{\text{вх}} = 2y \cdot K_Y = (13,6 \pm 0,4)$ В (считаем, что погрешность определения $2y$ равна 0,2 дел).

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 $U_{\text{вых}} = (104 \pm 4)$ мВ.

Расчитаем постоянную времени $\tau = \frac{U_{\text{вх}}}{\Omega U_{\text{вых}}} = 0,416 \pm 0,020$ с. Ту же величину найдем с помощью значений $R = 20 \text{ кОм}$ и $C_{\text{мкФ}}$, указанных на установке, $\tau = 0,4$ с. Видно, что в пределах погрешности данные результаты совпадают.

Также выполнено условие того, что $R \gg \frac{1}{\Omega C}$, так как $R = 20,0 \text{ кОм}$, а $\frac{1}{\Omega C} = 159,2 \text{ КОм}$.

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. Были рассчитаны цены деления ЭО для петель в $\frac{\text{А}}{\text{м}}$ для оси X и в Тл для оси Y , откуда были найдены коэрцитивная сила H_c , индукция насыщения B_s . Измеренные значения в пределах погрешности совпали со справочными.

Во второй и третьей частях работы была проведена проверка калибровок осей ЭО с помощью вольтметра и амперметра. Для рабочих коэффициентов K_X и K_Y были получены значения чувствительности каналов m_X и m_Y соответственно. Для $K_x = 50 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$ m_x в пределах погрешности совпало с ним. Для остальных коэффициентов K_x и K_y значения не попали в пределы погрешности, однако отклонение оказалось малым (максимальное отклонение от нижней границы погрешности не превысило 4%).

В последней части работы была экспериментально проверена постоянная времени интегрирующей цепочки, которая получилась равной $\tau = (0,416 \pm 0,020)$ с, т.е. в пределах погрешности совпадающей с $\tau = 0,4$ с, рассчитанной по указанным на установке величинам. Также было подтверждено условие применимости приближений, в которых работает RC -цепочка.

Список литературы

- [1] M. A. Akhter-D. J. Mapps-Y. Q. Ma Tan-Amanda Petford-Long-R. Doole; Mapps; Ma Tan; Petford-Long; Doole (1997). "Thickness and grain-size dependence of the coercivity in permalloy thin films". Journal of Applied Physics. 81 (8): 4122.
- [2] Zhenghong Qian; Geng Wang; Sivertsen, J.M.; Judy, J.H. (1997). "Ni Zn ferrite thin films prepared by Facing Target Sputtering". IEEE Transactions on Magnetism. 33 (5): 3748—3750.
- [3] M. A. Akhter-D. J. Mapps-Y. Q. Ma Tan-Amanda Petford-Long-R. Doole; Mapps; Ma Tan; Petford-Long; Doole (1997). "Thickness and grain-size

dependence of the coercivity in permalloy thin films". Journal of Applied Physics. 81 (8): 4122.