

Лабораторная работа №3.4.5
Петля гистерезиса (динамический метод)

Рожков А. В.

12 октября 2024 г.

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).

1 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.

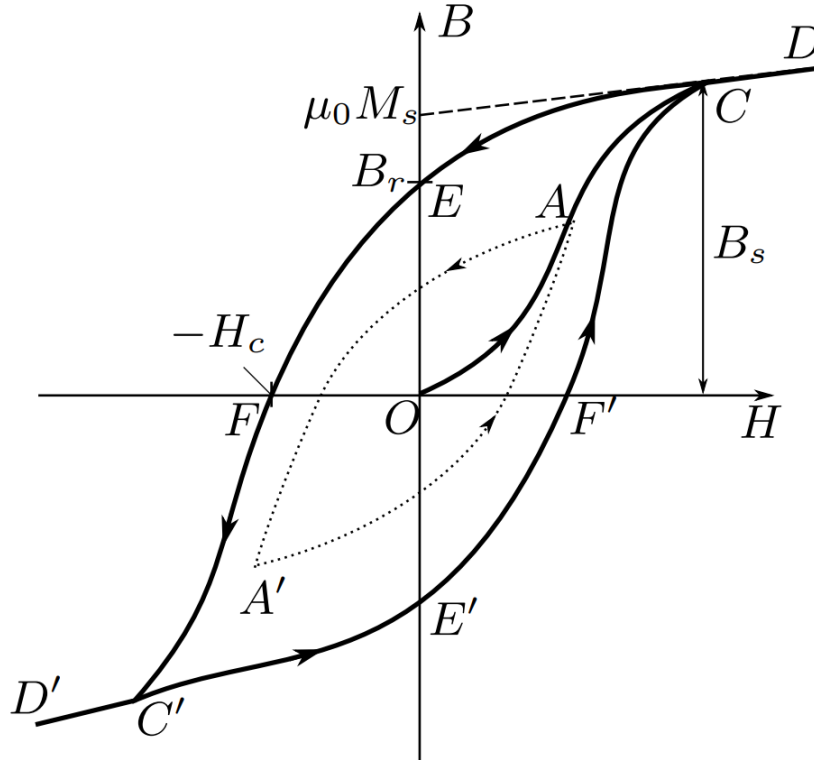


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

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* (OAC).

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 $U_{\text{вх}}(t)$ подаётся на последовательно соединённые резистор $R_{\text{и}}$ и конденсатор $C_{\text{и}}$. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}(t)$ 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

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

2 Экспериментальная установка

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

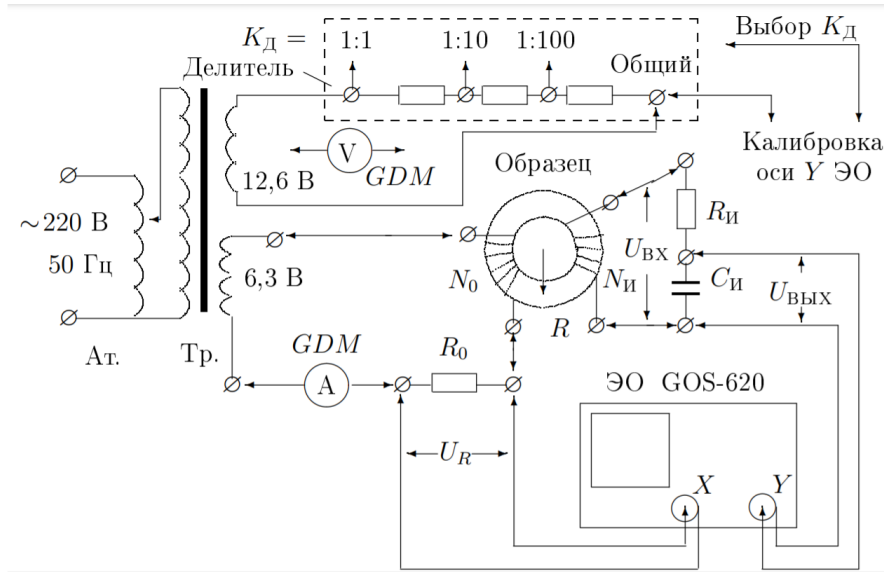


Рис. 2: Схема установки для исследования намагничивания образцов

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 $N_{\text{и}}$ на вход интегрирующей RC-цепочки подаётся напряжение $U_{\text{и}}$ ($U_{\text{вх}}$), пропорциональное производной \dot{B} , а с выхода снимается напряжение $U_{\text{с}}$ ($U_{\text{вых}}$), 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 $K_{XI} = \frac{K_X}{R_0} \left[\frac{A}{\text{дел}} \right]$ и затем определить цену деления шкалы в $\frac{A}{m}$.

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 $I_{\text{эф}}$, 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 :

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

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 :

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

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 поочередно 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

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

3 Ход работы

3.1 Проверка калибровки шкал осциллографа

Результат в таблице 1

$K_x, \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$		$K_y, \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$	
Осцилл.	Калибр.	Осцилл.	Калибр.
20	18.3	20	20.5
100	94	10	0.08

Таблица 1: Результаты калибровки шкал осциллографа

3.2 Измерение параметров RC-ячейки

$$\tau = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}\omega_0} = \frac{5.65 \text{ В}}{0.042 \text{ В} \cdot 2\pi 50 \text{ Гц}} = 0.43 \text{ с}$$

$$\tau = RC = 20 \text{ кОм} \cdot 20 \text{ мкФ} = 0.4 \text{ с}$$

Как видим, результаты почти совпали. Также выполняется условие $R \gg \frac{1}{\omega C}$ ($20000 \gg 159$).

3.3 Обработка результатов

Графики и таблица итоговых результатов представлены ниже.

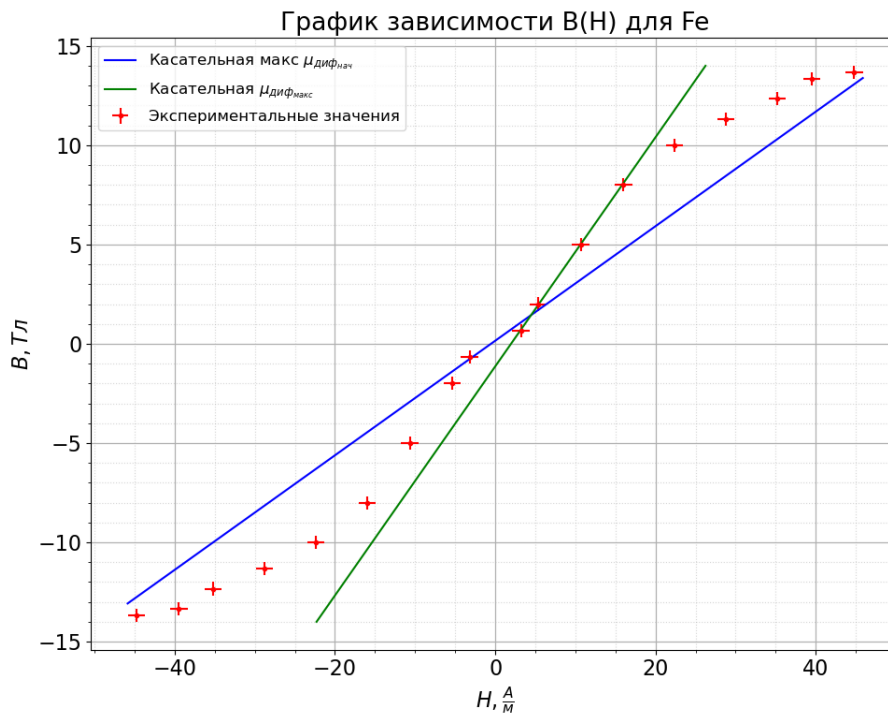


Рис. 3: График зависимости $B(H)$ для феррита

4 Вывод

Изучили петли гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных токах.

Сравним полученные результаты с табличными значениями:

Значения индукции насыщения достаточно сильно отличаются от табличных. Это можно объяснить неточностью определения момента, в который петля становится предельной.

Проверки калибровки показала хороший результат.

Измеренные параметры RC-ячейки почти совпали с указанными на установке.

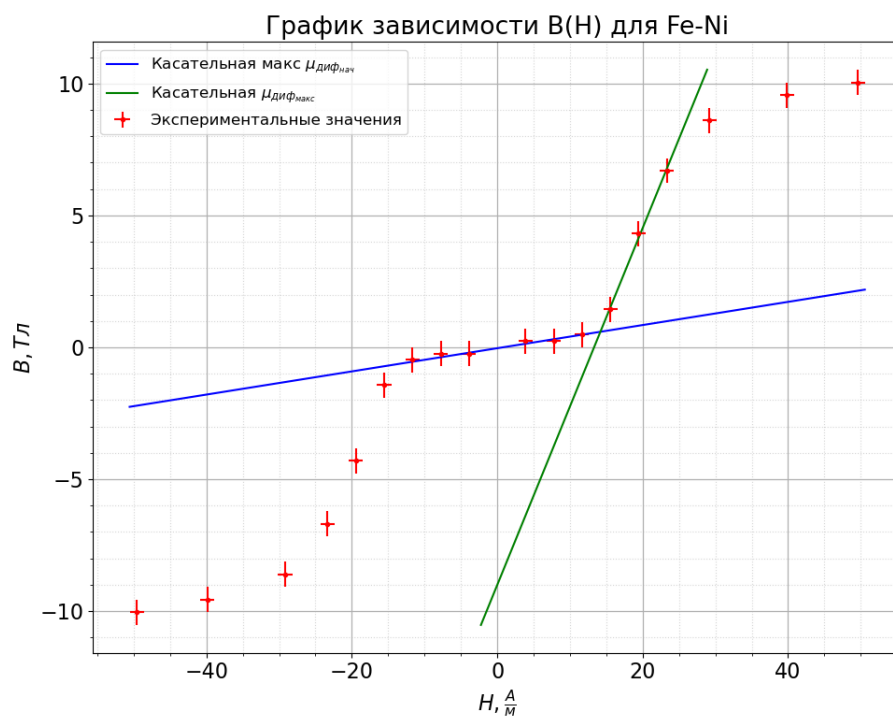


Рис. 4: График зависимости $B(H)$ для пермаллоя

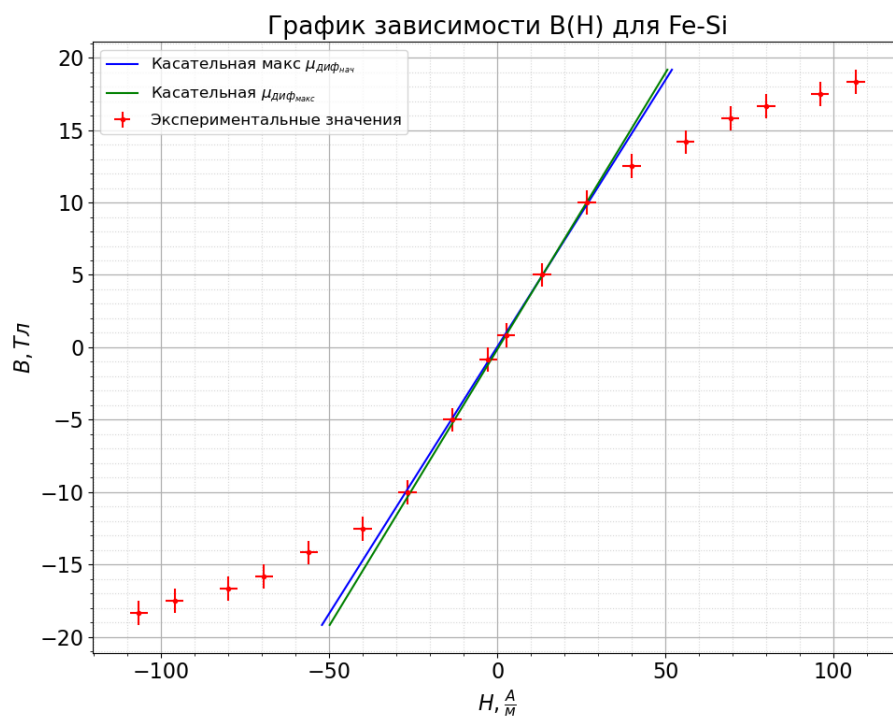


Рис. 5: График зависимости $B(H)$ для кремнистого железа

Материал	Fe	Fe-Ni	Fe-Si
I_{max} , мА	160.00 ± 0.01	200.00 ± 0.01	800.00 ± 0.01
K_x , $\frac{В}{дел}$	0.02	0.02	0.02
K_y , $\frac{В}{дел}$	0.01	0.1	0.01
H , $\frac{А/м}{дел}$	10.7	9.7	26.7
B , $\frac{Тл}{дел}$	3.3	4.8	8.3
H_{max} , А/м	45 ± 1	49.58 ± 0.97	107 ± 3
B_s , Тл	13.7 ± 0.3	10.0 ± 0.5	18.3 ± 0.8
H_c , А/м	6 ± 1	5.83 ± 0.97	16 ± 3
B_r , Тл	5.3 ± 0.3	7.7 ± 0.5	13.3 ± 0.8
$\mu_{дифнач}$	0.29 ± 0.08	0.04 ± 0.02	0.37 ± 0.02
$\mu_{дифмакс}$	0.58 ± 0.01	0.68 ± 0.04	0.382 ± 0.004

Таблица 2: Результаты расчётов

	Ампл.	Fe-Ni	Fe-Si	Феррит
эксп	H_c , А/м	5.83 ± 0.97	16 ± 3	6 ± 1
табл		4	8	8
эксп	B_s , Тл	10.0 ± 0.5	18.3 ± 0.8	13.7 ± 0.3
табл		1.1	2	0.2-0.4

Таблица 3: Результаты расчётов и табличные значения