

# Лабораторная работа 2.4.1

## Определение теплоты испарения жидкости

Выполнил Жданов Елисей Б01-205

### 1 Цель работы:

1) Изучение петель гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных полях.

### 2 Оборудование:

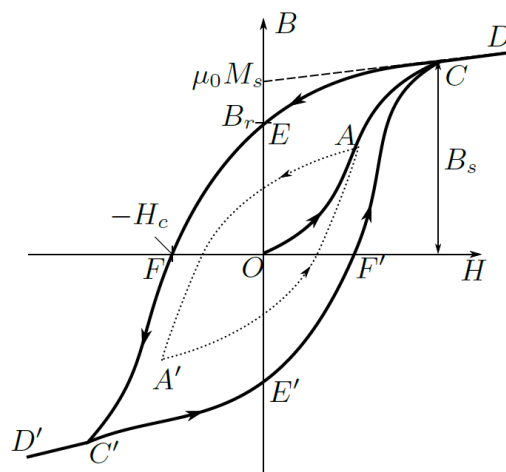
Автотрансформатор, понижающий трансформатор, интегрирующая цепочка, амперметр, вольтметр, электронный осциллограф, делитель напряжения, тороидальные образцы с двумя обмотками.

### 3 Теоретическая справка

Ферромагнитные материалы часто применяются в трансформаторах, дросселях, машинах переменного тока, то есть в устройствах, где они подвергаются периодическому перемагничиванию, - поэтому изучение магнитных характеристик ферромагнетиков в переменных полях представляет большой практический интерес. Основные характеристики ферромагнетиков - их коэрцитивное поле  $H_c$ , магнитная проницаемость  $\mu$ , рассеиваемая в виде тепла при перемагничивании мощность - зависят от частоты перемагничивающего поля. В данной работе кривые гистерезиса ферромагнитных материалов изучаются в поле частоты  $\nu_0 = 50$  Гц с помощью электронного осциллографа.

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 рис. 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 (напр., петля  $AA'$ , обозначенная пунктиром на рис. 1). Если амплитуда напряжённости достаточно велика, то образец будет периодически достигать насыщения, что на рисунке соответствует кривой  $CEFC'E'F'C$  (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 рис. 1), лежат на начальной кривой намагничивания (ОАС).

### 3.1 Измерение магнитной индукции

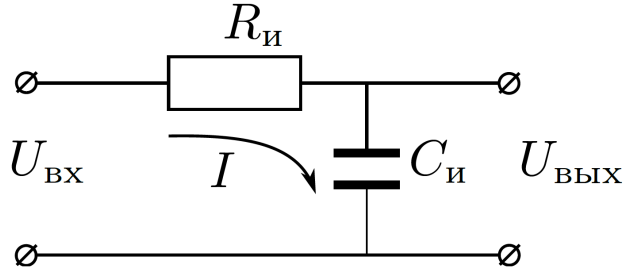
Магнитную индукцию  $B$  удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при изменении магнитного потока  $\Phi$  в катушке, намотанной на образец. Пусть катушка с  $N$  витками плотно охватывает образец сечением  $S$ , и индукция  $B$  в образце однородна. Из формулы 4.20) имеем

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

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 (рис. 2 ). «Входное» напряжение от источника  $U_{\text{вх}}(t)$  подаётся на последовательно соединённые напряжение  $U_{\text{вых}}(t)$  снимается с конденсатора. Предположим, что 1) сопротивление источника мало по сравнению с  $R_n$ , 2) выходное сопротивление (сопротивление на входе осциллографа), напротив, велико:  $R_{\text{вых}} \gg R_n$  и, наконец, 3) сопротивление  $R_n$  достаточно велико, так что почти всё падение напряжения приходится на него,

Рис. 2: Интегрирующая ячейка



а  $U_{\text{ВЫХ}} \ll U_{\text{ВХ}}$ . В таком случае ток цепи равен  $I = (U_{\text{Х}} - U_{\text{»Х}}) / R_{\text{н}} \approx U_{\text{Х}} / R$ , и входное и выходное сопротивление связаны соотношением

$$U_{\text{ВУХ}} = \frac{q}{C_{\text{и}}} = \frac{1}{C_{\text{и}}} \int_0^t I dt \approx \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \int_0^t U_{\text{ВХ}} dt.$$

где  $\tau_{\text{и}} = R_{\text{и}} C_{\text{и}}$  - постоянная времени RC-цепочки. Для индукции поля из (1) получаем

$$|B| = \frac{1}{SN} \int U_{\text{Х}} dt = \frac{\tau_{\text{и}}}{SN} U_{\text{ВЫХ}},$$

**Замечание.** Уточним критерий применимости соотношения (2). Пусть на вход интегрирующей ячейки подан синусоидальный сигнал с частотой  $\omega_0$ . Тогда, пользуясь методом комплексных амплитуд, нетрудно найти отношение амплитуд входного и выходного напряжений:

$$\frac{U_{\text{Всх}}}{U_{\text{Вх}}} = \frac{1/(\omega_0 C)}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega_0 C)^2}}}$$

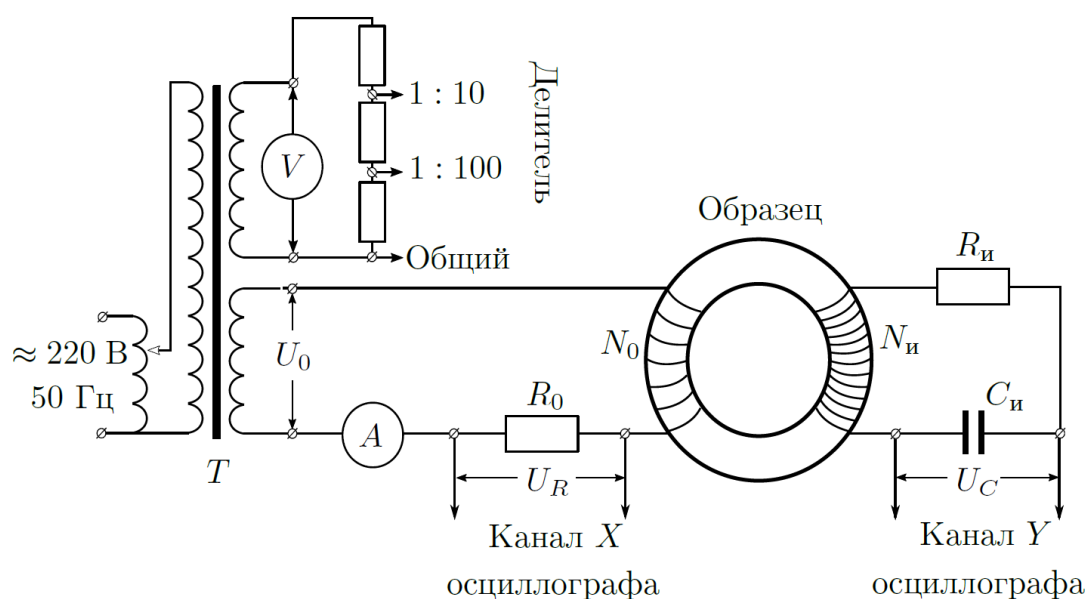
Видно, что неравенство  $U_{\text{ВЫХ}} \ll U_{\text{ВХ}}$  реализуется, если

$$\tau \equiv RC \gg \frac{1}{\omega_0}$$

(импеданс конденсатора мал по сравнению сопротивлением резистора). В таком случае для синусоидального сигнала имеем

$$\frac{U_{\text{Ввх}}}{U_{\text{Вх}}} \approx \frac{1}{\omega_0 \tau}.$$

В общем случае, если  $\omega_0$  - частота самой низкой гармоники в спектре произвольного входного сигнала, то при  $\omega_0 \tau \gg 1$  неравенство  $U_{\text{ВЫХ}} \ll U_{\text{ВХ}}$  выполняется на любой частоте  $\omega > \omega_0$ .



## 4 Экспериментальная установка

Схема установки изображена на рис. 3. Напряжение сети (220 В, 50 Гц) с помощью трансформаторного блока Т, состоящего из регулировочного автотрансформатора и разделительного понижающего трансформатора, подаётся на намагничивающую обмотку  $N_0$  исследуемого образца.

В цепь намагничивающей катушки, на которую подаётся некоторое напряжение  $U_0$ , последовательно включено сопротивление  $R_0$ . Напряжение на  $R_0$ , равное  $U_R = R_0 I_0$ , где  $I_0$  - ток в намагничивающей обмотке  $N_0$ , подаётся на канал X осциллографа. Связь напряжённости  $H$  в образце и тока  $I_0$  рассчитывается по теореме о циркуляции (см. (4.16)).

238 Магнитные свойства вещества Действующее значение переменного тока в обмотке  $N_0$  измеряется амперметром  $A$ .

Для измерения магнитной индукции  $B$  с измерительной обмотки  $N_{\text{и}}$  на вход  $RC$ -цепочки подаётся напряжение  $U_{\text{н}} (U_{\text{Вх}})$ , пропорциональное производной  $dB/dt$ . С интегрирующей ёмкости  $C_{\text{и}}$  снимается напряжение  $U_{\text{с}} (U_{\text{Вых}})$ , пропорциональное величине  $B$ , и подаётся на вход  $Y$  осциллографа. Значение индукции поля  $B$  рассчитывается по формуле (3).

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  $Y$  осциллографа.

## 4.1 Калибровка осциллографа

Калибровка канала  $X$  осциллографа производится с помощью амперметра  $A$ . Предварительно необходимо замкнуть обмотку  $N_0$  (так как катушка с ферромагнитным образцом является нелинейным элементом, ток в ней не имеет синусоидальной формы, поэтому связать амплитуду тока с показаниями амперметра можно лишь с довольно большой погрешностью). При замкнутой обмотке  $N_0$  показания эффективного тока, умноженные на  $2\sqrt{2}$ , дадут значение удвоенной амплитуды тока, подаваемого на ось  $X$ , соответствующего ширине горизонтальной развёртки на экране (осциллограф должен работать в режиме  $X - Y$ ).

Калибровка вертикальной оси  $Y$ , как правило, не нужна (переключатель масштабов осциллографа откалиброван при изготовлении - при условии, что ручка плавной регулировки находится в положении калибровки). Тем не менее, она может проводиться с помощью сигнала, снимаемого через делитель напряжения со второй катушки понижающего трансформатора (рис. 3). Вольтметр  $V$  может достаточно точно измерить эффективное напряжение, подаваемое на вход осциллографа. После этого можно сравнить показания осциллографа и вольтметра.

## 4.2 Измерение параметров интегрирующей ячейки

Постоянную времени  $RC$ -цепочки можно определить экспериментально. С обмотки  $U_0$  на вход интегрирующей цепочки подаётся синусоидальное напряжение с частотой цепи  $\nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 50$  Гц. На вход  $Y$  осциллографа или цифрового вольтметра поочерёдно подаются сигналы со входа ( $U_{ВХ} = U_0$ ) и выхода ( $U_{ВЫХ} = U_C$ )  $RC$ -цепочки. Измерив амплитуды этих сигналов, можно рассчитать постоянную времени  $\tau_{и} = R_{и} C_{и}$  по формуле (5). Кроме того, сопротивление и ёмкость можно независимым образом измерить цифровым мультиметром.

# 5 Измерения, Обработка

## 5.1 Измерение петли гистерезиса

- 1) Соберем указанную схему
- 2) Проведем измерения для пермаллоя. Настроим критическую петлю гистерезиса.
- 3-5) Запишем коэффициенты в таблицу
- 6) Последовательно уменьшая амплитуду тока намагничивания, занесем значения всех крайних правых верхних точек  $A$ .
- 7) Приведу таблицу с параметрами пермаллоя и других сплавов.

Рис. 4: Петля гистерезиса для пермаллоя

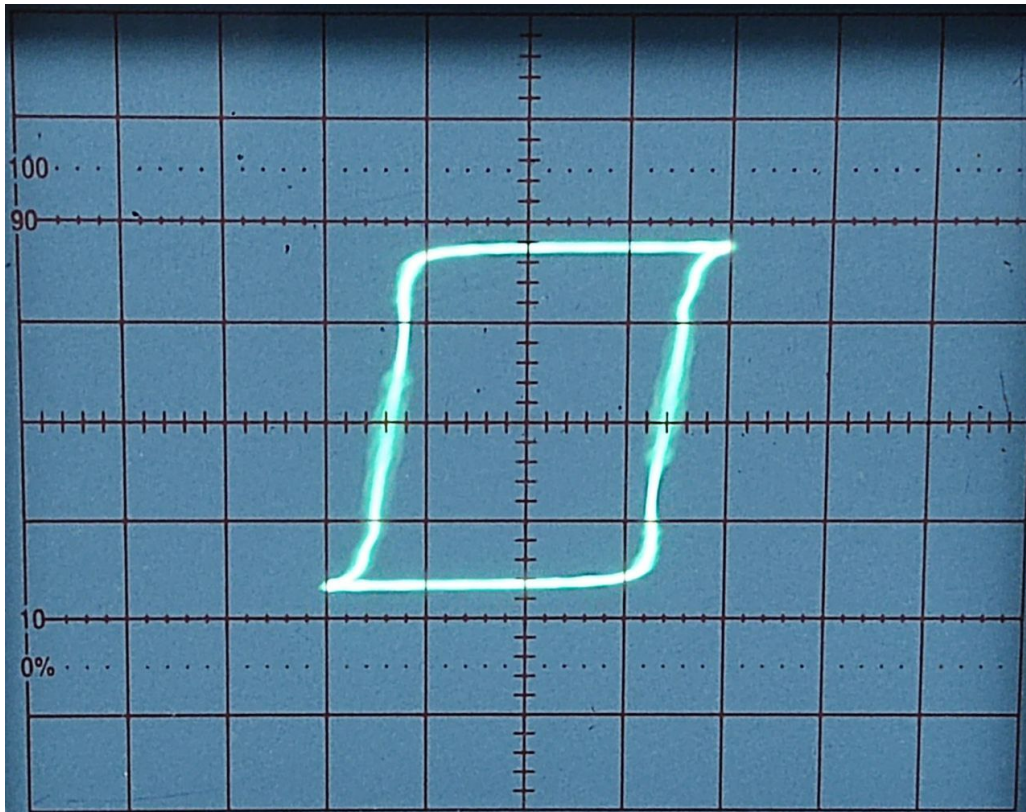
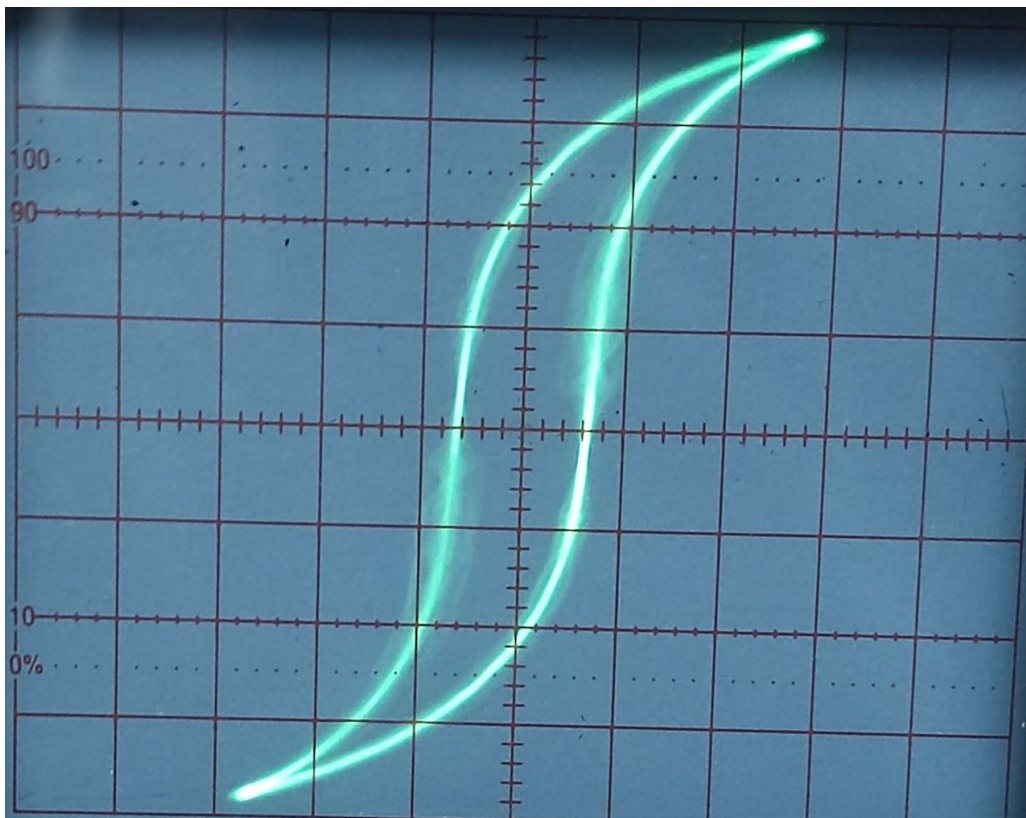


Рис. 5: Петля для кремнистого железа(похожая петля у феррита)



	Пермаллой(Fe-Ni)	Кремнистое железо(Fe-Si)	Феррит(1000нн)
$2X_s$ , мВ	160	720	108
$2Y_s$ , мВ	180	128	76
$2X_c$ , мВ	132	160	52
$2Y_c$ , мВ	170	56	13

	Пермаллой(Fe-Ni)	Кремнистое железо(Fe-Si)	Феррит(1000нн)
$N_0$ , витков	15	20	45
$N_u$ , витков	300	200	400
$S$ , см <sup>2</sup>	0.66	2	3
$2\pi R$ , см	14.1	11	25

## 5.2 Калибровка осциллографа

9-10) Проведем калибровку и занесем в таблицу реальные коэффициенты  $K_x$  и  $K_y$  для выбранных масштабов.

канал	деления	$K_x$ , мВ
5 мВ	6.1	2.74
10 мВ	4.1	4.60
20 мВ	4.3	9.67
50 мВ	4.0	24.7
100 мВ	4.4	56.0

канал	деления	U, мВ	$K_y$ , мВ
5 мВ	3	9.7	4.57
10 мВ	3	20.3	9.5
20 мВ	3	40.1	19
50 мВ	3	101.4	47

Как видим, канал Y не нуждается в пересчете, поскольку откалиброван собственно, в погрешности измеряемых калибровочных величин. По каналу же X пересчет должен производиться.

## 5.3 Определение параметров RC-ячейки

11-12)  $U_{BX} = 3.3$  В.  $U_{ВЫХ} = 0.027$  В.  $\nu_0 = 50$  Гц. Тогда  $\tau = \frac{U_{ВЫХ}}{\omega_0 U_{BX}} = \frac{U_{ВЫХ}}{2\pi\nu_0 \cdot U_{BX}} \approx 0.39$  сек

13)  $\tau = RC = 0.4$  сек, что приблизительно совпадает с расчетом через напряжения.

## 5.4 Обработка результатов

14) Из теории:

$$H = \frac{IN_0}{2\pi R} = \frac{U_X N_0}{2\pi R R_0}$$

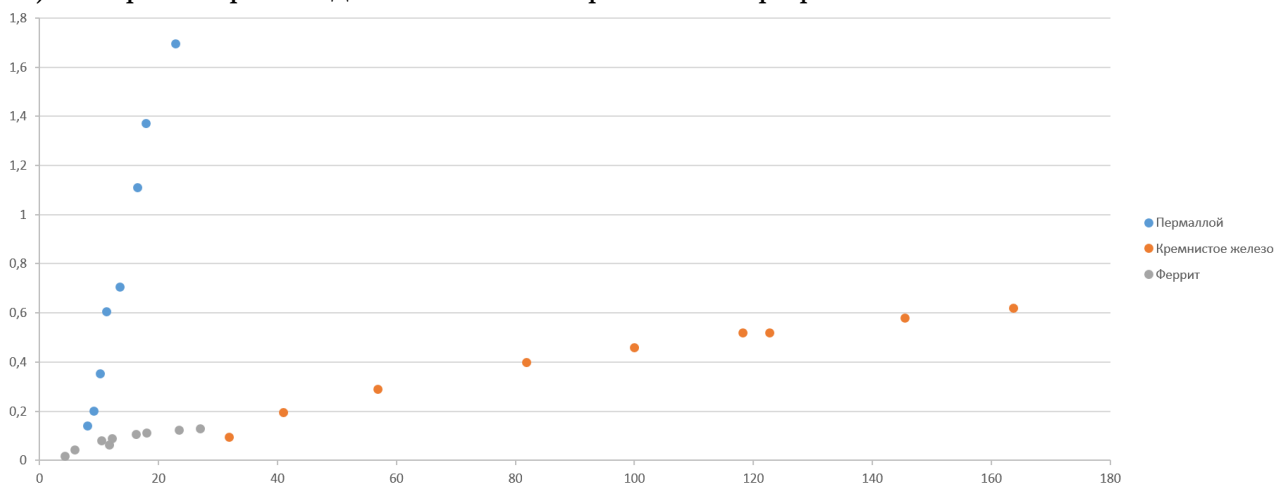
$$B = \mu\mu_0 H = \frac{R_u C_u U_Y}{S N_u}$$

В реальности необходимо учесть калибровку, домножив подставляемое напряжение на  $\frac{K_x}{R_x}$ ,  $R_x$  - шаг режима ЭО. Для ОУ этот коэффициент - единица, а для ОХ:  $\approx 0.5$ .

15-16) Занесем полученные коэффициенты в таблицу

	Пермаллой(Fe-Ni)	Кремнистое железо(Fe-Si)	Феррит(1000нн)
$H_{max}, \frac{A}{M}$	42.6	327	48.6
$B_s, Tc$	3.64	1.28	0.253
$H_c, \frac{A}{M}$	35.1	72.7	23.4
$B_r, Tc$	3.44	0.56	0.043

17) Построим кривые для всех 3-х материалов на графике



Найдем угловые коэффициенты прямых для установки по МНК.

$$a = \frac{\langle x_i y_i \rangle - \langle x \rangle \langle y_i \rangle}{\langle x_i^2 \rangle - \langle x_i \rangle^2}$$

$$b = \langle y_i \rangle - a \langle x_i \rangle$$

Также рассчитаем их погрешности

$$S_a^2 = \frac{\langle x_i^2 \rangle}{\langle x_i^2 \rangle - \langle x_i \rangle^2} \cdot \frac{\langle b_i - b \rangle^2}{n - 2}$$



По измеренным данным трудно рассчитать начальное и максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости, поэтому приведу среднее характерное значение

Для феррита  $\mu_{\text{дифф}} = 0.110 \pm 0.007$ , для кремниевого железа  $\mu_{\text{дифф}} = 0.0038 \pm 0.0003$ , для феррита  $\mu_{\text{дифф}} = 0.0046 \pm 0.0007$

## 6 Вывод

Полученные значения в целом порой, очень даже неплохо совпадают с табличными значениями для материалов. Понятное дело, для точного расчета той же дифференциальной магнитной проницаемости требуется большое количество точек и, возможно, дифференцирующая цепочка. Но при соответствующем качестве эксперимента полученные значения выходят довольно вразумительными.

## 7 Ресурсы

Расчет по МНК: метод-наименьших-квадратов.рф