

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»
Кафедра физики и методики преподавания физики

Т.И. Пискарёва, И.Н. Анисина, А.С. Лелюхин

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательную область «Инженерное дело, технологии и технические науки»

Оренбург

2019

УДК 537.6:53(076.5)
ББК 22.334я7
ПЗ4

Рецензент – доктор физ-мат. наук, профессор Н.А. Манаков

- ПЗ4** **Пискарёва, Т.И.**
Изучение явления гистерезиса ферромагнитных материалов / Т.И. Пискарёва, И.Н. Анисина, А.С. Лелюхин; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 31 с.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по изучению магнитных свойств ферромагнетиков. Работы включают теоретическое изложение материала, описание методики проведения измерений и контрольные вопросы для самоподготовки.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Физика» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательную область «Инженерное дело, технологии и технические науки».

УДК 537.6:53(076.5)
ББК 22.334я7

© Пискарёва Т.И.,
Анисина И.Н.,
Лелюхин А.С. 2019
©ОГУ,2019

Содержание

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Элементарные представления о магнитных свойствах вещества | 4 |
| 2 | Методика измерений | 11 |
| 3 | Экспериментальная установка | 15 |
| 4 | Экспериментальная часть | 19 |
| 4.1 | Лабораторная работа №1 «Калибровка виртуального осциллографа»..... | 19 |
| 4.2 | Лабораторная работа №2 «Построение основной кривой намагничивания ферромагнетика» | 24 |
| 4.3 | Лабораторная работа №3 «Оценка работы перемагничивания ферромагнетика за один цикл» | 27 |
| | Список использованных источников | 31 |

1 Элементарные представления о магнитных свойствах вещества

Все вещества обладают магнитными свойствами, т.е. являются магнетиками. Магнитные свойства веществ определяются величиной и ориентацией магнитных моментов молекул, ионов или атомов. В обычных условиях магнитные моменты сориентированы произвольно (рисунок 1).

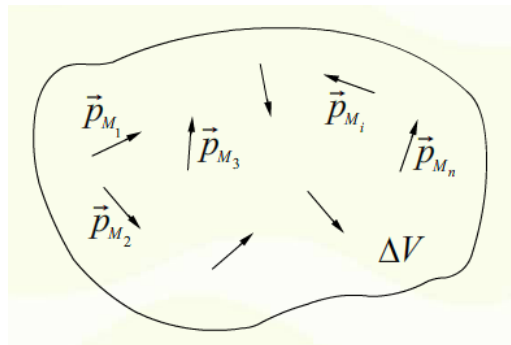


Рисунок 1 – Ориентация магнитных моментов в объеме ΔV магнетика

Магнитный момент p плоского контура S , по которому течет ток I , определяется по формуле:

$$p = ISn \quad (1)$$

где n – единичная нормаль, направление которой определяется по правилу правого винта.

В магнитном поле с индукцией B на замкнутый контур с током действует момент сил

$$M = pB \sin(p, B), \quad (2)$$

стремящийся повернуть контур так, чтобы направления p и B совпали. Контур с током создает также собственное магнитное поле с индукцией B_1 , совпадающее по направлению с магнитным моментом p контура.

В устойчивом состоянии контура, когда $M = 0$, вектор индукции $B' = B + B_1$ в любой точке плоскости внутри контура всегда больше вектора индукции B

внешнего магнитного поля. Увеличение индукции B внутри контура с током в магнитном поле качественно объясняет увеличение или уменьшение индукции в магнетике, помещенном во внешнее магнитное поле.

Намагничивание вещества объясняется наличием у составляющих его атомов, молекул, ионов микроскопических магнитных моментов:

электронного орбитального p_e ;

электронного собственного (спинового) p_s ;

ядерного p_c .

Электронным орбитальным магнитным моментом обладает электрон, движущийся вокруг ядра атома (рисунок 2).

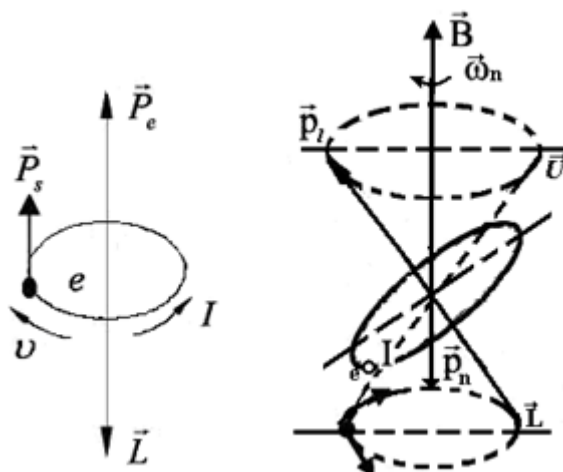


Рисунок 2 – Возникновение орбитального магнитного момента электрона

Такой электрон подобен плоской круговой рамке с током $I = ev$, имеющей магнитный момент

$$p_e = ISn = ev\pi r^2 n,$$

где e – заряд электрона, v – частота вращения, r – радиус круговой орбиты.

Направление магнитного момента p_e противоположно направлению механического момента $L = r m_e v$. Величины p_e и L связаны соотношением

$$p_e = \frac{-e}{2m_e} L,$$

где m_e – масса электрона.

Спиновой магнитный момент p_s является неотъемлемым свойством электрона. Единицей магнитного момента является магнетон Бора:

$$\mu_{\delta} = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9.27 \cdot 10^{-24}, \quad \text{А м}^2$$

где \hbar – постоянная Планка.

Ядерный магнитный момент p_c либо равен 0, либо на 3 – 4 порядка меньше μ_{δ} и его влиянием можно пренебречь. При отсутствии поля приближенно можно считать, что магнитный момент атома

$$p_{am} = \sum_{i=1}^Z p_{ei} + \sum_{i=1}^Z p_{ei}, \quad (3)$$

где Z – число электронов в атоме.

Магнитный момент молекулы

$$p_{mol} = \sum_{k=1}^N p_{amk},$$

где N – число атомов в молекуле.

Во внешнем магнитном поле на электрон атома, как на замкнутый контур с током, действует момент сил M . Под действием этого момента сил электрон, подобно механическому волчку, будет совершать прецессию, при которой векторы p и L описывают с постоянной угловой скоростью конус вокруг направления поля. Это дополнительное движение электрона приводит к появлению у него магнитного момента прецессии p_n , направленного против магнитного поля B . Это явление носит название диамагнитного эффекта. При наличии внешнего магнитного поля магнитный момент атома

$$p_{am} = \sum_{i=1}^Z p_{ei} + \sum_{i=1}^Z p_{si} + \sum_{i=1}^Z p_{ni} \quad (4)$$

Намагниченность J равна магнитному моменту единицы объема магнетика:

$$J = \frac{p_{mol}}{\Delta V}, \quad (5)$$

где ΔV – малый объем магнетика; p_{mol} – сумма магнитных моментов всех молекул в объеме ΔV . Намагниченность J связана с напряженностью магнитного поля:

$$J = \chi H, \quad (6)$$

где χ – коэффициент пропорциональности, называемый магнитной восприимчивостью вещества. Магнитные свойства вещества характеризуются также магнитной проницаемостью μ , связанной с χ соотношением

$$\mu = 1 + \chi. \quad (7)$$

В зависимости от знака и величины магнитной восприимчивости все магнетики делятся на три группы (таблица 1).

Таблица 1 – Типы магнетиков

| Магнитная проницаемость | Поле магнетика | Магнетик | Магнитная восприимчивость |
|-------------------------|--|---------------|---------------------------|
| $\mu \leq 1$ | $\vec{B}' \uparrow \downarrow \vec{B}_0$ | Диамагнетик | $\chi_m < 0$ |
| $\mu \geq 1$ | $\vec{B}' \uparrow \uparrow \vec{B}_0$ | Парамагнетик | $\chi_m > 0$ |
| $\mu \gg 1$ | $\vec{B}' \uparrow \uparrow \vec{B}_0$ | Ферромагнетик | $\chi_m \gg 0$ |

1. Диамагнетики – вещества (например, инертные газы), у которых при отсутствии внешнего магнитного поля орбитальные p_e и спиновые p_s моменты атомов и молекул скомпенсированы. Во внешнем магнитном поле в результате прецессии появляются индуцированные магнитные моменты $p_{am} = p_n$, направленные против поля, а магнитная восприимчивость отрицательна $\chi = -10^{-6} \dots 10^{-8}$.

2. Парамагнетики – вещества, у которых при отсутствии внешнего поля B $p_{am} \neq 0$ или $p_{mol} \neq 0$, а $J = 0$ вследствие хаотической ориентации магнитных моментов p_{am} или p_{mol} . Во внешнем магнитном поле под действием вращающего момента сил M магнитные моменты p_{am} или p_{mol} вещества стремятся повернуться в направлении поля, в результате чего $J > 0$ и $\chi > 0$, $\chi = 10^{-4} \dots 10^{-6}$.

Природа диа- и парамагнетизма иллюстрируется таблицей 2.

Таблица 2 – Свойства диа- и парамагнетиков

| Тип магнетика | $B_0 = 0$ | $B_0 \neq 0$ |
|---------------|--|---|
| Диамагнетик | Магнитные моменты молекул равны нулю $p_z = 0$ (вследствие конфигурации) | Индукцируются незатухающие молекулярные токи, направленные по правилу Ленца, поэтому их поле ослабляет внешнее поле |
| Парамагнетик | Магнитные моменты молекул отличны от нуля $p_z \neq 0$ | Магнитные моменты молекул ориентированы таким образом, что внутреннее поле магнетика усиливает внешнее поле |

3. Ферромагнетики – это кристаллические вещества, у которых магнитные моменты отдельных ионов $p_i \neq 0$. У ферритов элементарную ячейку кристалла

образуют ионы различного типа, у ферромагнетиков – одного типа. Как показали опыты Эйнштейна и де Гааза, а также опыты Н. Ф. Иоффе и П. Л. Капицы, магнитный момент иона ферромагнетика обусловлен упорядоченной ориентацией спиновых магнитных моментов.

Часть ферромагнетика, в которой все магнитные моменты при отсутствии внешнего поля устанавливаются в одном направлении за счет обменного взаимодействия, называется доменом (рисунок 3).

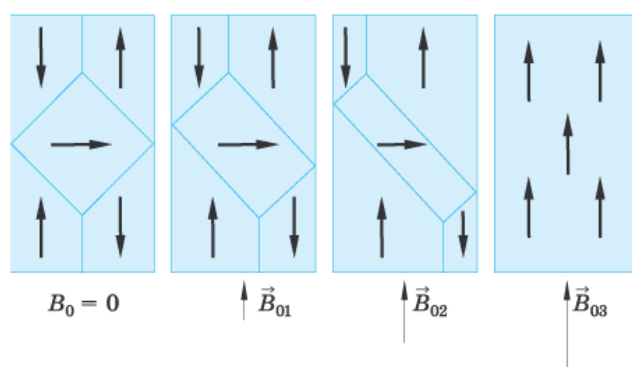


Рисунок 3 – Доменная структура ферромагнетика в магнитных полях разной интенсивности

Домен обладает магнитным моментом p_δ . Размеры доменов составляют $10^{-6} \dots 10^{-8}$ м. При отсутствии внешнего магнитного поля магнитный момент ферромагнетика $p = p_\delta = 0$.

Между доменами имеются переходные слои шириной $10^{-8} \dots 10^{-9}$ м. Внутри переходного слоя магнитные спиновые моменты ионов поворачиваются до тех пор, пока не примут нужного направления. Во внешнем магнитном поле переходные слои разрушаются. Магнитные моменты отдельных доменов поворачиваются в направлении магнитного поля.

Зависимость намагниченности J магнетиков от напряженности H внешнего магнитного поля изображена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Зависимость намагниченности магнетика от напряженности внешнего поля

Нелинейная область I отражает процесс ориентации доменов в ферромагнетиках в направлении внешнего поля при возрастании напряженности H . В сильных полях (область II) наступает магнитное насыщение, и намагниченность практически не зависит от напряженности поля H . Кривая $J=f H$ носит название основной кривой намагничивания. Для диа- и парамагнетиков зависимость $J=f H$ линейная.

У ферромагнетиков и ферритов имеет место магнитный гистерезис, в котором проявляется зависимость намагниченности от предшествующего состояния.

При циклических изменениях величины и направления напряженности внешнего поля H эта зависимость характеризуется кривой, называемой петлей гистерезиса (рисунок 5).

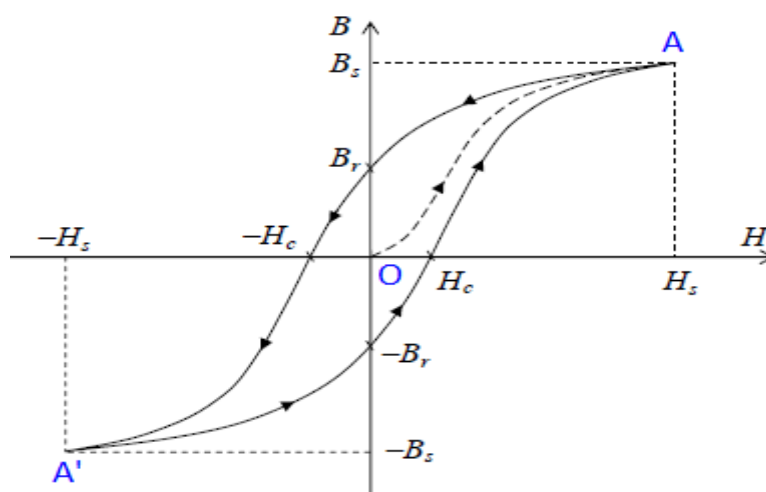


Рисунок 5 – Петля гистерезиса

Если ферромагнетик был первоначально размагничен ($B=0, H=0$), то его намагничивание происходит по основной кривой намагничивания ОА.

В точке А напряженность H_s и индукция B_s соответствует состоянию магнитного насыщения.

Размагничивание ферромагнетика происходит по кривой АВ_rН_cА`.

При $H=0$ намагниченность не исчезает $B=B_r$. Это состояние называется остаточным магнетизмом.

Напряженность ($-H_c$), при которой исчезает остаточная намагниченность ($B=0, H=-H_c$), принято называть коэрцитивной силой.

Если при циклическом намагничивании $H_{max} \geq H_s$, то будет получена максимальная петля гистерезиса. Когда $H_{max} \leq H_s$ будут сформированы частные циклы. Максимумы B и H частных циклов лежат на основной кривой намагничивания ОА. Условно принято считать ферромагнетики жесткими, если $H_s > 100 \frac{A}{M}$. Если $H_s < 100 \frac{A}{M}$, ферромагнетики считаются мягкими.

Магнитная проницаемость μ ферромагнетика зависит от напряженности магнитного поля H (рисунок 6).

Магнитная проницаемость $\mu = \frac{B}{\mu_0 H_0}$ достигает максимума, когда напряженность H внешнего поля становится равной напряженности H_s , при которой домены максимально ориентируются по направлению поля и при этом достигается магнитное насыщение образца.

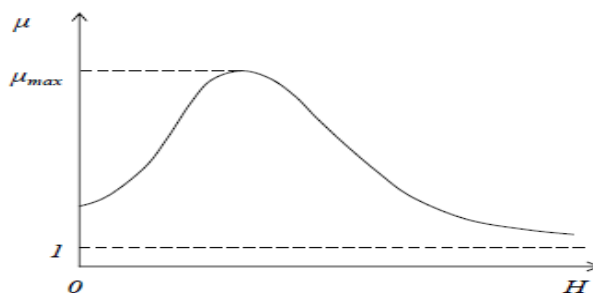


Рисунок 6 – Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля

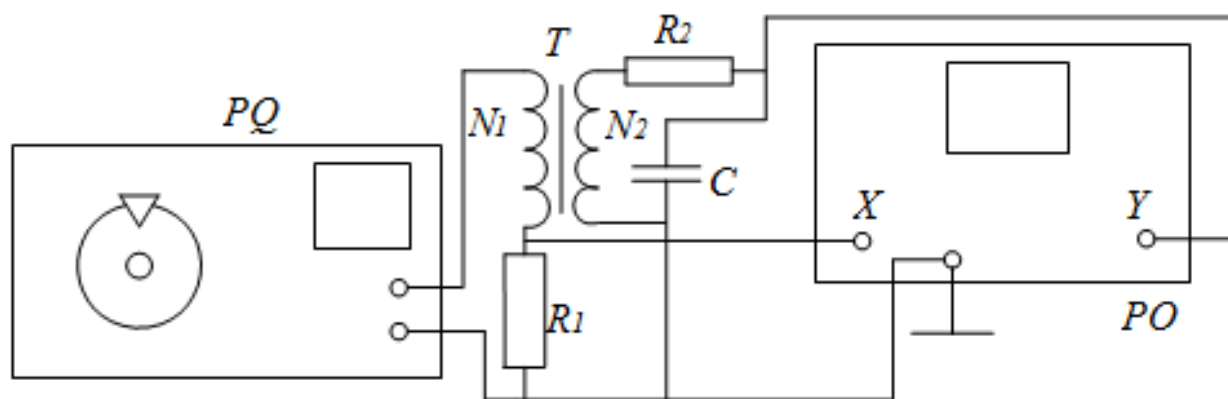
В таблице 3 приведены характеристики некоторых ферромагнетиков и ферритов.

Таблица 3 – Характеристики ферромагнетиков и ферритов

| Вещество | $\mu_{\text{макс}}$ | $H_c, \text{ А/м}$ | $B_r, \text{ Тл}$ | $B_s, \text{ Тл}$ |
|------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Железо техническое | 5000 | 80 | 0,06 | 2,1 |
| Супермаллой | 1000000 | 0,16 | - | 0,79 |
| Сталь кобальтовая | - | 2000 | 0,9 | 1,6 |
| Феррит никель-цинковый | 7500 | 4 | - | 0,2 |

2 Методика измерений

Структурная схема экспериментальной установки для исследования магнитных свойств ферромагнитных материалов приведена на рисунке 7.



PQ – генератор низкочастотных сигналов; PO – осциллограф; T – трансформатор.

Рисунок 7 – Структурная схема экспериментальной установки

Исследуемый образец выполнен в виде тороидального трансформатора T , первичная обмотка которого содержит N_1 витков, а вторичная – N_2 витков.

Напряжение на первичную обмотку трансформатора T подается с выхода звукового генератора PQ через сопротивление R_1 . Вторичная обмотка трансформатора последовательно соединена с сопротивлением R_2 и конденсатором C .

С сопротивления R_1 на вход «х» осциллографа PO подается напряжение U_x , пропорциональное напряженности магнитного поля H . На вход «у» с конденсатора C подается напряжение U_y , пропорциональное индукции магнитного поля B .

Схема возбуждения магнитного поля в исследуемом образце приведена на рисунке 8.

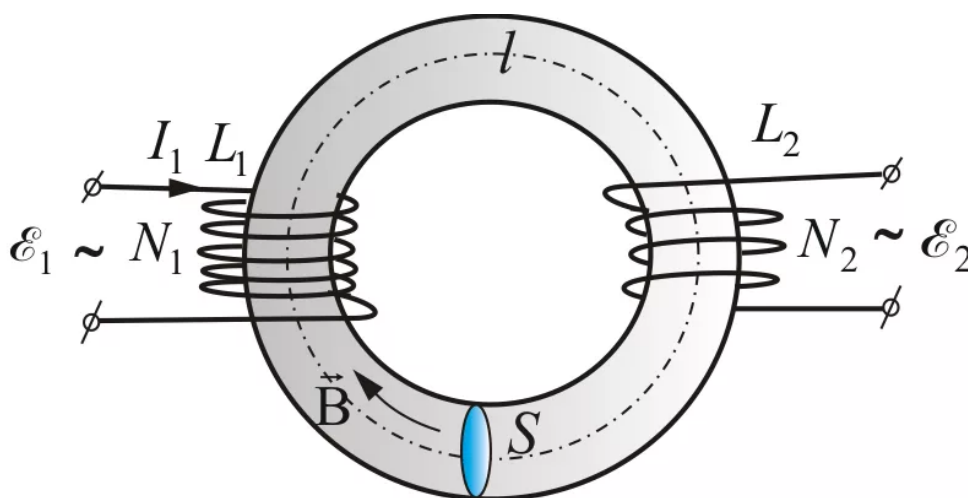


Рисунок 8 – Схема возбуждения магнитного поля в исследуемом образце

При радиусе витка обмотки $r_b \ll l$ радиуса тороида напряженность H в тороиде

$$H = \frac{N_1}{2\pi l} I_1, \quad (8)$$

где $l = \frac{(r_1+r_2)}{2}$; $r_1 = \frac{D}{2}$; $r_2 = \frac{d}{2}$; I_1 – ток в первичной обмотке трансформатора.

D и d – соответственно внешний и внутренний диаметры тороида.

Так как падение напряжения на сопротивлении R_1 составляет $U_x = I_1 R_1$, то с учетом (8)

$$U_x = \frac{2\pi l R_1 H}{N_1}. \quad (9)$$

U_x определяется величиной коэффициента усиления по горизонтальной оси k_x

$$U_x = k_x x. \quad (10)$$

С учетом (10) выражение для H может быть записано в виде

$$H = \frac{N_1 k_x x}{2\pi R_1 l} = \alpha U_x. \quad (11)$$

По закону Фарадея ЭДС индукции по вторичной обмотке

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \frac{dB}{dt} S, \quad (12)$$

где Φ – поток вектора магнитной индукции через один виток; S – площадь поперечного сечения тороида.

По закону Ома для вторичной обмотки получаем

$$\varepsilon_2 = U_c + I_2 R_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt}, \quad (13)$$

где U_c – напряжение на конденсаторе; I_2 – ток во вторичной обмотке; L_2 – индуктивность вторичной обмотки.

Так как L_2 очень мало, а $I_2 R_2 \gg U_c$, уравнение (13) может быть записано с учетом (12) в следующем виде:

$$-N_2 \frac{dB}{dt} S = I_2 R_2.$$

Откуда
$$I_2 = -\frac{N_2 S}{R_2} \frac{dB}{dt}. \quad (14)$$

Учитывая (14), найдем напряжение U_y , равное напряжению на конденсаторе

$$U_y = U_c = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t I_2 dt = -\frac{N_2 S}{R_2 C} \int_0^B dB = -\frac{N_2 S B}{R_2 C}, \quad (15)$$

где Q – заряд на обкладках конденсатора.

Если известен коэффициент отклонения k_y по вертикали, то

$$U_y = k_y y. \quad (16)$$

Из выражений (15) и (16) получаем

$$B = \frac{R_2 C U_y}{S N_2} = \frac{R_2 C k_y y}{S N_2} = \beta U_y \quad (17)$$

Подав одновременно напряжения U_y и U_x на входы осциллографа «х» и «у», получим на экране осциллографа петлю гистерезиса.

По площади петли можно найти работу перемагничивания, отнесенную к единице объема. Малое изменение объемной плотности энергии магнитного поля $\omega_H = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$ в цикле перемагничивания определяется по формуле

$$d\omega_H = Hd \mu\mu_0 H = HdB . \quad (18)$$

Работа dA_n расходуется на изменение внутренней энергии единицы объема ферромагнетика. За полный цикл перемагничивания

$$A_n = \int HdB . \quad (19)$$

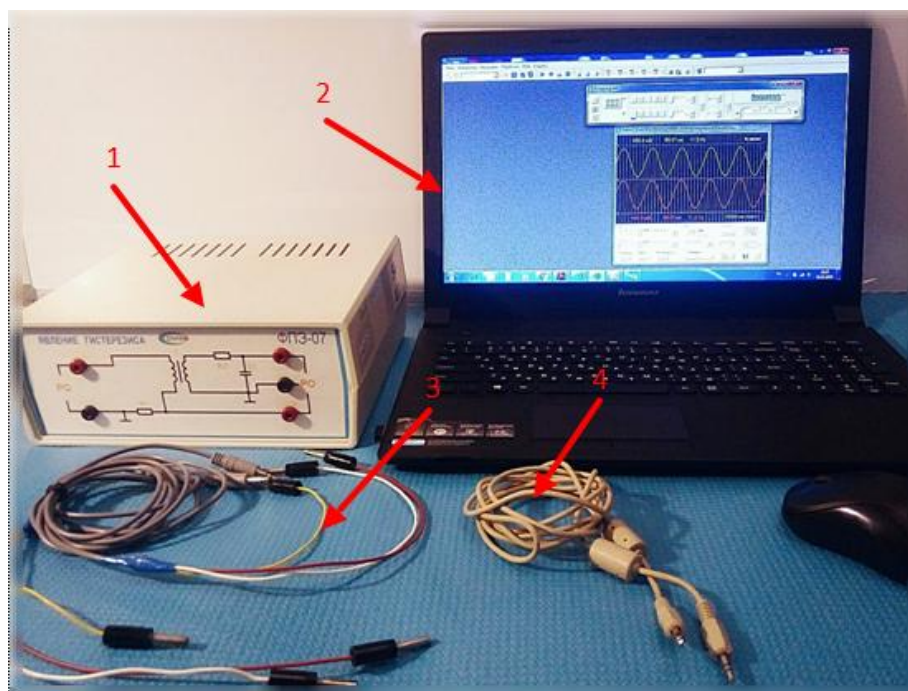
Учитывая (11) и (17), получаем

$$A_n = \frac{N_1 R_2 C k_x k_y}{2\pi r_T R_1 S_2 N_2} S_n , \quad (20)$$

где S_n площадь петли гистерезиса; $S = r_1 - r_2 h$.

3 Экспериментальная установка

Состав экспериментальной установки иллюстрируется рисунком 9.



1 – модуль ФПЭ-07; 2 – персональный компьютер с сервисным программным обеспечением; 3 – соединительные кабели для подключения модуля ФПЭ-07 к звуковому порту ПК; 4 – универсальный звуковой кабель.

Рисунок 9 – Экспериментальная установка для изучения явления гистерезиса

Для формирования и наблюдения петли гистерезиса в работе используется лабораторный модуль ФПЭ-07, виртуальный осциллограф и виртуальный генератор, реализованные на базе звуковой карты персонального компьютера (ПК), комплект соединительных кабелей.

Электрическая схема модуля ФПЭ-07 (рисунок 10) содержит следующие элементы:

$$R1=51 \text{ Ом};$$

$$R2=4,3 \text{ кОм};$$

$$C=0,22 \text{ мкФ}.$$

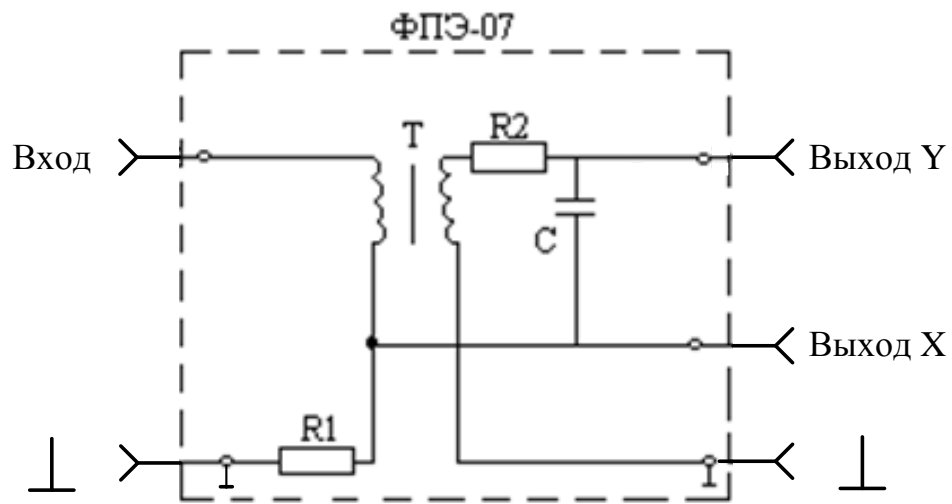


Рисунок 10 – Схема модуля ФПЭ-07

Трансформатор Т выполнен на тороидальном сердечнике (рисунок 11) имеющем размеры:

$$D=17,5 \text{ мм};$$

$$d=8 \text{ мм};$$

$$h=5 \text{ мм}.$$

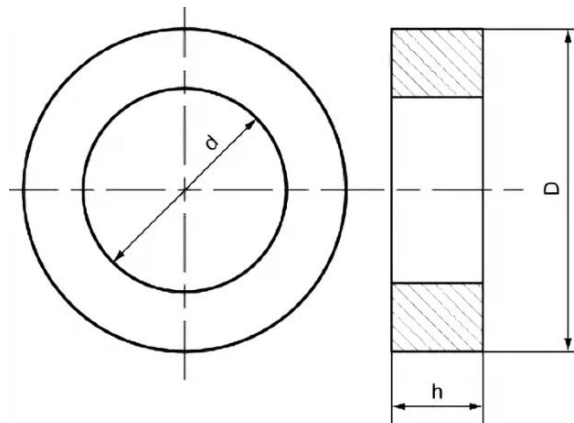


Рисунок 11 – Сердечник тороидального трансформатора

Число витков первичной обмотки трансформатора $N1=100$, вторичной – $N2=100$.

Для подключения модуля ФПЭ-07 к персональному компьютеру используются соединительные кабели, имеющие цветовую маркировку:

желтый – общий провод;

коричневый – первый (левый) канал;

белый – второй (правый) канал.

Вход модуля ФПЭ-07 подключается к линейному выходу звуковой карты ПК. Сигналы с выхода модуля ФПЭ-07 подаются на линейный вход звуковой карты.

Внимание! Категорически запрещается подключать к ПК иные приборы кроме модуля ФПЭ-07, если это не оговорено отдельно.

Виртуальный осциллограф «РадиоМастер» позволяет исследовать переменные напряжения в звуковом диапазоне частот от 10 Гц до 20 кГц. Для наблюдения сигналов доступны два независимых канала Y1 (зеленый) и Y2 (красный). Амплитуда входного напряжения без использования входного делителя напряжения ограничена возможностями звуковой карты ПК и не превышает 1,5 В.

На лицевой панели прибора (рисунок 12) располагаются органы управления, типичные для реальных осциллографов, а также специальные средства настройки и кнопки для работы в режиме запоминания осциллограмм. Все элементы панели снабжены всплывающими комментариями. Программа сопровождается файлом «help» с кратким описанием функциональных возможностей.

Виртуальный генератор «Авангард» позволяет возбуждать на линейном выходе звуковой карты ПК низкочастотные сигналы специальной формы в диапазоне до 20 кГц. Амплитуда выходного сигнала ограничена возможностями звуковой карты ПК и не превышает 1,5 В. Поскольку амплитуда сигнала определяется текущим положением регуляторов уровня, то задание амплитуды осуществляется в процентах от максимального уровня. Для вывода сигналов доступны два независимых канала.

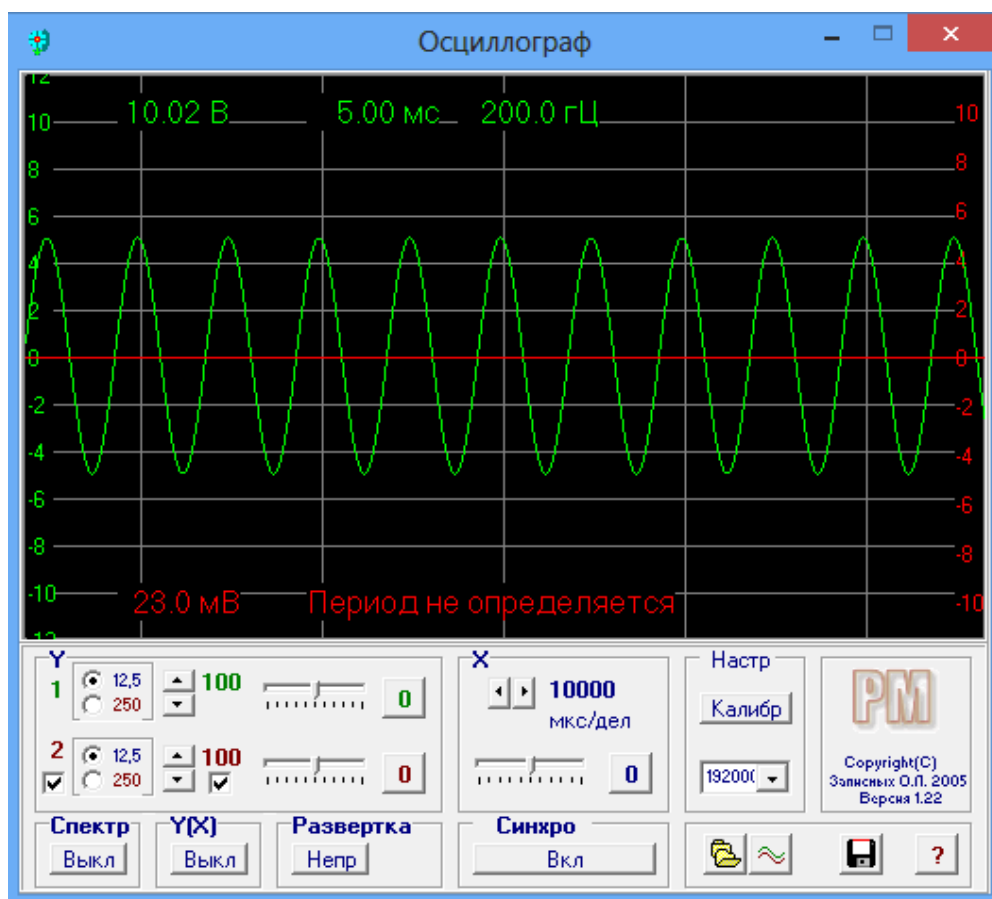


Рисунок 12 – Лицевая панель виртуального осциллографа

На лицевой панели прибора (рисунок 13) располагаются органы управления для выбора формы выходного сигнала, задания его частоты и амплитуды, а также кнопки для динамического изменения выходного сигнала по частоте или амплитуде (Свип-режим). Все элементы панели снабжены всплывающими комментариями. Программа сопровождается файлом «help» с кратким описанием функциональных возможностей.

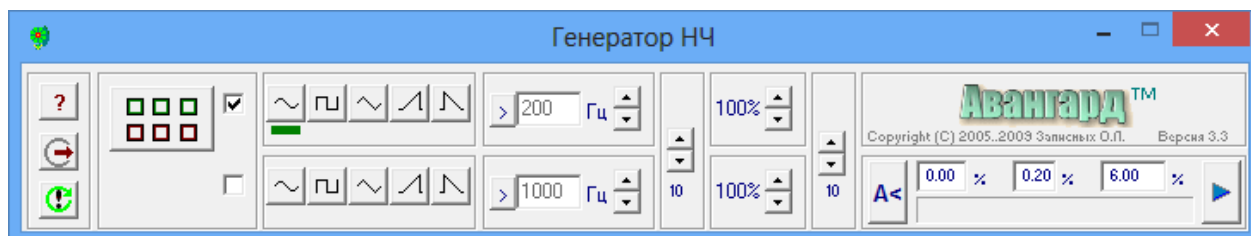


Рисунок 13 – Лицевая панель виртуального генератора низкочастотных сигналов

4 Экспериментальная часть

4.1 Лабораторная работа №1 «Калибровка виртуального осциллографа»

Цель работы

1. Познакомиться с виртуальными измерительными приборами, освоить принципы измерения параметров импульсных сигналов с помощью осциллографа.
2. Провести процедуру калибровки виртуального осциллографа, оценить предельные возможности воспроизведения сигналов различной формы в диапазоне частот.
3. Осуществить наблюдение фигур Лиссажу при сложении колебаний, происходящих в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Порядок выполнения работы

Задание 1

1. Включите персональный компьютер. После загрузки убедитесь, что регуляторы уровня для активных аудиоустройств установлены на максимальный (100%) уровень, а регулятор баланса установлен в нейтральное положение. Для этого откройте «Панель управления», далее «Оборудование и звук» и перейдите к свойствам активных устройств (рисунок 14). Проверьте и при необходимости скорректируйте выходные уровни.
2. Запустите виртуальный осциллограф и генератор. Для этого найдите на рабочем столе папки «Виртуальный осциллограф» и «Виртуальный генератор» и активируйте исполняемые файлы «osc.exe» и «gen33.exe». После запуска программ разместите лицевые панели приборов на рабочем столе для комфортной работы.
3. Воспользовавшись универсальным звуковым кабелем, соедините аудио вход с аудио выходом звуковой карты ПК.
4. Установите на лицевых панелях виртуальных приборов элементы управления в положения, соответствующие рисункам 12 и 13. Далее, меняя значения коэффициентов развертки по времени и амплитуде, добейтесь устойчивой картины воспроизведения на экране осциллографа синусоидального сигнала.

5. Перейдите к виртуальному генератору. Изменяя частоту выходного сигнала от 200 Гц до 1 кГц с шагом 10 Гц наблюдайте за сигналом, отображаемым на экране осциллографа. При необходимости скорректируйте диапазон развертки на осциллографе. Затем увеличьте шаг изменения частоты до 1 кГц и последовательно увеличивайте частоту до 20 кГц. Визуально оцените возникающие искажения сигнала.

6. Повторите п. 5 для сигналов «Меандр» и «Пила нарастающая». Сравните результаты для сигналов разной формы, сделайте выводы.

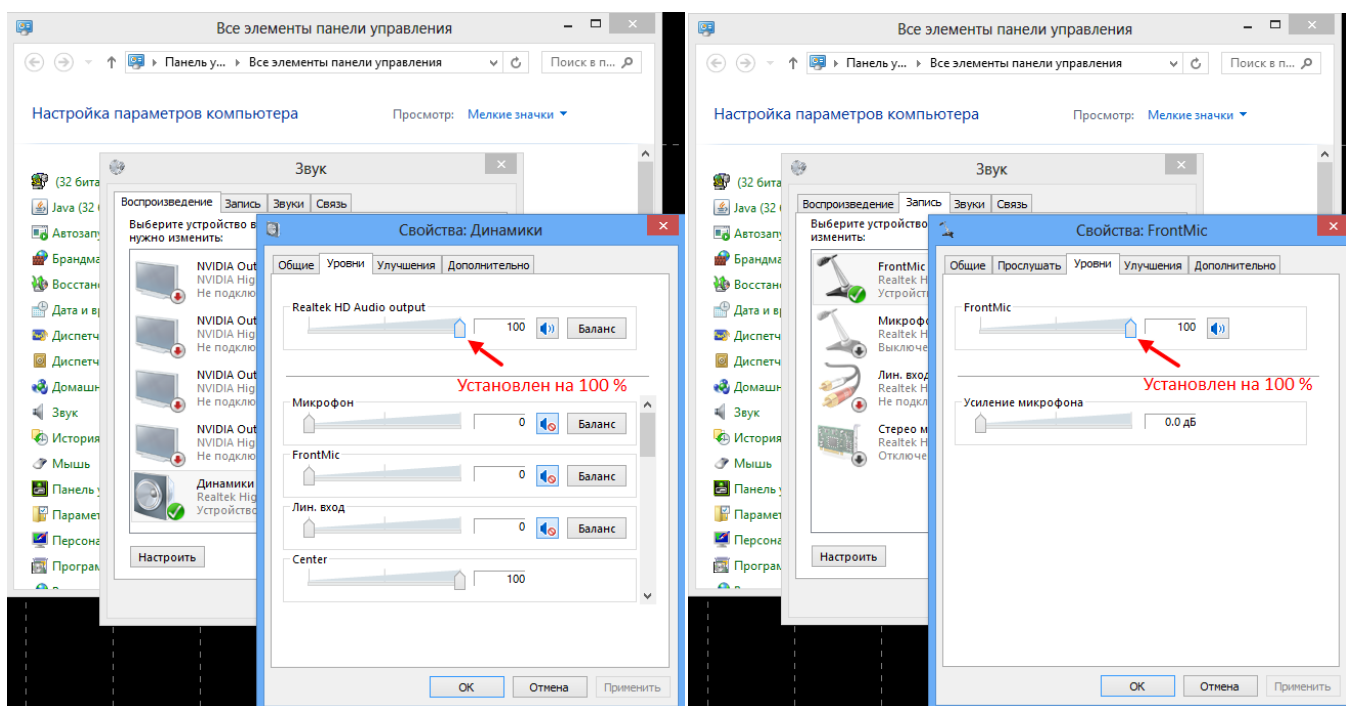


Рисунок 14 – Установка выходных уровней сигналов активных аудиоустройств

7. Установите частоту выходного синусоидального сигнала 1 кГц. На панели генератора «Свип-режим» задайте начальное значение амплитуды сигнала – 0.00 %; шаг изменения амплитуды сигнала – 10 %; конечное значение амплитуды сигнала – 100%. Нажмите кнопку «Запустить» и наблюдайте за изменениями сигнала на экране осциллографа. Остановите процесс кнопкой «Остановить».

8. Повторите п. 7 для сигналов «Меандр» и «Пила нарастающая». Сравните результаты для сигналов разной формы, сделайте выводы.

9. Активируйте режим генерации «Синус». Затем переключите свип-режим «Нарастание частоты/амплитуды». Установите начальное значение частоты – 100Гц; шаг – 0.10 Окт; конечное значение 20 кГц. Нажмите кнопку «Запустить» и наблюдайте за изменениями сигнала на экране осциллографа. Остановите процесс кнопкой «Остановить».

10. Повторите п. 9 для сигналов «Меандр» и «Пила нарастающая». Сравните результаты для сигналов разной формы, сделайте выводы.

Задание 2

1. Перейдите в режим генерации «Синус», установите частоту выходного сигнала 1 кГц, амплитуду сигнала 100%. Убедитесь в наличии устойчивого сигнала на экране виртуального осциллографа. Отключите первый канал генерации.

2. Отключите универсальный звуковой кабель. Воспользовавшись соединительным кабелем для подключения модуля ФПЭ-07, подайте сигнал с линейного выхода (первый канал, коричневый провод) на вход электронного осциллографа. Включите приборы и измерьте амплитуду сигнала, запомните полученное значение в милливольтках.

3. Отключите внешние приборы и восстановите соединение аудио входа с аудио выходом звуковой карты ПК с помощью универсального звукового кабеля. Включите первый и второй каналы виртуального генератора. На экране виртуального осциллографа должны отображаться синусоидальные сигналы зеленого и красного цветов.

4. На лицевой панели виртуального осциллографа нажмите кнопку «Калиб». В открывшееся окно введите ранее полученное значение амплитуды сигнала в милливольтках и нажмите клавишу «Ввод» на клавиатуре компьютера. Калибровка закончена.

5. Выполните п. 5 из задания 1, сравните результаты.

Задание 3

1. Установите на лицевой панели виртуального генератора элементы управления в положения, соответствующие рисунку 15.

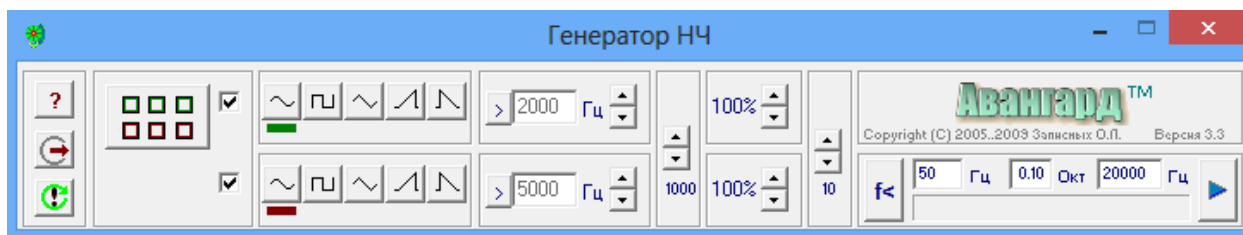


Рисунок 15 – Предустановка элементов управления виртуального генератора

2. Переведите виртуальный осциллограф в режим динамического характериографа, нажав кнопку $Y(X)$ «Вкл/Выкл» или клавишу X на клавиатуре компьютера (рисунок 16). При подаче синусоидальных напряжений одновременно на оба входа виртуального осциллографа на его экране будут получаться различные фигуры в зависимости от амплитуды, частоты и фазы подаваемых напряжений.

3. Фигуры, отображаемые на экране осциллографа в режиме $Y(X)$, называют фигурами Лиссажу. Изменяя частоту виртуального генератора, получите фигуры Лиссажу при соотношении частот первого и второго каналов 1:1, 1:2, 1:3, 2:3. Полученные осциллограммы сохраните в виде графических файлов. Сохранение осциллограмм осуществляется нажатием кнопки «Поместить в архив». Сохраненные осциллограммы размещаются в папке «data».

4. Соотношение частот можно определить по виду фигуры. Отношение частот колебаний равно отношению числа касаний фигуры с прямой, параллельной горизонтальной оси X , и с прямой, параллельной вертикальной оси Y . Результаты измерений и рисунки поместите в таблицу, приведенную ниже.

| Частота, кГц | | Соотношение частот, определенное по виду фигуры | Вид фигуры |
|--------------|--------|--|------------|
| Вход X | Вход Y | | |
| | | | |

5. Воспользовавшись кнопкой «Архив осциллограмм» выведите на экран осциллографа одну из ранее сохраненных осциллограмм. Определите, какому соотношению частот она соответствует.

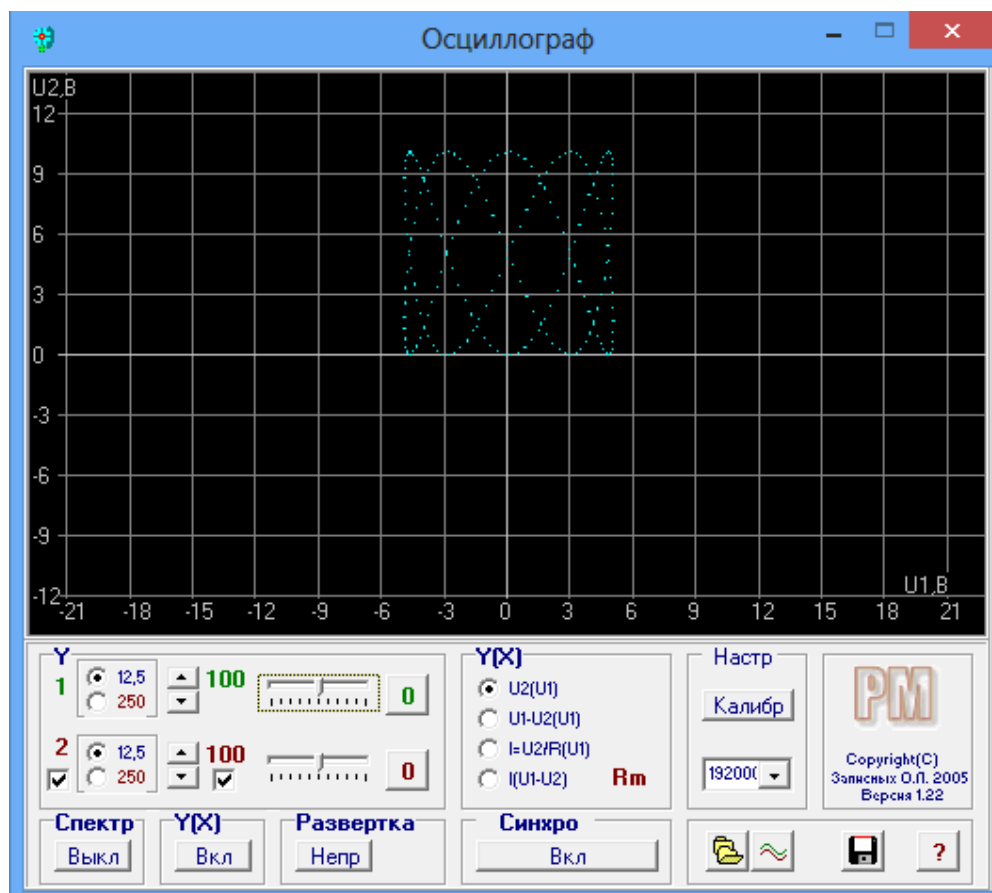


Рисунок 16 – Лицевая панель виртуального осциллографа в режим динамического характериографа

Контрольные вопросы

1. Каково назначение виртуального осциллографа?
2. Как определить с помощью осциллографа период исследуемого сигнала; напряжение исследуемого сигнала?
3. Для чего выполняется процедура калибровки виртуального осциллографа?
4. Почему при изменении формы сигнала и его частоты возникают искажения?
5. Для чего нужен режим динамического характериографа $Y(X)$.

4.2 Лабораторная работа №2 «Построение основной кривой намагничивания ферромагнетика»

Цель работы

1. Получить петлю гистерезиса предельного цикла и семейство петель гистерезиса, соответствующих частным циклам намагничивания. Получить экспериментальные данные для построения основной кривой намагничивания исследуемого ферромагнетика.

2. Выполнить динамическое построение петель гистерезиса, используя возможности используемых виртуальных приборов.

Порядок выполнения работы

Задание 1

1. Включите персональный компьютер. После загрузки убедитесь, что регуляторы уровня для активных аудиоустройств установлены на максимальный (100%) уровень, а регулятор баланса установлен в нейтральное положение.

2. Запустите виртуальный осциллограф и генератор. При необходимости выполните калибровку виртуального осциллографа.

3. Переведите виртуальный осциллограф в режим динамического характериографа, нажав кнопку $Y(X)$ «Вкл/Выкл» или клавишу X на клавиатуре компьютера.

4. Переведите первый канал виртуального генератора в активный режим, второй канал отключите. Установите режим генерации «Синус» и задайте частоту колебаний 4 кГц, амплитуду колебаний 100%.

5. Подберите кратность вертикальной и горизонтальной разверток виртуального осциллографа для наблюдения на экране петли гистерезиса, занимающей наибольшее доступное пространство (рисунок 17).

6. Получите семейство петель гистерезиса, последовательно уменьшая амплитуду выходного сигнала генератора на 10%. Все результаты поместите в архив для последующего анализа.

7. Не меняя частоту выходного синусоидального сигнала на панели генератора «Сви́п-режим», задайте начальное значение амплитуды сигнала – 5%; шаг изменения амплитуды сигнала – 5%; конечное значение амплитуды сигнала – 100%. Нажмите кнопку «Запустить» и наблюдайте за изменениями сигнала на экране осциллографа. Остановите процесс кнопкой «Остановить». Поясните наблюдаемые изменения формы петель гистерезиса.

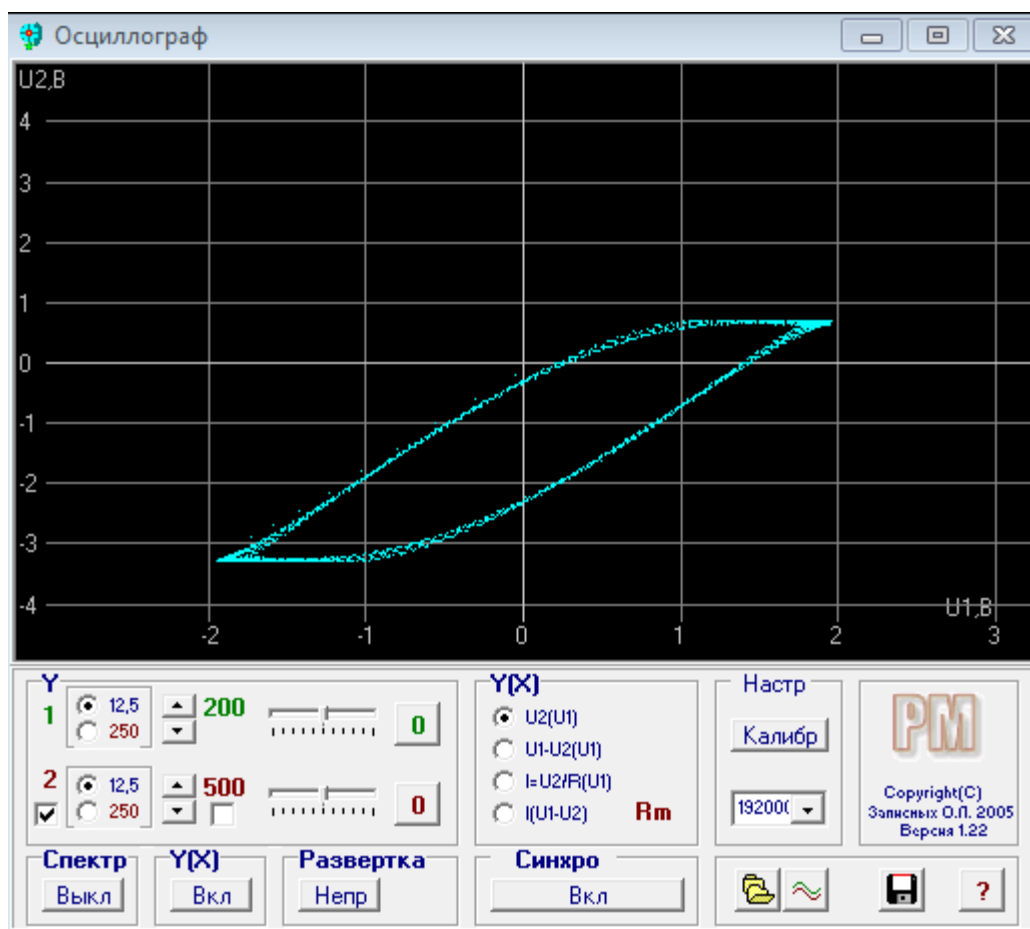


Рисунок 17 – Максимальная петля гистерезиса в пределах экрана осциллографа, соответствующая магнитному насыщению образца

Задание 2

1. Для каждой петли гистерезиса, помещенной в архив, определите значения напряжений U_x и U_y , соответствующие их вершинам. Воспользуйтесь линейкой для более точного нахождения координат вершин. Учитывайте, что размах входного напряжения, подаваемого на вход X осциллографа, однозначно определяет размер петли гистерезиса вдоль горизонтальной оси.

2. По формулам (11) и (17) вычислите значения напряженности H и индукции B вершин каждой петли гистерезиса. Результаты вычислений занесите в таблицу.

| № петли гистерезиса | Координаты вершин | | Результаты вычислений | |
|---------------------|-------------------|----------|-----------------------|---------|
| | U_x, B | U_y, B | $H, A/m$ | $B, Tл$ |
| | | | | |

3. По полученным данным постройте кривую намагничивания для исследуемого ферромагнетика $B=f(H)$. Для построения графика используйте программу Excel.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип формирования петли гистерезиса с помощью модуля ФПЭ-07?

2. Какие процессы происходят в ферромагнетике при его намагничивании и перемагничивании? Чем обусловлен магнитный гистерезис?

3. Поясните отличие частных петель гистерезиса от петли гистерезиса предельного цикла?

4. Какой вид имеет основная кривая намагничивания ферромагнетика?

5. Как объяснить наличие остаточной намагниченности у ферромагнетиков?

6. Что называется магнитной восприимчивостью магнетика, каков физический смысл этого понятия? Единица измерения магнитной восприимчивости в СИ? Как связаны магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость вещества?

7. Почему зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от индукции намагничивающего поля имеет максимум?

4.3 Лабораторная работа №3 «Оценка работы перемагничивания ферромагнетика за один цикл»

Цель работы

1. Получить петлю гистерезиса предельного цикла и провести количественный анализ. Определить работу перемагничивания и значения коэрцитивной силы и остаточной намагниченности.

2. Выполнить динамическое построение петель гистерезиса, используя возможности используемых виртуальных приборов.

Порядок выполнения работы

Задание 1

1. Включите персональный компьютер. После загрузки убедитесь, что регуляторы уровня для активных аудиоустройств установлены на максимальный (100%) уровень, а регулятор баланса установлен в нейтральное положение.

2. Запустите виртуальный осциллограф и генератор. При необходимости выполните калибровку виртуального осциллографа.

3. Переведите виртуальный осциллограф в режим динамического характериографа, нажав кнопку $Y(X)$ «Вкл/Выкл» или клавишу X на клавиатуре компьютера.

4. Переведите первый канал виртуального генератора в активный режим, второй канал отключите. Установите режим генерации «Синус» и задайте частоту колебаний 4 кГц, амплитуду колебаний 100%.

5. Подберите кратность вертикальной и горизонтальной разверток виртуального осциллографа для наблюдения на экране петли гистерезиса, занимающей наибольшее доступное пространство (рисунок 17).

6. Сохраните петлю предельного цикла в архиве осциллограмм для последующей обработки.

Задание 2

1. Для анализа петли предельного цикла воспользуйтесь возможностями графического редактора «Paint». Откройте сохраненную осциллограмму в графическом редакторе и активируйте линии сетки и линейки (рисунок 18).

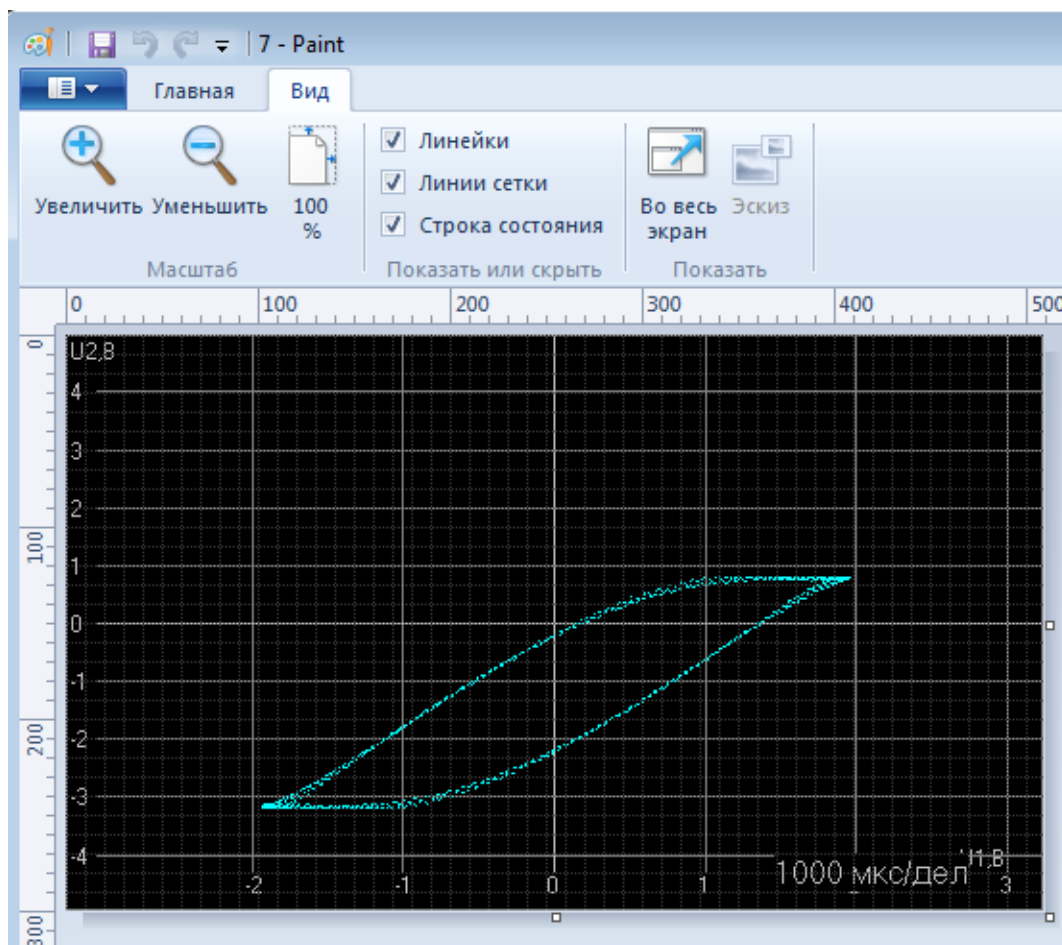


Рисунок 18 – Отображение сохраненной осциллограммы в графическом редакторе «Paint»

2. Учитывая, что размах входного напряжения, подаваемого на вход X осциллографа, однозначно определяет размер петли гистерезиса вдоль горизонтальной оси, определите шаг приращения напряжения для горизонтальной и вертикальной координат наложенной сетки. Линии основной шкалы используйте для нахождения масштабирующего коэффициента для вертикальной координаты. Определите значения коэффициентов отклонения по горизонтали k_x (В/дел.) и вертикали k_y (В/дел.).

3. Постройте прямоугольник, полностью охватывающий петлю гистерезиса (рисунок 19). Добавьте оси координат и обозначьте характерные точки петли гистерезиса, соответствующие значениям H_s , H_c , B_s , B_r .

4. Определите площадь петли гистерезиса, сопоставив ей число клеток наложенной сетки, лежащих внутри петли. Рассчитайте работу перемагничивания за один цикл по формуле (20).

5. Определите значение H_c по формуле (11). По полученному значению установите, к какой группе ферромагнетиков (мягкий или жесткий) относится исследуемый магнетик. Оцените значение B_r .

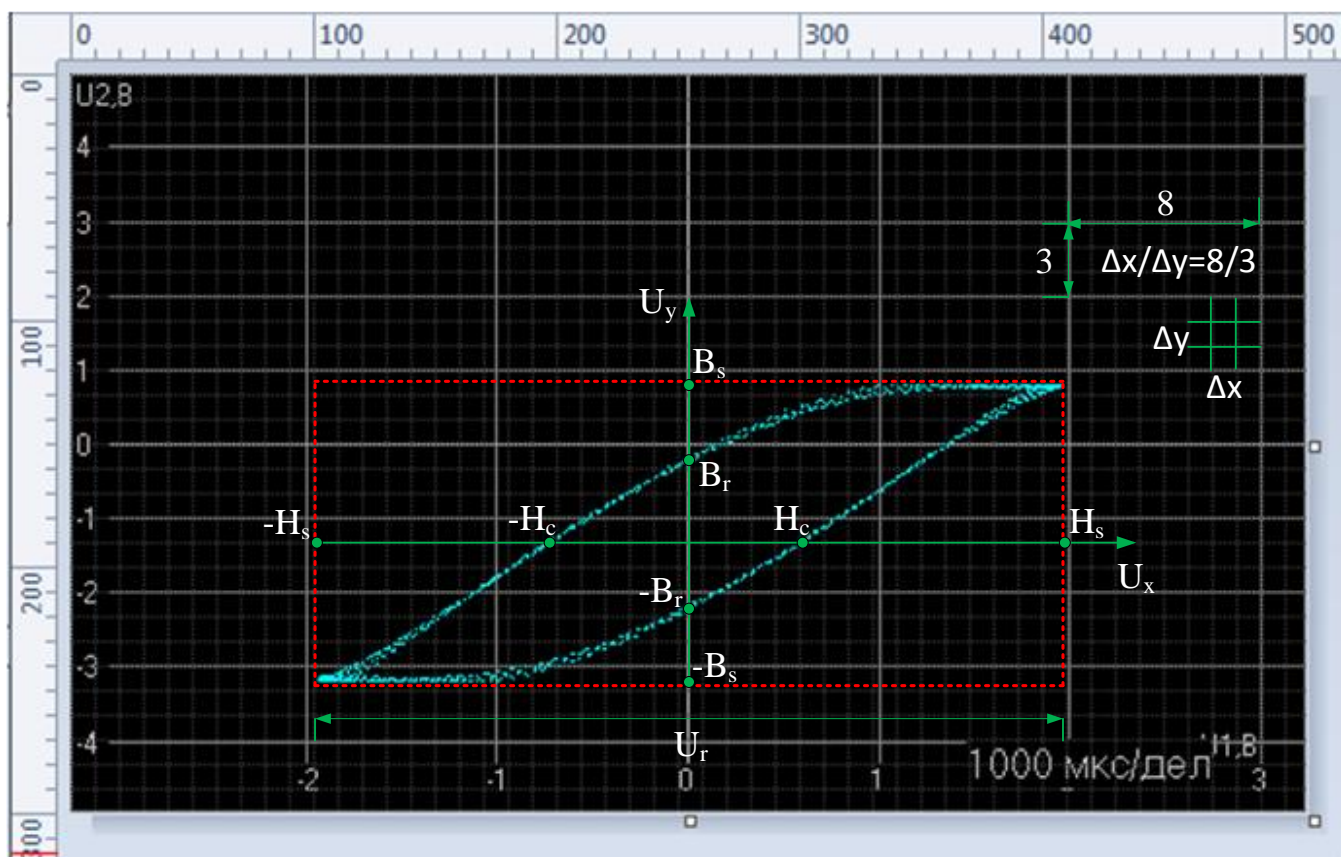


Рисунок 19 – Анализ сохраненной осциллограммы в графическом редакторе «Paint»

Задание 3

1. Не меняя амплитуду выходного синусоидального сигнала на панели генератора «Сви-режим» задайте начальное значение частоты сигнала – 2 кГц; шаг

изменения – 0.2 Окт; конечное значение частоты сигнала – 20 кГц. Нажмите кнопку «Запустить» и наблюдайте за изменениями сигнала на экране осциллографа. Остановите процесс кнопкой «Остановить». Поясните наблюдаемые изменения формы петель гистерезиса.

2. Последовательно устанавливая частоту синусоидального сигнала 4, 6, 8 и 12кГц сохраните в архиве наблюдаемые петли гистерезиса.

3. Откройте сохраненные на предыдущем шаге осциллограммы в графическом редакторе и активируйте линии сетки и линейки (рисунок 18).

4. Для каждой петли гистерезиса найдите отношение площади петли к площади охватывающего ее прямоугольника. Установите, как меняется соотношение площадей при увеличении частоты синусоидального сигнала. Поясните полученные результаты.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные свойства парамагнетиков и диамагнетиков?
2. Какой класс магнитных материалов называется ферромагнетиками? Что такое спонтанная намагниченность и как она зависит от температуры?
3. Как намагниченность и магнитная восприимчивость ферромагнетика зависят от напряженности магнитного поля?
4. Какие процессы происходят в ферромагнетике при его намагничивании и перемагничивании? Чем обусловлен магнитный гистерезис?
5. Какой физический смысл имеет площадь петли гистерезиса?

Список использованных источников

1. Савельев, И.В. Курс общей физики [Текст]: учебное пособие. В 3т.Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1988. – 496 с.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики [Текст]: учебное пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 2001. – 542 с.