

# Работа 1.1.

## Изучение магнитного и электрического гистерезиса

**Цель:** исследовать поляризацию сегнетоэлектриков в зависимости от напряжённости приложенного электрического поля; исследовать намагниченность ферромагнетиков в зависимости от напряжённости приложенного магнитного поля; изучить явление гистерезиса на их примере.

**Оборудование:** электронный осциллограф, звуковой генератор, вольтметр, модуль ФПЭ–07 с ферромагнитным образцом, модуль ФПЭ–02 с сегнетоэлектрическим образцом

### Введение

Отклик некоторой системы (физической, биологической и др.) на внешнее воздействие может определяться не просто присущими ей фиксированными характеристиками, но и её текущим состоянием. При этом поведение системы во времени при изменении внешнего воздействия во многом определяется её предысторией. Например, исходно ненамагниченное железо, помещенное во внешнее магнитное поле, остаётся намагниченным и после выключения этого поля. Такого рода явления называют **гистерезисом** (от греч. *отстающий*).

В данной работе рассматриваются явления электрического гистерезиса в сегнетоэлектриках и магнитного гистерезиса в ферромагнетиках.

## Электромагнитное поле в веществе

Приведём основные сведения из теории электрического и магнитного поля в веществе.

**Электрическое поле.** Молекулы диэлектрика, помещённые в электрическое поле  $\vec{E}$ , поляризуются (т. е. имеет место смещение связанных зарядов относительно центра молекулы), а исходно поляризованные молекулы (такие как  $\text{H}_2\text{O}$ ) стремятся выстроиться вдоль направления  $\vec{E}$ . Каждая поляризованная молекула может быть описана как точечный электрический диполь. Свойства среды в целом при этом описываются вектором поляризации  $\vec{P}$ , который равен суммарному электрическому моменту единицы объёма (объёмная плотность электрического момента)<sup>1</sup>

Электрическое поле в диэлектрике складывается из поля, созданного внешними по отношению к диэлектрику зарядами (свободными зарядами), и поля его поляризованных молекул. Удобно ввести величину  $\vec{D}$ , называемую вектором электрической индукции, и равную по определению

$$\vec{D} = \vec{E} + 4\pi\vec{P}, \quad (1)$$

где  $\vec{E}$  — напряженность среднего электрического поля в данной точке, а  $\vec{P}$  — значение поляризации в ней. В вакууме  $\vec{D} \equiv \vec{E}$ . Удобство введения данного вектора заключается в том, что теорема Гаусса для него выглядит также, как и для вектора  $\vec{E}$ , с тем отличием, что в ней учитываются только свободные заряды и исключаются поляризационные:

$$\text{div } \vec{D} = 4\pi\rho_{\text{своб}}, \quad \leftrightarrow \quad \text{div } \vec{E} = 4\pi(\rho_{\text{своб}} + \rho_{\text{пол}}).$$

В случае простейшей геометрии (например, в плоском или сферическом конденсаторе) вектор  $\vec{D}$  есть непосредственно *электрическое поле, создаваемое свободными зарядами* (на обкладках конденсатора).

---

<sup>1</sup>Точечным диполем называют два разноименных заряда  $q$ , расположенных на малом расстоянии  $\ell$ . Электрическим моментом называют вектор  $\vec{p} = q\vec{\ell}$ , где вектор  $\ell$  проведён от отрицательного заряда к положительному.

Для широкого класса диэлектриков (в частности, во всех газах и жидкостях)  $\vec{D}$  пропорционален вектору  $\vec{E}$  в каждой точке вещества. Коэффициент пропорциональности между ними  $\varepsilon$  называют диэлектрической проницаемостью среды:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}. \quad (2)$$

Существует особый класс диэлектрических кристаллов, называемых сегнетоэлектриками, в которых дипольные моменты поляризованные молекулы могут, взаимодействуя между собой, ориентироваться параллельно друг другу и сохранять эту ориентацию при выключении поля. Это приводит наличию ненулевой поляризации  $\vec{P} \neq 0$  кристалла даже при отсутствии внешнего поля ( $\vec{D} = 0$ ). Кроме того, сегнетоэлектрики характеризуются следующими свойствами: а) большой чувствительностью по отношению к внешнему полю,  $\varepsilon \gg 1$ , б) поляризация  $\vec{P}$  и, следовательно, диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  нелинейным образом зависят от напряжённости  $\vec{E}$  (и индукции  $\vec{D}$ ),  $\vec{P} = \vec{P}(\vec{E})$ ,  $\varepsilon = \varepsilon(\vec{E}, \vec{D})$ , и в) в сегнетоэлектриках имеет место явление гистерезиса.

**Магнитное поле.** В веществе, помещённом в магнитное поле, возникают индуцированные циркуляционные молекулярные токи. Каждая молекула в таком случае может быть описана как точечный магнитный диполь<sup>2</sup>. Кроме того, каждая молекула может обладать собственным ненулевым магнитным моментом<sup>3</sup>, которые при воздействии внешнего магнитного поля могут ориентироваться вдоль него, создавая ненулевой средний магнитный момент в образце.

Истинное среднее магнитное поле в образце описывается вектором  $\vec{B}$  (этот вектор аналогичен вектору напряжённости  $\vec{E}$  электрического поля, однако по традиции его «неправильно» называют вектором **магнитной индукции**). По аналогии с электрическим

---

<sup>2</sup>Точечным магнитным диполем называют бесконечно малый виток с током. Магнитным моментом витка площадью  $S$ , по которому течёт ток  $I$ , называют величину  $\vec{m} = IS\vec{n}$ , где  $\vec{n}$  — нормаль к витку, направление которой задано по правилу правого винта.

<sup>3</sup>Это явление имеет квантовомеханический характер и связано с наличием собственного момента импульса — спина — у элементарных частиц, составляющих молекулу: электронов, протонов и нейтронов

полем вводят объёмную плотность магнитного момента — вектор намагниченности  $\vec{M}$ , и вспомогательное магнитное поле, вычисляемое по свободно текущим (не молекулярным) токам, — вектор  $\vec{H}$ , называемый традиционно **напряжённостью** магнитного поля. Введённые величины связаны между собой соотношением

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{M}. \quad (3)$$

Теорема о циркуляции векторов  $\vec{H}$  и  $\vec{B}$  выглядит следующим образом

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}_{\text{своб}}, \quad \leftrightarrow \quad \text{rot } \vec{B} = \frac{4\pi}{c} (\vec{j}_{\text{своб}} + \vec{j}_{\text{мол}}), \quad (4)$$

где  $\vec{j}_{\text{своб}}$  и  $\vec{j}_{\text{мол}}$  — объёмные плотности свободных (например, текущих по охватывающим магнитный образец проводам) токов и молекулярных (собственных или индуцированных) токов. В случае простой геометрии, например, в длинном соленоиде, вектор  $\vec{H}$  есть просто *магнитное поле, созданное токами проводимости*.

Коэффициент пропорциональности  $\mu$  между  $\vec{H}$  и  $\vec{B}$  называют **магнитной проницаемостью** среды:

$$\vec{B} = \mu\vec{H}. \quad (5)$$

Существует класс веществ (например, элементы группы железа Fe, Co, Ni), называемые **ферромагнетиками**, в которых магнитные моменты атомов и молекул могут, взаимодействуя между собой, ориентироваться параллельно друг другу и сохранять эту ориентацию при выключении внешнего поля ( $\vec{M} \neq 0$  при  $\vec{H} = 0$ ). Ферромагнетики, кроме того, характеризуются следующими свойствами: а) высокой чувствительностью ко внешнему магнитному полю  $\mu \gg 1$ , б) намагниченность  $\vec{M}$  и, следовательно, магнитная проницаемость  $\mu$  нелинейным образом зависят от величины поля  $\vec{B}$  (или  $\vec{H}$ ),  $\vec{M} = \vec{M}(\vec{B})$ ,  $\mu = \mu(\vec{B}, \vec{H})$ , и в) в ферромагнетиках имеет место явление гистерезиса.

### **Явление электрического и магнитного гистерезиса**

Таким образом, в веществе под воздействием приложенного электрического или магнитного полей происходит возникновение

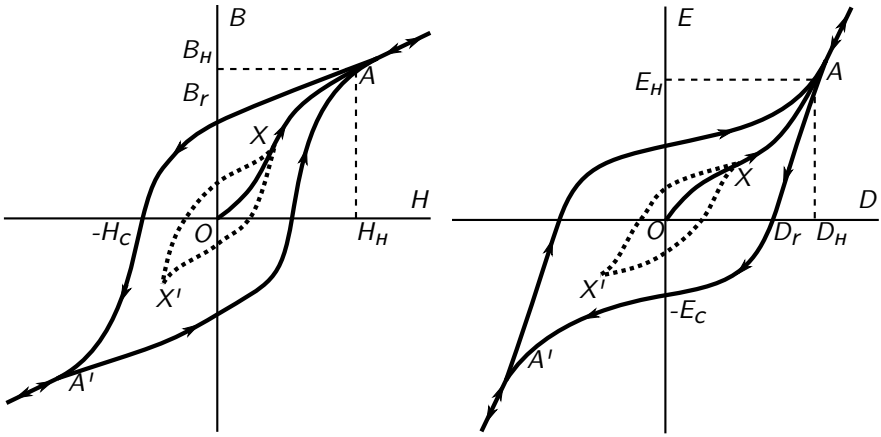


Рис. 1: Петля гистерезиса для ферромагнетика (слева) и сегнетоэлектрика (справа).

или переориентация соответственно электрических или магнитных диполей. Образец в целом при этом поляризуется или намагничивается, что характеризуется векторами  $\vec{P}$  или  $\vec{M}$ . Сегнетоэлектрики и ферромагнетики характеризуются тем, что, при возвращении величины приложенного поля к первоначальному значению, диполи в веществе (электрические или магнитные) не возвращаются в исходное положение — как бы «застревают» в том состоянии, до которого они были доведены.

Рассмотрим явление гистерезиса подробнее (см. рис. 1) на примере ферромагнетика.

Пусть имеется исходно немагнитный материал. Поместим его во внешнее магнитное поле, которое будем постепенно увеличивать. В таком случае  $B$  и  $H$  в образце будут увеличиваться по некоторому нелинейному закону, зависящему от рода вещества (кривая  $OA$ ). Намагниченность образца  $M$  также будет расти по мере того, как всё больше и больше магнитных диполей выстраиваются преимущественно вдоль поля. В точке  $A$  намагниченность достигнет своего максимально возможного значения  $M_H$  ( $B = B_H$ ,  $H = H_H$ ) — это состояние называется магнитным насыщением, и в нём все имеющиеся в веществе магнитные моменты ориентиро-

ваны по приложенному полю.

Далее начнём уменьшать внешнее поле. Размагничивание пойдёт по кривой, лежащей выше  $OA$  и при достижении  $H = 0$  остановится в точке  $B_r \neq 0$ . Таким образом, при снятии внешнего воздействия<sup>4</sup> в образце остаётся остаточная намагниченность  $M_r$ , создающая поле  $B_r$  ( $B_r = 4\pi M_r$ ).

Чтобы размагнитить образец (то есть довести до точки  $B = 0$ ) необходимо создать в образце поле  $-H_c$ , называемое **коэрцитивным** (*coerce* — принуждать), которое должно быть направлено противоположно исходному.

При дальнейшем увеличении по модулю отрицательного  $H$  образец доходит до точки насыщения в обратном направлении  $A'$ , симметричной точке  $A$ . Возврат к нулевому значению  $H$  приводит в точку  $B = -B_r$  и дальнейшее увеличение  $H$  приводит систему обратно в точку  $A$  по кривой, лежащей ниже  $OA$ . Цикл, в котором достигается состояние насыщения, называют **предельным**.

Если не доводить систему до состояния насыщения и начать уменьшать  $H$  при  $H_x < H_n$ , то система пройдёт по циклу  $XX'$ , подобному предельному, но меньшего охвата.

Для сегнетоэлектрика картина будет аналогична описанной, с заменой  $B \rightarrow E$ ,  $H \rightarrow D$  и  $M \rightarrow P$  (см. рис. 1, справа). Заметим небольшое отличие: поскольку при нарастании поля всегда  $\vec{E} \uparrow \uparrow \vec{P}$  (все индуцированные диполи ориентируются по  $\vec{E}$ ), из (1) следует, что  $D > E$ , а значит при уменьшении внешнего поля после достижения насыщения  $A$  кривая насыщения пойдёт ниже  $OA$ , и первой будет достигнута точка  $D = D_r = 4\pi P_r$ ,  $E = 0$  (а не  $B = B_r$ ,  $H = 0$ , как в магнитном случае). Значение  $D_r$  называют остаточной индукцией. При дальнейшем уменьшении внешнего поля будет достигнута точка  $E = -E_c$ ,  $D = 0$ , где  $E_c$  — коэрцитивное поле.

---

<sup>4</sup>Внешнее воздействие характеризуется токами вокруг образца, и при этом вектор  $\vec{H}$  пропорционален величине тока  $I$ ,  $H \propto I$ . Для случая электрического поля внешнее воздействие определяется зарядами  $q$  на обкладках, которым пропорционален вектор  $\vec{D}$ ,  $D \propto q$ .

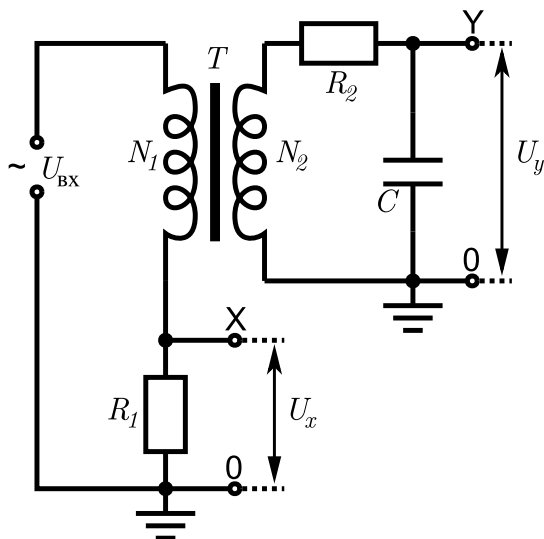


Рис. 2: Схема для измерения магнитного поля в ферромагнетике (модуль ФПЭ-07)

## Экспериментальная установка

### А. Изучение гистерезиса ферромагнитных материалов

Схема измерений приведена на рис. 2. Она реализована таким образом, что в исследуемом образце создаётся переменное магнитное поле, напряженность которого изменяется периодически от  $+H_m$  до  $-H_m$  с рабочей частотой  $\sim 2$  кГц. При этом на канал  $X$  осциллографа подаётся величина, пропорциональная  $H$ , а на канал  $Y$  — пропорциональная  $B$ , так что на его экране отображается петля гистерезиса  $B(H)$ , соответствующая амплитуде колебаний напряжённости  $H_m$ .

Рассмотрим подробнее устройство измерительной схемы. Исследуемый образец выполнен в виде тороидального трансформатора  $T$ : ферромагнитного тора, на который намотано две катушки, одна из которых содержит  $N_1$  витков, другая —  $N_2$ .

**Измерение  $H$ .** Обмотка  $N_1$  подключена последовательно с резистором  $R_1$  к генератору, создающему входное напряжение  $U_{BX}$ . На-

пряжение  $U_x$  с резистора  $R_1$  подаётся на канал  $X$  осциллографа. Это позволяет измерять ток  $I_1$  в катушке  $N_1$ , а значит и напряжённость магнитного поля  $H$ . Ток найдём по закону Ома

$$I_1 = \frac{U_x}{R_1},$$

а напряжённость поля в торе можно приближенно найти, считая тор длинным тонким цилиндром:

$$H = \frac{4\pi}{c} n_1 I_1, \quad (6)$$

где  $n_1 = N_1/(2\pi r_T)$  — плотность намотки витков, а  $r_T = (r_1 + r_2)/2$  — средний радиус тора. Таким образом,

$$H = \frac{2N_1}{r_T R_1} U_x. \quad (7)$$

Выражая используемые величины в системе СИ, получим удобную для практических расчётов формулу

$$H = 10^{-5} \frac{2N_1}{r_T R_1} U_x \quad [\text{эрстед}], \quad (8)$$

где  $R_1$  выражено в омах,  $U_x$  — в вольтах,  $r_T$  в сантиметрах. Ответ при этом окажется выраженным в эрстедах (ед. СГС)<sup>5</sup>.

**Измерение В.** Вторичная обмотка тора  $N_2$  включена в цепь с конденсатором  $C$  и резистором  $R_2$ . Напряжение с конденсатора  $U_y$  подаётся на канал  $Y$  осциллографа. Сопротивление  $R_2$  велико, так что напряжение на резисторе  $U_{R_2}$  значительно превосходит напряжение на конденсаторе  $U_C$  (в электротехнике такую схему называют **интегрирующей ячейкой** — смысл этого термина виден из дальнейших выкладок).

---

<sup>5</sup>В системе СГС размерности всех электромагнитных величин —  $H$ ,  $B$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $M$ ,  $P$  — одинакова. При этом по традиции единицу измерения  $H$  называют «эрстед», единицу измерения  $B$  — «гаусс», а для остальных величин особого названия не употребляют — ответ записывается как «ед. СГС».



По закону электромагнитной индукции, ЭДС, индуцируемая в обмотке  $N_2$  из-за наличия в торе переменного магнитного поля  $B$ , равна

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi_2}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt},$$

где  $\Phi_2 = N_2 B S$  — поток магнитного поля, пронизывающий обмотку  $N_2$ ,  $S$  — поперечное сечение тора.

Пренебрегая ЭДС самоиндукции катушки 2 и напряжением на конденсаторе, закон Ома для вторичной цепи можно записать как

$$\mathcal{E}_2 = I_2 R_2, \quad (9)$$

где  $I_2$  — ток через резистор  $R_2$ , откуда

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

Ток через конденсатор также равен  $I_2$ , а напряжение на нём равно  $U_C = q/C$ , где  $q = \int I_2 dt$  — его заряд. Окончательно получаем

$$U_y = U_C = \frac{1}{C} \int I_2 dt = \frac{1}{c} \frac{N_2 S}{R_2 C} B. \quad (10)$$

Выражая отсюда  $B$  и переходя к величинам в системе СИ, получим расчётную формулу:

$$B = 10^{-6} \frac{R_2 C}{N_2 S} U_y \quad [\text{гаусс}], \quad (11)$$

где  $R_2$  выражено в омах,  $C$  — в микрофарадах,  $U_y$  — в вольтах и  $S$  — в  $\text{см}^2$ .

Подав одновременно напряжения  $U_y$  и  $U_x$  на вертикальный и горизонтальный каналы осциллографа, получим на экране петлю гистерезиса  $B(H)$ .

## Б. Изучение гистерезиса сегнетоэлектриков

Схема измерений приведена на рис. 3. Она реализована таким образом, что в исследуемом образце (отмечен серым) создаётся переменное электрическое поле, напряженность которого в образце

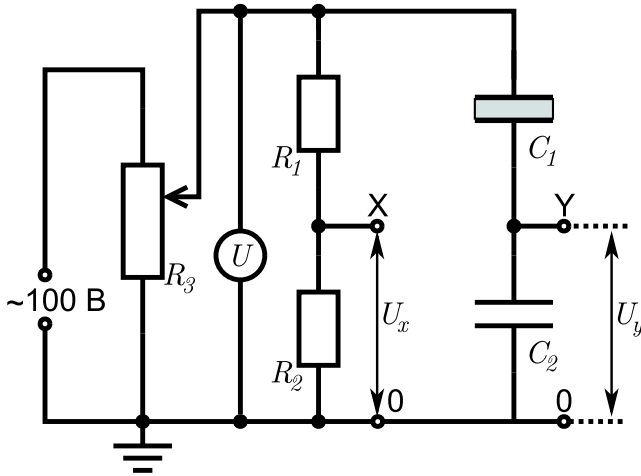


Рис. 3: Схема для измерения электрического поля в сегнетоэлектрике (модуль ФПЭ-02)

изменяется периодически от  $+E_m$  до  $-E_m$  с частотой сети  $\sim 50$  Гц. При этом на канал  $X$  осциллографа подаётся величина, пропорциональная  $E$ , а на канал  $Y$  — пропорциональная  $D$ , так что на его экране отображается петля гистерезиса  $D(E)$ , соответствующая амплитуде колебаний напряжённости  $E_m$ .

Рассмотрим подробнее устройство измерительной схемы. Исследуемый образец выполнен в виде пластины, помещённой в конденсатор с некоторой малой ёмкостью  $C_1$ .

**Измерение  $D$ .** Индукция электрического поля  $D$  в образце определяется зарядом  $q$  на пластинах конденсатора  $C_1$ :

$$D = \frac{4\pi q}{S_1},$$

где  $S_1$  — площадь пластин.

На канал  $Y$  подаётся напряжение с конденсатора  $C_2$ , включённого последовательно с  $C_1$ . Заряды на конденсаторах в любой момент времени равны  $q_1 = q_2 = q$ , поэтому

$$U_y = \frac{q}{C_2} = \frac{S_1}{h_1 C_2} \frac{D}{4\pi},$$

Откуда получаем практическую формулу для вычисления  $D$ :

$$D = 12\pi \cdot 10^3 \frac{h_1 C_2}{S_1} U_y \quad [\text{ед. СГС}], \quad (12)$$

где  $U$  выражено в вольтах, а  $C$  — в микрофарадах, а геометрические размеры — в сантиметрах.

**Измерение Е.** Напряжённость поля  $E$  в конденсаторе  $C_1$  может быть определена как

$$E = \frac{U_{C_1}}{h_1},$$

где  $U_{C_1}$  — разность потенциалов между пластинами конденсатора,  $h_1$  — расстояние между ними.

Согласно схеме подключения, на канал  $X$  подаётся напряжение, равное

$$U_x = I_2 R_2 = \frac{U}{R_1 + R_2} R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (U_{C_1} + U_{C_2}),$$

где  $U = U_{C_1} + U_{C_2}$  — суммарное напряжение на конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$ , Параметры схемы таковы, что  $C_1 \ll C_2$ , поэтому  $\frac{U_{C_1}}{U_{C_2}} = \frac{C_2}{C_1} \gg 1$ , и

$$U = U_{C_1} + U_{C_2} \approx U_{C_1}.$$

Тогда имеем

$$E \approx \frac{R_1 + R_2}{R_2} \frac{U_x}{h_1} \approx \frac{U}{h_1}, \quad (13)$$

Учтём, что вольтметр показывает «действующее» напряжение в цепи  $V$ , которое, как известно,  $\sqrt{2}$  раз меньше амплитуды. Запишем расчётную формулу в следующем виде:

$$E = \frac{1}{300} \frac{R_1 + R_2}{R_2} \frac{U_x}{h_1} = \frac{\sqrt{2}}{300} \frac{V}{h_1} \quad [\text{ед. СГС}], \quad (14)$$

где  $V$  — показания вольтметра, выраженные в вольтах,  $h_1$  выражено в см.

## Задание

1. Ознакомьтесь с устройством звукового генератора и осциллографа. Для этого установите на генераторе некоторое значение частоты и амплитуды выходного сигнала и подключите звуковой генератор к каналу  $Y$  осциллографа. Получите на экране осциллографа устойчивую картину и измерьте с его помощью частоту и амплитуду сигнала со звукового генератора.

### А. Изучение гистерезиса ферромагнитных материалов

2. Отключите приборы от сети и соедините их в соответствии со схемой экспериментальной установки.
3. Установите звуковой генератор в режим генерации синусоидальных колебаний на частоте  $\nu = 2$  кГц. Амплитуду выходного сигнала установите в среднее положение. Включите его в сеть.
4. Включите осциллограф и подготовьте его к работе.
5. Выставьте нули на каналах осциллографа. Для этого выведите на экран положение нуля каналов  $X$  (CH1) и  $Y$  (CH2), установив переключатель входа в положение GND, и ручками регулятора уровня  $\blacktriangle/\blacktriangledown$  каждого канала совместите нулевой сигнал со средней горизонтальной линией на экране. После этого установите переключатели входа в положение DC (открытый вход).
6. Получите на экране осциллографа изображения сигналов на каналах  $X$  (CH1) и  $Y$  (CH2). Наблюдайте как они изменяются при изменении амплитуды сигнала с генератора. С помощью осциллографа уточните частоту сигнала звукового генератора.
7. Отключите развёртку осциллографа, переведя его в режим построения зависимости  $U_y$  от  $U_x$  («X-Y» на ручке регулирования периода развертки). Ручкой смещения сигнала по оси  $X$   $\blacktriangleleft / \blacktriangleright$  установите получившуюся картину в центр экрана.
8. Установите наибольшее напряжение на генераторе, и получите на экране осциллографа максимальную петлю гистерезиса. Установите переключатели масштабов по осям  $X$  и  $Y$  так, чтобы петля

занимала не менее половины экрана, не выходя за его пределы. Запишите коэффициенты масштаба по осям  $K_x$  и  $K_y$  [Вольт/дел] (убедитесь, что серая ручка плавной регулировки масштаба повернута до упора вправо в положение cal).

Зарисуйте полученную петлю на кальку (или сфотографируйте её).

9. Для максимальной петли измерьте координаты а) вершин петли  $\pm x_m, \pm y_m$ , б) координаты  $\pm x_n, \pm y_n$  точек, в которых образец выходит на насыщение, в) координату  $y_r$  точки пересечения кривой с осью  $Y$ , соответствующей остаточному значению магнитного поля  $B_r$ . г) координату  $-x_c$  точки пересечения кривой с осью  $X$ , соответствующей значению напряжённости  $H_c$ , необходимой для размагничивания образца.
10. Уменьшая амплитуды сигнала генератора от максимального до минимального, измерьте координаты вершин соответствующих петель  $\pm x_m, \pm y_m$  (не менее 8 петель). По мере уменьшения входного напряжения подбирайте (и записывайте) множители  $K_x$  и  $K_y$  так, чтобы значения  $x_m$  и  $y_m$  составляли несколько делений.

## Параметры установки

Число витков первичной обмотки трансформатора  $T$   $N_1 = 100$ , вторичной  $N_2 = 200$ . Сопротивления резисторов  $R_1 = 51 \text{ Ом} \pm 5\%$ ,  $R_2 = 4,3 \text{ кОм} \pm 5\%$ . Ёмкость конденсатора  $C = 0,22 \text{ мкФ} \pm 20\%$ . Геометрические размеры тороидального сердечника: толщина  $d = 5 \text{ мм}$ , внешний радиус  $r_1 = 18 \text{ мм}$ , внутренний радиус  $r_2 = 9 \text{ мм}$ .

## Б. Изучение гистерезиса сегнетозлектриков

11. Отключите приборы от сети и соедините их в соответствии со схемой экспериментальной установки.
12. Включите вольтметр и установите его в режим измерения переменного тока (АС). Установите ручку регулятора напряжения  $U$  в среднее положение ( $\sim 50 \text{ В}$ ) и включите измерительный модуль.

13. Включите осциллограф и подготовьте его к работе.
  14. Выставьте нули на каналах осциллографа. Для этого выведите на экран положение нуля каналов  $X$  (CH1) и  $Y$  (CH2), установив переключатель входа в положение GND, и ручками регулятора уровня  $\blacktriangle/\blacktriangledown$  каждого канала совместите нулевой сигнал со средней горизонтальной линией на экране. После этого установите переключатели входа в положение DC (открытый вход).<sup>6</sup>
  15. Получите на экране осциллографа изображения сигналов на каналах  $X$  и  $Y$ . При этом на канал  $X$  осциллографа подаётся величина, пропорциональная  $E$ , а на канал  $Y$  — пропорциональная  $D$  в сегнетоэлектрическом образце. Наблюдайте как они изменяются при изменении амплитуды сигнала с генератора.
  16. Отключите развёртку осциллографа, переведя его в режим построения зависимости  $U_y$  от  $U_x$  («X-Y» на ручке регулирования периода развертки). Ручкой смещения сигнала по оси  $X$   $\blacktriangleleft / \blacktriangleright$  установите получившуюся картину в центр экрана.
  17. Установите наибольшее напряжение на генераторе, и получите на экране осциллографа максимальную петлю гистерезиса. Установите переключатели масштабов по осям  $X$  и  $Y$  так, чтобы петля занимала не менее половины экрана, не выходя за его пределы. Запишите коэффициенты масштаба по осям  $K_x$  и  $K_y$  [Вольт/дел] (убедитесь, что серая ручка плавной регулировки масштаба повернута до упора вправо в положение cal).
- Зарисуйте полученную петлю на кальку (или сфотографируйте её).
18. Для максимальной петли измерьте координаты а) вершин петли  $\pm x_m, \pm y_m$ , б) координаты  $\pm x_n, \pm y_n$  точек, в которых образец выходит на насыщение, в) координату  $y_r$  точки пересечения кривой с осью  $Y$ , соответствующей остаточному значению электрической

---

<sup>6</sup>Конденсатор, блокирующий постоянную составляющую на входе АС (закрытый вход), при низкой рабочей частоте (50 Гц) создаёт значительную разность фаз между каналами  $X$  и  $Y$ , что приводит к сильному искажению картинки на экране.

индукции  $D_r$ . г) координату  $-x_c$  точки пересечения кривой с осью  $X$ , соответствующие значению электрического поля  $E_c$ , необходимого для снятия остаточной индукции.

19. Уменьшайте напряжение до тех пор, пока образец не перестанет попадать в состояние с насыщением — то есть, пока площадь петли на экране не начнёт уменьшаться. Запишите полученное напряжение и измерьте координаты вершин  $x_m, y_m$  (они должны примерно совпасть с  $x_n$  и  $y_n$  из предыдущего пункта).
20. Уменьшая далее значение напряжения  $U$  до минимального, измерьте координаты вершин соответствующих петель  $\pm x_m, \pm y_m$  (не менее 10 петель) в зависимости от  $U$ . По мере уменьшения входного напряжения подбирайте (и записывайте) множители  $K_x$  и  $K_y$  так, чтобы значения  $x_m$  и  $y_m$  составляли несколько делений.

### Параметры установки

Толщина сегнетоэлектрической пластины  $h_1 = 1 \pm 0,1$  мм, её площадь  $S = 6,0$  мм  $\times$  3,5 мм. Ёмкость 2-го конденсатора  $C_2 = 0,047$  мкф  $\pm 10\%$ . Сопротивления резисторов  $R_1 = 470$  кОм  $\pm 5\%$ ,  $R_1 = 11$  кОм  $\pm 5\%$ .

### Обработка результатов измерений

#### А

1. По результатам измерения п. 9 определите величину остаточного поля  $B_r$  и коэрцитивное поле  $H_c$ .
2. По результатам измерения п. 10 постройте график зависимости  $B_m$  от  $H_m$  на фоне максимальной петли гистерезиса.
3. Для исходно ненамагниченного образца ( $H = M = 0$ ) постройте график зависимости намагниченности  $M$  от напряжённости  $H$  при нарастании  $H$  (или график зависимости магнитной проницаемости  $\mu = B/H$  от напряжённости  $H$ ).
4. Определите максимальную магнитную проницаемость исследуемого вещества  $\mu_{\max}$  и намагниченность  $M_n$  образца в состоянии насыщения.

## Б

5. По результатам измерения п. 18 определите величину остаточной индукции  $D_r$  и коэрцитивное поле  $E_c$ .
6. По результатам измерения п. 19–20 постройте график зависимости  $D_m$  от  $E_m$  на фоне максимальной петли гистерезиса.
7. Постройте график зависимости диэлектрической проницаемости  $\varepsilon = D/E$  от электрического поля  $E$  при нарастании  $E$  (или график зависимости поляризации  $P$  от  $E$ ).
8. Определите максимальное значение диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{\max}$  и поляризацию образца  $P_n$  в состоянии насыщения.

### Контрольные вопросы

1. Что такое электрический и магнитный диполи? Как определяются их дипольные моменты?
2. Что такое вектор поляризации  $\vec{P}$ ? Как устроено поляризованное вещество на молекулярном уровне?
3. Что такое вектор намагничённости  $\vec{M}$ ? Как устроено намагничённое вещество на молекулярном уровне?
4. Опишите способы измерения величин  $H$ ,  $B$ ,  $D$  и  $E$ .
5. Что представляет собой состояние насыщения ферромагнетика/сегнетоэлектрика? Что такое остаточная индукция и коэрцитивное поле?
6. Чем определяются наклоны кривых  $B(H)$  и  $E(D)$  после прохождения точки насыщения  $A$  при  $H > H_n$  и  $D > D_n$ ? («хвосты» петли гистерезиса на рис. 1)
7. Исходя из теоремы о циркуляции для магнитного поля, получите формулу (6) напряжённости магнитного поля внутри длинного соленоида.
8. Как можно размагнитить (довести до точки  $O$  рис. 1) исходно намагничённый кусок железа?
9. \*Как рассчитать работу, которую необходимо совершить, чтобы перемагнитить образец по предельному циклу ( $A \rightarrow A' \rightarrow A$  на рис. 1)? На что идет эта работа?