

Группа М3213

К работе допущен _____

Студент Губанов Константин

Работа выполнена _____

Преподаватель Хуснутдинова Наира
Рустемовна

Отчет принят _____

Рабочий протокол и отчет по лабораторной работе №3.06

Изучение электрических свойств сегнетоэлектриков

Цель работы:

Изучение электрических свойств сегнетоэлектриков, включая:

- Определение параметров петли гистерезиса: электрического смещения насыщения D_s , остаточной поляризации P_r , коэрцитивной силы E_c .
- Расчёт диэлектрических потерь за цикл переполяризации сегнетоэлектрика.
- Анализ зависимостей электрического смещения D и диэлектрической проницаемости ϵ от напряженности электрического поля E .
- Определение начальной и максимальной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика.

Задачи, решаемые при выполнении работы:

- Построение и исследование предельной петли гистерезиса сегнетоэлектрика.
- Измерение электрического смещения D при различных значениях напряженности электрического поля E .
- Вычисление параметров D_s , P_r , E_c и диэлектрических потерь.
- Построение графиков зависимости $D(E)$ и $\epsilon(E)$.
- Оценка начальной и максимальной диэлектрической проницаемости.

Объект исследования: Сегнетоэлектрический конденсатор (вариконд) модели ВК2-4, установленный в термокамере стенда СЗ-РМ02.

Метод экспериментального исследования: Исследование электрических характеристик сегнетоэлектрика с использованием лабораторной установки, включающей:

- Измеритель статических характеристик «ИСХ1» для построения петли гистерезиса.
- Анализ петли гистерезиса в координатах D и E .
- Обработка данных с использованием формул, включающих параметры установки и измеренные значения.

Параметры установки:

R1	47	кОм
R2	470	кОм
C1	1	мкФ
C2	0,01	мкФ
S	500	мм
d	0,5	мм

Результаты измерений:

Y_s	D_s	2,3
X_s	E_s	2,8
Y_r	D_r	0,8
X_c	E_c	0,5

U, В	Kx(input 1)	Ky(input 2)	X, дел	Y, дел
------	-------------	-------------	--------	--------

17	5	5	28	23
15	5	5	24	21
13	5	5	22	18
11	5	5	18	16
9	5	5	15	12
7	5	5	12	8
5	5	5	9	5
4,4	2	2	18	8
3,8	2	2	16	7
3,2	2	2	13	5
2,6	2	2	10	4
2,0	1	1	17	5
1,4	1	1	11	3
0,8	0,5	0,5	13	4
0,2	0,1	0,1	16	4

Рабочие формулы:

$$P_r = D_r - \varepsilon_0$$

$$E_r = D_r$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\pi} \frac{\oint D dE}{D_s E_s}$$

$$D = \frac{C_1}{S} \cdot U_{C_1} = \frac{C_1}{S} \cdot K_y Y$$

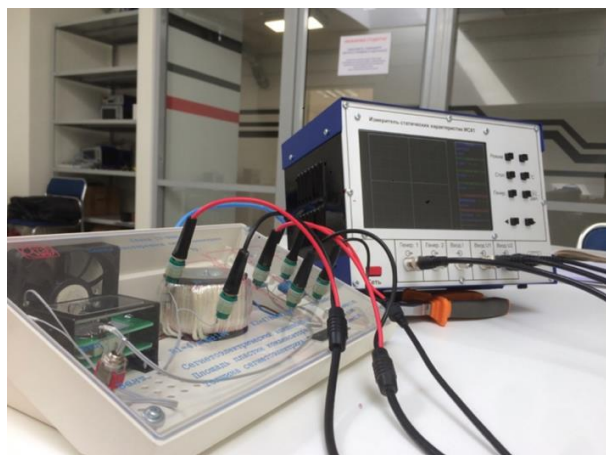
$$E = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{U_{R_1}}{d} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{K_x X}{d}$$

$$\varepsilon = \frac{D}{\varepsilon_0 E}$$

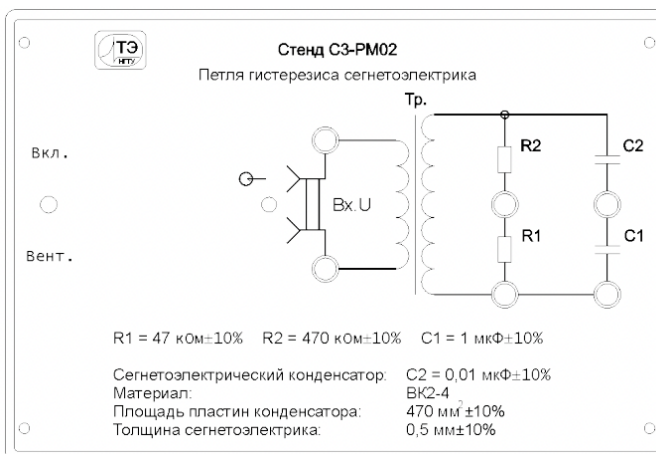
Измерительные приборы:

№	Наименование	Предел измерений	Цена деления	Погрешность прибора
1	ИСХ1 (измеритель статических характеристик)	-4 - 4 дел	0,1 дел	0,05 дел

Схема установки:



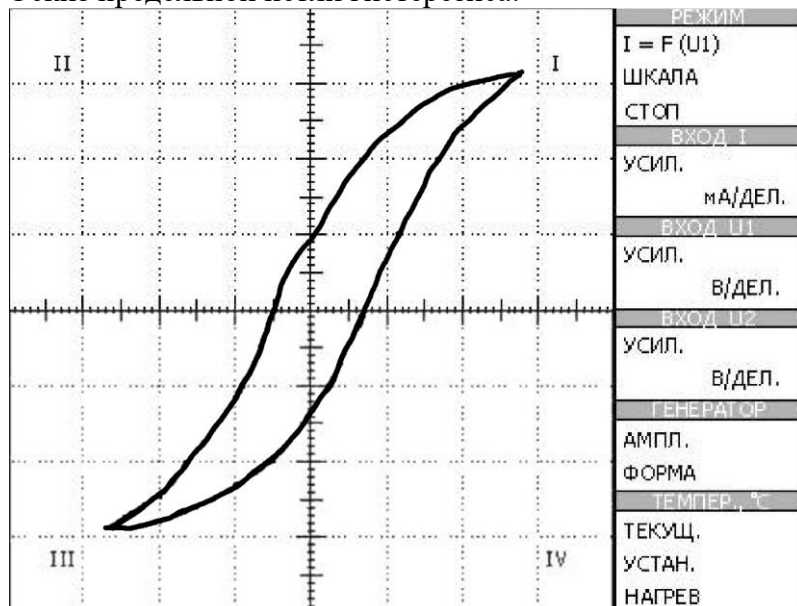
Общий вид лабораторной установки



Принципиальная схема установки

Результаты прямых измерений и их обработки:

Эскиз предельной петли гистерезиса:



$$D_s \rightarrow 2,3 \text{ дел} = Y_s, \quad E_s \rightarrow 2,8 \text{ дел} = X_s, \quad D_r \rightarrow 0,8 \text{ дел} = Y_r, \quad E_c \rightarrow 0,5 \text{ дел} = X_c$$

Расчёт результатов косвенных измерений:

Коэрцитивное поле:

$$E_c = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{K_x X_c}{d} = \frac{47 + 470}{47} * \frac{5 \cdot 0.5}{0.5 \cdot 10^{-3}} = 55 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$$

Электрическая индукция в состоянии насыщения:

$$D_s = \frac{C_1}{S} \cdot K_y Y_s = \frac{0.000001}{0.0005} * 5 * 2.3 = 0.023 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$$

Остаточная поляризация:

$$P_r = \frac{C_1}{S} \cdot K_y Y_r = \frac{0.000001}{0.0005} * 5 * 0.8 = 0.008 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$$

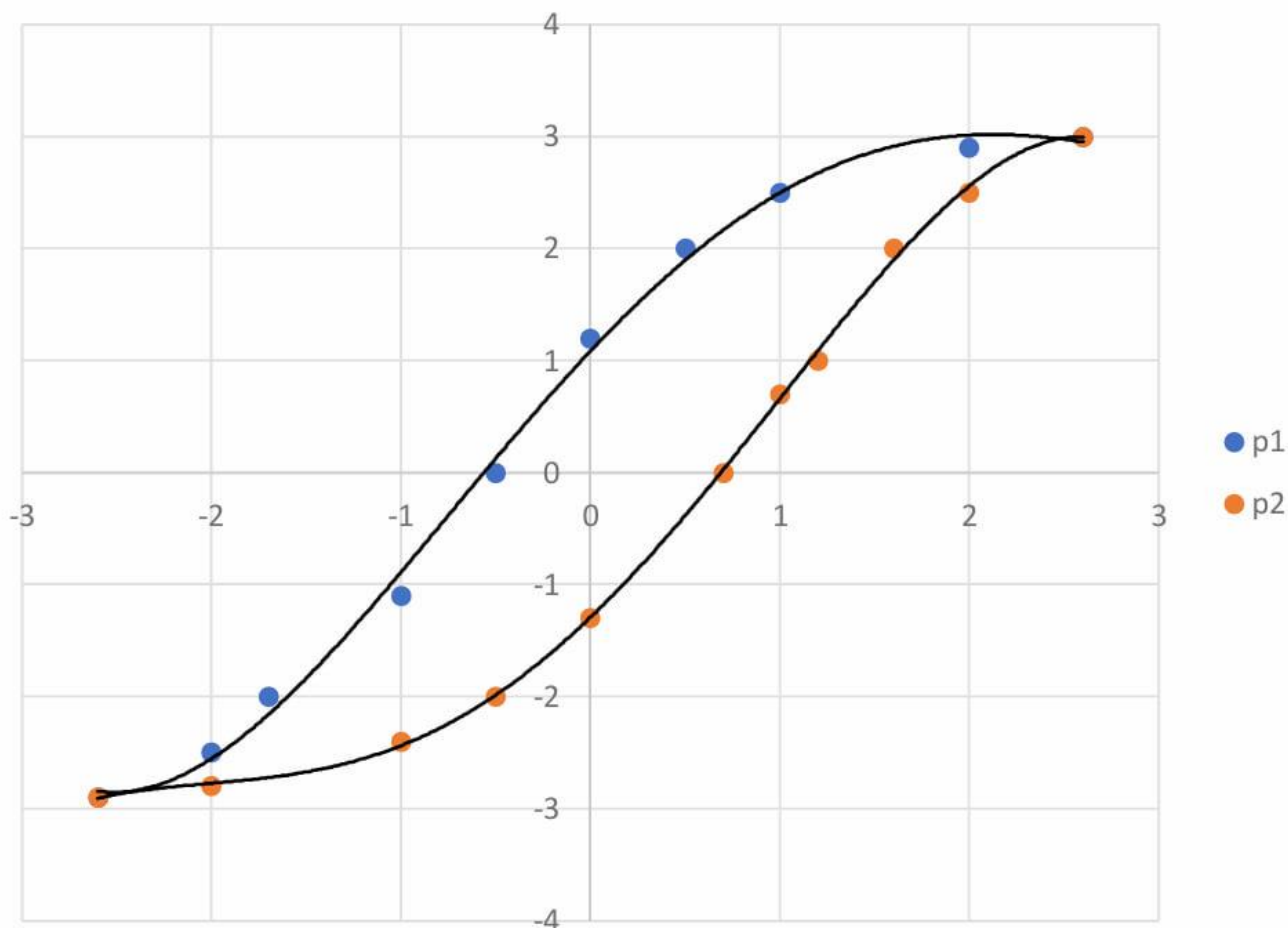
Выберем множество точек на петле гистерезиса, и сделаем полиномиальную регрессию 4-й степени для верхней и нижней половины:

Для верхней половины $p_1(x)$:

$$p_1(x) = 0.0182x^4 - 0.0854x^3 - 0.2781x^2 + 1.7526x + 1.1023$$

Для нижней половины $p_2(x)$:

$$p_2(x) = -0.0287x^4 - 0.0634x^3 + 0.4242x^2 + 1.6123x - 1.3152$$



Тогда площадь предельной петли гистерезиса в делениях шкалы экрана будет примерно равна:

$$S_0 = \oint Y dX \approx \int_{-2.8}^{2.8} p_1(x) dx - \int_{-2.8}^{2.8} p_2(x) dx = 3.45 + 3.19 = 6.64 \text{ дел}^2$$

Найдём тангенс угла диэлектрических потерь в сегнетоэлектрике:

$$\begin{aligned} \oint D dE &= \oint (C_1 S \cdot K_y Y) d \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot K_x X d \right) = C_1 S \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot K_x K_y d \oint Y dX \\ &= C_1 S \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot K_x K_y d \cdot S_0 \end{aligned}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\pi} \frac{\oint D dE}{D_s E_s} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{6.64}{2.3 \cdot 2.8} = \frac{6.64}{\pi \cdot 6.44} = \frac{6.64}{3.14159 \cdot 6.44} \approx \frac{6.64}{20.24} \approx 0.328$$

Для экстраполяции полученной зависимости $\varepsilon = \varepsilon(E)$ к нулевому значению напряжённости электрического поля я использовал полиномиальную регрессию 6-й степени, из которой следует, что $\varepsilon_{\text{нач}} = 3.38 \times 10^{-3} \text{ Ф/м}$.

Максимальное значение диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{макс}} = 0.29 \text{ Ф/м}$. Этому значению диэлектрической проницаемости соответствует $E = 34 \text{ кВ/м}$.

Расчёт погрешности измерений:

Погрешность напряжённости электрического поля (и коэрцитивного поля):

$$E = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{K_x X}{d}, \quad \frac{\partial E}{\partial X} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{K_x}{d}, \quad \frac{\partial E}{\partial R_1} = -\frac{R_2 K_x X}{R_1^2 d}, \quad \frac{\partial E}{\partial R_2} = \frac{K_x X}{R_1 d}$$

$$\frac{\partial E}{\partial d} = -\frac{(R_1 + R_2) K_x X}{R_1 d^2}, \quad \Delta E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial X} \cdot \frac{2}{3} \Delta X\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial R_1} \Delta R_1\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial R_2} \Delta R_2\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial d} \Delta d\right)^2}$$

$$\Rightarrow \Delta E = \sqrt{\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{K_x}{d} \cdot \frac{2}{3} \Delta X\right)^2 + \left(-\frac{R_2 K_x X}{R_1^2 d} \Delta R_1\right)^2 + \left(\frac{K_x X}{R_1 d} \Delta R_2\right)^2 + \left(-\frac{(R_1 + R_2) K_x X}{R_1 d^2} \Delta d\right)^2} =$$

$$= \frac{K_x X}{R_1 d} \sqrt{\left(\frac{2}{3} \frac{R_1 + R_2}{X} \Delta X\right)^2 + \left(\frac{R_2}{R_1} \Delta R_1\right)^2 + \Delta R_2^2 + \left(\frac{R_1 + R_2}{d} \Delta d\right)^2}$$

$$\Rightarrow \Delta E_c = 26.03 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$$

Погрешность электрической индукции (а также индукции в состоянии насыщения и остаточной поляризации):

$$D = \frac{C_1}{S} \cdot K_y Y, \quad \frac{\partial D}{\partial Y} = \frac{C_1}{S} \cdot K_y, \quad \frac{\partial D}{\partial C_1} = \frac{K_y Y}{S}, \quad \frac{\partial D}{\partial S} = -\frac{C_1}{S^2} \cdot K_y Y$$

$$\Delta D = \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial Y} \cdot \frac{2}{3} \Delta Y\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial C_1} \Delta C_1\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial S} \Delta S\right)^2}$$

$$\Rightarrow \Delta D = \sqrt{\left(\frac{C_1}{S} \cdot K_y \cdot \frac{2}{3} \Delta Y\right)^2 + \left(\frac{K_y Y}{S} \Delta C_1\right)^2 + \left(-\frac{C_1}{S^2} \cdot K_y Y \Delta S\right)^2} =$$

$$= \frac{K_y Y C_1}{S} \sqrt{\left(\frac{2 \Delta Y}{3 Y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_1}{C_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2}$$

$$\Rightarrow \Delta D_s = 0.007418 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}, \quad \Delta P_r = 0.006762 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$$

Погрешность диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon = \frac{D}{\varepsilon_0 E}, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial E} = -\frac{D}{\varepsilon_0 E^2}, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial D} = \frac{1}{\varepsilon_0 E}, \quad \Delta \varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial E} \Delta E\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial D} \Delta D\right)^2}$$

$$\Rightarrow \Delta \varepsilon = \sqrt{\left(-\frac{D}{\varepsilon_0 E^2} \Delta E\right)^2 + \left(\frac{1}{\varepsilon_0 E} \Delta D\right)^2} = \frac{1}{\varepsilon_0 E} \sqrt{\frac{D^2}{E^2} \Delta E^2 + \Delta D^2}$$

Погрешность тангенса угла диэлектрических потерь в сегнетоэлектрике:

$$\text{tg } \delta = \frac{1}{\pi} \frac{D d E}{D_s E_s} = \frac{C_1 (R_1 + R_2) K_x K_y S_0}{S R_1 d D_s E_s \pi} = T$$

$$\frac{\partial T}{\partial D_s} = -\frac{C_1 (R_1 + R_2) K_x K_y S_0}{S R_1 d D_s^2 E_s \pi}, \quad \frac{\partial T}{\partial E_s} = -\frac{C_1 (R_1 + R_2) K_x K_y S_0}{S R_1 d D_s E_s^2 \pi},$$

$$\frac{\partial T}{\partial S} = -\frac{C_1 (R_1 + R_2) K_x K_y S_0}{S^2 R_1 d D_s E_s \pi}, \quad \frac{\partial T}{\partial R_1} = -\frac{C_1 R_2 K_x K_y S_0}{S R_1^2 d D_s E_s \pi}, \quad \frac{\partial T}{\partial R_2} = \frac{C_1 K_x K_y S_0}{S R_1 d D_s^2 E_s \pi}$$

$$\frac{\partial T}{\partial C_1} = \frac{(R_1 + R_2) K_x K_y S_0}{S R_1 d D_s^2 E_s \pi}, \quad \frac{\partial T}{\partial S_0} = \frac{C_1 (R_1 + R_2) K_x K_y}{S R_1 d D_s^2 E_s \pi}$$

$$\sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial D_s} \Delta D_s\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial E_s} \Delta E_s\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial S} \Delta S\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial R_1} \Delta R_1\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial R_2} \Delta R_2\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial C_1} \Delta C_1\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial S_0} \Delta S_0\right)^2}$$

$$\Rightarrow \Delta T = 36,249$$

Погрешности начальной и максимальной диэлектрических проницаемостей:

$$\Delta \varepsilon_{\text{нач}} = 15922, \quad \Delta \varepsilon_{\text{макс}} = 8635237$$

Графики:

График зависимости $D = D(E)$

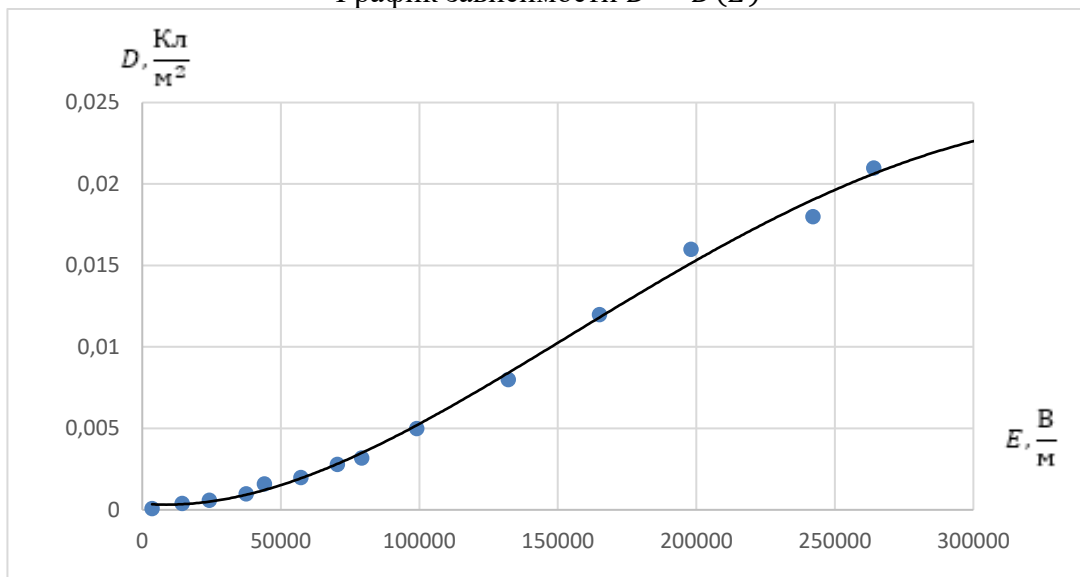
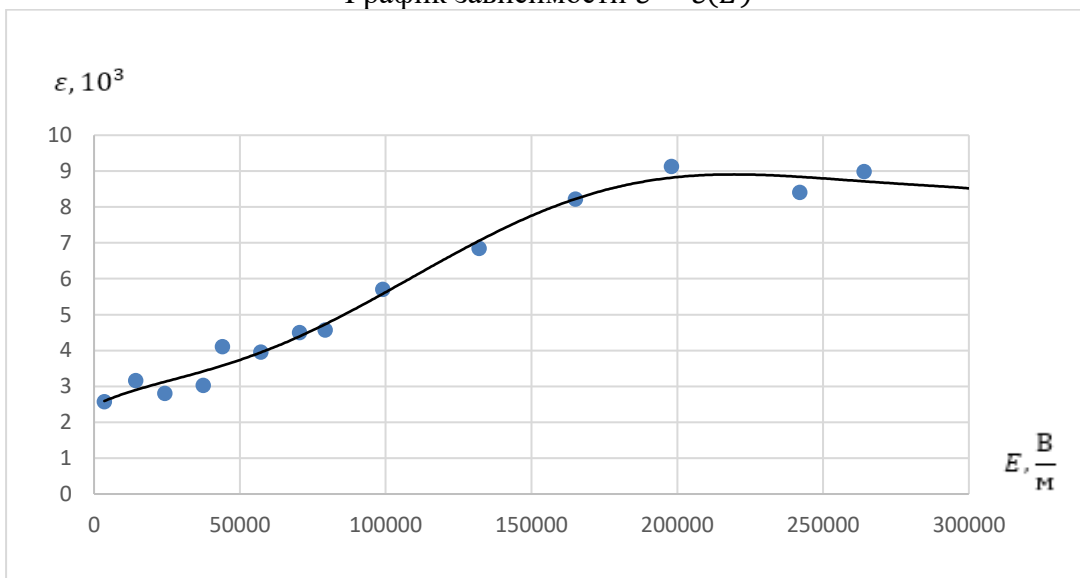


График зависимости $\epsilon = \epsilon(E)$



Окончательные результаты:

$$E_c = 55 \text{ кВ/м}$$

$$D_s = 0.023 \text{ Кл/м}^2$$

$$P_r = 0.008 \text{ Кл/м}^2$$

$$\tan \delta = 0.328$$

$$\epsilon_{\text{нач}} = 3.38 \cdot 10^{-3} \text{ Ф/м}$$

$$\epsilon_{\text{макс}} = 0.29 \text{ Ф/м}$$

Выводы и анализ результатов работы:

В ходе работы изучены электрические свойства сегнетоэлектриков. Получены параметры предельной петли гистерезиса (D_s, P_r, E_c), рассчитаны диэлектрические потери, а также построены зависимости $D(E)$ и $\epsilon(E)$. Определены начальная и максимальная диэлектрическая проницаемость, что подтверждает характерные свойства сегнетоэлектриков и их применимость в электронных устройствах.

В сегнетоэлектриках электрическая индукция изменяется неоднородно по мере увеличения напряжённости поля. В начале процесса наблюдается плавный рост, который затем становится более интенсивным, пока не наступает стадия насыщения, где прирост замедляется.

Диэлектрическая проницаемость ведёт себя аналогично: она увеличивается с увеличением напряжённости, достигает максимального значения в определённой точке, после чего начинает постепенно снижаться. Такой характер зависимости отражает физическую природу сегнетоэлектриков, связанную с особенностями их доменной структуры и свойствами поляризации.