

УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР ОБЩЕЙ ФИЗИКИ ФТФ

---

Группа \_\_\_\_\_ Р3110

К работе допущен \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_ Цыпандин Николай Петрович

Работа выполнена \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_ Коробков Максим Петрович

Отчет принят \_\_\_\_\_

## Рабочий протокол и отчет по лабораторной работе № 3.06

### Изучение электрических свойств сегнетоэлектриков

#### Цель работы:

1. Определение значений электрического смещения насыщения  $D_s$ , остаточной поляризации  $P_r$ , коэрцитивной силы  $E_c$  для предельной петли гистерезиса сегнетоэлектрика.
2. Расчёт диэлектрических потерь за цикл переполяризации сегнетоэлектрика.
3. Получение зависимостей смещения  $D$  и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  от напряжённости электрического поля  $E$ .
4. Определение значений начальной и максимальной диэлектрической проницаемости.

#### Задачи, решаемые при выполнении работы:

1. Измерить и записать в протокол измерений в делениях шкалы экрана значения параметров  $D_s$ ,  $E_s$ ,  $D_r$  и  $E_c$ , которые соответствуют предельной петле гистерезиса.
2. Для значений напряжения в диапазоне 5 – 17 В с шагом в  $\Delta U = 2,0$  В и в диапазоне 0,4 – 5,0 В с шагом в  $\Delta U = 0,6$  В измерить и записать координаты  $X$  и  $Y$  правой вершины петель гистерезиса.
3. Рассчитать значения коэрцитивного поля  $E_c$ , электрической индукции в состоянии насыщения  $D_s$  и остаточной поляризации  $P_r$ . Оценить погрешность полученных результатов.
4. Найти площадь предельной петли гистерезиса в делениях шкалы экрана по сделанной фотографии или эскизу. По найденным ранее значениям  $E_s$  и  $D_s$  в делениях шкалы оценить значение тангенса угла диэлектрических потерь.
5. С помощью записанных в Таблице 1 значений коэффициентов усиления  $K_x$  и  $K_y$  заполнить колонки  $E$  и  $D$ , рассчитав значения напряжённости электрического поля и электрической индукции. Построить график зависимости  $D = D(E)$ , отражающий ход основной кривой поляризации.
6. Найти значения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика для всех значений напряжённости электрического поля. Построить график зависимости  $\varepsilon = \varepsilon(E)$ .

7. С помощью экстраполяции полученной зависимости к нулевому значению напряжённости электрического поля найти значение начальной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{\text{нач}}$ . Оценить величину его погрешности.
8. На графике  $\varepsilon = \varepsilon(E)$  найти максимальное значение диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{\text{макс}}$ . Оценить величину его погрешности. Определить напряжённость  $E$ , которой соответствует  $\varepsilon_{\text{макс}}$ .

**Объект исследования:** сегнетоэлектрик.

**Метод экспериментального исследования:** прямые и косвенные измерения.

**Рабочие формулы:**

$$P_r = D_r - \varepsilon_0 E_r = D_r$$

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

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

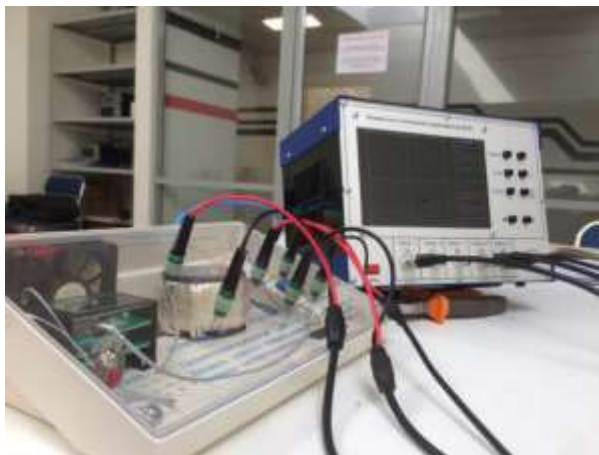
$$E = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{U_{R_1}}{d} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{K_x X}{d}$$

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

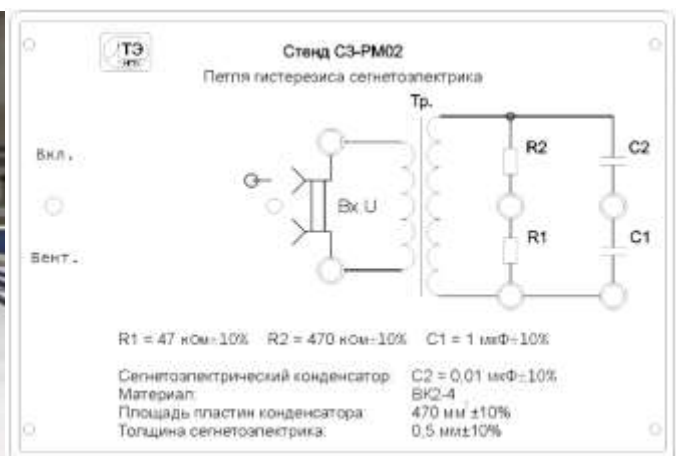
**Измерительные приборы:**

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

**Схема установки:**



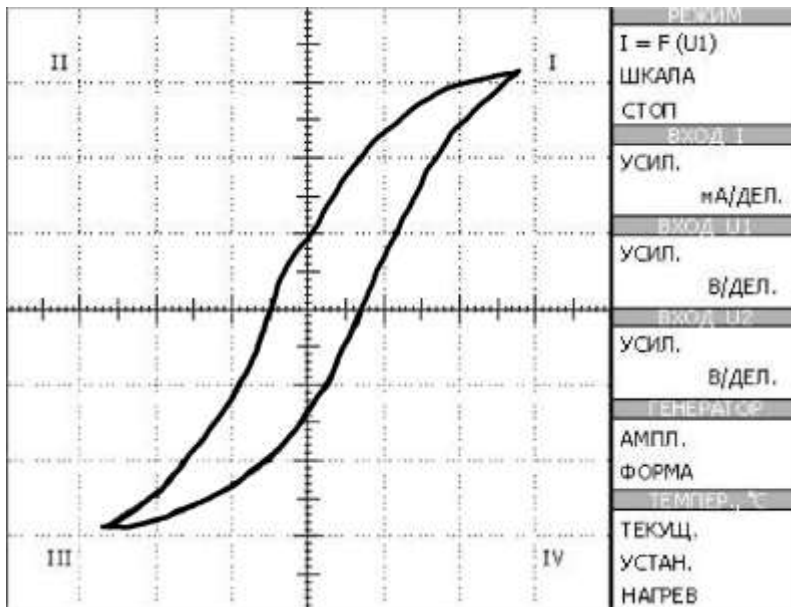
Общий вид лабораторной установки



Принципиальная схема установки

## Результаты прямых измерений и их обработки:

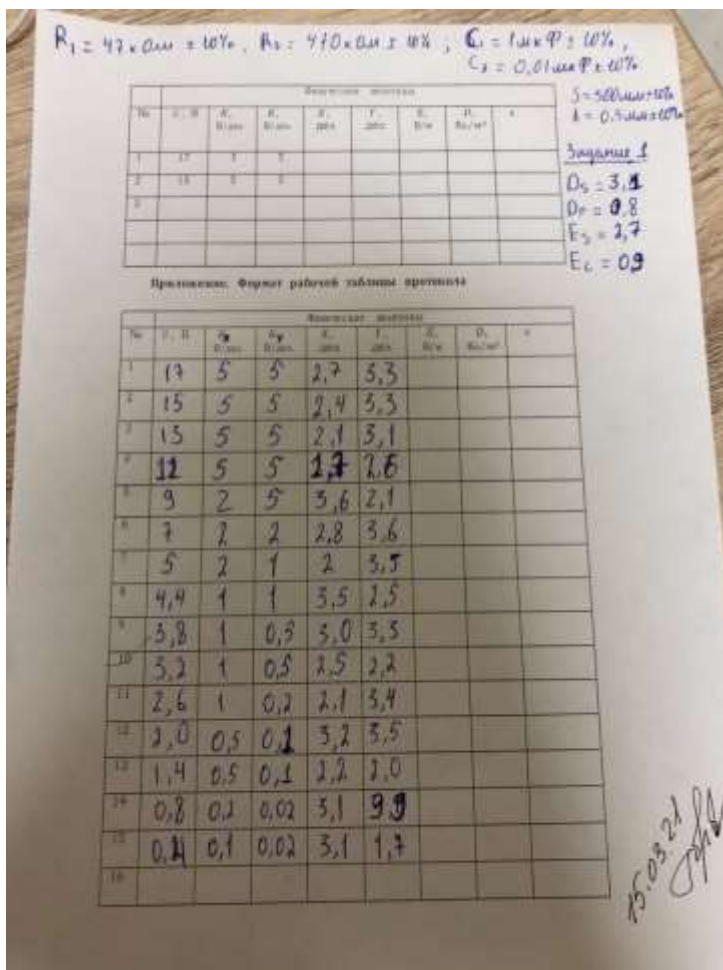
Эскиз предельной петли гистерезиса:



$$D_s \rightarrow 3,1 \text{ дел} = Y_s, \quad E_s \rightarrow 2,7 \text{ дел} = X_s, \quad D_r \rightarrow 0,8 \text{ дел} = Y_r, \quad E_c \rightarrow 0,7 \text{ дел} = X_c$$

Измерения проводились:

Понедельник 15 Март 2021 16:00 – 16:50



## Расчёт результатов косвенных измерений:

Коэрцитивное поле:

$$E_c = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{K_x X_c}{d} = \frac{47 + 470}{47} * \frac{5 * 0.9}{0.5} = 99 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$$

Электрическая индукция в состоянии насыщения:

$$D_s = \frac{C_1}{S} \cdot K_y Y_s = \frac{0.000001}{0.0005} * 5 * 3.1 * 10^3 = 31 \frac{\text{мКл}}{\text{м}^2}$$

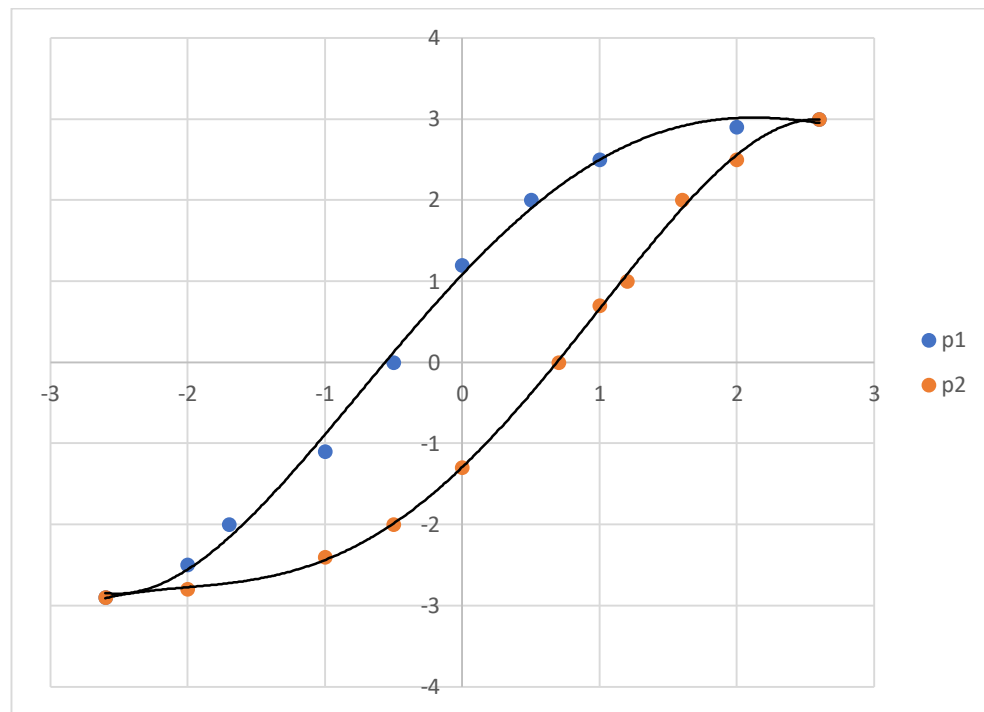
Остаточная поляризация:

$$P_r = \frac{C_1}{S} \cdot K_y Y_r = \frac{0.000001}{0.0005} * 5 * 0.8 * 10^3 = 8 \frac{\text{мКл}}{\text{м}^2}$$

Я выбрал множество точек на петле гистерезиса, и сделал полиномиальную регрессию 4-й степени для верхней и нижней половины:

$$p_1(x) = 0,0231x^4 - 0,1011x^3 - 0,3001x^2 + 1,7726x + 1,1023$$

$$p_2(x) = -0,0349x^4 - 0,0696x^3 + 0,4421x^2 + 1,6343x - 1,3152$$



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

$$S_0 = \oint Y dX \approx \int_{-2,7}^{2,7} p_1(x) dx - \int_{-2,7}^{2,7} p_2(x) dx = 3.34 + 3.30 = 6,64 \text{ дел}^2$$

Найдём тангенс угла диэлектрических потерь в сегнетоэлектрике:

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

$$\Rightarrow \operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\pi} \frac{\oint D dE}{D_s E_s} = \frac{C_1 (R_1 + R_2) K_x K_y S_0}{S R_1 d D_s E_s \pi} = 0,24$$

Для экстраполяции полученной зависимости  $\varepsilon = \varepsilon(E)$  к нулевому значению напряжённости электрического поля я использовал полиномиальную регрессию 6-й степени, из которой следует, что  $\varepsilon_{\text{нач}} = 0,91 \cdot 10^3$ .

Максимальное значение диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{\text{макс}} = 15,7 \cdot 10^3$ . Этому значению диэлектрической проницаемости соответствует  $E = 187 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ .

### Расчёт погрешности измерений:

Погрешность напряжённости электрического поля (и коэрцитивного поля):

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

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

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

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

$$\Rightarrow \Delta E_c = 17 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$$

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

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

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

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

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

$$\Rightarrow \Delta D_s = 4 \frac{\text{мКл}}{\text{м}^2}, \quad \Delta P_r = 1.1 \frac{\text{мКл}}{\text{м}^2}$$

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:

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

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

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

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

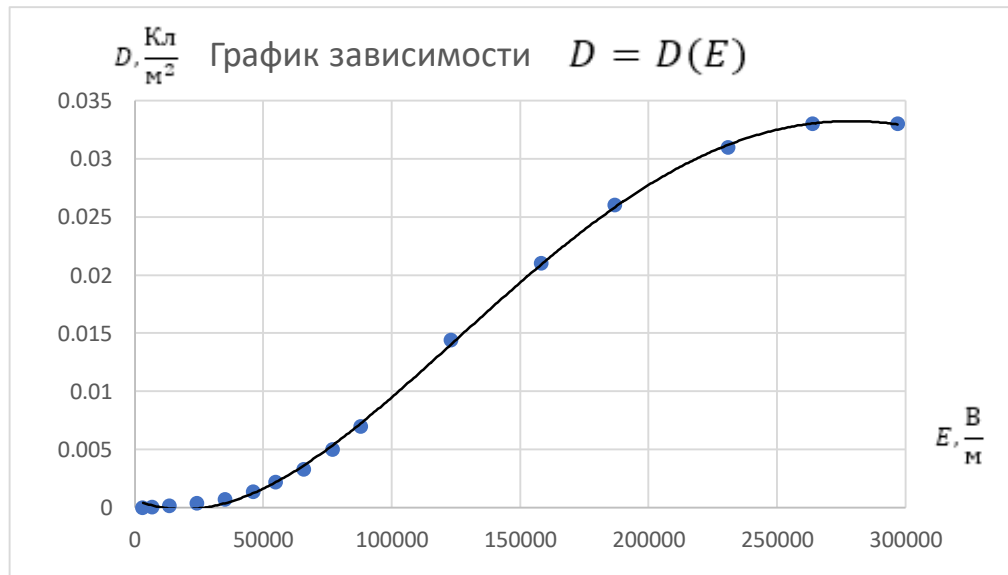
$$\sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial D_s} \Delta D_s\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial E_s} \Delta E_s\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial S} \Delta S\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial R_1} \Delta R_1\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial R_2} \Delta R_2\right)^2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

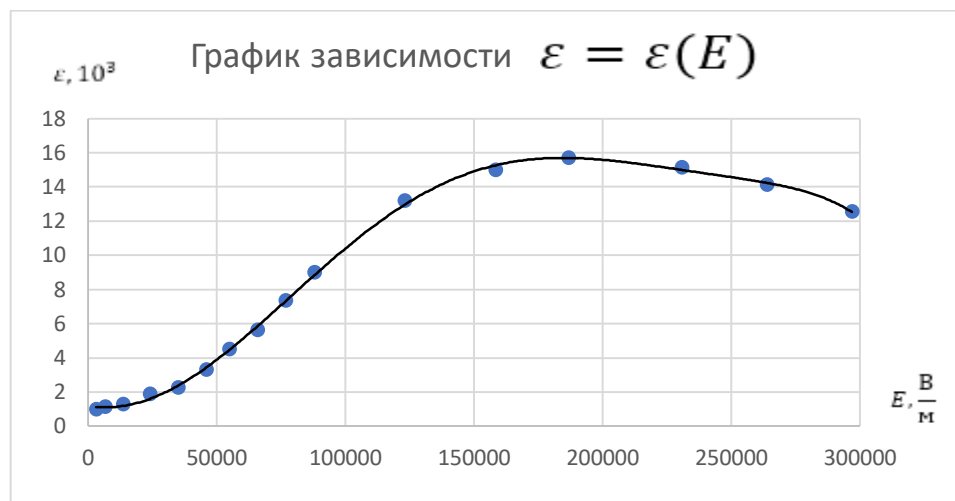
$$\Rightarrow \Delta T = 0,064$$

Погрешности начальной и максимальной диэлектрических проницаемостей:

$$\Delta \varepsilon_{\text{нач}} = 0,21 \cdot 10^3, \quad \Delta \varepsilon_{\text{макс}} = 2,9 \cdot 10^3$$

Графики:





### Окончательные результаты:

$$D_s = (31 \pm 4) \frac{\text{мКл}}{\text{м}^2}, \quad \varepsilon = 13\%$$

$$P_r = (8 \pm 1.1) \frac{\text{мКл}}{\text{м}^2}, \quad \varepsilon = 13,8\%$$

$$E_c = (99 \pm 17) \frac{\text{кВ}}{\text{м}}, \quad \varepsilon = 17,2\%$$

$$\text{tg } \delta = 0,24 \pm 0,06, \quad \varepsilon = 25,0\%$$

$$\varepsilon_{\text{нач}} = (0,91 \pm 0,21) \cdot 10^3, \quad \varepsilon = 23,1\%$$

$$\varepsilon_{\text{макс}} = (13,3 \pm 2,9) \cdot 10^3, \quad \varepsilon = 21,8\%$$

### Выводы и анализ результатов работы:

Зависимость электрической индукции (смещения) от напряжённости электрического поля в сегнетоэлектрике нелинейная: сначала функция медленно растёт, затем её рост ускоряется, а потом плавно начинает замедляться.

Диэлектрическая проницаемость так же зависит нелинейно от напряжённости – сначала с ростом напряжённости растёт и диэлектрическая проницаемость, но в какой-то момент она достигает своего максимального значения и далее медленно убывает.