

Группа Р3214

К работе допущен

Студент Силинцев Владислав

Работа выполнена

Преподаватель Хвастунов Н.Н.

Отчет принят

## **Рабочий протокол и отчет по лабораторной работе №03.06**

### **Изучение электрических свойств сегнетоэлектриков**

#### **1. Цель работы.**

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

#### **2. Задачи, решаемые при выполнении работы.**

- Вычислить значения коэрцитивного поля  $E_c$ , электрической индукции в состоянии насыщения  $D_s$  и остаточной поляризации  $P_r$ .
- Оценить погрешности вычисляемых величин.
- Построить графики зависимости электрического смещения и диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля на основе экспериментальных данных.
- Сравнить результаты с теоретическими знаниями.

### 3. Объект исследования.

Сегнетоэлектрический конденсатор (вариконд) ВК2-4.

### 4. Метод экспериментального исследования.

Исследование петли гистерезиса сегнетоэлектрика с помощью «ИСХ1».

### 5. Рабочие формулы и исходные данные.

- $R_1 = 47 \text{ кОм} \pm 10\%$  – номинал резистора 1.
- $R_2 = 470 \text{ кОм} \pm 10\%$  – номинал резистора 2.
- $C_1 = 1 \text{ мкФ} \pm 10\%$  – емкость эталонного конденсатора.
- $S = 500 \text{ мм}^2 \pm 10\%$  – площадь пластин конденсатора.
- $d = 0,5 \text{ мм} \pm 10\%$  – толщина сегнетоэлектрика.
- $E = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{U_{R_1}}{d}$  – напряженность электрического поля.
- $D = \frac{C_1}{S} \cdot U_{C_1}$  – модуль вектора электрической индукции.
- $\epsilon = \frac{D}{\epsilon_0 E}$  – диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика.
- $D = P + \epsilon_0 E$  – модуль вектора электрического смещения.
- $\tan \delta = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\int D dE}{D_s E_s}$  – тангенс угла диэлектрических потерь в сегнетоэлектриках.
- $\Delta_{E_c} = \sqrt{\left(\frac{\partial E_c}{\partial R_1} \Delta_{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_c}{\partial R_2} \Delta_{R_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_c}{\partial d} \Delta_d\right)^2}$ ,  $\epsilon_{E_c} = \frac{\Delta_{E_c}}{E_c} \cdot 100\%$  – абсолютная и относительная погрешности коэрцитивной силы соответственно.
- $\Delta_{D_s} = \sqrt{\left(\frac{\partial D_s}{\partial C_1} \Delta_{C_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_s}{\partial S} \Delta_S\right)^2}$ ,  $\epsilon_{D_s} = \frac{\Delta_{D_s}}{D_s} \cdot 100\%$  – абсолютная и относительная погрешности электрического смещения насыщения соответственно.

- $\Delta_{P_r} = \Delta_{D_r} = \sqrt{\left(\frac{\partial D_r}{\partial C_1} \Delta_{C_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_r}{\partial S} \Delta_S\right)^2}$ ,  $\varepsilon_{P_r} = \varepsilon_{D_s} = \frac{\Delta_{D_r}}{D_r} \cdot 100\%$  – абсолютная и относительная погрешности остаточной поляризации соответственно.
- $\Delta_\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial D} \Delta_D\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial E} \Delta_E\right)^2}$ ,  $\varepsilon_\varepsilon = \frac{\Delta_\varepsilon}{\varepsilon} \cdot 100\%$  – абсолютная и относительная погрешности диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика соответственно.

## 6. Измерительные приборы.

№ п/п	Наименование	Тип прибора	Используемый диапазон	Погрешность прибора
1	«ИСХ1»	ИСХ	Настраиваемый	Настраиваемая

## 7. Схема установки (перечень схем, которые составляют Приложение 1).

Схема 1: Измеритель статических характеристик ИСХ1.

Схема 2: Принципиальная электрическая схема установки.

## 8. Результаты прямых измерений и их обработки (таблицы, примеры расчетов).

Искомая величина	$K_x, B/\text{дел}$	$X, \text{дел}$	$U_{R_1}, B$	$E, \frac{B}{M}$
$E_s$	5	2,7	13,5	297000
$E_c$	5	0,6	3	66000

Искомая величина	$K_y, B/\text{дел}$	$Y, \text{дел}$	$U_{C_1}, B$	$D, \frac{Kл}{M^2}$
$D_s$	5	3	15	0,03
$D_r$	5	1.3	6,5	0,013

Примеры расчетов для первой строки:

$$U_{R_1} = 0,6 \cdot 5 = 3 B, U_{C_1} = 3 \cdot 5 = 15 B.$$

Используя формулы  $E = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{U_{R_1}}{d}$  и  $D = \frac{C_1}{S} \cdot U_{C_1}$  найдем значения  $E_s$ ,  $E_c$ ,  $D_s$  и  $D_r$ :

$$E_s = \frac{47 \cdot 10^3 + 470 \cdot 10^3}{47 \cdot 10^3} \cdot \frac{13,5}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 297000 \frac{B}{м},$$

$$E_c = \frac{47 \cdot 10^3 + 470 \cdot 10^3}{47 \cdot 10^3} \cdot \frac{3}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 66000 \frac{B}{м},$$

$$D_s = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{500 \cdot 10^{-6}} \cdot 15 = 0,03 \frac{Кл}{м^2},$$

$$D_r = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{500 \cdot 10^{-6}} \cdot 6,5 = 0,013 \frac{Кл}{м^2}.$$

Из  $D_r = P_r + \varepsilon_0 E_c$  следует, что  $P_r = D_r - \varepsilon_0 E_c$ .  $\varepsilon_0 E_c \ll D_r$ , тогда  $P_r \approx D_r$ .

Тогда, значение остаточной поляризации:  $P_r = D_r = 0,013 \frac{Кл}{м^2}$ .

	Физические величины							
№	$U, В$	$K_x, В/дел$	$K_y, В/дел$	$X, дел$	$Y, дел$	$E, В/м$	$D, Кл/м^2$	$\varepsilon$
1	17	5	5	2.7	3	297000	0,03	11413,57
2	15	5	5	2.5	2.8	275000	0,028	11504,88
3	13	5	5	2.3	2.6	253000	0,026	11612,07
4	11	5	5	1.7	2.1	187000	0,021	12689,21
5	9	5	5	1.4	1.7	154000	0,017	12473,4
6	7	5	5	1.1	1.2	121000	0,012	11206,05
7	5	2	2	2	1.5	88000	0,006	7704,16

Пример подсчёта:  $E = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{U_{R_1}}{d} = \frac{47 \cdot 10^3 + 470 \cdot 10^3}{47 \cdot 10^3} \cdot \frac{2,7 \cdot 5}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 297000 \frac{B}{м}.$

Пример подсчёта:  $D = \frac{C_1}{S} \cdot U_{C_1} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{500 \cdot 10^{-6}} \cdot 3 \cdot 5 = 0,03 \frac{Кл}{м^2}.$

9. Расчет результатов косвенных измерений (таблицы, примеры расчетов).

Пример подсчёта:  $\varepsilon = \frac{D}{\varepsilon_0 E} = \frac{0,03}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 297000} = 11413,57.$

Используя формулу  $\tan \delta = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\int D dE}{D_s E_s}$  найдем тангенс угла диэлектрических потерь:

$$\tan \delta = \frac{1}{3,14} \cdot \frac{5,5}{3 \cdot 2,7} \approx 0,216.$$

## 10. Расчет погрешностей измерений (для прямых и косвенных измерений).

Погрешности прямых измерений:

$$\Delta_{R_1} = 4,7 \text{ кОм}, \varepsilon_{R_1} = 10\%.$$

$$\Delta_{R_2} = 47 \text{ кОм}, \varepsilon_{R_2} = 10\%.$$

$$\Delta_{C_1} = 0,1 \text{ мкФ}, \varepsilon_{C_1} = 10\%.$$

$$\Delta_S = 50 \text{ мм}^2, \varepsilon_S = 10\%.$$

$$\Delta_d = 0,05 \text{ мм}, \varepsilon_d = 10\%.$$

Погрешности косвенных измерений:

$$\Delta_{E_c} = \sqrt{\left(\frac{-U_{R_1} R_2}{d R_1^2} \Delta_{R_1}\right)^2 + \left(\frac{U}{d R_1} \Delta_{R_2}\right)^2 + \left(\frac{-U_{R_1} (R_1 + R_2)}{R_1 d^2} \Delta_d\right)^2} = \sqrt{(-6000)^2 + (6000)^2 + (-6600)^2} \approx 10\,749,88 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

$$\varepsilon_{E_c} = \frac{10\,749,88}{66000} \cdot 100\% \approx 16,29\%.$$

$$\Delta_{D_s} = \sqrt{\left(\frac{U_{C_1}}{S} \Delta_{C_1}\right)^2 + \left(\frac{-C_1 U_{C_1}}{S^2} \Delta_S\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{15}{5000}\right)^2 + \left(\frac{-15}{5000}\right)^2} \approx 0,004243 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

$$\varepsilon_{D_s} = \frac{0,004243}{0,03} \cdot 100\% \approx 14,14\%.$$

$$\Delta_{P_r} = \sqrt{\left(\frac{U_{C_1}}{S} \Delta_{C_1}\right)^2 + \left(\frac{-C_1 U_{C_1}}{S^2} \Delta_S\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{6,5}{5000}\right)^2 + \left(\frac{-6,5}{5000}\right)^2} \approx 0,001838 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

$$\varepsilon_{P_r} = \frac{0,001838}{0,013} \cdot 100\% \approx 14,14\%.$$

$$\Delta_\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{1}{\varepsilon_0 E} \Delta_D\right)^2 + \left(\frac{-D}{\varepsilon_0 E^2} \Delta_E\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,4 \cdot 10^{-2}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,87 \cdot 10^5}\right)^2 + \left(\frac{-0,021 \cdot 0,11 \cdot 10^5}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,87^2 \cdot 10^{10}}\right)^2} \approx 2529,624.$$

$$\varepsilon_\varepsilon = \frac{2529,624}{12689,21} \cdot 100\% \approx 19,9\%.$$

## 11. Графики (перечень графиков, которые составляют Приложение 2).

График 1: график зависимости  $D = D(E)$ .

График 2: график зависимости  $\varepsilon = \varepsilon(E)$ .

## 12. Окончательные результаты.

$$D_s = (3,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-2} \frac{Кл}{м^2}.$$

$$E_c = (2,97 \pm 0,11) \cdot 10^5 \frac{В}{м}.$$

$$P_r = (1,30 \pm 0,18) \cdot 10^{-4} \frac{Кл}{м^2}.$$

$$\varepsilon_{нач} = (200 \pm 5) \cdot 10.$$

$$\varepsilon_{макс} = (12,7 \pm 2,5) \cdot 10^3.$$

$$E_{макс} = (1,87 \pm 0,11) \cdot 10^5 \frac{В}{м}.$$

## 13. Выводы и анализ результатов работы.

В ходе этой работы была изучена петля гистерезиса сегнетоэлектрика. Были определены значения  $E_s$ ,  $E_c$ ,  $D_s$ ,  $D_r$  и  $\varepsilon_{макс}$ , а также рассчитаны диэлектрические потери за цикл переполяризации сегнетоэлектрика. Анализируя графики 1 и 2, можно прийти к выводу, что зависимости  $D = D(E)$  и  $\varepsilon = \varepsilon(E)$  являются нелинейными.

14. Дополнительные задания.

15. Выполнение дополнительных заданий.

16. Замечания преподавателя (*исправления, вызванные замечаниями преподавателя, также помещают в этот пункт*).

**Примечание:**

1. Пункты 1-6,8-13 Протокола-отчета **обязательны** для заполнения.
2. Необходимые исправления выполняют непосредственно в протоколе-отчете.
3. При ручном построении графиков рекомендуется использовать миллиметровую бумагу.
4. Приложения 1 и 2 вкладывают в бланк протокола-отчета.

# Приложение 1

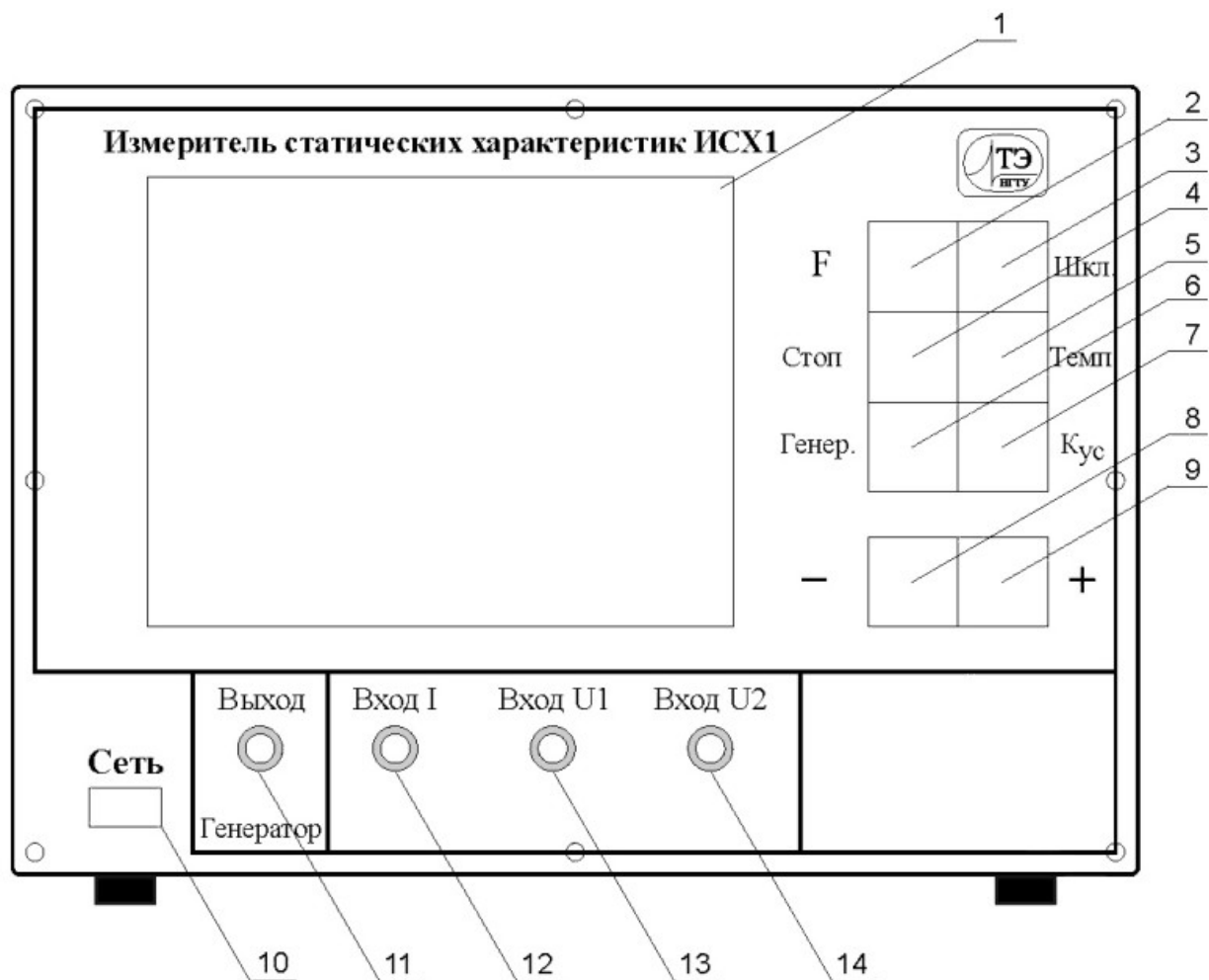


Схема 1: Измеритель статических характеристик ИСХ1.

1. графический дисплей;
2. кнопка выбора режима работы «F»;
3. кнопка выбора шкалы «Шкл.»;
4. кнопка запоминания оцифрованного сигнала «Стоп»;
5. кнопка выбора температурного режима «Темп»;
6. кнопка управления генератором «Генер.»;
7. кнопка выбора коэффициента отклонения « $K_{ус}$ »;
8. кнопка уменьшения выбранной величины «-»;
9. кнопка увеличения выбранной величины «+»;
10. кнопка выключателя «Сеть»;
11. выход генератора;



12. вход тока  $I$ ;

13. вход напряжения  $U_1$ ;

14. вход напряжения  $U_2$ ;

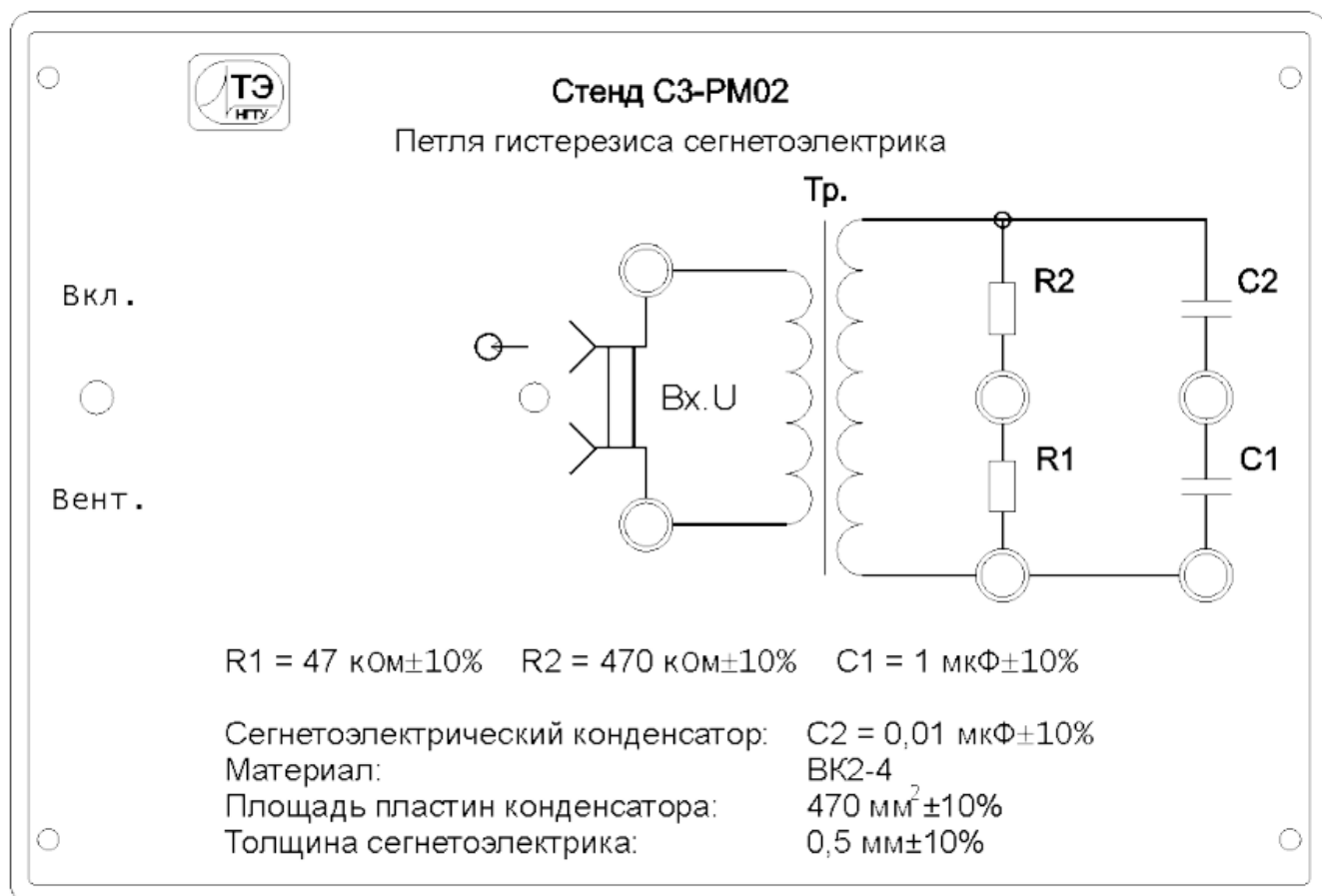


Схема 2: Принципиальная электрическая схема установки.

## Приложение 2

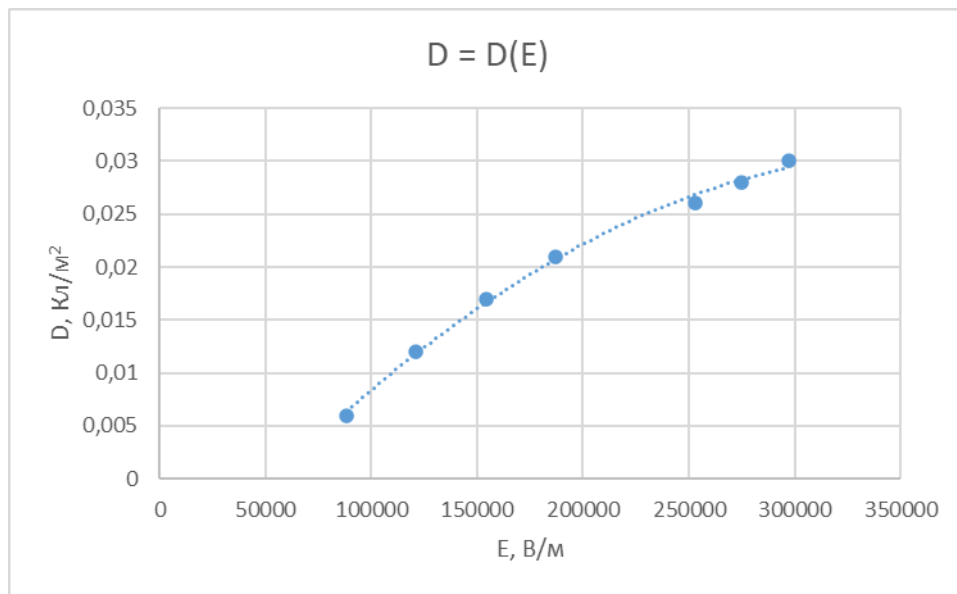


График 1: график зависимости  $D = D(E)$ .

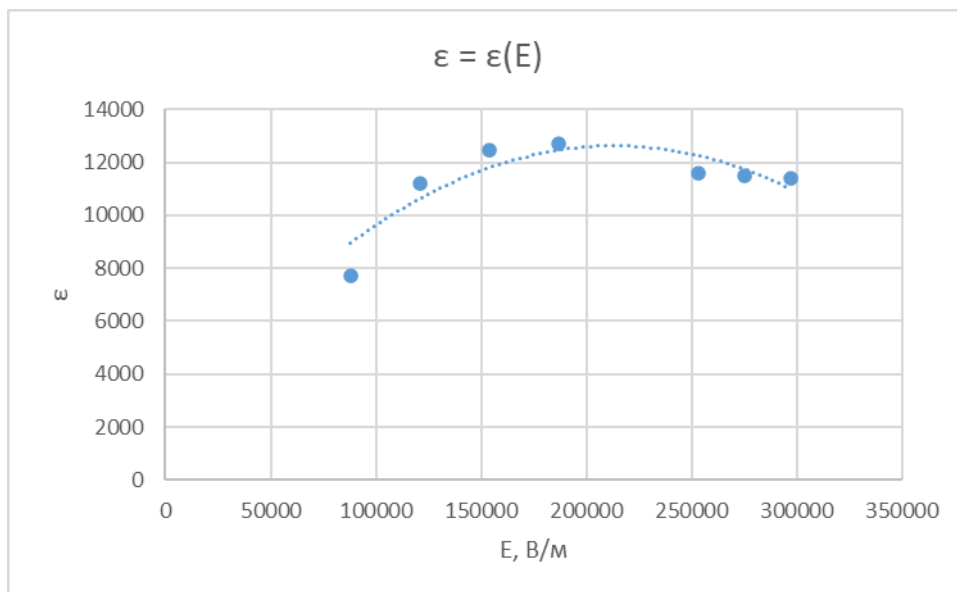


График 2: график зависимости  $\varepsilon = \varepsilon(E)$ .