

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра физики

ЭЛЕКТРОСТАТИКА
Комплекс К-310.2

Методические указания для лабораторных работ
по разделу физики «Электродинамика»
для студентов всех направлений и специальностей

Составители **В. В. Дырдин**
А. А. Мальшин
Т. И. Янина

Утверждены на заседании кафедры
Протокол № 9 от 24.03.2015
Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
направления 20.03.01 (280700.62)
Протокол № 8 от 31.03.2015
Электронная копия находится
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2015

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	2
I. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ	3
II. Лабораторная работа №1 ИЗУЧЕНИЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ.....	8
III. Лабораторная работа №2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НЕПОЛЯРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА И ПОЛЯРИЗУЕМОСТИ ЕГО МОЛЕКУЛ.....	16
IV. Лабораторная работа № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА МЕТОДОМ МОСТА СОТТИ.....	22
V. Лабораторная работа №4 ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ	26
VI. Лабораторная работа №5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ	33
VII. Список рекомендуемой литературы	43

ВВЕДЕНИЕ

Комплекс К-310.2 представляет собой перечень лабораторных работ, предусмотренных образовательным стандартом и рабочей программой по разделу «Электростатика» дисциплины «Физика». Он включает в себя описание лабораторных установок, порядок измерений и алгоритмы расчета определенных физических величин.

Для подготовки к выполнению лабораторной работы в соответствии с образовательным стандартом второго поколения 50 % от объема часов, отводимых на изучение дисциплины, приходится на самостоятельную работу, которая является необходимым компонентом процесса обучения. *Целью самостоятельной работы является закрепление и углубление знаний и навыков, подготовка к лекциям, практическим и лабораторным занятиям, а также формирование у студентов самостоятельности в приобретении новых знаний и умений.*

Учебными планами для различных специальностей предусмотрено на самостоятельное изучение дисциплины «физика» в течение семестра от 60 до 120 часов. Из них на подготовку к лабораторным работам приходится 20–40 часов, или 2–4 часа на одну работу. В течение этого времени студент должен: прочитать соответствующие параграфы в учебниках; выучить основные формулы и законы; познакомиться с установкой и порядком измерений.

Для допуска к выполнению работы на установке студент должен знать устройство установки, уметь определять цену деления измерительного прибора, знать последовательность измерений, уметь обрабатывать результаты измерений, оценивать погрешность. Ответить на контрольные вопросы, помещённые в конце методических указаний. После всех расчетов и оформления отчета, студент должен сделать вывод, в котором конкретно указать те физические закономерности, которые были проверены в ходе выполнения работы и указать, каким образом это сделано.

На выполнение каждой из представленных в данном комплексе лабораторных работ отводится два часа аудиторных занятий и 2÷4 часа самостоятельной работы.

I. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

1. Системы электроизмерительных приборов

Электроизмерительным прибором называется устройство, служащее для измерения электрических величин. По принципу действия электроизмерительные приборы делятся на следующие системы: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, индукционную, термоэлектрическую, электростатическую, вибрационную, электронную. Краткое описание и обозначение системы на шкале прибора приведено в табл. 1.1. Другие условные обозначения на шкалах приборов приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.1

Системы электроизмерительных приборов

Наименование системы	Условные обозначения	Род тока	Приборы данной системы
Магнитоэлектрическая*		Постоянный	Гальванометры, миллиамперметры, милливольтметры, регистрирующие приборы.
Электромагнитная**		Постоянный и переменный	Щитовые амперметры и вольтметры, фазометры.
Электродинамическая***		Постоянный и переменный	Миллиамперметры переменного тока, переносные амперметры и вольтметры, ваттметры.
Электродинамическая со сталью (ферродинамическая)		Переменный	Регистрирующие: амперметры, вольтметры и ваттметры переменного тока.
Индукционная		Переменный	Счетчики электрической энергии.
Вибрационная		Переменный	Герцметры в цепях переменного тока технической частоты
Электростатическая		Постоянный и переменный	Вольтметры и киловольтметры постоянного и переменного тока.

* – самые чувствительные из всех систем, самые точные приборы постоянного тока. Шкала прибора – равномерная.

** – самые прочные и дешевые. Относительно низкая чувствительность. Шкала прибора – неравномерная.

*** – самые точные из приборов переменного тока. Шкала неравномерная. Рабочая часть начинается от 15–20 % шкалы.

Погрешности измерений (ошибки измерений) – это отклонения результатов измерений от истинных значений измеряемых величин. Представление о точности измерений электроизмерительным прибором дает относительная погрешность

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A} 100 \% , \quad (1.1)$$

где ΔA – абсолютная погрешность (разность между показаниями прибора A и истинным значением $A_{\text{ист}}$ измеряемой величины).

Отношение минимальной абсолютной погрешности ΔA к предельному (максимальному) значению измеряемой величины A_{max} данным прибором называется приведенной относительной погрешностью

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{\Delta A}{A_{\text{max}}} 100 \% . \quad (1.2)$$

Таблица 1.2

*Условные обозначения, применяемые на шкалах
электроизмерительных приборов*

Условное обозначение	Содержание обозначения	Условное обозначение	Содержание обозначения
1,5	Класс точности прибора 1,5		Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 кВ
	Выпрямительный преобразователь		Прибор нормально работает в вертикальном положении
	Прибор предназначен для работы в цепях постоянного тока		Прибор нормально работает в горизонтальном положении
	Переменный однофазный ток		Прибор нормально работает под углом 60°
	Трехфазный ток		Зажим для заземления
 50	Прибор нормально работает при частоте 50 Гц		Вторая категория защищенности прибора от влияния внешних магнитных полей

Приведенная относительная погрешность $\varepsilon_{\text{пр}}$, выраженная в процентах, определяет класс точности прибора (γ). Применяются следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Обозначение класса точности записывается на его шкале в виде соответствующих цифр. Иногда класс точности обозначается числом в кружке. Приборы класса точности 0,05 дают наименьшую относительную погрешность измерения и употребляются в точных лабораторных исследованиях, а также как образцовые приборы для проверки менее точных приборов. Приборы остальных классов 0,1–4 относятся к техническим.

Зная класс точности прибора, можно найти относительную погрешность конкретного измерения ε :

$$\varepsilon = \gamma \frac{X_{\text{пред}}}{X} \%, \quad (1.3)$$

где X – показания прибора.

Общая формула для расчета минимальной абсолютной погрешности имеет вид

$$\Delta A_{\text{приб}} = \frac{\gamma}{100} A_{\text{max}}, \quad (1.4)$$

где γ – класс точности прибора; A_{max} – верхний предел измерений прибора.

Из вышесказанного следует, что чем ближе измеряемая величина к предельному значению прибора, тем меньше относительная ошибка, тем она ближе к значению класса точности прибора. Электроизмерительный прибор или его предел для работы следует выбирать так, чтобы значение измеряемой величины было близким к предельному (наибольшему) значению шкалы прибора.

Важнейшей характеристикой измерительного прибора является его внутреннее сопротивление, определяемое как

$$R_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{max}}}{I_{\text{max}}}, \quad (1.5)$$

где U_{max} – максимальное падение напряжения на приборе; I_{max} – максимальное допустимое значение силы тока, протекающего через прибор.

2. Многопредельные электроизмерительные приборы

Через измерительный механизм рассмотренных выше электроизмерительных приборов, особенно магнитоэлектрической системы, можно пропускать очень слабый ток. Однако прибор можно использовать для измерения больших токов, если параллельно изме-

рительному механизму подключить дополнительное малое сопротивление, которое называют шунтом. Шунты изготавливаются из материала с малым температурным коэффициентом сопротивления, имеют форму спиралей, лент или стержней. Если к прибору подключить несколько шунтов, то это даст возможность иметь несколько пределов измерения силы тока. Такой прибор называется многопредельным амперметром. Многопредельный прибор, как правило, имеет переключатель на несколько пределов измерения (пределы указаны около ручки переключения), одну общую клемму * и ряд других клемм ("1, 2, ..."), около которых указаны пределы измерений.

Если последовательно с измерительным механизмом подключить добавочное большое сопротивление, то прибор может быть использован в качестве вольтметра – прибора для измерения напряжения. Вольтметр в электрическую цепь включается параллельно тому участку, на котором измеряется напряжение.

3. Правила пользования многопредельным прибором

Для сохранения целостности и работоспособности многопредельного электроизмерительного прибора, например, амперметра при включении его в электрическую цепь с неизвестной силой тока следует придерживаться следующих правил.

1. С помощью ручки установки пределов устанавливается максимальный предел на приборе.

2. Если при замыкании цепи отклонение стрелки амперметра будет незначительным, нужно последовательно уменьшать пределы измерения до тех пор, пока отклонение стрелки не окажется в правой части шкалы, где точность измерения будет больше (погрешность меньше).

3. Для выбранного предела определяют цену одного деления шкалы амперметра

$$Z = I_{\max} / m, \quad (1.6)$$

где Z – цена одного деления шкалы амперметра для выбранного предела измерений; m – число всех делений шкалы прибора; I_{\max} – максимальное значение силы тока (напряжения), которое может быть измерено на выбранном пределе измерения.

4. Величина измеряемого тока (напряжения) вычисляется

$$I = Zk, \quad (1.7)$$

где k – деление шкалы прибора, на которое отклонится стрелка при включении прибора в электрическую цепь.

Аналогично определяется цена деления вольтметра.

4. Вопросы для самоподготовки

4.1. По каким признакам классифицируются электроизмерительные приборы?

4.2. Для измерения напряжений использовался вольтметр с пределами измерений: 3 В, 15 В, 75 В и классом точности 1,5. Определить абсолютные погрешности для каждого предела измерений.

4.3. В чём заключается устройство и принцип действия электроизмерительных приборов магнитоэлектрической, электромагнитной и электродинамической систем?

4.4. Почему шкала у одних электроизмерительных приборов равномерная, у других – неравномерная?

4.5. В чём особенности устройства и принципа действия аstaticкого прибора?

4.6. Рассчитайте сопротивление шунта к миллиамперметру на 100 мА, для измерения тока до 2 А ($R_A = 0,1$ Ом).

4.7. Рассчитайте добавочное сопротивление к милливольтметру на 100 мВ, для измерения напряжения до 10 В ($R_V = 2$ кОм).

4.8. Для измерений тока использовался двухпредельный миллиамперметр на 300 мА и 750 мА. Шкала прибора имеет 150 делений. Определить цену делений шкалы прибора для каждого предела измерений.

4.9. Как выбрать нужный предел при использовании многопредельного амперметра?

4.10. Как определяется цена одного деления многопредельного электроизмерительного прибора?

4.11. Как следует включить реостат (переменное сопротивление) для изменения силы тока в цепи?

4.12. Как включить в цепь реостат в качестве потенциометра, то есть для изменения напряжения?

II. Лабораторная работа №1 ИЗУЧЕНИЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

1. Цель работы

Освоение экспериментального метода определения характеристик электрических полей и графического изображения электростатических полей с помощью эквипотенциальных и силовых линий.

2. Подготовка к работе

Изучить теоретические положения, касающиеся данного явления по литературным источникам [1] – гл.13–14, [2] – §§ 79–85, [3] – гл.1. Для выполнения работы студент должен: а) знать теорему Гаусса для электростатического поля; б) уметь строить эквипотенциальные поверхности и силовые линии напряженности; в) знать связь между напряженностью и потенциалом; г) изучить схему лабораторной установки; д) познакомиться с работой осциллографа, источника питания; е) уметь определять цену деления измерительных приборов и оценивать погрешности измерений; ж) ответить на вопросы для самоподготовки, приведённые в конце данной лабораторной работы.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторного стенда

На рис. 2.1 приведена электрическая схема лабораторной установки, состоящая из ванны В, выполненной из материала с хорошими электроизоляционными (оргстекло) свойствами, источника питания ИП, электронного осциллографа РО, вольтметра V и набора электродов (различной формы) \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 .

В ванну кладут лист бумаги (в клетку), на котором студенту необходимо нарисовать положение электродов \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 и ось X, соединяющую центры электро-

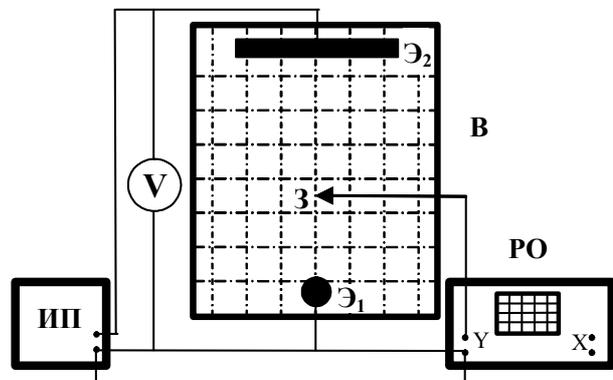


Рис. 2.1. Электрическая схема экспериментальной установки

дов. Затем наливают слой воды 3-5 мм. Измерения проводят с использованием переменного напряжения промышленной частоты (50 Гц). В этом случае, учитывая, что расстояние между электродами невелико, можно считать, что потенциалы во всех точках исследуемого поля изменяются синхронно, и эквипотенциальные поверхности остаются неизменными. Если развёртку осциллографа выключить, а зонд З поставить на электрод Э₁, то выбирая усиление осциллографа по Y, можно установить максимальный размах сигнала по вертикали и определить цену одного деления (В/дел).

В поле между электродами помещается зонд (З), соединенный с входом «Y» электронного осциллографа (РО). Помещая зонд в точки с определенными координатами X, с помощью электронного осциллографа определяют потенциал этих точек относительно одного из электродов (на рис. 2.1 относительно электрода Э₁).

3.2. Методика измерений и расчёта

3.2.1. Исследование поля двух коаксиальных металлических цилиндров, равномерно заряженных с линейной плотностью τ .

Очевидно, что поле цилиндра обладает осевой симметрией. Силовые линии, начинаясь на поверхности металлического цилиндра радиуса a , идут по радиусам r до поверхности второго цилиндра (рис. 2.2). Поэтому поле в этом случае можно рассчитать, используя теорему Гаусса.

Поток вектора \vec{E} через основания цилиндра равен нулю, так как силовые линии лишь скользят вдоль оснований, не пересекая их. Поток вектора \vec{E} через гауссову поверхность S будет, поэтому равен потоку через боковую поверхность вспомогательного цилиндра, а напряжённость поля E будет рассчитываться по формуле:

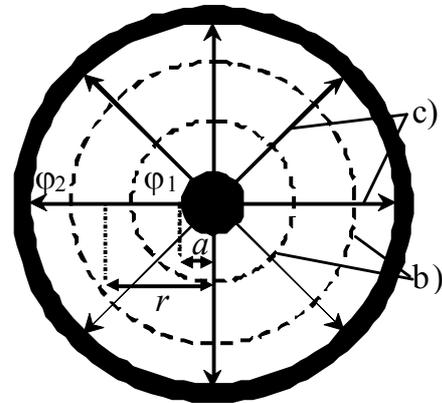


Рис. 2.2. Силовые c) и эквипотенциальные линии поля b) двух заряженных цилиндров

$$E = \frac{\tau}{2\pi r \varepsilon_0} . \quad (2.1)$$

Рассматриваемый заряженный цилиндр – металлический, поэтому все его точки внутри и на поверхности имеют один и тот же потенциал. Примем его равным нулю ($\varphi_0 = 0$). Потенциал $\varphi(r)$ на расстоянии r от оси найдем, пользуясь равенством (2.1):

$$E_r = -\frac{d\varphi}{dr} \quad \text{и} \quad \int_0^{\varphi(r)} d\varphi = -\int_a^r E_r dr = -\frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \int_a^r \frac{dr}{r},$$

откуда

$$\varphi(r) = -\frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{r}{a} . \quad (2.2)$$

Как следует из (2.2), эквипотенциальные поверхности поля цилиндра (а значит, и двух коаксиальных цилиндров) – цилиндрические поверхности, коаксиальные с металлическим цилиндром (рис. 2.2).

3.2.2. Исследование поля равномерно заряженного цилиндра и проводящей плоскости.

Так как силовые линии перпендикулярны к поверхности металлических электродов (рис. 2.3), то можно, вместо поля цилиндра и проводящей плоскости ПП, рассматривать поле двух разноименно заряженных цилиндров, один из которых – данный цилиндр, второй – заряженный с линейной плотностью $(-\tau)$ и расположенный симметрично данному относительно проводящей плоскости ПП. Это – метод зеркальных изображений. В любой точке рассматриваемого электростатического поля напряженность

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 .$$

На линии OO' , соединяющей центры цилиндров:

$$E_r = E_1 + E_2 = \frac{|\tau|}{2\varepsilon_0\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{2\ell - r} \right),$$

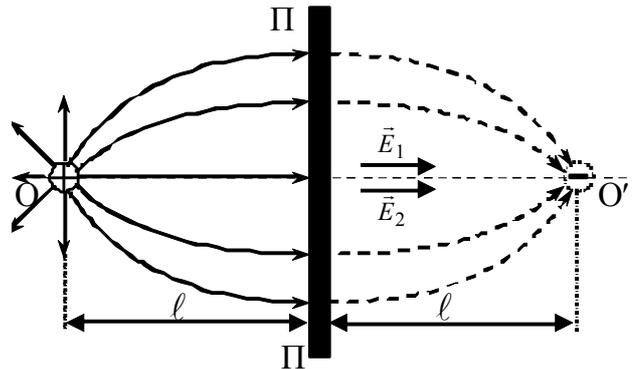


Рис. 2.3. Силовые линии плоскости и цилиндра

где $a \leq r \leq \ell$; a – радиус цилиндра.

Найдем разность потенциалов между исследуемым цилиндром и произвольной точкой поля на линии OO' :

$$\int_0^{\varphi(r)} d\varphi = -\int_a^r E_r dr = -\int_a^r \left(\frac{|\tau|}{2\pi\epsilon_0 r} + \frac{|\tau|}{2\pi\epsilon_0(2\ell - r)} \right) dr,$$

откуда

$$\varphi(r) = \frac{|\tau|}{2\pi\epsilon_0} \left(\ln \frac{2\ell - a}{a} - \ln \frac{2\ell - r}{r} \right). \quad (2.3)$$

Выражение (2.3) можно представить как

$$\varphi(r) = U \left(1 - \frac{\ln\left(\frac{2\ell}{r} - 1\right)}{\ln\left(\frac{2\ell}{a} - 1\right)} \right), \quad (2.4)$$

где $a \leq r \leq \ell$, $U = \frac{|\tau|}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2\ell - a}{a}$ – разность потенциалов между

электродами. Подставляя значения r , выбранные в эксперименте, можно найти теоретические значения потенциала $\varphi(r)$ и сравнить их с измеренными.

3.3. Подготовка лабораторного стенда к работе

3.3.1. На миллиметровой бумаге (лист в клетку) нанести оси координат, изобразить положение электродов, положить лист на дно ванны, на изображение поместить электроды, заполнить ванну водой слоем около 3 мм.

3.3.2. Установить органы управления на панелях осциллографа ЭО в положение, обеспечивающее измерение амплитуды.

3.3.3. Собрать электрическую схему установки согласно рис. 2.1.

3.3.4. После проверки схемы преподавателем присоединить ИП и РО к сети 220 В. Включить приборы тумблерами «Сеть». Дать приборам прогреться в течение 3 мин.

3.4. Изучение электрического поля между двумя коаксиальными цилиндрами

3.4.1. Поместить цилиндр малого радиуса (\mathcal{E}_1) в центр координатной сетки ванны. Второй цилиндр установить соосно с первым.

3.4.2. Подать напряжение на электроды.

3.4.3. Поместить зонд в точку, находящуюся на координатной оси ванны на расстоянии $r_1 = 1$ см от малого электрода (рис. 2.2). Записать показания электронного осциллографа и расстояние r_1 в табл. 2.1. Отметить на рисунке точку с найденным значением потенциала.

3.4.4. С помощью зонда найти положение еще 9–10 точек с тем же значением потенциала. Отметить их положение на рисунке.

3.4.5. Повторить измерения для других 6 значений делений координатной оси ванны, занося соответствующие данные в табл. 2.1.

3.4.6. Соединить на рисунке точки с одинаковым значением потенциала (построить эквипотенциальные линии).

3.4.7. Провести на рисунке силовые линии перпендикулярно эквипотенциальным линиям таким образом, чтобы образующиеся 4-х угольники имели примерно одинаковую площадь.

3.4.8. На миллиметровой бумаге в осях (по ординате φ , по абсциссе $\ln \frac{r}{a}$) по данным табл. 2.1 построить экспериментальную зависимость.

Таблица 2.1

*Результаты экспериментального изучения
поля двух коаксиальных цилиндров*

№ п/п	a	r	φ	$\ln \frac{r}{a}$
	м	м	В	
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

3.5. Изучить электрическое поле между цилиндром и проводящей плоскостью.

3.5.1. Поместить электроды в ванне таким образом, чтобы горизонтальная ось координатной сетки ванны являлась осью сим-

метрии (ось OO' на рис. 2.3), а расстояние между поверхностями электродов составляло 10–15 делений координатной оси. Цилиндр должен быть электродом \mathcal{E}_1 .

3.5.2. Подать напряжение на электроды.

3.5.3. Поместить зонд в точку, находящуюся на горизонтальной оси координатной сетки на расстоянии одного деления от цилиндра. Записать показания осциллографа и расстояние r_1 в табл. 2.2. Отметить на рисунке точку с найденным значением потенциала.

Таблица 2.2

*Результаты экспериментального изучения
поля цилиндра и плоскости, расчета $\varphi_r^{\text{теор}}$*

№ п/п	a	ℓ	r	φ_r	$\frac{2\ell}{r} - 1$	$\ln\left(\frac{2\ell}{r} - 1\right)$	U	$\varphi_r^{\text{теор}}$
	м	м	м	В			В	В
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

3.5.4. Провести измерения согласно пп. 3.4.4–3.4.7, занося соответствующие данные в табл. 2.2.

3.5.5. С помощью вольтметра измерить напряжение U между электродами. Результат занесите в табл. 2.2.

3.5.6. Для значений r_i из табл. 2.2 по формуле (2.4) рассчитать теоретические значения $\varphi(r)$. Сравнивая теоретические и экспериментальные значения φ_r , сделать вывод о соответствии теории эксперименту.

3.6. Методом численного дифференцирования определить напряженность E поля между электродами.

3.6.1. Пользуясь данными табл. 2.1 или 2.2 (по указанию преподавателя), построить график зависимости потенциала φ поля от расстояния r между электродами, начиная с $r = a$.

3.6.2. Пользуясь построенным графиком, методом численного дифференцирования найти напряженность E поля для разных значений r , зная, что

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta r}, \quad (2.5)$$

где $\Delta\varphi$ - изменение потенциала на отрезке Δr ($\Delta r = 5$ мм).

Расчет по формуле (2.5) проводить следующим образом. Выбрав значение r_1 , установить по графику соответствующее ему значение φ_1 , а затем значение φ_2 для $r_2 = r_1 + \Delta r$. Разделив $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ на Δr , получим численное значение напряженности E поля, которое следует отнести к середине $r_{\text{ср}}$ выбранного интервала ($r_1, r_1 + \Delta r$). Расчет выполнить для 9–10 значений r , охватывающих весь интервал расстояний между электродами. Результаты расчетов занести в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Результаты расчета методом численного дифференцирования напряженности \vec{E} поля между электродами

r	φ_1	φ_2	$\Delta\varphi$	E	$r_{\text{ср}}$
см	В	В	В	В/м	см
1		---			--
2					1,5
3					2,5
4					3,5
5					4,5
6					5,5
7					6,5
8					7,5
9					8,5
10					9,5

3.6.3. По данным табл. 2.3 построить график зависимости напряженности \vec{E} электрического поля от расстояния $r_{\text{ср}}$.

3.7. Оценить погрешности определения потенциалов и расчёта напряжённости.

3.8. Сделать вывод о степени совпадении экспериментальных и теоретических данных.

4. Вопросы для самоподготовки

4.1. Что называют напряженностью электростатического поля? Как направлен вектор напряженности \vec{E} ? Какую линию, изображающую электростатическое поле, называют силовой, а какую эквипотенциальной?

4.2. Чему равен модуль вектора напряженности поля точечного заряда на расстоянии r от него? Как направлены вектора напряженности поля?

4.3. Чему равна работа перемещения электрического заряда в электрическом поле по замкнутой траектории? По незамкнутой?

4.4. В чём заключается принцип суперпозиции полей для совокупности электрических зарядов?

4.5. Что называют потенциалом данной точки электростатического поля? Что называют эквипотенциальной поверхностью?

4.6. Как графически изобразить электростатическое поле? Каково взаимное расположение силовых и эквипотенциальных линий?

4.7. Как связаны напряженность и потенциал? Куда направлен вектор градиента потенциала?

4.8. Что называют потоком вектора \vec{E} ?

4.9. Чему равен поток вектора \vec{E} сквозь замкнутую поверхность, не содержащую электрических зарядов? Содержащую положительные электрические заряды? Отрицательные?

4.10. Что можно сказать о потенциале внутри и на поверхности металлического цилиндра, о напряженности внутри и на поверхности металлического цилиндра?

4.11. Как изменится поток вектора \vec{E} , если замкнутую поверхность в виде сферы заменить замкнутой поверхностью произвольной формы?

III. Лабораторная работа №2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НЕПОЛЯРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА И ПОЛЯРИЗУЕМОСТИ ЕГО МОЛЕКУЛ

1. Цель работы

Освоение метода определения емкости конденсатора с помощью моста Сотти, определение относительной диэлектрической проницаемости и поляризуемости молекул жидкого неполярного диэлектрика.

2. Подготовка к работе

Изучить теоретические положения, касающиеся данного метода по литературным источникам [1] – гл. 15, [2] – §§ 87–89, [3] – гл. II. Для выполнения работы студент должен знать: а) типы диэлектриков и их поляризуемость в электрических полях; б) методику измерений ёмкости конденсатора с помощью моста Сотти; в) алгоритм расчёта диэлектрической проницаемости диэлектриков и поляризуемости молекул; г) ответы на контрольные вопросы; д) методику и оценку погрешности измерений; е) порядок безопасной работы с электрическими приборами.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторного стенда

Принципиальная электрическая схема установки изображена на рис. 3.1, а схема подключения электронного осциллографа ЭО – на рис. 3.2. В установке в качестве источника переменного напряжения применяется звуковой генератор ЗГ. Измерения производят на частоте $\nu = 1200$ Гц; C_0 – эталонная электроёмкость, величина которой указана на стенде; C_x – ёмкость батареи конденсаторов, которую надо определить. При включенных звуковом генераторе и развертке осциллографа ЭО на его экране будет видна синусоида, если потенциалы точек М и О не равны между собой. Перемещая движок реостата, можно найти такое его положение, при котором потенциалы этих точек будут равными. На экране осциллографа

амплитуда синусоиды при этом будет уменьшаться и при равенстве потенциалов синусоида превращается в прямую.

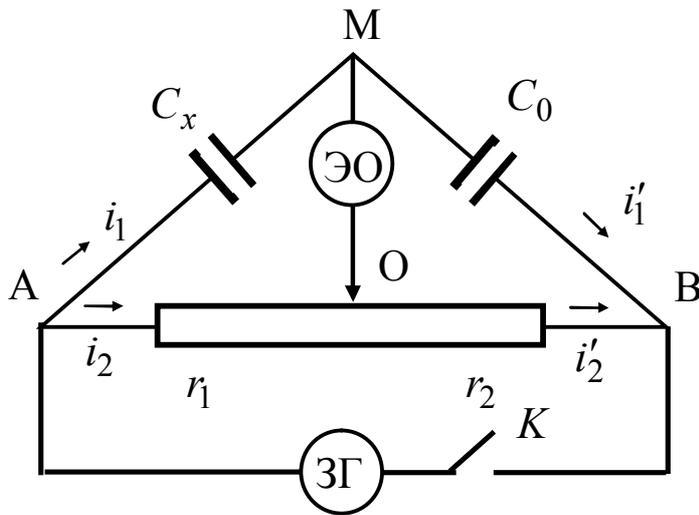


Рис. 3.1. Принципиальная электрическая схема установки

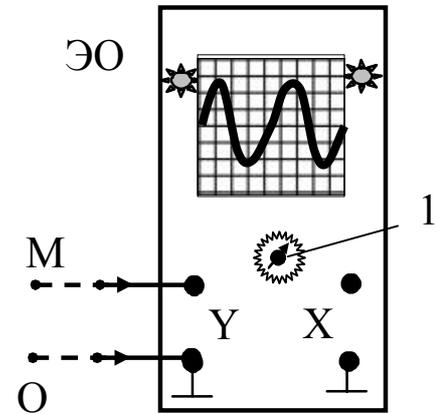


Рис. 3.2. Схема подключения электронного осциллографа:
1 – ручка развертки

В установке используется конденсатор переменной ёмкости (ёмкость изменяется путём изменения площади S взаимного перекрытия пластин). На стенде приведена графическая зависимость S от угла поворота φ подвижных пластин. Измерив, угол поворота φ ротора по транспортиру, с помощью графика определяем площадь перекрытия пластин S .

3.2. Методика измерений и расчёта

Емкость плоского конденсатора определяется по формуле

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (3.1)$$

где C – емкость; ϵ_0 – электрическая постоянная; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды, заключенной между пластинами конденсатора; S – площадь пластин конденсатора; d – расстояние между пластинами конденсатора.

По известным d и S и экспериментально измеренной емкости конденсатора C можно рассчитать относительную диэлектрическую проницаемость среды ϵ . В данной работе применяется

батарея параллельно соединенных плоских конденсаторов, погруженных в исследуемую жидкость, являющуюся неполярным диэлектриком. Емкость батареи при параллельном соединении конденсаторов равна

$$C_x = C_1 + C_2 + \dots + C_m = mC, \quad (3.2)$$

где m – число параллельно соединенных одинаковых конденсаторов, а C их электроёмкость.

С учетом (3.1) и (3.2) получим

$$C_x = mC = \frac{m\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}. \quad (3.3)$$

Из выражения (3.3) получим

$$\varepsilon = \frac{C_x d}{m\varepsilon_0 S}. \quad (3.4)$$

При равновесии моста мгновенные значения потенциалов точек $\varphi_M = \varphi_O$, следовательно, также будут равны и мгновенные значения разности потенциалов:

$$\varphi_A - \varphi_M = \varphi_A - \varphi_O, \quad \varphi_M - \varphi_B = \varphi_O - \varphi_B. \quad (3.5)$$

Будут также равны токи i_1 и i_2 (амплитудные или действующие значения):

$$i_1 = i'_1; \quad i_2 = i'_2. \quad (3.6)$$

Сопротивления участков АО и ОВ являются активными и равны r_1 и r_2 , соответственно. Сопротивления участков АМ и МВ – реактивно-емкостные и величины их будут равны

$$X_C^{AM} = \frac{1}{\omega C_x}; \quad X_C^{MB} = \frac{1}{\omega C_0}, \quad (3.7)$$

где $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота.

Равенства (3.6) можно записать с помощью закона Ома полагая, что токи квазистационарны. Тогда будем иметь:

$$\frac{\varphi_A - \varphi_M}{X_C^{AM}} = \frac{\varphi_M - \varphi_B}{X_C^{MB}}; \quad (3.8)$$

$$\frac{\varphi_A - \varphi_O}{r_1} = \frac{\varphi_O - \varphi_B}{r_2}. \quad (3.9)$$

Разделив почленно (3.8) на (3.9), получим:

$$\frac{r_1}{X_C^{AM}} = \frac{r_2}{X_C^{MB}}. \quad (3.10)$$

Подставляя в (3.10) значения реактивных сопротивлений из (3.7) и учитывая, что сопротивление плеч реостата пропорционально их длине, получим

$$C_x = C_0 \frac{\ell_{OB}}{\ell_{AO}}. \quad (3.11)$$

Зная ёмкость эталонного конденсатора и измерив длину плеч реостата от точки А до бегунка (точка О) – ℓ_{AO} и от бегунка до точки В – ℓ_{OB} , по формуле (3.11) рассчитаем ёмкость неизвестного конденсатора.

Электрическое поле внутри диэлектрика характеризуется вектором электрического смещения \vec{D} и выражается следующим образом [1]:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad (3.12)$$

где \vec{P} – дипольный момент единицы объема диэлектрика или другими словами величина, характеризующая поляризацию диэлектрика.

Для неполярного диэлектрика

$$\vec{P} = \alpha n_0 \varepsilon_0 \vec{E}_{\text{лок}}, \quad (3.13)$$

где n_0 – концентрация молекул диэлектрика; $\alpha = 4\pi r^3$ – множитель, пропорциональный третьей степени радиуса молекулы и называемый *поляризуемостью молекулы*; $\vec{E}_{\text{лок}}$ – напряжённость локального поля, которое создается свободными зарядами вне диэлектрика и зарядами всех молекул внутри диэлектрика за исключением зарядов рассматриваемой молекулы, то есть

$$\vec{E}_{\text{лок}} = \vec{E} + \frac{1}{3\varepsilon_0} \vec{P}, \quad (3.14)$$

где \vec{E} – среднее макроскопическое поле в диэлектрике.

С учетом (3.13) и (3.14) выражение (3.12) принимает вид:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \frac{3\alpha n_0 \varepsilon_0}{3 - n_0 \alpha} \vec{E} = \frac{3 + 2\alpha n_0}{3 - n_0 \alpha} \varepsilon_0 \vec{E}. \quad (3.15)$$

Из этого выражения следует формула для относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика:

$$\varepsilon = \frac{3 + 2n_0 \alpha}{3 - n_0 \alpha}. \quad (3.16)$$

Концентрацию молекул можно найти по известной формуле

$$n_0 = \frac{\rho N_A}{M}, \quad (3.17)$$

где ρ , M – плотность жидкости и ее молярная масса, соответственно; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$ – постоянная Авогадро.

Тогда поляризуемость молекул диэлектрика будет равна

$$\alpha = \frac{3\varepsilon - 3}{2n_0 + n_0 \varepsilon}. \quad (3.18)$$

3.3. Подготовка лабораторного стенда к работе

3.3.1. Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 3.1).

3.3.2. Поставить пластины батареи конденсаторов в положение максимального перекрытия, движок реостата – в среднее положение, включить звуковой генератор и осциллограф. Через 2–3 минуты на экране осциллографа появится синусоида, параметры которой можно изменять частотой развертки и усилением.

3.4. Определение неизвестной электроёмкости

3.4.1. Изменяя положение движка реостата O , добиться, чтобы на экране осциллографа получилась прямая линия при максимальном усилении осциллографа по вертикали (по Y).

3.4.2. Записать значения l_{AO} и l_{OB} в табл. 3.1. Зная C_0 , по формуле (3.11) вычислить C_x . Пользуясь паспортными данными, прилагаемыми к работе, по формуле (3.4) найти ε . Результаты занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Результаты измерений ёмкости батареи конденсаторов и расчёта диэлектрической проницаемости ε диэлектрика

№ п/п	φ	S	l_{AO}	l_{OB}	C_0	C_x	ε	$\langle \varepsilon \rangle$
	град	м ²	мм	мм	Ф	Ф		
1								
...								
7								

3.4.3. Провести аналогичные измерения ещё для $5 \div 7$ различных значений площади взаимного перекрытия пластин батареи конденсаторов (площадь S перекрытия пластин конденсаторов найти по значениям угла φ с помощью графика зависимости S от φ , прилагаемого к установке). Найти среднее значение $\langle \varepsilon \rangle$. Результаты занести в табл. 3.1.

3.5. Расчёт параметров молекул

3.5.1. Зная молярную массу M и плотность ρ диэлектрика, определить концентрацию молекул диэлектрика n_0 по формуле (3.17). По формуле (3.18), пользуясь средним значением $\langle \varepsilon \rangle$, вычислить поляризуемость α молекул диэлектрика. Результаты занести в табл. 3.2.

3.5.2. Зная, что $\alpha = 4\pi r^3$, оценить радиус молекулы r .

3.6. Оценить погрешность измерений электроёмкости, расчёта относительной диэлектрической проницаемости, поляризуемости.

3.7. Сделать выводы по работе.

Таблица 3.2

Результаты расчёта поляризуемости α молекул и оценка радиуса r молекулы диэлектрика

N_A	ρ	M	$\langle \varepsilon \rangle$	n_0	α	r
1/моль	кг/м ³	кг/моль		1/м ³	м ³	м
		0,320				

4. Вопросы для самоподготовки

4.1. Что называется диполем? Дипольным моментом? Как он направлен?

4.2. Какие диэлектрики называются полярными? В чём состоит их поляризация?

4.3. В чём заключается поляризация в неоднородном электрическом поле?

4.4. Что общего и в чём различие в поляризации полярного и неполярного диэлектриков?

4.5. Зависит ли поляризуемость α неполярной молекулы от температуры? Почему?

4.6. Почему поляризацию неполярных диэлектриков называют деформационной? Электронной?

4.7. Влияет ли тепловое движение на ориентацию индуцированных дипольных моментов неполярной молекулы?

4.8. Какая физическая величина служит количественной мерой поляризации диэлектриков? От чего она зависит?

4.9. Каков физический смысл диэлектрической проницаемости?

4.10. Как определяется напряжённость поля в диэлектрике?

4.11. В чём заключается особенность установки, изображённой в виде схемы на рис. 3.1?

4.12. Чем отличается среднее макроскопическое поле в диэлектрике от локального поля?

IV. Лабораторная работа № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА МЕТОДОМ МОСТА СОТТИ

1. Цель работы

Освоение мостового метода измерения емкости конденсатора и экспериментальная проверка соотношений при параллельном и последовательном соединении конденсаторов.

2. Подготовка к работе

Изучить теоретические положения, касающиеся данного метода по литературным источникам [1] – гл. 16, 17, [2] – §§ 92–95, [3] – гл. III, IV. Для выполнения работы студент должен знать: а) понятие электроёмкости проводника и конденсатора и от чего она зависит; б) понятие реактивно-ёмкостного сопротивления; в) формулы для расчёта ёмкости плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов; г) расчет электроёмкости батареи конденсаторов; д) схему лабораторной установки; е) схему подключения и управления осциллографом и магазином сопротивлений; ж) расчёт погрешностей измерений.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторного стенда

Существуют несколько методов экспериментального определения емкости конденсаторов. В данной работе емкость измеряется при помощи мостовой схемы – моста Сотти (рис. 4.1).

Из четырех элементов собирается квадрат, в одну диагональ которого включают источник переменного тока, а в другую – электронный осциллограф. Если источник тока включен, то в цепи, в том числе и на участке ЕД, течет ток, а на экране осциллографа видна синусоида. Подбором сопротивлений R_1 и R_2 можно

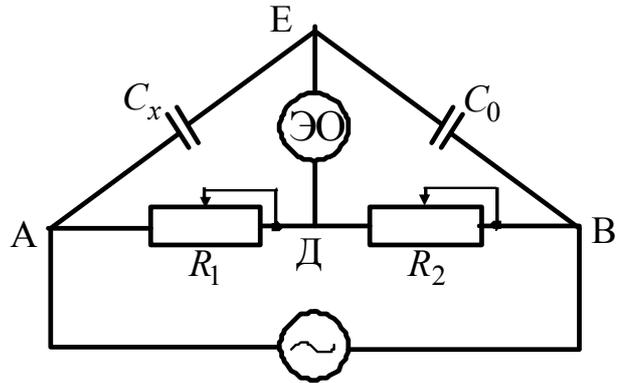


Рис. 4.1. Схема моста Сотти

добиться равновесия моста Сотти, при котором разность потенциалов ($\varphi_E - \varphi_D$) равна нулю (состояние равновесия моста). По мере приближения к положению равновесия (путем подбора R_2 на магазине сопротивлений) амплитуда синусоида уменьшается. В момент достижения равновесия синусоида сменяется горизонтальной прямой. Для более точной балансировки моста усиление на Y можно увеличить. После перехода через положение равновесия амплитуда колебаний снова увеличивается.

3.2. Методика измерений и расчёта

При равновесии моста Сотти потенциалы точек Е и Д равны ($\varphi_E = \varphi_D$). Это значит, что разность потенциалов на участке АЕ по величине равна разности потенциалов на участке АД:

$$\varphi_A - \varphi_E = \varphi_A - \varphi_D. \quad (4.1)$$

По аналогичным соображениям:

$$\varphi_E - \varphi_B = \varphi_D - \varphi_B. \quad (4.2)$$

Токи в ветвях АЕ и ЕВ, АД и ДВ будут равны по величине:

$$I_{AE} = I_{EB}, \quad (4.3)$$

$$I_{AD} = I_{DB}. \quad (4.4)$$

Сопrotивление участка цепи переменного тока, содержащего конденсатор, определяется по формуле $X_C = 1/\omega C$, где C – емкость конденсатора; ω – циклическая частота.

К однородным участкам цепи АЕ, ЕВ, АД и ДВ применим закон Ома в виде $I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}$. Тогда равенства (4.3) и (4.4) примут вид:

$$\frac{\varphi_A - \varphi_E}{X_{C_x}} = \frac{\varphi_E - \varphi_B}{X_{C_0}}, \quad (4.5)$$

$$\frac{\varphi_A - \varphi_D}{R_1} = \frac{\varphi_D - \varphi_B}{R_2}. \quad (4.6)$$

Разделив почленно равенство (4.5) на (4.6), учитывая при этом, что $X_C = \frac{1}{\omega C}$ получим:

$$C_x = C_0 \frac{R_2}{R_1}. \quad (4.7)$$

Это и есть рабочая формула для расчета неизвестной емкости. Из рабочей формулы (4.7) следует, что при измерении целесообразнее фиксировать R_1 и находить равновесие моста при помощи магазина R_2 .

3.3. Порядок выполнения работы

3.3.1. Собрать цепь по схеме рис. 4.1.

3.3.2. На магазине сопротивлений выставить R_1 (от 1500 до 5000 Ом), включить трансформатор и осциллограф, дождаться появления на экране осциллографа синусоиды.

3.3.3. Меняя сопротивление R_2 на втором магазине, добиться, чтобы на экране осциллографа получилась прямая линия. Это возможно при условии равновесия моста.

3.3.4. Записать значение R_2 в таблицу. Зная C_0 , по формуле (4.7) вычислить C_x . Результаты занести в таблицу 4.1.

3.3.5. Повторить измерения для другого неизвестного конденсатора, результаты занести в таблицу.

3.3.6. Измерить емкость при последовательном и параллельном соединении конденсаторов C_{x1} и C_{x2} .

Таблица 4.1

Результаты измерений емкости конденсаторов

Конденсатор	№ опыта	R_1	R_2	C_x	$\langle C_x \rangle$	$\varepsilon, \%$
		Ом	Ом	Ф	Ф	%
C_1	1					
	2					
	3					
C_2	1					
	2					
	3					
$C_{12\text{посл}}$	1					
	2					
	3					
$C_{12\text{пар}}$	1					
	2					
	3					

3.3.7. Сравнить их со значениями, полученными путем расчета по формулам для параллельного и последовательного соединения конденсаторов.

$$\varepsilon = \frac{|C_{\text{экс}} - C_{\text{расч}}|}{C_{\text{экс}}} \cdot 100\%$$

4. Вопросы для самоподготовки

4.1. Что называется электроемкостью уединенного проводника? От чего она зависит? В каких единицах измеряется электроемкость?

4.2. Что представляет собой конденсатор? Как вывести формулы электроемкости плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов?

4.3. В чём заключается принцип действия моста Сотти?

4.4. Три одинаковых конденсатора один раз соединены последовательно, другой – параллельно. Во сколько раз и когда электроемкость батареи будет больше?

4.5. Всегда ли одинаковы емкости двух одинаковых по форме и размерам проводников?

4.6. Что больше емкость Земли ($R_3 = 6,4 \cdot 10^6$ м) или Солнца ($R_C = 6,95 \cdot 10^8$ м)? Какой радиус должен иметь проводящий шар, чтобы в вакууме его емкость равнялась 1 Ф?

4.7. Плоский воздушный конденсатор после зарядки отключают от источника тока и погружают в керосин. Как изменится энергия, накопленная в конденсаторе?

4.8. Как изменятся результаты опыта (см. 4.7), если конденсатор не отключать от сети?

4.9. Как изменится разность потенциалов между обкладками плоского конденсатора, если его отсоединить от сети и уменьшить расстояние между обкладками?

4.10. Как изменится емкость плоского конденсатора, если между его пластинами поместить: а) слой металла, заполняющего половину пространства между пластинами; б) той же толщины слой диэлектрика?

V. Лабораторная работа №4 ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

1. Цель работы

Экспериментальное изучение зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля; определение остаточной индукции, коэрцитивной силы, спонтанной и индуцированной составляющих поляризации сегнетоэлектрика.

2. Подготовка к работе

Изучить теоретические положения, касающиеся данного явления по литературным источникам [1] – гл. 15, [2] – §§ 88–91, [3] – гл. II. Для выполнения работы студент должен знать: а) типы диэлектриков и виды их поляризуемости; б) понятия напряженности электрического поля и электрического смещения; в) причины возникновения петли гистерезиса при изменении поляризующего поля; г) ответы на вопросы для самоподготовки; д) особенности

экспериментальной установки и порядок измерения; е) как провести оценку погрешности измерений.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторного стенда

На рис. 5.1 приведена структурная схема установки, с помощью которой изучаются свойства сегнетоэлектриков.

На передней панели модуля ФПЭ-02 имеются: Рег. «U» – ручка регулирования напряжения; гнезда «PV» – для подключения вольтметра; гнезда «PO» («Y», «X», «⊥») – для подключения осциллографа.

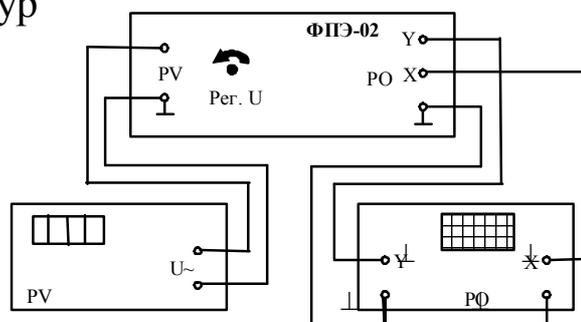


Рис. 5.1. Структурная схема установки: ФПЭ – 02 модуль: PV – цифровой вольтметр; PO – осциллограф

Принципиальная электрическая схема установки приведена на рис. 5.2. От источника питания на схему поступает напряжение сети $\sim 220\text{В}$, 50 Гц. Напряжение, снимаемое со вторичной цепи пони-

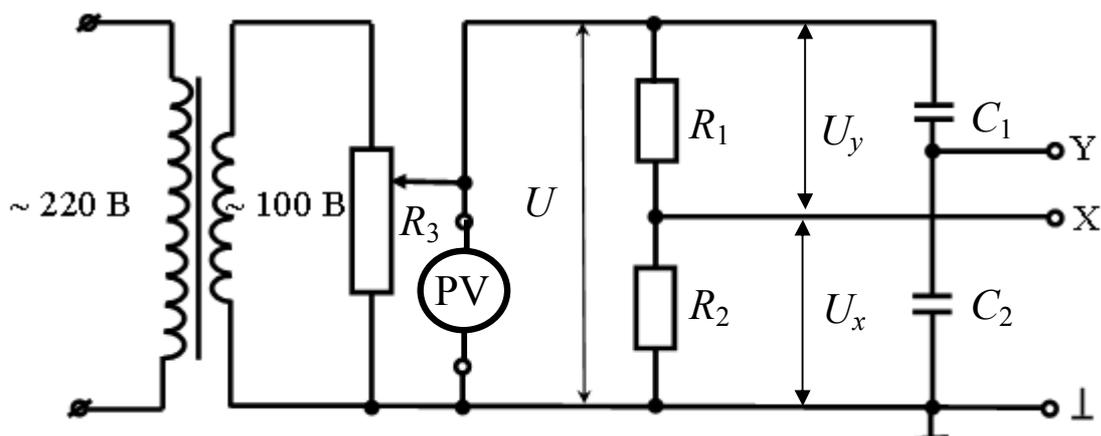


Рис. 5.2 Принципиальная электрическая схема установки

жающего трансформатора (220/100), через потенциометр R_3 , подается на делитель напряжения, состоящий из сопротивлений R_1 и R_2 . Параллельно делителю R_1 , R_2 включены последовательно два конденсатора, образующие емкостной делитель: исследуемый керамический сегнетоэлектрический конденсатор C_1 и эталонный конденсатор C_2 .

включении поля поляризованность растет в соответствии с кривой ОА. Соответствующее точке А значение напряженности E называется полем насыщения. Дальнейшее возрастание E приводит к возрастанию поляризованности P по прямой АА'.

Это возрастание обусловлено электронной поляризацией молекул сегнетоэлектрика. Соответствующее значение суммарной спонтанной и электронной поляризованности равно P_m . Для снятия остаточной поляризованности надо приложить электрическое поле противоположного направления, напряжённость которого называют коэрцитивной силой. Если максимальное значение напряженности электрического поля таково ($-E_m$), что поляризация достигает насыщения P_m , то получается петля гистерезиса, называемая петлей предельного цикла.

3.2.2. Методика измерений

На вертикально отклоняющие пластины осциллографа подается напряжение U_y с эталонного конденсатора:

$$U_y = \frac{q}{C_2}. \quad (5.1)$$

Так как C_1 и C_2 соединены последовательно, то они имеют одинаковый заряд q на обкладках. Величина этого заряда может быть выражена через поляризованность P в исследуемом конденсаторе C_1 :

$$P = \sigma = \frac{q}{S},$$

откуда

$$q = PS, \quad (5.2)$$

где σ – поверхностная плотность поляризационного заряда на обкладках конденсатора C_1 ; $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь обкладки, d – диаметр обкладок. С учетом формулы (5.2) напряжение

$$U_y = \frac{S}{C_2} P. \quad (5.3)$$

На горизонтально отклоняющиеся пластины подается напряжение U_x , снимаемое с сопротивления R_2 :

$$U_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U. \quad (5.4)$$

Это напряжение составляет часть полного напряжения U , подаваемого на делитель напряжения R_1, R_2 , а значит и на емкостной делитель C_1, C_2 . Емкости C_1 и C_2 подобраны таким образом, что $C_1 \ll C_2$. Поэтому с достаточной степенью точности ($\sim \frac{C_1}{C_2}$) можно

считать, что практически все напряжение U , снимаемое с потенциометра R_3 , на емкостном делителе приложено к сегнетоэлектрическому конденсатору C_1 . Действительно, так как $\frac{U_{C1}}{U_{C2}} = \frac{C_2}{C_1} \gg 1$, то

$U = U_{C1} + U_{C2} \approx U_{C1}$. Полагая электрическое поле внутри конденсатора C_1 однородным, имеем

$$U = Eh, \quad (5.5)$$

где E – напряженность электрического поля в сегнетоэлектрике; h – толщина слоя сегнетоэлектрика.

С учетом формулы (5.5) напряжение U_x подаваемое на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа, примет вид:

$$U_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} Eh. \quad (5.6)$$

Таким образом, в данной электрической схеме на вертикально отклоняющие пластины осциллографа подаётся периодически изменяющееся напряжение, пропорциональное поляризованности P (формула(5.3)), а на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа подаётся периодически изменяющееся напряжение, пропорциональное напряженности поля E в исследуемом сегнетоэлектрике (формула (5.6)), в результате чего на экране осциллографа получается петля гистерезиса (см. рис. 5.3).

Выражения (5.3), и (5.6) позволяют найти поляризованность P и напряженность E электрического поля в сегнетоэлектрике, если предварительно определены величины U_x, U_y и U . Напряжение U , определяется по показанию вольтметра PV. Напряжения U_y и U_x измеряются с помощью осциллографа и рассчитываются по формулам:

$$U_y = K_y y; \quad (5.7)$$

$$U_x = K_x x, \quad (5.8)$$

где y , x – отклонения электронного луча на экране осциллографа по осям Y и X соответственно; K_y , K_x – коэффициенты отклонения каналов Y и X осциллографа определяется по показанию вольтметра PV (если верхнюю клемму вольтметра подсоединить к клемме Y и X , соответственно).

Учитывая формулы (5.7) и (5.8), из выражений (5.3) и (5.6) получим

$$P = \frac{C_2 K_y}{S} y; \quad (5.9)$$

$$E = \frac{(R_1 + R_2) K_x}{R_2 h} x. \quad (5.10)$$

Амплитудное значение напряжённости поля E_0 найдём по формуле:

$$E_0 = \frac{U_0}{h} = \frac{\sqrt{2}}{h} U. \quad (5.11)$$

где U – действующее (эффе́ктивное) значение напряжения, измеряемое вольтметром PV .

Определив с помощью формул (5.9) и (5.11) значения P_0 , и E_0 , вершин нескольких циклов, можно найти значения ε при различных значениях E_0 , согласно выражению

$$\varepsilon = \frac{P_0}{\varepsilon_0 E_0} = \frac{C_2 h}{\sqrt{2} \varepsilon_0 S} \cdot \frac{K_y y_0}{U} \quad (5.12)$$

Полученные соотношения можно применить для исследования зависимости $\varepsilon = f(E)$ в сегнетоэлектрике.

3.3. Подготовка установки к работе

3.3.1. Установить ручку «Рег. U » на панели модуля ФПЭ–02 в среднее положение.

3.3.2. На передней панели осциллографа: отключить развёртку по X , что позволит осуществить измерение величины переменного напряжения и исследование зависимости между двумя внешними сигналами.

3.3.3. Вольтметр PV подключить к ФПЭ–02.

3.3.4. Собрать схему согласно рис. 5.1.

3.3.5. После проверки схемы преподавателем присоединить приборы к сети ~ 220 В, 50 Гц и включить тумблеры «Сеть» на па-

нелях приборов. На экране осциллографа должна появиться петля гистерезиса.

3.3.6. Установить петлю гистерезиса в центральную часть экрана осциллографа.

3.4. Определение остаточной поляризованности P_R , коэрцитивной силы E_m и поляризации насыщения P_m .

3.4.1. Установить петлю гистерезиса предельного цикла, полученную в задании 3.3.6, симметрично относительно оси Y . Измерить значение y_0 как половину высоты петли при $x = 0$; записать значение K_y , соответствующее этому измерению.

3.4.2. Установить петлю гистерезиса симметрично относительно оси X . Измерить значение x_c как половину ширины петли ($y = 0$).

3.4.3. Продолжить линейные участки петли предельного цикла (AA' и ДД' на рис. 5.3) до пересечения с осью Y . Измерить значение y_c как половину расстояния между точками пересечения экстраполированных участков с осью Y .

3.4.4. По формулам (5.9–5.10) рассчитать значения P_m и E_m . Оценить погрешности измерения P_m и E_m .

Указание. Значения параметров, необходимых для расчета: размеры конденсатора C_1 : $h = 0,35$ мм, $d = 5,4$ мм; $C_2 = 0,047$ мкФ, $R_1 = 470$ кОм, $R_2 = 11$ кОм.

3.5. Получение основной кривой поляризации и изучение зависимости $\varepsilon = f(E)$

3.5.1. Установить значение коэффициента для осциллографа $K_y = 2$ В/дел и получить петлю гистерезиса предельного цикла. Вольтметром PV измерить максимальное напряжение U и определить координаты вершин x_0, y_0 (в делениях сетки экрана осциллографа).

3.5.2. Уменьшить напряжение U с помощью ручки «Рег. U» на панели модуля и получить петлю предельного цикла, соответствующую такому амплитудному значению E_0 напряженности поля, ниже которого предельный цикл исчезает (т. е. начинают изменяться площадь петли и координаты ее вершин). Измерить это напряжение и соответствующие ему координаты вершин x_0, y_0 .

Таблица 5.1

Результаты измерений петли гистерезиса

№	U	x_0	y_0	K_y	$\frac{K_y y_0}{U}$	E_0	ε	$\Delta\varepsilon$	$(\varepsilon \pm \Delta\varepsilon)$
	В	дел	дел	В/дел		10^4 В/м	10^3	10^3	10^3
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									

3.5.3. Получить несколько частных циклов (не менее 7), уменьшая напряжение U ручкой «Рег. U » результаты всех измерений занести в таблицу 5.1.

3.5.4. Построить основную кривую поляризации в координатах P, E . Оценить погрешности измерений.

3.5.5. По формулам (5.11) и (5.12) рассчитать значения E_0 и ε для всех исследованных циклов переполяризации.

3.5.6. Построить график зависимости $\varepsilon = f(E_0)$.

3.6. Сформулировать выводы по полученным результатам.

VI. Лабораторная работа №5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ

1. Цель работы

Экспериментальное изучение зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля и потерь энергии в сегнетоэлектриках вследствие диэлектрического гистерезиса.

2. Подготовка к работе

Изучить теоретические положения, касающиеся данного явления по литературным источникам [1] – гл. 15, [2] – §§ 88–91, [3] – гл. II. Для выполнения работы студент должен знать: а) особенности сегнетоэлектриков, пьезоэлектриков и электретов; б) понятия диэлектрическая восприимчивость и проницаемость; в) причины возникновения петли гистерезиса при изменении поляризующего поля; г) ответы на вопросы для самоподготовки; д) особенности экспериментальной установки и порядок измерения; е) как провести оценку погрешности измерений.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторного стенда

На рис. 6.1 приведена структурная схема установки, с помощью которой изучаются свойства сегнетоэлектриков. На передней панели модуля ФПЭ-02 имеются: Рег. «U» – ручка регулирования напряжения; гнезда «PV» – для подключения вольтметра; гнезда «PO» («Y», «X», «⊥») – для подключения осциллографа.

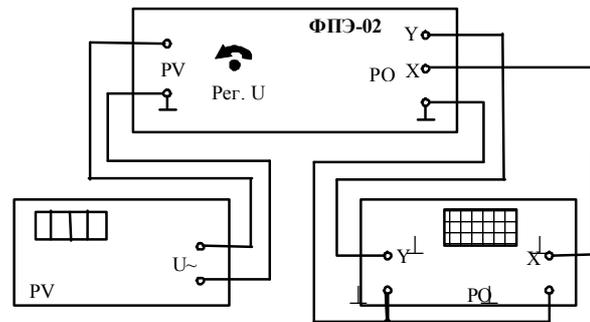


Рис. 6.1. Структурная схема установки: ФПЭ – 02 модуль: PV – цифровой вольтметр; PO – осциллограф

Принципиальная электрическая схема установки приведена на рис. 6.2. От источника питания на схему поступает напряжение сети

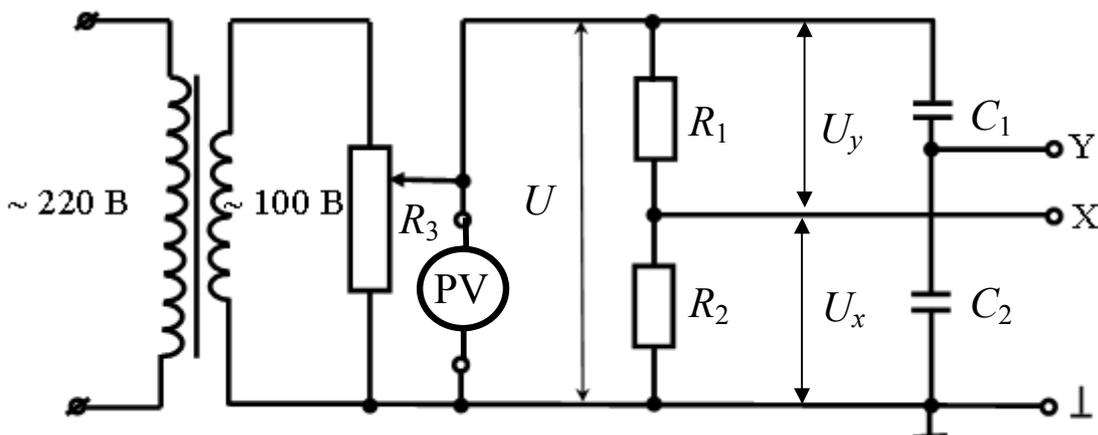


Рис. 6.2. Принципиальная электрическая схема установки

~220В, 50 Гц. Напряжение, снимаемое со вторичной цепи понижающего трансформатора (220/100), через потенциометр R_3 , подается на делитель напряжения, состоящий из сопротивлений R_1 и R_2 . Параллельно делителю R_1 , R_2 включены последовательно два конденсатора, образующие емкостной делитель: исследуемый керамический сегнетоэлектрический конденсатор C_1 и эталонный конденсатор C_2 .

Вольтметр PV обеспечивает измерение величины напряжения, подаваемого на делители R_1 , R_2 и C_1 , C_2 . Осциллограф РО служит для наблюдения и изучения картины поляризации сегнетоэлектрика в конденсаторе C_1 при подаче на него переменного гармонического напряжения.

Напряжение на зажимах конденсатора C_2 прямо пропорционально индукции поля D_0 , а напряжение на конденсаторе с сегнетоэлектрическим диэлектриком C_1 пропорционально напряженности E_0 электрического поля. Таким образом, на экране осциллографа будет воспроизводиться петля гистерезиса, то есть зависимость $D_0 = f(E_0)$.

3.2. Методика измерений и расчёта

3.2.1. Свойства сегнетоэлектриков

Сегнетоэлектриками называются кристаллические диэлектрики, которые обладают остаточной поляризованностью даже при отсутствии внешнего электрического поля (имеют области спонтанно поляризованные).

Сегнетоэлектрики отличаются от других диэлектриков рядом особенностей. Диэлектрическая проницаемость ϵ сегнетоэлектриков очень высока ($\sim 10^4$). Всем сегнетоэлектрикам присущ

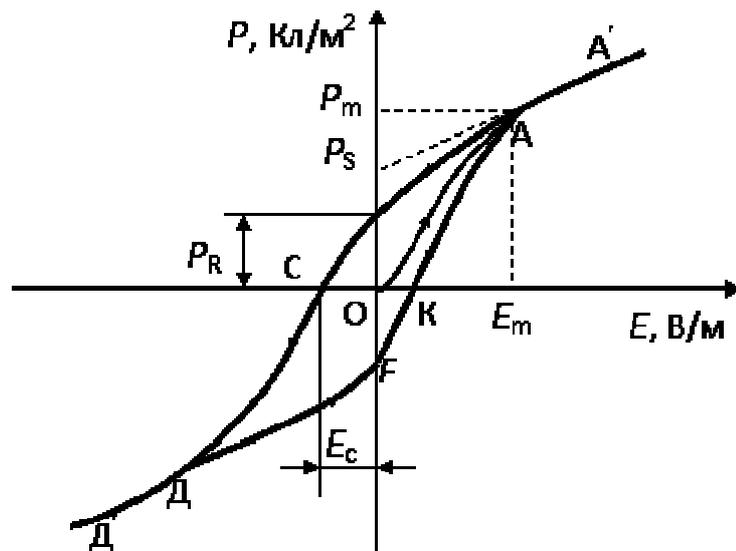


Рис. 6.3. Зависимость поляризованности P от напряженности поля E (петля гистерезиса)

гистерезис, представляющий собой неоднозначную зависимость поляризованности \vec{P} от напряженности электрического поля. Величина \vec{P} зависит не только от напряженности поля, но и от того, в каких полях до этого побывал сегнетоэлектрик.

На рис. 6.3 показана зависимость поляризованности P от напряженности поля E . При первоначальном включении поля поляризованность растет в соответствии с кривой ОА. Соответствующее точке А значение напряженности E называется полем насыщения. Дальнейшее возрастание E приводит к возрастанию поляризованности P по прямой АА'.

3.2.2. Методика измерений

На вертикально отклоняющие пластины осциллографа подается напряжение U_y с эталонного конденсатора:

$$U_y = \frac{q}{C_2}. \quad (6.1)$$

Так как C_1 и C_2 соединены последовательно, то они имеют одинаковый заряд q на обкладках. Величина этого заряда может быть выражена через поляризованность P в исследуемом конденсаторе C_1 :

$$P = \sigma = \frac{q}{S},$$

откуда

$$q = PS, \quad (6.2)$$

где σ – поверхностная плотность поляризационного заряда на обкладках конденсатора C_1 ; $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь обкладки, d – диаметр обкладок. С учетом формулы (6.2) напряжение

$$U_y = \frac{S}{C_2} P. \quad (6.3)$$

На горизонтально отклоняющиеся пластины подается напряжение U_x , снимаемое с сопротивления R_2 :

$$U_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U. \quad (6.4)$$

Это напряжение составляет часть полного напряжения U , подаваемого на делитель напряжения R_1, R_2 , а значит и на емкостной

делитель C_1, C_2 . Емкости C_1 и C_2 подобраны таким образом, что $C_1 \ll C_2$. Поэтому с достаточной степенью точности ($\sim \frac{C_1}{C_2}$) можно

считать, что практически все напряжение U , снимаемое с потенциометра R_3 , на емкостном делителе приложено к сегнетоэлектрическому конденсатору C_1 . Действительно, так как $\frac{U_{C1}}{U_{C2}} = \frac{C_2}{C_1} \gg 1$, то

$U = U_{C1} + U_{C2} \approx U_{C1}$. Полагая электрическое поле внутри конденсатора C_1 однородным, имеем

$$U = Eh, \quad (6.5)$$

где E – напряженность электрического поля в сегнетоэлектрике; h – толщина слоя сегнетоэлектрика.

С учетом формулы (6.5) напряжение U_x , подаваемое на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа, примет вид:

$$U_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} Eh. \quad (6.6)$$

Таким образом, в данной электрической схеме на вертикально отклоняющие пластины осциллографа подаётся периодически изменяющееся напряжение, пропорциональное поляризованности P (формула (6.3)), а на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа подаётся периодически изменяющееся напряжение, пропорциональное напряженности поля E в исследуемом сегнетоэлектрике (формула (6.6)), в результате чего на экране осциллографа получается петля гистерезиса (см. рис. 6.3).

Выражения (6.3), и (6.6) позволяют найти поляризованность P и напряженность E электрического поля в сегнетоэлектрике, если предварительно определены величины U_x, U_y и U . Напряжение U , определяется по показанию вольтметра PV . Напряжения U_y и U_x измеряются с помощью осциллографа и рассчитываются по формулам:

$$U_y = K_y y; \quad (6.7)$$

$$U_x = K_x x, \quad (6.8)$$

где y, x – отклонения электронного луча на экране осциллографа по осям Y и X соответственно; K_y, K_x – коэффициенты отклонения каналов Y и X осциллографа определяется по показанию вольтмет-

ра PV (если верхнюю клемму вольтметра подсоединить к клемме Y и X, соответственно).

Учитывая формулы (6.7) и (6.8), из выражений (6.3) и (6.6) получим

$$P = \frac{C_2 K_y}{S} y; \quad (6.9)$$

$$E = \frac{(R_1 + R_2) K_x}{R_2 h} x. \quad (6.10)$$

Амплитудное значение напряжённости поля E_0 найдём по формуле

$$E_0 = \frac{U_0}{h} = \frac{\sqrt{2}}{h} U, \quad (6.11)$$

где U – действующее (эффе́ктивное) значение напряжения, измеряемое вольтметром PV.

Полученные соотношения можно применить для нахождения тангенса угла диэлектрических потерь в сегнетоэлектрике и исследования зависимости $\varepsilon = f(E)$.

3.2.3. Потери энергии в сегнетоэлектриках вследствие диэлектрического гистерезиса

Потери энергии в диэлектриках, находящихся в переменном электрическом поле, называемые диэлектрическими, могут быть связаны со следующими явлениями: а) отставанием во времени поляризованности P от напряжённости поля E из-за молекулярно-теплового движения; б) наличием небольших токов проводимости; в) явлением диэлектрического гистерезиса. Во всех этих случаях происходит необратимое преобразование электрической энергии в теплоту.

Диэлектрические потери приводят к тому, что на участке цепи переменного тока, содержащем конденсатор, сдвиг по фазе между колебаниями тока и напряжения никогда не бывает точно равным $\frac{\pi}{2}$, а всегда оказывается меньше, чем $\frac{\pi}{2}$, на угол δ , называемый углом потерь. Диэлектрические потери в конденсаторах оцениваются тангенсом угла потерь

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{R}{X_p}, \quad (6.12)$$

где X_p – реактивно-ёмкостное сопротивление конденсатора; R – активное сопротивление потерь в конденсаторе, определяемое из условия: мощность, выделяемая на этом сопротивлении при прохождении по нему переменного тока, равна мощности потерь в конденсаторе.

Тангенс угла потерь есть величина, обратная добротности процесса Q :

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{Q}.$$

Для его определения, наряду с формулой (6.12), может быть использовано выражение

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W}, \quad (6.13)$$

где ΔW – потери энергии за период колебаний (в элементе цепи или во всей цепи); W – энергия колебаний (максимальная для элемента цепи и полная для всей цепи).

Воспользуемся формулой (6.13) для оценки потерь энергии, вызванных диэлектрическим гистерезисом. Эти потери, как и сам гистерезис, есть следствие необратимого характера процессов, ответственных за переориентацию спонтанной поляризации.

Перепишем соотношение (6.13) в виде

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{w_r}{w_0}, \quad (6.14)$$

где w_r – плотность потерь энергии переменного электрического поля на диэлектрический гистерезис в единице объема сегнетоэлектрика за время одного периода; w_0 – максимальная плотность энергии электрического поля в кристалле сегнетоэлектрика.

Так как объёмная плотность энергии электрического поля

$$w = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2, \quad (6.15)$$

то при увеличении напряженности поля на dE объёмная плотность энергии соответственно изменяется на

$$dw = E d(\varepsilon \varepsilon_0 E) = E dP.$$

Эта энергия затрачивается на переполяризацию единицы объёма сегнетоэлектрика и идет на увеличение его внутренней энергии, т. е. на его нагрев. Очевидно, что за один полный период величина диэлектрических потерь в единице объема сегнетоэлектрика определяется формулой

$$w_{\Gamma} = \oint E dP \quad (6.16)$$

и численно равна площади петли гистерезиса в координатах P , E . Максимальная плотность энергии электрического поля в кристалле составляет

$$w_0 = \frac{E_0 P_0}{2}, \quad (6.17)$$

где E_0 и P_0 , – амплитуды напряженности электрического поля и остаточной поляризованности сегнетоэлектрика.

Подставляя формулы (6.16) и (6.17) в формулу (6.14), получим следующее выражение для тангенса угла диэлектрических потерь в сегнетоэлектриках:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1 \oint E dP}{\pi E_0 P_0}. \quad (6.18)$$

С учётом выражений (6.9) и (6.10), получаем окончательно

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1 \oint E dP}{\pi E_0 P_0} = \frac{1 \oint x dy}{\pi x_0 y_0} = \frac{1}{\pi} \frac{S_n}{x_0 y_0}, \quad (6.19)$$

где S_n – площадь петли гистерезиса в координатах x , y ; x_0 , y_0 – координаты вершины предельной петли гистерезиса.

Для измерения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика ε используем тот факт, что основная кривая поляризации (кривая ОАА' на рис. 6.3) является геометрическим местом точек вершин циклов переполяризации, полученных при различных максимальных значениях E_0 напряженности поля в образце. Для каждой её точки можем записать соотношение

$$P_0 = D = \varepsilon \varepsilon_0 E, \quad (6.20)$$

где P_0 , E_0 – координаты вершин циклов переполяризации. Тогда, определив с помощью формул (6.9) и (6.11) значения P_0 , и E_0 , вершин нескольких циклов, можно из формулы (6.20) найти значения ε при различных значениях E_0 , согласно выражению

$$\varepsilon = \frac{P_0}{\varepsilon_0 E_0} = \frac{C_2 h}{\sqrt{2} \varepsilon_0 S} \cdot \frac{K_y y_0}{U} \quad (6.21)$$

и изучить зависимость $\varepsilon = f(E)$.

3.3. Подготовка установки к работе

3.3.1. Установить ручку «Рег. U» на панели модуля ФПЭ–02 в среднее положение.

3.3.2. На передней панели осциллографа: отключить развёртку по X, что позволит измерять величину напряжения и исследовать зависимости между двумя внешними сигналами.

3.3.3. Вольтметр PV подключить к ФПЭ–02.

3.3.4. Собрать схему согласно рис. 6.1.

3.3.5. После проверки схемы преподавателем присоединить приборы к сети ~ 220 В, 50 Гц и включить тумблеры «Сеть» на панелях приборов. На экране осциллографа должна появиться петля гистерезиса.

3.3.6. Установить петлю гистерезиса в центральную часть экрана осциллографа.

3.4. Определение тангенса угла диэлектрических потерь

3.4.1. Получить петлю гистерезиса предельного цикла. Для этого повернуть в крайнее правое положение ручку «Рег. U» на панели модуля и подобрать, если это необходимо, такой коэффициент отклонения K_y осциллографа, чтобы кривая гистерезиса предельного цикла целиком размещалась в пределах экрана, занимая не меньше половины экрана (по вертикали).

3.4.2. Установить кривую гистерезиса симметрично относительно осей Y и X и перерисовать ее с экрана осциллографа на миллиметровую бумагу по точкам, снятым с помощью сетки экрана.

3.4.3. Измерить координаты x_0 и y_0 вершины петли гистерезиса. Для этого, подводя каждую из вершин петли (точки А и Д на рис. 6.3) сначала к оси X, а затем к оси Y (центральным, градуированным линиям сетки экрана), определить их координаты $+x_0$ и $-x_0$, $+y_0$ и $-y_0$ и взять среднее арифметическое из модулей полученных значений. Записать значение коэффициента отклонения K_y при измерении y_0 .

3.4.4. Определить площадь петли гистерезиса, используя рисунок, выполненный на миллиметровой бумаге.

3.4.5. Вычислить $\operatorname{tg}\delta$ по формуле (6.19).

Указание. Значения параметров, необходимых для расчета: размеры конденсатора C_1 : $h = 0,35$ мм, $d = 5,4$ мм; $C_2 = 0,047$ мкФ, $R_1 = 470$ кОм, $R_2 = 11$ кОм.

3.5. Получение основной кривой поляризации и изучение зависимости $\varepsilon = f(E)$

3.5.1. Установить значение коэффициента для осциллографа $K_y = 2$ В/дел и получить петлю гистерезиса предельного цикла. Вольтметром РV измерить максимальное напряжение U и определить координаты вершин x_0, y_0 (в делениях сетки осциллографа).

3.5.2. Уменьшить напряжение U с помощью ручки «Рег. U» на панели модуля и получить петлю предельного цикла, соответствующую такому амплитудному значению E_0 напряженности поля, ниже которого предельный цикл исчезает. Измерить это напряжение и соответствующие ему координаты вершин x_0, y_0 .

Таблица 6.1

Результаты измерений петли гистерезиса и относительной проницаемости сегнетоэлектрика

№	U	x_0	y_0	K_y	$\frac{K_y y_0}{U}$	E_0	ε	$\Delta\varepsilon$	$(\varepsilon \pm \Delta\varepsilon)$
	В	дел	дел	В/дел		10^4 В/м	10^3	10^3	10^3
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									

3.5.3. Получить несколько частных циклов (не менее 10), уменьшая напряжение U ручкой «Рег. U» результаты всех измерений занести в таблицу 6.1.

3.5.4. Построить основную кривую поляризации в координатах P, E .

3.5.5. Оценить погрешности измерений.

3.5.6. По формулам (6.11) и (6.12) рассчитать значения E_0 и ε для всех исследованных циклов переполяризации.

3.5.7. Построить график зависимости $\varepsilon = f(E)$.

3.6. Сформулировать выводы по полученным результатам.

4. Вопросы для самоподготовки

4.1. В чем заключается поляризация диэлектриков?

4.2. Какая величина является количественной характеристикой поляризации? Как эта величина связана с напряжённостью электрического поля в диэлектрике?

4.3. В чём состоят особенности поляризации диэлектриков: электронной, ионной, ориентационной, спонтанной?

4.4. Каковы основные свойства сегнетоэлектриков?

4.5. Как получить петлю гистерезиса?

4.6. Как экспериментально определить диэлектрическую проницаемость сегнетоэлектрика.

VII. Список рекомендуемой литературы

1. Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 4-е изд., испр. – М. : Академия, 2007. – 720 с.

2. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 14-е изд., стереотип. – М. : Академия, 2007. – 560 с.

3. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие: в 3 т. Т. 2 : Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. – 8-е изд., стереотип. – СПб. : Лань, 2007. – 496 с.

Составители

Валерий Васильевич Дырдин
Анатолий Александрович Мальшин
Татьяна Ивановна Янина

ЭЛЕКТРОСТАТИКА
Комплекс К-310.2

Методические указания для лабораторных работ
по разделу физики «Электродинамика»
для студентов всех направлений и специальностей

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 20.04.2015. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Уч.-изд. л. 2,4.

Тираж 44 экз. Заказ .

КузГТУ, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр КузГТУ, 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4 А.