

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования Томский государственный  
университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Кафедра физики

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТВЕРДЫХ  
ДИЭЛЕКТРИКОВ**

Руководство к лабораторной работе по физике  
для студентов всех специальностей

**2019**

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования Томский государственный  
университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. каф физики

\_\_\_\_\_ Е.М.Окс  
14 января 2019 г.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТВЕРДЫХ  
ДИЭЛЕКТРИКОВ**

Руководство к лабораторной работе по физике  
для студентов всех специальностей

Разработчики:  
Проф. каф. физики  
\_\_\_\_\_ В.А. Бурдовицин

Доцент каф. физики  
\_\_\_\_\_ Ю.А. Бурачевский  
14 января 2019 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Вещества, которые не проводят электрический ток, называются *диэлектриками* или *изоляторами*. При помещении диэлектрика в электрическое поле весь его объем приобретает электрический (дипольный) момент. Это явление называется *поляризацией*. Целью данной работы является изучение явления поляризации и экспериментальное определение величины относительной диэлектрической проницаемости в твердых изоляторах.

## 1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Под действием электрического поля заряды разных знаков в каждой молекуле смещаются относительно друг друга. В результате каждая молекула будет обладать электрическим дипольным моментом

$$\vec{p}_i = \alpha \epsilon_0 \vec{E} \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  – поляризуемость молекулы;

$\vec{E}$  – напряжённость электрического поля в месте нахождения молекулы внутри диэлектрика.

Поляризация диэлектрического образца приводит к тому, что в приповерхностных слоях диэлектрика, прилегающих к электродам, появляются заряды противоположного электродам знака. Их поверхностная плотность заряда равна  $+\sigma'$  и  $-\sigma'$ . (Рис. 1.1). Это связанные заряды. Заряды диполей, расположенных внутри диэлектрика, компенсируют друг друга. В результате поляризации результирующее электрическое поле внутри диэлектрика  $E$  равно разности между внешним электрическим полем  $E_0$  и полем связанных зарядов  $E'$ .

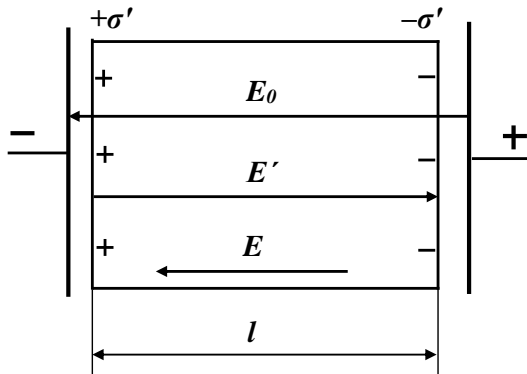


Рисунок 1.1 – Диэлектрик в однородном электрическом поле

Из рис. 1.1 следует, что образец в целом приобретает электрический момент, модуль которого равен

$$P = ql = \sigma' \cdot Sl, \quad (1.2)$$

где  $S$  – площадь заряженной поверхности;  
 $\sigma'$  – поверхностная плотность связанных зарядов;  
 $l$  – длина образца.

С другой стороны поляризация диэлектрика характеризуется дипольным моментом единицы объёма, который называется вектором поляризации.

$$\vec{p} = n \sum_{i=1} \vec{p}_i, \quad (1.3)$$

где  $n$  – концентрация элементарных диполей.

Модуль электрического момента всего образца

$$P = pV = pSl, \quad (1.4)$$

где  $V$  – объём образца.

Приравнявая (1.2) и (1.4) получим:

$$\sigma' \cdot Sl = pSl. \quad (1.5)$$

Отсюда  $p = \sigma'$ .

Или в общем случае

$$\sigma' = P_n, \quad (1.6)$$

где  $P_n$  – нормальная составляющая вектора поляризации.

*Поверхностная плотность связанных зарядов равна нормальной составляющей вектора поляризации в данной точке диэлектрика.*

Вектор поляризации можно записать и по-другому

$$\vec{P} = \alpha \cdot \epsilon_0 n \vec{E}. \quad (1.7)$$

Перепишем (1.7) в виде

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}, \quad (1.8)$$

где  $\chi = \alpha \cdot n$  – диэлектрическая восприимчивость. Макроскопическая безразмерная величина, характеризующая поляризуемость единицы объёма.

Напряженность поля для двух бесконечных заряженных плоскостей

$$E' = \frac{\sigma'}{\epsilon_0} = \frac{p}{\epsilon_0}. \quad (1.9)$$

$$\overline{E} = \overline{E}_0 + \overline{E}' .$$

Или в скалярной форме

$$E = E_0 - E' = E_0 - \frac{P}{\varepsilon_0} = E_0 - \frac{\chi \varepsilon_0 E}{\varepsilon_0} = E_0 - \chi E ,$$

или  $E + \chi E = E_0 .$

Отсюда

$$E = \frac{E_0}{1 + \chi} = \frac{E_0}{\varepsilon} . \quad (1.10)$$

Относительная диэлектрическая проницаемость

$$\varepsilon = 1 + \chi . \quad (1.11)$$

*Относительная диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз электрическое поле ослабляется внутри диэлектрика.*

## 2 АНАЛИЗ СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Наиболее простой способ экспериментального определения относительной диэлектрической проницаемости материалов состоит в измерении емкости плоского конденсатора, которая равна

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} , \quad (2.1)$$

где  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость,

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}$  - электрическая постоянная,

$S$  - площадь обкладки конденсатора,

$d$  - расстояние между обкладками.

Емкость можно определить, измеряя емкостное сопротивление конденсатора на переменном токе

$$X_s = \frac{1}{\omega C} , \quad (2.2)$$

где  $\omega = 2\pi\nu$  - круговая частота.

Значение  $X_c$  можно получить, подавая синусоидальное напряжение на цепь, состоящую из соединенных последовательно конденсатора  $C$  и резистора  $R$  с известным сопротивлением (рис. 2.1). Измеряя амплитуды входного напряжения  $U_0$  и выходного напряжения  $U_R$ , снимаемого с резистора, можно вычислить  $X_c$  и  $C$ .

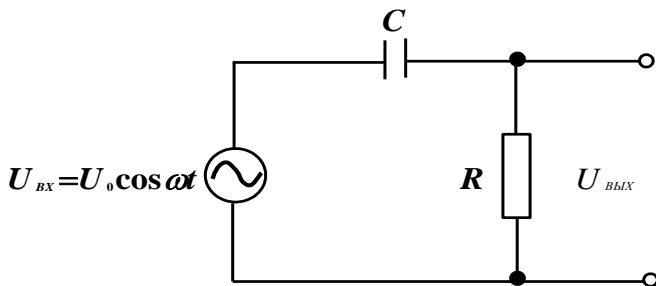


Рисунок 2.1 – Схема измерения

Для установления взаимосвязи между амплитудами напряжений на резисторе  $U_R$ , на конденсаторе  $U_C$  и выходного напряжения  $U_0$  рассмотрим их векторную диаграмму (рис. 2.2). Взаимная перпендикулярность векторов  $U_R$  и  $U_C$ , изображающих соответственно напряжение на резисторе и напряжение на конденсаторе, обусловлено отставанием по фазе на  $\pi/2$  напряжения на конденсаторе от тока  $I$ . Напряжение на резисторе совпадает по фазе с током. Согласно рис. 2.2, амплитуда входного напряжения  $U_0$  может быть найдена по правилу сложения векторов.

$$U_0 = \sqrt{I_0^2 R^2 + I_0^2 / \omega^2 C^2} = I_0 \sqrt{R^2 + 1 / \omega^2 C^2}, \quad (2.3)$$

где  $1/\omega C$  - сопротивление конденсатора на переменном токе.

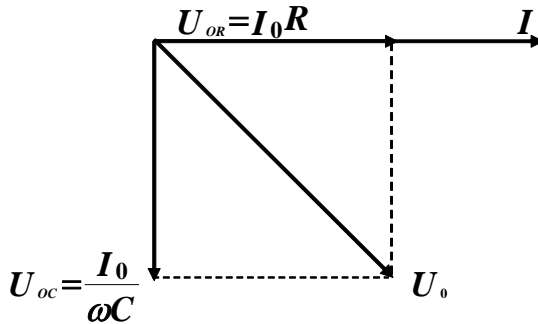


Рисунок 2.2 – Векторная диаграмма напряжений в схеме

Введем в рассмотрение коэффициент передачи  $K$

$$K = \frac{U_{OR}}{U_0} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}. \quad (2.4)$$

Выразим  $I_0$  из (2.3) и запишем для амплитуды напряжения на резисторе

$$U_{or} = I_0 R = U_0 R \omega C / \sqrt{1 + R^2 \omega^2 C^2}. \quad (2.5)$$

Наконец для коэффициента передачи получим

$$K = R \omega C / \sqrt{1 + R^2 \omega^2 C^2}. \quad (2.6)$$

Отсюда емкость может быть определена как

$$C = \frac{K}{\omega \cdot R} \times \frac{1}{\sqrt{1 - K^2}}. \quad (2.7)$$

Измеряя амплитуды входного и выходного напряжения и определяя коэффициент передачи  $K$  по их отношению (см. 2.4), можно по (2.7) найти емкость конденсатора. Однако, следует иметь в виду, что емкость, вычисленная с помощью выражения (2.7), включает в себя не только емкость конденсатора, но и паразитную емкость  $C_{ПАР}$  монтажа (рис. 2.3). Для устранения влияния  $C_{ПАР}$  в данной работе используется процедура измерения емкости конденсаторов с различной площадью диэлектрика, площадь

обкладок при этом остается неизменной. Пусть  $S_{y\partial}$  - площадь удаленной части диэлектрика,  $S$  - по-прежнему площадь обкладки конденсатора.

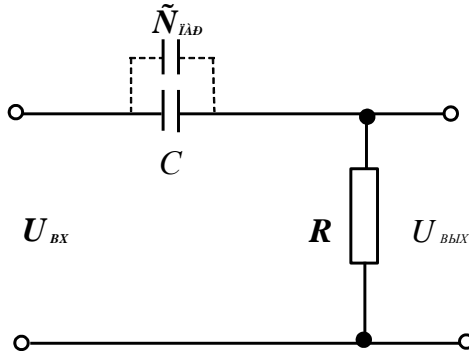


Рисунок 2.3 – Схема измерений с учетом паразитной емкости

Можно записать для емкости

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 (S - S_{y\partial})}{d} + \frac{\varepsilon_0 S_{y\partial}}{d} + C_{ПАР} \quad (2.8)$$

В первое слагаемое правой части выражения (2.8) входят  $\varepsilon$  и  $(S - S_{y\partial})$  - площадь оставшегося диэлектрика. Изучая зависимость емкости  $C$  от  $(S - S_{y\partial})$ , можно определить  $\varepsilon$ . В тоже время технически трудно осуществить измерение  $(S - S_{y\partial})$  в пределах более чем несколько процентов.

Поэтому выгоднее изучать зависимость  $C$  от  $S_{\partial\ddot{A}}$ . Выражение (2.8) в связи с этим следует привести к виду

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} - \frac{\varepsilon_0 (\varepsilon - 1) S_{y\partial}}{d} + C_{ПАР} \quad (2.9)$$

Как видно из (2.9), измеряемая емкость линейно уменьшается с ростом удаленной площади  $S_{y\partial}$ . График зависимости  $C = f(S_{y\partial})$  представляет собой прямую линию, по наклону которой может быть рассчитана относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$ .



### 3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

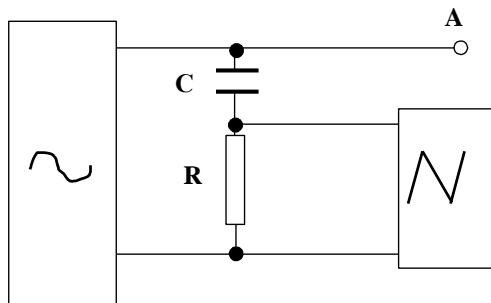




Рисунок 3.1 – Принципиальная схема установки

Схема, используемая для измерений, изображена на **рис. 3.1** и включает в себя генератор синусоидального сигнала , **RC** –цепочку и осциллограф  для измерения амплитуды входного и выходного сигналов. **R** = 68 кОм. Конструктивно схема размещена в настольном макете, в правой стороне его наклонной части. Роль генератора и осциллографа выполняет компьютер. Переключение осциллографа на измерение входного либо выходного сигналов производится тумблером на панели. Конденсатор представляет собой две параллельные металлические пластины площадью 100 см<sup>2</sup>, между которыми помещается пластина твердого диэлектрика. Диэлектрическая пластина вставляется в щель на правой стенке макета. Для облегчения измерений диэлектрическая пластина разлинована на участки площадью по 10 см<sup>2</sup> каждый.

#### 4 ЗАДАНИЕ

4.1 Наблюдать изменение амплитуды выходного сигнала при вытягивании диэлектрической пластины из конденсатора.

4.2 Измерить зависимость коэффициента передачи **K** от величины удаленной (вытянутой) площади  $S_{yd}$  диэлектрика.

4.3 Рассчитать емкость. Построить графики зависимости **C** от  $S_{yd}$   $C=f(S_{yd})$  и убедиться в линейности графика.

4.4 По наклону прямой определить диэлектрическую проницаемость диэлектрика и оценить погрешности измерений.

## 5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1 Запустить лабораторную работу.

5.1.1 Проверить макет. Для чего отключить все напряжения на лабораторном **макете**, расположенном справа от монитора: « $\sim 3$  В», « $\sim 28$  В», « $= 6$  В», « $= 15$  В», « $= 30$  В». Внешний вид лабораторного макета представлен на **рис. 5.1**.

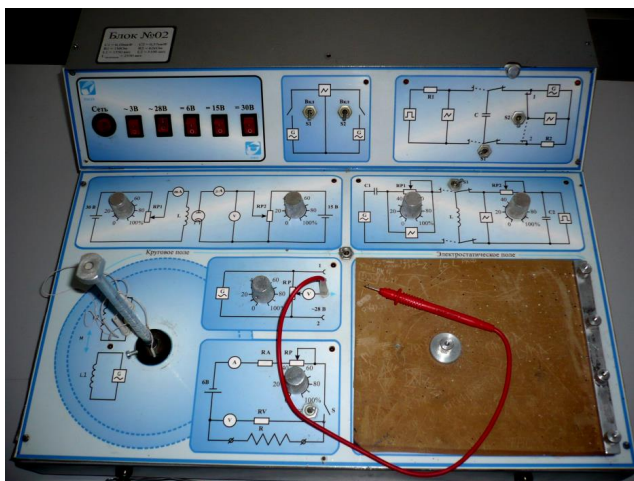


Рисунок 5.1 – Внешний вид лабораторного макета

5.1.2 Тумблер  $S1$  на схеме (**Рис. 5.2**), расположенной вверху справа на панели **макета**, перевести в правое положение.

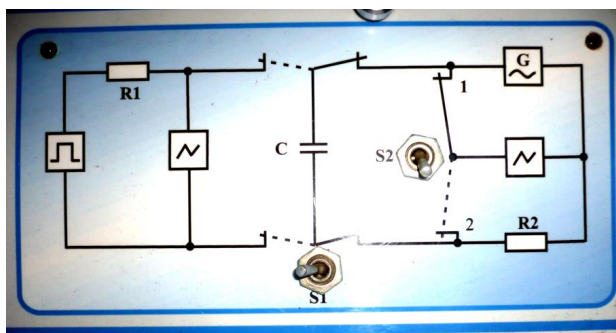


Рисунок 5.2 – Схема измерений на макете

5.1.3 В щель, находящуюся сверху на боковой правой панели **макета** вставить исследуемую пластину твёрдого диэлектрика. Это прямоугольная пластина площадью 100 см<sup>2</sup>. Для этого справа сверху на **макете**, над схемой нажать кнопку и вставить пластинку диэлектрика до упора.



5.1.4 Включить питание **макета**, нажав кнопку «Сеть».

5.1.5 Включить питание компьютера. Для этого нажать кнопку «Сеть» на системном блоке компьютера и дождаться загрузки Windows.

5.1.6 На рабочем столе (экране монитора после загрузки) щелкнуть дважды левой кнопкой мышки на ярлыке папки «Лаборатория». В открывшемся окне выбрать из списка лабораторных работ «Определение относительной диэлектрической проницаемости твердых диэлектриков» и по ней дважды щелкнуть левой кнопкой мышки. Во вновь открывшемся окне появится **стенд (панель)** данной лабораторной работы, на котором расположены экран осциллографической трубки, электронная таблица (**отчёт**) и набор кнопок управления (**Рис. 5.3**). На **макете** (**Рис. 5.1** и **Рис. 5.2**), в верхнем правом углу схемы измерений загорится индикатор. На экране осциллографа должна появиться синусоида. Если вся система работает, то в левом нижнем углу экрана монитора появится надпись «**Устройство готово**».

5.2 Проведение измерений.

5.2.1 По указанию преподавателя установить частоту сигнала. Для этого установить курсор мышки на указатель потенциометра «Частота», нажав и, удерживая левую кнопку мышки, установить нужную частоту поворачивая, ручку потенциометра.

5.2.2 Измерить амплитуду входного сигнала. Для этого тумблер **S2** на схеме макета переключить вверх. На **стенде** (**Рис. 5.3**) нажать кнопку «**Измерить напряжение генератора**». Нижнюю горизонтальную красную линию совместить с отрицательным значением амплитуды входного напряжения (с нижней границей синусоиды). Для этого установить курсор мышки на маркер нижней горизонтальной красной линии (  ), нажав и, удерживая левую кнопку мышки на горизонтальной части маркера и установить горизонтальную красную линию в нужное положение. Аналогичным образом совместить верхнюю красную горизонтальную линию с положительным значением амплитуды входного напряжения (с верхней границей синусоиды). Для этого установить курсор мышки на маркер верхней горизонтальной красной линии (  ), нажав и, удерживая левую кнопку мышки на горизонтальной части маркера и установить горизонтальную красную линию в нужное положение.

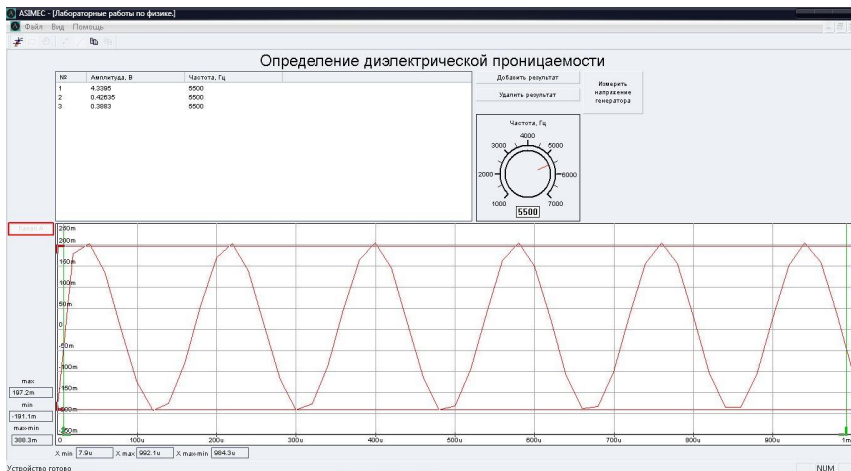


Рисунок 5.3 – Вид экрана монитора

5.2.3 Нажать кнопку в электронной таблице «Добавить результат». В электронной таблице появятся значения начального напряжения  $U_0$  ( $U_{Bx}$ ).

5.2.4 Выключить измерение входного сигнала. Для этого на стенде левой кнопкой мышки нажать кнопку «Измерить напряжение генератора».

5.2.5 Измерить амплитуду выходного сигнала, для чего тумблер  $S_2$  на схеме макета переключить вниз. После этого, провести измерения амплитуды сигнала аналогично изложенному в п. 5.2.2, переместить с помощью мышки горизонтальные красные линии к верхней и нижней границам синусоиды. Нажать мышью кнопку «Добавить результат».

5.2.6 Вытянуть пластину диэлектрика на 1,5 см до риски и произвести измерения по п. 5.2.5. После чего еще несколько раз вытягивать пластину на 1,5 см до риски, всякий раз повторяя измерения по п. 5.2.5. После каждого измерения записать его результаты нажимая мышью кнопку «Добавить результат».


5.2.7 Если записанный в электронный журнал результат неверен, то его можно удалить. Для этого выделяют ошибочную запись и нажимают кнопку «Удалить результат».

5.2.8 Результаты из таблицы на экране монитора переписать в рабочую тетрадь (Таблица 5.1).

5.2.9 После завершения измерений вытащить образец. С помощью микрометра измерить несколько раз его толщину. Результаты занести в таблицу.

Таблица 5.1 – Результаты измерений

Назв. диэл.	№ изм.	$S_{уд}, \text{см}^2$	$U_{вх}, \text{В}$	$U_{вых}, \text{В}$	$K$	$C, \text{пФ}$	$d, \text{мм}$	Примеч.
	1							$\varepsilon(R) = 10\%$ ; $\varepsilon(U) = 5\%$ ; $\sigma(d) = 0,01 \text{ мм}$ ; $\varepsilon(S_{уд}) = 5\%$ ; $\varepsilon(v) = 1\%$ .
	2							
	3							
	4							
	5							
	6							

5.2.10 Выключить **стенд**. Для этого указатель мышки установить на кнопку  на экране монитора и щелкнуть левой кнопкой мышки один раз. После этого закрыть все окна на экране монитора.

5.2.11 Выключить компьютер. Для этого щелкнуть левой кнопкой мышки по расположенной в левом нижнем углу экрана кнопке «Пуск». В открывшемся меню щелкнуть левой кнопкой мышки по строке «Завершение работы»,

5.2.12 Выключить питание **макета**, нажав кнопку «Сеть».

## 6 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

6.1. Рассчитать значения коэффициента передачи  $K$  и емкости  $C$  по формулам (2.4) и (2.7) и занести в таблицу.

6.2. Определить погрешности измерений емкости  $C$ .

6.3. Нанести экспериментальные точки на график в координатах  $C, S_{уд}$ . Здесь же указать погрешности в виде доверительных интервалов.

6.4. Провести прямую по экспериментальным точкам и определить ее угловой коэффициент.

6.5. Имея в виду, что согласно (2.9) угловой коэффициент равен  $\frac{\varepsilon_0(\varepsilon - 1)}{d}$ , определить диэлектрическую проницаемость каждого диэлектрика.

6.6. Сравнить полученные значения  $\varepsilon$  между собой и с табличными значениями.

6.7. Сделать вывод по работе, в котором привести полученные значения  $\epsilon$  с учетом погрешностей, а также отметить возможности и точность методики и указать возможные причины нелинейности зависимости  $C$  от  $S_{уд}$  отклонения полученных значений  $\epsilon$  от табличных величин.

## 7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 7.1. В чем состоит цель работы?
- 7.2. Как подготовить макет и компьютер к выполнению работы?
- 7.3. В чем состоит идея определения  $\epsilon$  в данной работе.
- 7.4. Поясните работу измерительной схемы.
- 7.5. Что такое коэффициент передачи?
- 7.6. Как измеряется амплитуда сигнала в настоящей работе?
- 7.7. Как рассчитывается емкость конденсатора?
- 7.8. Как оценить погрешность определения емкости?
- 7.9. Как оценить погрешность определения  $\epsilon$ ?
- 7.10. Сформулируйте физический смысл относительной диэлектрической проницаемости.
- 7.11. В чем состоит физическая сущность явления поляризации диэлектрика?
- 7.12. По какой причине возникает внутреннее электрическое поле в диэлектрике, как формируется результирующее поле?
- 7.13. Сформулируйте физический смысл вектора поляризации.
- 7.14. Почему помещение диэлектрика между обкладками конденсатора увеличивает его емкость?

## 8 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 8.1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. – М.: Наука, Астрель, АСТ, 1998, 2001, 2002, 2004.
- 8.2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1978.
- 8.3. Мухачёв В.А., Магазинников А.Л. Оценка погрешности измерений: Методические указания для студентов всех специальностей. – Томск: ТУСУР, 2009.
- 8.4. Чужков Ю.П. Общие требования и правила оформления отчета о лабораторной работе по физике. Методические указания. – Томск: ТУСУР, 2006.