

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

Кафедра физики

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТВЕРДЫХ  
ДИЭЛЕКТРИКОВ**

Руководство к компьютерной лабораторной работе  
для студентов всех специальностей

2012

Министерство образования и науки Российской Федерации  
 Федеральное государственное бюджетное образовательное  
 учреждение высшего профессионального образования  
 Томский государственный университет систем управления и  
 радиоэлектроники (ТУСУР)

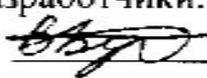
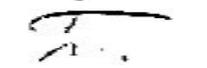
Кафедра физики

УТВЕРЖДАЮ  
 Заведующий кафедрой физики  
 Е.М. Окс  
 « 02 » 01 2012 г.

Физика

**Определение относительной диэлектрической проницаемости  
 твердых диэлектриков**

Руководство к компьютерной лабораторной работе по физике  
 для студентов всех специальностей

Разработчики: профессор каф. физики  
 В.А. Бурдовицин  
 доцент каф. физики  
 Ю.А. Бурачевский

---

« 2 » января 2012 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 внешнего электрического поля заряды разных знаков в каждой молекуле смещаются относительно друг друга. В результате образуется система двух одинаковых по величине, но разных по знаку зарядов, называемая электрическим диполем, который характеризуется электрическим дипольным моментом.

$$\vec{p} = q\vec{l} , \quad (1.1)$$

где  $q$ - заряд,

$l$ - расстояние между зарядами.

Установлено, что каждая молекула будет обладать электрическим дипольным моментом

$$\vec{p} = \alpha \epsilon_0 \vec{E} \quad (1.2)$$

где  $\alpha$  - поляризуемость молекулы,

$E$  - напряженность электрического поля в месте нахождения молекулы внутри диэлектрика.

Если диэлектрик поместить между двумя металлическими плоскостями, которые называются обкладками (**рис. 1.1**), то в результате поляризации в слоях диэлектрика, прилегающих к обкладкам, возникнут нескомпенсированные заряды, называемые *связанными*. Их поверхностная плотность равна  $+\sigma'$  и  $-\sigma'$ .

Связанные заряды создают внутреннее электрическое поле  $\vec{E}'$ , направленное в сторону противоположную внешнему полю  $\vec{E}_0$ . В результате поляризации результирующая напряженность электрического поля внутри диэлектрика  $\vec{E}$  равна сумме напряженностей  $\vec{E}_0$  и  $\vec{E}'$ .

Вектор поляризации (дипольный момент единицы объема) равен

$$\vec{P} = n\alpha\epsilon_0\vec{E} , \quad (1.3)$$

где  $n$  - концентрация молекул;

$\alpha$  - поляризуемость молекулы.

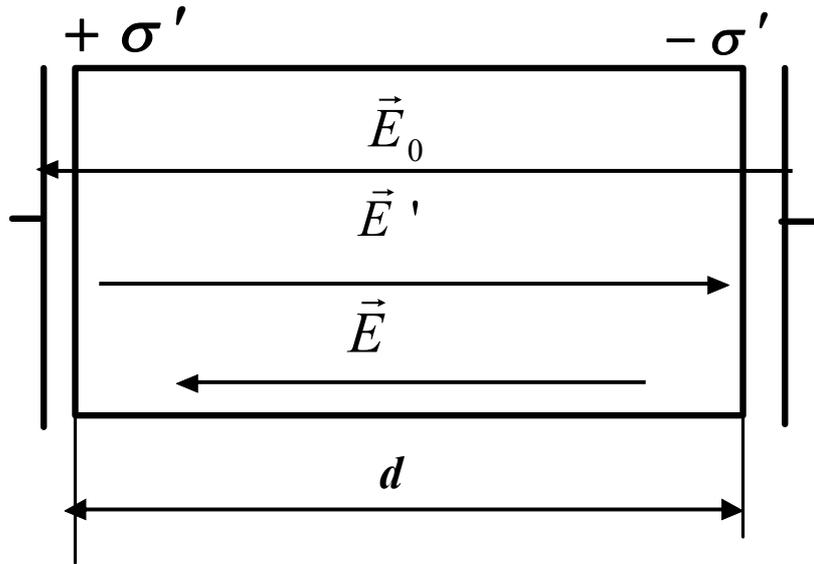


Рисунок 1.1– Диэлектрик в однородном электрическом поле.

Перепишем последнее выражение в виде

$$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E} , \quad (1.4)$$

где  $\chi = n\alpha$  - диэлектрическая восприимчивость, макроскопическая безразмерная величина, характеризующая поляризацию единицы объема.

Поле в диэлектрике

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' , \quad (1.5)$$

Напряженность поля связанных зарядов  $E'$  может быть выражена по известной формуле для поля между заряженными плоскостями

$$E' = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0} .$$

Дипольный момент всего диэлектрика  $P$  выражается

$$D = \sigma' Sd ,$$

где  $d$  – толщина диэлектрика. Тогда модуль вектора поляризации равен

$$P = \frac{D}{Sd} = \frac{\sigma' Sd}{Sd} = \sigma' .$$

Для  $E'$  получаем

$$E' = \frac{P}{\varepsilon_0} . \quad (1.6)$$

Поле в диэлектрике в скалярной форме

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

или  $E + \chi E = E_0$ . Отсюда

$$E = \frac{E_0}{1 + \chi} = \frac{E_0}{\varepsilon}. \quad (1.7)$$

Величина  $\varepsilon = 1 + \chi$  называется *относительной диэлектрической проницаемостью*. Она 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,

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

$S$  - площадь обкладки конденсатора,

$d$  - расстояние между обкладками.

Емкость можно определить, измеряя емкостное сопротивление конденсатора на переменном токе

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

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

Значение  $X_c$  можно получить, подавая синусоидальное напряжение на цепь, состоящую из последовательно соединенных 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  $C$ .

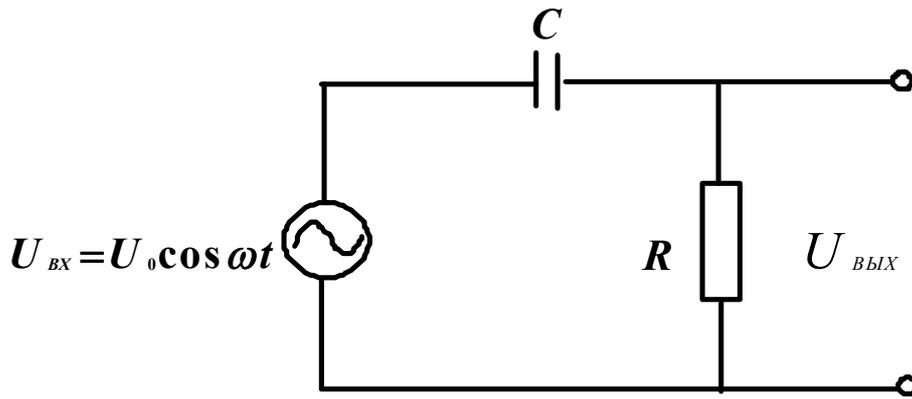


Рисунок 2.1 – Схема измерения

Для установления взаимосвязи между амплитудами напряжений на резисторе  $U_{0R}$ , на конденсаторе  $U_{0C}$  и входного напряжения  $U_0$  рассмотрим их векторную диаграмму (рис. 2.2). Взаимная перпендикулярность векторов  $\vec{U}_{0R}$  и  $\vec{U}_{0C}$ , изображающих соответственно напряжение на резисторе и напряжение на конденсаторе, обусловлена 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.

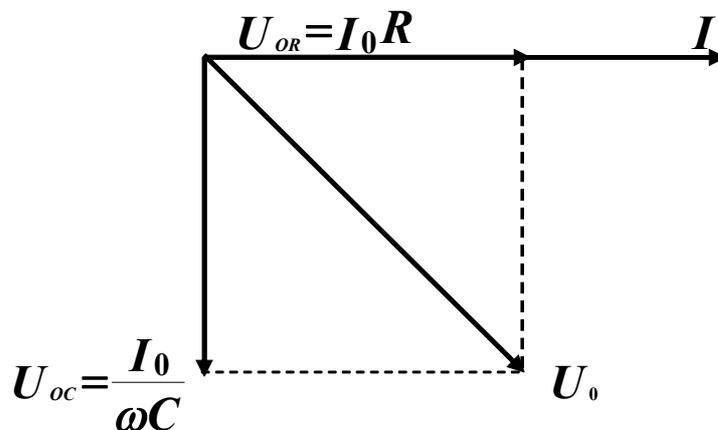


Рисунок 2.2 – Векторная диаграмма напряжений в схеме

Введем в рассмотрение коэффициент передачи  $K$

$$K = \frac{U_{OR}}{U_0}, \quad (2.4)$$

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

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

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  $S_{уд}$  - площадь удаленной части диэлектрика,  $S$  - по-прежнему площадь обкладки конденсатора.

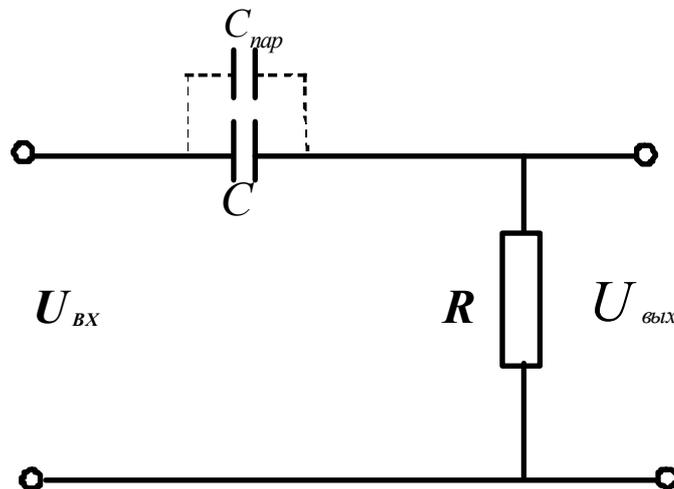


Рисунок 2.3 – Схема измерений с учетом паразитной емкости

Можно записать для емкости

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

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 то же время технически трудно осуществить изменение  $(S - S_{y\partial})$  в пределах более чем несколько процентов.

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

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

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

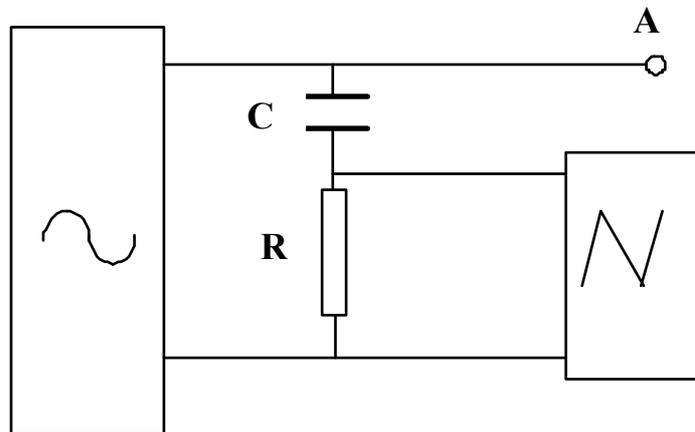


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема установки

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** = 62 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 вы-

ходного сигналов производится тумблером  $S_2$  на панели. Конденсатор представляет собой две параллельные металлические пластины площадью  $100 \text{ см}^2$ , 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  $10 \text{ см}^2$  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 для трех разных диэлектриков.
- 4.3 Рассчитать емкость. Построить графики зависимости  $C$  от  $S_{yd}$  и убедиться в линейности графиков для каждого диэлектрика.
- 4.4 По наклону прямых определить диэлектрические проницаемости диэлектриков и оценить погрешности измерений.

#### 5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 5.1 Включить лабораторный макет (Рис. 5.1) кнопкой «Сеть» на его передней стенке.

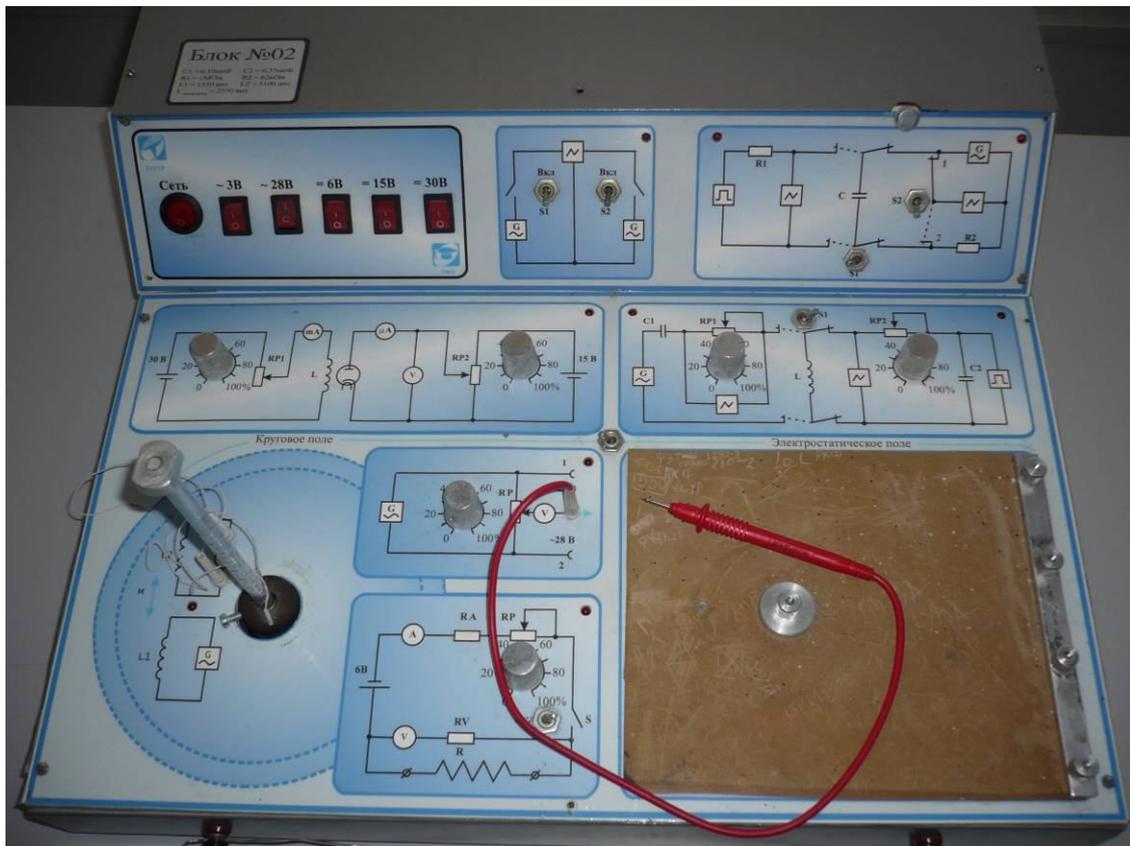


Рисунок 5.1 – Вид лабораторного макета

5.2 Вставить полностью в щель с правой стороны макета образец (диэлектрическую пластину), предварительно нажав кнопку на правой верхней вертикальной панели макета.

5.3 Включить компьютер. Дождаться его полной загрузки.

5.4 Войти в «среду» «Реально-виртуальная лаборатория», для чего на экране монитора установить указатель мыши на значок «Лаборатория»  и нажать дважды на левую кнопку. При этом появляется меню с набором лабораторных работ.

5.5 Выбрать название работы и щелкнуть по строке мышью. На экране появится рабочий стенд, включающий экран осциллографа, рукоятку регулировки частоты генератора, а также таблицу для занесения измеренных значений амплитуды и частоты. На макете загорается сигнальная лампочка, указывающая выбранную работу. Переключатель типа работы на макете следует перевести в положение работы с переменным сигналом. Для этого тумблер *S1* перевести в правое положение (См. **рис. 5.2**).

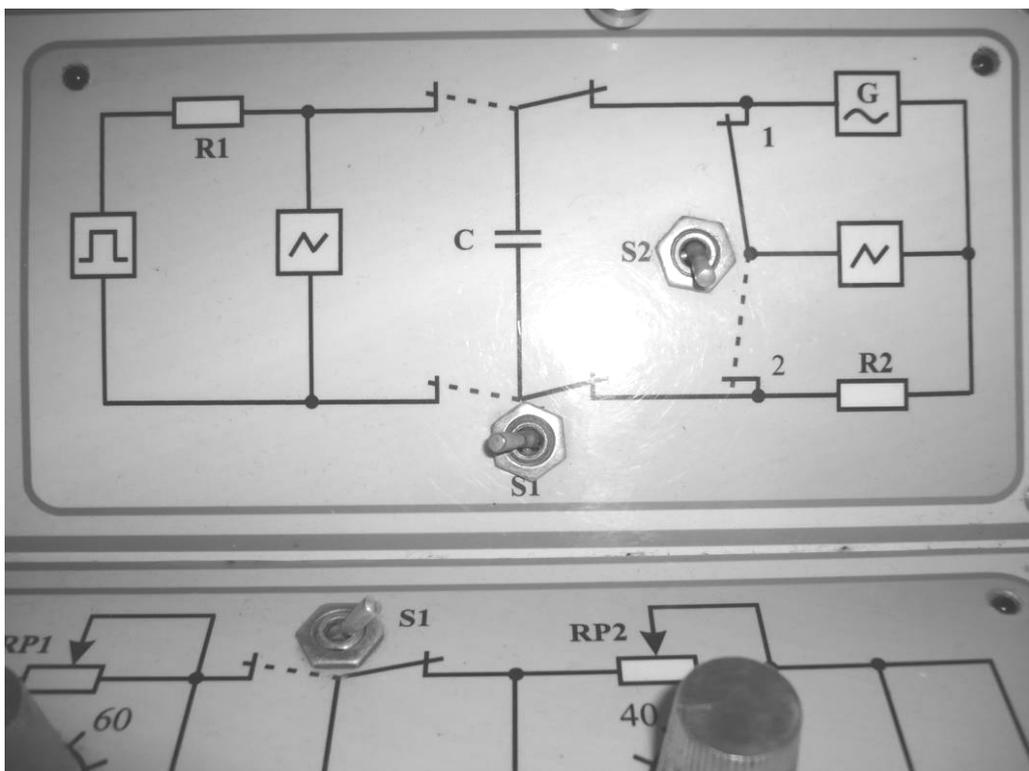


Рисунок 5.2 – Вид части лабораторного макета с данной лабораторной работой

5.6 Включить питание стенда, для чего активизировать мышью кнопку . На экране осциллографа должна появиться синусоида. Мышь установить частоту сигнала по указанию преподавателя.

5.7 Измерить амплитуду входного сигнала. Для этого тумблер **S2** на схеме макета переключить вверх. Указатель мышки установить на нижнюю горизонтальную линию, при этом ниже линии появится указатель (  $L$  ). Нажать и, удерживая левую кнопку мышки совместить эту горизонтальную линию с нижней границей синусоиды. Далее установить указатель мышки на верхнюю горизонтальную линию (при этом выше линии появится указатель (  $r$  )). Нажать и, удерживая левую кнопку мышки совместить горизонтальную линию с верхней границей синусоиды. Эта точка даст значение

входного сигнала. Нажать мышью кнопку  «Передача данных в таблицу».

5.8 Измерить амплитуду выходного сигнала, для чего тумблер **S2** на схеме макета переключить вниз. После этого, аналогично изложенному в п. 5.7, взять мышью скобки на экране и вновь подвести их к верхней и нижней

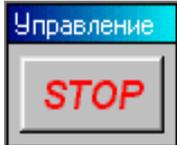
границам синусоиды. Нажать мышью кнопку  «Передача данных в таблицу».

5.9 Вытянуть пластину диэлектрика на 1,5 см до риски и произвести измерения по п. 5.8. После чего еще несколько раз вытягивать пластину на 1,5 см до риски, всякий раз повторяя п. 5.8.

5.10 Результаты из таблицы на экране монитора переписать в рабочую тетрадь (**Таблица 5.1**) или переслать в *Excel* кнопкой на экране монитора.

5.11 Повторить пп. 5.7 – 5.9 для двух других диэлектриков, всякий раз измеряя толщину  $d$  диэлектрика и занося значения в таблицу 5.1.

5.12 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, установив указатель

мышки кнопку  и щелкнуть левой кнопкой один раз.

5.13 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 «Завершить работу», а затем по кнопке «ОК».

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

**ВНИМАНИЕ!** Включение и выключение питания **макета** при включённом компьютере может привести к зависанию компьютера.

Таблица 5.1 – Результаты измерений

Назв. диэл.	№ изм.	$S_{уд}$	$U_{вх}$	$U_{вых}$	$K$	$C$	$d$	Примеч.
	1 2 • 6							$\varepsilon(R)=10\%$
	1 2 • 6							
	1 2 • 6							

## 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  $\varepsilon$  с учетом погрешностей, отметить возможности и точность методики, а также указать возможные причины нелинейности зависимости  $C$  от  $S_{уд}$  и отклонения полученных значений  $\varepsilon$  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  $\varepsilon$  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.