

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 α - 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;

α - поляризуемость молекулы.

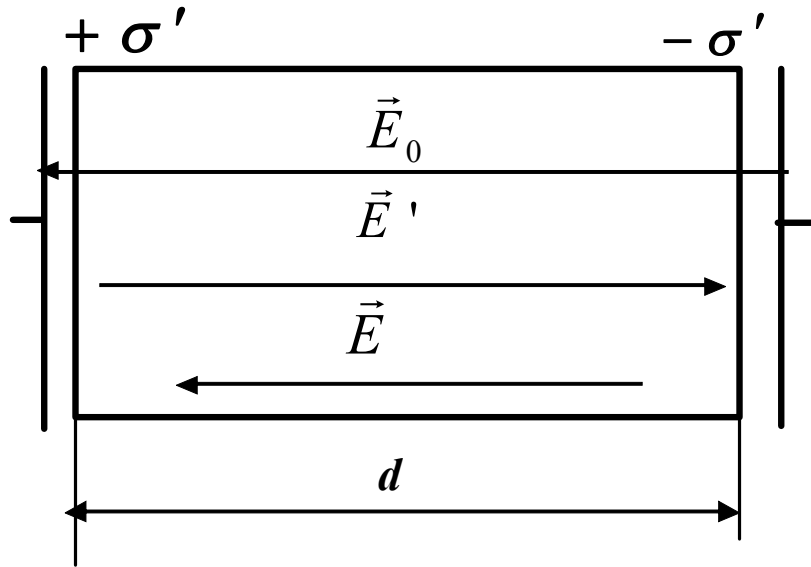


Рисунок 1.1– Диэлектрик в однородном электрическом поле.

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 ε - 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 .

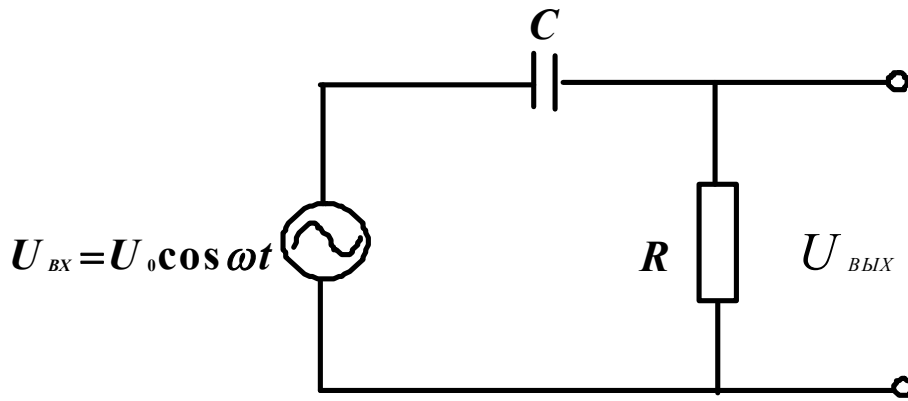


Рисунок 2.1 – Схема измерения

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 $\frac{\pi}{2}$ 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.

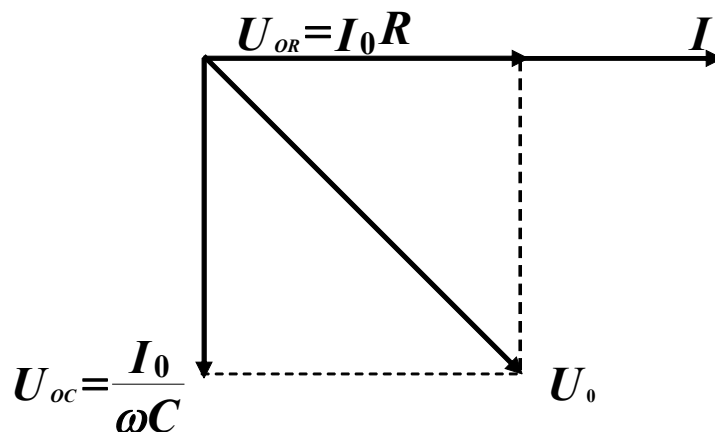


Рисунок 2.2 – Векторная диаграмма напряжений в схеме

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.

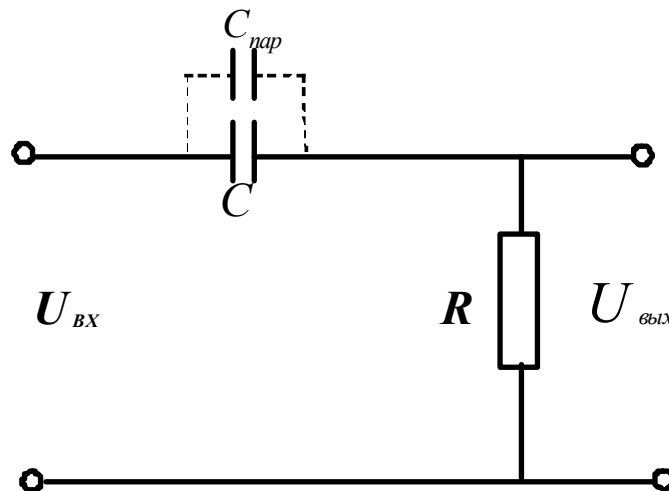


Рисунок 2.3 – Схема измерений с учетом паразитной емкости

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 ε и $(S - S_{y\partial})$ - площадь оставшегося диэлектрика. Изучая зависимость емкости C от $(S - S_{y\partial})$, можно определить ε . 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 ε .

3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

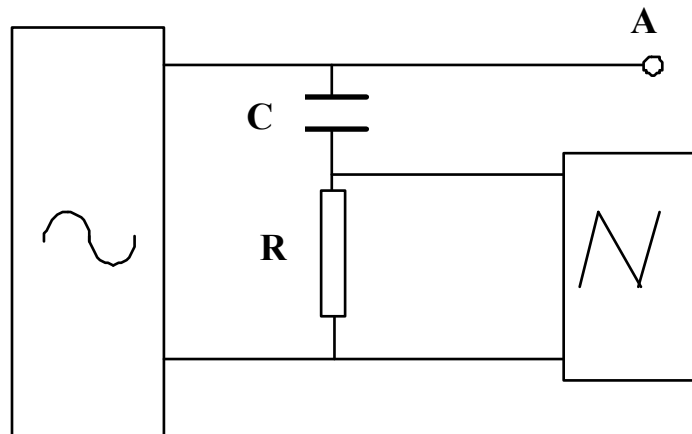




Рисунок 3.1 – Принципиальная схема установки

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 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 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.

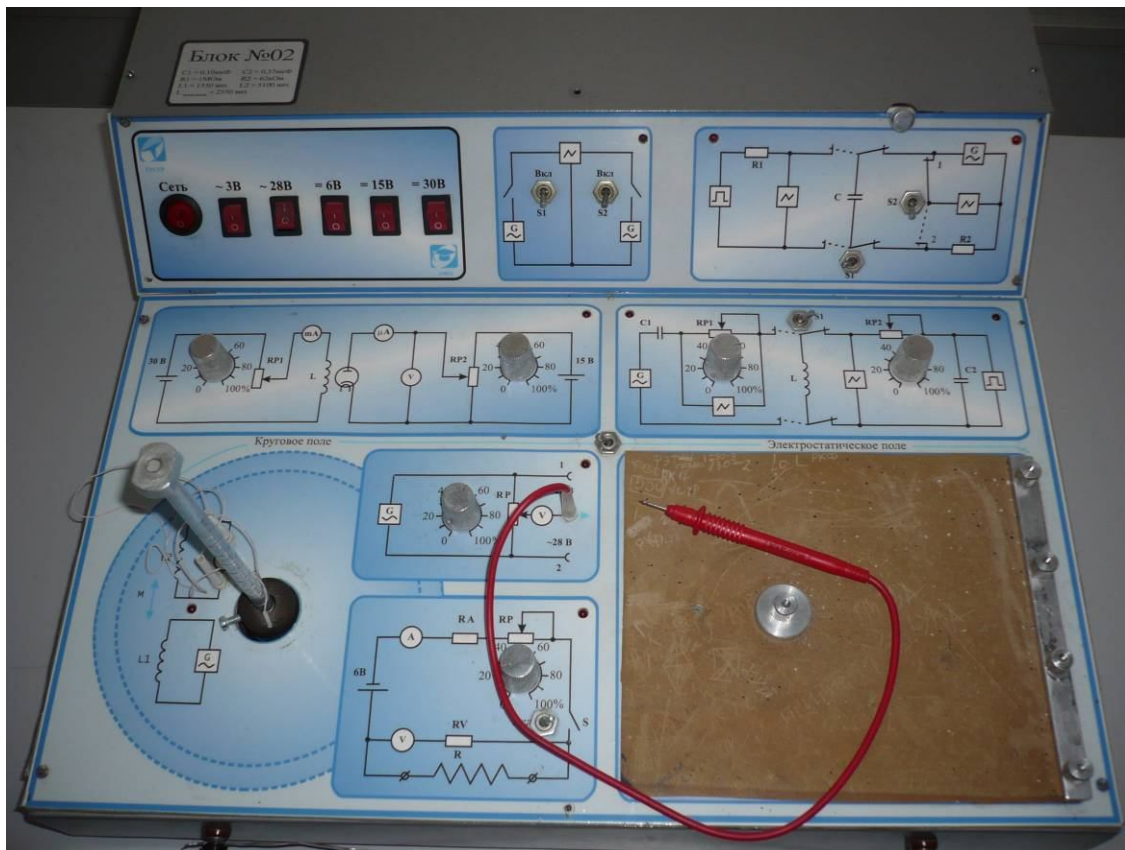



Рисунок 5.1 – Вид лабораторного макета

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**).

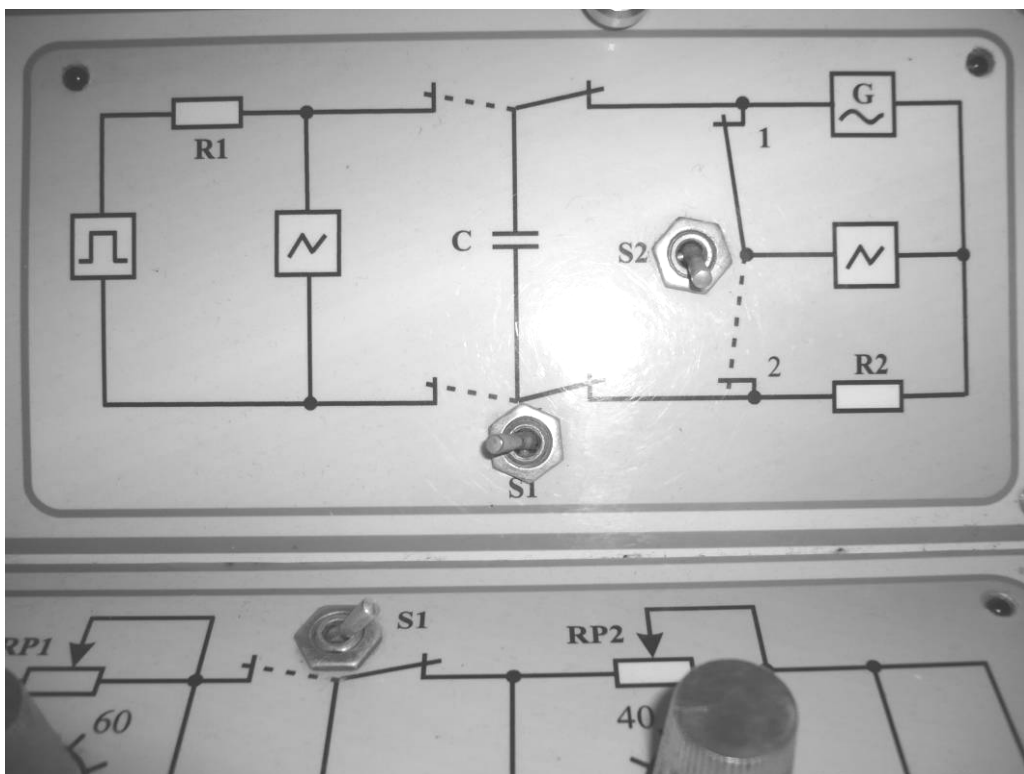





Рисунок 5.2 – Вид части лабораторного макета с данной лабораторной работой

5.6 Включить питание стенда, для чего активизировать мышью кнопку . На экране осциллографа должна появиться синусоида. Мышью 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

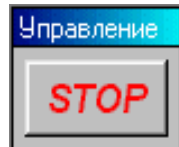
границам синусоиды. Нажать мышью кнопку  «Передача данных в таблицу».

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 ε между собой и с табличными значениями.

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