

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

В. А. Бурдовицин, Ю. А. Бурачевский

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

Методические указания по выполнению
компьютерной лабораторной работе

Томск
2020

УДК 537.226.1
ББК 22.3
Б 912

Рецензент
Орловская А. В., ст. преподаватель

Одобрено на заседании каф. физики, протокол № 83 от 06.03.2020.

Бурдовицин, Виктор Алексеевич

Б 912 **Определение относительной диэлектрической проницаемости твердых диэлектриков : метод. указания по выполнению компьютерной лабораторной работе / В. А. Бурдовицин, Ю. А. Бурачевский. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – 16 с.**

Рассматривается явление поляризации и определение величины относительной диэлектрической проницаемости в диэлектриках. Приводится задание по определению проницаемости диэлектриков, порядок работы с установкой, обработка полученных результатов, а также контрольные вопросы для закрепления теоретического материала.

УДК 537.226.1

ББК 22.3

© Бурдовицин В. А.,
Бурачевский Ю. А., 2020
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2020

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ.....	4
2 АНАЛИЗ СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ	5
3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	8
4 ЗАДАНИЕ	9
5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	9
6 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	10
7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	11
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	11

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 диэлектриках.

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 разнопотенциальными металлическими плоскостями, которые называются обкладками (рисунок 1.1), то в результате поляризации на поверхностях диэлектрика, прилегающих к обкладкам, возникнут некомпенсированные заряды, называемые *связанными*. Их поверхностная плотность равна $+\sigma'$ и $-\sigma'$.

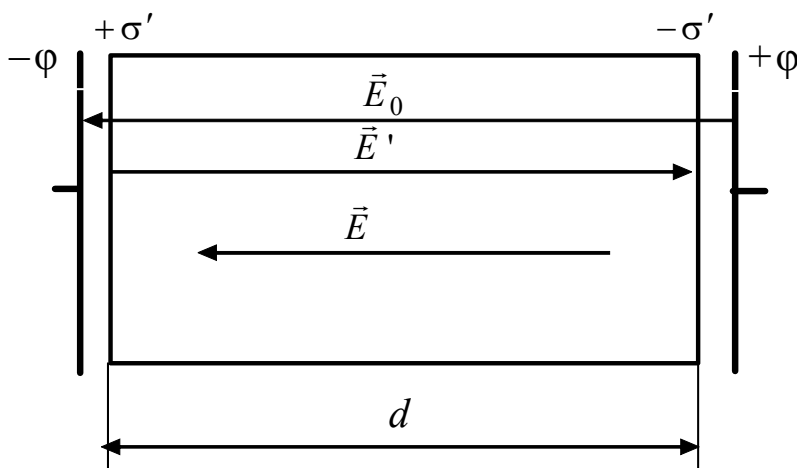


Рисунок 1.1 – Диэлектрик в однородном электрическом поле

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 *снижается*: $E = E_0 - E'$.

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.

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

$$p = \sigma' S d,$$

где d – толщина диэлектрика.

Тогда модуль вектора поляризации равен

$$P = \frac{p}{S d} = \frac{\sigma' S d}{S d} = \sigma'.$$

Для E' получаем

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

Поле в диэлектрике в скалярной форме

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

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;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ 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 (рисунок 2.1). Измеряя амплитуды входного напряжения U_0 и выходного напряжения U_R , снимаемого с резистора, можно вычислить X_C и C .

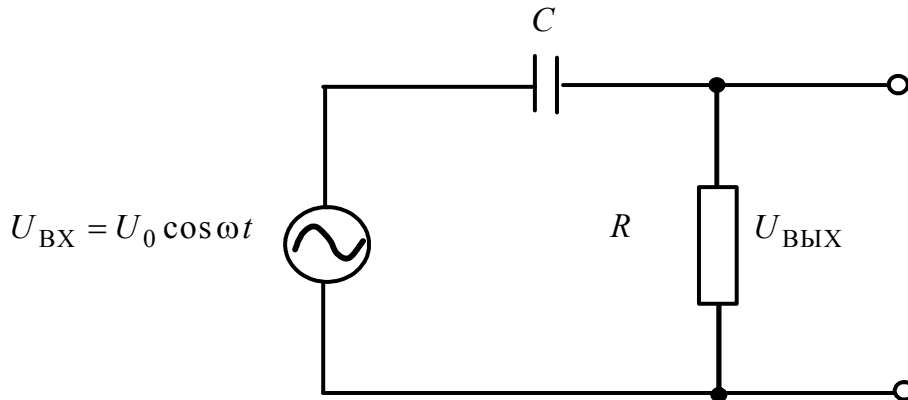


Рисунок 2.1 – Схема измерения

Для установления взаимосвязи между амплитудами напряжений на резисторе U_R , на конденсаторе U_C и входного напряжения U_0 рассмотрим их векторную диаграмму (рисунок 2.2). Взаимная перпендикулярность векторов \vec{U}_R и \vec{U}_C , 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 рисунку 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.

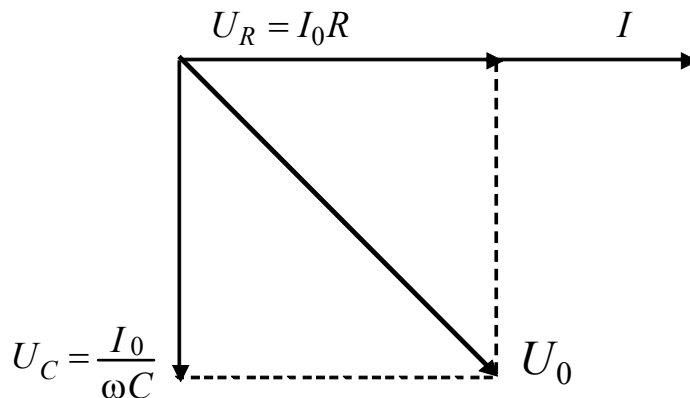


Рисунок 2.2 – Векторная диаграмма напряжений в схеме

Введем в рассмотрение коэффициент передачи K

$$K = \frac{U_R}{U_0}. \quad (2.4)$$

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

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

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

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

Измеряя амплитуды входного и выходного напряжения и определяя коэффициент передачи K по их отношению (см. выражение 2.4), можно по формуле (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 $C_{\text{пар}}$ монтажа (рисунок 2.3). Для устранения влияния $C_{\text{пар}}$ в данной работе используется процедура измерения емкости конденсаторов с различной площадью диэлектрика, площадь обкладок при этом остается неизменной. Пусть $S_{\text{уд}}$ – площадь удаленной части диэлектрика, S – по-прежнему площадь обкладки конденсатора.

Если часть обкладок свободна от диэлектрика, то всю структуру можно рассматривать как три параллельных конденсатора, емкость которых

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 (S - S_{\text{уд}})}{d} + \frac{\epsilon_0 S_{\text{уд}}}{d} + C_{\text{пар}}. \quad (2.8)$$

Преобразуя выражение (2.8), получаем

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} - \frac{\epsilon_0 (\epsilon - 1) S_{\text{уд}}}{d} + C_{\text{пар}}. \quad (2.9)$$

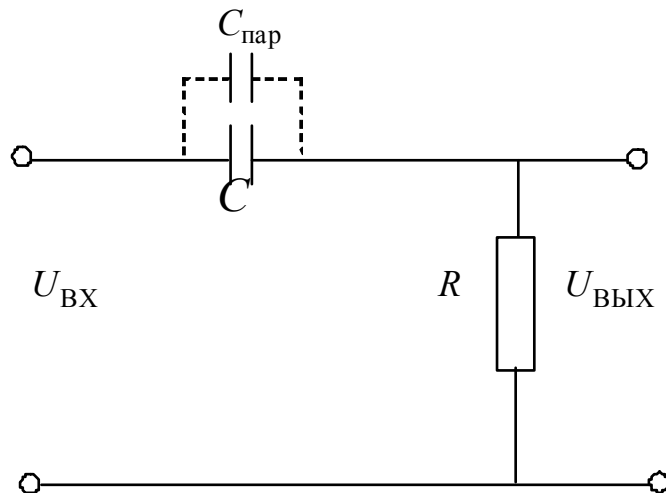




Рисунок 2.3 – Схема измерений с учетом паразитной емкости

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

3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема, используемая для измерений, изображена на рисунке 3.1 и включает в себя генератор  синусоидального сигнала, RC-цепочку и осциллограф  для измерения амплитуды входного и выходного сигналов. Сопротивление $R = 420$ кОм.

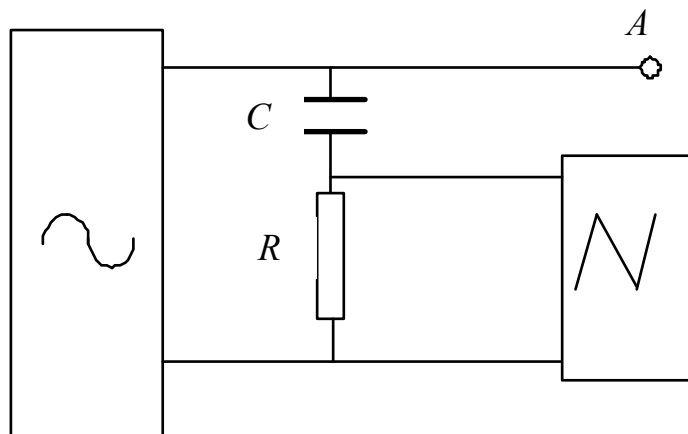


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема установки

Конструктивно схема размещена в настольном **стенде** (рисунок 3.2). Органы управления собраны на отдельной панели (рисунок 3.3).

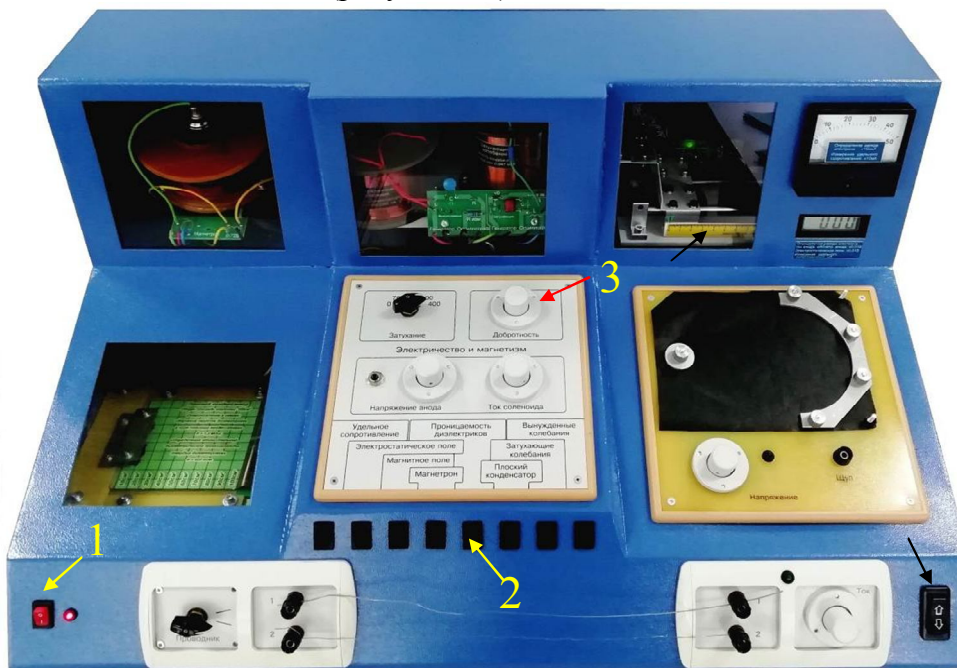


Рисунок 3.2 – Внешний вид установки

Роль генератора и осциллографа выполняет компьютер. Размах колебаний (удвоенная амплитуда) входного сигнала равен 4 В. Конденсатор представляет собой две параллельные металлические пластины площадью 100 см^2 , между которыми помещается пластина твердого диэлектрика. Диэлектрическая пластина вставляется в щель на левой стенке стенда. Для облегчения измерений диэлектрическая пластина разлинована на участки площадью по 10 см^2 каждый.



Рисунок 3.3 – Панель управления

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 $S_{\text{уд}}$ диэлектрика для трех разных диэлектриков.

4.3 Рассчитать емкость согласно формуле (2.7), предварительно измерив толщину d диэлектрика с помощью микрометра. Построить графики зависимости C от $S_{\text{уд}}$ 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 стенд (см. рисунок 3.2) кнопкой 1 на его передней стенке и работу «Проницаемость диэлектриков» кнопкой 2.

5.2 Вставить полностью в щель с левой стороны стенда образец (диэлектрическую пластину).

5.3 Включить компьютер. Дождаться его полной загрузки.

5.4 На экране монитора найти папку «Лаборатория», открыть ее, установить указатель мыши на значок «Определение диэлектрической проницаемости» и нажать дважды на левую

кнопку «мыши». На экране появятся экран осциллографа, таблица для записи результатов измерений, а также кнопки «Добавить», «Удалить».

5.5 Кнопкой 2 на стенде включить работу «Проницаемость диэлектриков». На экране появится синусоида выходного сигнала.

5.6 Измерить период синусоиды.

5.7 Измерить амплитуду сигнала. Для этого указателем «мыши» установить две горизонтальные линии на нижнюю и верхнюю границы синусоиды. Нажать кнопку «Добавить».

5.8 Вытянуть пластину диэлектрика на 1,0 см до риски и произвести измерения по п. 5.7. После чего еще несколько раз вытягивать пластину на 1,0 см до риски, всякий раз повторяя п. 5.7.

5.9 Результаты из таблицы на экране монитора переписать в рабочую тетрадь (таблица 5.1) или переслать в *Libre Office Calc* (аналог *Excel*) кнопкой на экране монитора.

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

Таблица 5.1 – Результаты измерений

Название диэлектрика	Номер изм.	$S_{уд}$	$U_{вх}$	$U_{вых}$	K	C	d	Примечание
	0							$\varepsilon(R)=10\%$
	1							
	...							
	10							

5.11 Указателем мышки убрать картину колебаний с экрана монитора.

5.12 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».

5.13 Выключить питание **стенда**, нажав кнопку «Сеть».

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

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 формуле (2.9) угловой коэффициент равен $\frac{\varepsilon_0(\varepsilon - 1)}{d}$, определить диэлектрическую проницаемость 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 стенд 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?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И. В. Курс общей физики: учебник в 3-х т. Т. 2 : Электричество и магнетизм. Волны. Оптика./ И. В. Савельев. - 14-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2018. – 500 с.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М. : Высшая школа, 1978.
3. Мухачёв В. А. Оценка погрешности измерений : метод. указания для студентов всех специальностей / В. А. Мухачёв, А. Л. Магазинников. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2009.
4. Зенин А. А. Общие требования и правила оформления отчета о лабораторной работе по физике: Методические указания [Электронный ресурс] / А. А. Зенин. — Томск: ТУСУР, 2019. — 20 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/8957> (дата обращения: 03.06.2020.)