

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

В.А. Бурдовицин, Ю.А. Бурачевский

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

Методические указания по выполнению лабораторных работ по фи-
зике для студентов всех специальностей

Томск
2023

УДК 531.262
ББК 22.3
Б 912

Рецензент

Зенин А.А., доцент, канд. техн. наук

Одобрено на заседании каф. физики протокол №104 от 16.04.23

Бурдовицин Виктор Алексеевич

Б 912 Определение относительной диэлектрической проницаемости твердых диэлектриков: метод. указания по выполнению лабораторной работы/ В. А. Бурдовицин, Ю. А. Бурачевский. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 14 с.

Рассматривается явление поляризации и величины, характеризующие это явление. Введена в рассмотрение относительная диэлектрическая проницаемость диэлектриков. Сформулировано задание по измерению проницаемости диэлектриков, указаны порядок работы с установкой и методика обработка полученных результатов. Приведены контрольные вопросы для закрепления теоретического материала.

УДК 537.226.1
ББК 22.3

© Бурдовицин В. А.,
Бурачевский Ю. А., 2023
© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ.....	4
2 АНАЛИЗ СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ	6
3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	9
4 ЗАДАНИЕ	11
5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	11
6 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	13
7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	13
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	14

ВВЕДЕНИЕ

Вещества, которые в нормальных условиях 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 образуется система двух одинаковых по величине, но противоположных по знаку зарядов, называемая электрическим диполем, который характеризуется электрическим дипольным моментом \vec{p}_i

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

где q – заряд,
 l – расстояние между зарядами.

Установлено, что дипольный момент каждой молекулы связан с напряженностью электрического поля \vec{E} соотношением

$$\vec{p}_i = \alpha \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (1.2)$$

где α – поляризуемость молекулы;

Если диэлектрик поместить между двумя разнопотенциальными металлическими плоскостями, называемыми обкладками и создающими внешнее поле напряженностью \vec{E}_0 , то в результате поляризации на поверхностях диэлектрика, обращенных к обкладкам, возникнут нескомпенсированные заряды, называемые *связанными*. Их поверхностная плотность равна $+\sigma'$ и $-\sigma'$ (Рис. 1.1).

Связанные заряды создают внутреннее электрическое поле \vec{E}' , направленное в сторону, противоположную внешнему полю \vec{E}_0 .

В результате поляризации результирующая напряженность E электрического поля внутри диэлектрика *снижается*:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' \quad (1.3)$$

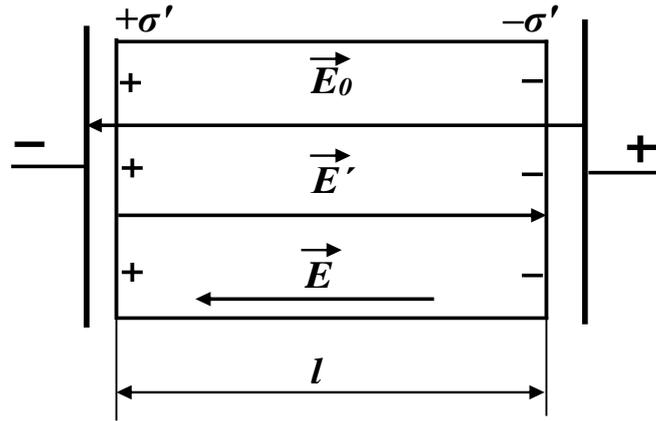


Рисунок 1.1 – Диэлектрик в однородном электрическом поле

Вектор поляризации (дипольный момент единицы объема) равен

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

где $\chi = \alpha n$ – диэлектрическая восприимчивость, безразмерная величина, n – концентрация молекул.

Модуль напряженности поля в диэлектрике $E = E_0 - E'$. Напряженность E' поля поверхностных связанных зарядов может быть выражена известной формулой для поля между заряженными плоскостями

$$E' = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0} \quad (1.5)$$

Дипольный момент P всего диэлектрика выражается

$$P = ql = \sigma' \cdot Sl, \quad (1.6)$$

где σ' – поверхностная плотность связанных зарядов;
 l – длина образца.

Модуль вектора поляризации равен $P = \frac{P}{Sl} = \frac{\sigma' Sl}{Sl} = \sigma'$.

Для E' получаем

$$E' = \frac{P}{\varepsilon_0} \quad (1.7)$$

Напряженность поля в диэлектрике

$$E = E_0 - E' = E_0 - \frac{P}{\varepsilon_0} = E_0 - \frac{\chi \varepsilon_0 E}{\varepsilon_0} = E_0 - \chi E \quad (1.8)$$

или $E + \chi E = E_0$. Отсюда

$$E = \frac{E_0}{1 + \chi} = \frac{E_0}{\varepsilon}. \quad (1.9)$$

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, ν – линейная 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**). Изменяя амплитуды входного напряжения U_0 и выходного напряжения U_{0R} , снимаемого с резистора, можно вычислить X_C и C . 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**).

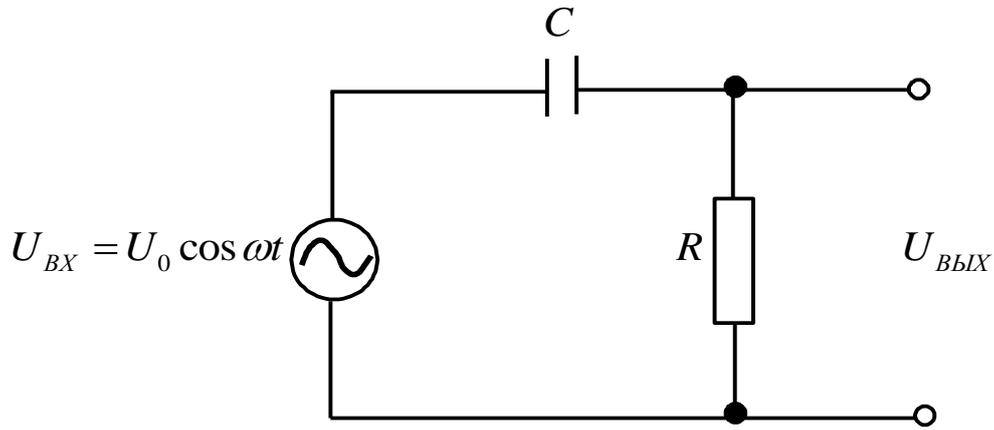


Рисунок 2.1 – Схема измерения

Взаимная перпендикулярность векторов U_{OR} и U_{OC} , 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.

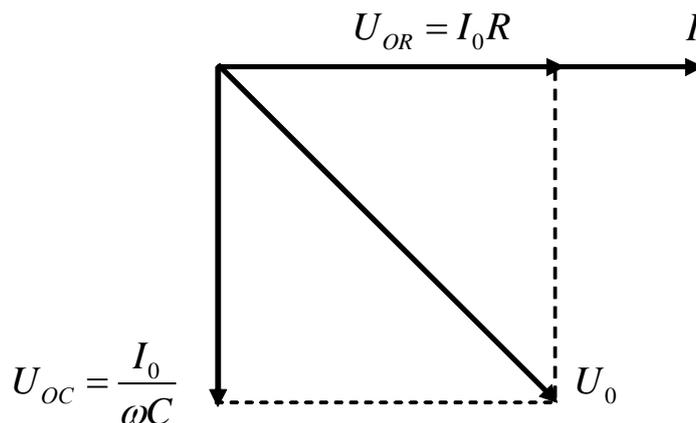


Рисунок 2.2 – Векторная диаграмма напряжений

Введем в рассмотрение коэффициент передачи K

$$K = \frac{U_{0R}}{U_0}. \quad (2.4)$$

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

$$U_{0R} = I_0 R = U_0 R \omega C / \sqrt{1 + R^2 \omega^2 C^2}. \quad (2.5)$$

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

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

Измеряя амплитуды входного и выходного напряжения и определяя коэффициент передачи K по их отношению (см. формулу (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.

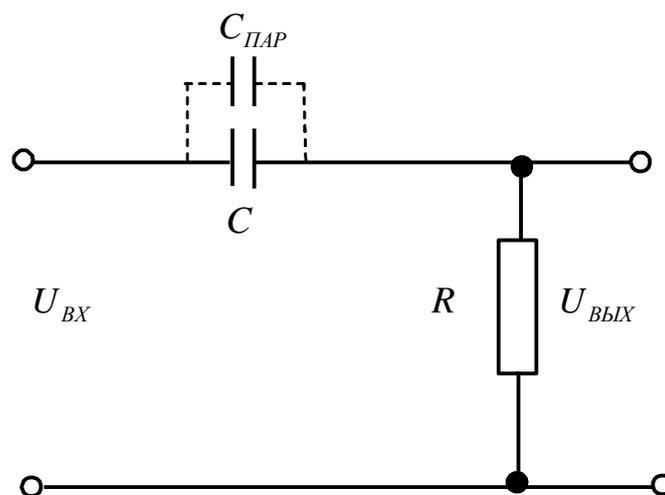


Рисунок 2.3 – Схема измерений с учетом паразитной емкости

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

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

Выражение (2.8) приводим к виду

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

Как видно из (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

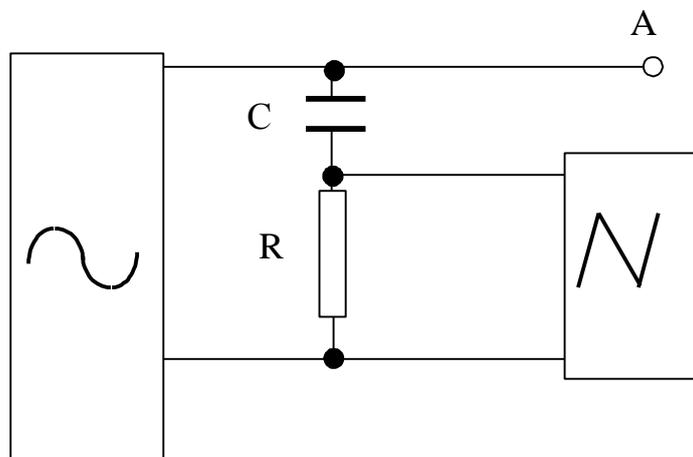


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема установки

Схема, используемая для измерений, изображена на рис. 3.1 и включает в себя генератор синусоидального сигнала \sim , **RC** – цепочку и осциллограф $\square \sim$ для измерения амплитуды выходного сигналов. Амплитуда входного сигнала фиксирована и равна 4 В.

R = 420 кОм. Конструктивно схема размещена в настольной установке (рис. 3.2), в левой стороне её наклонной части. Органы

управления собраны на отдельной панели (рис. 3.3). Роль генератора и осциллографа выполняет компьютер.

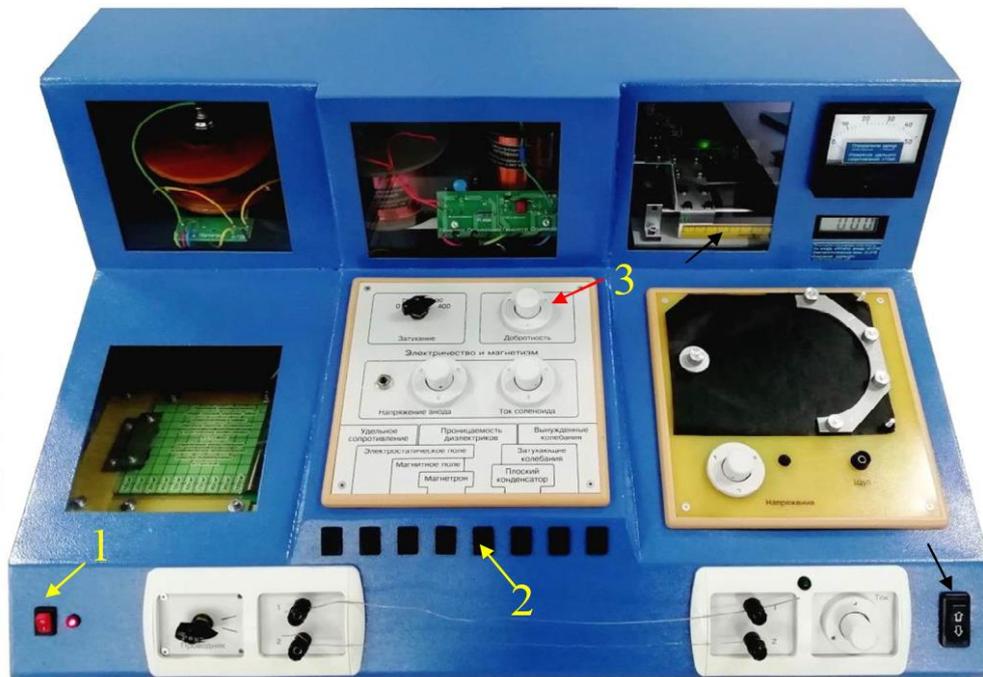


Рисунок 3.2 – Внешний вид установки.

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 макета. 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 $S_{уд}$ диэлектрика.

4.3 Рассчитать емкость согласно формуле (2.7). Построить графики зависимости C от $S_{уд}$ и убедиться в линейности графика.

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

5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1 Включить установку (рис. 2.2) кнопкой 1 на передней стенке и работу «Проницаемость диэлектриков» кнопкой 2.

5.2 Вставить диэлектрическую пластину полностью в щель с левой стороны установки.

5.3 Включить компьютер. Дождаться его полной загрузки.

5.4 На экране монитора в папке «Лаборатория», запустить лабораторную работу «Определение диэлектрической проницаемости». На мониторе появятся экран осциллографа с синусоидой выходного сигнала (рис. 5.1), таблица для записи результатов измерений, а также кнопки «Добавить», «Удалить».

5.5 Измерить период синусоиды.

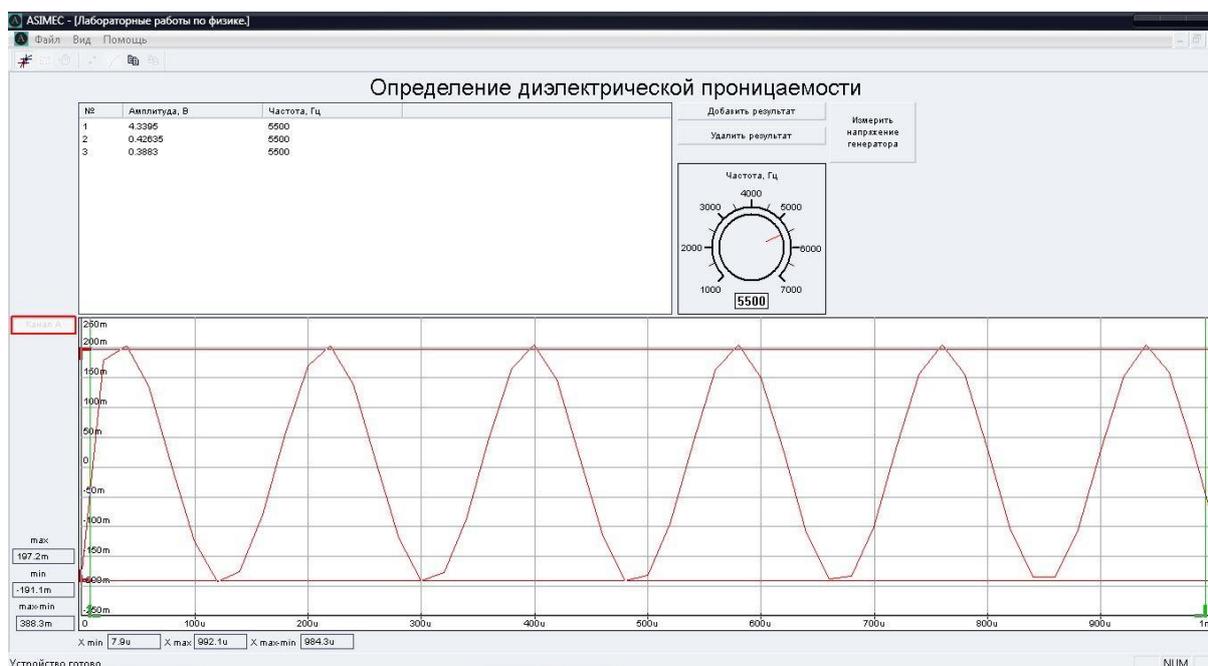


Рисунок 5.1 – Вид экрана монитора

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

5.7 Вытянуть пластину диэлектрика на 1 см до риски и произвести измерения по п. 5.6. После этого еще несколько раз вытягивать пластину на 1 см до очередной риски, всякий раз повторяя п. 5.6.

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

5.9 Указателем «мыши» убрать картину колебаний с экрана.

5.10 Выключить компьютер.

5.11 Выключить питание установки, нажав кнопку «Сеть».

Внимание. Не включать и не выключать питание установки при включенном компьютере.

Таблица 5.1 – Результаты измерений

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

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 диэлектрика.

6.6. Сравнить полученные значения ε с табличным значением.

6.7. Сделать вывод по работе, в котором привести полученное значение ε с учетом погрешностей, отметить возможности и точность методики, указать возможные причины нелинейности зависимости C от $S_{уд}$ и отклонение полученного значения ε от табличной величины.

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?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И. В. Курс общей физики: в 3 т. [Электронный ресурс]: учеб. / И. В. Савельев. – СПб. : Лань, 2018. – Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – 500 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/98246> (дата обращения 10.04.2023)
- 2 Бурачевский Ю. А. Электричество и магнетизм [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе / Ю. А. Бурачевский. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2018. – 137 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/7729> (дата обращения 10.04.2023)
- 3 Зенин А. А. Общие требования и правила оформления отчета о лабораторной работе по физике [Электронный ресурс]: метод. указания / А. А. Зенин. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2019. – 20 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/8957> (дата обращения 10.04.2023)
- 4 Мухачев В. А. Оценка погрешностей измерений [Электронный ресурс]: метод. указания к лабораторной работе / В. А. Мухачев, А. Л. Магазинников. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 24 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1099> (дата обращения 10.04.2023)