

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**имени М. В. Ломоносова**

---

**Физический факультет**  
**кафедра общей физики и физики конденсированного состояния**

**Методическая разработка**  
**по общему физическому практикуму**

**Лаб. работа № 69**

**ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ**  
**ПРОНИЦАЕМОСТИ**

**Составил описание доц. Горшков С.Н.**

**Москва 2012 г.**

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

# ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

**Цель задачи** - измерение диэлектрической проницаемости некоторых твердых диэлектриков.

## Основные понятия и соотношения

В данной задаче в основе измерения диэлектрической проницаемости некоторого диэлектрика лежит формула для емкости плоского конденсатора, заполненного данным диэлектриком:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} \quad (1)$$

Здесь  $S$  - площадь обкладок конденсатора,  $d$  - расстояние между обкладками,  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость диэлектрика,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  - электрическая постоянная. Из формулы (1) вытекает соотношение

$$\varepsilon = \frac{Cd}{\varepsilon_0 S} \quad (2)$$

которое позволяет вычислить искомую диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon$ , если известны емкость конденсатора  $C$ , площадь обкладок  $S$  и расстояние между ними  $d$ .

Один из способов определения емкости конденсатора  $C$  состоит в том, чтобы последовательно этому конденсатору подключить некоторый другой конденсатор с известной емкостью  $C_0$  и составить цепь, содержащую источник постоянного тока и батарею последовательно соединенных конденсаторов  $C$  и  $C_0$  (рис. 1)

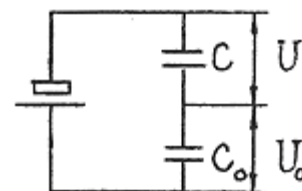


Рис. 1.

Если в цепи, представленной на рис. 1,  $U$  - разность потенциалов на обкладках конденсатора  $C$ , и  $U_0$  - разность потенциалов на обкладках конденсатора  $C_0$ , то, учитывая, что заряды  $q$  конденсаторов  $C$  и  $C_0$  при последовательном соединении одинаковы, будем иметь:

$$q = CU = C_0U_0.$$

Откуда

$$C = \frac{U_0}{U} \cdot C_0 \quad (3)$$

Следовательно, для определения емкости конденсатора  $C$  достаточно в цепи, изображенной на рис. 1, измерить разности потенциалов  $U$  и  $U_0$  на конденсаторах  $C$  и  $C_0$ .

Существенно, что при измерении разности потенциалов (напряжения) на некотором участке  $AB$  произвольной цепи измеряемое напряжение несколько меняется вследствие подключения вольтметра. Условием правильного измерения напряжения на данном участке цепи вольтметром, имеющим сопротивление  $R$ , является выполнение соотношения

$$R_{AB} \ll R,$$

где  $R_{AB}$  - сопротивление участка  $AB$ . При измерении напряжений  $U$  и  $U_o$  на конденсаторах  $C$  и  $C_o$  в цепи, изображенной на рис. 1, данное условие, вообще говоря, не выполнено, так как сопротивление обычных вольтметров имеет хотя и большую, но конечную величину, в то время как сопротивление конденсаторов  $C$  и  $C_o$  постоянному току практически бесконечно.

Измерение напряжений  $U$  и  $U_o$  на конденсаторах  $C$  и  $C_o$  с помощью вольтметра становится возможным, если в качестве источника тока в цепи использовать источник не постоянного, а переменного синусоидального тока (см. рис. 2).

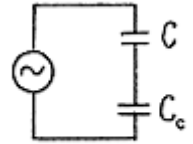


Рис. 2.

В цепи, изображенной на рис. 2, напряжения  $U$  и  $U_o$  на конденсаторах  $C$  и  $C_o$  меняются по синусоидальному закону:  $U(t) = U_A \sin \omega t$  и  $U_o(t) = U_{oA} \sin \omega t$ , где  $U_A$  и  $U_{oA}$  - амплитудные значения напряжений  $U$  и  $U_o$ ,  $\omega$  - круговая (циклическая) частота, связанная с обычной частотой  $\nu$  ( $\nu = 1/T$ , где  $T$  - период) соотношением  $\omega = 2\pi\nu$ . Для данной цепи формула (3) справедлива для значений  $U$  и  $U_o$  в произвольный момент времени, в частности для амплитудных значений этих напряжений  $U_A$  и  $U_{oA}$ , а, следовательно, и для действующих, или эффективных, значений  $U_d$  и  $U_{od}$ , которые связаны с амплитудными значениями формулами

$$U_d = U_A/\sqrt{2} \quad \text{и} \quad U_{od} = U_{oA}/\sqrt{2},$$

$$C = \frac{U_{od}}{U_d} \cdot C_o. \quad (4)$$

Как известно, вольтметры переменного напряжения измеряют именно действующее значение напряжения, так что с помощью такого вольтметра можно непосредственно измерить напряжения  $U_d$  и  $U_{od}$  на конденсаторах  $C$  и  $C_o$ . Условием правильного измерения вольтметром действующих значений напряжений  $U_d$  и  $U_{od}$  является выполнение неравенств:

$$\frac{1}{\omega C} \ll R, \quad \frac{1}{\omega C_o} \ll R, \quad (5)$$

где  $1/\omega C$  и  $1/\omega C_o$  - соответственно сопротивления конденсаторов  $C$  и  $C_o$  переменному току,  $R$  - сопротивление вольтметра.

В данной задаче для измерения напряжений  $U$  и  $U_o$  в цепи переменного тока используется вольтметр  $B7-22A$ , сопротивление которого  $R$  составляет  $10^7$  Ом, емкости исследуемых конденсаторов  $C$  с диэлектриком между обкладками имеют величину порядка сотни пикофарад ( $1$  пикофарада =  $10^{-12}$  Ф), а емкость конденсатора  $C_o$  составляет, примерно  $10^{-8}$  Ф. При этих условиях неравенства (5) можно считать выполненными, если частота  $\nu$  переменного тока удовлетворяет условию  $\nu \geq 10^4$  Гц. Действительно, для этой частоты имеем  $\omega \geq 2\pi \cdot 10^4$  Гц и левые части неравенств (5) не превосходят  $1,6 \cdot 10^5$  Ом,

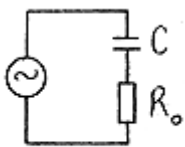


Рис. 3.

т.е. много меньше  $R$ .

Дополнительный способ измерения емкости  $C$  может быть получен с помощью цепи, изображенной на рис. 3., в которой  $R_0$  - известное сопротивление. Если  $U_d$  и  $U_{od}$  - действующие значения напряжений на конденсаторе  $C$  и резисторе  $R_0$ , то для действующего значения силы тока в цепи можно написать соотношение:

$$I_d = \omega C \cdot U_d = \frac{1}{R_0} U_{od},$$

из которого следует, что

$$C = \frac{1}{\omega R_0} \cdot \frac{U_{od}}{U_d}. \quad (6)$$

Условием правильного измерения напряжений  $U_d$  и  $U_{od}$  на конденсаторе  $C$  и резисторе  $R_0$  в цепи, изображенной на рис. 3, является выполнение следующих неравенств:  $R_0 \ll R$  и  $1/\omega C \ll R$ , где  $R$  - сопротивление вольтметра.

Поскольку сопротивление используемого в данной работе резистора  $R_0$  составляет по величине примерно  $1900 \text{ Ом}$ , то для вольтметра  $B7-22A$  при частотах  $\nu \geq 10^4 \text{ Гц}$  оба указанные неравенства можно считать выполненными.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

**Приборы и принадлежности:** разборный конденсатор, нижняя пластина которого закреплена на измерительном стенде, конденсатор  $C_0$  и резистор  $R_0$ ,

закрепленные на измерительном стенде, генератор сигналов функциональный  $ГСФ-1$ , вольтметр  $B7-22A$ , пластины из диэлектрических материалов (стекло, оргстекло, текстолит)

**Ознакомление с работой приборов, используемых при выполнении задачи**

### 1. Разборный конденсатор

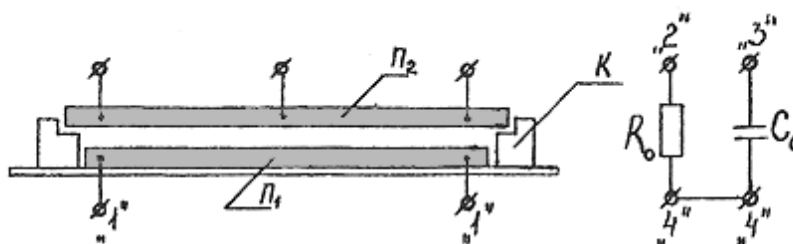


Рис. 4.

Схематическое изображение разборного конденсатора (вид сбоку) приведено на рис. 4.

Конденсатор содержит нижнюю обкладку в виде металлической пластины  $\Pi_1$ , подключенной к двум гнездам "1" на измерительном стенде, верхнюю обкладку в виде съемной металлической пластины  $\Pi_2$  с гнездами для подключения соединительных проводов. Окантовка  $K$  нижней обкладки конденсатора обеспечивает фиксированный зазор  $d_0 = 1,9$  мм между пластинами. Если на нижнюю обкладку положен диэлектрик толщиной  $d > d_0 = 1,9$  мм, то расстояние между пластинами равно толщине слоя диэлектрика.

Кроме того, на измерительном стенде имеются конденсатор  $C_0$ , подключенный к гнездам "3" и "4" стенда, и резистор  $R_0$ , подключенный к гнездам "2" и "4". Два гнезда "4" измерительного стенда соединены между собой (рис. 4).

## 2. Генератор сигналов функциональный ГСФ-1

Передняя панель генератора сигналов ГСФ-1 схематически изображена на рис. 5.

Кнопки и ручки на передней панели генератора имеют следующее

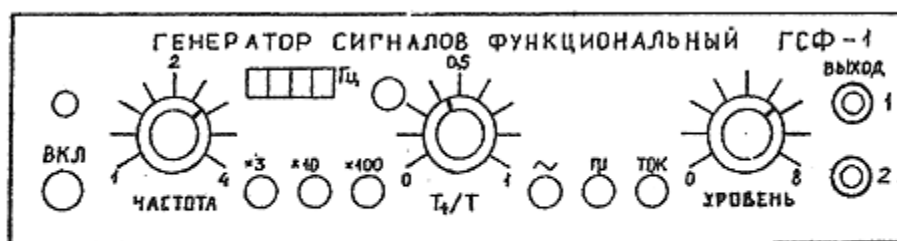


Рис. 5.

назначение:

1) Кнопка "ВКЛ" служит для включения прибора в сеть.

2) Ручка "ЧАСТОТА" регулирует частоту  $\nu$  напряжения, снимаемого с выходных клемм "1" и "2" генератора.

3) Кнопки "x3", "x10", "x100" служат для умножения частоты  $\nu$  выходного сигнала генератора, установленной с помощью ручки " ЧАСТОТА ", на соответствующий множитель. При одновременном нажатии нескольких из кнопок " x3 ", " x10 ", " x100 " частота умножается на произведение всех соответствующих множителей. Точное значение частоты  $\nu$  выходного сигнала генератора в герцах высвечивается на четырехразрядном индикаторе частоты (при условии, что отжата расположенная рядом с индикатором кнопка, определяющая режим его работы; если указанная кнопка нажата, то индикатор работает в режиме высвечивания частоты внешнего напряжения, которое может быть подано извне на специальный разъем на задней панели генератора).

4) Ручка "УРОВЕНЬ" служит для регулировки величины выходного

сигнала генератора.

5) Кнопка  $\square$  в нажатом состоянии служит для получения на выходе генератора сигнала прямоугольной формы. При ненажатой кнопке  $\square$  формирование сигнала на выходе генератора определяется кнопкой "~": при отпущенной кнопке  $\sphericalangle$  генератор выдает сигнал синусоидальной формы, при нажатой - пилообразной формы.

6) При нажатии кнопки "ТОК" к выходной клемме "2" генератора подключается дополнительное сопротивление величиной  $1 \text{ Ом}$ , т.е. внутреннее сопротивление генератора увеличивается на  $1 \text{ Ом}$ . Подключение данного сопротивления позволяет ограничить величину тока, протекающего через генератор при коротком замыкании во внешней цепи.

7) Ручка " $T_+/T$ " задействована только при нажатой кнопке  $\square$ , т.е. при сигнале генератора прямоугольной формы, и позволяет регулировать отношение длительности положительной полуволны прямоугольного сигнала к длительности периода.

### 3. Вольтметр В7-22А

Вольтметр В7-22А служит для измерения постоянного и переменного напряжения, силы переменного и постоянного тока, сопротивления постоянному току.

Передняя панель вольтметра В7-22А схематически изображена на рис. 6.

Включение вольтметра и работа с ним осуществляется следующим образом:

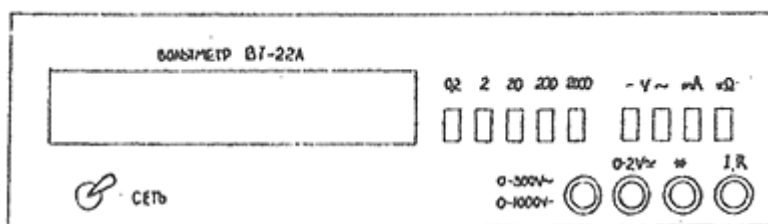


Рис. 6.

1. Тумблер "СЕТЬ" служит для включения прибора в сеть.

2. Для измерения переменного или постоянного напряжения нажимаются соответственно кнопки "V~" или "V-", причем измерительные провода вольтметра подключаются к клеммам "\*" и соответственно "0-300 V~" или "0-1000 V-". Затем нажатием одной из кнопок "2000", "200", "20", "2", "0.2" выбирается предел измерений, т.е. максимальное значение величины (в вольтах при измерении напряжения, в миллиамперах при измерении силы тока, в килоомах при измерении сопротивления), которое может быть измерено вольтметром в выбранном режиме. Существенно, что чем меньше значение предела измерений, тем точнее производится измерение требуемой величины. Если измеряемое напряжение превосходит по величине установленный предел измерений, то на индикаторе прибора высвечивается значение этого предела,

что свидетельствует о перегрузке прибора. Таким образом, оптимальным является измерение на шкале с минимальным пределом измерения, но на которой еще не происходит перегрузка прибора.



3. Если измеряемое напряжение не превосходит двух вольт, то при работе на пределах измерений "2" и "0.2" измерительные провода вольтметра должны быть подключены к клеммам "\*" и "0-2 V $\approx$ ".

4. Для измерения силы тока измерительные провода вольтметра подключаются к клеммам "\*" и "I, R" и нажимаются кнопки "mA" и соответственно "V $\sim$ " или "V-" при измерении соответственно силы переменного или постоянного тока. Выбор оптимальной шкалы измерения аналогичен выбору шкалы при измерении напряжения (см. п. 2).

5. Для измерения сопротивления нажимается кнопка "k $\Omega$ " и измерительные провода вольтметра подсоединяются к клеммам "\*" и "I, R". Выбор оптимальной шкалы измерения аналогичен выбору шкалы при измерении напряжения и силы тока.

## ПОДГОТОВКА ПРИБОРОВ К РАБОТЕ

1. Включите генератор ГСФ-1 и вольтметр В7-22А с помощью соответственно кнопки "ВКЛ" и тумблера "СЕТЬ".

2. Задайте на выходе генератора ГСФ-1 синусоидальное напряжение. Для этого отожмите кнопки  и .

3. С помощью индикатора частоты генератора, меняя положение ручки "ЧАСТОТА" и нажимая кнопки "x3", "x10", "x100", определите максимальное значение частоты сигнала  $\nu_{max}$  которое можно получить с помощью генератора. Результат запишите в тетрадь. (В ходе работы максимальное значение частоты  $\nu_{max}$  по мере прогрева генератора постепенно увеличивается). При считывании показаний индикатора для частоты  $\nu_{max}$  имейте в виду, что если значение частоты превосходит 9999 Гц, т.е. представляет собой пятизначное число, например 10523, то на индикаторе высвечиваются лишь последние четыре разряда этого числа,

4. Подключите вольтметр В7-22А к выходным клеммам "1" и "2" генератора и, меняя положение ручки "УРОВЕНЬ" на его передней панели, определите максимальное действующее значение напряжения выходного сигнала генератора при нажатой и отжатой кнопке "ТОК". Результаты запишите в тетрадь.

### Упражнение 1

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА $C_0$ .

1. Соберите цепь, изображенную на рис. 7, в которой конденсатор  $C$  представляет собой воздушный конденсатор и не содержит пластины из диэлектрика.



2. На генераторе сигналов ГСФ-1 задайте максимально возможное значение частоты  $\nu$  выходного напряжения, для чего ручку "ЧАСТОТА" поставьте в крайнее правое положение и нажмите кнопки "x3", "x10", "x100" множителей частоты.

3. Величину выходного напряжения генератора задайте максимальной, повернув ручку "УРОВЕНЬ" в крайнее правое положение.

4. Отключите дополнительное сопротивление величиной 1 Ом от выходной клеммы "2" генератора, отжав кнопку "ТОК".

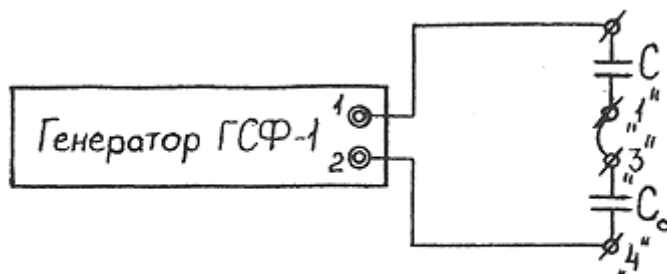


Рис. 7.

5. Измерьте напряжение  $U_d$  на конденсаторе  $C$  с помощью вольтметра В7-22А, подключив один из измерительных проводов вольтметра к гнезду "1" (или "3") измерительного стенда, а второй - к одному из трех гнезд на верхней пластине конденсатора  $C$ .

6. Измерьте напряжение  $U_{od}$  на конденсаторе  $C_0$  с помощью вольтметра В7-22А, подключив измерительный провод от клеммы "\*" вольтметра к гнезду "4" измерительного стенда, а второй измерительный провод - к гнезду "3" (или "1").

7. Вычислите емкость конденсатора  $C$  по формуле плоского конденсатора (1), считая, что диэлектрическая проницаемость воздуха  $\epsilon_{возд} \approx 1$  и учитывая, что  $d = 1,9 \text{ мм}$  и площадь обкладок конденсатора  $S = 220 \text{ см}^2$ .

8. Учитывая найденное значение емкости конденсатора  $C$ , рассчитайте емкость конденсатора  $C_0$  по формуле

$$C_0 = \frac{U_d}{U_{od}} C,$$

вытекающей из формулы (4).

9. Оцените погрешность измерения емкости конденсатора  $C_0$ , считая, что напряжения  $U_d$  и  $U_{od}$  измерены с относительной погрешностью 1 %.

## Упражнение 2

### ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗИСТОРА $R_0$ И ПРОВЕРКА ФОРМУЛЫ ДЛЯ ЕМКОСТИ ПЛОСКОГО КОНДЕНСАТОРА

1. Измерьте сопротивление резистора  $R_0$  с помощью вольтметра В7-22А,

подключив его измерительные провода к гнездам "2" и "4" измерительного стенда.

2. Соберите цепь, изображенную на рис. 8, в которой конденсатор  $C$  представляет собой воздушный конденсатор и не содержит пластины из диэлектрика.

3. На генераторе сигналов ГСФ-1 задайте максимально возможное значение частоты  $\nu$  выходного переменного напряжения, для чего ручку "ЧАСТОТА" поставьте в крайнее правое положение и нажмите кнопки "x3", "x10", "x100" множителей частоты. Запишите в тетрадь полученное значение частоты  $\nu$  по показаниям индикатора частоты на передней панели генератора.

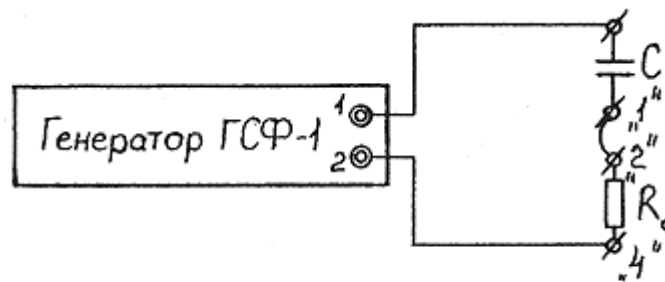


Рис. 8.

4. Величину выходного напряжения генератора задайте максимальной, повернув ручку "УРОВЕНЬ" в крайнее правое положение.

5. Отключите дополнительное сопротивление величиной  $1 \text{ Ом}$  от выходной клеммы "2" генератора, отжав кнопку "ТОК".

6. Измерьте напряжения  $U_d$  и  $U_{0d}$  на конденсаторе  $C$  и резисторе  $R_0$  с помощью вольтметра В7-22А. При измерении напряжения  $U_d$  на конденсаторе  $C$  один из измерительных проводов вольтметра подключается к гнезду "1" (или "2") измерительного стенда, а второй - к одному из трех гнезд на верхней пластине конденсатора  $C$ . При измерении напряжения  $U_{0d}$  на резисторе  $R_0$  измерительные провода вольтметра подключаются к гнезду "1" (или "2") и соответственно гнезду "4" измерительного стенда.

7. Рассчитайте емкость воздушного конденсатора  $C$  по формуле

$$C = \frac{1}{2\pi\nu R_0} = \frac{U_{0d}}{U_d}, \quad (7)$$

вытекающей из формулы (6).

8. Оцените погрешность измерения емкости  $C$ , считая, что напряжения  $U_d$  и  $U_{0d}$  измерены с относительной погрешностью  $1\%$ , а сопротивление  $R_0$  и частота  $\nu$  - с относительной погрешностью  $0,1\%$ .

9. Сравните полученное значение для емкости  $C$  со значением, вычисленным в п. 7 упражнения 1 по формуле (1) для емкости плоского конденсатора.

### Упражнение 3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

### (1-й способ)

1. Измерьте толщину пластин диэлектрика из стекла, оргстекла и текстолита с помощью штангенциркуля. Для каждой из пластин измерение толщины выполните 4 раза - в середине каждой из сторон пластины. Результаты занесите в таблицу:

Таблица 1.

	Толщина пластины диэлектрика, мм				
	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_{cp}$
Стекло					
Оргстекло					
Текстолит					

2. Соберите электрическую схему, изображенную на рис. 7, и вставляя поочередно пластины диэлектрика из стекла, оргстекла и текстолита между обкладками конденсатора  $C$  проведите измерения напряжения  $U_d$  и  $U_{0d}$  на конденсаторах  $C$  и  $C_o$  с помощью вольтметра  $B7-22A$ . При измерении напряжения  $U_{0d}$  на конденсаторе  $C_o$  измерительный провод от клеммы "\*" вольтметра должен быть подключен к гнезду "4" измерительного стенда, т.е. к пластине конденсатора  $C_o$ , соединенной с клеммой "2" генератора). Результаты измерений занесите в таблицу:

Таблица 2

	$U_b, В$	$U_{0d}, В$	$C, пФ$	$\epsilon$
Стекло				
Оргстекло				
Текстолит				

3. Рассчитайте емкость конденсатора  $C$  для каждого из диэлектриков по формуле (4) и определите диэлектрическую проницаемость каждого вещества по формуле (2), учитывая, что площадь обкладок конденсатора  $S = 220 \text{ см}^2$ , а расстояния между обкладками, равные толщине  $d$  пластин, изготовленных из различных диэлектриков, известны из п. 1.

4. Оцените погрешность измерения диэлектрической проницаемости, считая, что основной вклад в погрешность обусловлен погрешностями

измерения напряжений  $U_d$  и  $U_{0d}$  на конденсаторах  $C$  и  $C_0$ , погрешностью измерения емкости конденсатора  $C_0$  (см. упражнение 1), а также погрешностью измерения толщины пластины диэлектрика  $d$ .

### Упражнение 4, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ (2-й способ)

1. Соберите электрическую цепь, изображенную на рис. 8.

2. Вставьте поочередно пластины диэлектрика из стекла, оргстекла и текстолита между обкладками конденсатора  $C$  и с помощью вольтметра  $B7-22A$  измерьте напряжения  $U_d$  и  $U_{0d}$  на конденсаторе  $C$  и сопротивлении  $R_0$ . Результаты измерений занесите в таблицу:

Таблица 3.

	$U_d$ , В	$U_{0d}$ , В	$\nu$ , Гц	$C$ , пФ	$\epsilon$
Стекло					
Оргстекло					
Текстолит					

3. Рассчитайте емкость конденсатора  $C$  для каждого из диэлектриков по формуле (7) и определите диэлектрическую проницаемость каждого вещества по формуле (2), учитывая, что площадь обкладок конденсатора  $S = 220 \text{ см}^2$ , а расстояния между обкладками, равные толщине  $d$  пластин диэлектрика, известны из п. 1 упражнения 3.

4. Оцените погрешность измерения диэлектрической проницаемости, считая, что основной вклад в указанную погрешность обусловлен погрешностью измерения величин напряжений  $U_d$  и  $U_{0d}$  на конденсаторах  $C$  и  $C_0$ , погрешностью измерения сопротивления резистора  $R_0$  (см. упражнение 2), а также погрешностью измерения толщины пластины диэлектрика  $d$  и погрешностью задания частоты  $\nu$  генератора.

5. Сравните значения диэлектрической проницаемости для стекла, оргстекла и текстолита со значениями, полученными в упражнении 3, с учетом погрешностей измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белов Д.В. Электромагнетизм и волновая оптика. М.: Издательство МГУ, 1994,

§ 4-6, 12

2. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. Пособие. В 5 кн. Кн. 2. Электричество и магнетизм - 4-е изд., перераб. - М.: Наука. Физматлит. 1998. - 336.

Глава 2. Электрическое поле в диэлектриках.

§ 2.1. Полярные и неполярные молекулы.

§ 2.2. Поляризация диэлектриков.

§ 2.3. Поле внутри диэлектриков.

§ 2.4. Объемные и поверхностные связанные заряды.

§ 2.5. Вектор электрического смещения.

Глава 3. Проводники в электрическом поле.

§ 3.3. Емкость.

§ 3.4. Конденсаторы.