

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 21.08.2023 11:28:10

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabb0773e943df4a4851fca56d089

# МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова



2023 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Методические указания по выполнению лабораторной работы № 6  
по дисциплине «Конструкционные и биоматериалы»

Курск 2023

УДК 621.382

Составитель О.Е. Ключникова

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры КПиСС *Е.О. Брежнева*

**Исследование температурной зависимости электрической проводимости твёрдых диэлектриков:** методические указания по выполнению лабораторной работы № 6 по дисциплине «Конструкционные и биоматериалы» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: О.Е. Ключникова. – Курск, 2023. – 13 с.

В методических указаниях излагаются основные понятия и определения и методические рекомендации по подготовке к выполнению лабораторной работы, её проведению и оформлению результатов опытов.

Методические указания соответствуют требованиям федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению «Биотехнические системы и технологии» и рабочей программы дисциплины «Конструкционные и биоматериалы».

Предназначены для студентов направления подготовки бакалавров 12.03.04 Биотехнические системы и технологии очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции.

Подписано печать . Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,68 . Тираж 100 экз. Заказ 305 Бесплатно

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное исследование зависимости электрической проводимости твёрдых диэлектриков от температуры и расчёт некоторых характеристик диэлектриков и конденсаторов.

## 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрическая проводимость твёрдых диэлектриков как величина, количественно характеризующая электропроводность, зависит от их химического состава, структуры и условий, в которых проводятся измерения (температуры, направленности электрического поля и др.) Электропроводность диэлектриков может быть обусловлена перемещением ионов и электронов. В некоторых диэлектриках, например в титанате бария ( $BaTiO_3$ ), преобладает электронный тип проводимости. Но у большинства используемых твёрдых диэлектриков в слабых электрических полях проводимость обусловлена движением ионов. Участие электронов в электропроводности этих диэлектриков наблюдается только в сильных электрических полях.

Удельная электрическая проводимость  $\gamma$  диэлектрика

$$\gamma = q \cdot n \cdot \mu, \quad (6.1)$$

где  $q$  – заряд иона;

$n$  – концентрация ионов, участвующих в электропроводности, в единице объёма диэлектрика;

$\mu$  – дрейфовая подвижность этих ионов.

Концентрация  $n$  и подвижность  $\mu$  ионов зависят от температуры. Следовательно, удельная электрическая проводимость  $\gamma$  диэлектрика является функцией температуры.

### 2.1. Механизм ионной проводимости твёрдых диэлектриков.

В твёрдом теле ион взаимодействует с окружающими его заряженными частицами. Энергия этого взаимодействия  $W$  зависит от положения иона (от его координаты  $x$ ) относительно окружающих

частиц и от зарядов ионов, т.е. от химического состава и структуры вещества (рис. 6.1). Каждый ион стремится занять положение, которому соответствует минимум потенциальной энергии.

Положение 1 на рис. 6.1 соответствует иону, который находится в узле кристаллической решётки. Потенциальная энергия его минимальна и равна  $W_1$ . Для выхода из потенциальной ямы ион должен преодолеть потенциальный барьер высотой  $W_3 = W_1 = \Delta W_1$ . Энергия  $\Delta W_1$  называется энергией активации собственных ионов диэлектрика.

В реальных диэлектриках практически всегда имеются ионы примеси. Они сравнительно слабо закреплены (положение 2 на рис. 6.1)

Для их выхода из потенциальной ямы необходима энергия активации  $\Delta W_2$  значительно меньшая, чем  $\Delta W_1$  (см. рис 6.1). Аналогично ведут себя ионы основного вещества, располагающиеся вблизи дефектов кристаллической решётки и в междоузлиях.

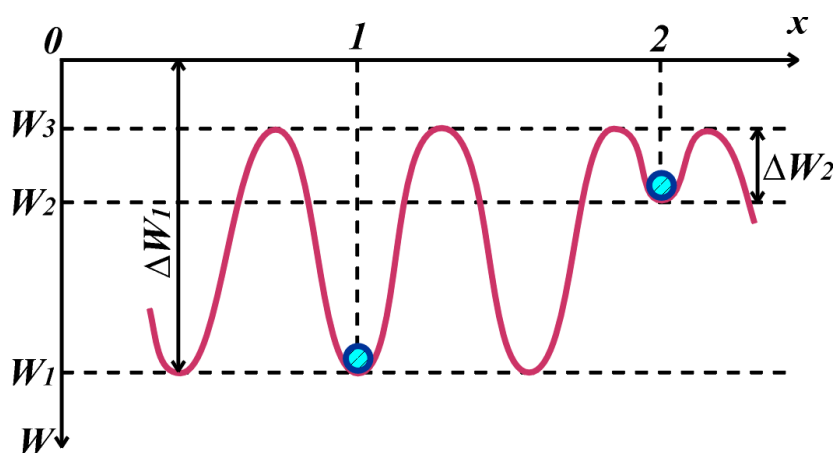


Рис 2.1. Зависимость потенциальной энергии иона твёрдого диэлектрика от координаты в электрическом поле окружающих заряженных частиц

Движение ионов в твёрдом теле рассматривают как их тепловое освобождение из потенциальной ямы и переход в другую потенциальную яму. В отсутствии внешнего электрического поля переходы ионов за счёт тепловой энергии по всем направлениям равновероятны. Так, например, для перехода иона из положения 1 в направлениях  $+x$  и  $-x$  нужно преодолеть барьер одной и той же

высоты  $\Delta W_1$ , а для перехода примесного иона – барьер  $\Delta W_2$ . Хаотичное движение ионов не приводит к появлению электрического тока.

При воздействии на диэлектрик внешнего электрического поля каждый ион обладает потенциальной энергией в этом поле, равной  $q \cdot \gamma$ , где  $q$  – заряд иона, а  $\gamma$  потенциал электрического поля в точке расположения иона.

Если поле в диэлектрике равномерное, то потенциал изменяется с координатой по линейному закону и зависимости  $q \cdot \gamma$  от координаты имеет вид, представленный на рис 6.2.

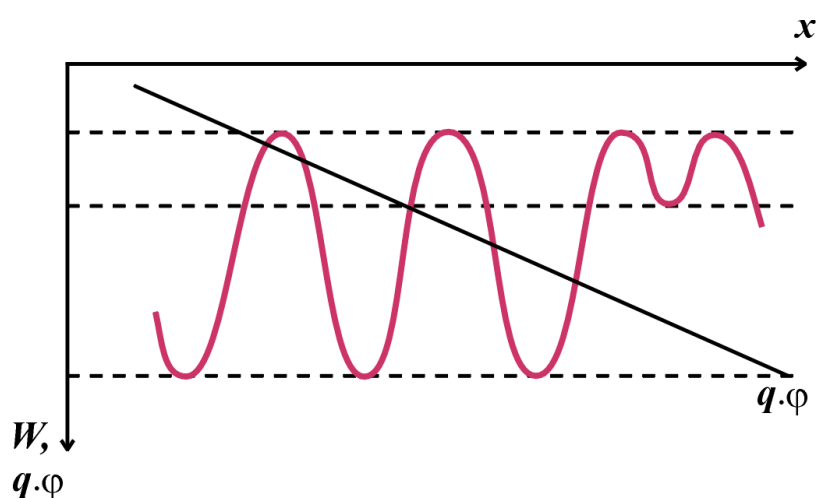


Рис 6.2. Зависимость потенциальной энергии иона от координаты во внешнем поле  $q \cdot \gamma$  и в электрическом поле окружающих заряженных частиц  $W_1$

Просуммировав обе составляющие потенциальной энергии иона, получим для потенциальной энергии иона график, представленный на рис. 6.3.

Высота потенциальных барьеров при перемещении ионов в направлениях  $+x$  и  $-x$  теперь не одинакова  $\Delta W_1'' \neq \Delta W_2'$ . Следовательно, возрастает вероятность перемещения положительных ионов в направлении вектора напряжённости электрического поля  $E$ , а отрицательных ионов – в противоположном направлении, и в диэлектрике появляется электрический ток.

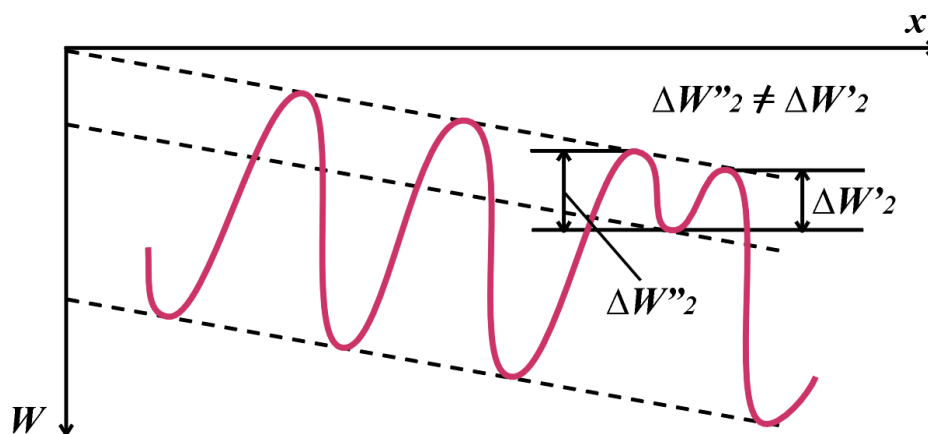


Рис 6.3. Зависимость потенциальной энергии иона от координаты в твёрдом теле при воздействии равномерного электрического поля

## 2.2. Температурная зависимость электрической проводимости

С повышением температуры растёт вероятность освобождения иона из потенциальной ямы и его перемещения в твёрдом диэлектрике. Вследствие этого, с повышением температуры увеличивается электропроводность диэлектриков.

Если в электрической проводимости принимают участие ионы одного вида, то математически зависимость удельной электрической проводимости диэлектрика от температуры описывается выражением

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{\Delta W}{kT}}, \quad (6.2)$$

где  $A$  – коэффициент, не зависящий от температуры;

$\Delta W$  – энергия активации ионов;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – абсолютная температура.

График зависимости удельной электрической проводимости от температуры представлен на рис. 6.4. Практически удобнее пользоваться графиком, построенным в полулогарифмической системе координат (рис. 6.5).

Прологарифмируем (6.2)

$$\ln \gamma = \ln A - \frac{\Delta W}{k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (6.3)$$

В системе координат  $\ln \gamma = f\left(\frac{1}{T}\right)$  график представляет собой прямую линию (см. рис. 6.5). Тангенс угла наклона прямой относительно оси

$x$  равен  $\Delta W/k$ . Следовательно, с помощью этого графика нетрудно рассчитать энергию активации ионов, участвующих в электропроводности:

$$\Delta W = k \cdot \frac{\ln \gamma'' - \ln \gamma'}{\frac{1}{T''} - \frac{1}{T'}}, \quad (6.4)$$

где  $k = 8,6 \cdot 10^{-5}$  К эВ/град – постоянная Больцмана;

$\Delta W$  – энергия активации ионов, эВ;

$\gamma'$  и  $\gamma''$  – удельная электрическая проводимость при температурах  $T'$  и  $T''$  соответственно;

$T'$  и  $T''$  – абсолютная температура.

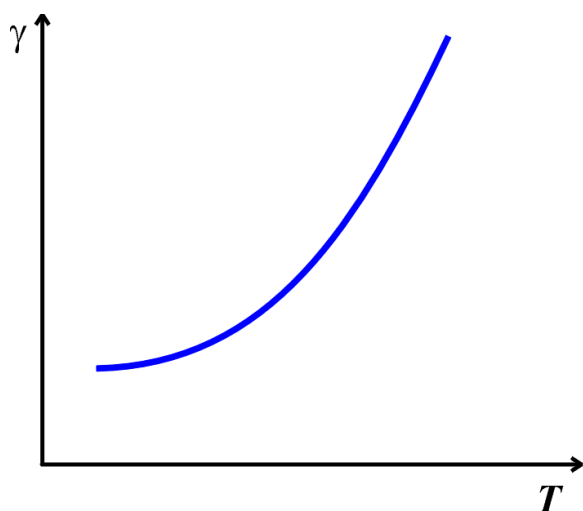


Рис. 6.4. Зависимость электрической проводимости  $\gamma$  от температуры  $T$

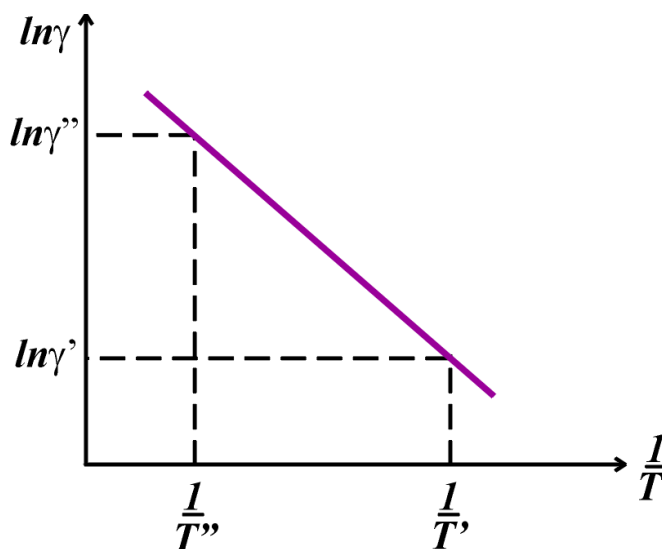


Рис. 6.5. Зависимость электрической проводимости  $\gamma$  от температуры  $T$  в полулогарифмической системе координат

Если в исследуемом интервале температур в электропроводности участвуют ионы двух видов, то зависимость удельной электрической проводимости от температуры математически описывается формулой вида:

$$\gamma = A_1 \cdot e^{-\frac{\Delta W_1}{kT}} + A_2 \cdot e^{-\frac{\Delta W_2}{kT}}, \quad (6.5)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – коэффициенты, относящиеся к ионам первого и второго вида соответственно;

$\Delta W_1$  и  $\Delta W_2$  - энергия активации этих ионов.

Если  $\Delta W_1 \neq \Delta W_2$ , то в системе координат  $\ln \gamma = f\left(\frac{1}{T}\right)$  график представляет собой ломаную линию. С его помощью можно рассчитать энергию активации ионов первого и второго вида.

### 2.3. Саморазряд конденсатора

В ряде радиотехнических устройств используются явления изменения заряда конденсатора во времени в результате саморазряда.

Если конденсатор зарядить при постоянном напряжении до напряжения  $U$ , а затем отключить от источника и оставить с разомкнутыми электродами, то заряд конденсатора со временем будет уменьшаться за счёт электропроводности диэлектрика. Напряжение  $U(t)$  на обкладках конденсатора будет со временем изменяться по закону:

$$U(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (6.6)$$

где  $\tau$  – постоянная времени саморазряда конденсатора, с.

За отрезок времени  $t = \tau$  напряжение на конденсаторе с разомкнутыми электродами уменьшится в  $e$  раз.

Можно показать, что  $\tau$  не зависит от геометрических размеров и формы конденсатора, а определяется исключительно свойствами диэлектрика.

$$\tau = R \cdot C = \rho \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon, \quad (6.7)$$

где  $R$  – объёмное сопротивление изоляции конденсатора, Ом;

$C$  – ёмкость конденсатора, Ф;

$\rho$  – удельное объёмное сопротивление диэлектрика, Ом.м;

$\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ Фм}^{-1}$  – электрическая постоянная;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость.



### 3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

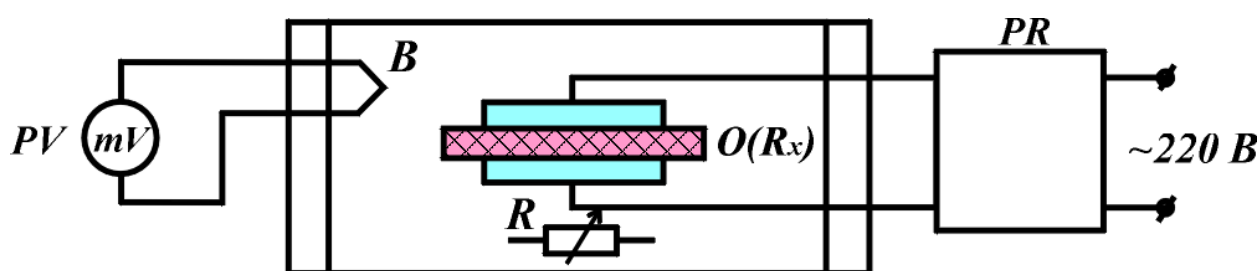


Рис. 6.6. Схема установки

Образец  $O$  помещается в муфельную печь. Скорость нагревания образца регулируется реостатом  $R$ . Температура образца измеряется с помощью термопары  $B$  и милливольтметра  $PV$ , а сопротивление - тераомметром  $PR$  (рис. 6.6).

Принцип работы тераомметра заключается в следующем (рис. 6.7). Измеряемое сопротивление  $R_x$  присоединяется к известному калиброванному сопротивлению  $R_9$ . Эти последовательно соединённые сопротивления  $R_x$  и  $R_9$  подключены к специальному стабилизированному источнику постоянного напряжения  $G$  ( $U = 105B$ ) и образуют делитель напряжения. Падение напряжения  $U_6$  на сопротивлении  $R_9$  измеряется при помощи усилителя постоянного тока  $A$  с большим выходным сопротивлением изоляции  $R_{из}$  ( $R_{из} \gg R_9$ ) и стрелочного прибора  $P$ .

Падение напряжения можно рассчитать по формуле

$$U_B = \frac{U}{R_x + R_9} \cdot R_9. \quad (6.8)$$

Отсюда

$$R_x = \frac{U \cdot R_9}{U_B} - R_9. \quad (6.9)$$

Напряжение  $U$  и сопротивление  $R_9$  постоянны. Следовательно,  $R_x$  обратно пропорционально  $U_B$  и шкалу микроамперметра  $P$  можно проградуировать в величинах сопротивления.

Для расширения пределов измерения в тераомметре имеется набор из 9 сопротивлений  $R_9$ , подключённых к многопозиционному переключателю.

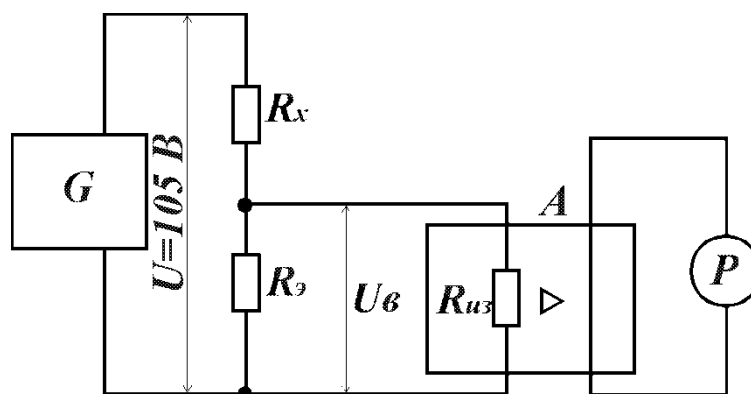


Рис. 6.7. Схема установки

#### 4. ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Включить тераомметр в сеть и дать прогреться в течение 30 минут.

2. Откалибровать тераомметр. Поставить переключатель в положение “кΩ”. (Положение КАЛ служит для калибровки на пределы ТОм ×1 и ТОм ×10, которые при выполнении лабораторной работы не используются).

3. Ручкой УСТАНОВКА ∞ установить стрелку прибора на риску “∞”. Соединить проводником клеммы  $R_x$  накоротко и ручкой УСТАНОВКА 0,1 поставить стрелку прибора на риску “0,1”.

4. Произвести измерения сопротивления. Снять закоротку и подключить образец к клеммам  $R_x$ . Переключатель пределов поставить в положение, при котором отклонение стрелки находится в пределах шкалы. Величина сопротивления определится как показание стрелочного прибора, умноженное на множитель показателя пределов.

Примечания:

а) Первые измерения производить при положении переключателя 100 × 9 Ом.

б) При проведении измерений необходимо учесть, что схема прибора позволяет заземлить любой, но одновременно только один из зажимов “К” или “Э”. Зажимы “Ω” и “Э” – относительно зажима “К”

” находятся под потенциалом 105 В.

5. Включить нагреватель печи и произвести измерения в процессе нагрева.

## 5. ЗАДАНИЕ

1. Ознакомиться с измерительной установкой.
2. Снять температурную зависимость электрической проводимости керамического диэлектрика  $\gamma = f(T)$ , изменяя температуру от 20 до 230 °С. Измерения сопротивления производить через 10 – 15 °С. Построить график  $\gamma = f(T)$  в полулогарифмической системе координат.
3. Рассчитать энергию активации для всех видов ионов.
4. Данные измерений сводятся в таблицу.

$t, ^\circ\text{C}$	$T, \text{K}$	$\frac{1}{T}, \text{K}^{-1}$	$R, \text{Ом}$	$\gamma = \frac{1}{R},$ Ом	$\ln \gamma$	Примечание
						Материал образца

При расчёте энергии активации рекомендуется для уменьшения погрешности использовать значения  $\ln \gamma$ , наиболее удалённые по температурной шкале друг от друга, но лежащие на одном отрезке прямой.

5. Выполнить индивидуальное задание по указанию преподавателя. Записи, связанные с его выполнением, представить в отчёте после выводов (см. приложение).

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем обусловлена электропроводность твёрдых диэлектриков? Объясните механизм электропроводности.
2. Какова температурная зависимость электропроводности твёрдых диэлектриков?
3. Что такое энергия активации?

4. В каком соотношении находятся энергия активации собственных и примесных ионов?
5. Докажите, что при низких температурах проводимость примесная, а не собственная.
6. Физический смысл явления саморазряда конденсатора?
7. Расскажите принцип действия тераомметра.

## **7. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Основы материаловедения : [ Электронный ресурс ] : учебное пособие / Е.А. Астафьева, Ф.М. Носков, В.И. Аникина, В.С. Казаков, О.Ю. Фоменко ; Министерство образования и науки Российской Федерации ; Сибирский Федеральный университет. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2013. – 152 с. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=364047>.
2. Биомедицинское материаловедение [Текст]: учебное пособие / С. П. Вихров [и др.]. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 383 с.
3. Корневский, Николай Алексеевич. Биотехнические системы медицинского назначения [Текст]: учебник / Н. А. Корневский, Е. П. Попечителей. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 688 с. – Текст : непосредственный.
4. ГОСТ 6433.1-71. Методы электрических испытаний материалов и условия испытаний.

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. При температуре 200 °С конденсатор был заряжен при постоянном напряжении 1000 В, а затем отключен от источника и оставлен с разомкнутыми электродами. Рассчитайте остаточный заряд конденсатора через 5 минут после отключения конденсатора. Ёмкость конденсатора 950 пФ.

2. При температуре 210 °С конденсатор был заряжен при постоянном напряжении 1000 В, а затем отключен от источника и оставлен с разомкнутыми электродами. Через 5 минут напряжение на конденсаторе было равно 100 В. Рассчитайте ёмкость конденсатора.

3. Рассчитайте постоянную времени саморазряда конденсатора при температуре 100 °С и 200 °С, если при 100 °С ёмкость  $C = 1000$  пФ, а средний температурный коэффициент емкости  $TKE = -4 \cdot 10^{-4}$  град<sup>-1</sup>.

4. При температуре 220 °С в конденсаторе существуют потери только на электропроводность. Рассчитайте  $tg\delta$  при  $f = 1000$  Гц. Ёмкость конденсатора при 20 °С равна 1000 пФ, а среднее значение  $TKE = -4 \cdot 10^{-4}$  град<sup>-1</sup>.

5. Есть ли в конденсаторе релаксационные потери при 100 °С на частоте 2000 Гц, если у него  $tg\delta = 3 \cdot 10^{-3}$ , а ёмкость  $C = 975$  пФ.