

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 27.01.2022 22:54:50

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabf73e943df4a4851fda56d089

## МИНОБРНАУКИ 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.И. Локтионова

«15» 02

2018 г.

## МАТЕРИАЛЫ И КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Методические указания по выполнению лабораторных работ  
для студентов направления подготовки 11.03.03  
«Конструирование и технология электронных средств»

УДК 681.325

Составитель Е. М. Терещенко

Рецензент

Кандидат технических наук, профессор *В.А. Шлыков*

**Материалы и компоненты электронных средств:** методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Материалы и компоненты электронных средств» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Е. М. Терещенко. Курск, 2018. 161 с.: ил. 9, табл. 4, прилож. 3. Библиогр.: с. 161.

Содержатся теоретические сведения о свойствах основных материалов, применяемых для изготовления компонентов электронных средств. Указывается порядок выполнения лабораторных работ и методы обработки экспериментальных данных.

Предназначены для студентов направления подготовки 11.03.03 специальности «Конструирование и технология электронных средств» очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 4,94. Уч.-изд. л. 4,47. Тираж 100 экз. Заказ . Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

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

# **Лабораторная работа №1**

## **Исследование температурной зависимости сопротивления резистивных материалов**

### **1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

1. Экспериментальное исследование зависимости сопротивления резистивных материалов для основных типов резисторов от температуры.
2. Освоение методики сглаживания экспериментальных зависимостей (метода наименьших квадратов).

### **2. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- изучить теоретический материал, содержащийся в методических указаниях;  
ознакомиться с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы.

При подготовке к защите лабораторной работы необходимо:

- оформить отчет в соответствии с разделом 6; устно подготовить ответы на контрольные вопросы.

### **3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

#### **3. 1. Резистор как компонент электронной техники**

*Резистором* называется компонент электронной техники, обладающий активным сопротивлением. Резисторы - наиболее распространенные детали современного электронного или радиотехнического устройства, они составляют от 20 до 50 % общего количества элементов принципиальных схем.

Часть конструкции резистора, в которой реализовано свойство активного сопротивления, называется *резистивным элементом*.

Резисторы классифицируются по ряду признаков: назначению, характеру изменения сопротивления, способу защиты, материалу резистивного элемента. Также различно конструктивное исполнение резисторов: резисторы могут быть проволочными, непроволочными поверхностного типа, непроволочными объемного типа (см. подробнее [1], прил. 1).

**3. 1. 1. Назначение резисторов.** При протекании электрического тока в цепи, на резисторе в соответствии с законом Ома образуется падение напряжения. Поэтому в радиотехнических схемах резисторы могут выполнять ряд функций, важнейшая из которых - *уменьшение напряжения источника до необходимого значения.*

С этой целью применяют как постоянные резисторы: «*гасящие*», включаемые последовательно между источником и потребителем питания, и *потенциометрические делители* (два последовательно соединенных резистора, подключенные непосредственно к плюсу и минусу источника питания); так и переменные резисторы или *потенциометры.*

Следующая функция резисторов - *шунтирование.* Шунт - резистор, включенный параллельно каким-либо другим узлам или элементам. Использование шунтов основано на первом законе Кирхгофа (законе токов для разветвленных цепей), согласно которому общий ток, протекающий через параллельное соединение сопротивлений, разветвляется на составляющие, обратно пропорциональные значениям этих сопротивлений.

Еще одно применение резисторов в радиотехнических схемах - это использование резисторов в качестве *нагрузок.*

Кроме того, без применения резисторов невозможно осуществить интегрирование и дифференцирование импульсных сигналов, а также формирование времязадающих цепей. В этих целях широко применяются RC-цепи (см. [2]).

**3. 1. 2. Номинальное сопротивление резисторов.** Основным параметром резистора является номинальное сопротивление  $R_{\text{ном}}$ , значение которого получается расчетным путем. Номинальное сопротивление зависит от конструкции резисторов, его геометрических размеров, от вида резистивного материала ([3]).

Для *проволочных резисторов*

$$R_{\text{ном}} = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{4l}{\pi d^2},$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление материала проволоки;  
 $S, d, l$  - площадь, диаметр и длина провода соответственно.

Для *непроволочных резисторов объемного типа*,

$$R_{\text{ном}} = \rho \frac{l_{\text{к}}}{a \cdot b}, \quad (2)$$

где  $a, b$  - геометрические размеры проводящей композиции;

$l_{\text{к}}$  - расстояние между узлами (длина протекания тока).

Для *непроволочных резисторов поверхностного типа*, поскольку толщина пленки мала по сравнению с диаметром основания  $D$  (см. прил. 1),

$$R_{\text{ном}} = R_{\square} \frac{l_{\text{к}}}{\pi D} = R_{\square} k_{\text{ф}}, \quad (3)$$

где  $R_{\square}$  - сопротивление квадрата резистивной пленки<sup>1</sup>;

$k_{\text{ф}}$  - коэффициент формы резистивного элемента .

Действительное сопротивление резистора, получаемое путем измерения (без учета погрешностей самого измерения), может отличаться от номинального в пределах допуска. Допуск принято выражать в процентах от значения номинального сопротивления.

**3. 1. 3. Температурный коэффициент сопротивления.** Относительное изменение сопротивления резистора при изменении температуры на один градус (Цельсия или Кельвина) называется *температурным коэффициентом сопротивления ТКР*:

$$\text{TKP} = dR/RdT \quad (4)$$

Измеряют ТКР в  $\text{K}^{-1}$  или в процентах на градус, его значение и знак зависят от вида материала резистивного элемента.

Сопротивлением квадрата (сопротивлением на безразмерный квадрат) называется сопротивление квадратного участка плёнки при прохождении тока через две его противоположные грани параллельно поверхности подложки.

Коэффициентом формы называется отношение длины участка протекания тока к ширине пленки, через которую этот ток протекает.

Температурный коэффициент резисторов зарубежного производства оценивают в миллионных долях номинального сопротивления резистора, изменяющихся при изменении температуры на один градус (соответствующий параметр обозначается ppm).

Температурный коэффициент  $\alpha_R$  характеризует *обратимое* изменение резистивного элемента вследствие его нагрева, причиной чему может служить как изменение температуры окружающей среды, так и изменение электрической нагрузки [2].

Значения осд определяет температурную стабильность резистора:

для резисторов общего применения  $\alpha_R = 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-1} \% / K$  ;

для прецизионных резисторов  $\alpha_R = 10^{-4} \dots 10^{-2} \% / K$  .

Помимо температурного коэффициента сопротивления резистора интерес представляет также температурный коэффициент удельного сопротивления резистивного материала:

$$\text{ТК}\rho = \alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} . \quad (5)$$

В практических расчетах полезна формула

$$\alpha_\rho = \alpha_R + \alpha_l , \quad (6)$$

где  $\alpha_l$  - температурный коэффициент линейного расширения материала.

Для чистых металлов, поскольку  $\alpha_l \ll \alpha_\rho$ ,  $\alpha_R \approx \alpha_\rho$ .

температурный коэффициент большинства из них находится в диапазоне  $(3,9 \dots 6,5) \cdot 10^{-3}$ .

В достаточно широком диапазоне температур с ошибкой не более 10 % для проводников справедлива линейная зависимость удельного сопротивления от температуры ( $\rho \sim T$ ). Еще с большей точностью выполняется квадратичная зависимость:

$$\rho_T = \rho_0(1 + AT + BT^2), \quad (7)$$

где коэффициенты  $A$  и  $B$  являются характеристикой конкретного материала, причем  $B \ll A$ .

### 3. 2. Сглаживание результатов наблюдений. Метод наименьших квадратов

Пусть целью опыта является исследование зависимости одной физической величины (величины  $y$ ) от другой физической величины (величины  $x$ )<sup>3</sup>.

По результатам эксперимента составлена таблица (см. табл. 1) и построен график (рис. 1).

Таблица 1

Значения $x$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	...	$x_n$
Значения $y$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	...	$y_n$

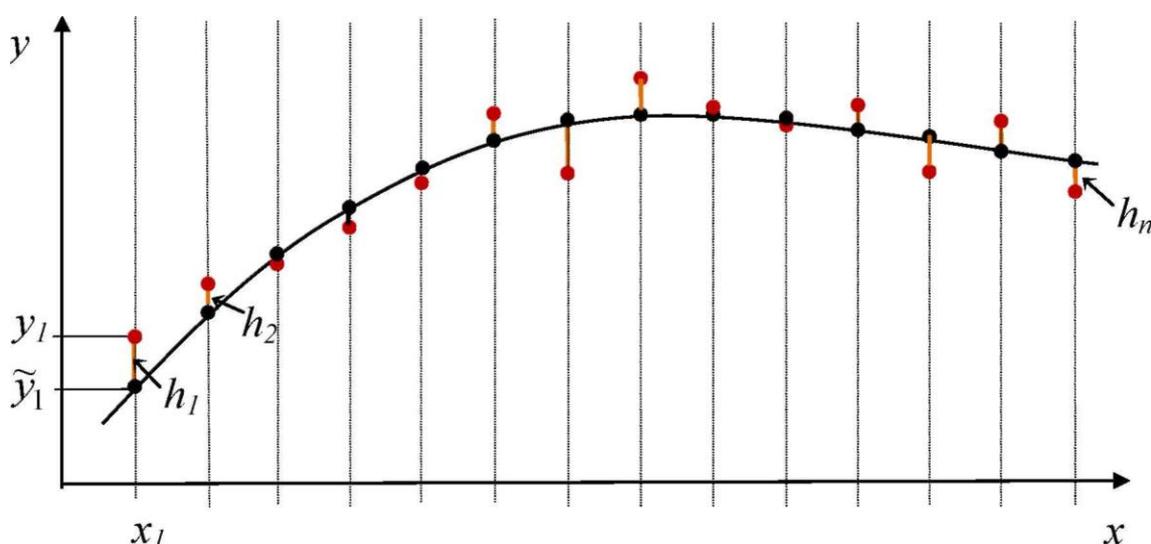


Рисунок 1.

Экспериментальные точки и кривая регрессии:

$(x_i, y_i)$  - экспериментальные точки (выделены красным цветом);

$(x_i, \tilde{y}_i)$  - теоретические точки (выделены черным цветом);

$h_i$  - невязки (показаны красным цветом)

Экспериментальные точки на графике располагаются не всегда правильным образом - сказываются погрешности измерения, личные ошибки операторов. Поэтому на практике возникает задача

В лабораторной работе в качестве величины  $y$  выступает сопротивление резистора  $R$ , в качестве величины  $x$  - температура  $T$ .

сглаживания экспериментальной зависимости: нахождения такой функции  $F(x)$ , в которой отразится только общая закономерность, но не будут учтены случайные ошибки наблюдения.

Пусть из физических соображений предполагается известной функциональная зависимость  $y=F(x)$ , но неизвестными параметрами функции  $F$ . Тогда задача сводится к подбору параметров функции  $F$  так, чтобы она наилучшим образом приближала экспериментальные точки - к задаче *математической регрессии*.

На практике в качестве меры близости экспериментальных точек и теоретической кривой используют сумму квадратов *невязок* - разностей ординат экспериментальных и теоретических точек (см. рис. 1). Соответствующий метод получил название «метод наименьших квадратов» (МНК)<sup>4</sup>.

Согласно методу наименьших квадратов требование наилучшей согласованности теоретической функции  $y=F(x)$  с результатами эксперимента (с таблицей 1) сводится к нахождению минимума функции  $\Phi$ :

$$\Phi = \sum_{i=1}^n h_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - F(x_i))^2 \rightarrow \min . \quad (8)$$

Рассмотрим метод нахождения приближающей функции в общем виде

$$y = F(x, a, b, c).$$

на примере аппроксимирующей функции с тремя параметрами:

(9)

Требование (8) переписывается в виде:

$$\Phi(a, b, c) = \sum_{i=1}^n (y_i - F(x_i, a, b, c))^2 \rightarrow \min . \quad (10)$$

Для нахождения таких параметров  $a$ ,  $b$  и  $c$ , при которых функция  $\Phi(a, b, c)$  достигает минимума, используем необходимые условия экстремума:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial c} = 0,$$

составляющие систему для определения неизвестных параметров  $a$ ,  $b$  и  $c$ :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n [y_i - F(x_i, a, b, c)] \cdot F'_a(x_i, a, b, c) = 0 \\ \sum_{i=1}^n [y_i - F(x_i, a, b, c)] \cdot F'_b(x_i, a, b, c) = 0 \\ \sum_{i=1}^n [y_i - F(x_i, a, b, c)] \cdot F'_c(x_i, a, b, c) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Разрешив систему (12) относительно параметров  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , мы и получим конкретный вид искомой функции  $F(x, a, b, c)$ . Изменение количества параметров выразится лишь в изменении количества уравнений в системе.

**3. 2. 1. Квадратичная регрессия.** Будем искать приближающую функцию в виде полинома второй степени:

$$F(x, a, b, c) = ax^2 + bx + c. \quad (13)$$

Частные производные функции (12) равны:

$$\begin{aligned} F'_a(x_i, a, b, c) &= x_i^2, \\ F'_b(x_i, a, b, c) &= x_i, \\ F'_c(x_i, a, b, c) &= 1 \end{aligned} \quad (14)$$

Система (12) переписывается в виде

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n [y_i - ax_i^2 - bx_i - c] \cdot (x_i)^2 = 0 \\ \sum_{i=1}^n [y_i - ax_i^2 - bx_i - c] \cdot x_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n [y_i - ax_i^2 - bx_i - c] \cdot 1 = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Система (15) представляет собой систему трех линейных уравнений с тремя неизвестными  $a$ ,  $b$  и  $c$ . Перепишем её в виде:

$$\begin{aligned} K_{x^4} \cdot a + K_{x^3} \cdot b + K_{x^2} \cdot c &= M_{x^2 y} \\ K_{x^3} \cdot a + K_{x^2} \cdot b + K_x \cdot c &= M_{x y} \\ K_{x^2} \cdot a + K_x \cdot b + n \cdot c &= M_y. \end{aligned} \tag{16}$$

Все коэффициенты системы уравнений (16) зависят только от данных, полученных в ходе эксперимента:

Решение системы дает значение параметров  $a$ ,  $b$  и  $c$  для функции регрессии  $F(x, a, b, c) = ax^2 + bx + c$ .

$$\begin{aligned} K_x &= \sum_{i=1}^n x_i; & K_{x^2} &= \sum_{i=1}^n (x_i)^2; & K_{x^3} &= \sum_{i=1}^n (x_i)^3; & K_{x^4} &= \sum_{i=1}^n (x_i)^4; \\ M_y &= \sum_{i=1}^n y_i; & M_{x y} &= \sum_{i=1}^n x_i y_i; & M_{x^2 y} &= \sum_{i=1}^n (x_i)^2 y_i. \end{aligned}$$

(17)

#### 4. ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Лабораторная бригада исследует температурную зависимость сопротивления нескольких резисторов, предварительно помещенных в сушильный шкаф. Необходимо:

- 1) изменяя температуру рабочей камеры сушильного шкафа, зафиксировать изменение сопротивления резисторов;
- 2) с помощью метода наименьших квадратов найти функцию регрессии в виде полинома второй степени для каждой из экспериментальных температурных зависимостей;
- 3) построить экспериментальную и теоретическую зависимости для каждого резистора в одной системе координат;
- 4) оценить температурные коэффициенты сопротивления резисторов.

## 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

### 5. 1. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка включает в себя

- набор резисторов;
- измеритель L,C,R цифровой E7-8;
- цифровой мультиметр Mastech M890G; сушильный шкаф;
- лабораторный трансформатор.

### 5. 2. Порядок проведения эксперимента

1. Переписать маркировку резисторов, помещаемых в сушильный шкаф.
2. Зафиксировать переключатель функций цифрового мультиметра в положение TEMP. Установить в разъем для измерения температуры на передней панели прибора термопару и поместить пробник термопары в сушильный шкаф непосредственно над сборкой резисторов.
3. Установить переключатель вида измерений прибора E7-8 на измерение сопротивления.
4. Закрыть дверцу шкафа, включить сушильный шкаф и подключенный к нему измеритель E7-8 в сеть. Температура сушильного шкафа начнет повышаться.

*Внимание:* перед началом работы необходимо проверить надёжность заземления прибора E7-8 и сушильного шкафа.

4. Переключая тумблер сушильного шкафа, с интервалом в два градуса снимать показания измерителя E7-8, записывая температуру и соответствующее значение сопротивления каждого резистора в таблицу.

*Внимание:* с целью регулирования скорости нагрева сушильного шкафа допускается использование лабораторного трансформатора.

## **6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

1. Цель работы.
2. Таблицы с результатами проведенных в ходе лабораторной работы измерений.
3. Основные формулы, используемые при расчетах.
4. Протокол обработки результатов эксперимента.
5. Графики экспериментальной и теоретической температурных зависимостей.
6. Анализ полученных результатов.
7. Выводы.

## **7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие функции выполняют резисторы в радиотехнических схемах? Что такое номинальное сопротивление резистора. Как оно определяется для различных типов резисторов.
2. Какие основные типы конструкций резисторов Вы знаете.
3. Проведите классификацию резисторов по типу материала резистивного элемента. Приведите сравнительные характеристики резисторов различных типов.
4. Дайте определение температурного коэффициента сопротивления. Какова его связь с температурным коэффициентом удельного сопротивления? Какова общая формула, описывающая температурную зависимость сопротивления проводников?
5. В чем заключается метод наименьших квадратов.

## **8. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Исследование влияния производственных погрешностей на параметры компонентов электронных средств : методические указания по выполнению лабораторной работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Л. А. Болычевцева. Курск, 2012. 26 с.
2. Гендин Г.С. Все о резисторах [Текст]: Справочник. М.: Горячая линия - Телеком, 1999. - 192 с.
3. Сорокин В. С. Материалы и элементы электронной техники [Текст] : учебник : в 2 т. Т. 2. - М. : Академия, 2006. - 384 с.

## **КЛАССИФИКАЦИЯ РЕЗИСТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ КОНСТРУКЦИИ РЕЗИСТОРОВ**

Вид материала резистивного (токопроводящего) элемента положен в основу *специальной классификации* резисторов (см. рис. в работе [1]). Выделяют следующие группы резисторов:

- 1) *проволочные;*
- 2) *непроволочные;*
- 3) *металлофольговые.*

1) Постоянный *проволочный* резистор представляет собой изоляционный каркас, на который намотана проволока с высоким удельным электрическим сопротивлением. Снаружи резистор покрывают термостойкой эмалью, спрессовывают пластмассой, либо герметизируют металлическим корпусом, закрываемым с торцов керамическими шайбами.

Для изготовления этих резисторов используют провода из специальных сплавов, имеющих высокое удельное сопротивление, хорошую теплостойкость, малый температурный коэффициент сопротивления, например, из манганина (Cu - 85 %, Mn - 12 %, Ni - 3 %), константана (Cu - 60 %, Ni - 40 %); из хромоникелевых сплавов (нихромов).

Проволочные резисторы обладают рядом достоинств: высокой температурной стабильностью, малыми шумами. К недостаткам резисторов такого типа следует отнести большие габаритные размеры, высокую стоимость, а также значительные индуктивность и ёмкость.

2) *Металлофольговые* резисторы содержат резистивный элемент из фольги определенной конфигурации, нанесенной на изолированное основание.

3) *Непроволочные* резисторы можно разделить на:

- *тонкопленочные* (толщина слоя - нанометры),
- *толстопленочные* (толщина слоя - доли миллиметра),
- *объемные* (толщина слоя - единицы миллиметров).

Такое разделение условно - четкой границы по толщине между тонкопленочными и толстопленочными резисторами не существует. Их часто объединяют в одну группу - *непроволочные резисторы поверхностного типа*. Конструкция таких резисторов показана на рис. П1.

**Резисторы поверхностного типа** являются наиболее распространенными элементами гибридных интегральных схем. Резистивный элемент тонкопленочных резисторов может представлять собой *микрокомпозиционный слой из диэлектрика и металла*, или тонкую пленку из *оксида металла*.

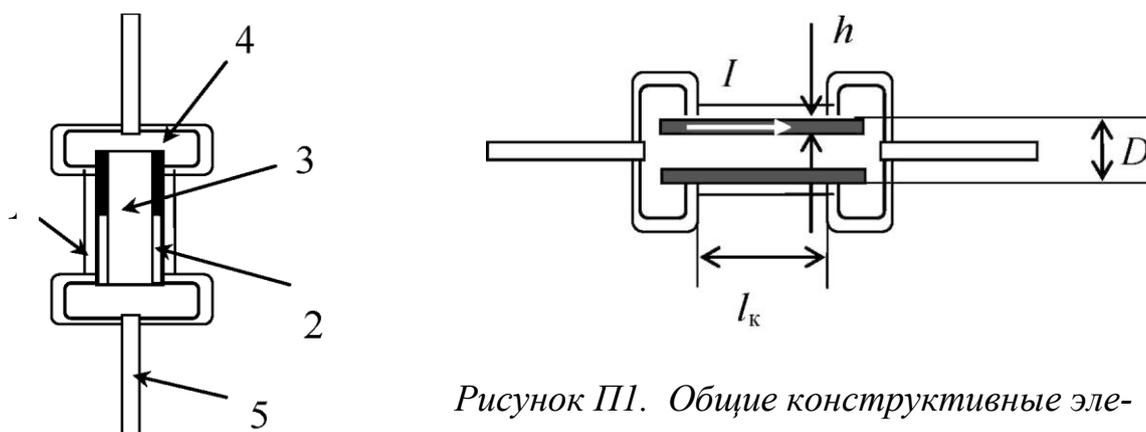


Рисунок П1. Общие конструктивные элементы непроволочного резистора поверхностного типа

- 1 - наружное защитное покрытие;
- 2 - резистивная пленка (токопроводящий слой);
- 3 - диэлектрическое основание; 4 - контактный колпачок; 5 - осевой металлический вывод;

$l_k$  - длина протекания тока  $I$ ;  $h$  - толщина пленки;  $D$  - диаметр основания

В мировой практике в качестве резистивных материалов из чистых металлов для изготовления тонких пленок получили тантал (Ta), хром (Cr) и рений (Re).

Универсальность *тантала* объясняется его высоким удельным сопротивлением, возможностью контролируемого изменения электрических параметров путем легирования и окисления, хорошими защитными свойствами окисных пленок.

*Хром* также удовлетворяет практически всем требованиям, предъявляемым к материалу резистивной пленки - воспроизводимости и стабильности электрических параметров, способности длительное время работать без отказов; образует стабильную и плотную окисную пленку.

*Рений* применяется для создания ТПР с высоким удельным поверхностным сопротивлением. Тугоплавкость рения позволяет использовать его даже при толщинах порядка 4 нм. Однако пленки рения нуждаются в защите от воздействия атмосферы, поэтому их обычно покрывают слоем окиси кремния.

подавляющее большинство чистых окислов металлов в нормальных условиях являются диэлектриками. Однако при неполном окислении или при введении некоторых примесей проводимость окислов повышается, что позволяет использовать их в качестве резистивного слоя пленочных резисторов (например, двуокись олова  $\text{SnO}_2$ , окись индия  $\text{In}_2\text{O}_3$ ).

Для изготовления тонкопленочных резисторов (в частности, резисторов интегральных микросхем) широко применяется *сплавы металлов*, например, нихромы.

Также к числу тонкопленочных относят *углеродистые и бороуглеродистые* резисторы, проводящий элемент которых - пленка пиролитического углерода или бороуглеродистые пленки.

Пиролитический углерод получают путем пиролиза (термического разложения без доступа кислорода) газообразных углеводородов (метана, бензина, гептана) в камере, где находятся основания заготовок для резисторов. Бороуглеродистые пленки получают пиролизом бороорганических соединений ( $\text{B}(\text{C}_4\text{H}_9)_3$  или  $\text{B}(\text{C}_3\text{H}_7)_3$ ).

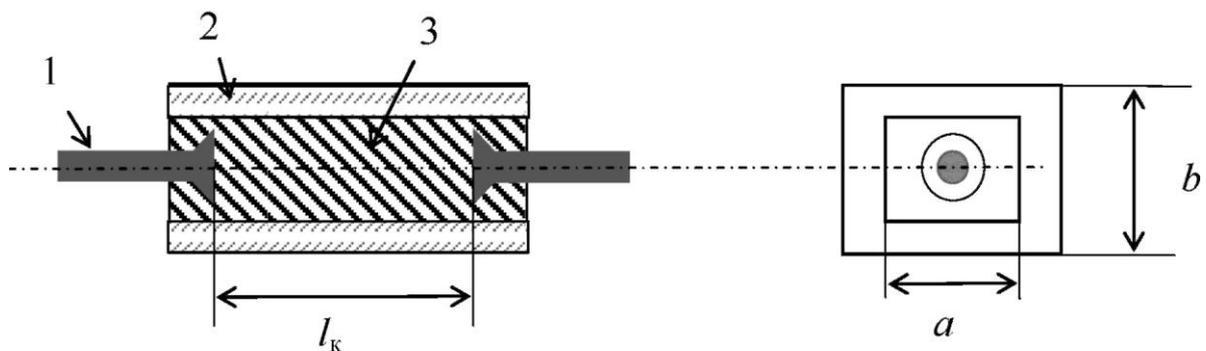
Хорошими эксплуатационными свойствами обладают *металлодиэлектрические* резисторы. Металлодиэлектрическая пленка является композицией из частиц металла и частиц диэлектрика. Свойства пленки зависят от соотношения этих веществ.

В случае значительно большего содержания проводящей фазы микрокомпозиция представляет собой металлическую матрицу, в которую диспергирована (рассеяна в виде мелких частиц) диэлектрическая фаза. В этом случае проводимость пленки определяется проводимостью металла и удельное сопротивление её невелико.

В противоположном случае пленка представляет собой диэлектрическую матрицу, в которой диспергированы частицы проводящего вещества. Удельное сопротивление такой композиции значительно (в десятки и сотни раз) выше удельного сопротивления первой структуры.

Проводящие резистивные слои толсто пленочных и **объемных резисторов** (конструкция объемного резистора показана на рисунке П2) могут представлять собой композицию из нескольких фаз, получаемую механическим смешением:

- проводящего компонента, например, графита или сажи<sup>5</sup>, металла или окисла металла,
- органических или неорганических связующих (смолы, стеклоэмали),
- наполнителей, пластификаторов, отвердителей.



*Рисунок П2. Общие конструктивные элементы  
непроволочного резистора объемного типа*

*1 - вывод; 2 - стеклокерамическая трубка; 3 -  
проводящая композиция;*

*$l_k$  - длина протекания тока  $I$ ;*

*$a, b$  - геометрические размеры проводящей композиции*

Природный графит - крупнокристаллический материал, являющийся одной из форм чистого углерода. Чистый углерод в модификации алмаза является диэлектриком. Сажи представляют собой мелко-дисперсный углерод с примесями слоистых веществ

После соответствующей термической обработки образуется монолитный слой с необходимым комплексом резистивных параметров.

*Лакосажевые* композиции формируются на основе синтетических смол в виде лаковых растворов. На основе таких композиций получают резисторы, называемые лакосажевыми, лакопленочными или пленочными композиционными.

*Керметы* - металлодиэлектрические композиции с неорганическим связующим. В резистивных керметных слоях основным проводящим компонентом являются металлические порошки и их смеси, представляющие собой керамическую, стеклянную или полимерную основу с равномерно распределенными частицами металлов. Наибольшее распространение получила композиция Cr -SiO<sub>2</sub>, тонкие пленки которой изготавливаются методом термического испарения и конденсации в вакууме.

Также широко применяются композиции стекла с палладием и серебром. Стекло, размолотое до зерен в 3-5 мкм, смешивают с порошком серебра и палладия, органической связкой и растворителем. Получившуюся пасту наносят на подложку и спекают в обычной атмосфере.

В резисторах на основе *проводящих пластмасс* резистивный элемент формируется горячим прессованием из проводящей композиции. Композиция представляет собой пресспорошок, изготовленный на основе связующих полимеров (фенольных и других смол) и сажи. Возможны металлопластмассовые композиции, проводящим компонентом которых являются металлы.

Сравнительная характеристика различных типов постоянных резисторов приведена в приложении 2.

## Приложение 2

### ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОСТОЯННЫХ РЕЗИСТОРОВ

Основные эксплуатационные параметры и характеристики наиболее распространенных в электронной технике резисторов приведены в таблице П1.

Таблица П1

Вид резистивного элемента	$R_{ном}$ Ом	$\sigma_{CR} \cdot 10^{-4}$ ,	$\Delta_{max}^A$ °C	Характеристика
<i>Металло-пленочный</i>	$10 \dots 10^4$	$\pm (2 \dots 5)$	153	Малые габаритные размеры, высокая стабильность
<i>Металло-диэлектрический</i>	$10^3 \dots 10^7$	$\pm (5 \dots 10)$	250	Малые габаритные размеры, высокая стабильность и термостойкость
<i>Металло-оксидный</i>	$10^{-1} \dots 100$	$- (10 \dots 20)$	155	Малые шумы, малые габаритные размеры
<i>Углеродистый</i>	$10 \dots 10^6$	$- (2 \dots 20)$	125	Малые шумы, низкая стоимость, большие габаритные размеры
<i>Композиционный пленочный</i>	$1 \dots 10^{13}$	$< + 100$	155	Большие шумы, малые габаритные размеры, плохая стабильность
<i>Композиционный объемный</i>	$1 \dots 10^7$	$< + 100$	300	Большие шумы, хорошая токовая стойкость и термостойкость
<i>Проволочный</i>	$10^{-2} \dots 10^6$	$+ (1 \dots 10)$	250	Высокая точность, большие габаритные размеры, высокая стоимость
<i>Металло-фольговый</i>	$1 \dots 10^4$	$\pm (10^{-1} \dots 1)$	85	Высокая точность, высокая стабильность, малые шумы

## Лабораторная работа №2

### Исследование температурной зависимости основных параметров конденсаторов

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Исследование температурных зависимостей ёмкости и тангенса угла диэлектрических потерь для основных типов конденсаторов.
2. Изучение методики расчета температурного коэффициента емкости.

#### 2. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- изучить теоретический материал, содержащийся в методических указаниях;
- ознакомиться с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы.

При подготовке к защите лабораторной работы необходимо:

- оформить отчет в соответствии с разделом 6; устно подготовить ответы на контрольные вопросы.

#### 3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

##### 3. 1. Конденсатор как компонент электронной техники

Конденсатор - это компонент электронной техники, образующий электрическую ёмкость. Конденсатор содержит электроды (обкладки), разделенные диэлектриком, который называют *рабочим* диэлектриком.

Ёмкость конденсатора  $C$  - это физическая величина, равная отношению заряда  $Q$ , накопленного в конденсаторе, к разности потенциалов  $U$  между его обкладками:

$$C = \frac{Q}{U}. \tag{1}$$

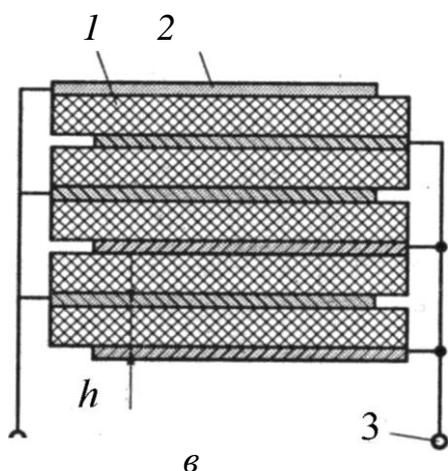
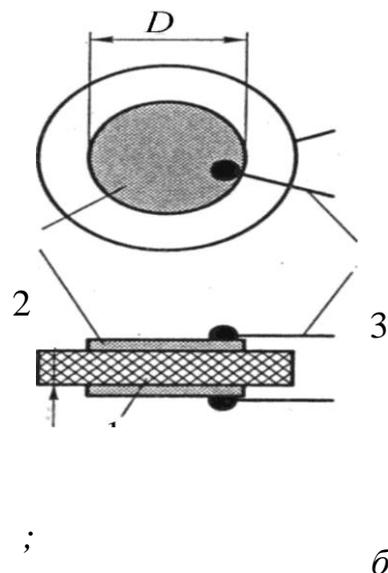
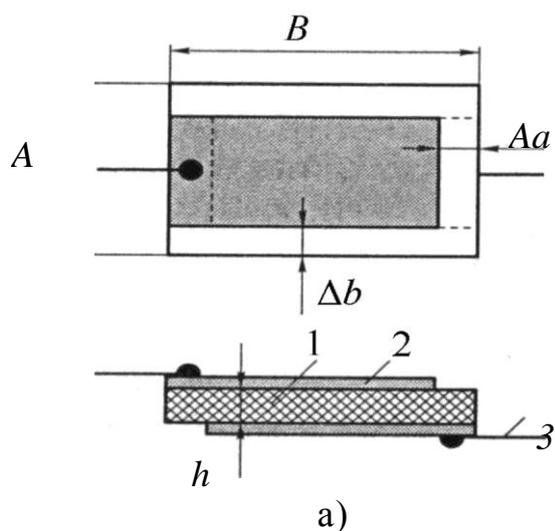
Единица измерения емкости - фарад (Ф); емкости менее  $10^{-10}$  Ф обозначаются в пикофарадах (пФ), от  $10^{-10}$  Ф до  $10^{-7}$  Ф - в нанофарадах (нФ), более  $10^{-7}$  Ф - в микрофарадах (мкФ).

### 3. 2. Основные типы конструкции конденсаторов

Общая и специальная классификации конденсаторов приведены в [1], приложение 1. Выделяют три основных типа конструкции конденсаторов: плоский, цилиндрический и спиральный [2].

**3. 2. 1. Плоский конденсатор.** Рабочий диэлектрик такого конденсатора представляет собой плоскую пластину. Электроды покрывают только часть поверхности диэлектрика, оставляя так называемые *закраины*, позволяющие увеличить напряжение пробоя конденсатора.

В *пластинчатом* конденсаторе рабочий диэлектрик имеет форму прямоугольника размером  $A \times B$  с закраинами  $Aa$  и  $Ab$ ; в *дисковом* - форму диска с диаметром  $D$  (см. рис. 1, а, б).



Емкость конденсатора определяется площадью перекрытия обкладок  $S$  и толщиной рабочего диэлектрика  $h$ . Поэтому ёмкость пластинчатого конденсатора (без учета краевых эффектов) может быть вычислена по формуле (2):

(2)

где  $\varepsilon_0$   
 $h$

$$C_{\text{п}} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S_{\text{п}}}{h}, \quad (3)$$

$S_{\text{п}}$  - электрическая постоянная,  
- толщина рабочего диэлектрика,  
- площадь перекрытия пластин конденсатора:

$$S_{\text{п}} = (a - 2 \Delta a) \cdot (B - 2 \Delta b).$$

Емкость дискового конденсатора (также без учета распространения электрического поля за пределы перекрытия пластин) определяется по формуле (4):

(4)

$$C_{\text{д}} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot h},$$

где  $D$  - диаметр электродов конденсатора.

*Многослойный* конденсатор также является разновидностью плоских конденсаторов. Его конструкция состоит из  $N$  диэлектрических слоев, расположенных между электродами. Между собой и с выводами конденсатора соединены все четные и все нечетные электроды (см. рис. 1, в).

Поскольку образованные емкости оказываются соединенными параллельно, общая емкость многослойного конденсатора

(5)

$$C_{\text{п}} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot N \cdot \frac{S_{\text{п}}}{h}.$$

Плоские конденсаторы являются наиболее распространенным типом, составляя более 80 % суммарного выпуска.

**3. 2. 2. Цилиндрический конденсатор.** Рабочий диэлектрик конденсатора такого типа имеет форму цилиндра, на которую с внешней и внутренней сторон нанесены электроды (см. рис. 2).

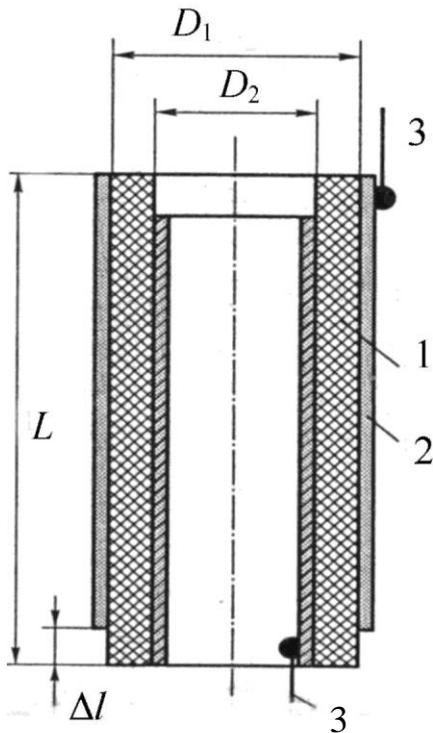


Рисунок 2. Цилин-

дрический конденсатор:

- 1 - рабочий диэлектрик;
- 2 - электроды;
- 3 - контактные выводы

Емкость цилиндрического конденсатора определяется из выражения:

$$C_{\text{ц}} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \frac{2\pi \cdot (L - 2\Delta l)}{\ln \frac{D_2}{D_1}} \quad (6)$$

где  $D_1, D_2$  — наружный и внутренний диаметры диэлектрической трубки,  
 $L$  — длина диэлектрической трубки,  
 $\Delta l$  — ширина закраин.

В том случае, когда зазор между обкладками ( $D_1 - D_2$ ) мал по сравнению с диаметром цилиндра:  $D_1 - D_2 \ll D_1$ , то

$$\ln \frac{D_2}{D_1} \approx \frac{D_2 - D_1}{D_1}, \quad (7)$$

и выражение (6) можно

$$C_{\text{ц}} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S_{\text{п}}}{D_2 - D_1}.$$

Выражение (8), определяющее емкость цилиндрического конденсатора при малом зазоре между обкладками (малой толщине рабочего диэлектрика) аналогично выражению (2) для емкости плоского конденсатора.

**3. 2. 3. Спиральный конденсатор.** В такой конструкции (см. рис. 3) используются гибкие диэлектрические и металлические материалы.

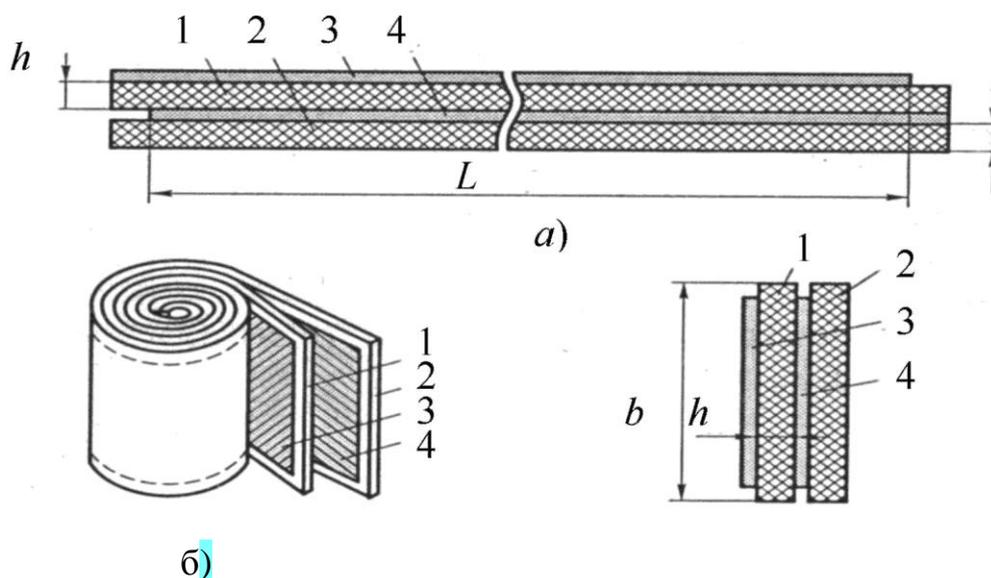


Рисунок 3. Спиральный конденсатор:

- а) в развернутом виде,
- б) секция конденсатора,
- в) сечение витка спирали.

1, 2 - рабочий диэлектрик; 3, 4 - электроды

Емкость спирального конденсатора равна удвоенной емкости конструкции на рис. 1, а:

$$C_c = 2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{l \cdot b}{h}, \quad (9)$$

где  $l$ ,  $b$  - длина и ширина области перекрытия электродов.

На долю спиральных конденсаторов приходится 10 - 15 % суммарного выпуска.

### 3. 3. Номинальная емкость конденсатора

*Номинальная емкость* конденсатора  $C_{\text{НОМ}}$  - емкость, полученная расчетным путем. Номинальная емкость зависит от конструкции конденсатора, его геометрических размеров и диэлектрической проницаемости рабочего диэлектрика (для основных типов постоянных конденсаторов емкость можно определить по выражениям (2), (4) - (6), (9)).

Емкость конденсаторов  $C$ , признаваемых годными и попадающих к потребителю, не равна в точности номинальной, а может более или менее отличаться от неё в зависимости от значения *допуска номинальной емкости*  $\gamma$  (%). Для всех конденсаторов должно выполняться неравенство:

$$\frac{C - C_{\text{НОМ}}}{C_{\text{НОМ}}} \cdot 100 \leq \gamma. \quad (10)$$

Маркировка номинальных емкостей и допусков конденсаторов приведена в приложении 2 методических указаний [1].

### 3. 4. Температурные зависимости емкости

Емкость конденсаторов зависит от внешних факторов, важнейшим из которых является температура. Для характеристики температурной зависимости конденсаторов применяют величину называемую *температурным коэффициентом емкости*.

Температурный коэффициент емкости ТКС (ас)<sup>1</sup> равен относительному изменению емкости при изменении температуры на один градус Цельсия (или Кельвина):

$$\text{ТКС} = \alpha_c = \frac{1}{C} \cdot \frac{dC}{dT}.$$

Нормировать ТКС можно только для конденсаторов с линейной зависимостью емкости от температуры. Такая зависимость ха-

рактерна для *высокочастотных конденсаторов*, рабочий диэлектрик которых является материалом с мгновенными механизмами поляризации.

В этом случае температурный коэффициент емкости будет постоянным во всем диапазоне рабочих температур и емкость  $C_T$  при любой температуре  $T$  будет выражаться через номинальную емкость, заданную при комнатной температуре  $T_{\text{комн}} = 20^\circ\text{C}$ :

$$C_T = C_{\text{ном}} [1 + \alpha_C (T - T_{\text{комн}})] \quad (12)$$

Температурная зависимость емкости высокочастотных конденсаторов показана на рисунке 4. Принятые условные обозначения температурного коэффициента емкости приведены в приложении 1.

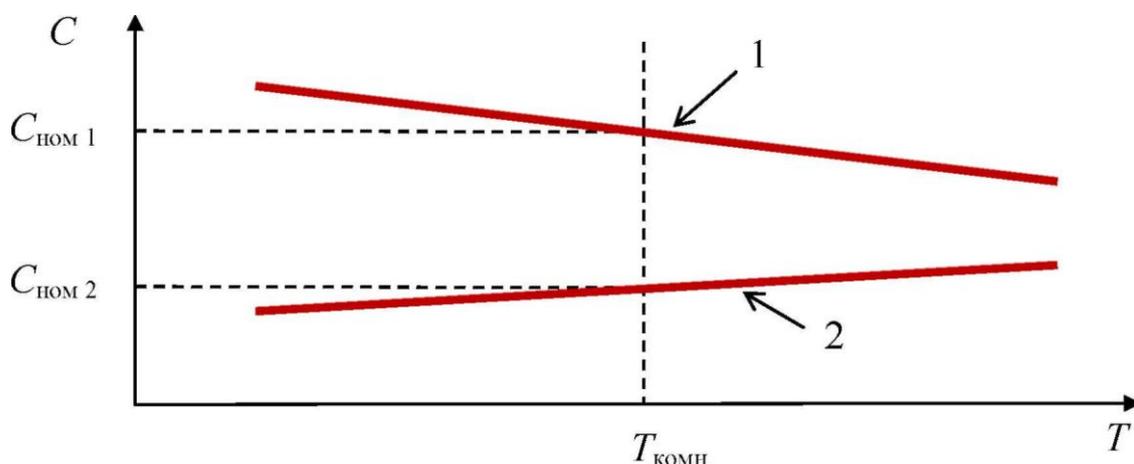


Рисунок 4. Температурная зависимость емкости высокочастотных конденсаторов:

**1** - в рабочем диэлектрике преобладает электронная поляризация ( $\alpha_C < 0$ ); **2** - в рабочем диэлектрике преобладает ионная поляризация ( $\alpha_C > 0$ )

При использовании в конденсаторах рабочих диэлектриков с замедленными механизмами поляризации зависимость емкости от температуры носит нелинейный характер. Примером могут служить низкочастотные сегнетокерамические конденсаторы с домен

ной поляризацией диэлектрика (см. рисунок 5), или конденсаторы с полярными органическими диэлектриками (с дипольно-релаксационной поляризацией).

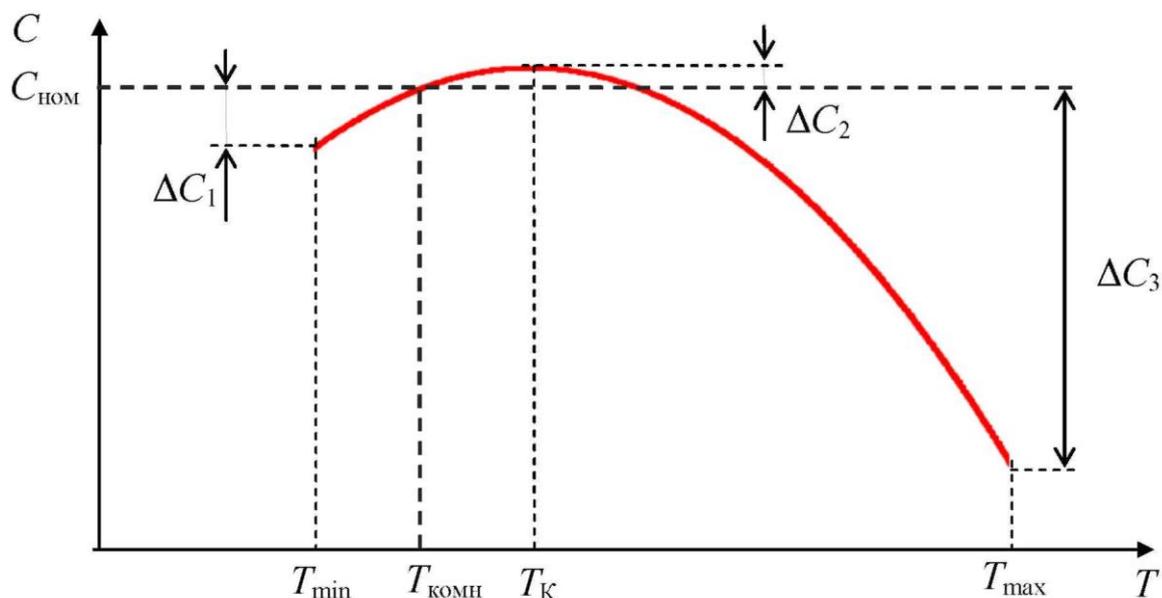


Рисунок 5. Температурная зависимость емкости низкочастотного сегнетокерамического конденсатора

Температурная стабильность низкочастотных конденсаторов может быть задана значением максимально допустимого относительного отклонения емкости от номинальной (при  $T_{\text{комн}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) в рабочем интервале температур. Группы температурной стабильности емкости низкочастотных конденсаторов приведены в приложении 1.

### 3. 5. Потери в конденсаторах

*Потери* называют активную мощность, выделяющуюся в конденсаторе, находящемся под напряжением. Потери вызывают нагрев конденсатора, что может привести к его пробое.

При подаче на конденсатор *постоянного напряжения*  $U_0$  потери обусловлены небольшим током утечки  $I_0$ , протекающем через конденсатор. Если сопротивление изоляции конденсатора обозначить  $R_m$ , то активную мощность можно определить из выражения

$$P_a = U_0 I_0 = \frac{U_0^2}{R_{\text{из}}}. \quad (13)$$

При воздействии на конденсатор *переменного напряжения* с круговой частотой  $\omega$  и амплитудным значением  $C_{\text{тах}}$

$$u = U_{\text{max}} \cdot \sin \omega t, \quad (14)$$

для характеристики качества конденсатора недостаточно знать только сопротивление изоляции. В этом случае между векторами тока и напряжения существует угол сдвига фаз  $\varphi_K$ .

В отсутствии потерь (в идеальных конденсаторах)  $\varphi_K = 90^\circ$  и ток  $i$ , протекающий через конденсатор, опережает приложенное напряжение  $U$  на четверть периода ( $90^\circ$ ) и отстает на столько же от э. д. с. емкости  $e_C$  (рисунок 6, подробнее см. [3, С. 15-17]).

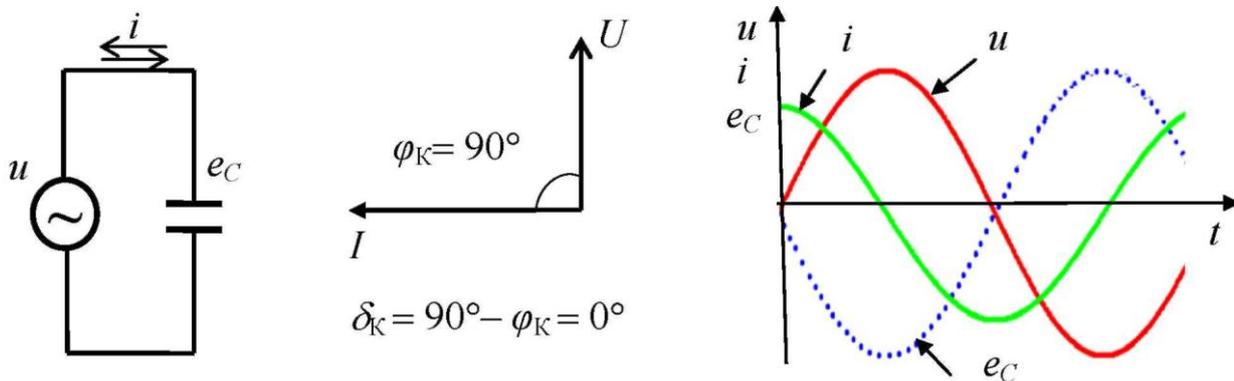


Рисунок 6. Фазовые соотношения в цепи переменного тока, содержащей идеальную ёмкость

В реальных «хороших» конденсаторах потери малы и угол сдвига фаз между током и напряжением близок к  $90^\circ$ . Поэтому в практических вычислениях удобнее использовать угол  $\delta_K$ , называемый *углом потерь конденсатора* (см. рисунок 7):

$$\delta_K = \frac{\pi}{2} - \varphi_K$$

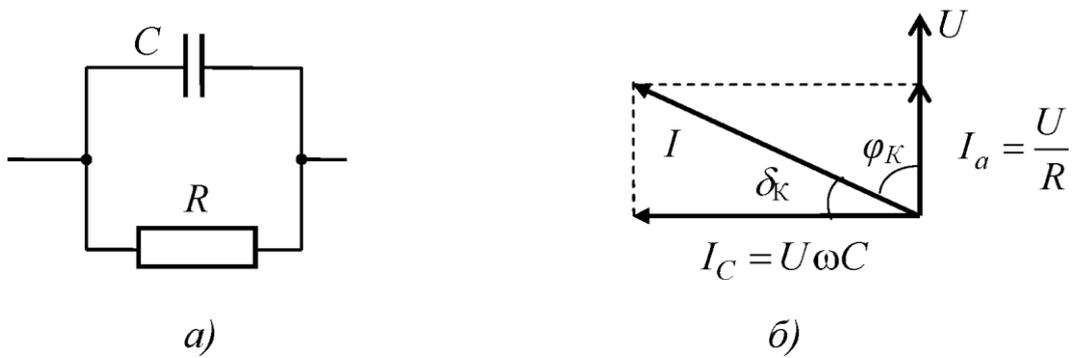


Рисунок 7. Эквивалентная схема (а) и векторная диаграмма (б) для реального конденсатора

Активная мощность, выделяющаяся в конденсаторе,

$$P_a = UI_a = UI \cos \varphi_K = UI \sin \delta_K = \quad (15)$$

$$= U \frac{I_C}{\cos \delta_K} \sin \delta_K = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta_K \quad (16)$$

где  $U$  - действующее значение напряжения;

$I$  - действующее значение тока;

$I_a$  - активная составляющая тока;

$I_C$  - реактивная (емкостная) составляющая тока;

$$I_C = \frac{U}{x_C} = U \omega C$$

$x_C$  - сопротивление конденсатора в цепи переменного тока:

$$x_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Поскольку в выражение (15) для активной мощности входит тангенс угла потерь  $\operatorname{tg} \delta_K$  именно этот параметр принято использовать для характеристики «качества» конденсаторов.

Потери в конденсаторах можно разделить на две группы:

- потери в металлических частях конденсатора;
- потери в диэлектрических частях.

**3. 5. 1. Потери в металлических частях конденсатора  $P_M$** , в свою очередь, делятся на потери в выводах ( $P_{\text{выв}}$ ), потери в обкладках ( $P_{\text{об}}$ ), потери, связанные с эффектом мерцания емкости ( $P_{\text{мерц}}$ ), потери от вибрации обкладок ( $P_{\text{вибр}}$ ):

$$P_M = P_{\text{выв}} + P_{\text{об}} + P_{\text{мерц}} + P_{\text{вибр}}. \quad (17)$$

*Потери в выводах* обусловлены протеканием по ним тока  $I$ , обусловленного переполяризацией рабочего диэлектрика конденсатора:

$$I = U \omega C. \quad (18)$$

Потери в выводах прямо пропорциональны квадрату тока  $I$ , удельному сопротивлению материала выводов  $\rho_{\text{выв}}$ , суммарной длине выводов  $l_{\text{выв}}$  и обратно пропорциональны квадрату диаметра выводов  $d_{\text{выв}}$ :

$$P_{\text{выв}} \sim \frac{I^2 \cdot \rho_{\text{выв}} \cdot l_{\text{выв}}}{\pi (d_{\text{выв}})^2} \quad (19)$$

*Потери в обкладках* зависят от конструкции конденсатора. Для плоского конденсатора длиной  $l$  и шириной  $b$  при толщине обкладок, равной  $h$

(20)

$$P_{\text{выв}} = \frac{2}{3} \rho_{\text{об}} I^2 \cdot \frac{l}{bh}.$$

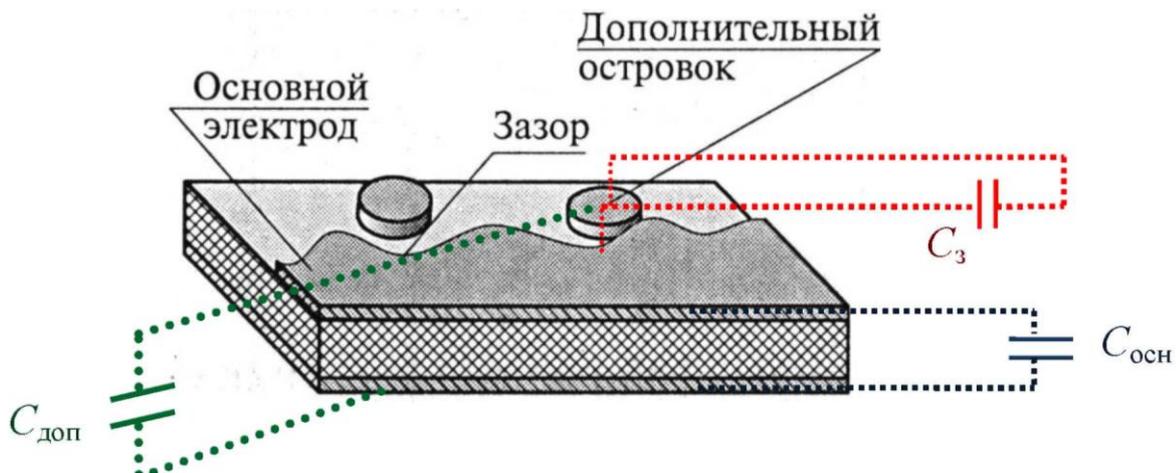
В конденсаторах с фольговыми обкладками под действием электрического поля возникает *вибрация обкладок* - попеременное притяжение обкладок к диэлектрику и отталкивание их от диэлектрика.

Этот эффект вызывает появление переходного сопротивления между обкладками и диэлектриком, на котором при протекании тока выделяется мощность  $P_{\text{вибр}}$ .

Для уменьшения  $P_{\text{вибр}}$  необходимо как можно более сильно прижать обкладки конденсатора к диэлектрику.

Эффект *мерцания емкости* возникает в металлизированных конденсаторах, в которых тонкая металлическая пленка наносится на поверхность твердого диэлектрика.

Граница электрода в таких конденсаторах получается неровной, вблизи края электрода могут оставаться островки металла, образующие совместно с основным электродом емкость зазора  $C_3$  (см. рисунок 8, подробнее [2, С. 257-258]). Последовательно с  $C_3$  будет соединена еще одна добавочная емкость -  $C_{доп}$  (емкость диэлектрика под островком металла).



*Рисунок 8. К эффекту мерцания емкости:  
внизу - нижний электрод; вверху -  
край и закраина верхнего электрода*

При приложении переменного напряжения в небольшом зазоре образуется электрическое поле высокой напряженности, что может привести к возникновению автоэлектронной эмиссии и как следствие - к появлению микродугои<sup>3</sup> (на что затрачивается энергия  $P_{мерц}$ ).

Дуга присоединяет емкость  $C_{доп}$  к основной емкости диэлектрика между электродами  $C_{осн}$  - общая емкость возрастает. При исчезновении дуги общая емкость падает. Эти колебания ведут к неустойчивости емкости.

Явления мерцания и вибрации емкости одновременно в конденсаторе не наблюдаются. Величины  $P_{мерц}$  и  $P_{вibr}$  определяются экспериментально.

Визуально микродугои можно наблюдать в темноте в виде вспышек по краям электродов

**3. 5. 2. Потери в диэлектрических частях конденсатора**  $P_d$  складываются из потерь на сквозную электропроводность  $P_{скв}$ , релаксационных потерь  $P_{рел}$  и потерь на ионизацию газовых включений в рабочем диэлектрике  $P_{ион}$ :

$$P_d = P_{скв} + P_{рел} + P_{ион}. \quad (21)$$

*Потери на сквозную электропроводность* обнаруживаются у диэлектриков, имеющих достаточно высокую электропроводность (объемную или поверхностную).

*Релаксационные потери* характерны для диэлектриков, обладающих замедленными механизмами поляризации, и сказываются в области достаточно высоких частот, когда поляризация начинает отставать от изменения электрического поля.

*Ионизационные потери* свойственны диэлектрикам, содержащим газообразные включения. При высоких значениях приложенного к конденсатору напряжения ионизация газа, заполняющего поры рабочего диэлектрика, нередко приводит к пробое конденсатора.

### **3. 6. Влияние температуры на тангенс угла потерь конденсатора**

Температура является одним из важнейших факторов, определяющих потери в конденсаторах. Рассмотрим вначале диэлектрические потери в рабочем диэлектрике.

Для высокочастотных диэлектриков, обладающих только *мгновенными механизмами поляризации*, тангенс угла диэлектрических потерь  $\tan \delta$  растет с ростом температуры практически по экспоненциальному закону. Также экспоненциально растет мощность  $P_{скв}$  (см. рисунок 9, а).

Температурная зависимость для диэлектриков, в которых преобладают *релаксационные потери* более сложная (см. рисунок 9, б). Наличие дипольного максимума обусловлено различным временем релаксации (установления) поляризации при различных температурах. При низкой температуре время релаксации велико и поворот диполей незначителен. Поэтому мал и тангенс угла диэлектрических потерь  $\tan \delta_{реj}$  рабочего диэлектрика.

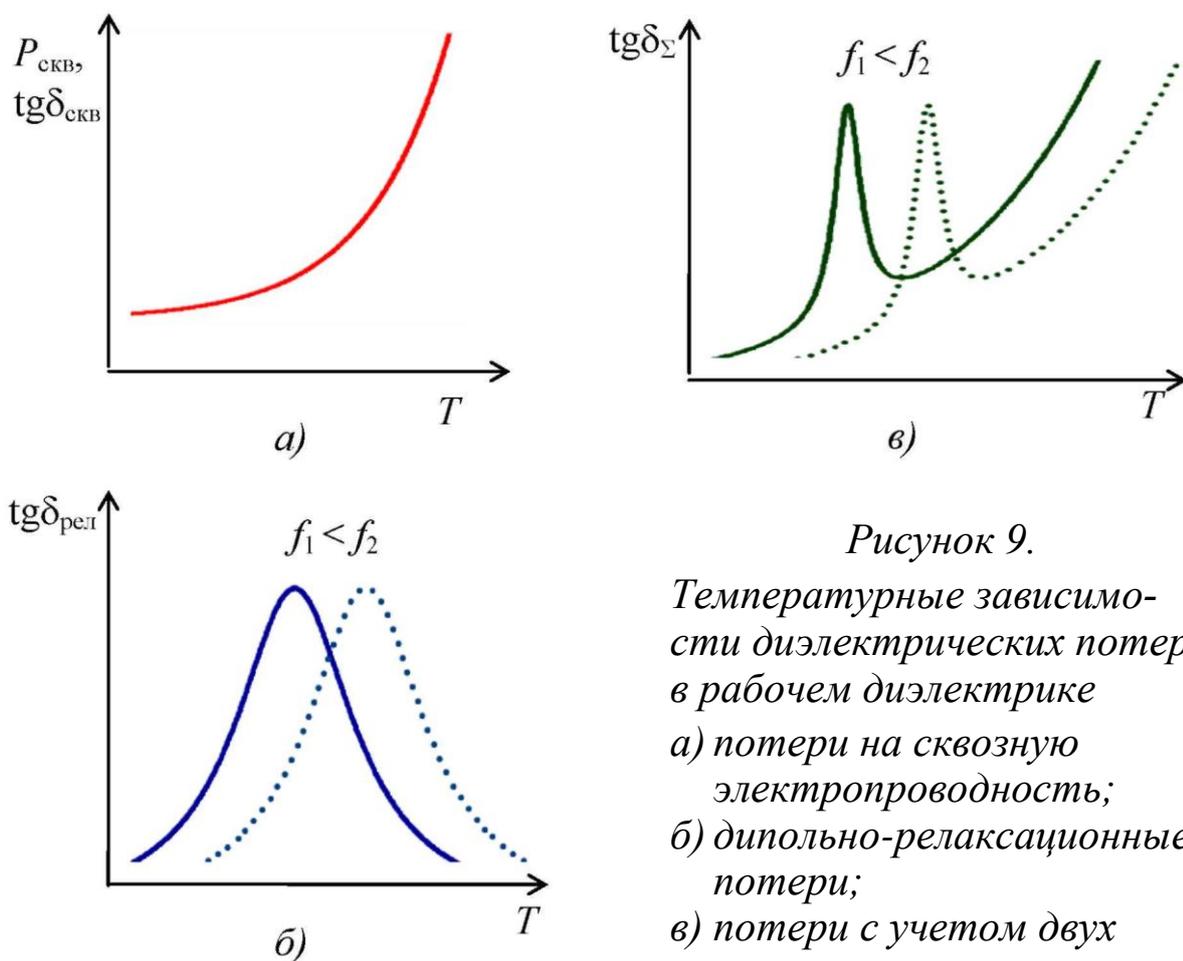


Рисунок 9.

Температурные зависимости диэлектрических потерь в рабочем диэлектрике  
 а) потери на сквозную электропроводность;  
 б) дипольно-релаксационные потери;  
 в) потери с учетом двух механизмов поляризации

При повышении температуры время релаксации приближается к периоду изменения поля - повышается поляризация, возрастает  $\text{tg}\delta_{\text{рел}}$ , достигая при определенной температуре максимума<sup>4</sup>. Максимум потерь соответствуют температуре, при которой период изменения поля равен времени установления поляризации.

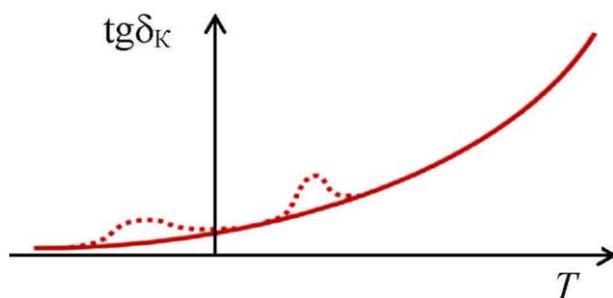
С дальнейшим ростом температуры  $\text{tg}\delta_{\text{рел}}$  падает за счет исчезновения запаздывания поляризации относительно поля [4, С. 206].

Температурная зависимость диэлектрических потерь с учетом вклада как релаксационного механизма, так и сквозной электропроводности показана на рисунке 9, в.

Потери в *металлических частях* конденсатора также интенсивно растут с ростом температуры (за счет температурного роста

Чем выше частота электрического поля, тем выше температура дипольного максимума

эквивалентного сопротивления, учитывающего эти потери). Поэтому температурная зависимость  $\operatorname{tg} \delta_k$  для высокочастотных конденсаторов (механизмы поляризации рабочего диэлектрика которых только мгновенные) близка к экспоненциальной (см. рисунок 10, сплошная линия).



*Рисунок 10.*

*Зависимость тангенса угла температуры потерь конденсатора от*

Релаксационные потери обуславливают наличие пиков в температурной зависимости (см. рисунок 10, пунктирная линия). При наличии в рабочем диэлектрике нескольких релаксационных механизмов поляризации (и соответственно нескольких различных времен релаксации) максимумов может быть несколько, в том числе и в области отрицательных температур.

#### **4. ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ**

Лабораторная работа может проводиться в двух вариантах: «а» или «б». Бригаде в качестве объекта исследования выдаются:

а) пять дисков из диэлектрических материалов для использования их в качестве рабочих диэлектриков плоских дисковых конденсаторов. Диаметр электродов конденсаторов - 50 мм.

б) пять промышленных конденсаторов различных типов.

Необходимо:

- 1) провести измерения ёмкости и тангенса угла потерь конденсаторов при различной температуре;
- 2) построить графики температурных зависимостей емкости и тангенса угла потерь конденсаторов;
- 3) сравнить полученные экспериментальные зависимости с приведенными в п. 3 теоретическими зависимостями;
- 4) оценить температурную стабильность конденсаторов;
- 5) сравнить полученные оценки для промышленных конденсаторов с указанными в маркировке (для варианта «б»).

## **5. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ**

### **5. 1. Описание лабораторной установки**

В состав лабораторной установки входят:

- набор конденсаторов;
- измеритель емкости цифровой Е8-4;
- сушильный шкаф со специальными креплениями для промышленных конденсаторов, и электродами для формирования емкостей с выданными образцами в качестве рабочих диэлектриков;
- цифровой мультиметр Mastech M890G с термопарой (для измерения температуры);
- микрометр для измерения линейных размеров;
- лабораторный трансформатор.

### **5. 2. Порядок проведения эксперимента**

1. Переписать:

- а) маркировку промышленных конденсаторов, помещенных в сушильный шкаф;
- б) названия диэлектрических материалов, используемых в качестве рабочих диэлектриков для образования емкостей.

*Внимание:* при выполнении варианта «б» лабораторной работы необходимо измерить микромером<sup>5</sup> и зафиксировать толщину каждого выданного образца.

2. Зафиксировать переключатель функций цифрового мультиметра в положение ТЕМР. Установить в разъем для измерения температуры на передней панели прибора термопару и поместить пробник термопары в сушильный шкаф непосредственно над сборкой конденсаторов.

3. Закрывать дверцу шкафа, включить сушильный шкаф и подключенный к нему измеритель Е8-4 в сеть. Температура сушильного шкафа начнет плавно повышаться.

*Внимание:* перед началом работы необходимо проверить надёжность заземления прибора Е8-4 и сушильного шкафа.

4. Переключая тумблер сушильного шкафа, с интервалом в два градуса снимать показания измерителя Е8-4, записывая температуру и соответствующие значения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь каждого конденсатора в таблицу.

*Внимание:* с целью регулирования скорости нагрева сушильного допускается использование лабораторного трансформатора.

## **6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

1. Цель работы.
2. Таблицы с результатами проведенных в ходе лабораторной работы измерений.
3. Основные формулы, используемые при расчетах.
4. Протокол обработки результатов эксперимента.
5. Графики температурных зависимостей емкости и тангенса угла потерь для каждого конденсатора.
6. Анализ полученных результатов (сравнение с теоретическими зависимостями).
7. Выводы.

## **7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Из каких элементов состоит сокращенное условное обозначение и маркировка конденсаторов.
2. Как определяется и в каких единицах измеряется емкость конденсатора.
3. Назовите основные типы конструкций конденсаторов.
4. Как рассчитывается емкость конденсаторов для основных типов их конструкций.
5. Что такое термостабильность конденсаторов. Как задаются требования к температурной стабильности высокочастотных и низкочастотных конденсаторов.

6. Дайте определение температурного коэффициента емкости.
7. Что называют потерями в конденсаторах. Как определяются потери в конденсаторах, находящихся под постоянным напряжением.
8. Приведите фазовые соотношения в цепи переменного тока, содержащей идеальную ёмкость.
9. Приведите эквивалентную схему и векторные диаграммы для конденсатора с потерями.
10. Дайте определение тангенса угла потерь конденсатора. Объясните отличие этой величины от тангенса угла диэлектрических потерь.
11. Приведите теоретические температурные зависимости емкости для высокочастотных и низкочастотных конденсаторов.
12. Приведите теоретические температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь для диэлектрических материалов различного вида.

## **8. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Исследование влияния производственных погрешностей на параметры компонентов электронных средств : методические указания по выполнению лабораторной работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Л. А. Большевцева. Курск, 2012. 26 с.
2. Сорокин В. С. Материалы и элементы электронной техники [Текст] : учебник : в 2 т. Т. 2 : Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники. - М. : Академия, 2006. - 384 с.
3. Калашников А. М. Основы радиотехники и радиолокации [Текст] : учебное пособие. - М. : Изд-во Министерства обороны, 1965. - 383 с.
4. Пасынков В.В. Материалы электронной техники [Текст]: учебник : 2-е изд, перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 1986. - 367 с.
5. Исследование частотной зависимости диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь твердых диэлектриков : методические указания по выполнению лабораторной работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Л. А. Большевцева, В. В. Григор. Курск, 2012. 23 с.

## СПОСОБЫ ЗАДАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ЕМКОСТИ

Принятые условные обозначения требований к термостабильности конденсаторов содержат букву с последующими цифрами.

1. Для высокочастотных конденсаторов нормируется температурный коэффициент емкости  $\alpha_C$  и наносится в виде маркировки на корпус компонента. Цифры показывают значения  $\alpha_C$  в миллионных долях, буква задает знак  $\alpha_C$ : М или N - отрицательный; П или Р - положительный. Для конденсаторов с  $\alpha_C \sim 0$  маркировка МПО или NPO (см. [2]).

Кодированные обозначения температурного коэффициента для высокочастотных конденсаторов и цветовой код<sup>6</sup> приведены в таблице П1.

Таблица П1

Температурная стабильность емкости высокочастотных конденсаторов

Кодированное обозначение $\alpha_C$	Значение $\alpha_C \cdot 10^6$ , $K^{-1}$	Цветовой код
П100	+ 100	Красный с фиолетовым
П33	+ 33	Серый
МПО	$\approx 0$	Черный
М33	- 33	Коричневый
М47	- 47	Голубой с красным
М75	- 75	Красный
М150	- 150	Оранжевый
М220	- 220	Желтый

Маркировку наносят в виде цветных точек или полосок, в зависимости от формы и размеров конденсатора так, чтобы они обеспечивали безошибочность расшифровки знаков.

В том случае, когда для цветового кодирования требуется два цвета, второй может быть представлен цветом корпуса или цветом типографской маркировки (см. ГОСТ 26192. Конденсаторы

Кодированное обозначение $\alpha_C$	Значение $\alpha_C \cdot 10^6$ , $K^{-1}$	Цветовой код
M330	– 330	Зеленый
M470	– 470	Голубой
M750	– 750	Фиолетовый
M1 500	– 1 500	Оранжевый с оранжевым
M2 200	– 2 200	Желтый с оранжевым

2. В низкочастотных конденсаторах рабочим диэлектриком является материал с замедленными механизмами поляризации. Это может быть полярный органический диэлектрик с дипольно-релаксационной поляризацией или сегнетоэлектрик (преимущественно сегнетокерамический материал) с доменной поляризацией.

Требования к термостабильности таких конденсаторов задаются в виде кодированного обозначения группы по ТКС. Начинается обозначение с буквы Н (или латинской И), затем округленно в процентах задается максимально возможное изменение емкости (по отношению к емкости при комнатной температуре  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в рабочем диапазоне температур (см. [2]).

Кодированное обозначение групп термостабильности и цветовые коды приведены в таблице П2.

*Таблица П2*

*Группы температурной стабильности емкости низкочастотных конденсаторов*

Кодированное обозначение группы термостабильности	$\frac{ \Delta C_{\max} }{C_{\text{ном}}}$ , %	Цветовой код
H10	$\leq 10$	Оранжевый с черным
H20	$\leq 20$	Оранжевый с красным
H30	$\leq 30$	Оранжевый с зеленым
H50	$\leq 50$	Оранжевый с голубым
H70	$\leq 70$	Оранжевый с фиолетовым
H90	$\leq 90$	Оранжевый с белым

## **Лабораторная работа №3**

### **Исследование влияния производственных погрешностей на параметры компонентов электронных средств**

#### **1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

1. Ознакомление с методами теоретической обработки результатов эксперимента.
2. Проведение анализа производственных погрешностей изготовления компонентов электронных средств на основе экспериментальных данных.

#### **2. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- изучить теоретический материал, содержащийся в методических указаниях;  
ознакомиться с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы.

При подготовке к защите лабораторной работы необходимо:

- оформить отчет в соответствии с разделом 6; устно подготовить ответы на контрольные вопросы.

#### **3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

##### **3. 1. Производственные погрешности.**

##### **Их классификация и причины возникновения**

Технологический процесс изготовления любого изделия неизбежно подвергается воздействию ряда факторов, приводящих к отклонению действительных значений параметров качества изделий от запланированных (*номинальных*) значений. Такие отклонения принято называть *производственными погрешностями*.

Производственные погрешности неизбежны, поэтому допускаются отклонения параметра качества от номинального значения в пределах установленного *поля допуска*.

Изделие признается *годным*, если значение параметра качества попало в поле допуска, и признается *негодным* в противном случае.

Величины производственных погрешностей определяют *точность технологического процесса*. Для повышения точности техпроцесса и предотвращения выпуска бракованных изделий про

водится выбор перечня подлежащих контролю параметров качества изделий (*контролируемых параметров*), их измерение, последующая обработка полученных данных, анализ результатов и формирование управляющих воздействий.

Выделяют два класса производственных погрешностей - случайные и систематические.

*Систематические погрешности* в ходе техпроцесса остаются постоянными или закономерно изменяются. Появление систематических погрешностей вызвано факторами, действующими на протяжении всего исследования *одинаковым* образом.

*Случайные погрешности*, напротив, обусловлены факторами, которые проявляются весьма нерегулярно, или проявляются с интенсивностью, которую трудно предвидеть. Случайные погрешности в ходе исследования меняются *произвольным* образом.

В производстве все погрешности действуют в совокупности и причины их весьма многочисленны: погрешности в работе оборудования и инструментов, неточность технологической оснастки или измерительных средств, личные ошибки операторов, условия внешней среды.

### **3. 2. Партия изделий. Выборка**

Пусть по результатам измерений требуется изучить поведение контролируемого параметра для совокупности изделий, произведенных за один технологический цикл - так называемой *партии изделий*.

Первый вариант решения поставленной задачи - проведение соответствующих измерений для всех изделий партии. На практике подобное (*сплошное*) исследование применяют сравнительно редко. Это может быть вызвано большим объемом партии, значительными материальными или временными затратами на проверку одного изделия, разрушением или повреждением изделия при проверке.

Второй вариант предоставляет нам возможность ограничиться проверкой лишь некоторого количества специально отобранных объектов - так называемой *выборки*.

Однако для того чтобы выборка была *репрезентативной* («правильно» представляла исследуемую партию), необходимо обеспечить два условия: достаточный объем выборки и одинаковую возможность попадания в выборку любого элемента совокупности.

### 3.3. Вариация. Графическое представление вариации контролируемого параметра

Вариацией значений параметра называется различие его значений у различных единиц данной совокупности в один и тот же период времени.

Пусть из партии изделий извлечена выборка объема  $n$ . Выполнив независимые измерения контролируемого параметра каждого изделия выборки, мы получим ряд из  $n$  чисел

$$x_1, x_2, \dots, x_n, \quad (1)$$

где  $x_i$  - результат измерения контролируемого параметра  $i$ -го изделия выборки. Этот первичный статистический материал принято называть *простой статистической совокупностью*.

Простую статистическую совокупность подвергнем дальнейшей обработке:

- 1) упорядочим ряд (1) в неубывающем порядке - получим так называемый *вариационный ряд*;
- 2) для придания материалу большей компактности прибегнем к группировке результатов измерений.

Для этого

- найдем наибольшее  $x_{max}$  и наименьшее  $x_{min}$  значение в вариационном ряду и определим размах  $R$  варьирования:

$$R = x_{max} - x_{min}. \quad (2)$$

- разделим полученный размах на  $k$  интервалов (*разрядов*) одинаковой длины

$$l = \frac{R}{k}, \quad (3)$$

и зафиксируем границы разрядов (такой способ группировки называется *способом равных интервалов*).

Для определения значения  $k$  часто рекомендуются формулы Старджеса (4), Брукса (5) или Хайнхольда (6)

$$k = \log_2 n + 1 = 3,3 \lg n + 1, \quad (4)$$

$$k = 5 \lg n, \quad (5)$$

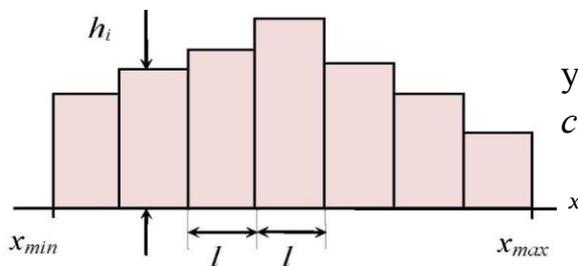
$$k = \sqrt{n}. \quad (6)$$

- подсчитаем *абсолютную частоту* каждого разряда  $m_I$  - количество результатов измерений, приходящихся на этот разряд.
- определим *относительную частоту* каждого разряда:

$$\tilde{p}_i = \frac{m_i}{n}. \quad (7)$$

3) изобразим полученные результаты графически.

Для этого отложим по горизонтальной оси границы всех интервалов и построим на основании каждого прямоугольник площадью, равной относительной частоте этого интервала.



Таким образом, высота  $i$ -го прямоугольника  $h_i$  оказывается равна *плотности* относительной частоты

$$h_i = \frac{\tilde{p}_i}{l} \quad (8)$$

*Рисунок 2. Пример гистограммы относительных частот*

Получившийся ступенчатый многоугольник называется *гистограммой относительных частот* (рис. 2).

Площадь гистограммы относительных частот равна единице:

$$S_{\text{отн}} = \sum l \cdot h_i = 1/n \sum m_i = 1 \quad (9)$$

В математической статистике нашел свое применение и другой вид гистограммы - *гистограмма абсолютных частот*, также состоящая из  $k$  прямоугольников с теми же основаниями, но с другими высотами (равными плотностям абсолютной частоты)

$$h'_i = \frac{m_i}{l}.$$

Площадь гистограммы абсолютных частот равна объему выборки, и оба вида гистограмм отличаются друг от друга только масштабом по оси ординат.

Гистограммы позволяют наглядно представить распределение опытных данных. При увеличении количества и соответствующем уменьшения длины интервалов ломаная, ограничивающая гистограмму относительных частот сверху, будет приближаться к некоторой кривой. Эта кривая представляет собой график *плотности распределения* результатов измерения.

### 3. 4. Выборочные оценки математического ожидания и дисперсии

*Математическое ожидание* является одним из показателей центра распределения наблюдений. В качестве его оценки для контролируемого параметра объектов всей партии берется среднее арифметическое всех  $n$  наблюдаемых в выборке значений - так называемая *выборочная средняя*

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (11)$$

Отклонение выборочной средней от номинального значения контролируемого параметра является характеристикой суммарной систематической производственной погрешности.

*Дисперсия* служит характеристикой рассеяния (разброса) наблюдений около центра распределения. Оценкой дисперсии служит так называемая *выборочная дисперсия*

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}. \quad (12)$$

Выборочная дисперсия является показателем случайных производственных погрешностей (чем выше дисперсия, тем более существенными являются случайные погрешности).

## **4. ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ**

Лабораторной бригаде в качестве объекта исследования выдаются две выборочных совокупности компонентов электронных средств (резисторов или конденсаторов). Необходимо:

- 1) провести измерения значений контролируемых параметров (сопротивления резисторов или ёмкости конденсаторов) по всем выборкам;
- 2) по результатам измерений отдельно для каждой выборки построить гистограммы относительных частот и провести их сравнение;
- 3) вычислить выборочную среднюю и выборочную дисперсию для всех выборок.

## **5. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ**

### **5. 1. Описание лабораторной установки**

Лабораторная установка состоит из вольтметра универсального цифрового В7-38 и двух зажимов для подсоединения к прибору исследуемого объекта.

### **5. 2. Порядок проведения эксперимента**

Провести измерения сопротивления каждого резистора из первой и второй выборок, записывая в подготовленную таблицу номер измерения и измеренное значение.

Выполнить обработку результатов (см. приложение 3).

## **6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

1. Цель работы.
2. Таблицы с результатами проведенных в ходе лабораторной работы измерений.
3. Основные формулы, используемые при расчетах.
4. Протокол обработки результатов эксперимента.
5. Гистограммы относительных частот и оценки параметров распределений (см. п. 4).
6. Анализ полученных результатов.
7. Выводы.

## **7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Из каких элементов состоят сокращенное условное обозначение и маркировка резисторов и конденсаторов.
2. Как формируется цветовой код для обозначения номиналов и допусков резисторов и конденсаторов.
3. Какие признаки положены в основу общей классификации резисторов.
4. Как классифицируются резисторы по материалу резистивного элемента.
5. Проведите общую классификацию конденсаторов и классификацию по типу рабочего диэлектрика.
6. Чем, прежде всего, определяются электрические свойства конденсаторов.
7. Дайте определение производственных погрешностей. Чем отличаются систематические погрешности от случайных. Назовите причины возникновения обоих классов погрешностей.
8. Дайте определения партии изделий и выборки из партии. Какие требования предъявляются к выборкам.
9. Что такое гистограмма. Перечислите основные этапы построения гистограммы.
10. Характеристикой каких показателей распределения служат математическое ожидание и дисперсия. Как можно оценить их значения по выборке.
11. Определите по маркировке на корпусе электронного компонента поле допуска на контролируемый параметр. Пренебрегая погрешностями измерений, определите, какой процент в каждой выборке составляют истинно годные и истинно негодные изделия.

## **8. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Сорокин В. С. Материалы и элементы электронной техники [Текст] : учебник : в 2 т. Т. 2 : Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники. - М. : Академия, 2006. - 384 с.

## КЛАССИФИКАЦИЯ РЕЗИСТОРОВ И КОНДЕНСАТОРОВ

1. Общая классификация резисторов (см. рис. П1) составлена по признакам, присущих практически всем изделиям электронной техники.

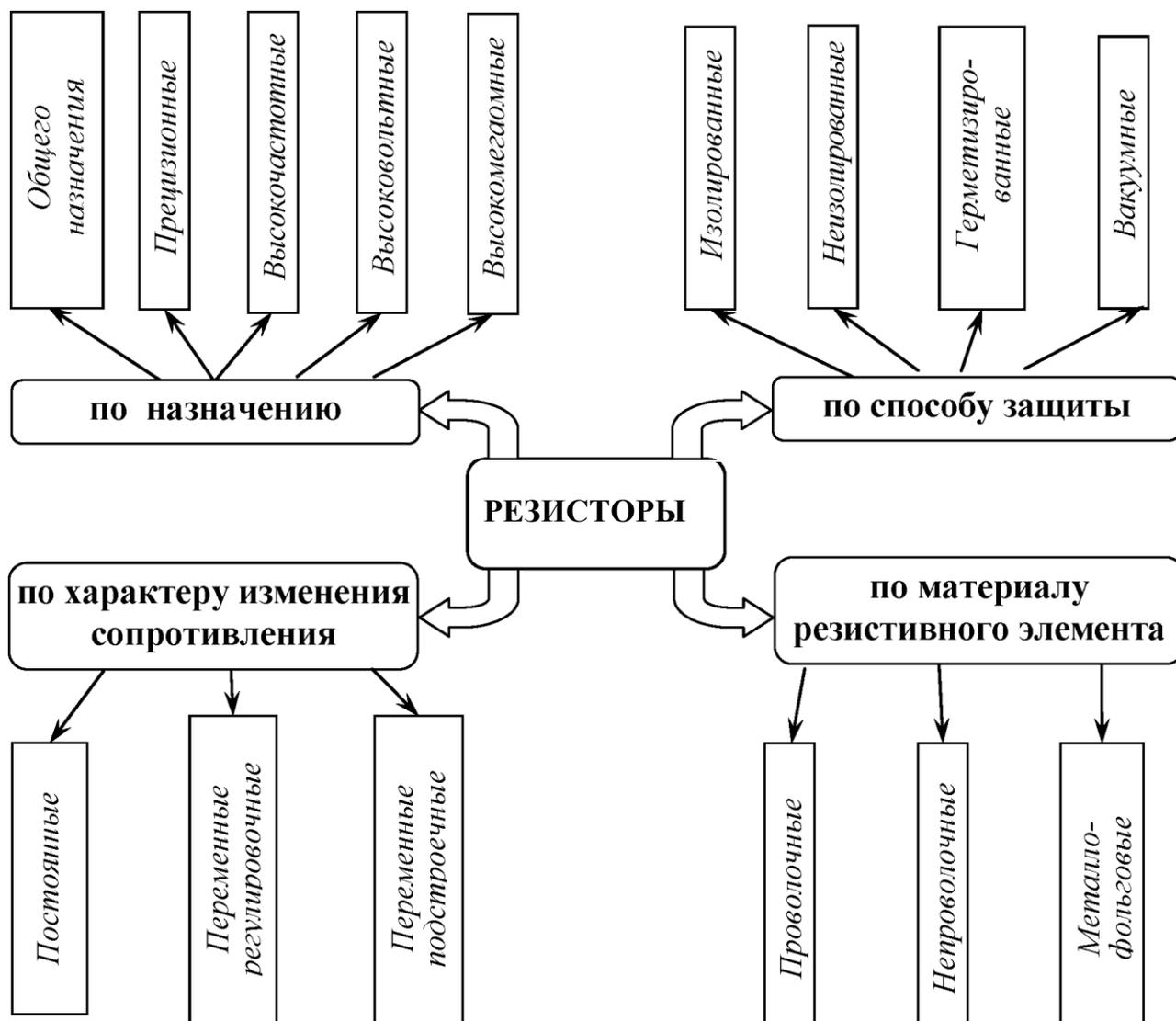


Рисунок П1. Общая классификация резисторов

В основу **специальной классификации резисторов** (см. рис. П3) положен вид материала резистивного (токопроводящего) элемента.

Специальная классификация конденсаторов (по типу рабочего диэлектрика) отражена на рис. П4.

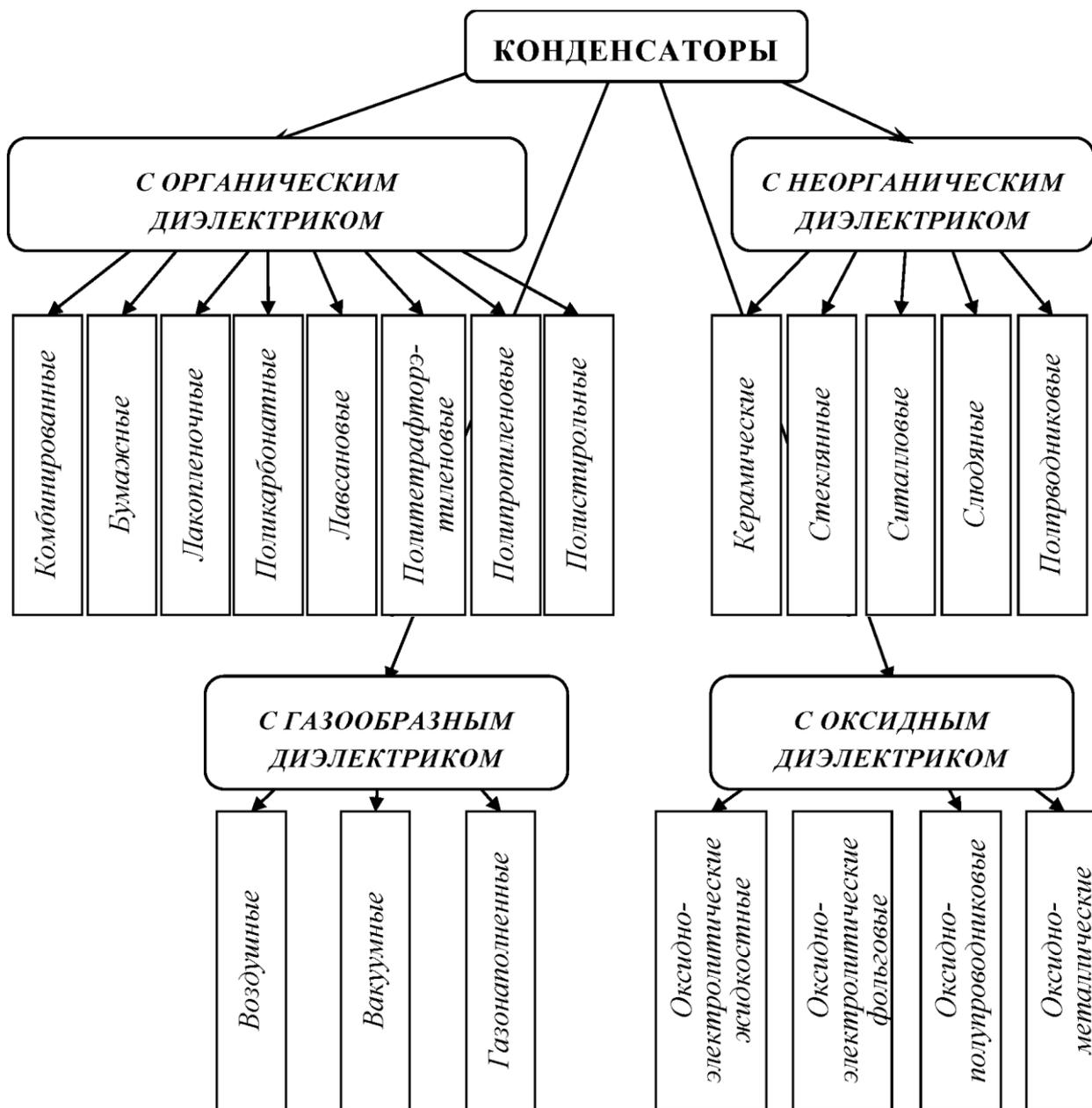


Рисунок П4. Классификация конденсаторов по материалу рабочего диэлектрика

Основными вентильными металлами, используемыми в оксидных конденсаторах, являются алюминий, тантал, ниобий и титан.

## СИСТЕМА УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И МАРКИРОВКА РЕЗИСТОРОВ И КОНДЕНСАТОРОВ

**1. Сокращенное условное обозначение резистора** должно состоять из следующих элементов:

*первый элемент* - буква или сочетание букв, обозначающее подкласс резисторов: Р - резисторы постоянные, РП - резисторы переменные, НР - наборы резисторов;

*второй элемент* - цифра, обозначающая группу резисторов по материалу резистивного элемента: 1 - непроволочные, 2 - проволочные;

*третий элемент* (пишется через дефис) - регистрационный номер конкретного типа резисторов.

По существовавшей ранее (до 1968 года) системе обозначений первый элемент: С - резисторы постоянные, СП - резисторы переменные; второй элемент (разновидность резистора в зависимости от материала токопроводящего элемента): 1 - непроволочные тонкослойные углеродистые и боруглеродистые, 2 - непроволочные тонкослойные металлодиэлектрические и металлоокисные, 3 - непроволочные композиционные пленочные, 4 - непроволочные композиционные объемные, 5 - проволочные, 6 - непроволочные тонкослойные металлизированные, 7 - металлофольговые.

Маркировка на резисторах введена также буквенно-цифровая. На корпусе резистора указывается тип резистора, номинальная величина сопротивления и допустимое отклонение от номинальной величины. В зависимости от размеров резисторов применяют полные или сокращенные (кодированные) обозначения. Кодированные обозначения состоят из:

- 1) цифр, обозначающих номинальную величину сопротивления Яном;
- 2) буквы, обозначающей единицу измерения сопротивления и одновременно указывающей положение десятичной запятой (буквы R, K, M, G, T обозначают множители 1,  $10^3$ ,  $10^6$ ,  $10^9$ ,  $10^{12}$  соответственно для сопротивлений, выраженных в омах);

допуск 5, %		+ 0,1	+ 0,2	± 0,5	+ 1,0	± 2,0	+ 5,0	± 10,0	± 20,0	+ 30,0
Бук- всн-	латинский	B	C	D	F	G	J	K	M	N
	русский	Ж	У	Д	Р	Л	И	С	В	Ф

- 3) буквы, обозначающей допустимое отклонение (5) сопротивления от номинала в процентах. Такие же обозначения допусков применяются и для конденсаторов (см. табл. П1 ).

<i>Проволочные</i>	
ПКВ	проволочные на керамическом основании, влагостойкие, многослойные
ПТКМ	проволочные многослойные константановые малогабаритные
ПТ	проволочные точные
ПЭ	проволочные эмалированные трубчатые невлагостойкие
ПЭВ	проволочные эмалированные трубчатые влагостойкие

Таблица П2

<i>Код</i>	<i>Полное наименование</i>
<i>Углеродистые и боруглеродистые</i>	
ВС	влагостойкие
УЛМ	углеродистые лакированные малогабаритные
УЛИ	углеродистые лакированные измерительные
УЛС	углеродистые лакированные специальные
БЛП	боруглеродистые лакированные прецизионные
<i>Металлопленочные и металлоокисные</i>	
МЛТ	металлопленочные лакированные теплостойкие
МТ	металлопленочные теплостойкие
МУН	металлопленочные ультравысокочастотные незащищенные
МГП	металлопленочные герметизированные прецизионные
<i>Композиционные объемные</i>	
С4-1	повышенной теплостойкости на неорганической связке
ТВО	теплостойкие, влагостойкие, объемные с неорганической связкой
КОИ	- // - с органической связкой
<i>Композиционные пленочные</i>	
КИМ	композиционные изолированные малогабаритные
КЛМ	композиционные лакированные
КВМ	композиционные вакуумные мегомные (в стеклянном баллоне)
КЭВ	композиционные экранированные высоковольтные

Основные типы постоянных резисторов (полные и сокращенные наименования) показаны в табл. П2.2. **Условное обозначение конденсаторов** состоит из следующих элементов:

*первый элемент* - буква или сочетание букв, обозначающее подкласс конденсаторов: К - постоянной емкости, КТ - подстроечные, КП - переменной емкости;

*второй элемент* - цифра, обозначающая группу резисторов по материалу диэлектрика (см. таблицу П3);

*третий элемент* (пишется через дефис) - регистрационный номер конкретного типа конденсатора.

Таблица ПЗ

Группа	Обозначение группы
<i>Конденсаторы постоянной ёмкости</i>	
Керамические низковольтные ( $U_{\text{ном}} < 1600\text{В}$ )	10
Керамические высоковольтные ( $U_{\text{ном}} > 1600\text{В}$ )	15
Стеклянные	21
Стеклокерамические	22
Тонкопленочные с неорганическим диэлектриком	26
Слюдяные	31
Бумажные низковольтные фольговые	40
Бумажные высоковольтные фольговые	41
Оксидно-электролитические (фольговые), алюминиевые	50
Оксидно-электролитические (фольговые), танталовые или ниобиевые	51
Оксидно-пористые (жидкостные)	52
Оксидно-полупроводниковые	53
Оксидно-металлические	55
Воздушные	60
Вакуумные	61

Группа	Обозначение группы
<i>Конденсаторы постоянной ёмкости</i>	
Полистирольные фольговые	70
Полистирольные металлизированные	71
Фторопластовые	72
Лавсановые фольговые	73
Лавсановые металлизированные	74
Комбинированные пленочные	74
Лакопленочные	75
Поликарбонатные	77
Полипропиленовые	78
<i>Подстроенные конденсаторы, конденсаторы переменной ёмкости</i>	
Воздушные	1
Вакуумные	2
С газообразным диэлектриком	3
С твердым диэлектриком	4
С жидким диэлектриком	5

Помимо буквенной маркировки применяют *цветокодовую* систему, при которой на корпус резисторов и конденсаторов наносят цветные пояски или круги. Цвет представляет собой цифру номинала или множителя, либо закодированное обозначение процентного допуска на величины сопротивления или ёмкости.

При маркировке цветовым кодом номинальный параметр выражается числом с двумя (для элементов с допуском  $\pm 5\%$  и более) и тремя<sup>1</sup> (для элементов с допуском  $\pm 2\%$  и менее) цифрами и множителем  $10^p$ , где  $p$  - целое число от -2 до +9.

Маркировочные знаки сдвигают к одному из торцов резистора, или, если размеры резистора не позволяют подобное размещение, площадь первого знака делают приблизительно в 2 раза больше площади остальных знаков.

Порядок расположения маркировочных знаков следующий: цифры (две или три, начиная с первой), множитель, допуск.

Цвета должны соответствовать указанным в таблице П4. Пример маркировки показан на рисунке П5.

Последняя цифра из трех не должна быть равна нулю

Таблица П4

Цвет знака	Номинальное сопротивление, Ом				Допуск, %
	1-ая цифра	2-ая цифра	3-ая цифра	Множитель	
Серебристый	—	—	—	$10^{-2}$	±10
Золотистый		—		$10^{-1}$	±5
Черный		0		1	—
Коричневый	1	1	1	10	±1
Красный	2	2	2	$10^2$	±2
Оранжевый	3	3	3	$10^3$	—
Желтый	4	4	4	$10^4$	—
Зеленый	5	5	5	$10^5$	±0,5
Голубой	6	6	6	$10^6$	±0,25
Фиолетовый	7	7	7	$10^7$	±0,1
Серый	8	8	8	$10^8$	±0,05
Белый	9	9	9	$10^9$	—



1 2 3 4 5

- 1 — красный (первая цифра 2);
- 2 — желтый (вторая цифра 4);
- 3 — белый (третья цифра 9);
- 4 - черный (множитель 1)%
- 5 - зеленый (допуск ± 0,5 %)

Рисунок 775. Маркировка резистора с номинальным сопротивлением 249 Ом и допуском ±0,5 %.

*Замечание:* в настоящее время не существует общего подхода к системе маркировки компонентов. Рекомендации Международной электротехнической комиссии по данному вопросу не являются законодательно обязательными для всех мировых производителей электрорадиоаппаратуры и радиокомпонентов, поэтому в большинстве стран сохраняются свои национальные системы маркировки.

#### 4. Оценка систематической составляющей производственной погрешности

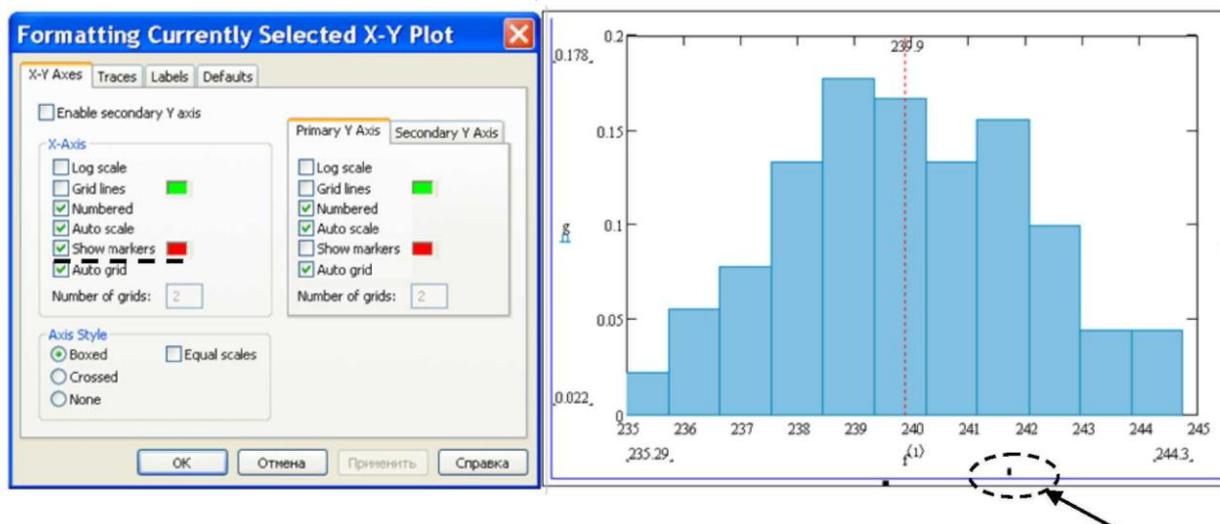
Графическую оценку систематической составляющей удобно провести, отметив на гистограмме номинальное значение контролируемого параметра и его выборочное среднее значение. Среда Mathcad предоставляет возможность воспользоваться для этого

6

маркерами.

Для этого в диалоговом окне *Formatting Currently Selected*. на вкладке *X-Y Axes* необходимо активизировать опцию *Show markers*, относящуюся к оси *X* (см. рис. П11; вертикальная пунктирная линия на графике - маркер для оценки математического ожидания контролируемого параметра; второй местозаполнитель (1) под графиком гистограммы не заполнен).

Рисунок П13



1

В появившиеся на графике под осью *X* местозаполнители следует ввести переменные или значения, соответствующие рассчитанной выборочной средней и номинальному значению контролируемого параметра.

Маркеры представляют собой вертикальные (для маркеров оси *X*) или горизонтальные (для маркеров оси *Y*) пунктирные линии, показывающие выбранные значения или значения выбранных переменных. На каждой оси допускается установка двух маркеров

## Лабораторная работа №4

### Исследование температурной зависимости электрической проводимости твердых диэлектриков1.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Экспериментальное исследование температурной зависимости электрической проводимости твёрдых диэлектриков.
2. Расчет характеристик твердых диэлектриков и конденсаторов с твердыми рабочими диэлектриками.

#### 2. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- изучить теоретический материал, содержащийся в методических указаниях;
- ознакомиться с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы.

При подготовке к защите лабораторной работы необходимо:

- оформить отчет в соответствии с разделом б; устно подготовить ответы на контрольные вопросы.

#### 3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ 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

$$\gamma = q \cdot n \cdot \mu,$$

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.

### 3. 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. 1). Каждый ион стремится занять положение, которому соответствует минимум потенциальной энергии.

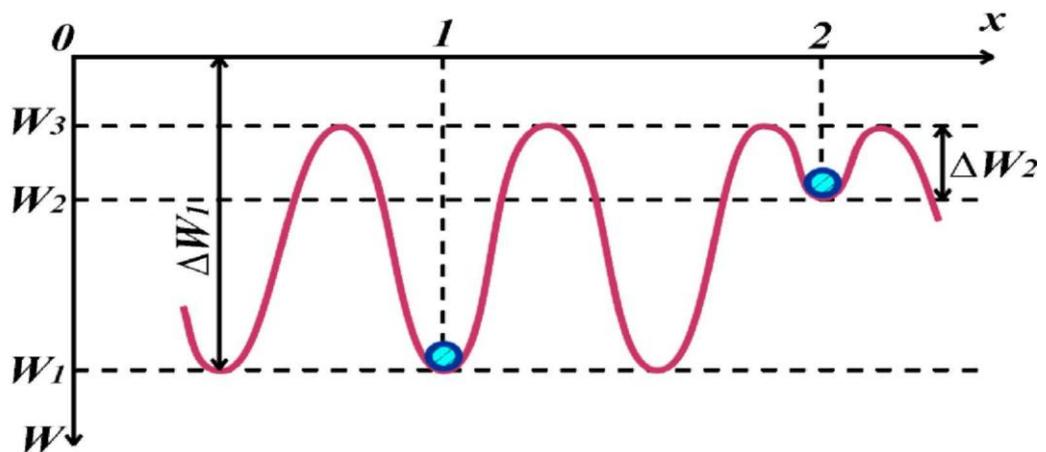


Рисунок 1.

*Зависимость потенциальной энергии иона твёрдого диэлектрика от координаты в электрическом поле окружающих заряженных частиц*

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

В реальных диэлектриках практически всегда имеются ионы примеси. Они сравнительно слабо закреплены (положение 2 на рисунке 1). Для их выхода из потенциальной ямы необходима энергия активации  $AW_2$  значительно меньшая, чем  $AW_x$  (см. рис 2.1). Аналогично ведут себя ионы основного вещества, располагающиеся вблизи дефектов кристаллической решётки и в междоузлиях.

Движение ионов в твёрдом теле рассматривают как их тепловое освобождение из потенциальной ямы и переход в другую потенциальную яму. В отсутствие 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  $AW_b$ , а для перехода примесного иона - барьер  $AW_2$ . 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  $q \cdot u$ , где  $q$  - заряд иона, а  $u$  потенциал электрического поля в точке расположения иона. Если поле в диэлектрике равномерное, то потенциал изменяется с координатой по линейному закону и зависимости  $q \cdot u$  от координаты имеет вид, представленный на рисунке 2.

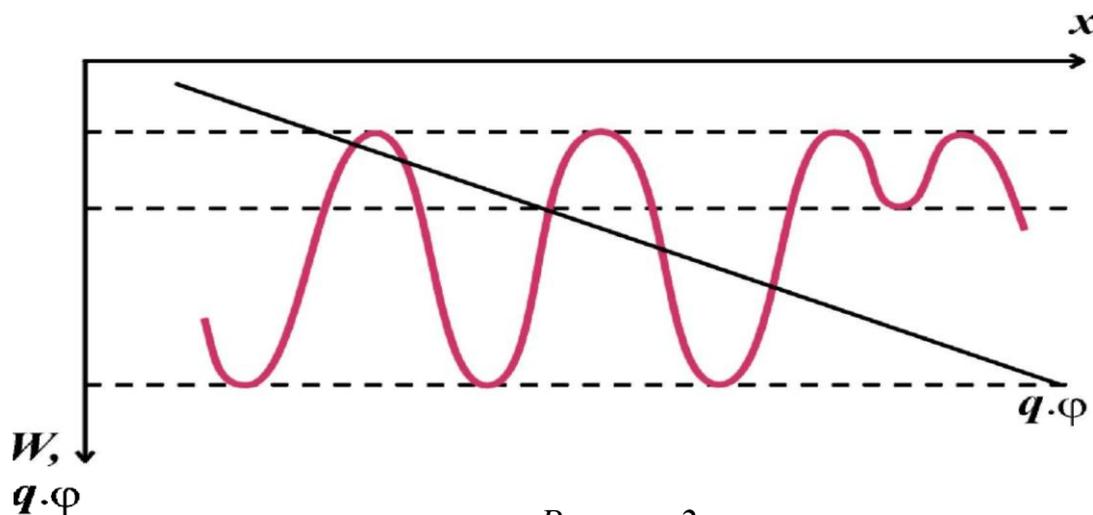


Рисунок 2.

Зависимость потенциальной энергии иона от координаты во внешнем поле  $q \cdot u$  и в электрическом поле окружающих заряженных частиц  $W_x$

Просуммировав обе составляющие потенциальной энергии иона, получим для потенциальной энергии иона график, представленный на рисунке 3.

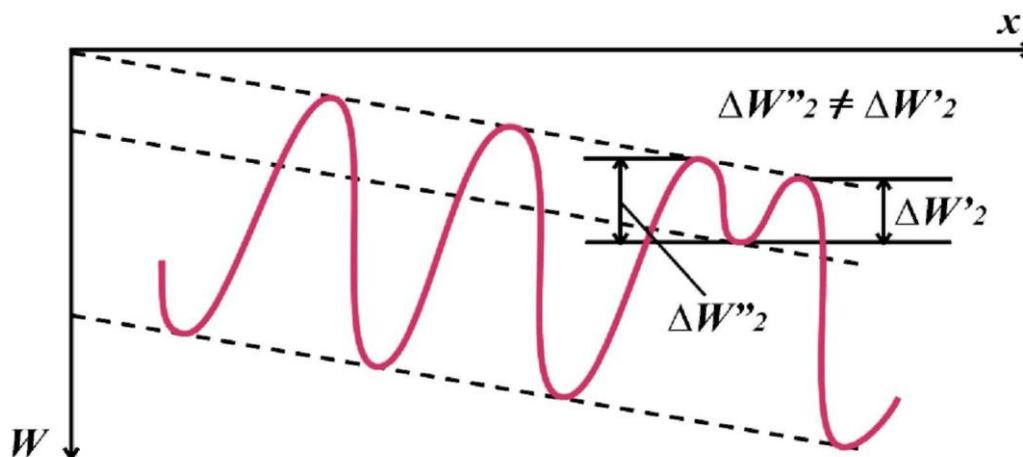


Рисунок 3.

*Зависимость потенциальной энергии иона от координаты в твёрдом теле при воздействии равномерного электрического поля*

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.

### 3. 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

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{\Delta W}{kT}}, \quad (2)$$

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. 4. Практически удобнее пользоваться графиком, построенным в полулогарифмической системе координат (рис. 5).

Прологарифмируем формулу 2

$$\ln \gamma = \ln A - \frac{\Delta W}{k} \cdot \frac{1}{T} \quad (3)$$

В системе координат  $\ln \gamma = f\left(\frac{1}{T}\right)$  график представляет собой прямую линию (см. рис. 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:

$$\Delta W = k \cdot \frac{\ln \gamma'' - \ln \gamma'}{\frac{1}{T'} - \frac{1}{T''}} \quad (4)$$

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.

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

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

Где  $A_1, A_2$  -коэффициенты, относящиеся к ионам первого и второго вида соответственно;

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

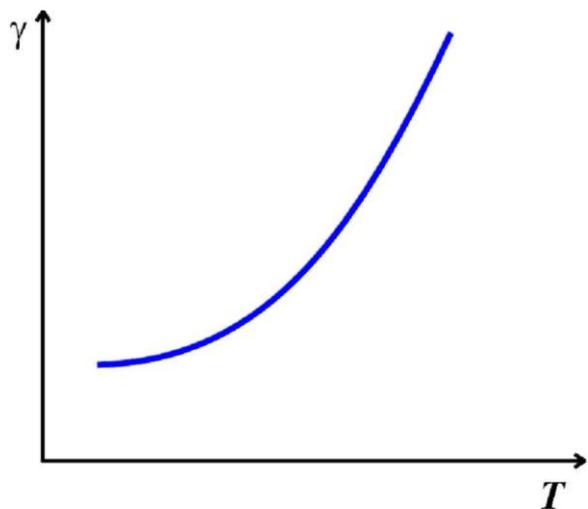


Рисунок 4.

Зависимость электрической проводимости  $\gamma$  от температуры  $T$

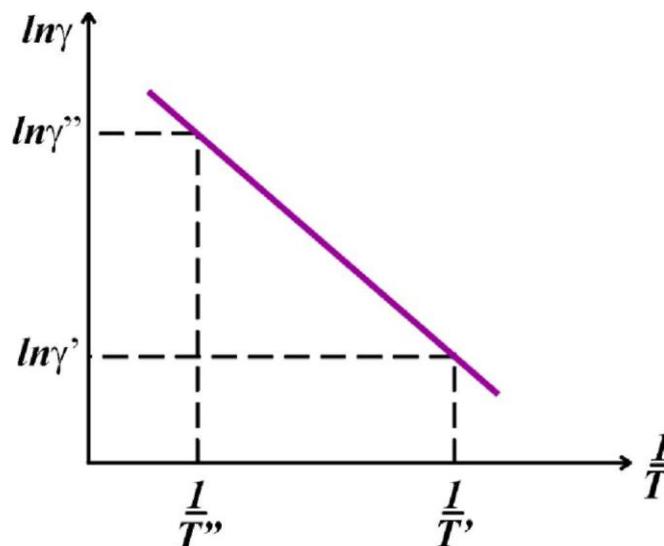


Рисунок 5. Зависимость

электрической проводимости  $\gamma$  от температуры  $T$  в полулогарифмической системе координат

Если  $\Delta W_1 \neq \Delta W_2$  то в системе координат

то график представляет собой ломаную линию. С его помощью можно рассчитать энергию активации ионов первого и второго вида.

### 3. 2. Саморазряд конденсатора

В радиотехнических устройствах 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:

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

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.

$$\tau = R \cdot C = \rho \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon, \quad (7)$$

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

$C$  - ёмкость конденсатора, Ф;

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

$\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость.

$\varepsilon_0$  - диэлектрическая постоянная;

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

#### 4. ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

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

4. Данные измерений свести в таблицу.

$t, ^\circ\text{C}$	$T, \text{K}$	$\frac{1}{T}, \text{K}^{-1}$	$R, \text{Ом}$	$\gamma = \frac{1}{R}, \text{Ом}$	$\ln \gamma$	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. Выполнять индивидуальное задание по указанию преподавателя. Записи, связанные с его выполнением, представить в отчёте после выводов (см. приложение).

## 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

### 5. 1. Описание лабораторной установки

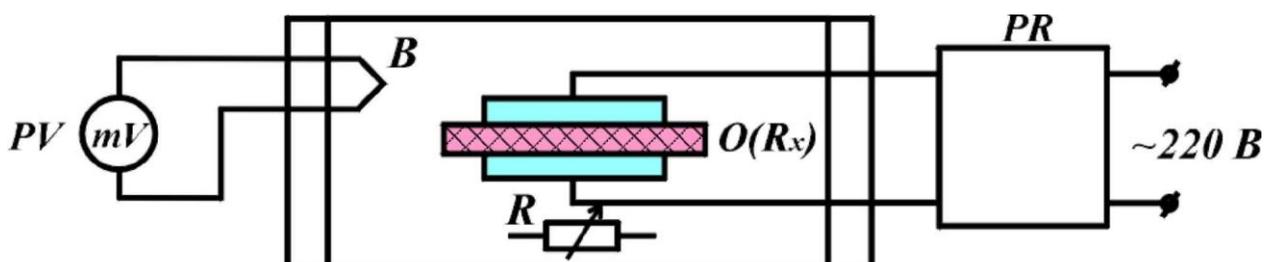


Рисунок 6. Схема установки 1

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  $PR$  (рисунок 6).

Принцип работы тераомметра заключается в следующем (рисунок 7). Измеряемое сопротивление  $R_x$  присоединяется к извест-

ному калиброванному сопротивлению  $R_{\text{Э}}$ . Эти последовательно соединённые сопротивления  $R_X$  и  $R_{\text{Э}}$  подключены к специальному стабилизированному источнику постоянного напряжения  $G$  ( $U=105\text{В}$ ) и образуют делитель напряжения. Падение напряжения  $U_e$  на сопротивлении  $R_{\text{Э}}$  измеряется при помощи усилителя постоянного тока  $A$  с большим выходным сопротивлением изоляции и стрелочного прибора  $P$ .

Падение напряжения можно рассчитать по формуле

$$U_B = \frac{U}{R_X + R_{\text{Э}}} \cdot R_{\text{Э}}. \quad (3.1)$$

Отсюда

$$R_X = \frac{U \cdot R_{\text{Э}}}{U_B} - R_{\text{Э}}. \quad (3.2)$$

Напряжение  $U$  и сопротивление  $R_{\text{Э}}$  постоянны. Следовательно,  $R_X$  обратно пропорционально  $U_B$  и шкалу микроамперметра  $P$  можно проградуировать в величинах сопротивления.

Для расширения пределов измерения в терраомметре имеется набор из 9 сопротивлений  $R_{\text{Э}}$ , подключённых к многопозиционному переключателю.

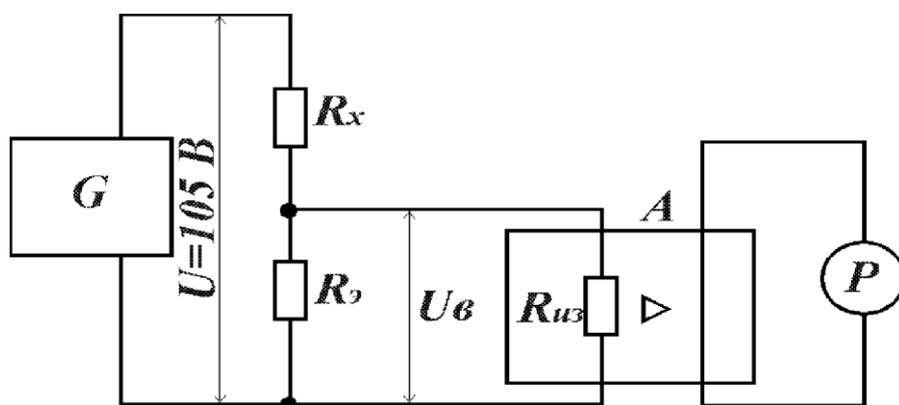


Рисунок 7. К принципу работы терраомметра

## 5. 2. Порядок проведения эксперимента

- 5.1. Включить тераомметр в сеть и дать прогреться в течение 30 минут.
- 5.2. Откалибровать тераомметр. Поставить переключатель в положение "  $k\Omega$  ". (Положение КАЛ служит для калибровки на пределы ТОм  $x_i$  и ТОм  $x_{i0}$ , которые при выполнении лабораторной работы не используются).
- 5.3. Ручкой УСТАНОВКА установить стрелку прибора на риску " $\infty$ ". Соединить проводником клеммы  $R_x$  накоротко и ручкой УСТАНОВКА 0,1 поставить стрелку прибора на риску "0,1".
- 5.4. 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:*

первые измерения производить при положении переключателя  $100 \times 9 \Omega$ ;

при проведении измерений необходимо учесть, что схема прибора позволяет заземлить любой, но одновременно только один из зажимов " К " или " Э ". Зажимы "  $\Omega$  " и " Э " - относительно зажима " к " находятся под потенциалом 105 В.

- 5.5. Включить нагреватель печи и произвести измерения в процессе нагрева.

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Таблицы с результатами проведенных в ходе лабораторной работы измерений.
3. Основные формулы, используемые при расчетах.
4. Протокол обработки результатов эксперимента.

5. Графики экспериментальной и теоретической температурных зависимостей.
6. Анализ полученных результатов.
7. Выводы.

## **7. 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.

## **8. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Сорокин В. С. Материалы и элементы электронной техники [Текст] : учебник : в 2 т. Т. 2. - М. : Академия, 2006. - 384 с.
2. Пасынков В.В. Материалы электронной техники [Текст]: учебник / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. 2-е изд, перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 1986. - 367 с.

## 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

$$TKE = -4 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$$

4. При температуре 220 °С в конденсаторе существуют потери только на электропроводность.

Рассчитайте  $tgd$  при  $f = 1000$  Гц. Ёмкость конденсатора при 20 °С равна 1000 пФ, а среднее значение  $TKE = -4 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$ .

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

## Лабораторная работа №5

### Исследование частотной зависимости диэлектрической проницаемости твердых диэлектриков

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение физических процессов, протекающих в твердых диэлектриках под воздействием внешних электрических полей различной частоты.
2. Проведение расчета и анализа зависимости комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь диэлектрика от частоты внешнего электрического поля на основе экспериментальных исследований.

#### 2. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: изучить теоретический материал, содержащийся в методических указаниях; ознакомиться с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы.

При подготовке к защите лабораторной работы необходимо:

- оформить отчет в соответствии с разделом 6;
- изучить соответствующие разделы конспекта лекций по дисциплине и ознакомиться с рекомендованной литературой;
- устно подготовить ответы на контрольные вопросы.

#### 3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

*Диэлектрическими (или диэлектриками)* называются материалы, оказывающие значительное сопротивление прохождению через них постоянного электрического поля.

Основным процессом, возникающим при воздействии на диэлектрик электрического напряжения, является *поляризация* - ограниченное изменение положения в пространстве частиц диэлектрика, имеющих заряд того или иного знака. В результате поляризации в любом элементе объема диэлектрика индуцируется электрический момент, которым этот объем до воздействия электрического поля не обладал.

### 3. 1. Диэлектрическая проницаемость

Количественно способность вещества к поляризации оценивается безразмерной величиной  $\epsilon_r$ , называемой *относительной диэлектрической проницаемостью* (или просто *диэлектрической проницаемостью*) этого вещества.

Диэлектрическую проницаемость вещества можно определить как отношение ёмкости конденсатора с данным диэлектриком ( $C_x$ ) к ёмкости конденсатора тех же размеров в вакууме  $C_0$ :

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0}. \quad (1)$$

Величина ёмкости плоского вакуумного конденсатора (т. е. геометрическая ёмкость) равна

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{h}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м - электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума),  $S$  - площадь пластин конденсатора,  $h$  - расстояние между пластинами.

### 3. 2. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости

Диэлектрическая проницаемость зависит от изменяющихся внешних факторов. Зависимость  $s(f)$  носит название *дисперсии диэлектрической проницаемости*.

Диэлектрическая проницаемость неполярных диэлектриков не зависит от частоты при изменении последней в чрезвычайно широких пределах. В случае дипольной поляризации на низких частотах (до некоторой предельной частоты)  $s$  также остается постоянной, с ростом частоты приближаясь асимптотически к значениям, характерным для неполярных диэлектриков.

При одновременном действии в материале нескольких механизмов релаксационной поляризации с различными временами релаксации  $\tau_y$  зависимость  $s(f)$  может иметь не один, а несколько пологих участков, заканчивающихся спадами (см. рисунок 1).

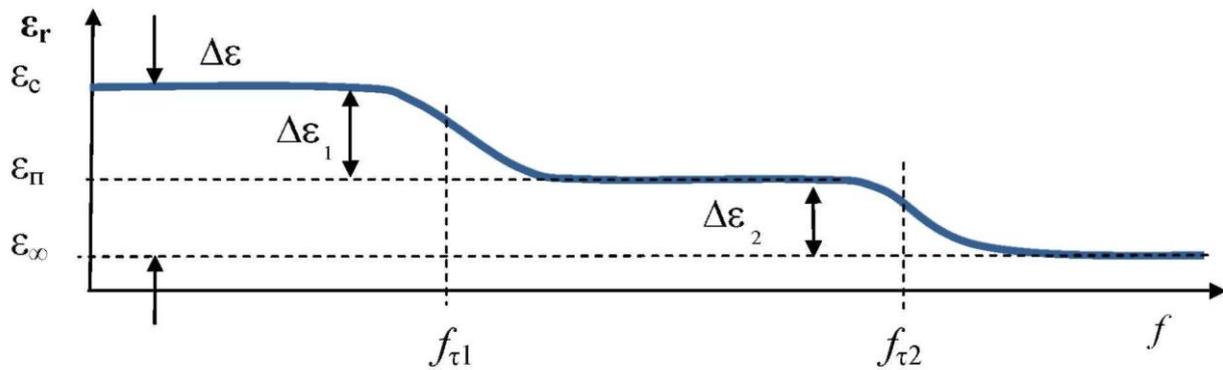


Рисунок 1.

Частотная зависимость диэлектрической проницаемости для однородного диэлектрика с двумя временами релаксации  $t_1$  и  $t_2$ .

$f_{\tau 1}$  и  $f_{\tau 2}$  - частоты релаксации, соответствующие временам  $t_1$  и  $t_2$ ,

$\epsilon_{п}$  - промежуточное значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{Гш}$

$\Delta\epsilon_1, \Delta\epsilon_2$  - глубины релаксации, соответствующие различным (без учета резонансного) механизмам поляризации

Разность значений диэлектрической проницаемости при повышении частоты до начала спада, вызванного тем или иным механизмом поляризации, и по окончании этого спада называется *глубиной релаксации* для данного механизма поляризации ( $\Delta\epsilon_r$ ).

Для примера на рисунке 1:

$$\Delta\epsilon_1 = \epsilon_c - \epsilon_{п}, \quad \Delta\epsilon_2 = \epsilon_{п} - \epsilon_{\infty}.$$

Независимо от «набора» механизмов поляризации в диэлектрике в *отсутствии резонансной поляризации* график  $\epsilon(f)$  ни на одном частотном диапазоне не будет возрастать: с ростом частоты будет наблюдаться или практическая независимость  $\epsilon$  от частоты, либо снижение  $\epsilon$ .

Наибольшее при этом значение диэлектрической проницаемости, достигаемое на самых низких частотах, принято называть

статической диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon_{гс}$ ); наименьшее (измеряемое на частотах, приближающихся к частоте световых колебаний) - *оптической диэлектрической проницаемостью* ( $\epsilon_{г\infty}$ ).

Разность этих величин, равная сумме всех значений глубин релаксации, называется *инкрементом диэлектрической проницаемости*:

$$\Delta\epsilon = \epsilon_c - \epsilon_\infty.$$

При включении механизмов резонансной поляризации функция  $\epsilon(\omega)$  уже не будет монотонной - в области световых частот возникнет ряд экстремумов.

### 3. 3. Потери в конденсаторах

Под воздействием электрического поля в любом веществе наблюдается рассеяние некоторого количества энергии. При включении в цепь конденсатора, энергия расходуется как в диэлектрике, заполняющем пространство между его пластинами, так и в металлических частях конденсатора (подробнее о потерях в конденсаторах см. методические указания [1, С. 11-16]).

Потери энергии в диэлектрике под воздействием приложенного к нему напряжения называют *диэлектрическими потерями*. Углом *диэлектрических потерь* называется угол  $\delta$ , дополняющий до  $90^\circ$  угол сдвига фаз  $\phi$  между током и напряжением в емкостной цепи.

Угол диэлектрических потерь характеризует диэлектрик, находящийся в электрическом поле. Для характеристики конденсатора как элемента, потери которого обусловлены не только потерями в диэлектрике, но и сопротивлением подводящих и соединительных проводов, сопротивлением самих электродов, вводится понятие *угла потерь*  $\delta_k$ .

В теоретически идеальном конденсаторе ток через конденсатор опережает напряжение на четверть периода, и, следовательно, угол  $\delta_k$  равен нулю.

Потери энергии в реальном конденсаторе можно представить в виде потерь на некотором условном активном сопротивлении  $R$  (сопротивлении потерь), включенном параллельно идеальному

конденсатору (см. рисунок 1). Угол потерь  $\delta_K$  реального конденсатора отличен от нуля, и чем больше этот угол, тем больше диэлектрические потери.

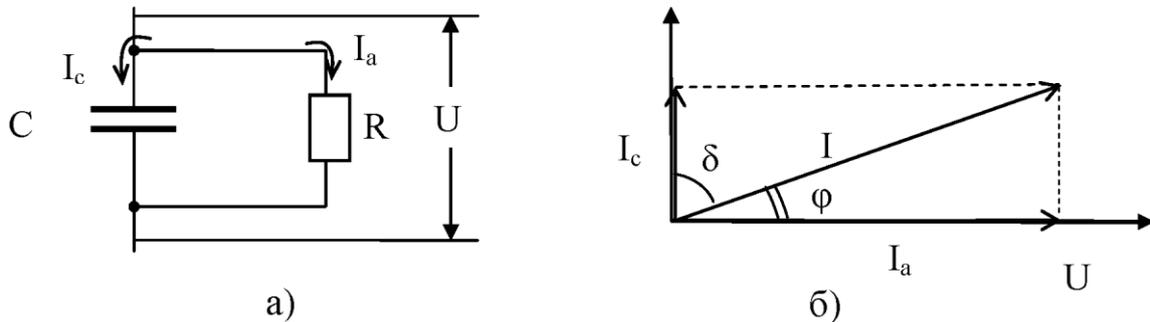


Рисунок 2. Эквивалентная параллельная схема (а) и векторная диаграмма (б) конденсатора с потерями

Если для данного конденсатора известно, что его потери в каком-либо диапазоне частот обусловлены только потерями от сквозной электропроводности рабочего диэлектрика, то определив эквивалентное сопротивление  $R$  на какой-либо частоте, можно использовать это значение для расчета потерь конденсатора для любой частоты из диапазона:

$$\operatorname{tg} \delta_K = \frac{1}{R \cdot 2\pi f C}.$$

$$P_a = \frac{U_0^2}{R},$$

где  $C$  - емкость конденсатора;

$f$  - частота приложенного к цепи напряжения;

$P_a$  - рассеиваемая в конденсаторе активная мощность.

Если же пренебречь потерями в металлических частях нельзя, и помимо потерь на электропроводность в диэлектрике будут присутствовать и релаксационные потери, то:

- 1) угол потерь конденсатора  $\delta_K$  не будет совпадать с углом диэлектрических потерь  $\varphi_K$ ;
- 2) эквивалентное сопротивление  $R$  будет само являться функцией частоты.

### 3. 4. Частотные зависимости потерь в конденсаторах

Рассмотрим вначале влияние частоты на диэлектрические потери (потери в рабочем диэлектрике конденсатора). Выделяют три основных вида диэлектрических потерь: потери на электропроводность, релаксационные потери, ионизационные потери.

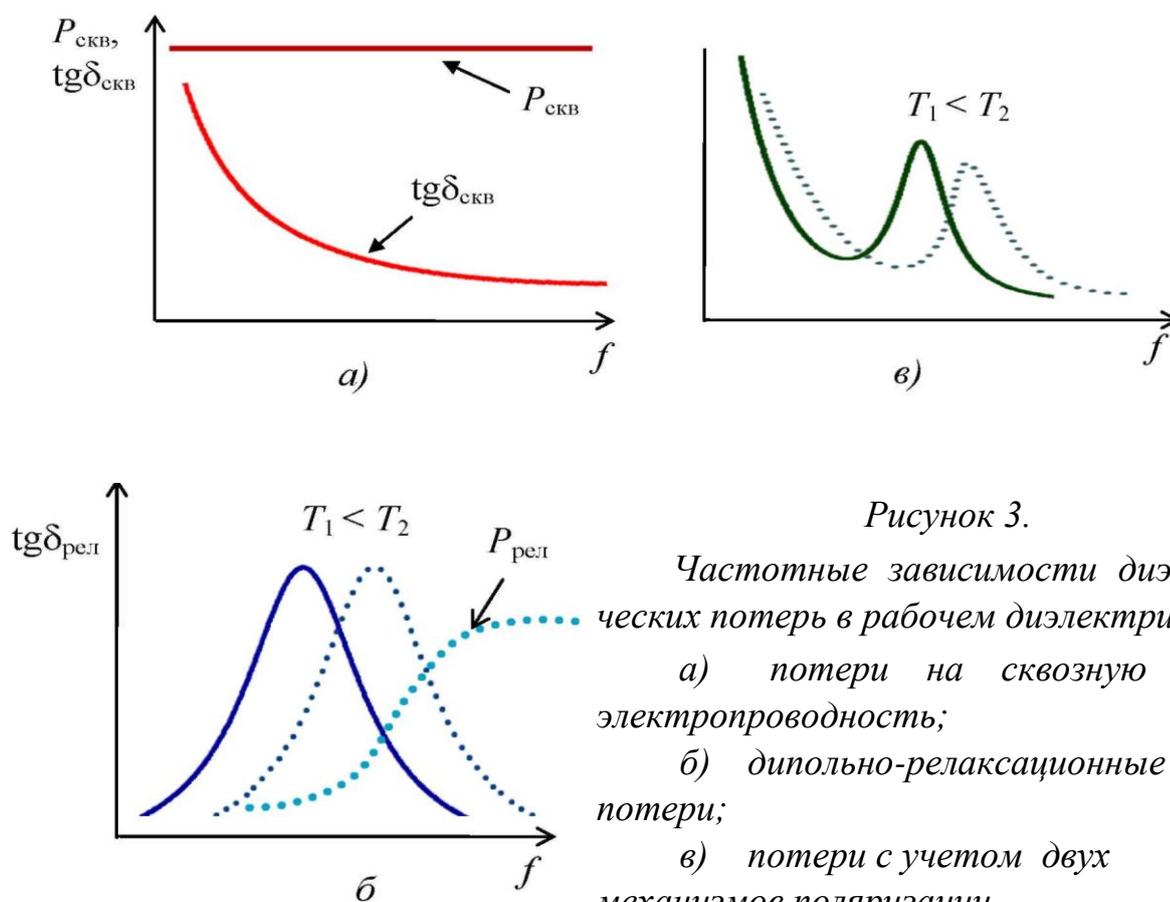


Рисунок 3.

Частотные зависимости диэлектрических потерь в рабочем диэлектрике  
 а) потери на сквозную электропроводность;  
 б) дипольно-релаксационные потери;  
 в) потери с учетом двух механизмов поляризации

**3. 4. 1. Потери на электропроводность** обнаруживаются в диэлектриках, имеющих заметную объемную или поверхностную электропроводность ([2]). Рассеиваемая мощность при потерях этого вида не зависит от частоты, тангенс угла диэлектрических потерь уменьшается с частотой по гиперболическому закону (см. рисунок 3, а)

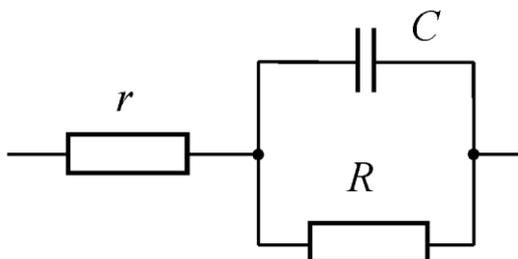
$$\text{tg}\delta(f) = 1.8 \cdot 10^{10} / \epsilon(f) \cdot f \cdot \rho$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление диэлектрика, измеренное на постоянном токе;  
 $\epsilon(f)$  - диэлектрическая проницаемость, измеренная на данной частоте.

**3. 4. 2. Релаксационные потери** обусловлены активными составляющими поляризационных токов. Частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь имеют характерный «дипольный» максимум, смещающийся с повышением температуры в область более высоких частот (см. рисунок 3, б).

Диэлектрические потери с учетом вклада релаксационного механизма и электропроводности диэлектрика показаны на рисунке 3, в.

**3. 4. 3. Частотная зависимость тангенса угла потерь конденсатора (с учетом потерь в металлических частях)** может быть рассчитана на основании рассмотрения эквивалентной схемы конденсатора



*Рисунок 4.*

*Эквивалентная смешанная схема конденсатора*

Сопротивление  $r$  учитывает потери в металлических частях конструкции, сопротивление  $R$  аналогично показанному на рисунке 2.

Для конденсатора, в рабочем диэлектрике которого существенны только потери на электропроводность, тангенс угла потерь можно представить <sup>1</sup>

$$tg\delta_K = \omega Cr + \frac{1}{\omega CR}.$$

(6)

Из (6) видно, что потери в металлических частях растут по линейному закону, а потери в диэлектрике убывают обратно пропорционально частоте.

Частоту, при которой  $tg\delta_K$  достигает экстремума (минимума), получим путем дифференцирования по частоте выражения (6) в предположении постоянства параметров  $r$ ,  $R$ ,  $C$

$$\frac{d(tg\delta_K)}{d\omega} = Cr - \frac{1}{\omega^2 CR}.$$

(7)

Отсюда

$$\omega_{\min} = \frac{1}{C \cdot \sqrt{Rr}}$$

(8)

Таким образом, частоту минимума тангенса угла потерь конденсатора можно легко найти графически (см. рисунок 5).

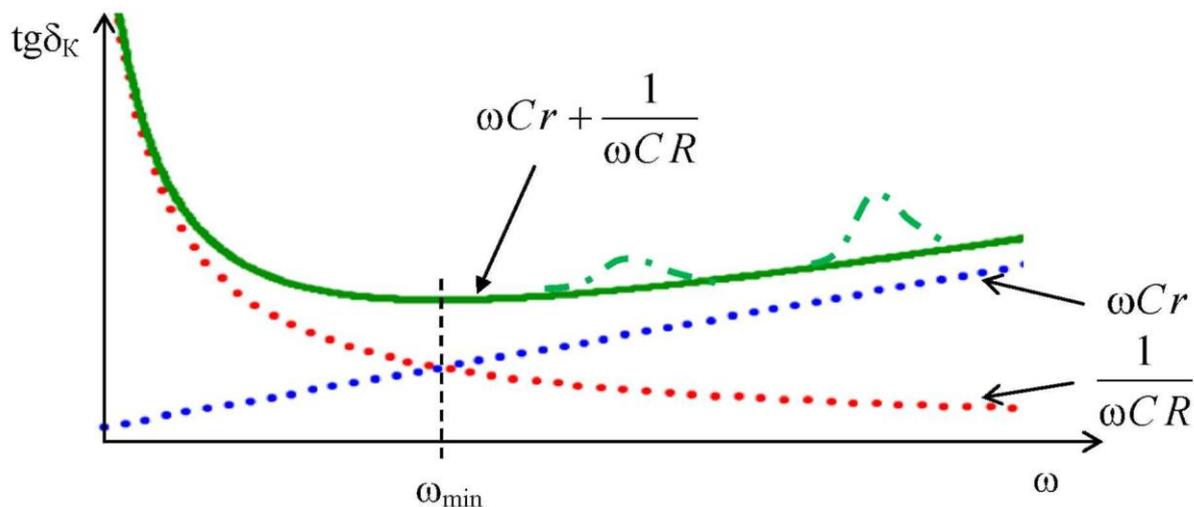


Рисунок 5. Зависимость тангенса угла потерь конденсатора от частоты

Если для рабочего диэлектрика характерны также и релаксационные потери (обусловленные доменной или дипольно-релаксационной поляризацией), то на частотной зависимости  $\text{tg}\delta_k$  появятся дополнительные максимумы (см. штрихпунктирную линию на рисунке 5), соответствующие временам релаксации.

### 3. 5. Добротность конденсатора.

#### Резонансный метод определения добротности

Поскольку диэлектрическая проницаемость однозначно связана со способностью вещества образовывать электрическую ёмкость, то и оценка диэлектрической проницаемости вещества может базироваться на оценке ёмкости конденсатора с данным диэлектриком.

Потери конденсатора могут характеризоваться либо тангенсом угла потерь  $\text{tg}\delta_k$ , либо добротностью (качеством) конденсатора  $Q_x$ , которые связаны между собой соотношением

$$Q_x = \frac{1}{\text{tg}\delta_k}. \quad (9)$$

Для экспериментального определения ёмкости и добротности конденсатора широкое распространение получил резонансный метод с использованием измерителя добротности (куметра).

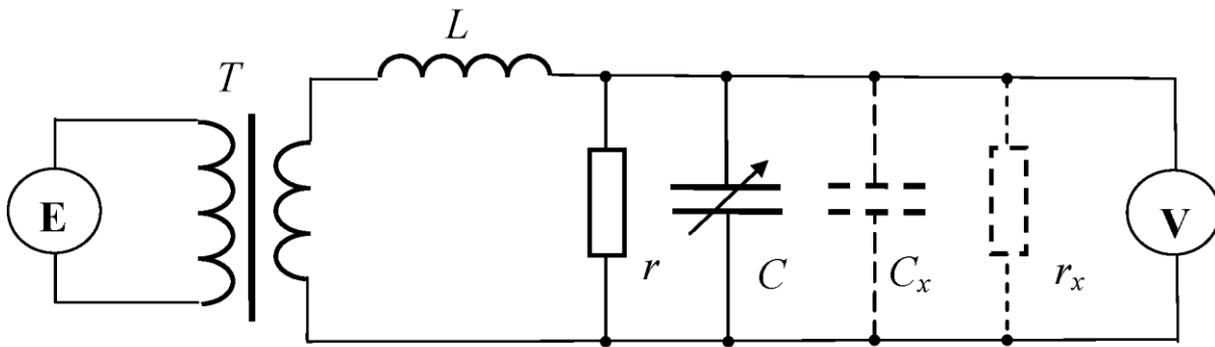


Рисунок 6. Схема последовательного колебательного контура (сплошная линия) с подключаемым параллельно ёмкости конденсатором с потерями (пунктирная линия).

- $E$  - электродвижущая сила;  $V$  - вольтметр;  
 $T$  - трансформатор связи;  
 $L, C$  - индуктивность и ёмкость контура; эквивалентное сопротивление потерь контура при резонансе;  
 $r$  - ёмкость и сопротивление потерь исследуемого диэлектрика  
 $C_x, r_x$

В основу работы прибора положен резонанс напряжений в последовательном колебательном контуре. Конструкция прибора выполнена так, что потери в контуре всегда значительно меньше потерь в исследуемом объекте. Подключаемая к куметру катушка индуктивности образует со встроенным в прибор конденсатором переменной ёмкости последовательный колебательный контур. ЭДС вводится в контур через трансформатор связи (см. рисунок 2), пополняя запас энергии контура и вызывая вынужденные колебания.

С изменением частоты генератора изменяются частотно зависимые реактивные сопротивления контура: ёмкостное сопротивление конденсатора  $X_C$  и индуктивное сопротивление катушки  $X_L$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C_1}; \quad X_L = 2\pi f L, \quad (10)$$

становясь равными на некоторой частоте, называемой частотой резонанса

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}}. \quad (11)$$

Здесь:  $C_1$  - величина внутренней переменной ёмкости прибора,  $L$  - величина индуктивности катушки.

При этом *полное сопротивление контура* (12)

$$Z_k = \sqrt{r^2 + (X_C - X_L)^2}$$

становится чисто активным ( $Z_{k \text{ рез}} = r$ ) и минимальным, и, следовательно, ток в контуре, напротив, достигает максимального значения.

При поддержании постоянного значения ЭДС максимального значения на частоте резонанса достигают также величина напряжения на конденсаторе  $U_C$  и добротность контура  $Q$ .

Резонансная кривая контура, снятая путём изменения ёмкости, представлена на рисунке 7 (правая кривая).

Значение добротности контура, зафиксированное на частоте резонанса, и потери контура связаны следующей формулой:

$$Q_1 = r\omega C_1,$$

где  $\omega = 2\pi f_{\text{рез}}$  - круговая частота резонанса.

Нагрузим контур, подключив конденсатор неизвестной ёмкости  $C_x$  с исследуемым диэлектриком параллельно измерительной (внутренней) ёмкости контура, путем изменения этой ёмкости добьемся резонанса в контуре на той же частоте  $f$ .

Поскольку индуктивность контура осталась без изменения, а ёмкости соединены параллельно, то для получения резонанса на той же частоте требуется уменьшить ёмкость внутреннего конденсатора на величину ёмкость образца, т. е. величина внутренней ёмкости прибора при работе с нагруженным контуром ( $C_2$ ) на частоте резонанса

$$C_2 = C_1 - C_x. \tag{14}$$

Резонансная кривая контура с образцом более пологая и смещена влево (рисунок 7, левая кривая).

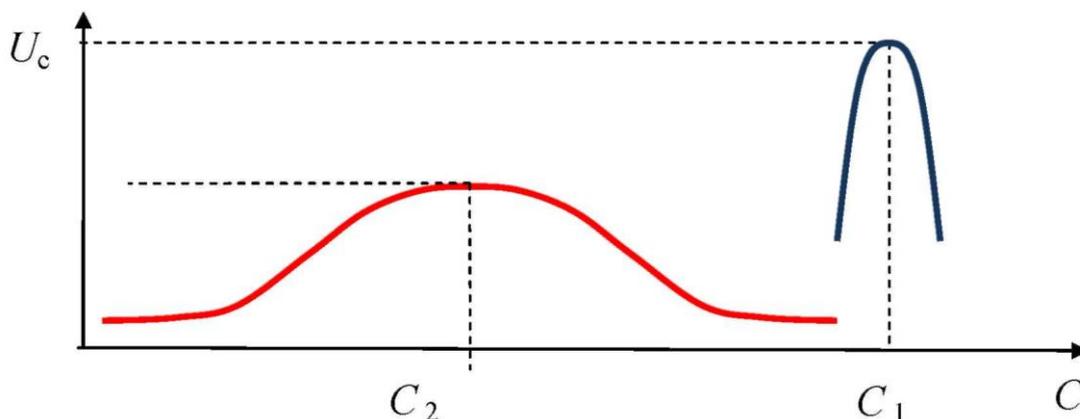


Рисунок 7. Формы резонансных кривых при различных значениях измерительной ёмкости

Поскольку показания прибора можно считать практически свободными от влияния потерь в измерительном блоке, измеренное при резонансе значение добротности контура  $Q_2$  будет равно

$$Q_2 = R\omega C \quad (15)$$

где  $R$  - сопротивление параллельного соединения эквивалентного сопротивления потерь контура  $r$  и эквивалентного сопротивления потерь конденсатора  $r_x$

$$R = r \cdot r_x / (r + r_x) \quad (16)$$

Из выражений (13-16) получаем добротность исследуемого образца

$$Q_x = r_x \omega C_x = \frac{(C_1 - C_2) Q_1 Q_2}{(Q_1 - Q_2) C_1}. \quad (17)$$

Соответственно тангенс угла потерь исследуемого конденсатора найдется из выражения (9).

#### 4. ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Лабораторной бригаде в качестве объекта исследования выдается

а) прямоугольный образец из какого-либо диэлектрического материала: гетинакса, текстолита, фторопласта, полиамида или ор-

ганического стекла (краткое описание этих материалов см. в приложении 1).

Полученный материал используется в качестве диэлектрика, заполняющего пространство между обкладками конденсатора, помещенного во внешнее электромагнитное поле с изменяющейся частотой  $f$ .

б) промышленный конденсатор, также помещаемый во внешнее электромагнитное поле с изменяющейся частотой  $f$ .

а)  $\varepsilon(f)$ ,  $\operatorname{tg} \delta_K(f)$  (вариант работы «а»);

б)  $C(f)$ ,  $\operatorname{tg} \delta_K(f)$  (вариант работы «б»)

Необходимо по полученным экспериментальным данным расчетным путём выявить зависимости и построить соответствующие графики.

## **5. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ**

### **5.1. Описание лабораторной установки**

В лабораторную установку входят:

- измеритель добротности (куметр) Е4-7,
- комплект катушек индуктивности L-0370-2 (12 катушек);
- микрометр и штангенциркуль для измерения линейных параметров конденсатора;  
две медных пластины, используемые в качестве обкладок конденсатора.

### **5.2. Порядок выполнения лабораторной работы**

При выполнении варианта «а»

1. Проведите измерения ширины пластин конденсатора, используя штангенциркуль.
2. Измерьте толщину исследуемого диэлектрика с помощью микрометра.
3. Результаты линейных измерений занесите в таблицу (формат таблицы см. в прил. 3).

4. Соберите конденсатор с исследуемым диэлектриком .

При выполнении варианта «б» переходите к электрическим измерениям.

### 5. 2. 1. Выполнение электрических измерений

1. Установите переключатель ПРЕДЕЛЫ Q куметра в положение 100.
2. Возьмите *первую* катушку комплекта L1 и подсоедините её к клеммам  $L_x$  на верхней панели измерителя добротности.
3. Установите необходимую частоту резонанса  $f_1$ . (Частоты указаны в таблице, выдаваемой преподавателем).

Порядок сборки конденсатора см. в прил. 4

4. Подстройте величину ёмкости контура прибора так, чтобы добиться настройки в резонанс. Используйте для грубой настройки кнопки включения электрического привода ручки измерительного конденсатора, для точной настройки - ручку ЕМКОСТЬ pF.

Момент настройки в резонанс соответствует максимальному отклонению стрелки измерительного прибора.

Если стрелка измерительного прибора находится в пределах первой трети шкалы, перейдите на более чувствительную шкалу переключателем ПРЕДЕЛЫ Q.

Если стрелка измерительного прибора находится в конце шкалы - перейдите на менее чувствительную шкалу.

5. Для повышения точности измерений перед снятием показаний проверьте точность калибровки прибора. Для этого:

- тумблер ИЗМЕРЕНИЕ/КАЛИБРОВКА установите в положение КАЛИБРОВКА;
- ручкой КАЛИБРОВКА Q подведите стрелку измерительного прибора точно на отметку под знаком т.

6. Установите тумблер ИЗМЕРЕНИЕ/КАЛИБРОВКА в положение ИЗМЕРЕНИЕ.

7. Запишите обеспечивающее резонанс на частоте  $f_1$  значение ёмкости  $C_1$  и добротность контура  $Q_1$ .

Отсчет добротностей для положений переключателя ПРЕДЕЛЫ Q 300 и 1000 проводится соответственно по шкалам 30 и 100 с последующим умножением показаний на 10.

8. Подключите конденсатор с *первым* исследуемым диэлектриком к клеммам  $C_x$  на верхней панели прибора (параллельно собственной ёмкости прибора).

9. Настройте контур с подсоединенным конденсатором в резонанс на той же частоте  $f_1$ , изменяя ёмкость контура прибора.

(Переключатель ПРЕДЕЛЫ Q рекомендуется перевести в начале измерений на наиболее чувствительную шкалу).

10. Проведя предварительную калибровку, занесите полученные значения ёмкости ( $C_2$ ) и добротности ( $Q_2$ ) при резонансе с подсоединенным конденсатором в таблицу.

11. Вычислите и занесите в таблицу разность (см. (1 2))

$$C_x = C_1 - C_2.$$

12. Повторите измерения и вычисления по п. 2-11 для всех указанных резонансных частот, выбирая подходящую катушку и записывая результаты.

### 5. 2. 2. Проведение вычислений и построение графиков

Используя основные теоретические сведения, приведенные в методических указаниях, проведите расчет и постройте графики  $\varepsilon(f)$  и  $tg \delta(f)$  ( $C(f)$  и  $tg \delta(f)$ ).

При построении графиков примените линейную интерполяцию во внутренних точках исследуемой полосы частот.

### 5. 2. 3. Анализ полученных результатов

Используя приведенную в приложении информацию об исследуемом диэлектрике, и на основании теоретических сведений о механизмах поляризации объясните полученные результаты.

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Таблица с результатами проведенных измерений.
4. Графики  $\varepsilon(f)$  ( $C(f)$ ),  $tg \delta_K(f)$ .

3. Основные формулы и результаты расчетов.
5. Анализ полученных результатов (сравнение с известными теоретическими зависимостями).
6. Выводы.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается поляризация диэлектрика. Перечислите известные Вам виды поляризации.
2. Какие механизмы поляризации относятся к мгновенной, какие к релаксационной поляризации. Что представляет собой каждый из перечисленных механизмов поляризации.
3. Проведите классификацию диэлектриков по основным механизмам поляризации. Приведите примеры.
4. Дайте определение понятий «диэлектрическая проницаемость» и «угол диэлектрических потерь». Перечислите основные виды диэлектрических потерь в диэлектриках.
5. Приведите эквивалентную схему конденсатора с потерями. Определите понятие добротности конденсатора.
6. Как вычислить добротность реального конденсатора, при включении сопротивления потерь параллельно идеальному конденсатору.
7. В чем заключается резонанс в последовательном колебательном контуре. Каковы условия резонанса.
8. Приведите и объясните теоретические частотные зависимости  $s(f)$  для диэлектрика с одним и двумя временами релаксации.
9. Какие виды диэлектрических потерь Вы знаете? Как зависит тангенс угла диэлектрических потерь  $tg \delta$  от частоты при различных видах диэлектрических потерь?
10. Дайте определение понятий дисперсии диэлектрической проницаемости и глубины релаксации. Покажите эти величины графически.

## 8. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование температурной зависимости емкости и тангенса угла потерь конденсаторов различных типов : методические

указания по выполнению лабораторной работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Л. А. Большевцева. Курск, 2012. 23 с.

**2.** Пасынков В.В. Материалы электронной техники [Текст]: учебник : 2-е изд, перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 1986. - 367 с.

**3.** Сорокин В. С. Материалы и элементы электронной техники [Текст] : учебник : в 2 т. Т. 2 : Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники. - М. : Академия, 2006. - 384 с.

## КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМЫХ В РАБОТЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

### П1.1. Слоистые пластики

Состоят из связующего вещества (феноло-формальдегидные и др. смолы) и наполнителей (листовые волокнистые материалы).

Фенолоформальдегидная смола получается путем нагревания в закрытом котле водяного раствора фенола и формальдегида в присутствии катализатора.

Феноло-формальдегидные смолы благодаря наличию в их молекулах гидроксильных групп полярны.

*Гетинакс* электротехнический листовой представляет собой слоистый материал (пластик), получаемый методом горячего прессования бумаги, пропитанной термореактивным связующим на основе фенолформальдегидных или эпоксидных смол.

Гетинакс относится к числу сильнополярных диэлектриков, поскольку как волокнистая основа, так и пропитывающее вещество обладают полярными свойствами.

Для гетинакса относительная диэлектрическая проницаемость - 6-7; тангенс угла диэлектрических потерь (на частоте  $10^6$  Гц) -0,04-0,08.

*Текстолит* электротехнический листовой аналогичен гетинаксу, однако получается он методом горячего прессования хлопчатобумажных тканей.

### П1.2. Группа неполярных полимеров

Относятся к материалам с малыми диэлектрическими потерями. Мономерные звенья у макромолекул таких полимеров не обладают дипольным моментом.

*Фторопласт* (политетрафторэтилен) является кристаллическим полимером тетрафторэтилена  $F_2C = CF_2$ .



## ПОРЯДОК СБОРКИ КОНДЕНСАТОРА С ИССЛЕДУЕМЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

Для проведения лабораторной работы необходимо собрать плоский конденсатор с исследуемым диэлектриком.

Диэлектрик помещается между пластинами, которые затем для устранения воздушной прослойки между ними прижимаются специальным грузом.

При сборке конденсатора обратите внимание на расположение обкладок: они размещаются перпендикулярно друг другу и внутрь (к диэлектрику) сторонами, к которым подведены проводники (см. рисунок П2).

Во избежание помех, вызванных влиянием двухпроводной линии, необходимо проводники сделать как можно короче. В идеале конденсатор должен подключаться непосредственно к клеммам прибора.

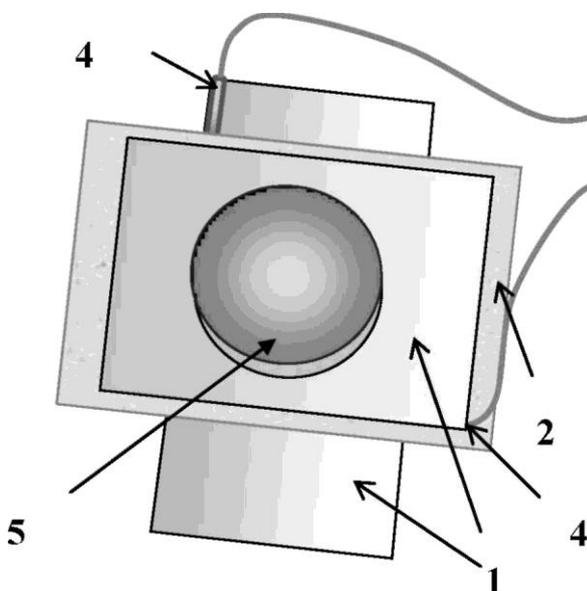


Рисунок П2.

Конденсатор (схематично):

1 — обкладки конденсатора;

2 — исследуемый диэлектрик;

3 — проводники для подключения конденсатора к куметру;

4 — положение мест крепления проводников;

5 — груз

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### **Лабораторная работа №1**

Исследование температурной зависимости сопротивления резистивных материалов.....3

### **Лабораторная работа №2**

Исследование температурной зависимости основных параметров конденсаторов.....19

### **Лабораторная работа №3**

Исследование влияния производственных погрешностей на параметры компонентов электронных средств.....39

### **Лабораторная работа №4**

Исследование температурной зависимости электрической проводимости твердых диэлектриков1.....54

### **Лабораторная работа №5**

Исследование частотной зависимости диэлектрической проницаемости твердых диэлектриков.....66