

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)  
*Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)*

**Н.И.Кузбных, Р.М.Капилевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ  
ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ**

*Методические указания по выполнению  
лабораторной работы для студентов всех специальностей*

2012

## СОДЕРЖАНИЕ

1	ВВЕДЕНИЕ.....	3
2	КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНДЕНСАТОРАХ.....	4
2.1	Краткие сведения об истории конденсаторов.....	4
2.2	Основные области применения конденсаторов .....	4
2.3	Классификация конденсаторов .....	5
2.4	Поляризация диэлектриков, диэлектрическая проницаемость и поте- ри в диэлектрике .....	5
2.5	Основные параметры конденсаторов .....	7
2.5.1	Емкость.....	7
2.5.2	Отклонение емкости от номинала – допуск.....	9
2.5.3	Потери энергии и добротность конденсаторов.....	9
2.5.4	Зависимость емкости конденсаторов и активных потерь от тем- пературы, частоты и времени.....	10
2.6	Основные сведения о конденсаторах постоянной емкости.....	11
2.6.1	Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком.....	11
2.6.2	Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком.....	12
2.7	Маркировка конденсаторов постоянной емкости .....	13
3	ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ.....	16
4	ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ .....	16
5	ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	16
6	СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.....	18
7	МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	19
8	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	19
	СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	20
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОПИСАНИЕ ПРИБОРОВ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТА- НОВКИ.....	21

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных условий успешного расчета и конструирования радиоаппаратуры является правильный выбор и применение стандартных электрорадиоэлементов, в том числе, конденсаторов постоянной емкости. В зависимости от вида радиоаппаратуры и назначения конденсаторов в схеме к ним предъявляются определенные требования, на основании которых выбирается тип конденсатора по его параметрам.

В настоящее время промышленностью выпускается очень большое количество конденсаторов постоянной емкости различного назначения, обладающих самыми разнообразными свойствами, отличающихся по конструктивному исполнению и используемому диэлектрику.

В данной лабораторной работе преследуются следующие цели:

- 1) изучить конструкции и основные свойства конденсаторов постоянной емкости;
- 2) научиться расшифровывать маркировку и кодировку конденсаторов, то есть ознакомиться с принятыми условными обозначениями типов конденсаторов и его основных параметров (буквенными, буквенно-числовыми и цветовыми);
- 3) ознакомиться с некоторыми методами измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь конденсаторов;
- 4) исследовать влияние температуры на основные параметры различных типов конденсаторов постоянной емкости;
- 5) на основе полученных знаний о свойствах различных типов конденсаторов научиться правильно (оптимально) выбирать конденсаторы, соответствующие требованиям технического задания проектируемых радиоэлектронных средств (РЭС).

## 2 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНДЕНСАТОРАХ

### 2.1 Краткие сведения об истории конденсаторов

Первые сведения о конденсаторах относятся к середине 18-го века. Эти конденсаторы представляли собой стеклянные сосуды, наполненные водой, служившей первой обкладкой, присоединяемой к электростатическому генератору. Второй обкладкой служила ладонь экспериментатора, прикладываемая к дну стеклянного сосуда. Применение такого конденсатора позволяло резко усилить эффект от разряда маломощного электростатического генератора, являвшегося в то время единственным источником электроэнергии.

В России первые сведения о конденсаторах относятся к 1752 г. Стеклянные банки, наполненные дробью и обклеенные сверху металлической фольгой, применялись М.В. Ломоносовым и Г. Рихтером при исследовании атмосферного электричества. В это же время был изготовлен первый воздушный конденсатор в доказательство того, что конденсатор может быть получен и из других диэлектриков («электрических тел»), что ранее оспаривалось.

Интересно отметить, что электрический конденсатор относится к числу изобретений, появившихся много ранее того времени, когда создались условия для их широкого внедрения в технику. В течение первых ста лет с момента его изобретения конденсатор применялся либо в виде научной игрушки, либо как вспомогательный прибор для физических исследований в лабораториях. Начало же технического применения конденсаторов относится к середине 19-го века. Необходимость их широкого промышленного производства возникла только после изобретения радио А.С. Поповым в 1895 году.

### 2.2 Основные области применения конденсаторов

В современных радиоэлектронных средствах конденсаторы находят исключительно широкое и разностороннее применение:

- 1) в радиоприемной, радиопередающей, радиоизмерительной аппаратуре – для реализации колебательных контуров, резонансных фильтров и линий задержки, в блокировочных цепях, для разделения цепей с различной частотой, в сглаживающих фильтрах источников вторичного электропитания и т.д.;
- 2) в радиолокационной технике – для получения импульсов большой мощности, формирования формы импульсов и т.д.;
- 3) в лазерной технике – для получения мощных импульсов.
- 4) в телефонии и телеграфии – для разделения цепей постоянного и переменного тока, разделения токов различной частоты, искрогашения в контактных устройствах, симметрирования кабельных линий и т.д.;
- 5) в автоматике и телемеханике – для создания емкостных датчиков, разделения цепей постоянного и пульсирующего токов, в корректирующих цепях и т.д.;
- 6) в вычислительной технике – в специальных запоминающих устройствах, в интегрирующих и дифференцирующих цепях и т.д.;

7) в электроизмерительной технике – в качестве образцовых конденсаторов, для получения переменной емкости и т.д.;

В современной электроэнергетике конденсаторы также находят широкое применение: для повышения коэффициента мощности промышленных энергетических установок, для защиты от перенапряжений, в устройствах освещения люминисцентными лампами, для подавления радиопомех и т. д.

### 2.3 Классификация конденсаторов

Конденсаторы постоянной емкости классифицируются по различным признакам. Однако основные электрические свойства, конструкция и область применения любого конденсатора в максимальной степени определяется диэлектриком, разделяющим его обкладки. Поэтому классификация конденсаторов по типу диэлектрика по праву считается основной. По данному признаку они получили свое наименование и разделяются на следующие типы:

- 1) конденсаторы с газообразным диэлектриком: воздушные, газонаполненные и вакуумные;
- 2) конденсаторы с жидким диэлектриком;
- 3) конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком: керамические, стеклокерамические, стеклоэмалевые, стеклопленочные, слюдяные;
- 4) конденсаторы с твердым органическим диэлектриком: бумажные, металобумажные, пленочные (из неполярных и полярных пленок), комбинированные;
- 5) конденсаторы с оксидным диэлектриком: электролитические (жидкие и сухие), оксидно-полупроводниковые, оксидно-металлические.

### 2.4 Поляризация диэлектриков, диэлектрическая проницаемость и потери в диэлектрике

В любом диэлектрике, независимо от наличия или отсутствия в нем свободных электрических зарядов (носителей зарядов) всегда имеются связанные заряды (электроны оболочек атомов, атомные ядра, ионы). Под действием внешнего электрического поля связанные заряды смещаются из своих равновесных состояний. В результате этого каждый элементарный объем диэлектрика  $dV$  приобретает элементарный, индуцированный (наведенный) электрическим полем, момент  $dp$ .

Образование индуцированного электрического момента в диэлектрике и представляет собой **явление поляризации**. Количественно интенсивность поляризации диэлектрика определяется **поляризованностью  $P$**

$$P = \frac{dp}{dV}. \quad (2.1)$$

В технике при рассмотрении способности материалов к поляризации используют безразмерный параметр – **относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$** , который характеризует способность диэлектрика поляризоваться

или образовывать электрическую емкость (см. формулу (2.3)). Для любого диэлектрика  $\epsilon > 1$ . Лишь для вакуума  $\epsilon = 1$ , а для воздуха  $\epsilon \approx 1$ .

Все виды поляризации делятся на две группы:

1) **Релаксационные процессы поляризации.** Время установления (релаксации) таких видов поляризации порядка  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  с. Эти виды поляризации происходят с определенными затратами энергии, то есть вызывают **потери**, которые характеризуются **тангенсом угла диэлектрических потерь** -  $\text{tg}\delta$ .

2) **Упругие процессы поляризации.** Время установления порядка  $10^{-15}$  с. Процессы поляризации происходят практически без потерь энергии.

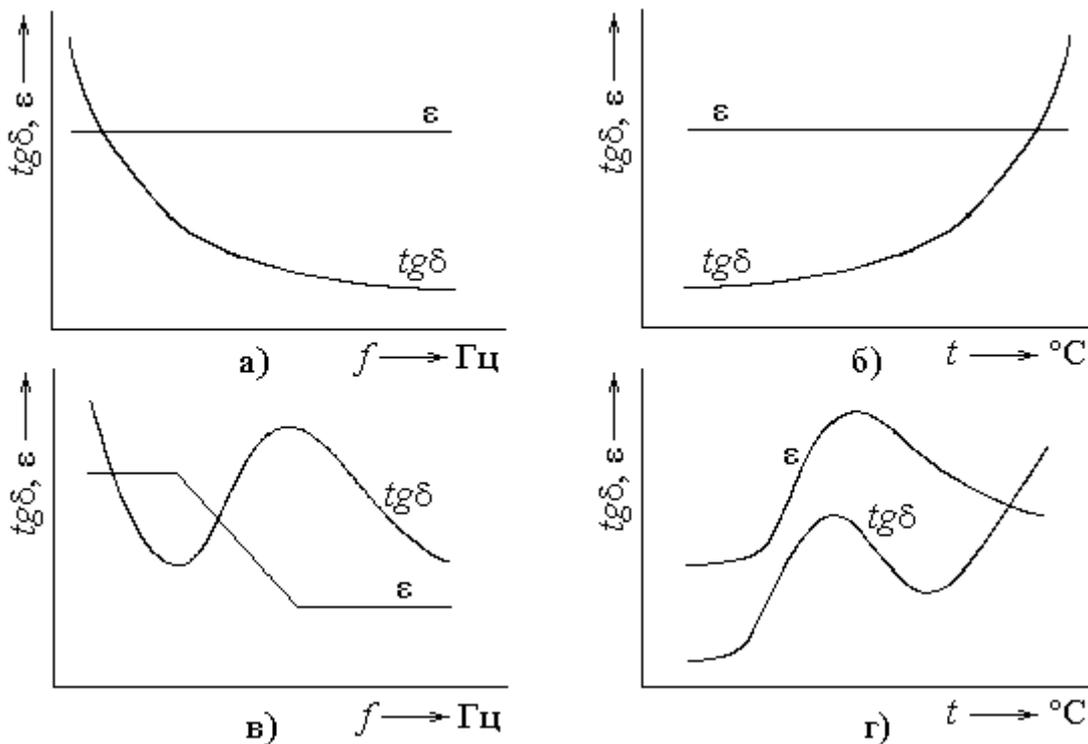
По видам поляризации диэлектрики можно подразделить на два класса:

- **полярные** – диэлектрики, у которых молекулы имеют собственный электрический момент (диполи). У таких диэлектриков обязательно имеют место релаксационные поляризации;

- **неполярные** – диэлектрики, не содержащие диполи. В них имеются только упругие процессы поляризации.

Чем сильнее поляризуется диэлектрик, тем больше будет емкость изготовленного из него конденсатора, но и потери в таких диэлектриках больше, и повышенная нестабильность при изменении частоты  $f$  приложенного поля и температуры окружающей среды  $t$ .

Характерные зависимости диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  от частоты  $f$  и температуры  $t$  представлены на рисунке 2.1.



**Рисунок 2.1 – Зависимости  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  от частоты  $f$  и температуры  $t$  для неполярных (а и б) и для полярных (в и г) диэлектриков**

Основные электрические свойства некоторых диэлектриков, используемых для изготовления конденсаторов, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные электрические свойства некоторых диэлектриков

Название материала	Нагревостойкость, $t$ , °C	Удельное сопротивление, $\rho$ , Ом·м	Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$	$\operatorname{tg}\delta$ (при $f = 1$ кГц)	Эл.прочность, $E_{\text{пр}}$ , МВ/м	Группа по поляризации
Полистирол	70...85	$10^{16} \dots 10^{17}$	2,4...2,6	$(1 \dots 5) \cdot 10^{-4}$	20...35	Неполярные
Фторопласт-4	250	$10^{16} \dots 10^{18}$	1,9...2,1	$(1 \dots 3) \cdot 10^{-4}$	20...30	
Бумага конденсаторная	85...100	$10^{11} \dots 10^{12}$	5...7	$(4 \dots 8) \cdot 10^{-2}$	12...15	Полярные
Лавсан	125	$10^{16}$	3...4	$(4 \dots 8) \cdot 10^{-2}$	15...20	
Фенолформальдегид	120...140	$10^{12} \dots 10^{13}$	3,0...4,5	$(1 \dots 3) \cdot 10^{-2}$	20...30	
Слюда (мусков.)	500	$10^{15} \dots 10^{16}$	6,5...7	$(1,5 \dots 3) \cdot 10^{-3}$	25...30	
Керамика	85...300	–	Более 12	Не менее $6 \cdot 10^{-4}$	30...50	Могут быть неполярными и полярными
Стекло	125	$10^{15} \dots 10^{16}$	Около 8	Не менее $2 \cdot 10^{-3}$	25	

## 2.5 Основные параметры конденсаторов

### 2.5.1 Емкость

**Емкость** – количественное выражение основного свойства конденсатора, характеризующего способность накапливать на обкладках электрический заряд. Определяется емкость отношением заряда  $Q$  к величине напряжения  $U$ , приложенного к обкладкам

$$C = \frac{Q}{U}. \quad (2.2)$$

Здесь заряд  $Q$  в кулонах, напряжение  $U$  в вольтах, а емкость  $C$  в фарадах. Но фарада – слишком крупная единица емкости, поэтому на практике пользуются микрофарадой ( $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ ), нанофарадой ( $1 \text{ нФ} = 10^{-9} \text{ Ф}$ ), пикофарадой ( $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$ ).

Величина емкости конденсаторов нормируется, то есть устанавливается стандартами. При массовом и серийном производстве **номинальная емкость**

$C_n$  – средняя величина емкости совокупности конденсаторов (выборки), равная числу из ряда предпочтительных чисел (РПЧ).

Емкость конденсатора определяется его геометрическими размерами (активной площадью обкладок  $S$  и расстоянием между ними  $d$  – толщиной диэлектрика) и типом диэлектрика, разделяющим обкладки (величиной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ ). В простейшем случае для плоского конденсатора с двумя обкладками (рисунок 2.2,а) емкость выражается формулой

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d}, \quad (2.3)$$

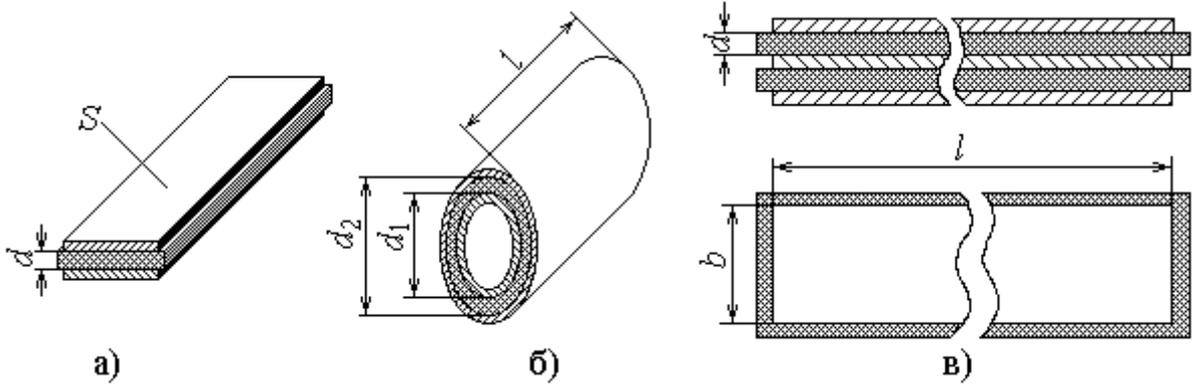
где  $C$  – емкость,  $\Phi$ ;

$\varepsilon_0 = 1 / (4\pi \cdot 9 \cdot 10^9) \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  – электрическая постоянная;

$\varepsilon$  – относительная величина диэлектрической проницаемости;

$S$  – активная площадь обкладок,  $\text{м}^2$ ;

$d$  – толщина диэлектрика,  $\text{м}$ .



**Рисунок 2.2 – Основные типы конденсаторов**

Наряду с плоскими конденсаторами часто применяют цилиндрические, например, керамические трубчатые, представляющие собой два коаксиальных проводящих цилиндра, разделенных диэлектриком (рисунок 2.2,б)

Емкость цилиндрического конденсатора равна

$$C = 0,241 \cdot \frac{\varepsilon \cdot l}{\lg(d_2 / d_1)}, \quad \Phi, \quad (2.4)$$

где  $l$  – активная длина цилиндров (длина обкладок),  $\text{м}$ ;

$d_1$  – внешний диаметр внутреннего цилиндра,  $\text{м}$ ;

$d_2$  – внутренний диаметр внешнего цилиндра,  $\text{м}$ .

Некоторые типы конденсаторов изготовляют намоткой ленты из обкладок, разделенных диэлектриком. Они представляют собой спиральные конденсаторы, например, бумажные, пленочные, сухие электролитические. Емкость спирального конденсатора равна удвоенному значению емкости того же конденсатора, но развернутого в плоскую ленту (рисунок 2.2,в).

$$C = 0,1768 \cdot \varepsilon \cdot b \cdot l / d, \quad \Phi, \quad (2.5)$$

где  $b$  и  $l$  – ширина и длина ленточных обкладок,  $\text{м}$ ;

$d$  – толщина диэлектрика,  $\text{м}$ .

### 2.5.2 Отклонение емкости от номинала – допуск

Изготовить конденсатор с точно заданной емкостью не представляется возможным. Поэтому введена такая величина, как *допустимое отклонение* фактической емкости от номинального значения или «допуск по емкости».

**Допуск** по емкости  $\delta C$  представляет собой *относительную величину разности между измеренной* (истинной)  $C_{из}$  и *номинальной*  $C_N$  емкостью

$$\delta C = \frac{\Delta C}{C_N} = \frac{C_{из} - C_N}{C_N} \cdot 100, \% \quad (2.6)$$

По величине допуска конденсаторы также *нормируются*. Номинальная величина емкости и допуска устанавливается РПЧ (таблица 2.2).

Таблица 2.2 - Ряды конденсаторов постоянной емкости

Ряды конденсаторов	R6	R12	R24	R48	R96	R192
Количество конденсаторов в декаде	6	12	24	48	96	192
Допустимое отклонение $\delta C_N, \%$	$\pm 20$	$\pm 10$	$\pm 5$	$\pm 2$	$\pm 1$	$\pm 0.5$

Ряды R6, R12 и R24 являются основными. Они используются для нормирования конденсаторов общего применения. Ряды R48, R96 и R192 используются для нормирования прецизионных конденсаторов. Для нормирования конденсаторов с оксидным диэлектриком используются несимметричные допуски, например, минус 20 % – плюс 50...100 %.

При массовом производстве разделение конденсаторов по  $C_N$  осуществляется путем разбраковки, т.е. измерения емкости каждого конденсатора и сортировки их по номиналам. Таким образом осуществляется безотходное производство конденсаторов.

Если требуется обеспечить высокую точность ( $\delta C < 1\%$ ) при мелкосерийном и единичном производстве, то приходится проводить подгонку (юстировку) емкости. Если имеется возможность собирать конденсатор из двух параллельно соединенных секций, то повышенную точность можно получить, подбирая секции с повышенной и пониженной емкостью так, чтобы сумма получилась возможно ближе к номиналу. Односекционные конденсаторы изготавливают с несколько повышенной емкостью, а затем подгоняют емкость до требуемого значения путем удаления части обкладки. Очевидно, что повышение точности требует дополнительных затрат, а потому увеличивает стоимость конденсаторов. И это надо учитывать при выборе конденсаторов в каждом частном случае.

### 2.5.3 Потери энергии и добротность конденсаторов

**Активные потери** энергии в конденсаторах обусловлены, главным образом, *замедленной поляризацией и проводимостью диэлектрика* и характери-

зуются **тангенсом угла потерь**  $tg\delta$ . Величина, обратная  $tg\delta$ , называется **добротностью конденсатора**

$$Q_c = 1/tg\delta. \quad (2.7)$$

При малых углах  $\delta$  емкость конденсатора не зависит от потерь, а при больших, потери следует учитывать, так как эквивалентная емкость конденсатора будет зависеть от  $tg\delta$

$$C_{ЭК} = C_H / (1 + tg^2\delta). \quad (2.8)$$

Современные конденсаторы характеризуются малыми потерями ( $tg\delta \leq 0,01 \dots 0,001$ ). Очевидно, что конденсаторы с полярным диэлектриком будут иметь добротность существенно ниже, чем конденсаторы с неполярным диэлектриком. Особенно большие потери энергии имеют место в электролитических конденсаторах –  $tg\delta \geq 0,01 \dots 0,1$ .

#### 2.5.4 Зависимость емкости конденсаторов и активных потерь от температуры, частоты и времени

Зависимость емкости конденсаторов от температуры характеризуется величиной **температурного коэффициента изменения емкости** (ТКЕ)  $\alpha_c$  – это относительное изменение емкости конденсатора при изменении температуры. При малых изменениях температуры ТКЕ аналитически можно представить как линейную часть от разложения уравнения (2.3) в ряд Тейлора

$$\alpha_c = \frac{\Delta C}{C_H \cdot \Delta t} \approx \frac{1}{C_H \cdot \Delta t} \cdot \sum_i \frac{\partial C}{\partial X_i} \cdot \frac{\partial X_i}{\partial t} \cdot \Delta t = \frac{1}{C_H} \cdot \left[ \frac{\partial C}{\partial \varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial S} \cdot \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial d} \cdot \frac{\partial d}{\partial t} \right]. \quad (2.9)$$

Продифференцировав уравнение (2.3) согласно (2.9), получим

$$\alpha_c \approx \frac{\partial \varepsilon}{\varepsilon \cdot \partial t} + \frac{\partial S}{S \cdot \partial t} - \frac{\partial d}{d \cdot \partial t} = \alpha_\varepsilon + \alpha_S - \alpha_d, \quad (2.10)$$

где  $\alpha_\varepsilon$ ,  $\alpha_S$  и  $\alpha_d$  – температурные коэффициенты изменения диэлектрической проницаемости, активной площади обкладок и толщины диэлектрика.

При экспериментальных исследованиях ТКЕ может быть определен по выражению

$$\alpha_c = \frac{\Delta C}{C_H \cdot \Delta t} \approx \frac{C_2 - C_1}{C_1 \cdot (t_2 - t_1)}, K^{-1}, \quad (2.11)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – емкость конденсатора при температуре  $t_1$  и  $t_2$ , соответственно.

Если зависимость емкости от температуры нелинейная, то указывается набор значений ТКЕ в заданном интервале температур.

Характер зависимости емкости конденсатора от температуры обычно определяется характером зависимости диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  диэлектрика от температуры (видами поляризации), то есть величиной и знаком  $TК\varepsilon$  и особенностями конструкции – изменением его размеров при нагревании. Температурное расширение обкладок приводит к увеличению емкости, а увеличение толщины диэлектрика – к уменьшению емкости. Но нестабильность геометрических размеров существенно меньше нестабильности диэлектрика.

ТК $\epsilon$  диэлектрика определяется типом поляризации данного диэлектрика. Для нейтральных диэлектриков, характеризующихся упругими процессами поляризации и малыми значениями диэлектрической проницаемости ( $\epsilon = 1 \dots 3$ ), ТК $\epsilon$  очень мало (порядка  $10^{-6} K^{-1}$ ). Активные потери в таких диэлектриках также незначительны.

Полярные диэлектрики характеризуются замедленными (релаксационными) видами поляризации, повышенными значениями  $\epsilon$  и  $tg\delta$  и имеют существенно нелинейные зависимости  $\epsilon$  и  $tg\delta$  от температуры (рисунок 2.1,з). Аналогичные зависимости  $tg\delta$  наблюдаются в полярных диэлектриках и от частоты (рисунок 2.1,в). Зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  от частоты также нелинейная.

Анализ физических свойств диэлектриков показывает, что диэлектрики, имеющие высокие значения  $\epsilon$ , обладают высокими потерями ( $tg\delta$ ) и низкой стабильностью. Таким образом, трудно совместить требования большой удельной емкости и высокой стабильности электрических параметров в одном конденсаторе. Поэтому при выборе конденсаторов для спецаппаратуры приходится принимать компромиссный вариант между требованиями к электрическим характеристикам, к стабильности и к массогабаритным показателям.

В секционированных конденсаторах температурную нестабильность можно существенно уменьшить, используя термокомпенсацию – параллельное соединение секций с разными диэлектриками, имеющими противоположные знаки ТК $\epsilon$ .

Перечисленные выше процессы в диэлектриках называют **обратимыми**. После охлаждения конденсаторов их свойства восстанавливаются. Но для большинства типов конденсаторов характерны **необратимые** изменения емкости. Под воздействием повышенных или пониженных температур, длительного хранения, длительного воздействия электрического поля при повышенных температурах приводят к *старению* конденсаторов. Это происходит преимущественно за счет необратимых изменений химического состава диэлектрика, а также из-за необратимых изменений размеров конденсатора. Необратимое изменение емкости обычно характеризуют комплексным параметром  $\delta C_{ост}$  – *остаточным относительным изменением емкости* (в процентах от исходного значения). *Необратимые изменения емкости под воздействием температуры оцениваются коэффициентом температурной нестабильности емкости* (КТНЕ)  $\beta_c$ . Керамические, стеклокерамические и слюдяные конденсаторы нормируются по ТКЕ и КТНЕ (см. таблицы 2.4 и 2.5).

## 2.6 Основные сведения о конденсаторах постоянной емкости

### 2.6.1 Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком

Современные конденсаторы с неорганическими диэлектриками можно разделить на следующие группы: **слюдяные**, **керамические** (высокочастотные и

низкочастотные), **стеклянные** и **тонкопленочные** конденсаторы с неорганическим диэлектриком.

Особенностью **керамики** как материала для изготовления конденсаторов является, прежде всего, большое разнообразие значений  $\epsilon$  и  $TKE$ . Величина  $\epsilon$  лежит в пределах от 7,5...9 до нескольких тысяч, а величина температурного коэффициента диэлектрической проницаемости  $T\epsilon$  и, соответственно,  $TKE$  могут иметь как большие отрицательные или положительные значения, так и значения, близкие к нулю (см. таблицу 2.4).

Свойства **стекло** для конденсаторов в значительной степени зависят от рецептуры. Например, самое дешевое и распространенное боросиликатное стекло является полярным диэлектриком и имеет большие потери за счет наличия в их составе легко подвижных одновалентных ионов. Но эти же ионы способствуют повышению  $\epsilon$  стекла. Снижение  $tg\delta$  при сохранении повышенных  $\epsilon$  можно получить, добавляя в состав щелочного стекла тяжелые окислы двухвалентных металлов  $PbO$  и  $BaO$ . Повышенная хрупкость стекол сдерживала применение их в конденсаторах. Поэтому были разработаны тонкопленочные, стеклоэмалевые и стеклокерамические конденсаторы.

Твердые неорганические диэлектрики обладают высокой механической прочностью, что позволяет использовать их в качестве несущей конструкции. При этом обкладки наносятся непосредственно на диэлектрик, выводы также крепятся на нем, что значительно упрощает конструкцию конденсаторов (керамические пластинчатые, дисковые, трубчатые, литые и др. конденсаторы).

Большая твердость и стабильность во времени неорганических диэлектриков обеспечивают неизменность расстояний между обкладками и способствуют достижению большой стабильности емкости во времени, а высокая нагревостойкость позволяет решить задачу повышения рабочей температуры конденсаторов. Многие неорганические диэлектрики отличаются небольшим значением температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) и малым  $T\epsilon$ . Это дает возможность изготавливать конденсаторы с малым значением  $TKE$ .

Ряд неорганических диэлектриков имеет малые  $tg\delta$ , что позволяет использовать эти диэлектрики в производстве высокочастотных конденсаторов.

Преимуществом неорганических диэлектриков перед органическими является их высокая химическая стабильность, что во многих случаях обеспечивает отсутствие старения при длительном действии электрического поля и повышенной температуры. Однако, при высокой температуре под воздействием постоянного электрического поля и в неорганических диэлектриках имеет место старение.

### 2.6.2 Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком

Из органических диэлектриков в конденсаторостроении нашли преимущественное применение **бумаги**, состоящие из природного высокомолекулярного вещества – клетчатки и **синтетические пленки**, изготавливаемые из неполярных или полярных искусственных высокомолекулярных соединений.

Эластичность (гибкость) этих материалов позволяет изготавливать конденсаторы в виде длинных, тонких лент, смотанных в рулоны (см. рисунок 2.2, в). При этом обкладки могут быть либо вкладные в виде фольги (бумажные и пленочные конденсаторы), либо нанесенные (напыленные) непосредственно на диэлектрическую ленту (металлобумажные и металлопленочные конденсаторы).

Одним из достоинств твердых органических диэлектриков является возможность использования малых толщин диэлектрика и высоких значений рабочих напряженностей электрического поля. Даже при небольших значениях  $\epsilon$  (у твердых органических материалов  $\epsilon \leq 3 \dots 6$ ) удается получать относительно большие значения удельной емкости конденсаторов, особенно у металлобумажных и металлопленочных. Все это позволяет значительно расширить диапазон номинальных значений емкости  $C_H$  в сторону увеличения по сравнению с конденсаторами на неорганических твердых диэлектриках. Номиналы емкостей у конденсаторов с твердым органическим диэлектриком достигают единиц и десятков микрофард.

Среди конденсаторов этой группы очень обширна группа **бумажных** конденсаторов. *Бумага* – *полярный* диэлектрик, обладает относительно высокими потерями и высокой температурной нестабильностью емкости, но технологичность изготовления ленточных конденсаторов, широкий диапазон  $C_H$ , практически неограниченная сырьевая база и, как следствие, дешевизна бумажных конденсаторов делают их конкурентными во многих областях применения в РЭС.

**Синтетические пленки** являются заменителями бумаги. **Полярные** пленки (*лавсан* – полиэтилентерефталат, *поликарбонат*) мало отличаются от бумаги по величине  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$ , но они обладают более высокой нагревостойкостью (см. таблицу 2.1). Кроме того, пленки имеют более высокую электрическую прочность и могут быть изготовлены значительно тоньше бумаги, что позволяет существенно повысить удельные характеристики конденсаторов.

Наиболее интересны **неполярные** синтетические пленки (*фторопласт-4* – политетрафторэтилен и *полистирол*). Они отличаются повышенной стабильностью емкости при изменении температуры ( $\text{TKE} \approx 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) и очень высоким удельным электрическим сопротивлением. *Фторопластовые* конденсаторы могут работать в области высоких температур (до 250 °C), но они дефицитны и дороги. *Полистирольные* конденсаторы имеют низкую нагревостойкость. Герметизированные полистирольные конденсаторы с повышенной точностью и стабильностью емкости применяют в электроизмерительной технике (в качестве образцовых) и в счетно-решающих устройствах (во времязадающих цепях).

## 2.7 Маркировка конденсаторов постоянной емкости

При маркировке конденсаторов должны быть указаны: номинальная емкость  $C_H$ , номинальный допуск  $\delta C_H$  и группа по ТКЕ (если они нормируются). Может быть указано также допустимое (номинальное) напряжение  $U_H$ .

Если размеры конденсатора позволяют, то  $C_H$  и  $\delta C$  пишут на конденсаторе полностью с указанием размерности. Если размерность емкости не указана, то по умолчанию она дана в пикофарадах.

Для малогабаритных конденсаторов применяют буквенно-цифровую маркировку. При указании номинальной емкости величина и размерность совмещаются. Вместо запятой в числовом значении емкости указывается код размерности: *М* – микрофарады; *Н* – нанофарады; *П* – пикофарады. При этом цифра ноль опускается.

Следом за величиной емкости пишется буква – код допустимого отклонения  $\delta C$ . Принятая кодировка допусков приведена в таблице 2.3. Например, маркировка *M15B* означает: конденсатор емкостью  $C_H = 0,15 \text{ мкФ}$  с допуском  $\delta C = \pm 20 \%$ ; маркировка *1H5C* означает: конденсатор емкостью  $1,5 \text{ нФ}$  ( $1500 \text{ пФ}$ ) с допуском  $\pm 10 \%$ .

Таблица 2.3 – Кодировка допустимых отклонений емкости конденсаторов

Кодированное обозначение	Ж	У	Д	Р	Л	И	С	В	Ф
Допустимое отклонение, %	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 5$	$\pm 10$	$\pm 20$	$\pm 30$

Окончание таблицы 2.3

Кодированное обозначение	Э	Б	А	Я	Ю	Х
Допустимое отклонение, %	+50-10	+50-20	+80-20	+100	+100-10	$\pm 0,4 \text{ пФ}$

По ТКЕ нормируются лишь слюдяные, керамические, стеклянные и стеклокерамические конденсаторы, обладающие достаточно высокой температурной стабильностью. На корпусе конденсатора, если позволяет место, указывается непосредственно группа по ТКЕ. Керамические конденсаторы небольших размеров маркируются по ТКЕ цветом окраски корпуса и цветом маркировочной точки. Группы температурной стабильности керамических и слюдяных конденсаторов и их кодировка приведены в таблицах 2.4 и 2.5.

Керамические конденсаторы, имеющие существенную нестабильность емкости, не нормируются по ТКЕ, но они разделяются на группы по величине допустимых изменений емкости. В таблице 2.6 приведена классификация таких конденсаторов по группам и их кодировка.

Бумажные и металобумажные конденсаторы и конденсаторы с оксидным диэлектриком, а также пленочные и металлопленочные конденсаторы с полярным диэлектриком не нормируются по ТКЕ, так как очень нестабильны и нелинейны. По той же причине не нормируются по ТКЕ сегнетокерамические конденсаторы. В свою очередь пленочные и металлопленочные конденсаторы с неполярным диэлектриком не нормируются по ТКЕ, так как очень стабильны.

Таблица 2.4 – Группы по ТКЕ керамических конденсаторов постоянной емкости (в диапазоне температур от плюс 20 до плюс 85 °С)

Группа по ТКЕ	$\alpha_c \cdot 10^6, K^{-1}$	$\beta_c$ не более	Цвет корпуса	Цвет маркировочной точки
П120	+ (120 ± 30)	0,0005	Синий	–
П100	+ (100 ± 30)	–	Синий	Черный
П33	+ (33 ± 30)	0,0005	Серый	–
МПО	+ (0 ± 30)	–	Голубой	Черный
М33	–(33 ± 30)	–	Голубой	Коричневый
М47	–(47 ± 30)	0,0005	Голубой	Красный
М75	–(75 ± 30)	–	Голубой	Красный
М150	–(150 ± 40)	–	Красный	Оранжевый
М220	–(220 ± 40)	–	Красный	Желтый
М330	–(330 ± 100)	0,0015	Красный	Зеленый
М470	–(470 ± 100)	–	Красный	Синий
М750	–(750 ± 100)	0,0015	Красный	–
М1500	–(1500 ± 200)	0,0015	Зеленый	–
М2200	–(2200 $\frac{+500}{-300}$ )	–	Зеленый	Желтый

Таблица 2.5 – Группы по ТКЕ слюдяных конденсаторов постоянной емкости (в диапазоне температур от плюс 20 до плюс 85 °С)

Группа по ТКЕ	$\alpha_c \cdot 10^6, K^{-1}$	$\beta_c$
А	Не оговаривается	
Б	± 200	0,005
В	± 100	0,002
Г	± 50	0,001

Таблица 2.6 – Допустимые изменения емкости керамических конденсаторов с ненормированным ТКЕ (для рабочих температур от минус 60 до плюс 85 °С)

Группа	Изменение емкости, %	Цвет корпуса	Цвет маркировочной точки
Н10	± 10	Оранжевый	Черный
Н20	± 20	Оранжевый	Красный
Н30	± 30	Оранжевый	Зеленый
Н50	–50	Оранжевый	Синий
Н70	–70	Оранжевый	–
Н90	–90	Оранжевый	Белый

### 3 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка включает:

- лабораторный макет – специальная плата с набором различных типов маркированных конденсаторов (7 шт.), предназначенных для исследования зависимости емкости от температуры;
- сушильного шкафа типа СШ – 200;
- цифрового измерителя емкости Е8-4;
- стенов с набором конденсаторов постоянной емкости.

Описание сушильного шкафа СШ – 200 и правила пользования им приведены в приложении А.

### 4 ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

4.1 Повторить раздел “Конденсаторы” изучаемой дисциплины, воспользовавшись учебными пособиями [1, с.123-196], [2, с. 84-135] или [3, 4]. Особое внимание обратить на основные свойства, конструктивные особенности, условные обозначения и области применения конденсаторов постоянной емкости.

4.2 Ознакомиться с настоящими методическими указаниями и заготовить протокол для внесения справочных данных исследуемых конденсаторов, результатов исследований и др. сведений в соответствии с рекомендациями, приведенными в разделе 7 данного руководства.

### 5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1 Ознакомиться с конструкциями конденсаторов, размещенных на макете; определить их тип, номинальную емкость  $C_H$ , допуск  $\delta C_H$ , группу по ТКЕ и  $tg\delta$ , пользуясь справочниками [5-9] и стендами с набором конденсаторов постоянной емкости, и внести их в таблицу 5.1 в порядке, соответствующем указанному номеру на плате.

Таблица 5.1 – Паспортные характеристики исследуемых конденсаторов

Номер и тип конденсатора	Паспортные параметры конденсаторов				Материал диэлектрика
	$C_H, nФ$	$\delta C_H, \%$	$\alpha_C \cdot 10^6, K^{-1}$	$tg\delta$	
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

5.2 Ознакомиться с лабораторной установкой и правилами пользования приборами (см. приложение А).

5.3 Получить добро на проведение экспериментальных исследований. Измерить емкость измерительного канала  $C_{KAN}$  с помощью измерителя емкости Е8-4, предварительно отсоединив макет с помощью разъема.

5.4 Подсоединив макет к измерительному каналу с помощью разъема и поместив его в сушильный шкаф, измерить величину емкости  $C_{ИЗ.Σ}$  и  $tgδ$  исследуемых конденсаторов с помощью прибора Е8-4 при **комнатной температуре**. Значения емкости  $C_{ИЗ.Σ}$  и  $tgδ$  внести в таблицу 5.2.

5.5 Определить фактические значения емкостей конденсаторов  $C_{ИЗ}$  по формуле (5.1), вычтя из показаний прибора емкость измерительного канала. Значения  $C_{ИЗ}$  внести в таблицу 5.2.

$$C_{ИЗ} = C_{ИЗ.Σ} - C_{KAN}. \quad (5.1)$$

5.6 Рассчитать фактическое отклонение емкости конденсаторов  $δC$  от номинальных значений по формуле (5.2) и внести результаты в таблицу 5.2.

$$δC = \frac{C_{ИЗ} - C_N}{C_N} \cdot 100\%. \quad (5.2)$$

Таблица 5.2 – Измеренные технические характеристики исследуемых конденсаторов при комнатной температуре,  $t_1 = \dots$  °С

Номер и тип конденсатора	Измеренные параметры конденсаторов				Примечания
	$C_{ИЗ.Σ}$ , нФ	$C_{ИЗ}$ , нФ	$δC$ , %	$tgδ$	
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

**Результаты измерений и расчетов показать преподавателю.**

5.7 Получив добро на продолжение исследований, зафиксировать по термометру в шкафу комнатную температуру  $t_1$  и внести ее в заголовок таблицы 5.2. Установить регулятор температуры на **деление 2** и включить подогрев. Отрегулировать положение подсветки термометра так, чтобы через смотровое стекло можно было легко контролировать температуру внутри шкафа. Закрывать сушильный шкаф и периодически, при включении подсветки, контролировать температуру в шкафу. По достижении температуры до 45°С установить регулятор температуры на 1,5 деления и продолжить нагрев шкафа, продолжая контроль за температурой. Через 5...7 минут должна установиться температура около 60°С. Если температура в шкафу начнет превышать 60°С, то регулятор температуры плавно повернуть против часовой стрелки до выключения подогревателя. При этом индикатор и подсветка выключаются.

5.8 После установки регулятора в нужное положение **подождать 10...15 минут**, пока все конденсаторы прогреются, измерить величину емкости  $C_{ИЗ.Σ,t}$  и

$tg\delta_t$  исследуемых конденсаторов с помощью прибора Е8-4 при **установившейся температуре** и зафиксировать температуру  $t_2$ . Значения емкости  $C_{из.Σ,t}$  и  $tg\delta_t$  внести в таблицу 5.3 и **показать преподавателю**.

5.9 Рассчитать фактические значения емкостей конденсаторов  $C_{из.t}$  по формуле (5.1) и внести результаты в таблицу 5.3.

5.10 Для удобства проведения расчета ТКЕ и сравнительного анализа температурной стабильности внести в таблицу 5.3 и результаты измерений емкости и  $tg\delta$  при комнатной температуре  $t_1$ .

5.11 Рассчитать ТКЕ конденсаторов по формуле (5.3) и внести результаты в таблицу 5.3.

$$\alpha_C = \frac{C_{из.t} - C_{из}}{C_{из} \cdot (t_2 - t_1)}, \quad (5.3)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – комнатная температура и температура в нагретом шкафу, соответственно.

Таблица 5.3 – Результаты исследований зависимости емкости и  $tg\delta$  конденсаторов от температуры

Номер и тип конденсатора	Емкость и $tg\delta$ при температуре $t_1$		Емкость и $tg\delta$ при температуре $t_2$			$\alpha_C \cdot 10^6, K^{-1}$
	$C_{из}, n\Phi$	$tg\delta \cdot 10^4$	$C_{из.Σ,t}, n\Phi$	$C_{из.t}, n\Phi$	$tg\delta_t \cdot 10^4$	
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

**Результаты измерений и расчетов показать преподавателю.**

5.12 По окончании измерений отключить сушильный шкаф и открыть камеру, дав ей возможность охладиться.

5.13 Провести анализ точности и температурной стабильности исследованных конденсаторов и **сделать выводы о качестве каждого из них**. Указать возможные области их применения.

5.14 Оформить отчет в соответствии с требованиями и защитить работу.

## 6 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

6.1 Введение (цель работы).

6.2 Описание лабораторной установки.

6.3 Порядок проведения работы и ее результаты – справочные данные и результаты исследований конденсаторов в виде таблиц.

6.4 Выводы по результатам исследований согласно пунктам 5.13 и 7.3.

## 7 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

7.1 Протокол по лабораторной работе готовится накануне занятия. Выполнять протокол следует в виде заготовки отчёта на тетрадных листах или листах формата А4. Он должен содержать все пункты раздела 6. Кроме чистового варианта заготовки отчета необходимо заготовить черновые варианты таблиц 5.1-5.3, в которые будут вноситься технические характеристики конденсаторов, результаты измерений и расчетов. В них нужно предусмотреть возможность внесения исправлений.

7.2 В данной работе исследуются различные типы керамических, пленочных, слюдяных и бумажных конденсаторов. Так как у многих типов пленочных конденсаторов с неполярным диэлектриком допустимая рабочая температура весьма ограничена, то в процессе исследований предельная температура в сушильном шкафу не должна превышать 60°C.

7.3 В выводах по результатам исследований необходимо отразить следующие моменты:

1) Соответствие фактических отклонений емкости  $\delta C$  конденсаторов паспортным данным  $\delta C_H$  (см. таблицы 5.1 и 5.2). Если имеют место несоответствия, то указать возможные причины;

2) Оценить температурную стабильность исследованных конденсаторов и объяснить возможные причины несоответствия измеренных ТКЕ ( $\alpha_C$ ) с паспортным, если таковые имеют место;

3) Объяснить причины активных потерь в исследованных конденсаторах и оценить соответствие/несоответствие фактических потерь паспортным. Как влияет температура на потери в конденсаторах?

4) Дать оценку качеству исследованных конденсаторов (точность, стабильность, добротность) и предложить возможные области применения каждого из них.

## 8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

8.1 В чем заключается принцип функционирования конденсатора?

8.2 Какие типы диэлектриков используются для реализации конденсаторов? В чем основные отличия полярных и неполярных диэлектриков?

8.3 На какие типы делятся конденсаторы постоянной емкости по типу диэлектрика?

8.4 Какими параметрами оцениваются свойства конденсаторов постоянной емкости?

8.5 Как зависит емкость от геометрических параметров конденсатора и от свойств диэлектрика?

8.6 Что понимается под температурным коэффициентом изменения емкости (ТКЕ)? Как и от каких параметров конденсатора он зависит?

8.7 Какими параметрами оцениваются активные потери в конденсаторах и от чего они зависят?

8.8 Как маркируются конденсаторы постоянной емкости? Какие способы кодировки используются для маркировки конденсаторов постоянной емкости?

8.9 Какие конструктивные исполнения конденсаторов постоянной емкости Вы знаете? В каких радиоэлектронных средствах и функциональных устройствах они применяются и для каких целей?

### **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1 Кузбных Н.И., Козлов В.Г. Перспективная элементная база РЭС. Электрорадиоэлементы: Учебное пособие.– Томск: ТУСУР, 2007.– 263 с.

2 Кузбных Н.И., Козлов В.Г. Перспективная элементная база радиоэлектронных средств. Ч.1. Электрорадиоэлементы: Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2005. – 180 с.

3 Волгов В.А. Детали и узлы РЭА. - М.: Энергия, 1977. - 656 с.

4 Фролов А.Д. Радиодетали и узлы. - М.: Высшая школа, 1975. - 440 с.

5 Справочник по электрическим конденсаторам / Под ред. И.И.Четверткова и В.С.Смирнова. - М.: Радио и связь, 1983. - 576 с.

6 Конденсатор: Справочник / Под ред. И.И.Четверткова и М.Н.Дьяконова. - М.: Радио и связь, 1993. - 392 с.

7 Краткий справочник конструктора РЭА / Под ред. Р.Г. Варламова. - М.: Сов. радио, 1972. С. 244-282.

8 Нестеренко И.И. Цвет, код, символика электронных компонентов. – М.: «Салон-Пресс», 2004. – 216 с.

9 Аксенов А.И., Нефедов А.В. Резисторы, конденсаторы, провода, припои, флюсы: Справочное пособие. – М.: «Салон-Пресс», 2000. – 240 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное)

### ОПИСАНИЕ ПРИБОРОВ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

#### 1 Описание сушильного шкафа СШ-200 и правила пользования им

Сушильный шкаф позволяет регулировать температуру от 30 до 200 °С и автоматически поддерживать заданную температуру с точностью  $\pm 3\%$ .

Для контроля температуры в камере шкаф оборудован ртутным термометром (с допустимой температурой  $t_{дон} = 100 \dots 200$  °С) и подсветкой, которая включается при включении нагревательного элемента.

Для подключения исследуемых конденсаторов к измерительному прибору шкаф оборудован специальным устройством. Это устройство состоит из *разъема*, помещенного в камеру и служащего для подключения макета с конденсаторами; *переключателя*, размещенного на передней панели шкафа, и *гнезда соединителя* для подключения коаксиального кабеля, которое размещено также на передней панели. Меняя положение переключателя, можно последовательно подключать к измерительному прибору исследуемые конденсаторы, пронумерованные числами, соответствующими положениям переключателя.

Для установки требуемой температуры в камере необходимо включить шкаф, повернуть рукоятку терморегулятора *вправо* (по часовой стрелке) на 2 больших деления и наблюдать за температурой по термометру. Для удобства наблюдения за температурой шкаф оборудован осветительной лампочкой, включенной в цепь терморегулятора. За 12-15 °С до подхода к требуемой температуре начать плавно поворачивать ручку терморегулятора *влево* (против часовой стрелки) *до выключения контрольной лампы*, расположенной на панели шкафа слева, что сопровождается щелчком при выключении реле нагревательного элемента. При повторном включении подогревателя, что сопровождается срабатыванием реле и загоранием осветительной и контрольной ламп, продолжить регулировку температуры в шкафу, плавно поворачивая рукоятку терморегулятора *влево* до выключения ламп. Для установления теплового равновесия в рабочей камере (термометра) и испытываемых образцов необходимо *выждать 10-15 минут*, периодически контролируя температуру в камере (при включении осветительной лампочки). При этом температура в камере будет автоматически регулироваться с точностью  $\pm 3\%$  от среднего значения.

## 2 Описание измерителя емкости цифрового Е8-4

### 2.1 Назначение и технические характеристики прибора

Прибор предназначен для измерения емкости  $C$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $tg\delta$  электрических конденсаторов с автоматическим отсчетом результатов измерения.

Измеритель емкости имеет следующие технические характеристики:

- Измерение параметров конденсатора осуществляется с помощью мостовой цепи переменного тока на частоте  $1000 \text{ Гц} \pm 1 \%$ ;
- пределы измерения параметров конденсаторов:
  - емкости  $C$  – от  $0,03 \text{ нФ}$  до  $15,999 \text{ мкФ}$ ;
  - тангенса угла диэлектрических потерь  $tg\delta$  – от  $5 \cdot 10^{-4}$  до  $999 \cdot 10^{-4}$ ;
- основные погрешности измерения не превышают:
  - емкости –  $\pm (0,001 \cdot C + 0,02 \text{ нФ} + 1 \text{ ед. счета})$ ;
  - тангенса угла потерь –  $\pm (0,02 \cdot tg\delta + 5 \cdot 10^{-4})$ ;
- прибор измеряет параметры по параллельной схеме замещения конденсатора;
  - время одного измерения, включая автоматический выбор пределов измерения, не превышает  $1 \text{ с}$ ;
  - напряжение на измеряемом конденсаторе не превышает  $18 \text{ В}$ ;
  - питание прибора от сети переменного тока напряжением  $220 \pm 22 \text{ В}$  частотой  $50 \text{ Гц}$ .

### 2.2 Принцип функционирования прибора

Принцип функционирования прибора Е8-4 основан на использовании чувствительного моста переменного тока. Функциональная схема прибора представлена на рисунке А.1, а, а упрощенная электрическая схема мостовой измерительной цепи приведена на рисунке А.1, б.

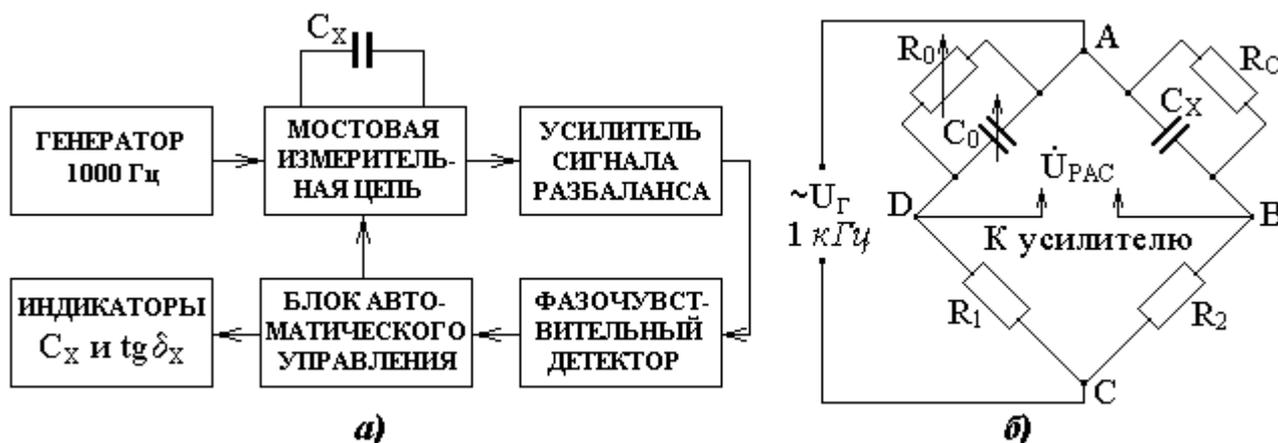


Рисунок А.1 – Функциональная схема прибора (а) и электрическая схема мостовой измерительной цепи (б)

Стабилизированное синусоидальное напряжение  $u_T(t)$  частотой 1 кГц подается на диагональ мостовой измерительной схемы АС (рисунок А.1, б), в одно из плеч которого (АВ) включен исследуемый конденсатор, имеющий параметры  $C_X$  и  $R_C$ . В другое плечо моста (AD) включены образцовые конденсатор переменной емкости  $C_0$  и переменное сопротивление  $R_0$ . Сопротивления моста  $R_1$  и  $R_2$  равны ( $R_1 = R_2$ ). Если емкости  $C_X$  и  $C_0$  и/или сопротивления  $R_C$  и  $R_0$  не равны ( $C_X \neq C_0$  и/или  $R_C \neq R_0$ ), то мост будет разбалансирован и в другой диагонали моста (BD) будет иметь место комплексный сигнал рассогласования  $\dot{U}_{PAC}$ . Этот сигнал подается на усилитель сигнала рассогласования (см. рисунок А.1, а), усиливается и подается на фазочувствительный детектор электрического сигнала. Детектор формирует управляющие сигналы (по модулю и по фазе напряжения  $\dot{U}_{PAC}$ ) и подает их на блок автоматического управления, который в свою очередь регулирует образцовые конденсатор  $C_0$  и сопротивление  $R_0$  так, что сигнал рассогласования уменьшается как по модулю, так и по фазе. По достижении баланса моста ( $\dot{U}_{PAC} = 0$ ) будут иметь место равенства  $C_X = C_0$  и  $R_C = R_0$  и на цифровом табло высвечиваются значения емкости конденсатора “С” и тангенса угла диэлектрических потерь “ $tg\delta$ ”.

В данном случае исследуемый конденсатор представляется параллельной схемой замещения с параметрами собственно емкости  $C_X$  и сопротивления потерь  $R_C$ . При этом величина тангенса угла диэлектрических потерь определяется через параметры  $C_X$  и  $R_C$  выражением

$$tg\delta = \frac{1}{2\pi f \cdot R_C \cdot C_X}. \quad (A.1)$$

При балансе мостовой схемы будем иметь равенства:

$$C_X = C_0, \quad (A.2)$$

$$tg\delta_X = \frac{1}{2\pi f \cdot R_0 \cdot C_0}. \quad (A.3)$$

Эти величины и будут высвечиваться на табло прибора.

### 2.3 Конструкция прибора

Прибор Е8-4 выполнен в настольном переносном варианте и состоит из измерительного блока и специального устройства для подключения к нему измеряемых конденсаторов. Все элементы управления, коммутации и индикации параметров конденсаторов расположены на лицевой панели, вид которой представлен на рисунке А.2:

- 1 – кнопка одиночного запуска прибора;
- 2, 3 – кнопочный переключатель на два положения: 2 – внешний запуск, 3 – периодический запуск;
- 4 – кнопочный переключатель на два положения для включения и выключения калибровки прибора;
- 5 – цифровое табло для считывания результатов измерения параметров конденсатора – емкости “С” и тангенса угла диэлектрических потерь “ $tg\delta$ ”;

6 – тумблер СЛЕЖЕНИЕ, предназначенный для переключения режима индикации результатов измерения в режим слежения;

7 – тумблер для подключения прибора к сети питания;

8 – клемма для подключения защитного заземления;

9 – органы компенсации параметров соединительного кабеля, выведенные под шлиц и закрытые защитной планкой;

10 – четыре гнезда соединителя, служащего для подключения кабелей специального устройства подсоединения исследуемых конденсаторов к прибору;

11 – органы калибровки образцовых элементов мостовой измерительной цепи, выведенные под шлиц и закрытые защитной планкой.

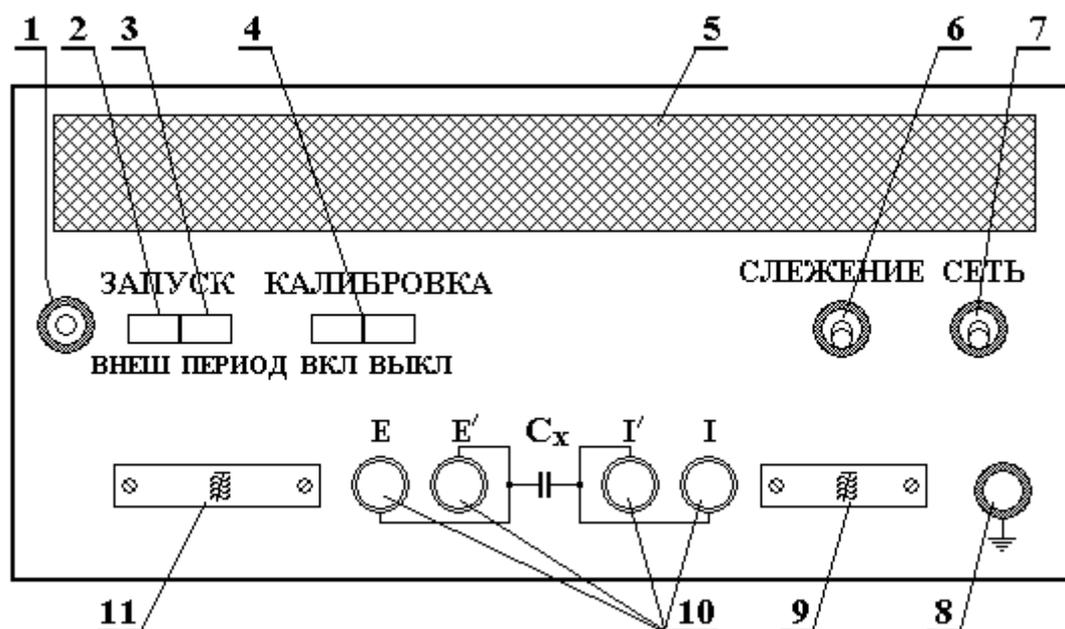


Рисунок А.2 – Внешний вид передней панели прибора Е8-4

#### 2.4 Порядок проведения измерений параметров конденсаторов

- 1) Включить питание прибора – тумблер СЕТЬ 7 перевести в верхнее положение.
- 2) Дать прибору прогреться 5...10 минут.
- 3) Подключить исследуемый конденсатор к зажимам специального устройства.
- 4) Приступить к измерениям. Измерения могут проводиться в трех режимах: ручного запуска, периодического запуска и в режиме слежения.
- 5) Для измерения в режиме ручного запуска установить переключатель ЗАПУСК в положение ВНЕШ – нажать кнопку 2, нажать кнопку 1 и считать с табло 5 результаты измерений. Для повторного измерения необходимо кнопку 1 нажать дважды: после первого нажатия происходит сброс информации предыдущего измерения – табло 5 обнуляется; после второго нажатия происходит повторное измерение и результаты выводятся на табло 5.

- 6) Для измерения в режиме периодического запуска переключатель ЗАПУСК установить в положение ПЕРИОД – нажать кнопку 3 и нажать кнопку 1. При этом прибор будет производить измерения периодически с интервалом в 2 с, отображая результаты на табло 5.
- 7) Для измерения в режиме слежения переключите тумблер 6 в положение СЛЕЖЕНИЕ (верхнее положение). При этом прибор будет непрерывно следить за изменением параметров исследуемого конденсатора и отображать их на табло 5.