

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

Методические указания к лабораторной работе по дисциплинам
«Материаловедение и технология материалов», «Материалы и
компоненты электронных средств», «Радиоматериалы и
радиокомпоненты»

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой КУДР

канд. техн. наук, доцент

_____ А.Г. Лоцилов

« ____ » _____ 2022 г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ ПОСТОЯННОЙ
ЕМКОСТИ**

Методические указания к лабораторной работе по дисциплинам
«Материаловедение и технология материалов», «Материалы и
компоненты электронных средств», «Радиоматериалы и
радиокомпоненты»

Разработчики:

преподаватель кафедры КУДР

_____ Т.В. Шиленок

« ____ » _____ 2022 г.

преподаватель кафедры КУДР

_____ А.Е. Здрок

« ____ » _____ 2022 г.

Томск 2022

Содержание

Введение	4
1 Краткие теоретические сведения о конденсаторах.....	5
1.1 Краткие сведения об истории конденсаторов	5
1.2 Основные области применения конденсаторов.....	5
1.3 Классификация конденсаторов	6
1.4 Поляризация диэлектриков, диэлектрическая проницаемость и потери в диэлектрике	6
1.5 Основные параметры конденсаторов	9
1.6 Основные сведения о конденсаторах постоянной емкости.....	13
1.7 Маркировка конденсаторов постоянной емкости	15
2 Описание лабораторной установки.....	17
3 Подготовка к работе	18
4 Порядок выполнения работы.....	18
5 Содержание отчета	20
6 Методические указания.....	21
7 Контрольные вопросы	21
Список рекомендуемой литературы	22
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное).....	23
А.1 Описание сушильного шкафа СШ-200 и правила пользования им	23
А.2 Принцип действия и правила работы с прибором ГИЕ-1М	24
А.3 Краткое описание прибора УМ-3 и методика измерения емкости и диэлектрических потерь	25

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 и частоты 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).

1 Краткие теоретические сведения о конденсаторах

1.1 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.

1.2 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 импульсов и т.д.;

3) в телефонии и телеграфии – для разделения цепей постоянного и переменного тока, разделения токов различной частоты, искрогашения в контактах, симметрирования кабельных линий и т.д.;

4) в автоматике и телемеханике – для создания емкостных датчиков, разделения цепей постоянного и пульсирующего токов, в корректирующих цепях и т.д.;

5) в вычислительной технике – в специальных запоминающих устройствах, в интегрирующих и дифференцирующих цепях и т.д.;

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

7) в лазерной технике – для получения мощных импульсов.

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.

1.3 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: стеклоэмалевые, стеклокерамические, стеклопленочные, слюдяные, керамические;

4) конденсаторы с твердым органическим диэлектриком: бумажные, металлобумажные, пленочные (из неполярных и полярных пленок), комбинированные;

5) конденсаторы с оксидным диэлектриком: электролитические (жидкие и сухие), оксидно-полупроводниковые, оксидно-металлические.

1.4 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 индуцированный (наведенный) электрическим полем момент dp .

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

$$P = \frac{dp}{dV} \quad (1.1)$$

В технике при рассмотрении способности материалов к поляризации используют безразмерный параметр – *относительную диэлектрическую проницаемость* ϵ , который характеризует способность диэлектрика поляризоваться или образовывать электрическую емкость (см. формулу (1.3)). Для любого вещества (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 $10^{-4} - 10^{-5}$ с. Эти виды поляризации происходят с определенными затратами энергии, то есть вызывают потери, которые характеризуется *тангенсом угла диэлектрических потерь* - $tg\delta$.

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

На основании вышеизложенного 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.

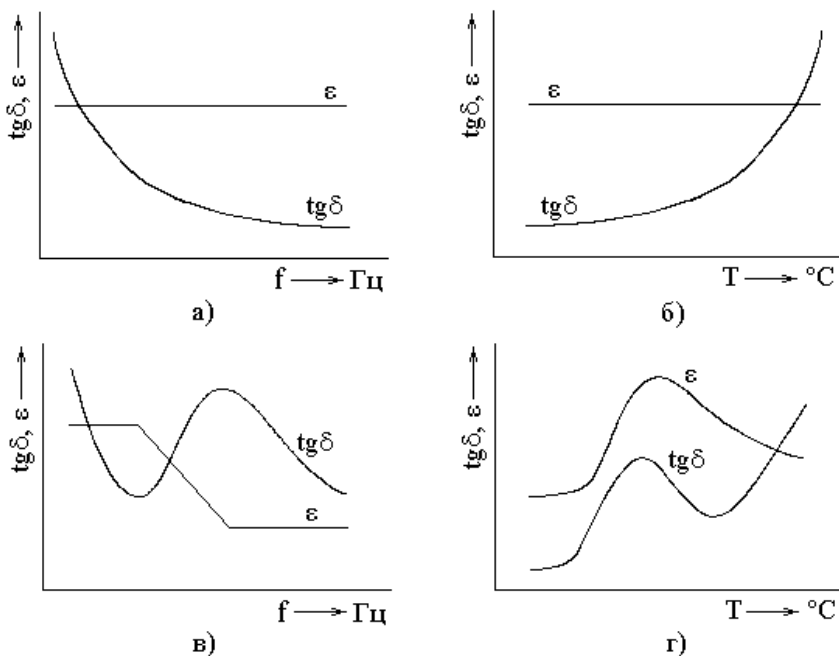
Чем сильнее поляризуется диэлектрик, тем больше будет емкость изготовленного из него конденсатора, но и потери в таких диэлектриках больше, и повышенная нестабильность при изменении частоты f приложенного поля и температуры окружающей среды T .

Характерные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ от частоты f и температуры T представлены на рисунке 1.1.

Рисунок 1.1 – Зависимости ϵ и $tg\delta$ от частоты f и температуры t : a и b – для неполярных диэлектриков; $в$ и $г$ – для полярных диэлектриков.

Основные электрические свойства некоторых диэлектриков, используемых для изготовления конденсаторов приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные электрические свойства некоторых диэлектриков



Название материала	Нагревостойкость, t , °C	Удельное сопротивление, ρ , Ом·м	ϵ	$\text{tg } \delta$ (при $f = 1 \text{ кГц}$)	Эл.проницаемость, E_{np} , МВ/м	Группа по поляризации
Полистирол Фторопласт-4	70...85	$10^{16} \dots 10^{17}$	2.4... 2.6	$(1 \dots 5) \cdot 10^{-4}$	20...35	Неполярные
	250	$10^{16} \dots 10^{18}$	1.9... 2.1	$(1 \dots 3) \cdot 10^{-4}$	20...30	
Фенолформальдегид Бумага конденсаторная Лавсан	120...140	$10^{12} \dots 10^{13}$	3.0- 4.5	$(1 \dots 3) \cdot 10^{-2}$	20...30	Полярные
	85...100	$10^{11} \dots 10^{12}$	5...7	$(4 \dots 8) \cdot 10^{-2}$	12...15	
	125	10^{16} $10^{15} \dots 10^{16}$	3...4	$(4 \dots 8) \cdot 10^{-2}$ $(1,5 \dots 3) \cdot 10^{-2}$	15...20 25...30	

Слюда (мусков.)	500		6.5... 7	10^{-3}		
Кера-мика	85...300	–	Боле е 12	Не менее $6 \cdot 10^{-4}$	30...50	Могут быть неполя- рными и поля- рными
Стекло	125	$10^{15} \dots 10^{16}$	Окол о 8	Не менее $20 \cdot 10^{-4}$	25	

1.5 Основные параметры конденсаторов

1.5.1 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:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1.2)$$

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* ($мкФ = 10^{-6}Ф$), *нанофарадой* ($нФ = 10^{-9}Ф$), *пикофарадой* ($пФ = 10^{-12}Ф$).

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 ϵ). В простейшем случае для плоского конденсатора с двумя обкладками (рисунок 1.2-а) емкость выражается формулой:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{d} \quad (1.3)$$

где C – емкость, $Ф$;

$\epsilon_0 = 1 / 4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная;

ϵ – относительная величина диэлектрической проницаемости;

S – активная площадь обкладок, $м^2$;

d – толщина диэлектрика, $м$.

Наряду с плоскими конденсаторами часто применяют цилиндрические, например, керамические трубчатые, представляющие

собой два коаксиальных проводящих цилиндра, разделенных диэлектриком (рисунок 1.2 б)

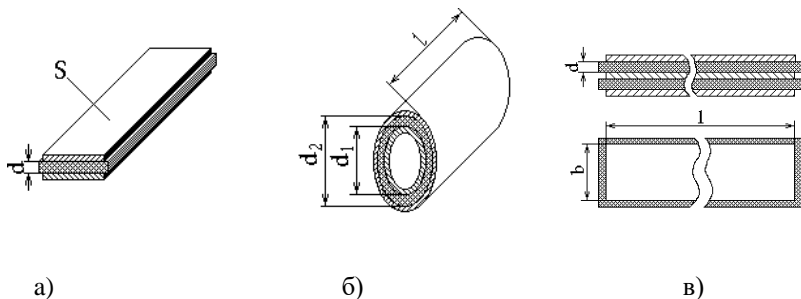


Рисунок 1.2 – Основные типы конденсаторов

Емкость цилиндрического конденсатора равна:

$$C = 0,241 \cdot \frac{\varepsilon \cdot l}{Lg(d_2/d_1)}, \Phi \quad (1.4)$$

где l – длина цилиндров (длина обкладок), м;

d_1 – внешний диаметр внутреннего цилиндра, м;

d_2 – внутренний диаметр внешнего цилиндра, м.

Некоторые типы конденсаторов изготавливают намоткой ленты из обкладок, разделенных диэлектриком. Они представляют собой спиральные конденсаторы, например, бумажные, пленочные, электролитические сухие. Емкость спирального конденсатора равна удвоенному значению емкости того же конденсатора, но развернутого в плоскую ленту (рисунок 1.2-в).

$$C = 0,1768 \cdot \varepsilon \cdot b \cdot l / d, \Phi \quad (1.5)$$

где b и l – ширина и длина обкладок, м;

d – толщина диэлектрика, м.

1.5.2 Отклонение емкости от номинала (допуск) и подгонка емкости

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 δC представляет собой относительную величину разности между измеренной (истинной) $C_{из}$ и номинальной емкостью C_n

$$\delta C = \frac{\Delta C}{C_n} = \frac{C_{из} - C_n}{C_n} \cdot 100 \%. \quad (1.6)$$

По величине допуска конденсаторы также нормируются. Величина номинала емкости и допуска устанавливается РПЧ (таблица 1.2).

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 δC_n , %	± 20	± 10	± 5	± 2	± 1	± 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: 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. Если требуется обеспечить высокую точность ($\delta C < 1\%$) при мелкосерийном и единичном производстве, то приходится проводить подгонку емкости. Если имеется возможность собирать конденсатор из двух параллельно соединенных секций с емкостью, равной примерно 0.5 номинального значения, то повышенную точность можно получить, подбирая для сборки две секции – с повышенной и пониженной емкостью так, чтобы сумма получилась возможно ближе к номиналу. Если конденсатор должен быть односекционным, то изготавливают его с несколько повышенной емкостью, а затем подгоняют емкость до требуемого значения путем удаления части обкладки.

Повышение точности емкости конденсатора обычно требует дополнительных затрат, а потому увеличивает его стоимость. Это надо учитывать в каждом частном случае при выборе конденсаторов.

1.5.3 Зависимость емкости конденсаторов и активных потерь от температуры, частоты и времени

Зависимость емкости конденсаторов от температуры характеризуется величиной температурного коэффициента изменения емкости (ТКЕ) α_c - это относительное изменение емкости конденсатора при изменении температуры. При малых изменениях температуры ТКЕ аналитически можно представить как линейную часть от разложения уравнения (1.3) в ряд Тэйлора:

$$\alpha_c = \frac{\Delta C}{C_n \cdot \Delta t} \approx \frac{1}{C_n \cdot \Delta t} \cdot \sum_i \frac{\partial C}{\partial X_i} \cdot \frac{\partial X_i}{\partial t} \cdot \Delta t = \frac{1}{C_n} \cdot \left[\frac{\partial C}{\partial \varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial S} \cdot \frac{\partial S}{\partial t} - \frac{\partial C}{\partial d} \cdot \frac{\partial d}{\partial t} \right]. \quad (1.7)$$

Продифференцировав уравнение (1.3) согласно (1.7), получим:

$$\alpha_c \approx \frac{\partial \varepsilon}{\varepsilon \cdot \partial t} + \frac{\partial S}{S \cdot \partial t} - \frac{\partial d}{d \cdot \partial t} = \alpha_\varepsilon + \alpha_s - \alpha_d, \quad (1.8)$$

где α_s , α_s и α_d - температурные коэффициенты изменения диэлектрической проницаемости, активной площади и толщины диэлектрика.

При экспериментальных исследованиях ТКЕ может быть определен по выражению

$$\alpha_c = \frac{\Delta C}{C_n \cdot \Delta t} \approx \frac{C_2 - C_1}{C_1 \cdot (t_2 - t_1)}, K^{-1} \quad (1.9)$$

где C_1 – емкость конденсатора при температуре t_1 ;

C_2 – емкость конденсатора при температуре t_2 .

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 ϵ диэлектрика от температуры (видами поляризации), то есть величиной и знаком ТКЕ и особенностями конструкции – изменением его размеров при нагревании. Температурное расширение обкладок приводит к увеличению емкости, а увеличение толщины диэлектрика – к уменьшению емкости. ТКЕ диэлектрика определяется типом поляризации данного диэлектрика.

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

Полярные диэлектрики характеризуются замедленными (релаксационными) видами поляризации, повышенными значениями ϵ и $tg\delta$ и имеют существенно нелинейные зависимости ϵ и $tg\delta$ от температуры (рисунок 1.1 г). Аналогичные зависимости $tg\delta$ наблюдаются в полярных диэлектриках и от частоты (рисунок 1.1 в). Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ от частоты также нелинейна.

Анализ показывает, что диэлектрики, имеющие высокие значения ϵ , 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, стабильности и массогабаритным показателям.

В секционированных конденсаторах температурную нестабильность можно существенно уменьшить путем параллельного соединения секций с разными диэлектриками, имеющими противоположные знаки ТКЕ, то есть используя термокомпенсацию.

Выше перечисленные 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* β_c .

1.6 Основные сведения о конденсаторах постоянной емкости

1.6.1 Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком

Современные конденсаторы с неорганическими диэлектриками можно разделить на следующие группы: *слодяные, керамические* (высокочастотные и низкочастотные), *стеклянные* и *тонкопленочные* конденсаторы с неорганическим диэлектриком.

Особенностью *керамики* как материала для изготовления конденсаторов является, прежде всего, большое разнообразие значений ϵ и TKE . Величина ϵ 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 положительные или отрицательные значения, так и значения, близкие к нулю (см. таблицу 1.4).

Свойства *стекол* 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 ϵ стекла. Снижение $tg\delta$ при сохранении повышенных ϵ 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 ТК ϵ . Это дает возможность изготавливать конденсаторы с малым значением ТКЕ.

Ряд неорганических диэлектриков имеет малые tg δ , 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.

1.6.2 Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком
синтетические пленки (*фторопласт-4* – политетрафторэтилен и *полистирол*) 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 1.2-в). При этом обкладки могут быть либо вкладные в виде фольги (бумажные, пленочные конденсаторы), либо нанесенные (напыленные) непосредственно на диэлектрическую ленту (металлобумажные, 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 ϵ (у твердых органических материалов ϵ не превышает 3...6) удастся получать относительно большие значения удельной емкости конденсаторов, особенно у металлобумажных и металлопленочных. Все это позволяет значительно расширить диапазон номинальных значений емкости C_n в сторону увеличения по сравнению с конденсаторами на неорганических твердых диэлектриках. У конденсаторов с твердым органическим диэлектриком можно легко получать емкости порядка единиц и десятков микрофарад, а если можно

использовать конденсаторы с увеличенными размерами, то значения C_n доходят до сотен микрофарад в одном корпусе.

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_n , 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 ε и $tg\delta$, но они обладают более высокой нагревостойкостью. Кроме того, пленки имеют более высокую электрическую прочность и могут быть изготовлены значительно тоньше бумаги, что повышает удельные характеристики конденсаторов.

Наиболее интересны *неполярные*). Они отличаются повышенной стабильностью емкости при изменении температуры (ТКЕ $\approx 10^{-6} K^{-1}$) и очень высоким удельным электрическим сопротивлением. *Фторопластовые* конденсаторы могут быть использованы до 250 °С, но они дефицитны и дороги. *Полистирольные* конденсаторы имеют низкую нагревостойкость. Герметизированные полистирольные конденсаторы с повышенной точностью и стабильностью емкости применяют в электроизмерительной технике и в счетно-решающих устройствах во времязадающих цепях.

1.7 Маркировка конденсаторов постоянной емкости

При маркировке конденсаторов должны быть указаны следующие величины: номинальная емкость C_n , номинальный допуск δC_n , группа по ТКЕ.

Если размеры конденсатора позволяют, то C_n и δC_n 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 δC_n . Принятая кодировка допусков приведена в таблице 1.3. Например, маркировка *M15B* означает: конденсатор емкостью $C_n = 0.15$ мкФ с допуском $\delta C_n = \pm 20\%$; маркировка *1H5C* означает: конденсатор емкостью 1500 пФ $\pm 10\%$.

Таблица 1.3 – Кодировка допустимых отклонений емкости конденсаторов

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

Окончание таблицы 1.3

Кодированное обозначение	Э	Б	А	Я	Ю	Х
Допустимое отклонение, %	+50-10	+50-20	+80-20	+100	+100-10	±0,4пФ

По ТКЕ нормируются лишь слюдяные, керамические и стеклянные 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 1.4 – 1.6.

Таблица 1.4 – Группы температурной стабильности керамических конденсаторов постоянной емкости (в диапазоне температур от плюс 20 до плюс 85 °С)

Группа	$\alpha_c \cdot 10^6, K^{-1}$	β_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	–
МП0	+ (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 1.5 – Группы температурной стабильности слюдяных конденсаторов постоянной емкости (в диапазоне температур от плюс 20 до плюс 85 °С)

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

Керамические конденсаторы, имеющие существенную нестабильность емкости, не нормируются по ТКЕ, но они разделяются на группы по величине допустимых изменений емкости. В таблице 2.5 приведена классификация таких конденсаторов по группам и их кодировка.

Таблица 1.6 – 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

2 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из следующих макетов и приборов:

- специальной платы (макет №1) с набором различных типов маркированных конденсаторов (7 шт.), предназначенных для исследования зависимости емкости от температуры;
- специальной платы (макет №2) с набором конденсаторов с бумажным и оксидным диэлектриком (5 шт.), предназначенных для исследования зависимости емкости и потерь от частоты;
- сушильного шкафа типа СШ – 200;
- гетеродинного измерителя емкости типа ГИЕ-1М;
- цифрового измерителя емкости Е8-4;
- универсального моста переменного тока типа УМ-3;
- стендов с набором конденсаторов постоянной емкости.

Описание сушильного шкафа СШ – 200 и измерительных приборов ГИЕ-1М, УМ-3 и правила пользования ими приведены в приложении А.

3 Подготовка к работе

3.1 Повторить раздел “Конденсаторы” изучаемой дисциплины (см. раздел 2), [1, с.103 - 155], [2, с. 46-86]. Особое внимание обратить на основные свойства, конструктивные особенности, условные обозначения и области применения конденсаторов постоянной емкости.

3.2 Заготовить протокол для внесения справочных данных исследуемых конденсаторов, результатов исследований и др. сведений в соответствии с требованиями, приведенными в разделе 7 данного руководства.

4 Порядок выполнения работы

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

4.2 Ознакомиться с конструкциями конденсаторов, размещенных на макете №1; определить их тип, номинальную емкость, допуск, группу по ТКЕ, $tg\delta$, пользуясь справочниками [3-5], и внести их в таблицу 4.1 в порядке, соответствующем указанному номеру на плате.

4.3 Подготовить прибор ГИЕ-1М к измерениям согласно рекомендациям (приложение А, раздел 2).

4.4 Измерить величину емкости и $tg\delta$ конденсаторов с помощью измерителя емкости Е8-4 при *комнатной температуре*. Значения емкости внести в таблицу 4.2, предварительно вычтя из показания прибора емкость измерительного канала.

4.5 Измерить величину емкости конденсаторов при *комнатной температуре* с помощью прибора ГИЕ-1М и внести результаты в таблицу 4.3, не вычитая емкость измерительного канала.

4.6 Закрывать сушильный шкаф, включить подогрев и снять зависимости емкости от температуры с помощью прибора ГИЕ-1М согласно рекомендациям (приложение А, раздел 2). Измерения производить через $20 \pm (3...5 \text{ } ^\circ\text{C})$. Полученные (фактические) данные внести в таблицу 4.3

Таблица 4.1 – Паспортные технические характеристики исследуемых конденсаторов (Макет №1)

Номер п/п	Тип конденсатора	Паспортные параметры конденсаторов				Материал диэлектрика
		$C_n, n\Phi$	$\delta C_n, \%$	$TKE \cdot 10^6, K^{-1}$	$tg\delta$	
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

Таблица 4.2 – Измеренные технические характеристики исследуемых конденсаторов (Макет №1) при комнатной температуре, $t = \text{ } ^\circ\text{C}$

Номер п/п	Тип конденсатора	Измеренные параметры конденсаторов				Примечания
		$C_{из}, n\Phi$	$\delta C, \%$	$TKE \cdot 10^6, K^{-1}$	$tg\delta$	
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

Таблица 4.3 – Результаты исследований зависимости емкости конденсаторов от температуры

Номер п/п	Характеристики конденсаторов		Величина емкости $C_\Sigma (n\Phi)$ при температуре $T (^\circ\text{C})$			
	Тип	$C_n, n\Phi$	20	40	60	80
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

Таблица 4.4 – Зависимости температурного коэффициента изменения емкости

Но- мер п/п	Характеристики конденсаторов		Значения $TKE (\alpha_C \cdot 10^6, K^{-1})$ при температуре $T (^{\circ}C)$		
	Тип	$TKE \cdot 10^6, K^{-1}$	30	50	70
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

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

4.8 На основании результатов измерений и паспортных данных (таблицы 4.1 и 4.2) рассчитать фактические отклонения емкости δC по формуле (1.5), внести в таблицу 4.2 и сравнить их значения с паспортными δC_n (таблица 4.1).

4.9 На основании результатов измерений (таблица 4.3) рассчитать по формуле (1.8) α_C и внести данные в таблицу 4.4. Значения температуры берутся средние для каждого интервала.

4.10 Построить зависимости $\alpha_C = f(t)$ и провести сравнительный анализ полученных результатов. Оценить качество исследованных конденсаторов и указать возможные области их применения (в выводах).

4.11 Сделать выводы о качестве исследованных конденсаторов и указать возможные области их применения.

4.12 Ознакомиться с конструкциями конденсаторов постоянной емкости, представленными на стенде.

4.13 Выполнить отчет в соответствии с требованиями и защитить работу.

5 Содержание отчета

5.1 Введение (цель работы).

5.2 Порядок проведения работы.

5.3 Справочные данные и результаты исследований конденсаторов в виде таблиц и графиков.

5.4 Выводы по результатам исследований (по пунктам).

6 Методические указания

6.1 Протокол по лабораторной работе готовится накануне занятия. Выполнять протокол следует в виде заготовки к отчёту на тетрадных листах или листах формата А4. Он должен содержать все пункты раздела 6. Под графические работы должно быть оставлено место. В таблицах 4.3 и 4.4 значения температуры рекомендуется вписать карандашом, чтобы потом можно было легко исправить на фактические значения, полученные в эксперименте.

6.2 В данной работе исследуются различные типы керамических, пленочных, слюдяных, бумажных конденсаторов и конденсаторов с оксидным диэлектриком типа КД, КТ, КЛС, КСО, БМ, МБМ, К50, К52, К53 и др.

6.3 При построении зависимостей $\alpha_C = f(t)$ отвести для графиков побольше места. Масштаб по оси ординат следует выбирать по максимальным величинам положительных и отрицательных значений α_C , взятым из таблицы 4.4. Все графики должны быть подписаны.

6.4 В выводах по результатам исследований необходимо отразить следующие моменты:

6.5 Соответствие фактических отклонений емкости δC конденсаторов паспортным данным δC_n . Если имеют место несоответствия, то указать возможные причины;

6.6 Объяснить характер полученных зависимостей $\alpha_C = f(t)$ и несоответствия измеренных ТКЕ α_C паспортным, если таковые имеют место;

6.7 Как влияют температура и частота напряжения на емкость различных типов конденсаторов?

6.8 Объяснить причины активных потерь в исследованных конденсаторах и оценить соответствие (несоответствие) фактических потерь паспортным. Как влияют температура и частота напряжения на потери в конденсаторах?

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

7 Контрольные вопросы

7.1 В чем заключается принцип функционирования конденсатора?

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

7.3 На какие типы делятся конденсаторы постоянной емкости по виду диэлектрика?

7.4 Какими параметрами оцениваются свойства конденсаторов постоянной емкости?

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

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

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

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

7.9 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 Волгов В.А. Детали и узлы РЭА. - М.: Энергия, 1977. - 656 с.
- 2 Фролов А.Д. Радиодетали и узлы. - М.: Высшая школа, 1975. - 440 с.
- 3 Справочник по электрическим конденсаторам / Под ред. И.И.Четверткова и В.С.Смирнова. - М.: Радио и связь, 1983. - 576 с.
- 4 Конденсатор: Справочник / Под ред. И.И.Четверткова и М.Н.Дьяконова. - М.: Радио и связь, 1993. - 392 с.
- 5 Краткий справочник конструктора РЭА / Под ред. Р.Г. Варламова. - М.: Сов. радио, 1972. С. 244-282.
- 6 Н.И. Кузевных, Р.М. Капилевич. Исследование конденсаторов постоянной емкости: Методические указания по выполнению лабораторной работы для студентов специальности 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств». – Томск: ТУСУР, 2001.– 24 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное)

ОПИСАНИЕ ПРИБОРОВ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

А.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 $\pm 3\%$.

Шкаф оборудован ртутным термометром (с допустимой температурой $t_{доп} = 100 \dots 200$ °С) для контроля температуры в камере и специальным устройством для подключения испытываемых конденсаторов к измерительному прибору. Это устройство состоит из разъема, помещенного в камеру, служащего для подключения макета №1; переключателя и гнезда для подключения коаксиального кабеля, которые размещены на передней панели шкафа. 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 3-4 деления и наблюдать за температурой по термометру. Для удобства наблюдения за температурой шкаф оборудован осветительной лампочкой, включенной в цепь терморегулятора. За 8-10 °С до подхода к требуемой температуре начать плавно поворачивать ручку терморегулятора *влево* (против часовой стрелки) *до выключения контрольной лампы*, расположенной на панели слева, что сопровождается щелчком при срабатывании реле. При повторном включении подогревателя, что сопровождается срабатыванием реле и загоранием осветительной и контрольной ламп, продолжить регулировку, 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 (кратковременно включая и выключая осветительную лампочку рукояткой терморегулятора). После установления стабильного теплового режима в камере можно приступить к измерению емкости конденсаторов.

А.2 Принцип действия и правила работы с прибором ГИЕ-1М

Гетеродинный измеритель емкости ГИЕ-1М позволяет измерить емкости от 1 до 1000 $n\Phi$. Принцип действия прибора основан на генераторном резонансном методе с индикацией момента резонанса по нулевым бинениям. В приборе имеется два высокочастотных генератора, собранных по одинаковой схеме (рисунок А.1): образцовый (ОГ) и рабочий (Г). В колебательный контур генератора ОГ включен образцовый конденсатор C_0 переменной емкости, в контур рабочего конденсатора параллельно с постоянной емкостью C подключается исследуемый конденсатор C_x .

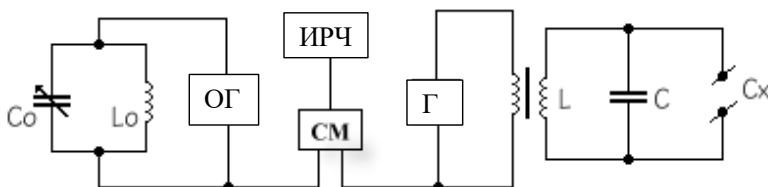


Рисунок А.1 – Функциональная схема прибора ГИЕ-1М

Колебания высокой частоты обоих генераторов через буферные усилители подаются на смеситель СМ. От смесителя колебания, равные разности частот, подаются через фильтр нижних частот и усилитель на индикатор резонансной частоты ИРЧ (электронную трубку).

При отсутствии C_x генераторы по нулевым бинениям настраиваются на одинаковую частоту при емкости первого контура C_0 , что должно соответствовать нулю по шкалам отсчета ($C_1 + C_2 + C_3 = 0$).

При этом наблюдается равенство

$$C_0' \cdot L_0 = L \cdot C \quad (\text{А.1})$$

При подключении измеряемого конденсатора к зажимам C_x изменяется частота генератора Г. Настроив генератор ОГ изменением емкости C_0 на частоту генератора Г получим

$$C_0'' \cdot L_0 = L \cdot (C + C_x) \quad (\text{А.2})$$

Из совместного решения полученных уравнений находим

$$C_x = \frac{C}{C_0'} \cdot (C_0'' - C_0') \quad (\text{А.3})$$

Так как отношение C/C_0 для каждого диапазона постоянно и может быть учтено постоянным коэффициентом, равным 1, а при $C_0' C_x = 0$, то величина измеряемой емкости может быть считана непосредственно со шкал –

$$C_x = C_0'' = C_1 + C_2 + C_3. \quad (\text{А.4})$$

Для измерения емкости необходимо сначала подготовить прибор, для чего:

1) Включить прибор ГИЕ-1М и дать возможность прогреться 10-15 мин.

2) С помощью ручек управления настроить луч индикатора на четкое изображение.

3) Выставить "0" прибора. Предварительно отключив измерительный кабель от прибора (на передней панели), выставить переключатель C_1 и лимбы шкал емкостей C_2 и C_3 на "0". Вращая отверткой шлиц подстроечного конденсатора, добиться изображения сигнала на экране в виде прямой линии.

4) Измерить емкость канала связи (измерительный кабель, монтаж) при отключенном разъеме от платы №1 в сушильном шкафу. При подключении кабеля к прибору обратить внимание на соответствие клеммы "Земля".

5) Подключить макет №1 к измерительной цепи. Открыть сушильный шкаф, подключить с помощью разъема конденсаторы к измерительному устройству и *осторожно, чтобы не вывести из строя термометр*, поместить плату в камеру по центру решетки (под термометр).

При измерении емкости конкретного конденсатора для ускорения процесса рекомендуется с помощью переключателя C_1 и шкал C_2 и C_3 установить значение номинальной емкости, плюс емкость канала измерения. Для контроля частоты наблюдаемого на экране сигнала можно воспользоваться встроенным на передней панели зуммером, предварительно включив и настроив его звучание (четкое, но негромкое).

А.3 Краткое описание прибора УМ-3 и методика измерения емкости и диэлектрических потерь

Универсальный мост УМ-3 (Е12-2) предназначен: для измерения сопротивлений на переменном токе; для измерения индуктивности и добротности катушек индуктивности; для измерения емкости и $tg\delta$ конденсаторов.

Измерения емкости могут производиться на фиксированных частотах 1000 и 100 Гц. На частоте 1000 Гц пределы измерения емкости от 10 нФ до 100 мкФ с точностью $\pm(1+200/C)$ %, где C – измеряемая емкость в пикофарадах, а $tg\delta (Q)$ от 0,001 до 1 с точностью не менее $\pm(10+0,1/tg\delta)$ %.

Измерительная часть прибора (для измерения емкости) представляет собой четырехплечий мост (рисунок А.2), два из которых собраны из активных сопротивлений, а два других – из сопротивлений и емкости.

В одну из диагоналей моста включен генератор синусоидального напряжения Γ , а в другую – измеритель рассогласования ИР (микроамперметр).

Равновесие моста достигается регулировкой ручек “Множитель” и “Отсчет” (изменяется величина сопротивления R_2) и вращением лимба “ $\text{tg}\delta - Q$ ” (изменяется величина сопротивления R_4). При равновесии моста (ток $I_o = 0$) справедливы уравнения

$$\frac{C_x}{C_4} = \frac{R_2}{R_3} \quad \text{и} \quad \frac{R_x}{1/\omega \cdot C_x} = \frac{R_4}{1/\omega \cdot C_4}, \quad (\text{A.5})$$

отсюда следует

$$C_x = \frac{R_2}{R_3} \cdot C_4, \quad \text{tg}\delta = \omega \cdot C_4 \cdot R_4 \quad (\text{A.6})$$

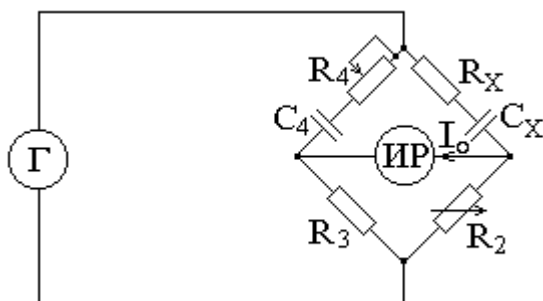


Рисунок А.2 – Схема измерительной части прибора УМ-3

Так как R_3 и C_4 являются величинами постоянными, то измеряемые величины C_x и $\text{tg}\delta$ определяются соответственно значениями R_2 и R_4 . Из выражений (А.6) очевидно, что на величину $\text{tg}\delta$ оказывает влияние частота напряжения источника питания (ω). Поэтому при исследовании зависимостей C и $\text{tg}\delta$ от температуры измерения следует проводить при одной и той же частоте ($f = 1000 \text{ Гц}$).

При измерении емкости и $\text{tg}\delta$ конденсаторов рекомендуется следующая методика:

а) установить переключатель “Вид измерения” в положение “С”, переключатель “Q-tgδ” – в положение “tgδ”, а переключатель “Частота” в положение “1000”;

б) вывести влево ручку “Регулировка напряжения” и установить ручкой “Уст. нуля” стрелку прибора на нуль, предварительно нажав кнопку;

в) подключить конденсатор к клеммам “R-L-C”;

г) ручками “Множитель” и “Отсчет” установить номинальную емкость измеряемого конденсатора, а лимб “Q- tgδ” установить в среднее положение;

д) ручкой “Рег. напряжения” плавно установить стрелку прибора около деления “80”;

е) плавно поворачивая ручку “Отсчет” (правую) добиться минимального отклонения стрелки прибора от нуля;

ж) увеличить напряжение ручкой “Рег. напряжения” до 80-100 и поворотом лимба “Q- $\text{tg}\delta$ ” установить стрелку прибора на минимальное значение;

з) при нечетком резонансе (отклонение стрелки мало чувствительно к повороту ручек “Отсчет” и “Q- $\text{tg}\delta$ ”) операции *д-ж* следует повторить. Если $\text{tg}\delta > 0,1$, то переключатель “Q- $\text{tg}\delta$ ” перевести в положение “Q”. При этом $\text{tg}\delta = 1/Q$;

и) по шкалам “Отсчет” и “Q- $\text{tg}\delta$ ” произвести отсчет величин емкости и $\text{tg}\delta$.