

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)
Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

Н.И. Кузбных, А.М. Трубицын

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ
СТАБИЛЬНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

*Руководство к лабораторной работе для студентов специальности
211000 Конструирование и технология электронных средств*

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение.....	3
2 Краткая теория.....	3
2.1 Общие положения.....	3
2.2 Зависимость $TK\epsilon$ от механизма поляризации	3
2.3 Графический метод расчета $TK\epsilon$	5
2.4 Расчет ϵ и $TK\epsilon$ композиционных диэлектриков (смесей).....	6
3 Экспериментальная часть.....	7
3.1 Метод измерений.....	7
3.2 Описание лабораторной установки.....	9
3.3 Порядок выполнения работы	10
4 Задание	11
6 Контрольные вопросы для самопроверки.....	13
Рекомендуемая литература.....	13
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Индивидуальные задания.....	14

1 ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является: исследование закономерности изменения температурного коэффициента диэлектрической проницаемости ($TK\epsilon$) от температуры; изучение и применение методики расчета диэлектрической проницаемости ϵ и $TK\epsilon$ комбинированных диэлектриков.

2 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

2.1 Общие положения

Устойчивость работы радиоэлектронных средств, в значительной мере, зависит от стабильности свойств материалов, из которых они изготовлены. Так, например, зависимость ϵ диэлектрика конденсатора от температуры приводит к изменению его емкости

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \Lambda. \quad (2.1)$$

При использовании такого конденсатора в колебательном контуре при изменении температуры будет наблюдаться уход резонансной частоты f контура

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}, \quad (2.2)$$

где C – емкость конденсатора, Ф;

$\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная;

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость;

Λ – геометрический фактор, м;

f – резонансная частота, Гц;

L – индуктивность колебательного контура, Гн.

Для количественной оценки термостабильности ϵ используется **температурный коэффициент диэлектрической проницаемости** – $TK\epsilon$. Он равен относительному изменению диэлектрической проницаемости ϵ при изменении температуры t на один градус

$$TK\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{d\epsilon}{dt}. \quad (2.3)$$

По знаку $TK\epsilon$ можно определить, увеличивается или уменьшается ϵ и емкость конденсатора C , соответственно, с ростом температуры. Если $TK\epsilon$ положительный – $TK\epsilon > 0$, то ϵ и C с увеличением температуры растут. Если же $TK\epsilon$ отрицательный, то ϵ и C с ростом температуры уменьшаются.

Абсолютное значение $TK\epsilon$ характеризует степень стабильности диэлектрической проницаемости диэлектрика и емкости конденсатора. У высокостабильных твердых диэлектриков величина $TK\epsilon$ составляет порядка 10^{-4} 1/°С.

2.2 Зависимость $TK\epsilon$ от механизма поляризации

Величина и знак $TK\epsilon$ зависят от механизма поляризации. Подробно механизмы поляризации рассмотрены в рекомендованной литературе [1-3].

Если в диэлектрике происходит только поляризация *электронного смещения*, то с ростом температуры ϵ уменьшается за счет уменьшения концентрации частиц в единице объема n . Поэтому $TK\epsilon < 0$.

При поляризации *ионного смещения* на зависимость ϵ от температуры влияют два фактора: во-первых, с ростом температуры концентрация частиц n уменьшается, что ведет к уменьшению ϵ ; во-вторых, с ростом температуры силы связи между ионами ослабевают, что вызывает увеличение ϵ . В зависимости от того, какой из этих двух факторов в данном интервале температур оказывает большее влияние на величину ϵ , знак $TK\epsilon$ будет положительный или отрицательный.

При *релаксационных* процессах поляризации главную роль в температурной зависимости ϵ играет изменение кинетической энергии ионов и диполей, участвующих в релаксационной поляризации. На рисунке 2.1 представлена типичная зависимость ϵ от температуры для веществ, у которых наряду с упругими видами поляризации возможна релаксационная поляризация.

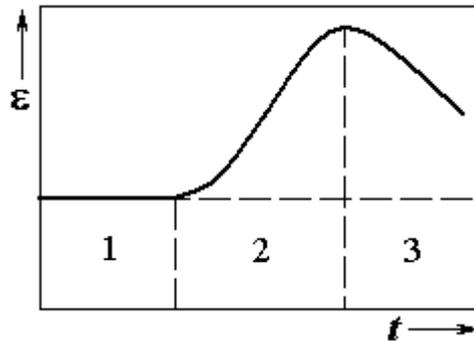


Рисунок 2.1 – Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ от температуры для полярного диэлектрика

При низких температурах (участок 1) кинетическая энергия полярных молекул настолько мала, что они не могут участвовать в релаксационном процессе. На этом участке происходят только упругие процессы поляризации и ϵ очень слабо зависит от температуры.

На участке 2 с ростом температуры кинетическая энергия полярных молекул возрастает. Они могут поворачиваться на большие углы и участвуют в поляризации – ориентируются в электрическом поле. ϵ растет, $TK\epsilon > 0$.

На участке 3 тепловое движение молекул становится настолько интенсивным, что электрическое поле не может удержать их в поляризованном состоянии, при котором электрический момент молекул совпадает по направлению с вектором поля. Диэлектрическая проницаемость ϵ уменьшается, $TK\epsilon < 0$.

Величина ϵ при наличии только упругих видов поляризации (электронное, ионное смещение) мало зависит от температуры. Поэтому $TK\epsilon$ тоже незначи-

тельно (обычно порядка $10^{-4} \dots 10^{-3}$ 1/K). При наличии релаксационных процессов $TK\epsilon$, как правило, значительно больше (порядка $10^{-2} \dots 10^{-1}$ 1/K).

У неполярных диэлектриков (полистирол, полиэтилен и др.), в которых происходит только поляризация электронного смещения, ϵ медленно уменьшается с ростом температуры за счет снижения концентрации элементарных частиц n . $TK\epsilon$ отрицательный и мал по абсолютной величине ($\sim 10^{-4}$ 1/K).

У полярных органических диэлектриков и у конденсаторной керамики $TK\epsilon$ может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от состава материала и рабочего интервала температур. При этом $TK\epsilon$ может достигать порядка 10^{-2} 1/K.

2.3 Графический метод расчета $TK\epsilon$

Пусть необходимо рассчитать $TK\epsilon$ для некоторой температуры t_1 . Экспериментально снимается зависимость диэлектрической проницаемости от температуры в окрестностях t_1 и строится график $\epsilon = f(t)$ (рисунок 2.2).

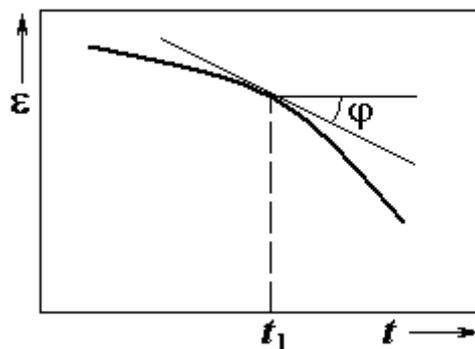


Рисунок 2.2 – К графическому расчету $TK\epsilon$

Из высшей математики известно, что

$$\frac{d\epsilon}{dt} = tg\varphi, \quad (2.4)$$

где $tg\varphi$ – тангенс угла наклона касательной при температуре t_1 .

У большинства диэлектриков ϵ плавно изменяется с температурой (рисунок 2.3) и можно считать, что в небольшом интервале температур зависимость $\epsilon(t)$ подчиняется линейному закону. Тогда для интервала температур $\Delta t = t_2 - t_1$ будут справедливы расчетные соотношения:

$$tg\varphi = \frac{\Delta\epsilon}{\Delta t} = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{t_2 - t_1} \quad \text{и} \quad TK\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{t_2 - t_1}. \quad (2.5)$$

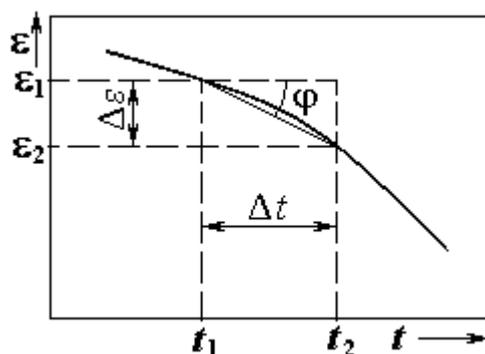


Рисунок 2.3 – Линеаризация зависимости $\varepsilon = f(t)$ при расчете ТКЕ

На практике обычно снимается зависимость емкости образца от температуры и рассчитывается температурный коэффициент емкости *ТКЕ*

$$ТКЕ = \frac{1}{C} \cdot \frac{dC}{dt}. \quad (2.6)$$

Однако, емкость образца зависит не только от ε диэлектрика, но и от геометрических размеров диэлектрика и электродов. Допустим для простоты, что образец представляет собой плоский конденсатор, имеющий обкладки (электроды) в форме квадрата со стороной, равной l . Емкость такого конденсатора будет равна

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot l^2}{h}, \quad (2.7)$$

где l – линейный размер электрода, м;

h – толщина диэлектрика, м.

Продифференцируем это выражение по температуре

$$\frac{dC}{dt} = \varepsilon_0 \left(\frac{l^2}{h} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{2\varepsilon l}{h} \cdot \frac{dl}{dt} - \frac{\varepsilon l^2}{h^2} \cdot \frac{dh}{dt} \right).$$

Если разделить это выражение на C , то получим

$$ТКЕ = ТК\varepsilon + ТКl - ТКh, \quad (2.8)$$

где $ТКl$ и $ТКh$ – температурные коэффициенты линейного расширения материала обкладок (металла) и диэлектрика.

Для чистых металлов и сплавов $ТКl \approx (15...30) \cdot 10^{-6}$ 1/К. У органических диэлектриков $ТКh \approx (50...100) \cdot 10^{-6}$ 1/К. а у неорганических $ТКh \approx (5...10) \cdot 10^{-6}$ 1/К. Очевидно, что значения температурных коэффициентов линейного расширения материалов обкладок и диэлектрика на несколько порядков меньше $ТК\varepsilon$ и в большинстве случаев ими можно пренебречь. Тогда

$$ТКЕ \approx ТК\varepsilon. \quad (2.9)$$

2.4 Расчет ε и ТКЕ композиционных диэлектриков (смесей)

У всех диэлектриков ε зависит от температуры. Но в одинаковых условиях у одних диэлектриков ε с ростом температуры увеличивается и $ТК\varepsilon > 0$, а у других ε уменьшается и $ТК\varepsilon < 0$. Подбирая соответствующим образом два или

несколько диэлектриков с разными ϵ и $TК\epsilon$, можно создавать диэлектрики, с заданными величинами ϵ и $TК\epsilon$ (в заданном диапазоне температур), в том числе и с $TК\epsilon = 0$. Необходимо особо отметить, что свойства смесей зависят не только от свойств компонентов и их объемной концентрации в смеси, но также и от их взаимного пространственного расположения в электрическом поле.

Для расчета ϵ композиционных диэлектриков (смесей) часто пользуются формулой Лихтенеккера, которая для двухкомпонентных смесей имеет вид:

$$\epsilon^x = \theta_1 \cdot \epsilon_1^x + \theta_2 \cdot \epsilon_2^x, \quad (2.10)$$

где ϵ^x – диэлектрическая проницаемость смеси;

ϵ_1^x и ϵ_2^x – диэлектрические проницаемости первого и второго компонентов;

θ_1 и θ_2 – объемные концентрации первого и второго компонентов смеси;

x – константа, характеризующая пространственное расположение компонентов и принимающая значения от +1 до -1.

Сумма объемных концентраций удовлетворяет условию

$$\theta_1 + \theta_2 = 1. \quad (2.11)$$

Простейшие модели пространственного расположения компонентов представлены на рисунке 2.4.

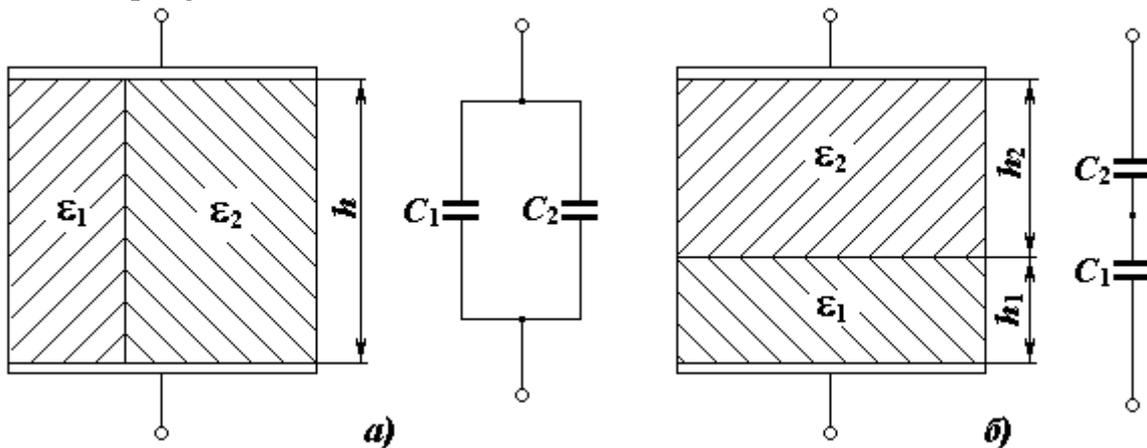


Рисунок 2.4 – Схемы двухкомпонентного плоского конденсатора с параллельным (а) и последовательным (б) расположением компонентов

Конструкцию с двумя параллельно расположенными диэлектриками можно рассматривать, как два параллельно включенных конденсатора (рисунок 2.4,а). Объемная концентрация первого компонента

$$\theta_1 = \frac{V_1}{V_1 + V_2} = \frac{S_1 \cdot h}{(S_1 + S_2) \cdot h} = \frac{S_1}{S_1 + S_2},$$

где V_1 и V_2 – объемы компонентов;

S_1 и S_2 – площади поверхностей компонентов, прилегающих к электродам;

h – толщина диэлектрика.

Суммируя емкости конденсаторов, можно убедиться, что в формуле Лихтенеккера в этом случае $x = 1$.

Схема, представленная на рисунке 2.4,б, соответствует последовательному включению двух конденсаторов. При этом $x = -1$, а $\theta_1 = h_1/(h_1 + h_2)$.

Большое практическое применение находят мелкодисперсные хаотические смеси (пластмассы, пенопласты, керамика и т.д.). Для них, принимая $x \rightarrow 0$, формула Лихтенеккера после несложных преобразований приводится к виду

$$\ln \varepsilon = \theta_1 \cdot \ln \varepsilon_1 + \theta_2 \cdot \ln \varepsilon_2. \quad (2.12)$$

Если это уравнение продифференцировать по температуре, то получится формула для расчета **ТК ε** мелкодисперсной хаотической смеси.

При параллельном и последовательном расположении компонентов для вывода формулы **ТК ε** поступают следующим образом.

При параллельном расположении компонентов (рисунок 2.4,а) $x = +1$. Следовательно, формула Лихтенеккера имеет вид

$$\varepsilon = \theta_1 \cdot \varepsilon_1 + \theta_2 \cdot \varepsilon_2. \quad (2.13)$$

Продифференцируем эту формулу по температуре, затем в правой части первое слагаемое умножим и разделим на ε_1 , а второе на ε_2 .

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \varepsilon_1 \cdot \theta_1 \cdot \frac{1}{\varepsilon_1} \cdot \frac{d\varepsilon_1}{dt} + \varepsilon_2 \cdot \theta_2 \cdot \frac{1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d\varepsilon_2}{dt}.$$

Если теперь все это уравнение разделить на ε смеси, то получим

$$TK\varepsilon = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \cdot \theta_1 \cdot TK\varepsilon_1 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon} \cdot \theta_2 \cdot TK\varepsilon_2. \quad (2.14)$$

Подобным приемом можно воспользоваться при выводе расчетной формулы **ТК ε** для случая последовательного расположения компонентов (рисунок 2.4,б).

Для смесей типа пенопластов, пенокерамики и др., состоящих из твердого и газообразного диэлектриков, удобнее пользоваться не объемными концентрациями компонентов в смеси, а их массовым содержанием в смеси. Плотность смеси можно рассчитать на основании арифметического закона смещения

$$D = \theta_1 \cdot D_1 + \theta_2 \cdot D_2, \quad (2.15)$$

где D, D_1, D_2 – плотности смеси и компонентов, $кг/м^3$.

С достаточной степенью точности можно принять для газа $D_2 = 0$ и $\varepsilon_2 = 1$. Формула (2.12) в этом случае приводится к виду

$$\ln \varepsilon = \frac{D_1}{D} \cdot \ln \varepsilon_1. \quad (2.16)$$

Изменениями D и D_1 от температуры из-за малости можно пренебречь. Дифференцирование уравнения (2.16) по температуре дает формулу для расчета **ТК ε** .

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1 Метод измерений

Для измерения малых изменений емкости конденсатора (образца) широко используется **метод нулевых биений**. Сущность его заключается в суммировании двух высокочастотных синусоидальных сигналов близких частот (f_1 и f_2) и выделение низкочастотного сигнала биений с частотой, равной разности $f_1 - f_2$. Структурная схема установки представлена на рисунке 3.1.

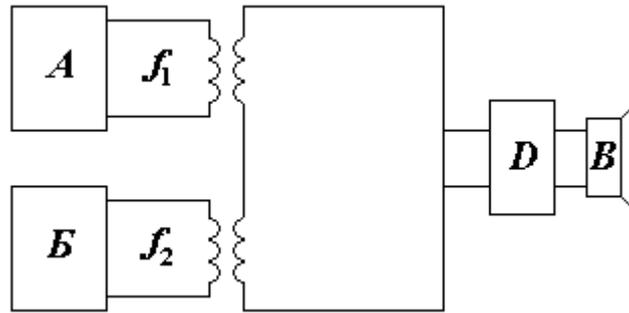


Рисунок 3.1 – Структурная схема установки

Положим, что блок **A** – высокочастотный генератор известной *фиксированной частоты* f_1 (образцовый генератор), а блок **B** – высокочастотный генератор, в колебательный контур которого параллельно переменному, образцовому конденсатору C включен исследуемый конденсатор C_x (рисунок 3.2). Резонансная частота этого колебательного контура будет равна

$$f_2 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L(C + C_x)}}. \quad (3.1)$$

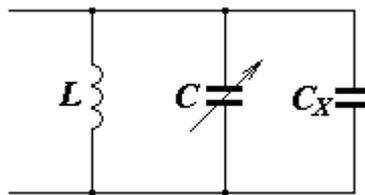


Рисунок 3.2 – Схема колебательного контура

Если $f_2 \neq f_1$, то на выходе детектора **D** (рисунок 3.1) появится сигнал биений с частотой $f = f_1 - f_2$. В качестве индикатора этого сигнала используется телефон **B**. Частоту f_2 можно изменять с помощью переменного конденсатора C . Если колебательный контур генератора **B** настроить на резонансную частоту $f_2 = f_1$, то частота сигнала биений f будет равна нулю (настройка на *нулевые биения*). Очевидно, что при этом звуковой сигнал в телефоне будет отсутствовать.

При нагреве исследуемого конденсатора его емкость C_x изменится на ΔC_x . Соответственно изменится и резонансная частота f_2 , а в телефоне появится сигнал биений с частотой $f = f_1 - f_2 \neq 0$.

Для того, чтобы снова настроиться на нулевые биения, нужно изменить емкость переменного конденсатора C . Например, если емкость образца C_x при нагреве *увеличилась* на ΔC_x , то резонансная частота f_2 *уменьшится* и в телефоне будет слышен сигнал с частотой $f = f_1 - f_2$. Если плавно уменьшать емкость переменного конденсатора C , то частота f_2 будет увеличиваться, а частота сигнала биений f понижаться и при $f_2 = f_1$ сигнал в телефоне исчезнет. При этом *величина увеличения емкости образца будет равна величине уменьшения емкости переменного конденсатора* ($\Delta C_x = \Delta C$).

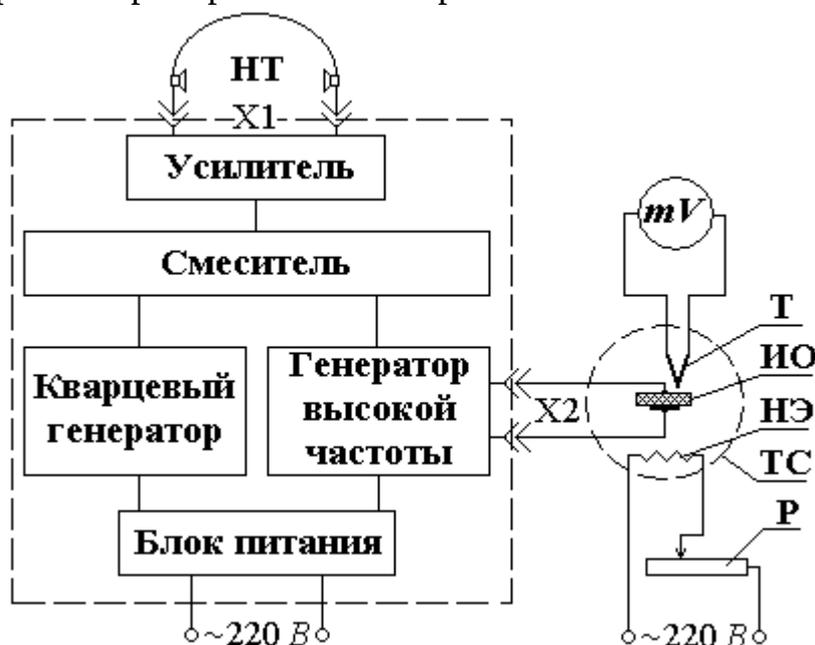
3.2 Описание лабораторной установки

Функциональная схема лабораторной установки представлена на рисунке 3.3. Для измерения изменений емкости исследуемого конденсатора (образца) используется гетеродинный частотомер. На схеме он выделен штриховой линией. В колебательный контур одного из генераторов частотомера впаяны контакты **X2** для подключения исследуемого образца.

Генератор фиксированной частоты (**Кварцевый генератор**) стабилизирован кварцевым резонатором и, кроме основной частоты, выдает серию гармоник, которые можно найти по **градуировочной книге прибора**.

Для нагрева исследуемого образца **ИО** используется термостат **ТС**. Температура в термостате измеряется косвенным методом с помощью термопары **Т**, термоэдс которой измеряется милливольтметром **mV**. Частота сигнала биений прослушивается с помощью наушников **НТ**, которые подключаются к частотомеру с помощью штекера **X1**.

Емкость исследуемого образца при комнатной температуре измеряется с помощью цифрового прибора Е9-4 – измерителя емкости.



НТ – наушники телефона; *mV* – милливольтметр; Т – термопара; ИО – исследуемый образец; НЭ – нагревательный элемент; ТС – термостат; Р – реостат

Рисунок 3.3 – Функциональная схема лабораторной установки

3.3 Порядок выполнения работы

3.3.1 Подготовить частотомер к работе. Подключить телефон. Переключатель рода работы поставить в положение ПРОВЕРКА, переключатель ДИАПАЗОНЫ – в положение 1, регулятор КОРРЕКТОР установить в положение 1. Разъединить цепь исследуемого образца в термостате с помощью специальной прокладки. Включить тумблер питания прибора и дать прогреться 15 мин.

3.3.2 Для заданной преподавателем частоты определить по *градуировочной книге прибора* соответствующее значение отсчета по лимбам переменного

конденсатора. На шкалах СОТНИ и ЕДИНИЦЫ установить найденное значение отсчета, настроив тем самым колебательный контур **Б** на заданную частоту.

Впаянные в контур контакты, электроды и соединительные провода для подключения образца создают паразитную емкость C' (рисунок 3.4), которая увеличивает общую емкость контура и понижает его частоту. Для компенсации влияния C' на резонансную частоту контура нужно соответственно **уменьшить** емкость переменного конденсатора C на величину C' . Так как лимб прибора проградуирован пропорционально частоте контура, которая обратно пропорциональна его емкости, то для настройки на нулевые биения необходимо плавно **увеличивать** отсчет по лимбу. При этом тон сигнала, слышимого в телефоне, должен постепенно понижался до полного прекращения звука.

3.3.3 Если емкость исследуемого образца C_x при комнатной температуре не оговорена, то измерить ее с помощью прибора Е9-4 или другого прибора.

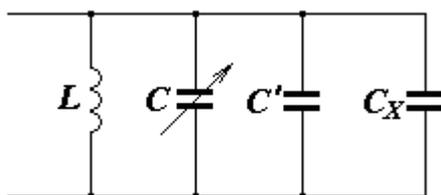


Рисунок 3.4 – Схема колебательного контура с учетом паразитной емкости

3.3.4 Пересчитать емкость образца в единицы (деления) шкалы переменного конденсатора по формуле

$$\alpha_x = \frac{C_x}{k}, \quad (4.1)$$

где C_x – измеренная емкость образца, $n\Phi$;

k – цена деления шкалы переменного конденсатора, $n\Phi/\text{деление}$. Она находится по таблице на приборе.

3.3.5 Подключить образец к выводам генератора, убрать специальную изоляционную прокладку. Чтобы после подключения образца измерения производились при заданной частоте, нужно емкость переменного конденсатора уменьшить на величину емкости образца C_x . Для этого отсчет по шкале лимба прибора нужно **увеличить** на величину α_x и настроиться на нулевые биения, как указано в пункте 3.3.2. Записать отсчет α по шкале переменного конденсатора в таблицу 3.1 при комнатной температуре.

3.3.6 Включить нагреватель термостата. В процессе нагревания образца **непрерывно** вести подстройку на нулевые биения. Отсчеты производить через каждые 5°C до 140°C . Результаты измерений внести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты измерений и расчетов

Номер измерений	$t, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \text{дел.}$	$\Delta\alpha, \text{дел.}$	$C, n\Phi$	$TKE \cdot 10^3, 1/\text{K}$	Примечание
-----------------	---------------------	-----------------------	-----------------------------	------------	------------------------------	------------

1						$S = \dots\dots\dots \text{м}^2$
2						$h = \dots\dots\dots \text{м}$
3						Материал....
...						.
N						Частота...
						...

4 ЗАДАНИЕ

4.1 Произвести измерения на образце материала.

4.2 Рассчитать емкость и ТКЕ образца при всех температурах по методике, приведенной ниже.

При температуре t_{n+1} емкость образца C_{n+1} (рисунок 4.1) будет равна

$$C_{n+1} = C_n + \Delta C_n, \quad (4.1)$$

где n – номер измерения.

Величина и знак ΔC_n находятся по результатам измерений

$$\Delta C_n = k \cdot (\alpha_{n+1} - \alpha_n) = k \cdot \Delta \alpha_n. \quad (4.2)$$

Следовательно,

$$C_{n+1} = C_n + k \cdot \Delta \alpha_n. \quad (4.3)$$

Температурный коэффициент емкости, соответственно, равен

$$TKE = \frac{\Delta C_n}{C_n \cdot \Delta t} = \frac{k \cdot \Delta \alpha}{C_n \cdot \Delta t}. \quad (4.4)$$

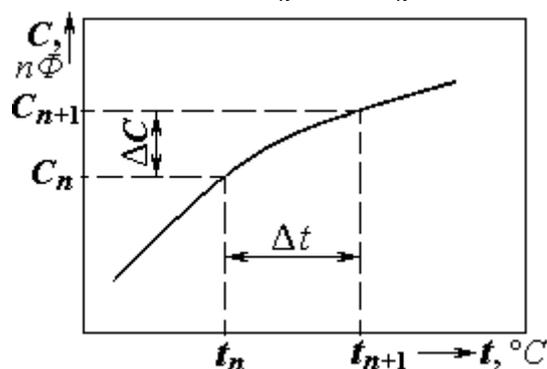


Рисунок 4.1 – К расчету емкости и ТКЕ образца

4.4 Построить графики зависимости C и TKE от температуры t и объяснить полученные результаты.

4.5 Произвести расчеты свойств комбинированного диэлектрика по заданию преподавателя.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- 5.1 Что такое $TK\epsilon$?
- 5.2 Какую информацию несет $TK\epsilon$?
- 5.3 Какого порядка $TK\epsilon$ у практически используемых диэлектриков?
- 5.4 При каких механизмах поляризации $TK\epsilon$ положителен и при каких отрицателен?
- 5.5 Как по графику $\epsilon = f(t)$ рассчитать $TK\epsilon$?
- 5.6 Как рассчитать ϵ и $TK\epsilon$ смесей? Напишите формулы.
- 5.7 Как связаны между собой TKE и $TK\epsilon$?
- 5.8 Объясните принцип измерений TKE методом нулевых биений.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники.- С-П.: Изд-во «Лань», 2003. – 367 с.
- 2 Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергоиздат, 1982. –320 с.
- 3 Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы: Учеб. пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 340 с.
- 4 Кузевных Н.И., Солдатова Л.Ю. Радиоматериалы и радиокомпоненты: Учебное пособие для студентов радиотехнических специальностей. – Томск: ТУСУР, 2012. – 177 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: edu.tusur.ru/training/publications/2733.
- 5 Кузевных Н.И. Общие требования и правила оформления отчетов по лабораторным работам: Метод. указания по оформлению отчетов по лабораторным работам для студентов всех специальностей. – Томск: ТУСУР, 2012. – 12 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: edu.tusur.ru/training/publications/3890

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Вариант 1

При температуре t емкость конденсатора равна C , а температурный коэффициент емкости TKE (таблица А.1). Диэлектрик конденсатора изготовлен из мелкодисперсной смеси двух веществ. Одно из них вы исследуете в лабораторной работе. Свойства другого не известны, но в смеси его содержится N %.

Рассчитайте диэлектрическую проницаемость и температурный коэффициент диэлектрической проницаемости неизвестного вещества при температуре t . Диэлектрическая проницаемость смеси при температуре t равна ϵ .

Таблица А.1 – Исходные данные для расчетов варианта 1

Номер варианта	$t, ^\circ\text{C}$	$C, \text{нФ}$	$TKE, 1/\text{K}$	ϵ	$N, \%$
1.1	90	220	$+0,8 \cdot 10^{-3}$	164	92
1.2	95	470	$-2,7 \cdot 10^{-4}$	170	94
1.3	105	80	$+8,32 \cdot 10^{-3}$	39,9	77,6
1.4	80	50	0	71,3	96,4
1.5	75	270	$+2,2 \cdot 10^{-4}$	38	86

Вариант 2

Из исследуемого вами материала необходимо изготовить пенопласт, у которого при температуре t температурный коэффициент диэлектрической проницаемости равен $TК\epsilon$ (таблица А.2). Рассчитайте плотность и диэлектрическую проницаемость пенопласта. Плотность исследуемого материала $D = 1,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Таблица А.2 – Исходные данные для расчетов варианта 2

Номер варианта	21	22	23	24	25
$t, ^\circ\text{C}$	85	95	80	75	100
$TК\epsilon \cdot 10^3, 1/\text{K}$	5	8,8	1,2	0,7	12

Вариант 3

Требуется конденсатор, у которого на частоте f при рабочей температуре t температурный коэффициент емкости равен TKE (таблица А.3).

Какое следует взять соотношение по объему компонентов смеси, состоящей из порошка керамики (наполнителя) и синтетической смолы (связующего

вещества). Свойства керамики приведены на рисунках А.1 и А.2. Свойства смолы измеряются при выполнении лабораторной работы.

Таблица А.3 – Исходные данные для расчетов варианта 3

Номер варианта	31	32	33	34	35
$t, ^\circ\text{C}$	75	80	80	85	95
$\text{TKE} \cdot 10^3, 1/\text{K}$	5	8,8	1,2	0,7	12
$f, \text{кГц}$	142	142	125	125	142
Наполнитель	Рис. А.2	Рис. А.1	Рис. А.2	Рис. А.2	Рис. А.1

Рассчитайте диэлектрическую проницаемость смеси при рабочей температуре и выбранном состоянии компонентов, а также диэлектрическую проницаемость при 20°C .

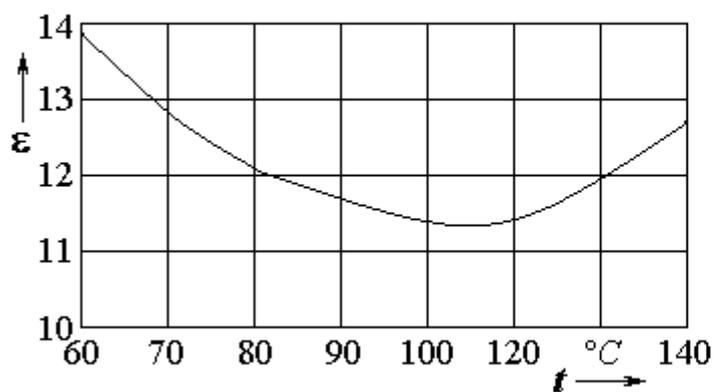


Рисунок А.1

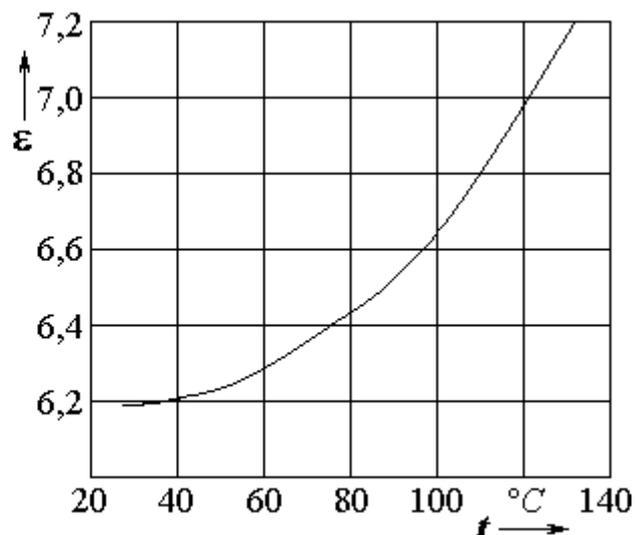


Рисунок А.2

Вариант 4

При температуре t у цилиндрического конденсатора (рисунок А.4) емкость равна C . Геометрические размеры его указаны в таблице А.4, а диэлектрик выполнен из мелкодисперсной смеси исследуемого вами вещества и керамики в равных частях. Зависимость ϵ керамики от температуры представлена на рисунке А.3. Рассчитайте температурный коэффициент диэлектрической проницаемости смеси при температуре t .

Таблица А.4 – Исходные данные для расчетов

Номер варианта	$t, ^\circ\text{C}$	$C, \text{нФ}$	$D, \text{мм}$	$d, \text{мм}$	$L, \text{мм}$	$l, \text{мм}$
4.1	105	23	21	8,2	100	74
4.2	90	14,6	12	4,1	75	58
4.3	75	110	7,2	6	64	60
4.4	95	230	8,8	7,8	86	80
4.5	86	400	16	14,2	130	120

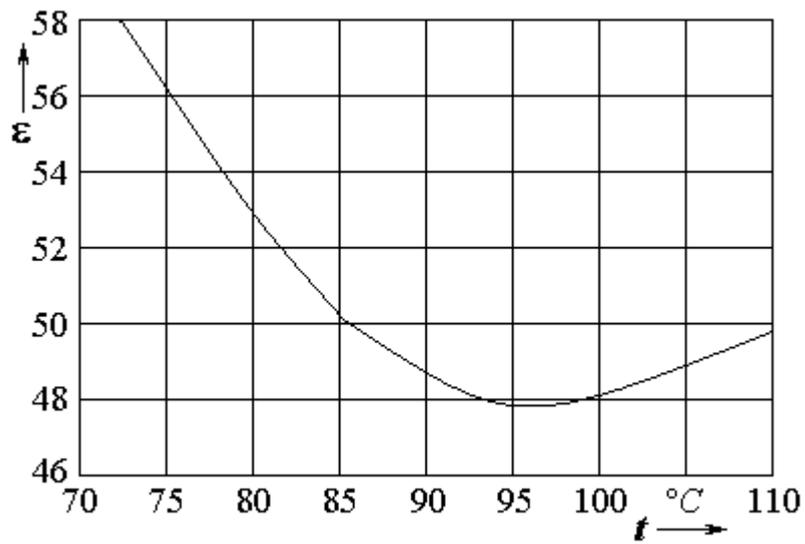


Рисунок А.3

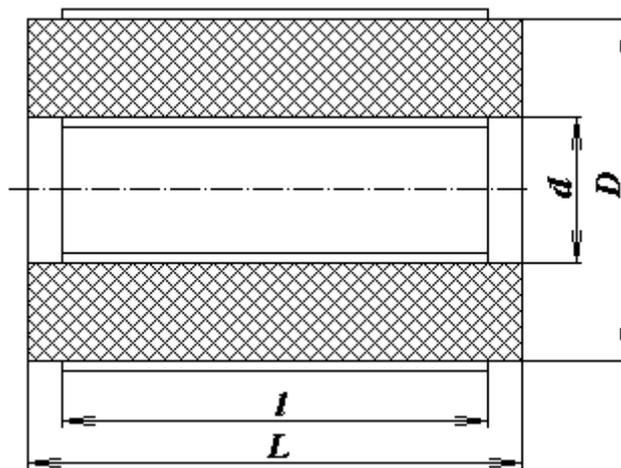


Рисунок А.4