

«Йога. Западный Госуда

Оксана Геннадьевна
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Протокол заседания

«Юго-Западный
государственный
университет»
(ЮЗГУ)

ОГРН 1034637015785

Министерство
образования
и высшего образования
Российской Федерации

* выдано
* инициально

28

«28» 05 2023 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Методические указания по выполнению лабораторной работы № 2
по дисциплине «Конструкционные и биоматериалы»

Курск 2023

УДК 621.382

Составители: О.Е. Ключникова, Н.А. Перьков

Рецензент

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

Исследование частотной зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков: методические указания по выполнению лабораторной работы № 2 по дисциплине «Конструкционные и биоматериалы»/ Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: О. Е. Ключникова, Н. А. Перьков. – Курск, 2023. – 25 с.

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

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

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

Текст печатается в авторской редакции.

Подписано печать . Формат 60х84 1/16.
Усл. печ. л. 1,45. Уч.-изд. л. 1,31 Тираж 100 экз. Заказ *301* Бесплатно
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение влияния на диэлектрическую проницаемость ε и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ твердых диэлектриков частоты изменения внешнего электрического поля.

2. Освоение методики экспериментального определения диэлектрической проницаемости ε и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$.

2. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При помещении диэлектрика в электрическое поле, в нем протекают процессы поляризации, связанные со смещением составляющих диэлектрик заряженных частиц q_i на некоторые расстояния Δx (обычно соизмеримые с постоянной решетки) относительно положения равновесия этих частиц или с поворотом дипольных молекул, который также можно представить как смещение пары заряженных частиц $\pm q_i$. Если в исходном состоянии диэлектрик не обладал ни зарядом, ни электрическим моментом, то в результате однородной поляризации единице объема будет соответствовать электрический момент (поляризованность):

$$P = \frac{1}{\Delta V} \cdot \sum_{i=1}^n q_i \cdot \Delta x_i = \frac{1}{\Delta V} \cdot \sum_{i=1}^n P_i, \quad (2.1)$$

где P_i – электрический дипольный момент.

Поляризованность – величина, численно характеризующая интенсивность поляризации диэлектрика. На рис. 2.1 схематически показана поляризация ионная (рис. 2.1, а), электронная (рис. 2.1, б), дипольная (рис. 2.1, в) и полностью поляризованный диэлектрик (рис. 2.1, г).

В наиболее простом случае однородного поля (плоского конденсатора) с объемом диэлектрика между электродами $V = S \cdot h$ поляризованность равна:

$$P = \frac{\sum P_i}{V} = \frac{\sum P_i}{S \cdot h},$$

а $\sum P_i$ равна произведению поверхностной плотности $\sigma_{свз}$ связанных электрических зарядов на поверхностях раздела диэлектрика и электродов (в глубине диэлектрика положительные и отрицательные заряды взаимно компенсируют друг друга) на объем диэлектрика:

$$\sum P_i = \sigma_{свз} \cdot S \cdot h,$$

т.е. поляризованность равна поверхностной плотности $\sigma_{свз}$ связанных зарядов в диэлектрике.

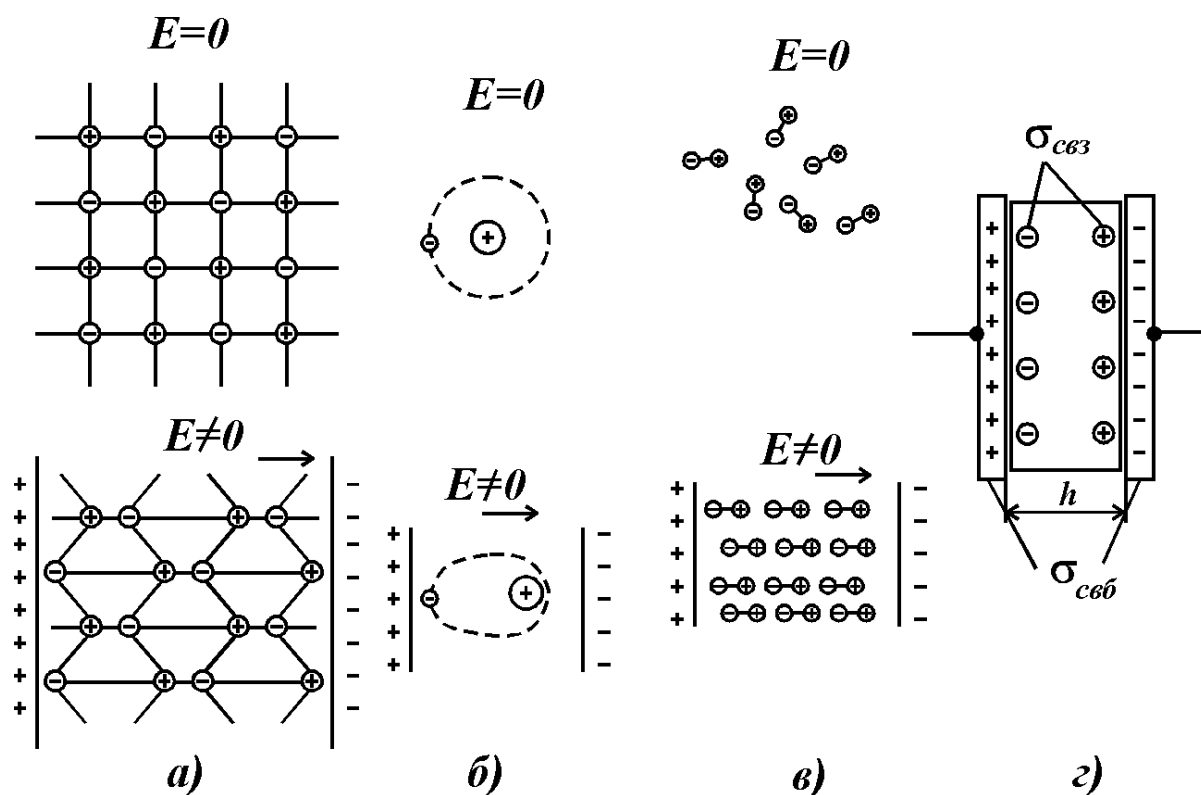


Рис. 2.1. Механизмы поляризации

Суммарное изменение заряда на электродах плоского конденсатора за счет поляризации диэлектрика:

$$\Delta Q = \left(\sum_i q_i \cdot \Delta x_i \right) / h = S \cdot P, \quad (2.2)$$

где S – площадь электродов.

В отсутствии диэлектрика заряд на электродах:

$$Q_0 = S \cdot \varepsilon_0 \cdot E = S \cdot \varepsilon_0 \cdot U/h = U \cdot C_0,$$

где U – приложенное напряжение, В;

h – расстояние между электродами, м;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума (электрическая постоянная);

$C_0 = \varepsilon_0 \cdot S/h$ – емкость воздушного конденсатора. Таким образом, при наличии диэлектрика:

$$Q_d = Q_0 + \Delta Q = S \cdot (\varepsilon_0 \cdot E + P) = S \cdot D, \quad (2.3)$$

где $D = \varepsilon_0 \cdot E + P$ – электростатическая индукция.

Отношение емкости конденсатора с диэлектриком $C_d = Q_d / U$ к емкости конденсатора без диэлектрика $C_0 = Q_0 / U$ называется относительной диэлектрической проницаемостью:

$$\varepsilon = C_d / C_0 = (\varepsilon_0 \cdot E + P) / \varepsilon_0 E = 1 + P / \varepsilon_0 E. \quad (2.4)$$

Для линейных диэлектриков поляризованность линейно зависит от напряженности среднего макроскопического поля $E = U / h$:

$$P = \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot E, \quad (2.5)$$

где χ – электрическая восприимчивость.

У нелинейных диэлектриков (к которым, в частности, относятся сегнетоэлектрики) пропорциональности между P и E не наблюдается. Таким образом, у линейных диэлектриков $\varepsilon = 1 + \chi$; $D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot E$ и поляризованный диэлектрик характеризуется либо поляризованностью $P = \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot E$, либо индукцией $D = \varepsilon_0 \cdot E + P = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot E$, а величина $\varepsilon = 1 + \chi$ определяет относительное увеличение емкости конденсатора при заполнении диэлектриком пространства между его обкладками. Поляризованный диэлектрик может быть представлен совокупностью связанных зарядов:

$$\sigma_{свз} = -(P_{2n} - P_{1n}); \quad (2.6)$$

$$\rho_{свз} = -\text{div} P, \quad (2.7)$$

где $\sigma_{свз}$ – поверхностная плотность связанных зарядов;

$\rho_{свз}$ – объемная плотность связанных зарядов;

P_{1n}, P_{2n} – нормальные составляющие поляризованности по обе стороны от границы разрыва вектора P .

Напряженность электрического поля, при таком представлении поляризованного диэлектрика определяется суммированием полей как от свободных, так и от связанных зарядов, тогда как вектор

индукции $\vec{D}$ определяется только свободными (истинными) зарядами: $\operatorname{div} \vec{D} = \rho_{св}$, $D_{2n} - D_{1n} = \sigma_{св}$, $\varepsilon_0 \cdot \operatorname{div} \vec{E} = \rho_{св} + \rho_{свз}$, $\varepsilon_0 \cdot (E_{2n} - E_{1n}) = \sigma_{св} + \sigma_{свз}$.

В частности для плоского конденсатора при однородной поляризации диэлектрика $\rho_{свз} = \operatorname{div} \vec{P} = 0$, и связанные заряды образуются только на границах диэлектрика с электродами с поверхностной плотностью $\sigma_{свз} = \pm \vec{P}$. Эти заряды создают так называемое деполяризующее поле $E_{ден} = -P/\varepsilon_0$, обратное по направлению поле, образованному свободными зарядами $E_0 = \sigma_{св} / \varepsilon_0 = D / \varepsilon_0$, находящимися на электродах конденсатора. В результате суммирования полей получаем среднюю макроскопическую напряженность поля в диэлектрике

$$E_e = E_0 - E_{ден} = (1/\varepsilon_0) \cdot (D - P) = U/h. \quad (2.8)$$

Результаты экспериментальных исследований позволяют разделить диэлектрики на три основные группы:

- 1) неполярные вещества с гомеополярными связями между атомами в молекулах и кристаллах – 1 группа;
- 2) неполярные вещества с гетерополярными (ионными) связями между атомами – 2 группа;
- 3) полярные вещества (с гомеополярной или гетерополярной связью), имеющие группы с дипольным моментом – 3 группа.

Поляризация в диэлектриках первой группы обусловлена только смещением электронных оболочек относительно ядер (электронная поляризация). К диэлектрикам такого типа относятся инертные и двухатомные газы, углеводородные жидкости, неполярные полимеры (полиэтилен, полистирол, тетрафторэтилен), алмаз, сера и др.

В диэлектриках, относящихся ко второй группе, кроме электронной составляющей поляризуемости имеется ионная (атомная) составляющая, связанная со смещением (или вынужденными колебаниями) под действием поля ионов противоположного знака, входящих в состав молекул, кристаллов. К диэлектрикам с ионным типом связи относятся некоторые газы (CO_2), кристаллические вещества с плотной упаковкой ионов: кварц, слюда,

глет (PbO), корунд (Al_2O_3), рутил (TiO_2), перовскит ($CaTiO_3$), неорганические стекла, многие виды керамики и др.

В диэлектриках, относящихся к третьей группе, кроме электронной и ионной составляющих поляризуемости имеется ориентационная составляющая, обусловленная ориентацией дипольных групп молекул, обладавших дипольным моментом. Во внешнем электрическом поле на постоянные дипольные моменты молекул действуют моменты сил (рис. 2.2) стремящиеся ориентировать дипольные моменты в направлении напряженности поля. В результате молекулы переориентируются так, что бесконечно малые физические элементы объема диэлектрика приобретают дипольные моменты, т.е. диэлектрик поляризуется.

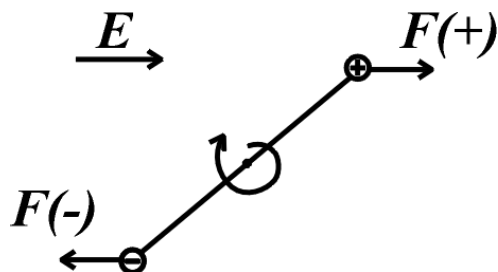


Рис. 2.2. Моменты сил, действующие на диполь

В жидких и твердых веществах ориентация диполей происходит с некоторым торможением со стороны окружающих молекул, что вызывает запаздывание установления поляризации (так называемые релаксационные процессы). К диэлектрикам этой группы относятся нитробензол, кремний органические соединения, фенолоформальдегидные смолы, эпоксидные компаунды, капрон и др.

Полярные (дипольные) диэлектрики обладают повышенной диэлектрической проницаемостью по сравнению с неполярными, что и определяет их широкое использование в производстве конденсаторов (полярные пропиточные жидкости, целлюлоза, полярные полимеры - полиэтилен-терафталат (лавсан), поликарбонат и др.).

Кроме указанных видов поляризации различают:

- 1) ионно-релаксационную (при этом ионы смещаются на расстояния, превышающие постоянную решетки);
- 2) электронно-релаксационную (рутил (TiO_2), загрязненный примесями);
- 3) резонансную;
- 4) миграционную (наблюдается у материалов с неоднородной структурой);
- 5) спонтанную поляризацию (наблюдается в сегнетоэлектриках).

Подчеркнем, что связанные заряды $\sigma_{свз}$ существуют только благодаря свободным зарядам $\sigma_{свз}$, которые могут перемещаться в проводнике "свободно" куда угодно. Если, разрядив конденсатор, удалить $\sigma_{свз}$ то $\sigma_{свз}$ также исчезнет, но он не стечет по проводу, которым разряжают конденсатор, а уйдет назад внутрь материала, за счет релаксации (ослабления) поляризации в диэлектрике.

Механизмы поляризации условно изображают в виде эквивалентной схемы диэлектрика (рис. 2.3), на которой активные сопротивления моделируют процесс диссипации энергии при релаксационных видах поляризации. Для большей наглядности объединяют, соответственно, емкости мгновенной (упругая поляризация) и замедленной (релаксационная) поляризация, а также активные сопротивления, эквивалентные потерям энергии при замедленных видах поляризации (рис. 2.4). Токи смещения при различных видах поляризации называют абсорбционными токами $I_{абс}$.

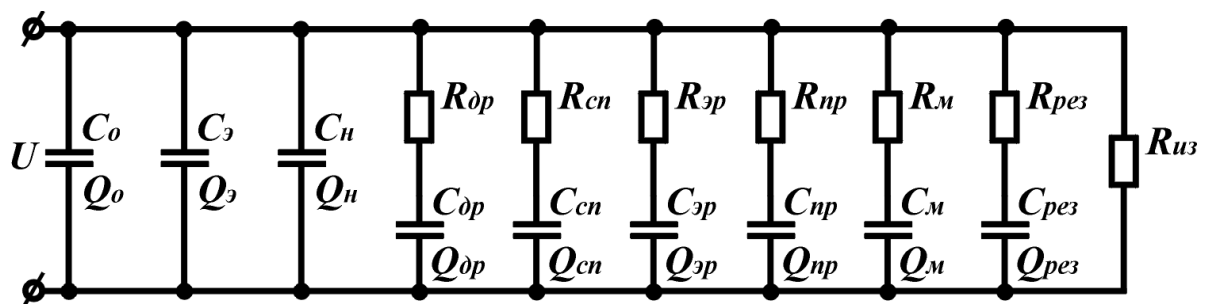


Рис. 2.3. Эквивалентная схема механизмов поляризации

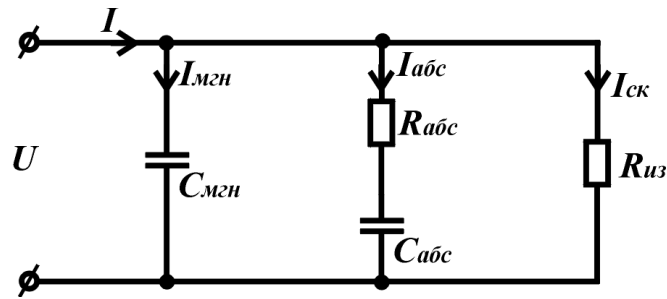


Рис. 2.4. Эквивалентная схема потерь энергии

В синусоидальном переменном электрическом поле $E(t) = E_m \cdot \cos \omega t$ поляризованность диэлектрика меняется с течением времени по синусоидальному закону, однако из-за некоторой инерционности поляризационных процессов может отставать по фазе от $E(t)$. С отставанием поляризованности по фазе от $E(t)$ связаны релаксационные диэлектрические потери. Кроме того, параллельно с изменением поляризованности диэлектрика происходит утечка тока через сопротивление изоляции, что приводит к дополнительным потерям - потерям проводимости. Оба этих эффекта суммируются, в результате индукция $D(t)$ оказывается сдвинутой по фазе на некоторый угол δ – по сравнению с полем $E(t)$ так, что $D(t) = D_m \cdot \cos(\omega t - \delta)$, а ток через конденсатор с диэлектриком $i(t) = S(dD(t)/dt) = -SD_m \cdot \omega \cdot \sin(\omega t - \delta)$.

Для описания процессов в конденсаторах при синусоидальном напряжении применяют символический метод. В этом случае:

$$D(t) = D_m \cdot \exp[j(\omega t - \delta)] = \varepsilon_0 \cdot \dot{\varepsilon}(\omega) \cdot E_m \cdot \exp(j\omega t); \quad (2.9)$$

$$I(t) = S \cdot (dD/dt) = Y \cdot U, \quad (2.10)$$

где Y – комплексная проводимость конденсатора;

$\dot{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega)$ – комплексная диэлектрическая проницаемость;

$\varepsilon''(\omega)$ – фактор (коэффициент) потерь на частоте ω .

Откуда $\varepsilon' = D_m \cos \delta / \varepsilon_0 E_m$; $\varepsilon'' = D_m \sin \delta / \varepsilon_0 E_m$.

Экспериментальные методы исследования диэлектриков в переменном электрическом поле заключаются в определении вещественной ε' и мнимой ε'' частей комплексной диэлектрической проницаемости. Как показал Дебай:

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\text{мгн}} + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_{\text{мгн}}}{1 + (\omega\tau)^2}; \quad (2.11)$$

$$\varepsilon'' = \frac{1}{\varepsilon_0 \omega \rho} + \frac{(\varepsilon_S - \varepsilon_{\text{мгн}})\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} = \varepsilon''_{\text{ск}} + \varepsilon_{\text{абс}}, \quad (2.12)$$

где ρ – удельное сопротивление диэлектрика;

τ – время релаксации ориентационной (дипольной) поляризации, численно равное времени, за которое ориентационная поляризованность достигнет $(e-1)/e$ своего максимального значения при включении постоянного электрического поля;

$\varepsilon_{\text{мгн}}$ – диэлектрическая проницаемость, обусловленная мгновенными видами поляризации (электронной и ионной – упругая проницаемость);

ε_S – диэлектрическая проницаемость в постоянном электрическом поле (статическая проницаемость);

$\varepsilon_{\text{абс}}$ – дипольная (ориентационная) проницаемость, связанная с запаздывающими (релаксационными) процессами поляризации диэлектрика (токи абсорбции);

$\varepsilon''_{\text{ск}}$ – составляющая фактора потерь, связанная со сквозной проводимостью диэлектрика.

На рис. 2.5 представлены графики зависимостей ε' и ε'' от частоты ω внешнего электрического поля.

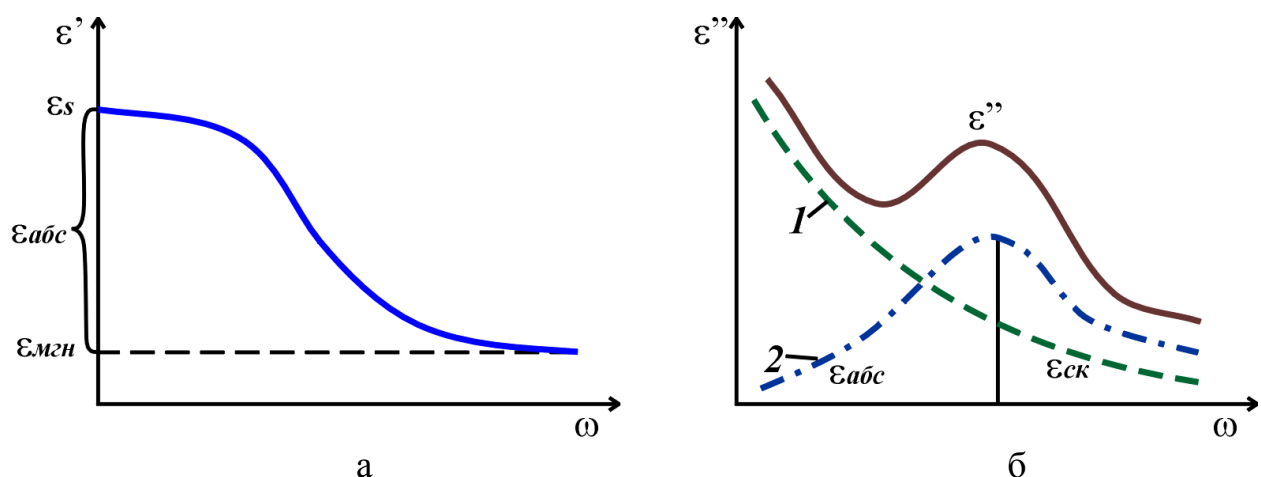


Рис. 2.5. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости: а – действительная часть, б – мнимая часть

В посеянном электрическом поле ($\omega = 0$) $\varepsilon' = \varepsilon_S = \varepsilon_{\text{мн}} + \varepsilon_{\text{абс}}$. При больших частотах изменения электрического поля (вплоть до оптического диапазона) ε' в основном определяется мгновенными видами поляризации: $\varepsilon' \rightarrow \varepsilon_{\text{мн}}$ при $\omega \rightarrow \infty$.

Кривая 1 на графике зависимости ε'' от частоты характеризует уменьшение потерь сквозной проводимости диэлектрика. Кривая 2, имеющая ярко выраженный максимум при $\omega = \tau^{-1}$ иллюстрирует частотную зависимость замедленных видов поляризации диэлектрика $\varepsilon_{\text{абс}}$.

На низкой частоте (менее 10^{-3} Гц) значения ε'' в основном определяются проводимостью диэлектрика, т.е. $\varepsilon'' = \varepsilon''_{\text{ск}}$, при этом $\varepsilon''_{\text{абс}} \approx 0$.

Составляющая $\varepsilon_{\text{ск}}$ изменяется обратно пропорционально частоте:

$$\varepsilon''_{\text{ск}}(\omega) = 1 / \varepsilon_0 \cdot \omega \cdot \rho. \quad (2.13)$$

По этой формуле можно определить значения $\varepsilon_{\text{ск}}$ для всех частот. Значения $\varepsilon_{\text{абс}}(\omega)$ равны разности между экспериментально полученными значениями $\varepsilon''(\omega)$ и соответствующими значениями $\varepsilon''_{\text{ск}}(\omega)$:

$$\varepsilon_{\text{абс}}(\omega) = \varepsilon''(\omega) - \varepsilon''_{\text{ск}}(\omega). \quad (2.14)$$

Так как

$$\varepsilon''_{\text{абс}} = \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_{\text{мн}}}{1 + (\omega\tau)^2} \cdot \omega\tau = (\varepsilon' - \varepsilon_{\text{мн}}) \cdot \omega\tau \quad (2.15)$$

или

$$\frac{\varepsilon''_{\text{абс}}}{\varepsilon' - \varepsilon_{\text{мн}}} = \omega\tau, \quad (2.16)$$

то

$$\lg \frac{\varepsilon''_{\text{абс}}}{\varepsilon' - \varepsilon_{\text{мн}}} = \lg \tau + \lg \omega.$$

И откладывая по оси ординат значения $y = \lg(\varepsilon''_{\text{абс}}) / (\varepsilon' - \varepsilon_{\text{мн}})$, а по оси абсцисс - значения $x = \lg \omega$, по пересечению графика $y = \lg \tau + x$ с осью

$x=0$ можно определить значение $\lg \tau$, откуда потенцированием найти время релаксации τ .

Обобщенные малосигнальные зависимости составляющих комплексной диэлектрической проницаемости имеют вид, показанный на рис. 2.6.

Колебательные выбросы на частотной зависимости ε' связаны с резонными ионной и электронной поляризациями, сопровождающимися потерями энергии. Поэтому на частотах $10^{13} \div 10^{14}$ и $10^{14} \div 10^{16}$ Гц наблюдаются максимумы в частотной зависимости ε'' . Такие же максимумы в частотной зависимости ε'' наблюдаются на частотах, где выключаются механизмы релаксационных и миграционной поляризаций.

Так для каждого конкретного диэлектрика характерны определенные виды поляризации, и частотные зависимости ε' и ε'' получается из обобщенных зависимостей путем учета только этих видов поляризации. При этом следует учитывать, что электронная поляризация наблюдается у всех без исключения диэлектриков.

На рис. 2.6 показано приращение вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости за счет:

ε_z – электронной поляризации;

ε_u – ионной поляризации;

$\sum \varepsilon_{rel}$ – релаксационных видов поляризации (электронно-, ионно-, и дипольно-релаксационной);

ε_m – миграционной поляризации.

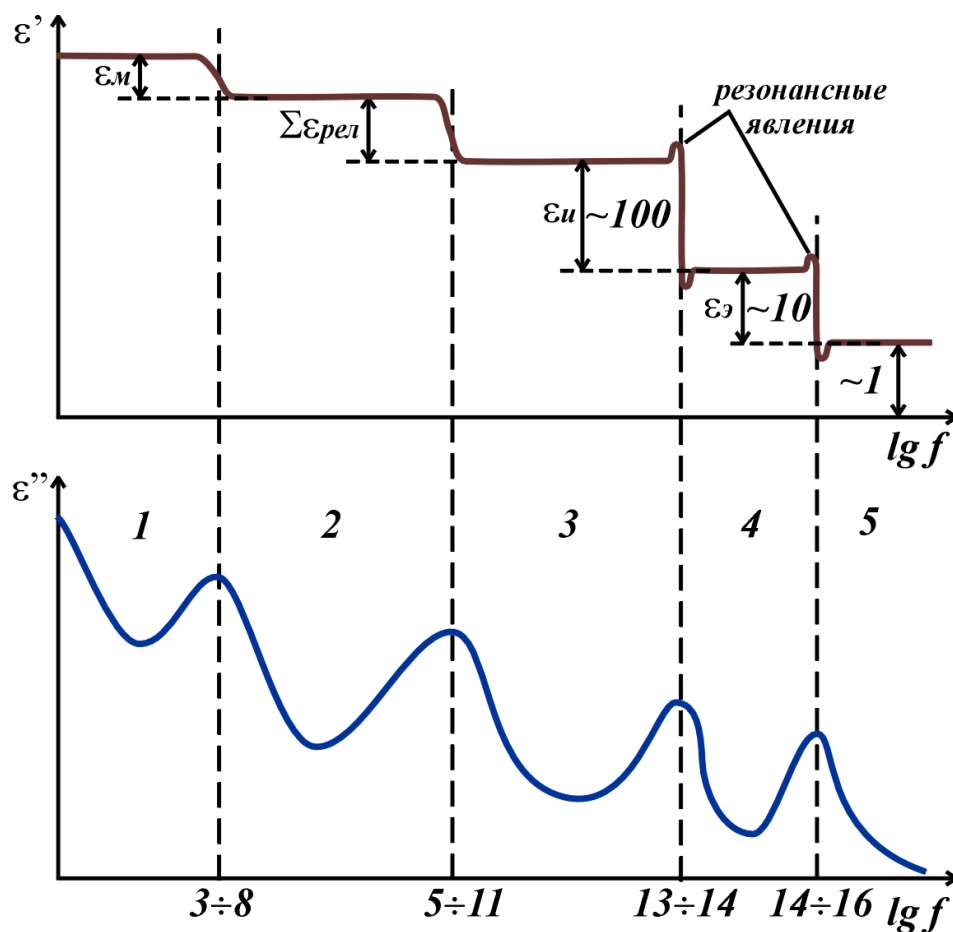


Рис. 2.6. Обобщенные малосигнальные частотные зависимости составляющих комплексной диэлектрической проницаемости

В области низких частот (участки 1 и 2) все процессы поляризации успевают развиваться в полной мере и ε' имеет максимальное значение. Между участками 2 и 3 внешнее поле изменяется настолько быстро, что релаксационные процессы успевают развиваться только частично. Поэтому ε' уменьшается. Такое явление наблюдается в области частот, где $\omega = 1/\tau$, т.е. скорость изменения внешнего поля соизмерима со скоростью установления поляризации.

В области высоких частот (участки 3 и 4 релаксационные) процессы поляризации не проявляются и ε обусловлена только упругими процессами поляризации.

В инженерной практике чаще всего для характеристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле используют угол диэлектрических потерь, а также тангенс этого угла.

Углом диэлектрических потерь δ называют угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи,

В случае идеального диэлектрика вектор тока в такой цепи опережает вектор напряжения на угол, $\varphi = 90^\circ$ при этом угол δ равен нулю.

Чем больше рассеивается в диэлектрике мощность, тем меньше угол сдвига фаз φ и тем больше угол диэлектрических потерь и его функция $\operatorname{tg} \delta$.

Тангенс угла диэлектрических потерь непосредственно входит в формулу для рассеиваемой в диэлектрике мощности, поэтому практически наиболее часто пользуются этой характеристикой.

Для инженерных расчетов вводят две схемы, условно отображающие потери в диэлектриках: схему с идеальным конденсатором без потерь, с параллельно включенным ему активным сопротивлением и схему с идеальным конденсатором без потерь с последовательно включенным сопротивлением (рис.2.7).

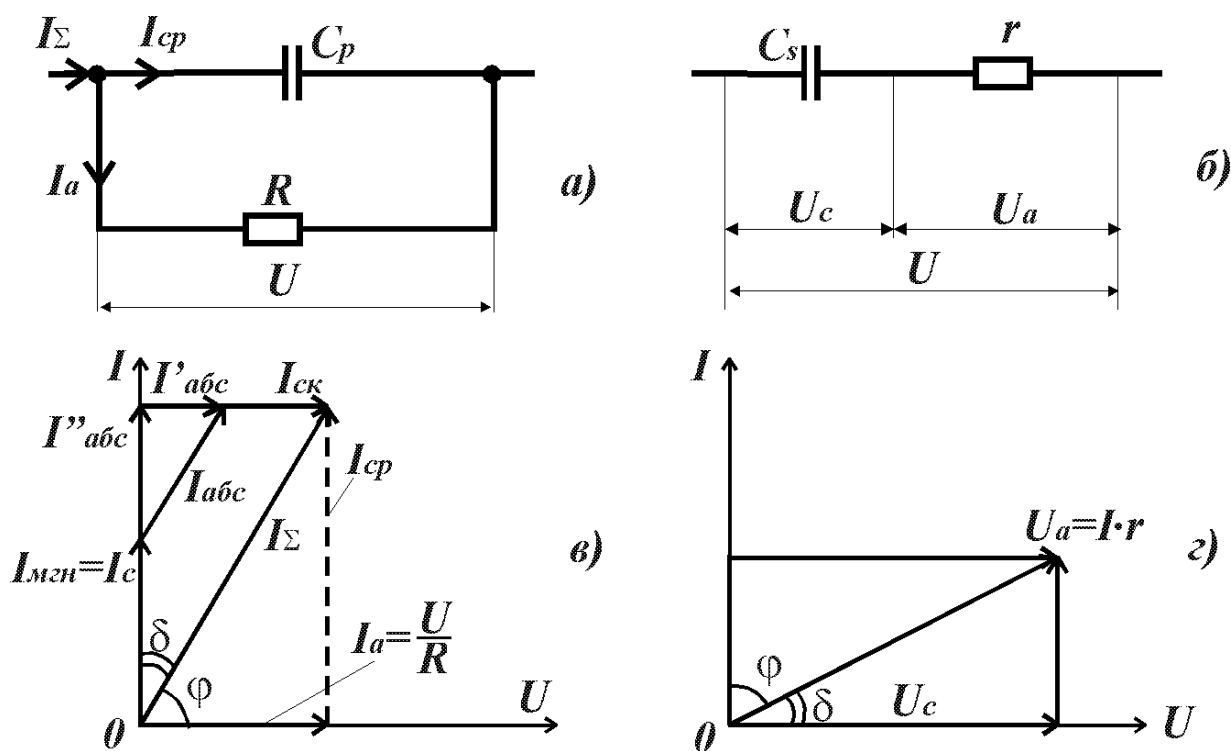


Рис. 2.7. Схемы замещения: а – параллельная, б – последовательная; в, г – векторные диаграммы

Таким образом, при работе диэлектрика под синусоидальным напряжением, через него идут три синусоидальных тока (см. рис. 2.7):

1) емкостный ток, опережающий напряжение на 90°

$$I_0 = v \cdot \omega \cdot C_3,$$

где C_3 – геометрическая емкость, соответствующая емкости, измеренной при весьма высокой частоте $\omega \rightarrow \infty$, когда релаксационная поляризация практически уже не имеет места;

2) ток абсорбции $I_{a\bar{b}c}$ с активным

$$I'_{a\bar{b}c} = v \cdot S \cdot \frac{\omega^2 \tau^2}{\omega^2 \tau^2 + 1}$$

и реактивным

$$I''_{a\bar{b}c} = v \cdot S \cdot \frac{\omega \tau}{\omega^2 \tau^2 + 1} = \frac{I'_{a\bar{b}c}}{\omega \tau}$$

компонентами,

где τ – постоянная времени затухания тока абсорбции;

S – имеющая размерность проводимости величина, в общем случае не равная проводимости для сквозного тока.

Сквозной ток проводимости $I_{с\bar{к}\bar{в}} = U \cdot \sigma = U / R$. Следовательно, наличие тока абсорбции приводит к увеличению измеренных на постоянном напряжении параметров участка изоляции – как активной проводимости сверх значения G , так и емкости сверх значения C_ϵ .

Частотная зависимость емкости:

$$C = C_\epsilon + \frac{S \tau}{\omega^2 \tau^2 + 1}.$$

Наибольшее значение емкости при $\omega = 0$ (постоянное напряжение) $C_0 = C_\epsilon + S \cdot \tau$, а наименьшее при $\omega \rightarrow \infty$: $C_\infty = C_\epsilon$.

Из векторной диаграммы для параллельной схемы:

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_{cp} = 1 / (\omega \cdot C_p \cdot R); \quad (2.17)$$

$$P_a = U \cdot I_a = U^2 \cdot \omega \cdot C_p \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (2.18)$$

Для последовательной схемы:

$$\operatorname{tg} \delta = U_a / U_c = \omega \cdot C_s \cdot v; \quad (2.19)$$

$$P_a = U^2 \cdot \omega \cdot C_s \cdot \operatorname{tg} \delta / (1 + \operatorname{tg}^2 \delta). \quad (2.20)$$

При малых потерях $C_p \cong C_s = C$ тогда выражение для мощности, рассеиваемой в диэлектрике, можно применять следующее выражение:

$$P_a = U^2 \cdot \omega \cdot c \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (2.21)$$

Емкость диэлектрика с большими потерями, находящегося под воздействием переменного поля становится условной величиной и зависит от выбора той или иной эквивалентной схемы.

Соотношения между C_p и C_s и между R и r имеют вид:

$$C_p = C_s / (1 + \operatorname{tg}^2 \delta); \quad (2.22)$$

$$R = r \cdot (1 + 1 / \operatorname{tg}^2 \delta). \quad (2.23)$$

Для большинства диэлектриков параметры эквивалентной схемы зависят от частоты. Поэтому, определив каким-либо методом значения емкости и эквивалентного сопротивления, для данного материала (конденсатора) при низкой частоте, нельзя использовать эти параметры для расчета угла потерь при другой частоте. Поэтому свойства материала необходимо определять при той частоте, на которой он будет работать в устройстве.

Связь между тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ и вещественной ε' и мнимой ε'' составляющими комплексной диэлектрической проницаемости имеет следующий вид:

$$\operatorname{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon'. \quad (2.24)$$

Величина, обратная тангенсу угла потерь, называется добротностью изоляции:

$$Q = 1 / \operatorname{tg} \delta = I_p / I_a = (I_c + I''_{abc}) / (I_{ck} + I'_{abc}). \quad (2.25)$$

Значения $\operatorname{tg} \delta$ для лучших электроизоляционных материалов, применяемых в технике высоких частот и высоких напряжений, составляют тысячные и десятитысячные доли единицы. Для материалов более низкого качества $\operatorname{tg} \sim 0,1$ и больше.

Если в диэлектрике релаксационные процессы поляризации отсутствуют, то $I \cong 0$, а ε не зависит от частоты. В этом случае:

$$I_a = I_{ck} = U / R = U \cdot S / (\rho \cdot d);$$

$$I_c = U \cdot \omega C = U \cdot 2\pi f \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S / d,$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление, $\text{Ом} \cdot \text{м}$;

S – площадь электродов, м^2 ;

d – толщина диэлектрика, м ;

f – частота, Гц;

$\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – диэлектрическая постоянная. Так как удельное электрическое сопротивление ρ не зависит, от частоты, то и мощность диэлектрических потерь в материалах с упругими видами поляризации с частотой не изменяется (рис. 2.8):

$$P = U \cdot I_{\text{ск}} = U^2 \cdot S / (\rho \cdot d).$$

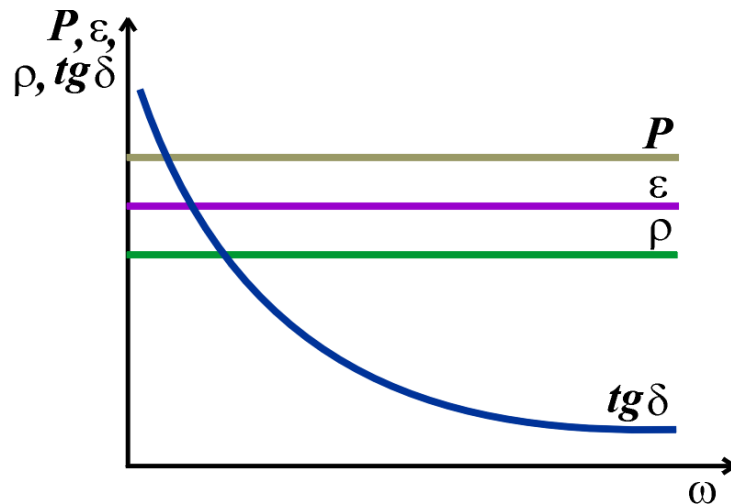


Рис. 2.8. Частотные зависимости поляризации P , диэлектрической проницаемости ε , сопротивления ρ , и угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$.

При этом тангенс угла потерь:

$$\text{tg } \delta = I_a / I_c = 1,86 \cdot 10^{10} / (f \cdot \rho \cdot \varepsilon) -$$

есть обратная функция частоты (см. рис. 2.8).

При наличии кроме упругих и релаксационных процессов поляризации на графике зависимости мощности диэлектрических потерь от частоты можно выделить три участка (рис. 2.9).

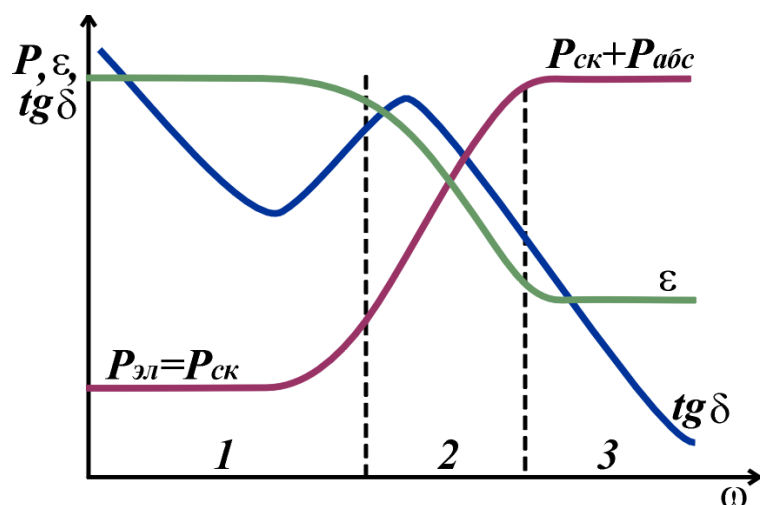


Рис. 2.9. Частотная зависимость диэлектрических потерь

Участок 1 (область низких частот). Поляризация изменяется в фазе с приложенным напряжением и релаксационные потери отсутствуют. Диэлектрические потери существуют только за счет проводимости и не зависят от частоты.

Участок 2 ($\omega\tau \approx 1$). Скорости изменения напряжения соизмеримы со скоростью установления поляризации (обратно пропорциональной времени релаксации τ). Дипольная поляризация с ростом частоты все более отстает по фазе от напряжения (ε уменьшается). К потерям на электропроводность добавляются релаксационные потери, величина которых растет с частотой.

Релаксационные потери достигают наибольшей величины, когда сдвиг по фазе становится максимальным ($\delta = 90^\circ$), и далее остаются постоянными (участок 3). Исследования показывают, что в рассматриваемом случае на графике зависимости $\text{tg } \delta$ от частоты имеется максимум в области $\omega \cdot \tau = 1$ (см. рис. 2.9).

Для измерения свойств материалов широко применяются резонансные методы, в частности измерители добротности (куметры), с помощью которых можно проводить измерения добротности, емкости и индуктивности. На рис. 2.10 приведена схема измерительного контура куметра.

В измерительный контур от генератора G через катушку связи L_1 вводится напряжение $U_0 = R_0 \cdot I$. $R_L \gg R_0$ весь, измеряемый миллиамперметром PA , ток будет протекать по сопротивлению R_0 .

Поддерживая ток 1 постоянным, добиваются, чтобы в процессе всех измерений напряжение, вводимое в контур, оставалось постоянным.

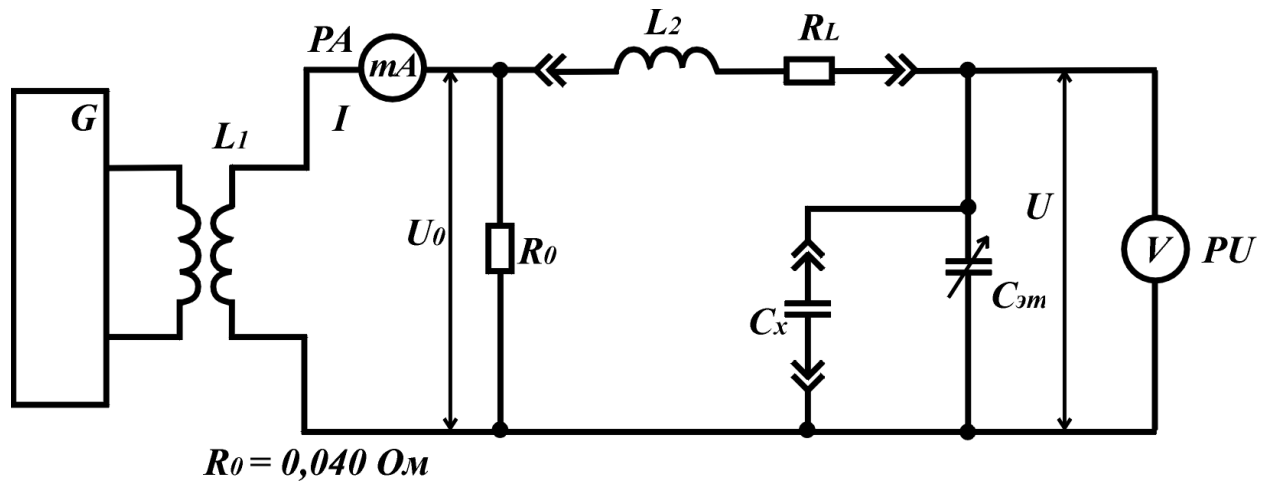


Рис. 2.10. Схема измерителя добротности

Общее сопротивление измерительного контура при переменном напряжении:

$$Z = \sqrt{R_L^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_{\text{ЭТ}}} \right)^2}.$$

Изменяя емкость переменного конденсатора $C_{\text{ЭТ}}$, можно измерительный контур настроить в резонанс при заданной частоте. Наибольшее напряжение на конденсаторе соответствует состоянию резонанса (рис. 2.11):

$$\omega \cdot L_2 = \frac{1}{\omega \cdot C_{\text{ЭТ}}}.$$

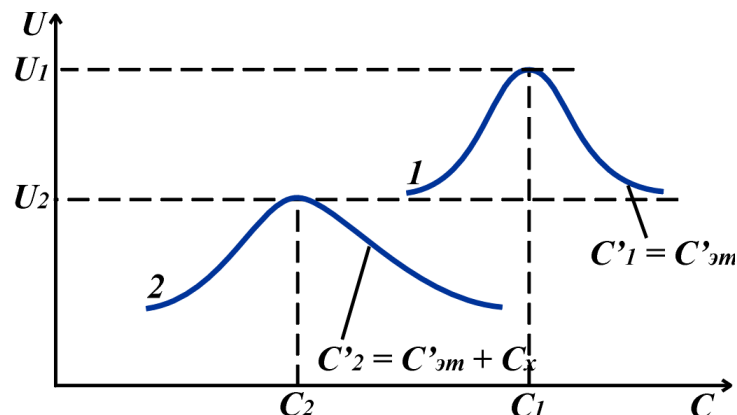


Рис. 2.11. Резонансная настройка контура эквивалентной ёмкостью

Следовательно, сопротивление контура $Z = R_L$, а ток в контуре $I_K = U_0 / R_L$, а напряжение, измеряемое вольтметром $PU : U = I_K / (\omega C_{ЭТ})$. Так как добротность контура $Q = \omega L_2 / R_L$, то $R_L = \omega \cdot L_2 / Q$.

Подставим выражение для I и R_L в формулу напряжения на измерительном конденсаторе:

$$U = \frac{I_K}{\omega C_{ЭТ}} = \frac{U_0}{R_L \cdot \omega \cdot C_{ЭТ}} = \frac{U_0 \cdot Q}{\omega \cdot L_2 \cdot \omega \cdot C_{ЭТ}}.$$

При резонансе $\omega L_2 = \frac{1}{\omega \cdot C_{ЭТ}}$, т.е. $\omega L_2 \cdot \omega \cdot C_{ЭТ} = 1$.

Окончательно получаем $U = U_0 \cdot Q$.

Таким образом, если поддерживать во всех измерениях $U_0 = const$, то шкалу вольтметра можно проградуировать в величинах добротности Q .

Подключим к клеммам C_X исследуемый конденсатор, вторично в резонанс контур. Резонансная кривая сместится ниже и влево на максимум за счет потерь в образце и будет более сглаженной. Так как настройка производится при той же частоте, ω и индуктивности L_2 , то из условия резонанса следует, что должно выполняться равенство $C_1 = C_2 + C_X$, отсюда

$$C_X = C_1 - C_2. \quad (2.27)$$

При этом

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_1}{(C_1 - C_2)} \cdot \frac{(Q_1 - Q_2)}{Q_1 \cdot Q_2}. \quad (2.28)$$

3. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

При подготовке к лабораторной работе следует проработать следующие вопросы:

- 1) в чем заключаются физические особенности свойств диэлектрических материалов в переменных электрических полях;
- 2) диэлектрическая проницаемость в зависимости от агрегатного состояния и структуры;
- 3) диэлектрические потери, коэффициент диэлектрических потерь, виды потерь в зависимости от агрегатного состояния

материалов и структуры;

4) какие факторы влияют на диэлектрическую проницаемость и диэлектрические потери, и каковы закономерности этого влияния;

5) изучить методику проведения измерения на лабораторной установке.

4. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В состав лабораторной установки входят:

1) измеритель добротности низкочастотный Е4-10;

2) измеритель добротности Е4-7;

3) измерительная камера с электродами и соединительными приводами.

5. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования используются диски из следующих материалов: 1) гетинакс; 2) стеклотекстолит; 3) фторопласт - 4.

Набор исследуемых материалов может быть уточнен преподавателем, ведущим занятие.

6. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. В соответствии с инструкцией к измерительному прибору подготовить измеритель добротности к работе.

2. Настроить контур прибора в резонанс без образца (порядок настройки см. в техническом описании куметра). Значения C_1 и Q_1 записать в таблицу (см. приложение).

3. Установить образец исследуемого материала между электродами, подключить электроды к зажимам C_x измерителя добротности и, не изменяя частоты, вновь настроить контур в резонанс. Значения C_2 и Q_2 занести в таблицу.

4. Снять зависимость емкости C и добротности Q от частоты при комнатной температуре (материалы и диапазон частот задаются преподавателем). Результаты измерений занести в табл. 1.

5. По формулам (2.4) и (2.28) рассчитать значения $\varepsilon(\omega)$ и $\operatorname{tg}\delta(\omega)$.
Результаты расчетов занести в табл. 1.

6. Повторить пункты 2-5, для всех исследуемых материалов.

7. Построить графики зависимости $\varepsilon, \operatorname{tg}\delta, P$ от частоты.
Пояснить полученные результаты.

8. По формулам (2.11), (2.12) и (2.24) определить значения вещественной ε' и мнимой ε'' частей комплексной диэлектрической проницаемости исследуемых материалов.

9. Выделить из мнимой части $\varepsilon''(\omega)$ составляющую $\varepsilon''_{\text{ск}}(\omega)$ (формула (2.13)), связанную с проводимостью диэлектрика, и составляющую $\varepsilon''_{\text{абс}}$, (формула (2.14)), связанную с релаксационными потерями.

10. Считая, что на низкой частоте значения ε'' в основном определяются проводимостью диэлектрика, т.е. $\varepsilon''(\omega_{\min}) = \varepsilon''_{\text{ск}}$, $\varepsilon''_{\text{абс}}(\omega_{\min}) = 0$, и, учитывая соотношения (2.13) к (2.14), определить значения $\varepsilon''_{\text{ск}}(\omega)$ и $\varepsilon''_{\text{абс}}(\omega)$ для всех частот. Результаты занести в таблицу.

12. Построить в логарифмическом масштабе графики частотных зависимостей $\varepsilon'(\omega), \varepsilon''(\omega), \varepsilon''_{\text{ск}}(\omega), \varepsilon''_{\text{абс}}(\omega)$.

13. Вычислить для каждой частоты значение комплекса $\varepsilon''_{\text{абс}}/(\varepsilon' - \varepsilon_{\text{мн}})$. Построив в двойном логарифмическом масштабе график зависимости этого комплекса от частоты, по пересечению этого графика с осью ординат оценить время релаксации дипольной поляризации. Пояснить полученные результаты.

14. Оценить погрешности измеренных и рассчитанных величин.

15. Изложить выводы по полученным экспериментальным результатам.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое поляризация диэлектрика? Когда она возникает? Как определяется поляризованность материала?

2. Как происходит релаксация поляризации в диэлектрике после

снятия электрического поля? Что происходит со связанными и свободными зарядами? В чем заключается различие между ними?

3. Какой параметр диэлектрического материала характеризует его емкостные свойства? Значения этого параметра для различных материалов.

4. Что такое электростатическая индукция?

5. Чему равно поле в диэлектрике?

6. Как диэлектрическая проницаемость зависит от свойств диэлектрика, помещаемого в электрическое поле?

7. Какие механизмы поляризации различают в твердых диэлектриках? Эквивалентная схема диэлектрика. Примеры материалов с различными механизмами поляризации.

8. В чем отличие поведения диэлектрика в переменном электрическом поле от поведения в постоянном поле? Какие токи при этом протекают через диэлектрик? Что такое комплексная диэлектрическая проницаемость? Чем обусловлены ее составляющие?

9. Что такое статическая, ориентационная и упругая диэлектрическая проницаемость? Как они связаны с вещественной и мнимой частями комплексной диэлектрической проницаемости?

10. Какова частотная зависимость составляющих комплексной диэлектрической проницаемости? Как определяется время релаксации?

11. Что такое угол диэлектрических потерь? Чему он равен в случае идеального диэлектрика? Можно ли отождествлять диэлектрические потери и тангенс угла диэлектрических потерь?

12. Как связан тангенс угла диэлектрических потерь с составляющими комплексной диэлектрической проницаемости и удельной объемной проводимостью диэлектрика?

13. Как P , ε , $\operatorname{tg}\delta$ зависят от частоты, если потери в образце обусловлены только электропроводностью?

14. Нарисуйте графики зависимости P , ε , $\operatorname{tg}\delta$ от частоты для материала, у которого возможна релаксационная поляризация.

15. Почему большие диэлектрические потери в

электроизоляционном материале недопустимы?

16. В чем суть методики измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь?

17. Почему необходимо проводить калибровку измерителя добротности?

8. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы материаловедения : [Электронный ресурс] : учебное пособие / Е.А. Астафьева, Ф.М. Носков, В.И. Аникина, В.С. Казаков, О.Ю. Фоменко ; Министерство образования и науки Российской Федерации ; Сибирский Федеральный университет. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2013. – 152 с. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=364047>.

2. Биомедицинское материаловедение [Текст]: учебное пособие / С. П. Вихров [и др.]. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 383 с.

3. Корневский, Николай Алексеевич. Биотехнические системы медицинского назначения [Текст]: учебник / Н. А. Корневский, Е. П. Попечителей. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 688 с. – Текст : непосредственный.

4. ГОСТ 6433.1-71. Методы электрических испытаний материалов и условия испытаний.

ПРИЛОЖЕНИЕ

УКАЗАНИЯ К ОТЧЕТУ

Все необходимые расчеты следует приводить в отчете. Результаты измерений и расчетов рекомендуется оформить в виде таблиц.

Таблица 1

Результаты исследования частотной зависимости параметров (наименование материала)

№ п/п	f , Гн	C_1 , пФ	C_2 , пФ	C_X , пФ	ε	ε'	$\varepsilon''_{ск}$	ε''_{abc}	Q_1	Q_2	Q	$tg\delta$	Примечание
													$S =$ $h =$