

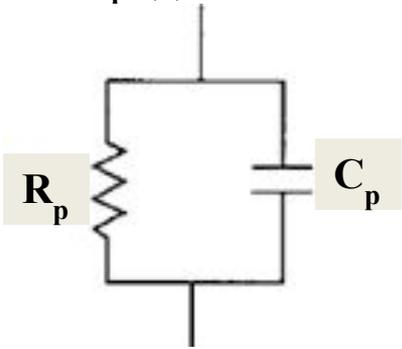
Задачи ДП

Диапазон радиочастот: ($10^2 \dots 10^9$) Гц

- Все виды потерь в конденсаторе с диэлектриком:
 - ✓ потери на электропроводность;
 - ✓ релаксационные потери;
 - ✓ ионизационные потери;
 - ✓ резонансные потери;
 - ✓ потери в обкладках и контактах
- В диапазоне радиочастот ($10^2 \dots 10^9$) Гц отсутствуют:
 - резонансные потери;
 - потери, обусловленные миграционной поляризацией, приэлектродной поляризацией; поляризацией Максвелла-Вагнера. Вклад этих видов потерь значим в области инфранизких частот: 10^{-6} Гц ÷ 10^2 Гц.

Если известно, что в данном диэлектрике потери в широком диапазоне частот определяются только затратами энергии на сквозную электропроводность, то справедлива параллельная схема замещения. Потери в таком конденсаторе определяются выражением:

$$P_a = \frac{U^2}{R}$$



Импеданс для параллельной R-C цепочки определяется вкладом резистивной и емкостной составляющих:

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + i\omega C_1}$$

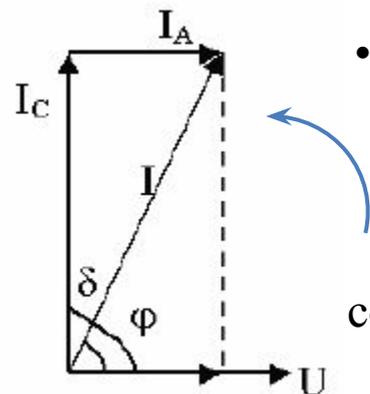
Реальная и мнимая составляющие импеданса, соответственно, описываются выражениями:

$$Z' = \frac{R_1}{1 + (\omega C_1 R_1)^2}$$

$$Z'' = -i \frac{\omega C_1 R_1^2}{1 + (\omega C_1 R_1)^2}$$

Постоянная времени разрядки цепи определяется соотношением:

$$\tau = R_p C_p$$



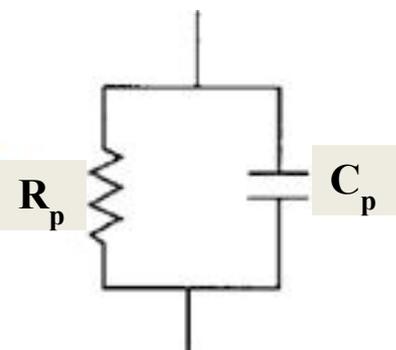
- Значения соответствующих токов равны:

$$I = U/z; \quad I_a = U/R; \quad I_r = U/x_c = U\omega C_p$$

где z – полное сопротивление, x_c – реактивное (емкостное) сопротивление конденсатора с диэлектриком, ω -угловая частота, $\omega = 2\pi f$.

- Из векторной диаграммы для параллельной схемы замещения диэлектрика $\text{tg}\delta$ равен отношению активного и реактивного токов:

$$\text{tg}\delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{\frac{U}{R}}{U\omega C_p} = \frac{1}{\omega C_p R}$$



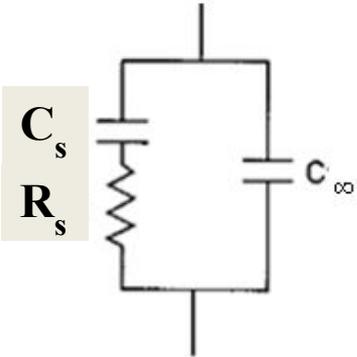
- Выражение для расчета полных диэлектрических потерь:

$$P_a = U \cdot I_a = U \cdot I_r \cdot \text{tg}\delta; \quad P_a = U^2 \omega C_p \text{tg}\delta$$

- Параметры параллельной схемы замещения:

$$C_p = \frac{P_a}{U^2 \omega \text{tg}\delta}$$

$$R_p = \frac{1}{\omega C_p \text{tg}\delta} = \frac{U^2 \omega \text{tg}\delta}{\omega P_a \text{tg}\delta} = \frac{U^2}{P_a}$$



Последовательная R-C цепочка хорошо описывает диэлектрические потери, вызванные релаксационными видами поляризации.

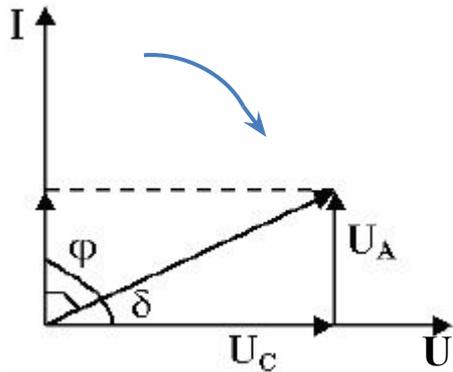
Последовательная $R_1 - C_1$ цепочка соответствует простейшему *уравнению Дебая*, описывающему **проводимость** диэлектрика с одним механизмом дипольной поляризации или с несколькими механизмами дипольной поляризации, если они характеризуются **одним временем релаксации τ** или очень близкими значениями времен релаксации.

Вклад упругих видов поляризации в суммарную поляризацию, а также геометрической емкости в измеряемом диэлектрическом отклике учитывается введением в схему замещения дополнительной емкости C_∞ параллельно к последовательной цепочке C_1-R_1 , то есть $C_\infty = C_{эл.} + C_{ион.} + C_{геом.}$

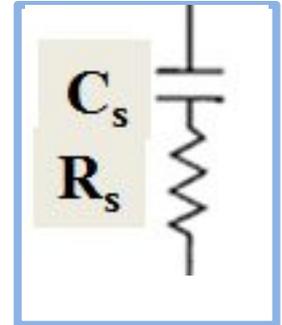
Выражение для адмиттанса в такой схеме замещения имеет вид:

$$Y = i\omega C_\infty + \frac{i\omega C_1(1 - i\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad \text{где} \quad \tau = R_s C_s$$

Векторная диаграмма токов для последовательной R-C цепочки



$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_a}{U_c} = \frac{IR_s}{I \frac{1}{\omega C_s}} = \omega C_s R_s.$$



$$P_a = U_a I = IR_s \frac{U}{z} = \frac{U}{z} R_s \frac{U}{z} = \frac{U^2}{z^2} R_s = \frac{U^2 \omega C_s \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}.$$

$$C_s = \frac{P_a (1 + \operatorname{tg}^2 \delta)}{U^2 \omega \operatorname{tg} \delta}$$

$$R_s = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega C_s} = \frac{U^2 \operatorname{tg}^2 \delta}{P_a (1 + \operatorname{tg}^2 \delta)}$$

Сопоставим значения эквивалентных параметров С и R для параллельной и последовательной схем замещения

а) параллельная схема:

$$C_p = \frac{P_a}{U^2 \omega \operatorname{tg} \delta},$$

$$R_p = \frac{1}{\omega C_p \operatorname{tg} \delta} = \frac{U^2 \omega \operatorname{tg} \delta}{\omega P_a \operatorname{tg} \delta} = \frac{U^2}{P_a}$$

б) последовательная схема:

$$C_s = \frac{P_a (1 + \operatorname{tg}^2 \delta)}{U^2 \omega \operatorname{tg} \delta}$$

$$R_s = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega C_s} = \frac{U^2 \operatorname{tg}^2 \delta}{P_a (1 + \operatorname{tg}^2 \delta)}$$

Соответственно:

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta},$$

$$R_p = R_s \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta} \right)$$

Соотношения между C_p и C_s , а также R и R_s :

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}, \quad R_p = R_s \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta} \right)$$

- Для **высококачественных** диэлектриков ($\operatorname{tg}^2 \delta \ll 1$) можно пренебречь значением $\operatorname{tg}^2 \delta$ по сравнению с единицей в формулах и считать

$$C_p \approx C_s = C; \quad R_p \gg R_s;$$

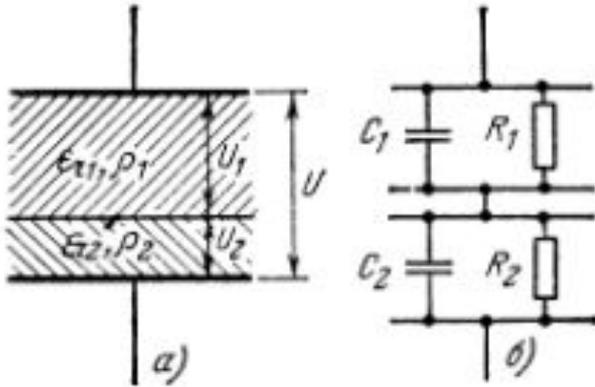
- Сопротивление R_p в параллельной схеме во много раз больше сопротивления R_s для последовательной схемы.
- Выражения для мощности, рассеиваемой в диэлектрике, в этом случае будут также одинаковы для обеих схем:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta,$$

- У диэлектриков с большими потерями (большой $\operatorname{tg} \delta$) емкость, а, следовательно, и диэлектрическая проницаемость при переменном напряжении становятся **условной величиной, зависящей от выбора той или иной схемы замещения.**
- **$\operatorname{tg} \delta$ от выбора схемы замещения не зависит.**

- **Технические диэлектрики практически всегда неоднородны:** наличие пор, неоднородное распределение примесей, наличие температурных градиентов, различие в свойствах объема диэлектрика и его поверхностных слоев, влияние контакта с электродами.
- **Потери Максвелла-Вагнера** особенно интенсивно проявляются в **керамических материалах гетерогенного типа с зернистой структурой.** Существование неоднородностей возможно и в **высококачественных изоляционных керамических материалах, например, при наличии градиента температуры.**
- Так как **время установления межповерхностной (миграционной) поляризации достаточно велико,** то исследовать **диэлектрические потери, обусловленные этой поляризацией, возможно либо на инфранизких частотах (10^{-2} - 10 Гц), либо при высоких температурах.**
- Простейший пример таких потерь может быть реализован для случая **двухслойного конденсатора.**

Рассмотрим токи абсорбции в неоднородном диэлектрике в постоянном поле



Рассмотрим простую схему неоднородного диэлектрика – двухслойный диэлектрик, слои которого характеризуются разным набором ϵ_i , ρ_i и, соответственно, R_i , C_i

□ В начальный момент времени после подачи постоянного напряжения падения напряжения на слоях распределяться обратно пропорционально емкостям слоев.

□ По окончании переходного периода в результате перераспределения зарядов падения напряжения распределяться уже прямо пропорционально сопротивлениям слоев.

НО: перераспределение (миграция) зарядов в структуре будет отсутствовать, если постоянные времени слоев равны друг другу:

$$R_1 C_1 = R_2 C_2.$$

В общем случае для любой многокомпонентной системы условие отсутствия тока абсорбции, обусловленного поляризацией **Максвелла-Вагнера**:

$$\epsilon_i \rho_i = \text{const.}$$

Очевидно, что такого тока абсорбции не будет и в случае однородности диэлектрика.

Основные соотношения

$$P_a = \frac{U^2}{R_{нз}}$$

$$P = U \times I_a = U \times I_p \times \operatorname{tg} \delta$$

$$P = U^2 \omega \varepsilon C_0 \operatorname{tg} \delta$$

$$p = P / V = E^2 \omega \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{tg} \delta$$

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_p = P_a / P_p$$

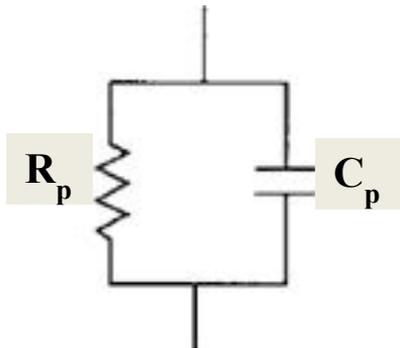
$$K_\delta = \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta = \varepsilon''$$

$$p_{\text{пост}} = E^2 / \rho = E^2 \gamma$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

$$Q = \frac{U_{C_s}}{U_r} = \frac{I \frac{1}{\omega C_s}}{I r} = \frac{1}{\omega C_s r} = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \operatorname{ctg} \delta.$$

Для параллельной схемы замещения:



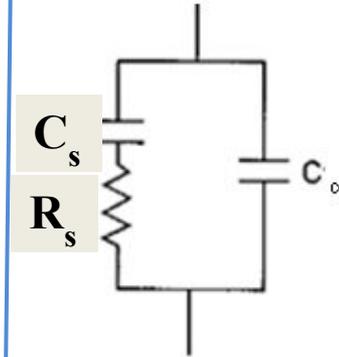
$$\tau = R_p C_p$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{(\omega C_p R_p)}$$

$$P_a = \frac{U^2}{R_p}$$

$$P_a = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta$$

Для последовательной схемы замещения:



$$\tau = R_s C_s$$

$$C_\infty = C_{\text{эл.}} + C_{\text{ион.}} + C_{\text{геом.}}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_s R_s$$

$$P_a = \frac{U^2 \omega C_s \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}$$

Задачи ДП-2021

1. В дисковом керамическом конденсаторе емкостью **100 пФ**, включенном на переменное напряжение **100 В** с частотой **1 МГц**, рассеивается мощность **10^{-3} Вт**. Определить реактивную мощность, тангенс угла диэлектрических потерь и добротность конденсатора.
2. В дисковом керамическом конденсаторе емкостью **100 пФ**, включенном на переменное напряжение **100В** с частотой **1 МГц**, рассеивается мощность **10^{-3} Вт**. Определите **удельные потери** в диэлектрике, если его диэлектрическая проницаемость **$\epsilon = 150$** , электрическая прочность **$E_{пр} = 10$ МВ/м** и запас по электрической прочности **$K = 10$** . (Напоминание: электрическая прочность оценивается по амплитудному значению приложенного напряжения, а приборы меряют действующее значение напряжения).
3. Тангенс угла диэлектрических потерь неполярного диэлектрика на частоте **50 Гц** равен **10^{-3}** . Вычислить активную мощность рассеяния в конденсаторе из этого диэлектрика на частоте **1 кГц**, если емкость этого конденсатора **1000 пФ**, а напряжение на его обкладках **1 кВ**.

4. Определить коэффициент потерь **неполярного** диэлектрика на частоте 1 МГц, если удельное сопротивление материала равно 10^{15} Ом·м.

5. При измерении параметров керамического конденсатора на частоте $f = 1$ кГц получено: емкость $C = 1000$ пФ; $\text{tg}\delta = 8 \cdot 10^{-3}$. Определить эквивалентное последовательное (r_s) и эквивалентное параллельное (R_p) сопротивление на этой частоте.

6. Какие дополнительные диэлектрические потери возникают в двухслойном диэлектрике, слои которого параллельны плоскости электродов? При отношении удельных проводимостей слоев $(\gamma_1/\gamma_2) = 3$ каким должно быть отношение диэлектрических проницаемостей слоев, чтобы дополнительные диэлектрические потери не возникали?

7. Вычислить на частоте **50 Гц** тангенс угла диэлектрических потерь хорошо очищенного трансформаторного масла, удельное объемное сопротивление которого равно **10^{12} Ом·м** и диэлектрическая проницаемость **$\epsilon = 2,2$** .

8. Определить удельные диэлектрические потери в плоском конденсаторе, изготовленном из пленки полистирола толщиной **20 мкм**, если на конденсатор подано напряжение **2В** частотой **2МГц** (для полистирола **$\epsilon = 2,5$; $\text{tg}\delta = 2 \cdot 10^{-4}$**).

9. Рассчитайте активную мощность потерь при постоянном напряжении **$U_0 = 100$ В** для конденсатора на основе пленки полиэтилентерефталата емкостью **$C = 1$ мкФ**. Постоянная времени этого конденсатора **$\tau = 10000$ МОм·мкФ**. Какой ток будет протекать по выводам этого конденсатора, если его включить в сеть с напряжением **220 В** и частотой **50 Гц**?