

ЛЕКЦІЯ 7

3.4.4. Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат

Для аналізу діелектричних втрат у діелектрику розглянемо для сталого режиму дві схеми заміщення і їхні векторні діаграми – паралельну й послідовну.

Розглянемо паралельну схему (рис.2.4).

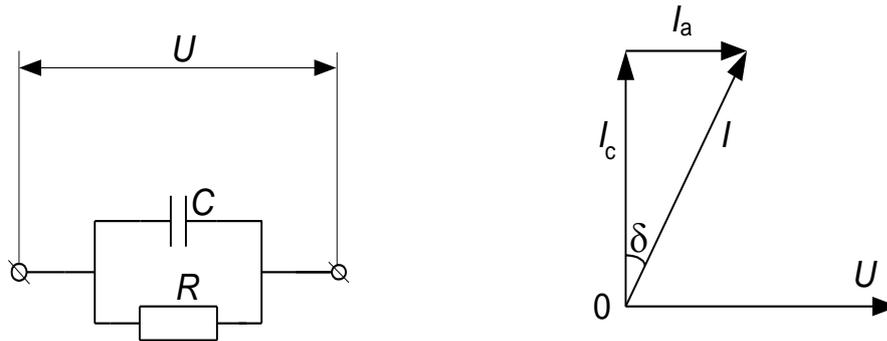


Рис.2.4. Паралельна схема заміщення діелектрика й векторна діаграма.

Підберемо R і C так, щоб струм I по фазі й амплітуді був таким же, як у реальному діелектрику.

Визначимо питомі втрати в діелектрику:

$$P_a = I_a \cdot U,$$

де: I_a – активний струм через діелектрик;

U – напруга, прикладена до діелектрика.

Реактивний струм через діелектрик буде дорівнювати $I_c = 2 \pi f \cdot C \cdot U$, де C - ємність конденсатора. Тоді, як видно з векторної діаграми,

$I_a = I_c \cdot \text{tg} \delta$ або $P_a = 2 \pi f C U^2 \cdot \text{tg} \delta$ - потужність, що виділяється у конденсаторі.

Якщо конденсатор плаский, то його ємність буде складати

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d},$$

де: ε – відносна діелектрична проникність діелектрика;

ε_0 – діелектрична стала;

S, d – площа та товщина діелектрика.

Питомі втрати P_y знайдемо, виходячи з того, що об'єм ізоляції $V = S \cdot d$

$$P_y = \frac{P_\alpha}{V} = \frac{2\pi f \cdot CU^2 \cdot \operatorname{tg}\delta}{S \cdot d} = \frac{2\pi f \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg}\delta \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{S \cdot d^2} = 2\pi f E^2 \operatorname{tg}\delta \varepsilon \varepsilon_0.$$

Якщо прикласти до діелектрика змінну напругу, та припустити, що абсорбційні процеси проходять повільно, то за половину періоду заряди поляризації не встигнуть зайняти кінцеві положення. Таким чином, діелектрична проникність ε , кут діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$ будуть залежати від частоти напруги, на якій ведуться дослідження, а отже, від частоти будуть залежати і питомі втрати, причому ця залежність проявляється складним чином.

Розглянемо послідовну схему (рис.2.5).

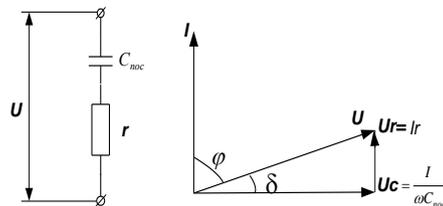


Рис.2.5. Послідовна схема заміщення діелектрика й векторна діаграма.

Для даної схеми можемо записати:

$$P_\alpha = rI^2 = r \frac{U^2}{r^2 + x^2} = \frac{r}{x} \cdot \frac{1}{x} \cdot \frac{U^2}{\frac{r^2}{x^2} + 1},$$

$$\frac{r}{x} = \operatorname{tg}\delta \quad \operatorname{tg}\delta = r \cdot 2\pi f \cdot C_{noc},$$

$$P_\alpha = \operatorname{tg}\delta \cdot 2\pi f C_{noc} \frac{U^2}{\operatorname{tg}^2\delta + 1}.$$

Установимо взаємозв'язок між параметрами послідовної й паралельної схеми. Якщо схеми еквівалентні, то потужності, що виділяються у схемах, повинні бути однакові. Також повинні бути однаковими і кути діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$ при тій же частоті та напрузі. Тоді

$$2\pi \cdot f \cdot C \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_{noc} \cdot \frac{U^2}{\operatorname{tg}^2\delta + 1}.$$

Якщо врахувати, що $\text{tg}^2\delta$ є надто малою величиною, то

$$C = \frac{C_{noc}}{\text{tg}^2\delta + 1} \approx C_{noc}.$$

Це співвідношення можна застосовувати для практичного використання.

Зпівставимо R та r для розглянутих вище схем заміщення.

$$\text{Для паралельної схеми: } \text{tg}\delta = \frac{I_\alpha}{I_c} = \frac{U}{R \cdot 2\pi \cdot f \cdot C \cdot U} \text{ або } \text{tg}\delta = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C \cdot R}.$$

$$\text{Для послідовної схеми: } 2\pi f \cdot C_{noc} \cdot r = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C \cdot R},$$

або з урахуванням $C \approx C_{noc}$, знаходимо:

$$r = \frac{1}{(2\pi f)^2 \cdot R \cdot C^2 (\text{tg}^2\delta + 1)} \cdot \frac{R}{R} = \frac{R \text{tg}^2\delta}{\text{tg}^2\delta + 1},$$

звідси $r = R \cdot \text{tg}^2\delta$.

На практиці вимірювань, щоб не оперувати малими цифрами, абсолютне значення $\text{tg}\delta$ часто прийнято виражати у відсотках.

З розгляду еквівалентних схем можна зробити ряд висновків:

- при зволоженні або нагріванні діелектрика його опори R_1 і R_2 (рис.2.2) зменшуються, отже, $\text{tg}\delta$ зростає;

- всі виміри необхідно виконувати при певній установленій частоті змінного струму;

- кут діелектричних втрат майже не залежить від геометричних розмірів однорідного діелектрика в силу пропорційності зміни активних і реактивної складових струмів (при незначній дії поверхневої провідності матеріалів);

- зосереджені дефекти діелектрика, наприклад при зволоженні, можуть бути не виявлені при вимірі $\text{tg}\delta$, тому що струми, обумовлені дефектом, можуть виявитися значно меншими струмів ємності в цілому.

Нехай ізоляція займає об'єм V , а в одиниці об'єму виділяється електрична потужність P_y , тоді потужність, що виділяється у всій ізоляції буде P_1 .

$$P_1 = V \cdot P_y = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta_1$$

Нехай в n -й частині об'єму ізоляції втрати збільшилися в K раз, тоді:

$$P_2 = (V - V \cdot n) \cdot P_y + V \cdot n \cdot K \cdot P_y = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta_2$$

Визначимо в скільки разів змінився $\operatorname{tg} \delta$:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{(V - V \cdot n) \cdot P_y + V \cdot n \cdot K \cdot P_y}{V \cdot P_y} = \frac{\operatorname{tg} \delta_2}{\operatorname{tg} \delta_1}$$

$$\operatorname{tg} \delta_2 = (1 - n + n \cdot K) \cdot \operatorname{tg} \delta_1$$

Якщо припустити, що зволожена 0,001 частина об'єму ізоляції ($n=0.001$), та втрати в цій частині об'єму ізоляції зросли в 10 разів ($K=10$), тоді:

$$\operatorname{tg} \delta_2 = 1,009 \operatorname{tg} \delta_1.$$

Як бачимо, виявити існуючими приладами таку незначну зміну $\operatorname{tg} \delta$ надто важко. Таким чином:

- $\operatorname{tg} \delta$ є інтегральною характеристикою ізоляції;
- по мірі збільшення прикладеної напруги до діелектрика відзначається досить незначна зміна $\operatorname{tg} \delta$. Лише після того як виникає іонізація у включеннях в діелектрику, що викликає додаткові втрати, $\operatorname{tg} \delta$ буде різко зростати;
- при від'ємних температурах, коли волога в діелектрику переходить у твердий стан, стан ізоляції по діелектричних втратах важко діагностувати.

При експлуатаційних вимірах кута діелектричних втрат одночасно вимірюється і ємність ізоляції, що також, у відомих межах, може служити показником стану діелектрика. При значному зволоженні діелектрика змінюється характер релаксаційного процесу, що призводить до змін ємності, які можуть служити індикатором стану ізоляції. Так, вимірюючи ємність, можна встановити об'ємне зволоження або забруднення ізоляції, рівень її старіння.

Розвиваючи методику вимірювань, засновану на дослідженні поляризаційних процесів, на практиці використовують вимірювання ємності чи опору при різних температурах або опору у деякі фіксовані моменти часу після прикладення напруги, наприклад 15 і 60 с.

Відображенням процесів поляризації є також результати ємності ізоляції при різних частотах (2, 50, 200 Гц). Порівняння отриманих результатів дає можливість оцінити ступінь зволоження ізоляції.