

## Лекція 8

### Засоби та методи вимірювання кута діелектричних витрат. Вимірювання кута діелектричних витрат та типове устаткування. Вимірювання при завадах

Тангенс кута діелектричних витрат – найважливіша характеристика ізоляції. Чим він більший, тим більші в ізоляції діелектричні втрати, які можуть бути причиною її теплового пробою.

Збільшення тангенса кута діелектричних витрат зумовлене зволоженням ізоляції, іонізацією газових включень у розшарованій ізоляції, забрудненням ізоляції. Значення  $\operatorname{tg}\delta$  залежить також від температури ізоляції, випробної напруги та її частоти.

Тангенс кута діелектричних витрат – питома величина, що характеризує загальні діелектричні втрати в об'ємі ізоляції. Тому він істотно зростає тільки в разі збільшення витрат у значній частині об'єму ізоляції. Якщо ж втрати зросли в невеликій частині її об'єму, то  $\operatorname{tg}\delta$  змінюється мало.

Проілюструємо це для випадків паралельного й послідовного розташування діелектриків з різними значеннями тангенса кута діелектричних витрат (рис. 3.17).

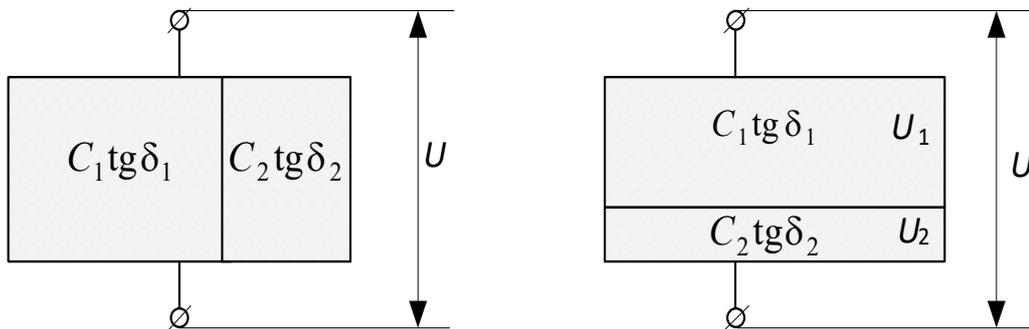


Рис. 3.17. Паралельне й послідовне розташування діелектриків з різними характеристиками

У першому випадку (паралельного розташування)

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{C_1 \operatorname{tg}\delta_1 + C_2 \operatorname{tg}\delta_2}{C_1 + C_2}. \quad (3.4.10)$$

Якщо об'єм  $V_2$  значно менший об'єму першого шару  $V_1$ , то й  $C_2 \ll C_1$ . Тоді

$$\operatorname{tg}\delta \approx \operatorname{tg}\delta_1 + \frac{C_2}{C_1} \operatorname{tg}\delta_2. \quad (3.4.11)$$

Зі співвідношення (3.4.11) випливає, що результуючий тангенс кута втрат незначно перевищує тангенс кута втрат основного об'єму ізоляції.

У разі послідовного розташуванні шарів ізоляції

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_2 \operatorname{tg} \delta_1 + C_1 \operatorname{tg} \delta_2}{C_1 + C_2}. \quad (3.4.12)$$

Якщо другий шар з більшим значенням тангенса кута втрат має незначну товщину, то  $C_2 \gg C_1$ . У цьому випадку

$$\operatorname{tg} \delta \approx \operatorname{tg} \delta_1 + \frac{C_1}{C_2} \operatorname{tg} \delta_2.$$

Оскільки  $C_2 \gg C_1$ , то  $\operatorname{tg} \delta \approx \operatorname{tg} \delta_1$ .

От чому вимірювання тангенса кута втрат для неоднорідної композиційної ізоляції має сенс у тому випадку, коли відбуваються загальні зміни її характеристик – старіння (зволоження) ізоляції, характерне для силових трансформаторів, введів, трансформаторів струму з паперово-масляною ізоляцією та ін.

У разі зволоження твердої ізоляції менш ніж на 3 %, якщо її температура дорівнює 20...30 °С, вирішальне значення для вимірювання тангенса кута втрат ізоляції мають характеристики трансформаторного масла. Вимірюючи  $\operatorname{tg} \delta$  використовуваної ізоляції та порівнюючи отримані значення з тими, що одержані під час заводських контрольно-приймальних випробувань, треба враховувати вплив температури ізоляції під час вимірювання.

Для ізоляції силових трансформаторів температурний перерахунок виконують за формулою

$$\operatorname{tg} \delta_{\theta_2} = \operatorname{tg} \delta_1 \cdot K_1$$

Значення коефіцієнта перерахунку  $K_1$  що залежить від різниці температур  $\Delta\theta$  вимірювань значень  $\operatorname{tg} \delta_{\theta_2}$  і  $\operatorname{tg} \delta_{\theta_1}$  ( $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ ). наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

$\theta_2 - \theta_1, ^\circ\text{C}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$K_1$	1,15	1,31	1,51	1,75	2,00	2,30	2,65	3,00	3,50	4,00

Стан ізоляції оцінюють за абсолютною величиною  $\text{tg}\delta$ .

Для вводів з паперово-масляною ізоляцією на 150...220 кВ під час монтажу й після капітального ремонту  $\text{tg}\delta$  має бути не більшим ніж 0,8 %. Для вводів на 330...500 кВ ці значення відповідно становлять 0,7 і 0,5 %. Для силових трансформаторів  $\text{tg}\delta$  після монтажу не може перевищувати паспортного значення більше ніж в 1,2...1,3 рази.

Під час експлуатації існує ємнісний зв'язок між об'єктом випробувань, вимірювальним пристроєм і неекранованими струмопровідними частинами устаткування, яке працює. Вимірювальні пристрої мають досить надійну систему екранів, але струми ємнісного зв'язку (струми впливу) можуть проходити через схему вимірювального пристрою, спричиняючи значні похибки вимірів.

Нехай струм впливу  $I_{\text{впл}}$ , зумовлений устаткуванням, яке працює, протікає через ємність об'єкта вимірювання  $C_x$  (рис. 3.18) . Пунктиром позначено схему вимірювального пристрою (зазвичай вимірювального моста).

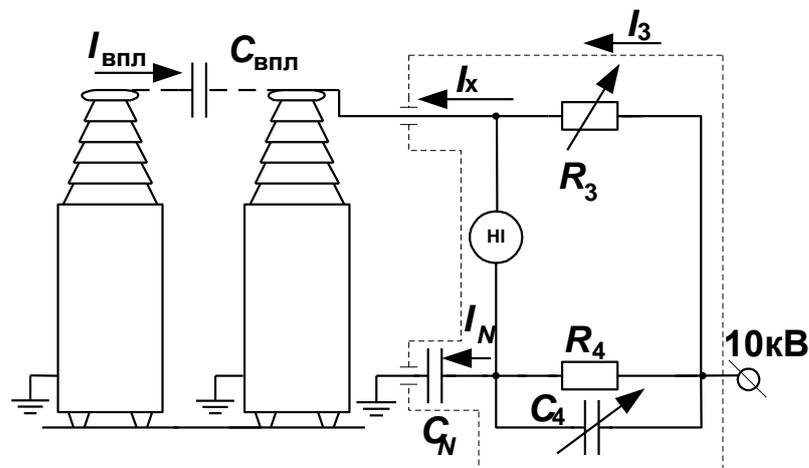


Рис. 3.18. Вплив устаткування, яке працює, на вимірювальний міст

Унаслідок того, що опір плеча моста  $R_3 \ll 1/(\omega C_x)$ ,  $I_3 \approx I_x + I_{\text{впл}}$ . Тому рівновага моста досягається за умови  $(I_x + I_{\text{впл}})R_3 = I_N R_4$ , що призводить до помилкової оцінки вимірюваної величини  $\text{tg}\delta$ .

Вплив струму  $I_{\text{впл}}$  ілюструється векторною діаграмою на рис.3.19. У разі зрівноважування мостової схеми протікатиме сума струмів  $I_x$  та  $I_{\text{впл}}$ , що мають фазовий зсув

відносно один одного. Отже, у процесі відліку результатів вимірювання буде зафіксовано деяке фіктивне значення  $\text{tg}\delta'$  або  $\text{tg}\delta''$ .

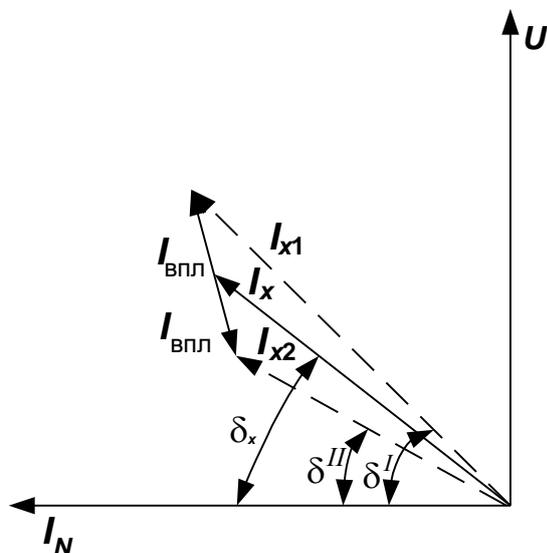


Рис. 3.19. Діаграма рівноваги моста з урахуванням зовнішніх впливів

Для усунення зазначеного впливу можна вдаватися до способу двох відрахувань. Для цього виконують два вимірювання з фазами випробної напруги, що відрізняються одна від одної на  $180^\circ$ . Це досягається зміною полярності живлення дослідного трансформатора. Для розрахунку дійсного значення  $\text{tg}\delta_x$  обчислюють середнє арифметичне значення окремих результатів:

$$\text{tg}\delta_x = \frac{\text{tg}\delta' + \text{tg}\delta''}{2},$$

чи точніше

$$\text{tg}\delta_x = \frac{\text{tg}\delta'R_3'' + \text{tg}\delta''R_3'}{R_3' + R_3''}.$$

Похибка вимірювання не є постійною й залежить від фази струму впливу стосовно струму об'єкта. Вона характеризується коефіцієнтом впливу

$$K_{\text{впл}} = \frac{I_{\text{впл}}}{I_c} = \frac{I_{\text{впл}}}{\omega C_x U_{\text{ном}}},$$

де  $\omega$  – частота випробної напруги;  $C_x$  – ємність досліджуваного об'єкта;  $U_{\text{ном}}$  – випробна напруга.

Тангенс кута діелектричних втрат ізоляції електроустаткування вимірюють за допомогою високовольтних мостів змінного струму, наприклад типу Р-595, Р-5026, «Вектор 2,0М», СА7100 та аналогічних.

Схему випробної установки, яка дозволяє у інший спосіб зменшити похибку від струмів впливу, зображено на рис. 3.20. Вона містить фазорегулятор  $\Phi$ , автотрансформатор АТ типу ЛАТР, високовольтний трансформатор Т типу НОМ-10 і вимірювальний високовольтний міст.

Одне плече моста – ємність досліджуваного об'єкта  $C_x$ , друге – еталонний конденсатор без втрат  $C_N$ , третє – магазин опорів  $R_3$ . Четверте плече моста складається з постійного опору  $R_4$  і магазину ємностей  $C_4$ . Нуль-індикатором НІ служить транзисторний підсилювач із живленням від гальванічних елементів постійного струму зі стрілочним приладом на виході.

Особливістю високовольтних мостів змінного струму для вимірювання діелектричних втрат в ізоляції є можливість вимірювання за перевернутою чи нормальною схемою. У першому випадку один з електродів заземлений, як показано на рис. 3.20., у другому – обидва електроди контрольованого об'єкта ізолювані від землі.

Під час вимірювання за перевернутою схемою вимірювальна частина моста перебуває під високою напругою. Конструкція моста передбачає ізоляцію вимірювальної частини від заземленого корпусу для виконання вимог техніки безпеки в процесі випробувальних робіт.

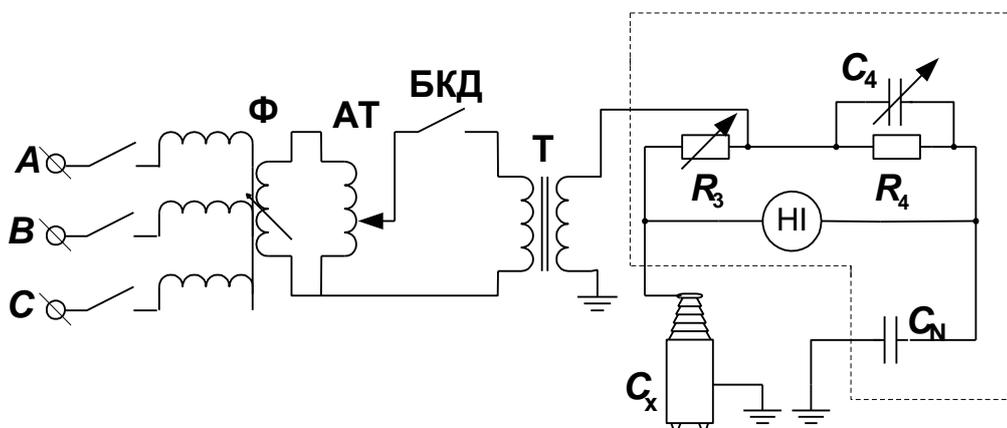


Рис. 3.20. Принципова схема установки для виміру  $\text{tg} \delta$   
(перемикач зміни полярності напруги на трансформаторі Т не показаний)

Для усунення похибок під час вимірювання  $\text{tg}\delta$  за цією схемою застосовують метод сполучення фаз струмів впливу  $I_{\text{впл}}$  і об'єкта  $I_x$ . Регулювання фази здійснюють спеціальним пристроєм – фазорегулятором, увімкненим у коло живлення випробного трансформатора. Вимірювання виконують за методикою, зазначеною в табл. 3.5. Якщо різниця між  $\text{tg}\delta_1$  та  $\text{tg}\delta_2 = \frac{\text{tg}\delta''''}{2}$  не перевищує 0,002 (тобто 0,2%), вимірювання припиняють. Якщо вказана різниця перевищує 0,2%, вимірювання продовжуються за вказаною у табл.3.5 послідовністю.

Дійсні значення  $\text{tg}\delta_x$  і  $C_x$  визначають за результатами вимірів у відповідності до табл.3.5 за такими формулами:

$$\text{tg}\delta_x = \frac{\text{tg}\delta_1 R_3'''' + \text{tg}\delta_2 R_3''''}{R_3'''' + R_3''''};$$

$$C_x = C_N R_4 \frac{R_3'''' + R_3''''}{2R_3'''' R_3''''}.$$

Якщо  $\text{tg}\delta_1 = \text{tg}\delta_2$ , то дійсне значення  $\text{tg}\delta_x$  дорівнює кожному з них.

Зазначений метод дає найменші похибки в разі вимірювання  $\text{tg}\delta$  за наявності зовнішніх впливів.

Таблиця 3.5

Номер операції	Напруга, що живить дослідний трансформатор	Положення ручок мостової схеми			Значення
		$C_4$ ( $\text{tg}\delta$ )	$R_3$	Фазорегулятори	
1	Від фаз 1 – 2 після фазорегулятора	0	Змінюючи $R_3$ й фазу фазорегулятора, балансують міст		$R_3'$
2	Від фаз 2 – 1 (зміна полярності на $180^\circ$ )	Змінюючи $C_4$ ( $\text{tg}\delta$ ) і $R_3$ , балансують міст		Залишається у фіксованому положенні після операції 1	$\text{tg}\delta''$ і $R_3''$
3	Від фаз 2 – 1 (зміна полярності на $180^\circ$ )	Виставляють положення $\text{tg}\delta_1 = \frac{\text{tg}\delta''}{2}$	Змінюючи $R_3$ й фазу фазорегулятора, балансують міст		$R_3'''$
4	Від фаз 1 – 2	Змінюючи $C_4$ ( $\text{tg}\delta$ ) і $R_{31}$ , балансують міст		Залишається у фіксованому положенні після	$\text{tg}\delta''''$ і $R_3''''$

			операції 3	
--	--	--	------------	--

Шляхом виміру  $\text{tg}\delta$  може бути надійно виявлено граничне значення вологовмісту твердої ізоляції, особливо коли контроль відбувається за підвищеної температури.

Але, при контролі за  $\text{tg}\delta$  маслонаповненого електрообладнання необхідно уважно слідкувати за станом ізоляційного масла, а також мати інформацію щодо виникнення можливих часткових розрядів (ЧР), (див. розділ 3.5) у об'ємі контрольованої ізоляції. У випадку, коли продукти старіння масла проникнуть між шарами паперу,  $\text{tg}\delta$  об'єкту може незворотно збільшитись. Слід відзначити, що збільшене значення  $\text{tg}\delta$  масла не завжди свідчить про небезпеку такого процесу. Якщо  $\text{tg}\delta$  масла збільшився, наприклад, через розчинення в ньому деяких компонентів ізоляційних лаків і далі росте, а значення  $\text{tg}\delta$  основної ізоляції залишається при цьому на нормальному рівні, то існує ймовірність, що погіршення стану цієї ізоляції до небезпечних меж не відбудеться досить швидко, і є певний час для відновлення якості масла чи його заміни.

Через неоднозначність зв'язку виміряного значення  $\text{tg}\delta$  із ступенем погіршення ізоляції перед оцінкою її стану необхідно уточнити характер дефекту. В першу чергу слід враховувати вплив характеристик масла та інтенсивність ЧР.

Нижче запропонована таблиця, що складена із врахуванням діелектричних втрат та інтенсивності ЧР в ізоляції (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

Область значень параметра		Оцінка стану ізоляції	Рішення
$\text{tg}\delta$	$q$ , Кл		
$(2-5) 10^{-3}$	$10^{-11} \dots 10^{-10}$	Хороший	Придатний до роботи
$(2-5) 10^{-3}$	$10^{-10} \dots 10^{-9}$	Повільне руйнування	Щорічний контроль
$(8-15) 10^{-3}$	$10^{-7} \dots 10^{-8}$	Сильне руйнування	Безперервний контроль та негайне виведення із експлуатації
$(8-15) 10^{-3}$	$10^{-7} \dots 10^{-6}$	Близький до пробою	Негайне виведення із експлуатації

На сьогоднішній день уже накопичений певний досвід використання трендів тангенса кута втрат, наприклад, високовольтних вводів, і якісно його можна узагальнити, як це зроблено на рис.3.21.

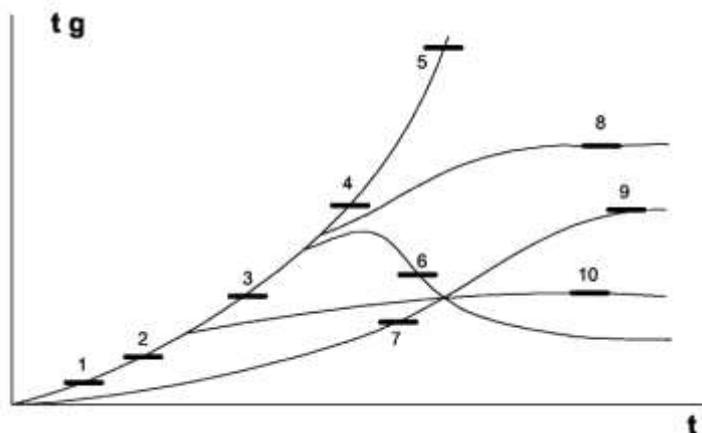


Рис. 3.21. Можливі зміни  $\text{tg}\delta$  ізоляції вводу в часі:

Як додаток для оцінки стану вводів і необхідності виконання тих або інших дій на цьому рисунку представлений графік із типовими кривими зміни тангенса кута діелектричних втрат у часі з рекомендаціями відносно відповідних дій:

- 1 - незначні зміни, продовження моніторингу, додаткові дії не потрібні;
- 2 - помірна зміна, проведення додаткових вимірів при найближчому регламентному відключенні, застосування тепловізійного контролю;
- 3 - значна зміна, необхідні додаткові випробування, якщо ріст продовжується - заміна вводу;
- 4,5 - аварійні зміни, погіршення ізоляції триває з небезпечною швидкістю - заміна вводу;
- 6 - можливе замикання обкладинок, необхідне проведення вимірів з відключенням, якщо діагноз підтверджується - заміна вводу;
- 7 -  $\text{tg}\delta$  досить високий, однак ріст погіршення ізоляції незначний, надійність знижена, проведення додаткових вимірів при найближчому регламентному відключенні;
- 8 - досягнута стабільність, але на небезпечному рівні, надійність значно знижена, підготуватися до заміни вводу;
- 9 - ріст стабілізувався після значного зростання, надійність знижена;
- 10 - досягнута стабільність після невеликого зростання, продовження моніторингу, додаткові дії не потрібні.