

УДК 621.315.337.4

П.С. Євтух, докт. техн. наук, проф.; О.О. Вакуленко; В.В. Дідух
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ІНДЕКСУ ІЗОЛЯЦІЇ ЕМАЛЬОВАНИХ ПРОВОДІВ ЗА ДІЕЛЕКТРИЧНИМИ ВТРАТАМИ

P.S. Yevtukh, Dr., Prof., O.O. Vakulenko, V.V. Didukh
**METHOD FOR ESTIMATING OF THE ENAMELLED WIRES
TEMPERATURE INDEX INSULATION BY ITS DIELECTRIC LOSSES**

Надійність виткових елементів електричних апаратів, в тому числі й високовольтних трансформаторів, залежить від їх здатності витримувати широкий спектр експлуатаційних навантажень. Тому, надзвичайно великого значення набуває вибір як певного типорозміру емальованого проводу, так і величини його температурного індексу.

Відома експрес-методика визначення ступеня запікання лакового шару ізоляції емальованих обмотувальних проводів типу ПЕТ-155, ПЭЭИ-180, ПЕТД-2-200 та ін., яка полягає у замірі залежності діелектричних втрат $tg \delta(T)$ при частоті 1000 Гц в діапазоні температур (100 ... 260)⁰С з використанням методу «двох дотичних» [1].

Методика дає також стійкі повторювані результати при оцінюванні температурного індексу для переважної більшості обмотувальних проводів. Однак, при оцінюванні температурного індексу деяких емальованих проводів виникало хибне представлення щодо реального значення цього показника, причому, в бік його зменшення. В цьому випадку температурна залежність $tg \delta(T)$ має або проміжний максимум в діапазоні температур (110 ... 130)⁰С, або ділянка різкого зростання $tg \delta(T)$ має зсув у бік нижчих температур.

Встановлено, що похибка у визначенні температурного індексу зумовлена недостатнім ступенем запікання лакового шару ізоляції по товщині внаслідок порушення технології виготовлення емальованого проводу. Як правило, це - завищення швидкості руху проводу при запіканні.

Дієвим методом встановлення критерію ступеня завершеності хімічної реакції полімеризації лакового шару ізоляції емальованого проводу є метод діелектричної релаксації, так як саме діелектрична релаксація, володіючи малим часом встановлення, встигає відстежувати, наприклад, динаміку реакції поліконденсації з утворенням поперечних хімічних зв'язків. При цьому, процес діелектричної релаксації проявляється при температурах більш низьких, ніж процес хімічної реакції структурування молекули полімеру, а тривалість діелектричної релаксації збільшується з підвищенням ступеня структурування.

Тривалість діелектричної релаксації τ полярних молекул пов'язана з енергією активації W виразом [2]: $\tau = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{W}{k \cdot T}\right)$, де $\tau_0 = (10^{-13} \dots 10^{-14})$ с - період власних коливань полярної молекули біля положення рівноваги. При цьому, поточне значення енергії активації W_x можна знайти через її встановлене значення $W_{ест}$ при відповідній температурі $T_{ест}$ згідно виразу: $W_x = T_x \cdot \frac{W_{ест}}{T_{ест}}$.

Тривалість діелектричної релаксації τ_x цілком визначається глибиною хімічної реакції, а тому закономірність її зміни також визначається параметрами рівняння кінетики хімічної реакції, виходячи з якого ступінь завершеності процесу структурування β можна оцінити за відповідними тривалостями діелектричної релаксації встановленого значення $\tau_{вст}$ й повністю прореагованих молекул τ_{np} згідно

виразу: $\beta = \frac{\tau_{np}}{\tau_{вст}}$. Після врахування енергетичних складових вираз для ступеня

завершеності процесу запікання лаку набуде вигляду: $\beta = \exp\left[-\frac{W_{вст}}{k \cdot T_{вст}^2} \cdot (T_{вст} - T_x)\right]$. Тут

$T_{вст}$ визначається згідно результатів теплового старіння лаку, а $W_{вст}$ - з температурної залежності $\text{tg } \delta(T)$ повністю структурованої ізоляції.

Таким чином, з експериментальної залежності $\text{tg } \delta(T)$ можна знайти температуру максимуму $\text{tg } \delta$ і розрахувати ступінь запікання лаку β . До речі, перевагою цього методу є можливість керування технологічним процесом формування якісної ізоляції емальпроводу шляхом підтримання оптимальної величини β для певного типу рідкого лаку.

Проведеними дослідженнями визначені температурні режими урівноваження якісних показників лакового шару ізоляції - температури допикання. Так, для обмотувального емальованого проводу марки ПЕТ-155 таким режимом є: температура $(260 \pm 5)^\circ\text{C}$, тривалість витримки - $(2 \dots 6)$ год. в залежності від діаметра проводу. Числові характеристики режимів допикання визначені з динаміки руху максимумів T_x (змінне значення температури) та $T_{вст}$ (встановлене значення температури) на графіках залежності $\text{tg } \delta(T)$. Доведено також, що при наведеному вище режимі допикання не виявлене додаткове теплове старіння ізоляції. При постійній температурі хімічної реакції ступінь завершення процесу запікання лакового шару визначається його тривалістю й величиною енергії активації, яка в $\sim (2 \dots 3)$ рази перевищує енергію активації діелектричної релаксації. Тому, постійна часу хімічної реакції, наприклад, при температурі 260°C для полієфірімідного лаку емальованого проводу марки ПЕТ-155 буде перевищувати тривалість діелектричної релаксації в $\square (1 \dots 10) \cdot 10^3$ разів.

Також встановлено, що для ізоляції обмотувального емальпроводу марки ПЭФД 2-200 додаткова тепла обробка при температурі $(250 \pm 5)^\circ\text{C}$ з тривалістю витримки $(2 \dots 4)$ год. підвищує ступінь запікання до значень $\beta = 0,6 \dots 0,8$. Після 6-годинного теплового старіння $\beta \rightarrow 1$. Таким чином, метод діелектричної релаксації може служити критерієм ступеня завершеності хімічної реакції запікання лакового шару емальпроводу. Отримані в результаті дослідження кривої залежності $\text{tg } \delta(T)$ значення температур можуть бути використані для експрес-оцінювання температурного індексу емальпроводу.

Література

1. Methods of test for winding wires. Part 5: Electrical properties : IEC 60851-5 : 1996. - [Publ. date: 1996-08-23 ; edit.: 3.0]. - Brussels : Centr. Secret., 1996. - 28 p. (International Standard).

2. Леонтъев В. О. Електротехнічні матеріали : навч. посібн. / В. О. Леонтъев, С. В. Бевз, В. А. Видмиш. - Вінниця : ВНТУ, 2013. - 122 с.