

УДК 629.423

**В. М. Тарасюк**

**ВИКОРИСТАННЯ АБСОРБЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ ЯКІРНИХ  
ОБМОТОК ТЕД ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ**

*Проаналізовано методи діагностики технічного стану ізоляції обмоток електричних машин. Наведені результати статистичних досліджень абсорбційних характеристик якірних обмоток ТЕД РТ-51.*

*Проанализированы методы диагностики технического состояния изоляции обмоток электрических машин. Приведены результаты статистических исследований абсорбционных характеристик якорных обмоток ТЭД РТ-51.*

*The methods of technical diagnostics of electrical machines winding insulation. The results of statistical studies of absorption characteristics anchor windings TED RT-51.*

**Ключові слова:** діагностика, поляризація, якір, діелектрик.

Методи контролю ізоляції розділяються на: фізичні структурні, руйнівні і неруйнівні непрямої дії. Фізичні структурні методи забезпечують безпосередню оцінку фізико-хімічного складу і стану структури матеріалу ізоляції. Однак їх використання можливе лише при дослідженні ізоляції в лабораторних умовах, що обмежує їх впровадження у ремонтному виробництві. Руйнівні методи базуються на прикладанні до ізоляції випробувальної напруги  $U_{вип}$  протягом нормованого часу [1]. Такі випробування виконуються як контрольні і не дають достатньо інформації для прогнозування терміну працездатності ізоляції в експлуатації.

$$U_{вип} = 2,25U_{ном} + 2000 \quad (1)$$

де  $U_{вип}$  – випробувальна напруга;

$U_{ном}$  – номінальна напруга на яку розрахована ізоляція.

Діагностування стану ізоляції виконується в основному неруйнівними методами непрямої дії. Коротка характеристика діагностичних методів зазначена в табл. 1. Система ізоляції обмоток електричних машин – це твердий діелектрик з макроскопічною неоднорідною структурою. Будь-яку систему ізоляції, що застосована в обмотках електричних машин, розглядають як конденсатор зі складним середовищем, структура якого визначається матеріалами, що закладені в систему ізоляції, а також її станом – наявністю дефектів та зволоженістю. Схема заміщення ізоляції зображена на рис. 1.

© Тарасюк В. М., 2013

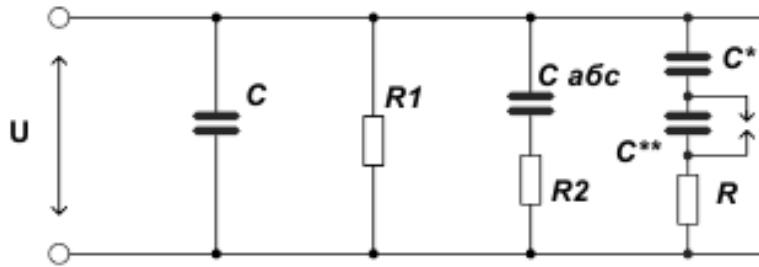


Рис. 1. Схема заміщення електричної ізоляції

$C$  – геометрична ємність;  $R1$  – опір наскрізної провідності;  
 $C_{абс}$  та  $R2$  – коло абсорбційної складової і діелектричних втрат;  
 $C^*$ ,  $C^{**}$ ,  $R$  – коло, в якому можливі втрати через іонізацію при наявності розряду

Таблиця 1. Норми напруг для випробування електричної міцності

Неруйнівні методи діагностування непрямої дії	Діагностичні параметри
Дослідження провідності	Струм витoku $I_v$ , омичний опір $R$
Поляризаційні методи	Електрична ємність $C$ , показники зміни струму абсорбції $I_{абс}$
Дослідження діелектричних втрат	Тангенс кута діелектричних втрат $tg\delta$
Частотні методи	Визначення $C$ , $R$ , $tg\delta$ при різних частотах випробувальних напруг $\omega$
Дослідження частотних розрядів	Частота повторення розрядів, їх інтенсивність, форма розрядів.
Імпульсні методи	Рівень магнітного поля, форми вихідного сигналу

У процесі експлуатації під дією електричного поля на обмотку, внаслідок різної електропровідності шарів ізоляції, на їх межах накопичуються заряди повільно рухомих іонів, і виникає міжшарова поляризація (релаксаційна). Внаслідок накопичення носіїв заряду виникає струм абсорбції [2]:

$$I_{абс} = n_0 a E + \frac{n_0 q^2 x^2}{12 k T} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) E \quad (2)$$

де  $n_0$  – число слабо зв'язаних іонів;

$a$  – величина, що визначає поляризованість іонів;

$E$  – напруженість поля;

$q$  – заряд іона;

$x$  – довжина пробігу іона;

$k$  – постійна Больцмана;

$T$  – температура;

$t$  – час протікання струму;

$\tau$  – час релаксації слабо зв'язаних іонів (поляризації діелектрика).

Час поляризації діелектрика визначається за формулою [3]:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{W_p}{kT}\right) \quad (3)$$

де  $\tau_0$  – період теплового коливання;

$W_p$  – енергія активації процесу релаксації.

У фундаментальній роботі Д.Вайди [4] доведено, що абсорбційні характеристики, особливо на початковому інтервалі часу, несуть значний об’єм інформації про внутрішній стан ізоляції, і зокрема, про ступінь незворотних змін її структури та діелектричних властивостей. Зв’язок абсорбційних характеристик з параметрами структури ізоляції та її основними властивостями може бути встановлений шляхом топологічного аналізу електричної схеми заміщення багат шарової ізоляції в режимі її розряду (див. рис. 2).

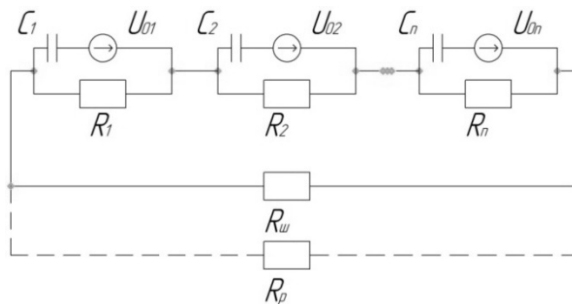


Рис. 2. Схема заміщення багат шарової ізоляції в режимі розряду

$C_1, C_2, C_n$  – ємність кожного шару ізоляції;  $R_1, R_2, R_n$  – опір кожного шару ізоляції;  $U_{01}, U_{02}, U_{0n}$  – ЕРС поляризації на кожному шарі ізоляції;  $R_{ш}$  – опір, що характеризує поверхню ізоляції;  $R_p$  – опір зовнішнього кола розряду.

Якщо не враховувати саморозряд, то ЕРС поляризації ізоляції буде рівною напрузі джерела:

$$\sum_{k=1}^n U_{0k} = U_0 \quad (4)$$

де  $U_0$  – напруга джерела заряду.

У такому випадку дискретну діагностичну модель схеми заміщення можна зобразити у вигляді ненаправленого графу (див.рис. 3) [5].

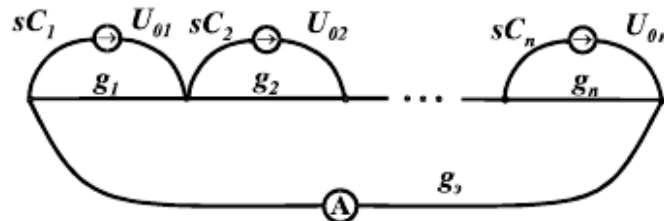


Рис. 3. Ненаправлений граф схеми заміщення багат шарової ізоляції в режимі розряду

$g_1, g_2, g_n$  – активна провідність шарів ізоляції;  $sC_1, sC_2, sC_n$  – ємнісна провідність шарів ізоляції;  $g_s$  – провідність кола розряду;  $s$  – оператор Лапласа

Провідність кола розряду:

$$g_3 = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_u} \quad (5)$$

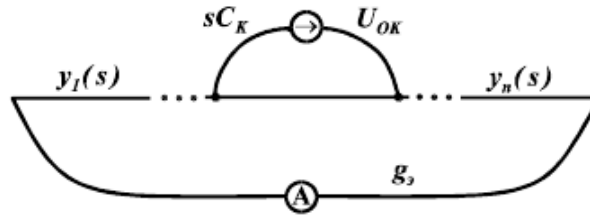
Загальний розрядний струм в ланцозі розряду складається зі струмів від дії кожного джерела ЕРС:

$$I_3(s) = \sum_{k=1}^n I_k(s) \quad (6)$$

$$I_k(s) = U_{0k}(s)F_k(s) \quad (7)$$

де  $F_k(s)$  – передача  $k$ -го джерела.

Припустимо, що джерела в інших шарах заморочені. Тоді граф схеми заміщення матиме вигляд:



**Рис. 4. Ненаправлений граф схеми заміщення  $k$ -го шару ізоляції в режимі розряду**

$y_1(s), \dots, y_n(s)$ , – оператори схеми, що визначають провідність шарів ізоляції, окрім  $k$ -го шару

Оператори провідності визначаються за виразами:

$$y_1(s) = \frac{1}{Z_1(s)} \quad (8)$$

$$y_n(s) = \frac{1}{Z_n(s)} \quad (9)$$

де

$$Z_1(s) = \frac{R_1}{1 + T_1 s} \quad (10)$$

$$Z_n(s) = \frac{R_n}{1 + T_n s} \quad (11)$$

Відповідно до правила Мезона передача  $F_k(s)$  визначається за виразом [5]:

$$F_k(s) = \frac{\frac{sC_k}{y_k(s)}}{\frac{1}{y_1(s)} + \dots + \frac{1}{y_n(s)} + \frac{1}{g_3}} = \frac{sC_k Z_k(s)}{\sum_{k=1}^n Z_k + R_3} \quad (12)$$

Загальний розрядний струм можна записати:

$$I_9(s) = \frac{U_0}{s} \frac{1}{\sum_{k=1}^n R_k} \frac{\sum_{k=1}^n s C_k Z_k(s) R_k}{\sum_{k=1}^n Z_k(s) + R_p} \quad (13)$$

Струм через розрядний опір:

$$I_p(s) = I_9(s) \frac{R_{uu}}{R_{uu} + R_p} \quad (14)$$

Припустимо, що  $R_p \ll R_{uu}$  і використовуючи зворотне перетворення Лапласа, функція струму розряду матиме значення:

$$I_p(t) = -\frac{U_0}{\sum_{k=1}^n R_k} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{k=1}^n \frac{R_k T_k}{\tau_i - T_k}}{\sum_{k=1}^n \frac{R_k T_k}{(\tau_i - T_k)^2}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (15)$$

де  $T_k = R_k C_k$ ,  $\tau_i = -\frac{1}{s_i}$  – оператори нижченаведеного рівняння.

$$\sum_{k=1}^n \frac{R_k \tau}{\tau - T_k} = -R_p \quad (16)$$

Із виразу розрядного струму бачимо, що експонента характеризує струм розряду геометричної ємності багат шарової ізоляції. При  $R_p \approx 0$  вона прямуватиме до  $\delta$ -функції. Таке припущення дає можливість розраховувати складову струму абсорбції, визначаючи постійну часу із виразу:

$$\sum_{k=1}^{n-1} \frac{R_k}{\tau - T_k} = 0 \quad (17)$$

Як бачимо розрядний струм  $I_p(t)$  залежить від співвідношення електричних параметрів шарів ізоляції, таких як діелектрична проникність та питома об'ємна провідність. Наприклад, для якірних котушок ТЕД електропоїздів постійна часу визначається за виразом:

$$\tau = \frac{R_1 T_1 + R_2 T_2 + R_3 T_3 + R_4 T_4 + R_5 T_5 + R_6 T_6}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6} \quad (18)$$

або,

$$\tau = \frac{\varepsilon_1 d_1 + \varepsilon_2 d_2 + \varepsilon_3 d_3 + \varepsilon_4 d_4 + \varepsilon_5 d_5 + \varepsilon_6 d_6}{\gamma_1 d_1 + \gamma_2 d_2 + \gamma_3 d_3 + \gamma_4 d_4 + \gamma_5 d_5 + \gamma_6 d_6} \quad (19)$$

Із виразу 19 випливає, що при старінні та зволоженні одного або декількох шарів ізоляції  $\tau$  зменшується, оскільки діелектрична проникність  $\varepsilon$  зростає повільніше ніж питома об'ємна провідність і струм абсорбції спадатиме більш круто (див. рис. 5).

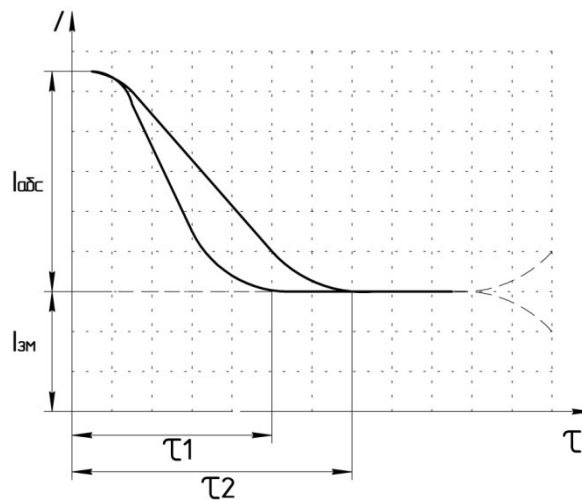


Рис. 5. Залежність величини струму в корпусній ізоляції обмотки якоря  
 $I_{abc}$  – струм абсорбції;  $I_{zm}$  – струм зміщення;  
 $\tau_1, \tau_2$  – час поляризації, відповідно із більшою і меншою кількістю дефектів ізоляції

На практиці для оцінки стану ізоляції за абсорбційними характеристиками можна використовувати метод частотної залежності ємності. Він базується на визначенні ємності ізоляції при постійній напрузі, на частотах 2 Гц і 50 Гц та визначенні відповідно ємності  $C_2$  і  $C_{50}$ . Встановлено, що при відношенні  $C_2/C_{50} > (1,2-1,3)$  ізоляція вважається зволоженою [3]. Однак, відношення  $C_2/C_{50}$  при зниженні температури зменшується. Визначення величин необхідно виконувати при 20 °С, що досить важко забезпечити у виробничих умовах при дослідженні ремонтних об'єктів. Інші методи діагностики, такі як імпульсний і частотних розрядів, використовуються в лабораторних умовах, а також для проведення безперервного контролю потужних електротехнічних об'єктів.

Більш прийнятним параметром, для якорних обмоток ТЕД, може бути використаний динамічний опір ізоляції  $R_{is}(t)$ . Параметр динамічного опору називають коефіцієнт абсорбції  $K_{abc}$ :

$$K_{abc} = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (20)$$

де  $R_{60}$  – опір ізоляції виміряний на 60 секунді прикладання напруги;

$R_{15}$  – опір ізоляції виміряний на 15 секунді прикладання напруги.

Оскільки метод абсорбції передбачає визначення відношення опорів ізоляції, вплив температури на результати мінімальний. Це дозволяє застосовувати метод в умовах ремонтного виробництва, а також в умовах експлуатації. З метою визначення нормованих величин  $K_{abc}$ , які можна було б використовувати під час контрольних випробувань в процесі ремонту, на ПрАТ «Київський ЕВРЗ» проведено статистичні дослідження стану ізоляції якорних обмоток. В період з 03.02.12 р. по 16.09.13 р. було випробувано 107 якорів типу РТ-51, що пройшли капітальний ремонт в об'ємі КР-2, з повною заміною ізоляції [6]. На рис. 6 зображена функція щільності розподілу  $f$  коефіцієнту абсорбції  $K_{abc}$ .

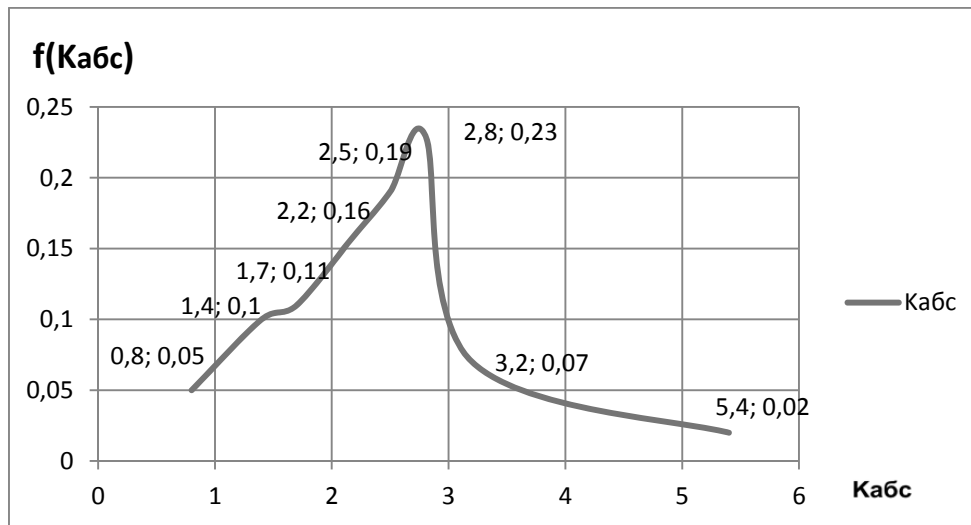


Рис. 6. Функція щільності розподілу  $f$  коефіцієнту абсорбції  $K_{абс}$

Із отриманого графіка  $f(K_{абс})$  видно, що розподіл величини  $K_{абс}$  подібний до закону нормального розподілу випадкових величин [7]. З великою імовірністю можна стверджувати, що для нової ізоляції якірних обмоток ТЕД електропоїздів  $K_{абс} \geq 2,8$ . Тому, якщо під час діагностики технічного стану ізоляції якірних обмоток величина  $K_{абс}$  значно менше 2,8 одиниць, то така ізоляція потребує відновлення діелектричних параметрів або ж повної заміни. На даний час проводяться статистичні дослідження по визначення  $K_{абс}$  для якірних обмоток, що надходять в капітальний ремонт з експлуатації, а також тих, що пройшли відновлення діелектричних параметрів під час капітального ремонту в об'ємі КР-1.

## ЛІТЕРАТУРА

1. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия.
2. Сканиви Г. И. Физика диэлектриков (область слабых полей). – М.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1945. – 500 с.
3. С. Н. Колесов, И. С. Колесов. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для вузов — 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2007. – 535 с.
4. Вайда Д. Исследование поврежденной изоляции. – М.: Энергия, 1968. – 400 с.
5. Гуменюк В. М. Надежность и диагностика электротехнических систем: Учеб. пособие для вузов. – Владивосток: Изд-во Дальневост. гос. техн. ун-та, 2010. – 218 с.
6. 105.86000.94111. Правила ремонту электрических машин электровозів і електропоїздів. ЦТ-0204.
7. Вентцель Е. Е. Теория вероятностей. – М.: Физматгиз, 1962.