

УДК 621.315.2; 519.2

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ МЕТОДІВ ВИПРОБОВУВАНЬ НАПРУГОЮ ІЗОЛЯЦІЇ ЕМАЛЬОВАНИХ ПРОВІДІВ

*П.С. Євтух, доктор технічних наук,
О.О. Вакуленко, старший викладач*

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Встановлена низька інформативність стандартних методів випробовувань напругою ізоляції обмоткових емальованих проводів внаслідок значного перевищення напруг пробою. Доведено перевагу статистичного моделювання при дослідженні реального стану дефектності ізоляції емальпроводів у вихідному стані та після намотування обмоткових елементів.

Емальпровід, випробування ізоляції напругою, дефектність, статистичні методи.

Ізоляційні конструкції електроустаткування виконують свої основні функції, в переважній більшості випадків, в умовах значного електричного, теплового, механічного та ін. навантажень.

Для підвищення надійності, наприклад, обмоткових елементів електричних машин і апаратів на заміну емальованих проводів з лаковою поліефірною ізоляцією класу нагрівостійкості 130, широко застосовуються проводи з однокомпонентною ізоляцією на основі поліефірімідного лаку класу 155 згідно стандартів: ТУ У 31.3–20006134–015:2004, ГОСТ 21428–75 та JIS C 3214:1974, а також класу 180 згідно ІЕС 60317–8:1990, поліефірциануратного лаку класу 155 згідно ГОСТ 26615–85. Висока поздовжня щільність лакового шару обмоткових проводів забезпечується двокомпонентною ізоляцією на основі поліефірімідного та поліамідного лаків класу 180 згідно ІЕС 60317–22:1990 та класу 200 згідно ТУ У 13970259.001–97, ТУ У 31.3–00214534.035:2005, а також поліефірімідного та поліамідимідного лаків класу 200 згідно ІЕС 60317–13:1990, ТУ У 31.3–20006134–014:2004.

Ці заходи, в основному, забезпечують стійкість ізоляційної конструкції до тривалої дії робочих температур, а також до короткотермінових перевищень температур внаслідок аномальних режимів роботи електроустаткування.

Щодо іншого, також важливого типу навантаження на ізоляційну конструкцію – електричного, не існує єдиного методологічно обґрунтованого підходу до методу визначення електричної міцності ізоляції обмоткових емальованих проводів, який давав би можливість оцінювати реальний стан ізоляції як на точковому (мікрорівні), так і на макрорівні однобісно орієнтованого протяжного об'єкта. Тут до емальованого проводу, як об'єкта досліджень, прикладаються різноманітні типи навантажень, в тому числі і напругою, встановлюються різні довжини зразків. Однак, після проведення таких випробовувань відповіді про реальний стан ізоляції емальпроводу, про її запас електричної міцності дослідник часто не отримує.

Проблема невизначеності полягає в тому, що визнані методики випробовувань ізоляції для визначення основного її показника – напруги пробою: двопроводова скрутка (підтримується ТУ У 31.3–20006134–015, ТУ У 13970259.001, ТУ У 31.3–00214534.035, ГОСТ 21428, ГОСТ 26615, IEC 60317, DIN 46416 та ін.), двовузлова система з механічним розтягувальним навантаженням (JIS C 3003), двовиткова модель відомої фірми “VS” (“Vossloh Schwabe Urbach”) побудовані таким чином, що в розрядному проміжку завжди присутній повітряний, причому різної довжини (в залежності від методики випробувань та взаємного розміщення дефектів ізоляції). Це зумовлює значний розкид значень напруг пробою ізоляції та їх завищення, що не дає можливості однозначно оцінити якісні показники ізоляції обмоткових емальпроводів, а також ступінь впливу технологічних чинників на їх погіршення.

Мета досліджень – запропонувати на основі виконаного аналізу і порівняння існуючих методів випробовувань напругою ізоляції емальованих проводів, нові підходи для визначення реального стану її дефектності.

Матеріал і методика досліджень. Дослідженням піддавались емальовані проводи для обмоткових елементів електричних машин і апаратів марок W200–L–0,30 IEC 60317–13 та ПЕТ 155 ТУ У 31.3–20006134–015:2004 номінальних діаметрів: 0,56; 0,63; 0,67 та 0,71 мм.

Програма досліджень включала наступні види випробовувань ізоляції емальпроводів напругою промислової частоти:

- встановлення розкиду значень напруг пробою розрядних повітряних проміжків між послабленими місцями (чи дефектами) ізоляції;
- виявлення й оцінювання відстані між дефектами ізоляції на «скрутках» зразків емальпроводів;
- визначення розкиду значень реальної електричної міцності дефектованих місць ізоляції.

Для реалізації програми використовувались наступні методики досліджень:

- електрична міцність ізоляції визначалась за допомогою двопроводових скруток згідно методик IEC 60317–0–1 й ГОСТ 14340.7–74;
- наявність та інтенсивність дефектоутворення оцінювалась візуальним спостереженням за розвитком видимого коронного розряду на робочій частині двопроводових скруток.

Результати досліджень. Було встановлено, що найбільші значення напруг пробою ізоляції з досліджуваного набору номінальних діаметрів мав емальпровід діаметром 0,67 мм: середнє значення вибірки з 5 штук «скруток» було рівне $U_{cp}^* = 9200$ В при середньоквадратичному відхиленні $\sigma_n = 1280$ В.

Зрозуміло, що дослідження розрядних процесів, особливо для встановлення ступеня вкладу проміжного повітряного проміжку в напругу пробою ізоляції, вимагає набагато більшої кількості зразків. Для встановлення об'єму вибірки необхідне застосування методик статистичного аналізу з наступних міркувань.

Відомо, що тривалість розвитку розрядного процесу в проміжках між

послабленими чи дефектованими місцями в лаковій плівці емальпроводу, як і в будь-якому розрядному проміжку, піддається статистичному розкиду і складається з тривалості формування розряду та, залежного від швидкості підйому напруги на розрядному проміжку, часу настання початкового значення напруги, при якому стає можливим розрядний процес [1]. До того ж, протягом тривалості підйому напруги лакова плівка ізоляції перебуває у зоні інтенсивного розрядного процесу, який для даної системи двох відрізків проводів («скрутка») є розрядом у різконеоднорідному полі – коронним розрядом, може нагріватись й руйнуватись. Так, при напругах, які використовуються для випробовування «скруток» зразків емальованих проводів, можливі попередній пробій повітряного проміжку та наступне пропалювання іскрою лакової ізоляції, якщо для цього процесу буде достатньо часу [4].

Виходячи з наведених вище міркувань, були використані відомі положення статистичного аналізу, увівши такі позначення:

U_{cp}^* – середня напруга пробою при обмеженій кількості зразків;

U_{cp} – дійсна середня напруга пробою (генеральна характеристика) при кількості зразків, яка прагне до нескінченості;

Δ – абсолютна похибка у визначенні U_{cp}^* ;

σ_n – середньоквадратичне відхилення для даної кількості випробуваних зразків;

N – кількість випробуваних зразків при визначенні U_{cp}^* ,

а також припущення, що розподіл можливих значень U_{cp}^* буде нормальним з математичним сподіванням, рівним U_{cp} при середньоквадратичному відхиленні σ_n , яке визначається із співвідношення:

$$\sigma_n^2 = \frac{\sum_{k=1}^q n_k \cdot (U_k - U_{cp}^*)^2}{N - 1}, \quad (1)$$

де n_k – кількість зразків, які пробиваються при напрузі U_k ;

$q = N - n_k$ – порядок суми у виразі (1).

Відомо [5], що гранична абсолютна похибка Δ відхилення величини U_{cp}^* від U_{cp} , зважаючи на обмежену кількість зразків N , охоплює із заданою довірчою ймовірністю α^* двосторонній інтервал оцінок математичного сподівання напруги пробою ізоляції. Ці величини зв'язані ймовірнісним співвідношенням:

$$\alpha^* = p(|U_{cp}^2 - U_{cp}| \leq \Delta). \quad (2)$$

Об'єм вибірки N для випробувань ізоляції на електричну міцність визначається за допомогою рівняння:

$$\Delta = u_\alpha \cdot \frac{\sigma_n}{\sqrt{N}}, \quad (3)$$

де u_α – квантиль нормального розподілу, який відповідає ймовірності α односторонньої оцінки математичного сподівання напруги пробою та пов'язаний з ймовірністю α^* залежністю: $\alpha^* = 2\alpha - 1$.

Таким чином, для емальпроводу, наприклад, марки ПЕТ 155–0,67 ТУ У 31.3–20006134–015:2005 з характеристиками ізоляції у вихідному стані: $U_{cp}^* = 9200$ В та $\sigma_n = 1280$ В при похибці визначення напруги пробою ізоляції, що не перевищує 5% й становить в абсолютному вимірі $\Delta = 460$ В, та довірчій ймовірності α^* на рівні 90% табличне значення [6] квантилю $u_{0,95} = 1,645$, а об'єм випробувань $N = 21$ зразок. Приймаємо об'єм вибірки – 25 зразків.

Очевидно, що збільшення розкиду значень напруги пробою та довірчої ймовірності при їх інтервальній оцінці зумовлює збільшення об'єму випробувань. Так, для довірчої ймовірності $\alpha^* = 0,95$ при незмінних інших характеристиках квантиль $u_{0,975} = 1,960$, а відповідна кількість зразків $N = 30$.

Спостереженнями за місцем виникнення видимої корони на робочій частині «скруток» було підтвержене допущення, що у місці розташування дефекту чи послаблення ізоляції є підсилення напруженості електричного поля як наслідок пропорційного зменшення у ньому діелектричної проникності у порівнянні з проникністю лакової плівки ізоляції, яке супроводжується характерним свіченням у фіолетовій області видимого спектру світла. Напруга виникнення видимого коронного розряду $U_{кв}$ практично співпадала з розрахунком згідно емпіричної формули [1].

Справді, при зміні температури і тиску повітря у місці проведення випробувань в межах: $(+8...+14)^\circ\text{C}$ та $(720...740)$ мм рт. ст., відповідно, густина повітря змінювалась в межах $\delta = 0,97...1,02$. Тоді при діаметрах досліджуваних проводів $d = (0,30;...;0,71)$ мм та коефіцієнті шорсткості $m = 0,99...1,00$ напруженість електричного поля виникнення коронного розряду у видимій області спектру світла рівна:

$$E_k = 30,3 \cdot m \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\frac{d}{2}} \cdot \delta} \right) = (79,0...102,7) \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}. \quad (4)$$

Напруга U_k розвитку іонізаційного процесу в коронуючому проміжку різконеоднорідного електричного поля «скрутки» досліджуваних проводів при відстані між їх центрами $D = (0,328...0,786)$ мм рівна

$$U_k = E_k \cdot \frac{d}{2} \cdot \ln \frac{2D}{d} = (0,93...2,90) \text{ кВ}. \quad (5)$$

В умовах проведених досліджень поява видимої корони була зафіксована при напругах $U_{кв}^* = (1,6...3,2)$ кВ, що, з врахуванням суб'єктивності зорового сприймання спостерігача, є цілком достатнім підтвердженням справедливості застосування для розрахунків наведеного вище виразу (4).

Для визначення електричної міцності у місцях послаблення ізоляції чи явних дефектів для створення суцільного контакту з досліджуваною ділянкою ізоляції робоча частина двопроводової скрутки на довжині 125 мм

занурювалась у струмопровідну рідину (воду). Фіксувалась напруга пробою U_{np} ізоляції при досягненні струму витоку I_e значення $(5,0 \pm 0,5)$ мА, а також методом візуального спостереження – інтенсивність газовиділення у вигляді бульбашок у розрядному проміжку: мідний провідник – лаковий шар ізоляції (дефект) – вода (рис. 1). Очевидно, що зафіксована таким чином напруга мала мінімальне значення на досліджуваній ділянці ізоляції.



**Рис. 1. Газовиділення у місці дефекту
($U_{np}=0,140$ кВ; $I_e=(5,0 \pm 0,5)$ мА)**

У результаті проведених випробувань досліджуваних емальпроводів були отримані розподіли відносних частот (частостей) напруг виявлення дефектів візуальним методом та пробою ізоляції зразків у вигляді «скруток» у вихідному стані; видовжених на 15% (моделювання одновісного розтягу при виготовленні обмоткових елементів електричних апаратів апаратури управління); змотаних з обмоткових виробів (до просочування). Аналізуючи отримані результати та складаючи пропорції найбільш ймовірних напруг U_{50} , отриманих згідно стандартного методу (1), візуального виявлення дефектів ізоляції у коронному розряді (2) та методом суцільного контакту (3) розподілів досліджуваних величин напруг, зафіксованих в результаті візуального спостереження дефектів та визначення їх електричної міцності, отримали, наприклад, для емальованого проводу марки ПЕТ 155–0,71:

- у вихідному стані: $U_{50(1)} : U_{50(2)} : U_{50(3)} = 9,75 : 6,75 : 3,50 = 2,79 : 1,93 : 1$;
- видовженого на 15%: $U_{50(1)} : U_{50(2)} : U_{50(3)} = 8,15 : 6,00 : 2,85 = 2,86 : 2,11 : 1$;
- змотаного з обмоткового елемента: $U_{50(1)} : U_{50(2)} : U_{50(3)} = 6,40 : 3,75 : 2,50 = 2,56 : 1,50 : 1$.

На рисунку 2 подані результати випробувань емальованого проводу марки ПЕТ 155–0,71 у вихідному стані трьома вище вказаними методами, де розподіли напруг U представлені у вигляді накопичених частостей – статистичних функцій розподілу F^* .

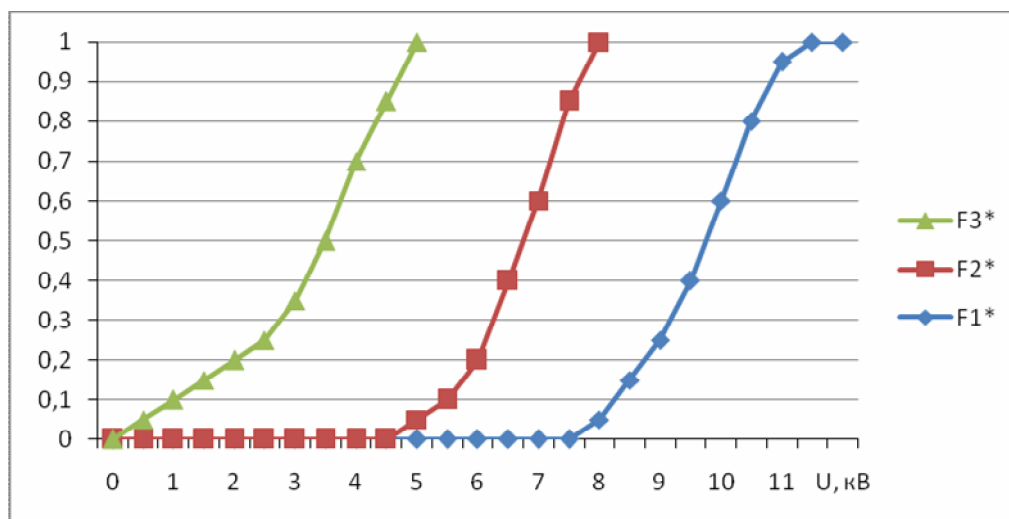


Рис. 2. Статистичні функції розподілів напруг для емальпроводу марки ПЕТ 155–0,71ТУ У 31.3–20006134–015:2005, отримані методами: $F1^*$ – стандартним; $F2^*$ – візуальним виявленням дефектів ізоляції у коронному розряді; $F3^*$ – створенням суцільного контакту на робочій частині «скрутки»

Таким чином, перевищення реальних напруг пробою ізоляції у місцях розташування дефектів через наявність повітряного розрядного проміжку при стандартних випробуваннях для проводу ПЕТ 155–0,71 у досліджуваних 3–х станах становило $\sim (2,50 \dots 2,80)$ разів, що є недопустимим, а така методика випробувань може вважатись тільки оцінювальною чи додатною для порівняльних випробувань.

Виявлена також загальна закономірність оберненої залежності величини розкиду напруг візуальної фіксації та пробою від якості ізоляції: ізоляція проводу у вихідному стані має, як правило, одне послаблене місце на нормованій довжині стандартного зразка, пробивається при високих для даної товщини ізоляції напругах з мінімальним перевищенням від виявленого візуального рівня. Місцеве послаблення ізоляції може бути викликане наступними особливостями нанесення необхідної товщини лаку на мідний провідник: нерівномірністю товщини плівки як по довжині, так і по колу провідника внаслідок відмінностей від оптимального крайового кута змочування рідкого діелектрика при емальованні; неоднорідністю через наявність в товщі діелектрика включень газів, у результаті чого в цих дефектованих місцях зменшується напруга пробою ізоляції, різко зростає напруженість електричного поля і виникають розрядні процеси, які також послаблюють ізоляцію; станом поверхні провідника, наявністю на ній забруднень, окислених місць, тріщин та ін., оскільки будь-яка неоднорідність поверхні змінює силу поверхневого натягу рідкого діелектрика, що зумовлює, як правило, значне зменшення товщини ізоляції в цьому місці, утворення кратерів, ділянок без ізоляції [4].

На противагу цьому, ізоляція проводу в залежності від інтенсивності дії технологічних чинників намотування: одновісного розтягу, створюваного демпферуєчим пристроєм, у комбінації з нерівномірністю натягу укладення витків прямокутних обмоткових виробів, особливо з відношенням сторін

(2...5):1, перегину та вмивання у випадку намотування на розбірні обмоткові елементи, механічного зношення внаслідок дії ударних навантажень при проходженні емальпроводом деталей та вузлів намотувального станка набуває дефекти як поодинокі, так і численні, які візуально проявляються вже на ранніх стадіях видимої корони, але мають напруги пробою значно більшої величини, залежної від розміру повітряного розрядного проміжку між дефектами, між дефектом та іншим послабленим місцем, а також між будь-яким іншим місцем підвищеної напруженості електричного поля й послабленим місцем ізоляції.

Оскільки згідно методу суцільного контакту розрядний проміжок у місці розташування дефекту позбувся випадкової складової у вигляді повітряного проміжку невизначеної довжини, було проведене подальше дослідження таким методом ізоляції одного з емальпроводів – W200–L–0,30 ІЕС 60317–13 для опису дефектності його ізоляції методами математичного моделювання з використанням Патенту [3] як у вихідному стані, так і після намотування з нього обмоткових елементів.

Згідно цієї методики в результаті випробування зразків емальпроводу методом суцільного контакту у струмопровідній рідині чи у вихідному стані, чи після дії технологічних чинників одержується ряд дискретних випадкових величин мінімальних напруг пробою ізоляції, нормованих до одиниці довжини емальпроводу. Можливі п'ять варіантів розподілу випадкових значень напруг пробою U , які дають можливість оцінити ступінь дефектності ізоляції досліджуваного емальпроводу за допомогою числових характеристик законів розподілу ймовірностей випадкових величин: математичного сподівання $M(U)$, моди M , медіани μ , асиметрії S_k , ексцесу ε , статистичної (інтегральної) функції розподілу $F^*(U)$ та зіставити з математично описаними законами розподілу випадкових величин (Шарльє, з рівномірною густиною, нормальним), застосувавши критерій узгодженості Колмогорова для інтегральної функції розподілу. А саме:

– емальпровід бездефектний (теоретично): $S_k=0$, $\varepsilon=0$, $M(U)=M$, порогова та номінальна електричні міцності ізоляції при значеннях функції розподілу $F^*(U)=0,1$ та $F^*(U)=0,75$, відповідно $E_{нор}(0,1) > 200$ кВ·мм⁻¹, $E_{ном}(0,75) > 250$ кВ·мм⁻¹;

– емальпровід з низьким ступенем дефектності: $S_k < 0$, $\varepsilon \geq 0$ або $\varepsilon < 0$, $M > M(U)$, $E_{нор}(0,1) > 20$ кВ·мм⁻¹, $E_{ном}(0,75) \geq 200$ кВ·мм⁻¹;

– емальпровід з середнім ступенем дефектності: $S_k < 0$, $\varepsilon \geq 0$ або $\varepsilon < 0$, $M > M(U)$, або $M \approx M(U)$, $E_{нор}(0,1) > 20$ кВ·мм⁻¹, $E_{ном}(0,75) \geq 150$ кВ·мм⁻¹;

– емальпровід з високим ступенем дефектності: $S_k > 0$, $\varepsilon \geq 0$ або $\varepsilon < 0$, $M < M(U)$, $E_{нор}(0,1) > 20$ кВ·мм⁻¹, $E_{ном}(0,75) \geq 100$ кВ·мм⁻¹;

– емальпровід з підвищеним ступенем дефектності: $S_k > 0$, $\varepsilon > 0$, $M \approx M(U)$, $E_{нор}(0,1) < 20$ кВ·мм⁻¹, $E_{ном}(0,75) < 100$ кВ·мм⁻¹; крайнім випадком є нормальний закон розподілу ($S_k \approx 0$, $\varepsilon \approx 0$) з гранично малими значеннями напруг пробою ізоляції на рівні (0...0,2) кВ та $E_{нор}(0,1) \approx 0$, $E_{ном}(0,75) < 20$ кВ·мм⁻¹.

Слід підкреслити, що заміряна напруга пробою однозначно відповідає електричній міцності ізоляції у місці пробою, тобто у місці послаблення

ізоляції чи дефекту.

Досліджуваний емальпровід марки W200–L–0,30 ІЕС 60317–13 використовувався для виготовлення обмоткових елементів апаратури управління електротехнічної продукції, виконаних механізованим способом у вигляді прямокутного виробу розміром (60...65)х(14...19)х17 мм з відношенням сторін $\sim (3,5...4,4):1$ з кількістю витків 760 та швидкістю намотування (1200...1600) об·хв.⁻¹ і мав наступні показники у вихідному стані:

- зовнішній діаметр (не більше 0,334), мм: 0,325...0,326;
- діаметр провідника (0,300±0,004), мм: 0,2994...0,2997;
- діаметральна товщина ізоляції (не менше 0,019), мм: 0,025...0,027;
- відносне видовження (не менше 22), %: 37,0...37,5;
- границя текучості (не нормується), Н·мм⁻²: 130...135;
- напруга пробою ізоляції (не менше 2200), В: 5600, 6100, 6700, 6800, 7400.

Як бачимо, емальпровід повністю відповідав вимогам стандарту: мідний провідник – середнього нагартування, коефіцієнт запасу з товщини ізоляції становив (1,3...1,4), а з електричної міцності – (2,5...3,4).

Для скорочення викладок далі подані результати математичного моделювання пошкодження ізоляції досліджуваного емальпроводу, змотаного з обмоткового елемента до його просочування. Вище наведені показники після намотування мали наступні значення:

- зовнішній діаметр, мм: 0,319...0,321;
- діаметр провідника, мм: 0,2935...0,2938;
- діаметральна товщина ізоляції, мм: 0,025...0,027;
- відносне видовження, %: 14,5...22,0;
- границя текучості, Н·мм⁻²: 185...195;
- напруга пробою ізоляції, В: 4200, 4800, 5600, 5800, 6000.

Аналіз отриманих результатів засвідчив, що емальпровід зазнав дії технологічних чинників: при порівняно невеликих змінах геометричних розмірів (зменшення на $\sim (1,2...2,1)\%$) емальпровід набув значного натягу (збільшення \sim в 1,5 рази), майже вдвічі зменшив свій запас пластичності, в 1,5 рази – запас ізоляції з електричної міцності. Проте, абсолютні значення отриманих результатів в тому числі і з напруги пробою ізоляції не дали підстави для негативного висновку щодо технології виготовлення обмоткового елемента на конкретному намотувальному станку.

Розподіл напруг пробою ізоляції $N = 25$ шт. зразків емальпроводу W200–L–0,30, змотаного з обмоткового елемента, довжиною (1,0±0,1) м методом суцільного контакту поданий у таблиці 1, де напруги пробою $U_{\min} = 0,16$ кВ; $U_{\max} = 2,04$ кВ; кількість інтервалів згідно правила Старджесса $r = 7$; крок зміни напруги в інтервалі $h = 0,30$ кВ; n_U – інтервальна кількість зразків.

1. Розподіл напруг пробою ізоляції емальпроводу W200–L–0,30, змотаного з обмоткового елемента

ΔU , кВ	[0,0...0,3)	[0,3...0,6)	[0,6...0,9)	[0,9...1,2)	[1,2...1,5)	[1,5...1,8)	[1,8...2,1)
--------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

n_U	3	8	5	3	3	2	1
-------	---	---	---	---	---	---	---

Використаємо для спрощення обчислень серединне в інтервалі зміни напруг пробою значення за змінну x [0,15; 0,45; ... 1,95] кВ, а також змінну T [1, 2, ..., 7], зв'язану з x лінійною залежністю: $x = k_1 \cdot T + k_2$, де $k_1 = 0,30$; $k_2 = -0,15$.

У результаті обчислень матимемо наступні статистичні характеристики закону розподілу напруг пробою ізоляції [2]:

– математичне сподівання $M(x) = 0,81$ кВ; мода $M \approx 0,45$ кВ $< M(x)$; середньоквадратичне відхилення $\sigma(x) = 0,502$ кВ;

– початкові моменти: $\alpha_1 = \sum_{i=1}^7 w_i \cdot T = 3,20$; $\alpha_2 = \sum_{i=1}^7 w_i \cdot T^2 = 13,04$;

$\alpha_3 = \sum_{i=1}^7 w_i \cdot T^3 = 62,36$; $\alpha_4 = \sum_{i=1}^7 w_i \cdot T^4 = 330,08$, де w_i – частість випадкової величини n_U в інтервалі x_i ;

– центральні моменти: $\mu_3(T) = \alpha_3 - 3\alpha_1\alpha_2 + 2\alpha_1^3 = 2,712$; $\mu_3(x) = \kappa^3 \cdot \mu_3(T) = +0,07322$; $\mu_4(T) = \alpha_4 - 4\alpha_1\alpha_3 + 6\alpha_1^2\alpha_2 - 3\alpha_1^4 = 18,4768$; $\mu_4(x) = \kappa^4 \cdot \mu_4(T) = +0,14966$;

– асиметрія $S_K = \frac{\mu_3(x)}{[\sigma(x)]^3} = +0,5788 \geq 0$ та ексцес

$$\varepsilon = \frac{\mu_4(x)}{[\sigma(x)]^4} - 3 = -0,6433 \leq 0.$$

Таким чином, графік частоти w_2 (відносної кількості зразків n_U) розподілу напруг пробою ізоляції U емальпроводу, змотаного з обмоткового елемента, представляється у вигляді асиметричної, дещо більш різко зростаючої зліва ($S_K \geq 0$) та менш гостровершинної ($\varepsilon \leq 0$) у порівнянні з функцією Гаусса кривої з вершиною, дещо зміщеною вліво (більшою густиною менших значень напруг пробою) та плавно спадаючої правіше вершини (рис. 3). Там же поданий графік частоти w_1 розподілу напруг пробою ізоляції U досліджуваного емальпроводу у вихідному стані, який своєю двомодальністю вказує на наявність невеликої частки місць послабленої ізоляції з напругами пробою (0,2...0,8) кВ.

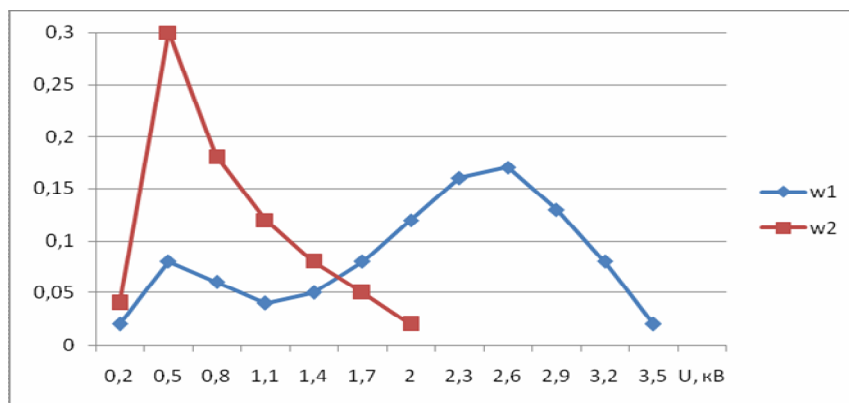


Рис. 3. Графіки відносних частот (частостей) напруг пробою ізоляції емальпроводу марки W200–L–0,30 ІЕС 60317–13: w1 – у вихідному стані, w2 – змотаного з обмоткового елемента

Враховуючи наявну несиметричність, вводилось припущення, що розподіл напруг пробою ізоляції підлягав закону Шарльє, похідного від нормального закону розподілу й такого, який враховує асиметрію та гостровершинність зміни випадкової величини за допомогою коефіцієнтів S_k та ε , відповідно, з відносною частотою w_s :

$$w_s = \frac{h}{\sigma(x)} \cdot z(y) \cdot S, \quad (6)$$

де

$$z(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{y^2}{2}}; y = \frac{x - M(x)}{\sigma(x)}; S = 1 + \frac{S_k}{6} \cdot y \cdot (y^2 - 3) + \frac{\varepsilon}{24} \cdot [y^2 \cdot (y^2 - 6) + 3],$$

а для підтвердження гіпотези було використано критерій узгодженості Колмогорова (D – критерій), обчисливши відповідні статистичну функцію розподілу $F^*(x)$ та теоретичну (інтегральну) функцію розподілу $F(x)$, за допомогою яких у цьому критерії визначається параметр λ - аргумент функції ймовірності того, що в силу тільки випадкових факторів максимальна розбіжність між функціями розподілу виявиться не меншою, ніж фактично отримана в результаті випробувань.

Результати обчислення розподілу відносних частот: статистичного w та теоретичного w_s й функцій розподілу: статистичної $F^*(x)$ та теоретичної $F(x)$ подані у таблиці 2.

2. Частоти та функції розподілу напруг пробою ізоляції емальпроводу, змотаного з обмоткового елемента

$x, \text{кВ}$	0,15	0,45	0,75	1,05	1,35	1,65	1,95
w	0,14	0,30	0,18	0,14	0,12	0,08	0,04
w_s	0,129	0,215	0,226	0,176	0,118	0,066	0,027
$F^*(x)$	0,14	0,44	0,62	0,76	0,88	0,96	1,00
$F(x)$	0,129	0,344	0,570	0,746	0,864	0,930	0,957
$ F^* - F $	0,011	0,096	0,050	0,014	0,016	0,030	0,043

Згідно критерію узгодженості Колмогорова параметр критерію λ :

$$\lambda = D \cdot \sqrt{N} \approx 0,48, \quad (7)$$

де $D = \max|F^*(x) - F(x)| = 0,096$, а $N = 25$ – об'єм вибірки.

Тоді [2], ймовірність $P(\lambda) = 1 - \sum_{j=-\infty}^{\infty} (-1)^j \cdot e^{-2 \cdot j^2 \cdot \lambda^2} = P(0,48) = 0,97$ вказала

на слушність гіпотези про розподіл напруг пробою ізоляції емальпроводу W200–L–0,30, змотаного з обмоткового елемента, в області значень (0,1...2,1) кВ згідно закону Шарльє у вигляді відповідної щільності розподілу $f(U)$ з отриманими вище числовими характеристиками:

$$f(U) = \frac{1}{1,67 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{y^2}{2}} \cdot \left\{ 1 + 0,0965 \cdot y \cdot (y^2 - 3) - 0,0268 \left[y^2 \cdot (y^2 - 6) + 3 \right] \right\}, \quad (8)$$

де $y = \frac{U - 0,81}{0,502}$, а U – напруга пробою ізоляції емальпроводу W200–L–

0,30, що змінюється в межах [0,16..2,04] кВ.

Оскільки порогова та номінальна електрична міцність ізоляції становила, відповідно,

$$E_{\text{пор}}(0,1) = \frac{2 \cdot (0,22 \dots 0,24)}{0,025 \dots 0,027} = (16 \dots 19) \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1} \leq 20 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$$

$$\text{та } E_{\text{ном}}(0,75) = \frac{2 \cdot (1,10 \dots 1,20)}{0,025 \dots 0,027} = (82 \dots 96) \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1} \leq 100 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1},$$

то згідно [3] досліджуваній емальпровід W200–L–0,30, змотаний з обмоткового елемента, слід віднести до класифікаційної групи: ізоляція з підвищеним ступенем дефектності.

Найбільш ймовірна електрична міцність ізоляції дорівнювала:

$$E_{\text{макс}}(0,50) = \frac{2 \cdot (0,69 \dots 0,72)}{0,025 \dots 0,027} = (51 \dots 58) \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1},$$

що в (3,0 – 3,5) разів менше значень міцності ізоляції емальпроводу у вихідному стані, отриманих методом суцільного контакту: (156 – 172) кВ·мм¹.

Отже, при виготовленні досліджуваної партії обмоткових елементів електричних апаратів з емальпроводу марки W200–L–0,30 ІЕС 60317–13 його ізоляція набула значних пошкоджень, які, проте, не були виявлені при випробуваннях стандартною методикою.

Висновки

Проведеними дослідженнями встановлено, що підвищення інформативності методик випробовувань ізоляції емальпроводів з метою виявлення їх послаблених чи дефектованих місць повинно відбуватись у напрямі безпосереднього дослідження дефекту. Одним з таких напрямів є застосування методу суцільного контакту, наприклад у воді [3], з одночасним математичним описом щільності розподілу дефектів ізоляції вздовж одиниці довжини емальпроводу.

В результаті усунення з розрядного проміжку неконтрольованої повітряної складової запропонованою методикою випробувань створюється можливість побудови математичної моделі щільності розподілу напруг пробою ізоляції у її найбільш дефектованих місцях, досить узгодженої з статистичною моделлю, отриманою у ході випробувань ізоляції емальпроводу як у вихідному стані, так і після дії технологічних чинників виготовлення обмоткових елементів.

Застосування розробленої методики суттєво підвищує ефективність діагностування та достовірність результатів випробовувань ізоляції емальованих проводів, у результаті чого стає можливим налаштування технологічних ланок на бездефектне виготовлення обмоткових елементів електричних машин і апаратів.

Список літератури

1. Базуткин В. В. Техника высоких напряжений: изоляция и перенапряжения в электрических системах. учеб. для вузов [текст] / В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь; под общ. ред. В. П. Ларионова. – 3–е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
2. Данко П. Е. Высшая математика в упражнениях и задачах. ч. II. учеб. пособие для студентов вузов [текст] / П. Е. Данко, А. Г. Попов, Т. Я. Кожевникова. – 3–е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1980. – 365 с.
3. Пат. 54560 ua, МПК 7 g01r31/12 Спосіб оцінки ступеня дефектності ізоляції емальпроводів [текст] / Вакуленко О. О. ; заявник ВАТ «Ватра». – № 2000042307 ; заявл. 24.04.2000 ; опубл. 17.03.2003, бюл. №3, 2003 р.
4. Пешков И. Б. Обмоточные провода. учеб. пособие для вузов [текст] / И. Б. Пешков. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 352 с.
5. Розанов Ю. А. Случайные процессы [текст] / Ю. А. Розанов. – М. : Наука, 1971. – 288 с.
6. Шор Я. Б. Таблицы для анализа и контроля надежности [текст] / Я. Б. Шор, Ф. И. Кузьмин. – М. : Сов. радио, 1968. – 276 с.

Установлено низкую информативность стандартных методов испытаний напряжением изоляции обмоточных эмальированных проводов вследствие значительного превышения напряжений пробоя. Доказано преимущество статистического моделирования при исследовании реального состояния дефектности изоляции эмальпроводов в исходном состоянии и после намотки обмоточных элементов.

Эмальпровод, испытание изоляции напряжением, дефектность, статистические методы.

Low information content of the standard methods for isolation test voltage winding enameled wire due to a significant excess of the breakdown voltage is established. Proved the advantage of statistical modeling in the study of the real state of enameled wires insulation defects in the initial state and after manufacturing of round winding unit.

Enameled wire, insulation test voltages, defects, statistical methods.