

## ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ДІАГНОСТУВАННЯ НАПРУГОЮ ІЗОЛЯЦІЇ ЕМАЛЬОВАНИХ ПРОВОДІВ

П.С.Євтух, докт.техн.наук, О.О.Вакуленко, О.В.Михайлов  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,  
вул. Руська, 56, Тернопіль, 46001, Україна. e-mail: [yakol@list.ru](mailto:yakol@list.ru)

*У статті розглянуто нові підходи до проблеми підвищення достовірності діагностування напругою ізоляції емальованих проводів та розкрито недоліки стандартної методики. На основі метрологічних досліджень статистичних вибірок з аномальними результатами встановлено, що вони є «викидами» від нормального закону розподілу. Запропоновано статистичні моделі з елементами робастного аналізу для зменшення ймовірності помилки при належності аномальних напруг пробою до певного закону розподілу, а також з метою подальшого їхнього використання як джерел інформації про стан дефектності ізоляції. Розкрито перевагу розробленого методу «суцільного контакту» при дослідженні емальованого покриття безпосередньо у місцях розташування послаблень і дефектів ізоляції. Описано побудову математичної моделі на основі статистичного ряду Грама–Шарльє для встановлення реального стану дефектності ізоляції емальованих проводів. Бібл. 10, рис. 4.*  
**Ключові слова:** емальпровід, випробування ізоляції напругою, дефектність, статистичні методи.

**Постановка проблеми.** Контроль ізоляції емальованих проводів у процесі їхнього виготовлення виявляється недостатнім для використання тільки його результатів при виготовленні електротехнічних виробів з витковими елементами через вплив технологічних і конструктивних чинників. Проведеними дослідженнями [2] встановлено майже трикратне перевищення напруги пробою ізоляції при стандартному методі двопроводових «скруток» над реальною напругою пробою у місцях послаблення ізоляції чи розташування дефектів. Це зумовлено особливостями стандартної методики – наявністю в розрядному проміжку з різко неоднорідним електричним полем повітряного прошарку різної довжини, залежної від взаємного розташування порушень однорідності ізоляції, а також умов розвитку розряду в них. Саме ця особливість «розмиває» і спотворює реальний розподіл напруг пробою та призводить їхній розкид до «нормального» закону цієї випадкової величини.

Доволі часто результати випробувань напругою ізоляції згідно з стандартною методикою містять окремі значення, як правило мінімальні, що «випадають» із загальної сукупності замірів, та які, в силу загальної закономірності цієї випадкової величини, слід вважати аномальними. Однак, саме наявність цих «проблемних» значень підтверджує гіпотезу, що вони містять ділянки з послабленою чи пошкодженою ізоляцією.

Таким чином, встановлена *нечутливість* стандартної методики до порядку величини реальної електричної міцності ізоляції та *нестійкість* процедури визначення закону статистичного розкиду напруг пробою зумовлює необхідність її дослідження методами «робастного» аналізу [10] з визначенням типу моделі статистичного розкиду напруг пробою ізоляції, представниками якої є мінімальні члени варіаційного ряду.

Численні публікації дослідників і нормативні документи щодо «проблемних» результатів замірів, які порушують закономірність основного розподілу випадкової величини [Ф.Грabbс (Grubbs F.), Щербakov M., [6, 7, 10], ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002, Р 50.1.033-2001], рекомендують як видалення замірів, що різко вирізняються, з метою безпеки основного статистичного аналізу, так і виділення особливих значень, що можуть призвести до відкриття нового ефекту.

**Мета роботи.** На основі виконаних досліджень розрядних процесів та метрологічних процедур з використанням елементів робастного аналізу запропонувати нові підходи до врахування аномальних значень напруг пробою ізоляції емальпроводів у статистичних вибірках як важливого інформативного джерела для встановлення й математичного опису реального стану її дефектності.

**Матеріал і методика досліджень.** Досліджується дефектність ізоляції емальованих проводів різних марок і номінальних діаметрів як у вихідному стані, так і після дії технологічних чинників, для чого виткові елементи електротехнічних виробів до просочування цементуючими сумішами розмочуються без пошкодження ізоляції проводу. Напруга пробою ізоляції визначається за допомогою стандартних двопроводових «скруток» згідно з методикою ГОСТ 14340.7–74 (МЕК 851–5–85), а оброблення результатів замірів – згідно з методикою ДСТУ ГОСТ ИСО 5725–2:2005. Електрична міц-

ність лакового шару емальпроводу у місцях розташування послаблень ізоляції чи її дефектів визначається спеціально розробленим методом «суцільного контакту» згідно з [1].

**Результати досліджень.** Випробуванням підлягають вибірки з контрольованих партій електротехнічних виробів (напівфабрикатів), виткові елементи яких виготовлені з досліджуваних емальованих проводів. Нижче представлені результати випробувань однієї з таких вибірок: виткові елементи з емальпроводу марки ПЭИДХ2–200–1,18 ТУ У 31.3–00214534.035:2005 у вигляді прямокутних виробів з розбірним комбінованим каркасом, що мають такі напруги пробою ізоляції у вихідному стані згідно з стандартною методикою (не менше 5000, В): 9200, 9800, 10000, 10600, 11200.

Стандартні зразки від виткових елементів вибірки об'ємом  $n_I=10$  шт. на пробій ізоляції методом „скруток” також показують  $\sim (2 \dots 2,3)$ -кратний запас електричної міцності ізоляції і мають такі значення, кВ: 8,4; 10,2; 10,4; 10,6; 10,6; 10,8; 11,2; 11,2; 11,4; 11,6. Параметри закону розподілу напруг: середня напруга  $\bar{U}_{nI}=10,64$  кВ, середньоквадратичне відхилення  $S_{nI}=0,91$  кВ.

Проводять оцінювання на аномальність за допомогою критерія Граббса згідно з методикою ГОСТ Р ИСО 5725–2–2002, а саме: для значення двосторонньої ймовірності  $\gamma=0,95$  приймають коефіцієнт  $G_I=2,29$  при  $n_I=10$  шт. зразків. Оскільки коефіцієнти розкиду крайніх значень вибірки (8,4 кВ та 11,6 кВ) дорівнюють  $G_{I/I}=2,46$  та  $G_{I/10}=1,06$ , то значення  $U_I=8,4$  кВ є аномальним.

Для уточнення статистичних характеристик розглядається інша вибірка з подвоєним  $n_2=20$  шт. числом стандартних зразків («скруток»), варіаційний ряд якої має такі значення, кВ: 6,2; 8,4; 9,2; 9,4; 9,4; 9,8; 10,0; 10,0; 10,2; 10,4; 10,6; 10,8; 10,8; 11,0; 11,2; 11,2; 11,4; 11,6; 11,6; 12,0 й відповідні характеристики:  $\bar{U}_{n2}=10,26$  кВ,  $S_{n2}=1,44$  кВ. Перевірка на аномальність дає коефіцієнти розкиду:  $G_{2/I}=2,82$  та  $G_{2/20}=1,208$ , що при  $\gamma=0,95$  й відповідному коефіцієнті  $G_2=2,709$  також вказує на аномальність найменшого значення напруги  $U_I=6,2$  кВ. При цьому «викид» двох найменших значень ( $U_I=6,2$  кВ та  $U_2=8,4$  кВ) має коефіцієнт розкиду  $G_{2/I+2}=0,304$ , менший за відповідний коефіцієнт  $G_3=0,439$ , і належить до нормального розподілу напруг пробою ізоляції.

Отримані результати спонукають дослідника детально опрацювати як стандартну методику випробувань напругою ізоляції емальпроводів двопроводовою «скруткою» з метою встановлення можливого джерела «викидів», так і отримані результати дослідження вибірок з тією ж метою.

Так, спостереженнями за розвитком розрядного процесу на стандартних зразках емальованих проводів встановлено чітке слідування фаз проявлення і збільшення світлової яскравості дефектів ізоляції в коронуючому розряді різко неоднорідного електричного поля й розвиток лавин розрядів при подальшому збільшенні напруженості поля. Розкиди значень напруг для одного з таких проводів – марки ПЕТ 155–1,06 ТУ У 31.3–20006134–015:2005 у вигляді графіків функцій розподілів напруг  $F_2(U)^*$  та  $F_1(U)^*$  показано на рис. 1 і становлять  $\sim (2 \dots 5,5)$  кВ і  $(7 \dots 11)$  кВ відповідно.

Результат діагностування місць послаблення ізоляції чи явних дефектів створенням суцільного контакту на робочій частині двопроводової «скрутки» з струмопровідною рідиною (водою) та фіксацією напруги пробою ізоляції при досягненні струму витoku значення  $(5,0 \pm 0,5)$  мА представлено на рис. 1 у вигляді графіка  $F_3(U)^*$ . Очевидно, що зафіксовані таким чином напруги пробою в межах  $(1 \dots 3,5)$  кВ є мінімальними значеннями на досліджуваній ділянці ізоляції.

Таким чином, розряд на двопроводовій «скрутці» є складним процесом, що вимагає роздільного дослідження власне процесу руйнування ізоляції емальованого проводу у місці послаблення чи дефекту ізоляції під дією різко неоднорідного електричного поля й розвитку розрядного процесу через повітряний проміжок до найближчого такого ж місця.

Для визначення внеску у величину напруги пробою ізоляції та розряду в повітрі вздовж її поверхні проводять два типи досліджень на двопроводових «скрутках» в залежності від відстані між місцями пробою: у вихідному стані (чи після дії технологічних чинників) (познач. «в.с.») й з наперед нанесеними пошкодженнями ізоляції (з явними дефектами) (познач. «я.д.»). Отримані залежності напруг пробою від відстаней між місцями пробою для проводів номінальним діаметром  $(0,56 \dots 1,80)$  мм показано на рис. 2 з позначеннями:  $U^*_{0,56 \text{ вс}}$ ;  $U^*_{1,80 \text{ вс}}$ ;  $U^*_{0,56 \text{ яд}}$ ;  $U^*_{1,80 \text{ яд}}$  відповідно.

Як видно з графіків, із зменшенням відстані між місцями пробою розкид напруг має прогресуючу тенденцію; для проводів з наперед непошкодженою ізоляцією прослідковується явна залеж-

ність лакового шару емальпроводу у місцях розташування послаблень ізоляції чи її дефектів визначається спеціально розробленим методом «суцільного контакту» згідно з [1].

Результати досліджень. Випробуванням підлягають вибірки з контрольованих партій електротехнічних виробів (напівфабрикатів), виткові елементи яких виготовлені з досліджуваних емальованих проводів. Нижче представлені результати випробувань однієї з таких вибірок: виткові елементи з емальпроводу марки ПЭИДХ2–200–1,18 ТУ У 31.3–00214534.035:2005 у вигляді прямокутних виробів з розбірним комбінованим каркасом, що мають такі напруги пробою ізоляції у вихідному стані згідно з стандартною методикою (не менше 5000, В): 9200, 9800, 10000, 10600, 11200.

Стандартні зразки від виткових елементів вибірки об'ємом  $n_I=10$  шт. на пробій ізоляції методом „скруток” також показують  $\sim (2 \dots 2,3)$ -кратний запас електричної міцності ізоляції і мають такі значення, кВ: 8,4; 10,2; 10,4; 10,6; 10,6; 10,8; 11,2; 11,2; 11,4; 11,6. Параметри закону розподілу напруг: середня напруга  $\bar{U}_{nI}=10,64$  кВ, середньоквадратичне відхилення  $S_{nI}=0,91$  кВ.

Проводять оцінювання на аномальність за допомогою критерія Граббса згідно з методикою ГОСТ Р ИСО 5725–2–2002, а саме: для значення двосторонньої ймовірності  $\gamma=0,95$  приймають коефіцієнт  $G_I=2,29$  при  $n_I=10$  шт. зразків. Оскільки коефіцієнти розкиду крайніх значень вибірки (8,4 кВ та 11,6 кВ) дорівнюють  $G_{I/I}=2,46$  та  $G_{I/10}=1,06$ , то значення  $U_I=8,4$  кВ є аномальним.

Для уточнення статистичних характеристик розглядається інша вибірка з подвоєним  $n_2=20$  шт. числом стандартних зразків («скруток»), варіаційний ряд якої має такі значення, кВ: 6,2; 8,4; 9,2; 9,4; 9,4; 9,8; 10,0; 10,0; 10,2; 10,4; 10,6; 10,8; 10,8; 11,0; 11,2; 11,2; 11,4; 11,6; 11,6; 12,0 й відповідні характеристики:  $\bar{U}_{n2}=10,26$  кВ,  $S_{n2}=1,44$  кВ. Перевірка на аномальність дає коефіцієнти розкиду:  $G_{2/I}=2,82$  та  $G_{2/20}=1,208$ , що при  $\gamma=0,95$  й відповідному коефіцієнті  $G_2=2,709$  також вказує на аномальність найменшого значення напруги  $U_I=6,2$  кВ. При цьому «викид» двох найменших значень ( $U_I=6,2$  кВ та  $U_2=8,4$  кВ) має коефіцієнт розкиду  $G_{2/I+2}=0,304$ , менший за відповідний коефіцієнт  $G_3=0,439$ , і належить до нормального розподілу напруг пробою ізоляції.

Отримані результати спонукають дослідника детально опрацювати як стандартну методику випробувань напругою ізоляції емальпроводів двопроводовою «скруткою» з метою встановлення можливого джерела «викидів», так і отримані результати дослідження вибірок з тією ж метою.

Так, спостереженнями за розвитком розрядного процесу на стандартних зразках емальованих проводів встановлено чітке слідування фаз проявлення і збільшення світлової яскравості дефектів ізоляції в коронуючому розряді різко неоднорідного електричного поля й розвиток лавин розрядів при подальшому збільшенні напруженості поля. Розкиди значень напруг для одного з таких проводів – марки ПЕТ 155–1,06 ТУ У 31.3–20006134–015:2005 у вигляді графіків функцій розподілів напруг  $F_2(U)^*$  та  $F_1(U)^*$  показано на рис. 1 і становлять  $\sim (2 \dots 5,5)$  кВ і  $(7 \dots 11)$  кВ відповідно.

Результат діагностування місць послаблення ізоляції чи явних дефектів створенням суцільного контакту на робочій частині двопроводової «скрутки» з струмопровідною рідиною (водою) та фіксацією напруги пробою ізоляції при досягненні струму витoku значення  $(5,0 \pm 0,5)$  мА представлено на рис. 1 у вигляді графіка  $F_3(U)^*$ . Очевидно, що зафіксовані таким чином напруги пробою в межах  $(1 \dots 3,5)$  кВ є мінімальними значеннями на досліджуваній ділянці ізоляції.

Таким чином, розряд на двопроводовій «скрутці» є складним процесом, що вимагає роздільного дослідження власне процесу руйнування ізоляції емальованого проводу у місці послаблення чи дефекту ізоляції під дією різко неоднорідного електричного поля й розвитку розрядного процесу через повітряний проміжок до найближчого такого ж місця.

Для визначення внеску у величину напруги пробою ізоляції та розряду в повітрі вздовж її поверхні проводять два типи досліджень на двопроводових «скрутках» в залежності від відстані між місцями пробою: у вихідному стані (чи після дії технологічних чинників) (познач. «в.с.») й з наперед нанесеними пошкодженнями ізоляції (з явними дефектами) (познач. «я.д.»). Отримані залежності напруг пробою від відстаней між місцями пробою для проводів номінальним діаметром  $(0,56 \dots 1,80)$  мм показано на рис. 2 з позначеннями:  $U^*_{0,56 \text{ вс}}$ ;  $U^*_{1,80 \text{ вс}}$ ;  $U^*_{0,56 \text{ яд}}$ ;  $U^*_{1,80 \text{ яд}}$  відповідно.

Як видно з графіків, із зменшенням відстані між місцями пробою розкид напруг має прогресуючу тенденцію; для проводів з наперед непошкодженою ізоляцією прослідковується явна залеж-

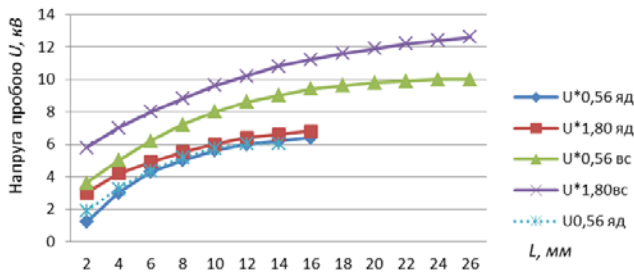


Рис. 2

но з стандартною методикою (фактор  $X_2$ ), мм; номінального діаметра досліджуваного емальованого проводу (фактор  $X_3$ ), мм. Оптимальною є лінійна модель виду

$$Y = 9,1 + 0,24 \cdot X_1 + 2,74 \cdot X_2 + 0,81 \cdot X_3 \quad (1)$$

Адекватність моделі перевіряють за допомогою коефіцієнта кореляції  $r_Y \approx 0,98$ .

Для визначення впливу максимального фактора  $X_2$  на функцію відгуку (напругу пробою) фіксують фактори  $X_1$  та  $X_3$  на основних рівнях. Тоді межі функції відгуку матимуть значення  $\delta Y(X_2) = \pm 30,1\%$ . Така ж процедура для фактора  $X_1$  дає межі функції відгуку  $\delta Y(X_1) = \pm 2,6\%$ . Таким чином, вклад електричної міцності ізоляції у місцях розташування дефектів чи її послаблень у розкид напруг пробою можна оцінити значенням  $\sim 27\%$ , а причиною є статистичний розкид міцності ізоляції, залежний від її поздовжньої неоднорідності.

Апроксимація отриманих залежностей, наприклад, для двопроводових «скруток» з наперед нанесеними дефектами емальованого проводу марки ПЕТ 155–0,56 квадратичною функцією з використанням методу найменших квадратів у вигляді виразу (2) описує розрядний процес у повітрі без вкладу електричної міцності ізоляції у місцях її послаблення чи дефектів

$$U(L) = -0,034 \cdot L^2 + 0,89 \cdot L + 0,239 \quad (2)$$

Перевірка на адекватність моделі дає максимальну похибку  $\pm 3,6\%$  при відстанях між явними дефектами у межах (4 ... 14) мм, що відображено кривою  $U_{0,56 \text{ яд}}$  на рис. 2.

Для встановлення вкладу другої компоненти у напругу пробою ізоляції проводять випробування з оцінюванням поздовжньої неоднорідності ізоляції емальованого проводу методом «суцільного контакту» на зразках довжиною  $(1,0 \pm 0,1)$  м [1]. У результаті випробувань отримують ймовірнісну оцінку сприятливого для розрядного процесу розташування дефектів чи місць послаблення ізоляції, а також вид функції щільності розподілу напруг пробою у місцях розташування дефектів ізоляції чи її послаблень (рис. 3, де подано найбільш часті випадки гістограм складових  $w(U_{np})$  напруг пробою  $U_{np}$  ізоляції в залежності від законів їхніх розподілів).

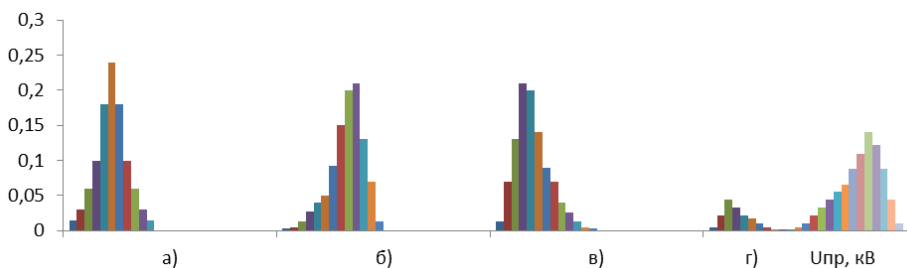


Рис. 3

відні їм значення електричної міцності: порогове  $E_{нор}(0,1)$  та номінальне  $E_{ном}(0,75)$  й порівнюючи з встановленими згідно з [7] величинами таким чином:

– ізоляція бездефектна (теоретично):  $E_{нор}(0,1) \geq 20 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$ ;  $E_{ном}(0,75) \geq 250 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$ ; (рис. 3, а) (практично без асиметрії);

– низький ступінь дефектності:  $E_{нор}(0,1) \geq 20 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$ ;  $E_{ном}(0,75) \geq 200 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$ ; (рис. 3, б) (з асиметрією та з переважанням більших значень напруг пробою);

– середній ступінь дефектності:  $E_{нор}(0,1) \geq 20 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$ ;  $E_{ном}(0,75) \geq 150 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$ ; (рис. 3, в) (двомодальний розподіл з асиметрією, з переважанням більших й з наявністю частки малих значень напруг пробою);

ність абсолютного значення напруги пробою від ступеня неоднорідності електричного поля.

Для дослідження впливу кожного з факторів на напругу пробою будується статистична поліноміальна модель методом планування факторного експерименту. В даному випадку функція відгуку ( $Y$ ) – функція залежності напруги пробою розрядного проміжку  $U_{np}$ , кВ, від: відстані вздовж кривої найменшої довжини між місцями пробою явних дефектів ізоляції (фактор  $X_1$ ), мм; те ж, між місцями пробою ізоляції згід-

До того ж, оскільки такий розподіл напруг пробою є розподілом мінімальних значень, це дозволяє нормувати ізоляцію згідно з *п'ятьма ступенями дефектності*, використовуючи значення статистичної функції розподілу  $F^*(U)$  на рівнях 0,1 та 0,75, обчислюючи відпо-

- високий ступінь дефектності:  $E_{нор}(0,1) \geq 20 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$ ;  $E_{ном}(0,75) \geq 100 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$ ; (рис. 3, з) (те саме, але з переважанням менших й з наявністю частки більших значень напруг пробою);
- підвищений ступінь дефектності:  $E_{нор}(0,1) \leq 20 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$ ;  $E_{ном}(0,75) \leq 100 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$ ; (рис. 3, в) (з асиметрією та з переважанням малих значень напруг пробою).

З врахуванням наявних в обох вибірках «проблемних» результатів для встановлення їхньої не випадковості проводять додаткове дослідження вибірок за допомогою таких критеріїв. Величина зміщення середніх арифметичних значень оцінюється за допомогою  $t$ -критерію Ст'юдента (Student - Gosset W.S.) [10]. При значенні двосторонньої ймовірності  $\gamma = 0,95$  і числі ступенів вільності  $k = n_1 + n_2 - 2$ ;  $k=28$  коефіцієнт довіри  $t_\gamma = t_{0,95} = 2,048 \geq 0,177$ . Таким чином, вибіркові середні  $\bar{U}_{n1}$  та  $\bar{U}_{n2}$  різняться неістотно і обидві вибірки можна вважати отриманими з однієї генеральної сукупності  $u$ .

Зваживши на обмеженість вибірок, для перевірки однорідності обох розподілів використовують  $T$ -критерій Крамера-Велча (Cramer-Welch). З асимптотичної нормальності  $T$ -статистики впливає правило прийняття рішення для цього критерію [7]: якщо  $|T| \leq u_p$ , де  $u_p$  – квантиль нормального розподілу з ймовірністю  $p = 1 - \alpha/2$ , то гіпотеза однорідності (рівності) математичних сподівань приймається на рівні значимості  $\alpha = 1 - \gamma$ . Справді, нерівність  $|T| = 0,879 \leq u_{0,975} = 1,96$  підтверджує цю гіпотезу.

Допустимість розкиду середньоквадратичних відхилень перевіряють за допомогою  $F$ -критерія Фішера (Sir Fisher) [3] з врахуванням аномальних значень напруг пробою та нерівності  $S_{n2} \geq S_{n1}$ . Тут для значення  $\gamma = 0,95$  з числами ступенів вільності  $f_1 = 9$  й  $f_2 = 19$  нерівність  $0,396 \leq 2,504 \leq 2,908$  згідно з ГОСТ Р ІСО 5725-2-2002 вказує на рівноточність проведених замірів напруг пробою ізоляції, а самі заміри – позбавленими систематичної похибки.

Для підтвердження закономірності відхилення від нормального закону значень напруг пробою ізоляції в обох вибірках у вигляді «викидів», а також однорідності отриманих результатів застосовують ранговий непараметричний  $T$ -критерій Вілкоксона (Wilcoxon) [7], згідно з яким для квантиля  $u_{0,975} = 1,96$  з врахуванням пов'язування елементів обох варіаційних рядів даних нерівність  $T = 0,75 \leq 1,96$  вказує на однорідність обох вибірок розподілів, відмінних від нормального закону.

Отже, наявність в обох вибірках аномальних значень («викидів» пониженої напруги пробою) дає підставу вважати їх такими, що несуть інформацію про деяку поздовжню неоднорідність ізоляції, суть якої не розкривається через наявність повітряного розрядного проміжку різної довжини [2].

Для встановлення характеристик розподілів напруг пробою у місцях послаблення чи дефектів ізоляції проводять дослідження за допомогою спеціально розробленого методу «суцільного контакту» [1]. Узагальнюючий результат випробувань наведено на прикладі емальованого проводу марки ПЭЭИДХ2-200-1,18 ТУ У 31.3-00214534.035:2005 як у вихідному стані, так і змотаного з виткового елемента досліджуваної партії з виявленими аномальними значеннями напруг пробою.

У варіаційному ряді напруг пробою ізоляції з  $N_0 = 25$  шт. зразків цього емальованого проводу у вихідному стані виявлено дві модальні області напруг: (0,64 ... 1,06) кВ – 16% зразків з наявними ділянками послабленої ізоляції, а також (6,4 ... 9,2) кВ – 68% зразків з якісною ізоляцією; решта зразків в діапазоні (1,62 ... 5,8) кВ є «викидами» від цих двох ділянок.

Нормована електрична міцність ізоляції за рівнями значень статистичної функції розподілу, маючи величини  $E_{нор}(0,1) = 18 \dots 24 \geq 20 \text{ [кВ} \cdot \text{мм}^{-1}]$ ;  $E_{ном}(0,75) = 187 \dots 210 \geq 150 \text{ [кВ} \cdot \text{мм}^{-1}]$ ;  $E_{макс}(0,5) = 173 \dots 195 \text{ [кВ} \cdot \text{мм}^{-1}]$ , вказує на те, що досліджуваний емальований провід у вихідному стані належатиме до класифікаційної групи: ізоляція з середнім ступенем дефектності.

Через виявлену двомодальність досліджують характеристики ізоляції проводу на подвоєній вибірці, в якій напруги пробою ізоляції мають значення: (0,62...1,84) кВ – 24% зразків з послабленою ізоляцією; (5,6...9,4) кВ – 68% зразків з якісною ізоляцією; решта зразків у діапазоні (2,46...5,2) кВ є «викидами» від обох ділянок. Згідно з [1] нормована електрична міцність:  $E_{нор}(0,1) = 19 \dots 24 \geq 20 \text{ [кВ} \cdot \text{мм}^{-1}]$ ;  $E_{ном}(0,75) = 189 \dots 213 \geq 150 \text{ [кВ} \cdot \text{мм}^{-1}]$ , що також вказує на її належність до групи: ізоляція з середнім ступенем дефектності. Результати випробувань підтверджують їхню точність та однорідність обох вибірок. Крім цього, виявилась явна аномальність обох модальних груп напруг пробою ізоляції: низькі напруги мають асиметрію у бік менших значень, а високі – у бік більших (рис. 3, з).

Близьким до нормального й таким, що враховує асиметрію, в тому числі й розподіли випадкової величини – напруги пробою ізоляції у місцях її послаблення чи з явними дефектами, є статистичний ряд Грама-Шарльє (Gram-Charlier) [3], який описується рівнянням

$$f_s(x) = \varphi(x) - (S_k / 6) \cdot \varphi'''(x) + (\varepsilon / 24) \cdot \varphi^{IV}(x), \quad (3)$$

де  $\varphi(x) = (\sqrt{2\pi})^{-1} \cdot e^{-y^2/2}$  – щільність нормального стандартного розподілу;  $\varphi'''(x) = -(y^3 - 3y) \cdot \varphi(x)$ ;  $\varphi^{IV}(x) = (y^4 - 6 \cdot y^2 + 3) \cdot \varphi(x)$ ;  $y = (x - \mu_1)(\sqrt{\mu_2})^{-1}$ ;  $S_k = \mu_3(\sqrt{\mu_2})^{-3}$  – асиметрія розподілу;  $\varepsilon = \mu_4\mu_2^{-2} - 3$  – ексцес;  $\mu_1 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$ ;  $\mu_k = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_1)^k$ ,  $k = 2, 3, 4$  – центрувальні моменти випадкової величини  $x$ .

Наявність «викидів» обох модальних ділянок напруг пробою ізоляції вносить невизначеність при спробі математичного опису їхнього розподілу, пов'язану з похибкою вибору параметрів. Тоді використовують метод «максимальної правдоподібності» у поєднанні з робастним методом групування масиву даних у вибірці інтервалами рівної ймовірності [5], внаслідок чого оцінка параметрів розподілу є найбільш стійкою до відхилень від встановлюваної закономірності.

Зважаючи на вибір ряду Грама–Шарльє як апроксимуючої функції до отриманого кожного з двох модальних розподілів напруг пробою ізоляції, а також на те, що оцінювані параметри ряду асиметрія  $|S_k|/6 \leq 1$  та ексцес  $|\varepsilon|/24 \leq 1$ , переважаючий вклад у функцію правдоподібності (4) як добуток ймовірностей на полігоні значень напруги пробою ізоляції  $u$  вносить функція щільності нормального розподілу  $\varphi(x)$

$$L[M(U); \sigma(U); S_k; \varepsilon] = \prod_{i=1}^n (\sqrt{2\pi} \cdot \sigma(U))^{-1} \cdot e^{-\frac{y_i^2}{2}} \cdot [1 + S_k(y^3 - 3y)/6 + \varepsilon(y^4 - 6y^2 + 3)/24] \approx \approx (\sqrt{2\pi} \cdot \sigma(U))^{-n} \cdot e^{-0,5[\sigma(U)]^{-2} \sum_{i=1}^n [U_i - M(U)]^2} \quad (4)$$

Звісно, таке спрощення викликане вимушеною необхідністю, але подальші дослідження підтверджують правильність вибору. Таким чином, за спрощені оцінки максимальної правдоподібності можна прийняти вибіркові середнє значення  $\bar{U}_n$  й середньоквадратичне відхилення  $\sigma_n$  [8]. Групування досліджуваної вибірки здійснюють способом розбиття на інтервали рівної ймовірності, а границі інтервалів у кількості  $r$  шукають з розв'язків такого рівняння:

$$\frac{k}{r} = F(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_n} \cdot \int_{-\infty}^U e^{-\frac{(U - \bar{U}_n)^2}{2\sigma_n^2}} dU, \quad (5)$$

де  $k=1, 2, \dots, (r-1)$ ;  $F(U)$  – функція нормального розподілу, для якого існує протабульована функція нормованого і центрованого розподілу  $F_0[(U - \bar{U}_i)/\sigma_n] = F(U)$ .

Для варіаційного ряду з  $n_I=37$  зразків в області значень (4,0 ... 9,4) кВ його характеристики:  $\bar{U}_{nI}=7,88$  кВ;  $\sigma_{nI}=1,34$  кВ. Враховуючи правило Стерджеса (Sturges) для кількості інтервалів  $r_I$  та (5), отримують такі границі інтервалів  $h_{r_I}$  рівної ймовірності згідно з вибраним законом апроксимації:  $u_1=6,44$  кВ;  $u_2=7,12$  кВ;  $u_3=7,64$  кВ;  $u_4=8,12$  кВ;  $u_5=8,64$  кВ;  $u_6=9,32$  кВ. Тоді масив даних розподіляють в інтервалах рівної ймовірності  $\Delta U_I$  відповідно до кількості інтервальних значень  $n_{UI}$  з врахуванням цензурування крайніх значень. Тут три мінімальних значення 4,0 кВ; 4,6 кВ й 5,2 кВ є аномальними для даного виду розподілу, пов'язаними з цензуруванням вибірки й такими, що належать іншому розподілу, несучи інформацію про підвищену дефектність окремих ділянок ізоляції, виявлену в іншому групуванні напруг пробою, і підлягають видаленню з розрахунків.

У результаті обчислень отримують відкориговані застосовану процедурою характеристики закону розподілу:  $M(U_I)=8,08$  кВ;  $\sigma(U_I)=0,96$  кВ;  $S_{kI}=-1,074$ ;  $\varepsilon_I=+4,705$ .

Враховуючи наявну несиметричність, вводять припущення, що розподіл напруг пробою підлягає статистичному ряду (3) з обчисленими коефіцієнтами  $S_{kI}$  та  $\varepsilon_I$  й відносною частотою  $w_s$  згідно з (6)

$$w_{s_1} = h_{r_1} (0,96\sqrt{2\pi})^{-1} e^{-y^2/2} S_1, \quad (6)$$

де  $y = (U - 8,08)/0,96$ ;  $S_1 = 1 - 0,179 \cdot y \cdot (y^2 - 3) + 0,196 \cdot [y^2 \cdot (y^2 - 6) + 3]$ .

Аналогічно чинять з масивом даних варіаційного ряду з  $n_2=13$  зразків в області значень (0,62...2,4) кВ, характеристики якого:  $\bar{U}_{n2}=1,03$  кВ;  $\sigma_{n2}=0,30$  кВ. З урахуванням правила Стерджеса для кількості інтервалів  $r_2=5$  та (5) отримують такі границі інтервалів рівної ймовірності:  $u_1=0,74$  кВ;  $u_2=1,02$  кВ;  $u_3=1,26$  кВ;  $u_4=1,54$  кВ. Тут одне максимальне значення напруги пробою 2,4 кВ є аномальним «викидом», несе інформацію про наявність ділянок ізоляції з набагато більшою напругою пробою і підлягає видаленню з подальших розрахунків.

У результаті обчислень отримують відкориговані застосованою процедурою характеристики закону розподілу:  $M(U_2)=1,028$  кВ;  $\sigma(U_2)=0,31$  кВ;  $S_{k2}=+0,852$ ;  $\varepsilon_2=-0,531$  та відносною частоти  $w_{s2}$  згідно з статистичним рядом Грама–Шарльє (7)

$$w_{s_2} = h_{r_2} (0,31\sqrt{2\pi})^{-1} e^{-y^2/2} S_2, \quad (7)$$

де  $y = (U - 1,03)/0,31$ ;  $S_2 = 1 + 0,142 \cdot y \cdot (y^2 - 3) - 0,022 \cdot [y^2 \cdot (y^2 - 6) + 3]$ .

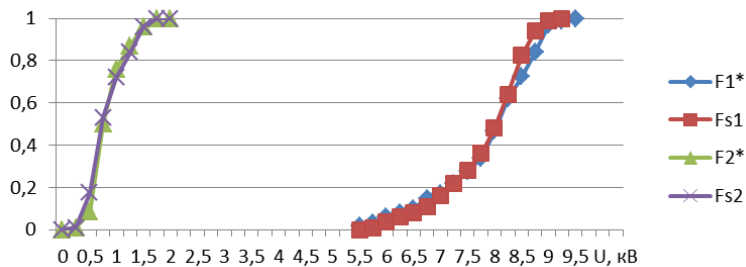


Рис. 4

Колмогорова точності моделювання [3], згідно з яким обчислюють ймовірність

$$P(\lambda) = 1 - \sum_{j=-\infty}^{\infty} (-1)^j \cdot e^{-2 \cdot j^2 \cdot \lambda^2} \quad \text{для параметра критерія } \lambda = D \cdot n^{0,5} = \max |F^*(U) - F(U)|.$$

Чисельні значення ймовірностей  $P(\lambda_1) \approx 0,999$  та  $P(\lambda_2) \approx 1,00$  вказують на слушність гіпотез про розподіли напруг пробую ізоляції емальованого проводу у вихідному стані в областях напруг пробую (5,8 ... 9,4) кВ й (0,62 ... 1,86) кВ згідно з статистичним рядом Грама–Шарльє у вигляді відповідних щільностей розподілів  $f_1(U)$  та  $f_2(U)$  з отриманими числовими характеристиками (6) і (7).

Випробування зразків на вибірці від виткових елементів виробів згідно з [1] дають такий розкид напруг пробую: (0,48...0,64) кВ – 48%; (4,0...5,6) кВ – 44%; решта зразків у діапазоні (2,0...3,5) кВ є «викидами» від обох ділянок. Нормована електрична міцність ізоляції має значення  $E_{нор}(0,1)=15 \dots 17 \leq 20$  [кВ·мм<sup>-1</sup>];  $E_{нор}(0,75)=117 \dots 129 \geq 100$  [кВ·мм<sup>-1</sup>], що вказує на її належність до класифікаційної групи: ізоляція з високим ступенем дефектності. Найбільш ймовірна електрична міцність ізоляції  $E_{макс}(0,5)=40 \dots 53$  [кВ·мм<sup>-1</sup>], що у 3–5 разів менше значень електричної міцності ізоляції проводу у вихідному стані.

Отже, у ході виготовлення виткових елементів електротехнічних виробів з емальованого проводу марки ПЭЭИДХ2-200-1,18 ТУ У 31.3-00214534.035:2005 його ізоляція внаслідок перевищення навантажень у ході намотування набула значних пошкоджень, встановлених і описаних з використанням запропонованих підходів, які, проте, не виявляються при випробуваннях за допомогою стандартної методики.

**Висновки.** Встановлено значне завищення і розкид значень напруг пробую ізоляції емальованих проводів стандартною методикою випробувань двопроводовою «скруткою», що доводить неможливість однозначного висновку щодо окремих результатів випробувань. Обґрунтовано необхідність дослідження аномальних результатів, що не містять систематичних похибок.

Запропонована спеціальна методика «суцільного контакту» є більш точним інструментом при дослідженні ізоляції емальованих проводів, яка дозволяє підвищити інформативність існуючої стандартної методики, виявляючи прихований реальний стан лакового шару ізоляції, особливо за наявності мінімальних значень напруг її пробую.

Розроблена методика у поєднанні з елементами робастного аналізу результатів досліджень дозволяє створювати математичні моделі, які враховують реальну дефектність ізоляції як у вихідному стані емальованого проводу, так і внаслідок дії технологічних чинників при виготовленні виткових елементів різного призначення.

1. Вакуленко О.О. Спосіб оцінки ступеня дефектності ізоляції емальпроводів. Патент 54560 UA, МПК 7 G01R31/12, – № 2000042307.

2. Євтух П.С., Вакуленко О.О. Дослідження інформативності методів випробувань напругою ізоляції емальованих проводів // Енергетика і автоматика. – 2013. – № 2. – С. 20–31.

3. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

4. *Корн Г.А.* Справочник по математике для научных работников и инженеров: определения, теоремы, формулы. – М.: Наука, 1970. – 720 с.
5. *Лемешко Б.Ю.* Группирование наблюдений как способ получения робастных оценок // Надежность и контроль качества. – 1997. – № 5. – С. 26–35.
6. *Лемешко Б.Ю.* Расширение области применения критериев типа Граббса, используемых при отбраковке аномальных измерений // Измерительная техника. – 2005. – № 6. – С. 13–19.
7. *Орлов А.И.* Прикладная статистика. – М.: Экзамен, 2004. – 656 с.
8. *Руденко В.М.* Математична статистика. – К.: Центр учб. літ-ри, 2012. – 304 с.
9. *Селиванов М.Н.* Качество измерений: Метрологическая справочная книга. – Л.: Лениздат, 1987. – 295 с.
10. *Хампель Ф., Рончетти Э., Рауссеу П., Штаэль В.* Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния. – М.: Мир, 1989. – 512 с.

УДК 519.246.3 : 621.317.333.6

#### **ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ ИЗОЛЯЦИИ ЭМАЛИРОВАННЫХ ПРОВОДОВ**

**П.С.Евтух, докт.техн.наук, А.А.Вакуленко, А.В.Михайлов**

**Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя,**

**ул. Руськая, 56, Тернополь, 46001, Украина. e-mail: [yakol@list.ru](mailto:yakol@list.ru)**

*В статье рассмотрены новые подходы к проблеме повышения достоверности диагностирования напряжением изоляции эмалированных проводов и раскрыты недостатки стандартной методики. На основании выполненных метрологических исследований статистических выборок с аномальными результатами установлено, что они есть «выбросами» от нормального закона распределения. Предложены статистические модели с элементами робастного анализа для уменьшения вероятности ошибки при отнесении аномальных напряжений пробоя к определенному закону распределения, а также с целью дальнейшего их использования как источников информации о состоянии дефектности изоляции эмалированных проводов. Раскрыто преимущество разработанного метода «целостного контакта» при исследовании эмалированного покрытия непосредственно в местах расположения послаблений и дефектов изоляции. Описано построение математической модели на основании статистического ряда Грама–Шарлье для установления реального состояния дефектности изоляции эмалированных проводов. Библ. 10, рис. 4.*

**Ключевые слова:** эмальпровод, испытания изоляции напряжением, дефектность, статистические методы.

#### **IMPROVEMENT OF THE CERTAINTY DIAGNOSTIC PROCEDURES INSULATION ENAMELED WIRES BY VOLTAGE**

**P.S.Evtukh, O.O.Vakulenko, O.V.Mikhailov**

**Ternopil National Technical University by Ivan Pulyui,**

**Ruska str, 56, Ternopil, 46001, Ukraine. e-mail: [yakol@list.ru](mailto:yakol@list.ru)**

*The article deals with new approaches to the improvement of the certainty of diagnosing voltage insulation enameled wires by voltage and the shortcomings of standard methods are exposed. On the basis of the metrological research of statistical samples with abnormal results is determined that they are "emissions" from the normal distribution. The statistical models with the elements of robust analysis to reduce the probability of errors in assigning abnormal breakdown voltage to a distribution law in order to use them further as sources of information about the state of the enameled wire insulation defects are suggested. The advantage of the developed method of "continuous contact" at research of enamelled coating directly in the locations of indulgence and defect insulation is revealed. The construction of mathematical models based on statistical series Gram-Charlier to establish the real state of the enameled wire insulation defects is described. References 10, figures 4.*

**Keywords:** enameled wire, insulation test by voltage, defectiveness, statistical methods.

1. *Vakulenko O.O.* A method assessing the degree of insulation defects enameled wires. Patent 54560 UA, IPC 7 G01R31/12, No 2000042307. (Ukr)
2. *Yevtukh P.S., Vakulenko O.O.* Research of methods informativeness of test voltage insulation enameled wires // Enerhetyka i Avtomatyka. – 2013. – No 2. – Pp. 20–31. (Ukr)
3. *Kobzar A.I.* Applied Mathematical Statistics. For engineers and scientists. – Moskva: Fizmatlit, 2006. – 816 p. (Rus)
4. *Korn G.A.* Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: definitions, theorems, formulas. – Moskva: Nauka, 1970. – 720 p. (Rus)
5. *Lemeshko B.Yu.* Grouping observations as a means obtain robust estimates // Nadezhnost i Kontrol Kachhestva. – 1997. – No 5. – Pp. 26–35. (Rus)
6. *Lemeshko B.Yu.* Extension of the scope Grubbs type criteria used for rejecting anomalous measurements // Izmeritelnaia Tekhnika. – 2005. – No 6. – Pp. 13–19. (Rus)
7. *Orlov A.I.* Applied Statistics. – Moskva: Ekzamen, 2004. – 656 p. (Rus)
8. *Rudenko V.M.* Mathematical statistics. – Kyiv : Tsentр uchbovoi literatury, 2012. – 304 p. (Ukr)
9. *Selivanov M.N.* Quality of measurements. – Leningrad: Lenizdat, 1987. – 295 p. (Rus)
10. *Khampel F., Ronchetti E., Rasseu P., Shtael V.* Robustness in Statistics. Approach based on influence functions. – Moskva: Mir, 1989. – 512 p. (Rus)

Надійшла 28.05.2014  
Остаточний варіант 22.12.2014