

28.02.91, Бюл. № 8. – 4 с. 4. Пат. 2 092 742 А Великобританії, G 01 P 5/18. Bubble flowmeter / Peter Small (Великобританія). – № 8104006; Заявл. 10.02.81; Опубл. 18.08.82. – 5 с. 5. Пат. 4.879.907 США, G 01 F 1/708. Soap film flowmeter / Dwight Patterson (США). – № 14.577; Заявл. 13.02.87; Опубл. 14.11.89. – 7 с. 6. Теплох З.М., Парнета О.З. Аналіз похибок плівкового витратоміра газу // Вимірювальна техніка та метрологія // Міжсвід. наук.-техн. зб. – Львів, 2003. – Вип. 62. – С. 114–120. 7. Теплох З.М., Парнета О.З. Вимірювальні бюретки плівкових витратомірів газу // Методи та прилади контролю якості. – 2000. – № 6. – С. 64–68. 8. Теплох З.М., Парнета О.З. Похибки визначення каліброваного об'єму в бюретці плівкового витратоміра // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація». – 2001. – № 432. – С. 121–125. 9. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание. – М.: Химия, 1974. 10. Зимон А.Д. Адгезия пленок и покрытий. – М.: Химия, 1977. 11. Рачинский Ф.Ю. Техника лабораторных работ. – Л.: Химия, 1982.

УДК 621.315.2; 519.2; 517.8

П.С. Євтух, О.О. Вакуленко

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФЕКТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ ЕМАЛЬПРОВODІВ ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ ОБМОТКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

© Євтух П.С., Вакуленко О.О., 2010

Розроблена методика випробувань ізоляції емальпроводів обмоткових елементів підвищеною напругою для оцінки ступеня їх дефектності методами статистичного аналізу.

Дефектність ізоляції емальпроводів – випробування підвищеною напругою – статистичні методи.

Worked out methods of tests of electric apparatuses' round winding wires isolation of electric disruptive strength for imperfectness degree by the methods of statistical analysis.

Isolation's imperfectness – electric disruptive strength – methods of statistical analysis.

Вступ. Відомі методики дослідження ізоляції емальпроводів за допомогою підвищеної напруги – так звані „скрутки” (ГОСТ 21428–75; IEC 317; DIN 46416; PN 89/E–90200; ТУ 16–705.110–79; ТУУ 313–20006134–015–2004 та ін.), двовузлова система з механічним розтягувальним навантаженням (JIS C 3003), двовиткова модель електротехнічної фірми „Vossloh Schwabe Urbach”.

Однак характерною ознакою цих методик випробувань є пробій ізоляції за схемою: „діелектрик – повітря – діелектрик”, причому в самому діелектрику – у місцях розташування дефектів. Оскільки довжина іонізованого розрядного проміжку під час таких випробувань залежить від багатьох чинників і змінюється в значних межах. Це зумовлює відповідний значний розкид напруг пробою. Тому вищенаведені методики можуть вважатись тільки оцінювальними, хоча й моделюючими частково окремі типи навантажень на ізоляцію емальпроводів протягом їх певних життєвих циклів. Реальний стан дефектності ізоляції ці методики не розкривають.

Варто зауважити, що жодна з відомих методик не дає змоги обґрунтовано вказати на ту ланку технології намотування обмоткових елементів, яка зумовлює появу дефектів ізоляції емальпроводів.

Постановка завдання. Ставиться завдання обґрунтування й розроблення методики випробувань емальпроводів, направленої на виконання завдання виявлення і опису реального стану

дефектності їх ізоляції. Методика повинна підвищити достовірність результатів випробування ізоляції емальпроводів підвищеною напругою, забезпечити можливість застосування до отриманих результатів випробувань статистичних методів обробки такого рівня, щоб дати можливість встановити найбільш об'єктивно реальну електричну міцність та ступінь дефектності ізоляції емальпроводів. Ще одне завдання методики – здійснити прив'язку дефектних ділянок ізоляції до дії технологічних чинників під час виготовлення обмоткових елементів, що зумовили появу дефектів.

Вихідні положення для розроблення моделі електричної міцності ізоляції. Поставлене завдання досягається тим, що досліджуваний емальпровід розподіляється на ділянки з експериментально встановленою оптимальною довжиною $(1,0 \pm 0,1)$ м довільної форми без пошкодження ізоляції, після чого утворені нормовані по довжині зразки занурюються у струмопровідну рідину, до кожного з яких через провідник емальпроводу і рідину прикладається плавно зростаюча від нуля до пробою ізоляції випробувальна напруга змінного струму промислової частоти. Фіксація напруги пробою здійснюється за допомогою диференціального пристрою, який реагує на швидкість зміни струму, або при досягненні струмом витoku нормованої величини $(5,0 \pm 0,5)$ мА, зареєстрованої відповідним пристроєм, за плавних іонізаційних процесів у місцях розташування дефектів, або відразу – за різкого зростання струму пробою ізоляції [1].

Технічне рішення за розробленою методикою визначається як особливістю формування ізоляції під час виготовлення емальпроводів, так і підвищенням її дефектності за дії технологічних чинників у процесі виготовлення обмоткових елементів.

Відомо, що лак наноситься на провідник шар за шаром в рідкому стані з подальшим калібруванням та затвердженням. В ідеальному випадку внаслідок дії сил поверхневого натягу шарування ізоляції було б концентричним, а її товщина однаковою в перерізі вздовж усієї довжини зразка проводу. Тому за запропонованого способу випробування розподіл напруг пробою ізоляції як величин випадкових відбувався б за нормальним законом, причому розкид значень залежав би тільки від апаратного виконання схеми випробування.

Однак реальна ізоляція емальпроводу має нерівномірність товщини плівки як по довжині, так і по колу провідника, внаслідок відмінностей від оптимального крайового кута змочування рідкого діелектрика при емальюванні, неоднорідність через наявність в товщі діелектрика включень повітря або інших газів, в результаті чого у цих дефектованих місцях зменшується напруга пробою ізоляції, різко зростає напруженість електричного поля і виникають “часткові розряди”, які також послаблюють ізоляцію. Відчутно збільшує дефектність ізоляції стан поверхні провідника, наявність на ній забруднень, окислених місць, тріщин тощо, оскільки будь-яка неоднорідність поверхні змінює силу поверхневого натягу рідкого діелектрика, що приводить, як правило, до значного зменшення товщини ізоляції у цьому місці, утворення кратерів, ділянок без ізоляції [2].

З іншого боку, під час машинного намотування обмоткового елемента зі швидкістю $(1500 \dots 3000)$ об·хв⁻¹ на неї діє комплекс таких технологічних та конструкційних чинників:

- перші витки емальпроводу лягають на каркас й перегинаються на його ребрах під прямим кутом з натягом, створюваним демпфуючим пристроєм. Залежно від типу каркаса: суцільного чи збірного існує принципова можливість забезпечити у першому випадку дотримання мінімального нормованого радіуса перегину $(1 d)$, де d – діаметр емальпроводу) і зменшення кількості дефектів або їх недопущення чи, навпаки, пошкодження ізоляції внаслідок вмивання до щокі торцевої частини пластини з електрокартону (картон + поліетилентерефталатна плівка) – у другому випадку, а також мінімального нормованого зусилля натягу $(39,2 H/\pi d^2)$;

- розгін мотовила намотувального верстата супроводжується прискоренням швидкості намотування обмоткового елемента й, неминуче, збільшенням натягу вкладання витків, що спричиняє додатковий розтяг і напруження ізоляції, особливо у місці її перегину;

- вплив геометричних співвідношень каркаса обмоткового елемента: чим більше відношення сторін прямокутника елемента відрізняється від одиниці, тим більшого прискорення надає мотовило верстата емальпроводу в момент переходу вкладання витка з більшої сторони прямокутника на меншу. У поєднанні з інерцією механізмів демпфуючих пристроїв це призводить до місцевого розтягу ділянок емальпроводу, яких на одному витку обмоткового елемента є принаймі дві;

– внаслідок особливостей вимотування емальпроводу з котушки (спіралеподібність та прискорення, які залежать від геометрії каркаса), швидкості вимотування та відстані від котушки до демпфуючого пристрою у цій системі можливе настання частих резонансів, за яких спіраль набуває бочкоподібної форми й піддається інтенсивному механічному зносу як при ударах в елементи зовнішньої конструкції, так і в демпфуючому пристрої;

– вивід проводу від початку обмотки проходить через усю її товщину і підлягає притисканню до поверхні щок витками з наростаючим зусиллям через вібрації, що виникають під час вкладання витків.

Кожен з цих чинників, окремо чи в сукупності, викликає збільшення дефектності ізоляції та відповідне зростання щільності ділянок з пониженими значеннями напруг пробою ізоляції емальпроводу, виявлення яких, опис та складання математичної моделі пробою ізоляції можливі за допомогою розробленої методики із пропорційним збільшенням кількості випробовуваних зразків на кожну з досліджуваних ділянок.

Отже, в результаті випробовування зразків емальпроводу чи у вихідному стані, чи після дії технологічних чинників одержують дискретні випадкові величини мінімальних напруг пробою ізоляції, нормованих до одиниці довжини емальпроводу. Цей ряд після застосування методів статистичної обробки містить інформацію про ймовірність існування ділянок емальпроводу з певними значеннями напруг пробою, в тому числі нижчими від нормативних або попередньо встановлених, а тому дає можливість здійснити градацію емальпроводу відповідно до його ступеня дефектності [1]. Слід підкреслити, що заміряна напруга пробою однозначно відповідає електричній міцності ізоляції у місці пробою.

Побудова математичної моделі електричної міцності ізоляції. Обґрунтування запропонованого підходу було проведене з використанням результатів досліджень ізоляції емальпроводів обмоткових елементів апаратури управління електротехнічної продукції, виконаних механізованим способом.

Досліджувалися обмоткові елементи у вигляді прямокутного виробу з відношенням сторін 3,5 (початок намотування витків) ...3,0 (кінець намотування) з кількістю витків 900 та швидкістю намотування (2200...2400) об·хв⁻¹ з використанням емальпроводу *Grade 1(L)-0,28 IEC 317-8* з такими показниками у вихідному стані:

- зовнішній діаметр (не більше 0,312), мм: 0,303...0,304;
- діаметр провідника (0,280±0,004), мм: 0,2802...0,2804;
- діаметральна товщина ізоляції (не менше 0,018), мм: 0,023...0,024;
- відносне видовження (не менше 22), %: 39,5...41,0;
- границя плинності (не нормується), Н·мм⁻²: 97,5...98,3;
- напруга пробою ізоляції (не менше 2200), В: 9600, 8000, 7200, 10400, 8600.

Як бачимо, емальпровід повністю відповідав вимогам стандарту: мідний провідник – м'який, коефіцієнт запасу по товщині ізоляції був дещо занижений і становив (1,2...1,3), проте по електричній міцності – (3,3...4,7).

Під час випробування головної ізоляції виробів з обмотковими елементами цієї партії на електричну міцність змінною напругою промислової частоти завбільшки 2,0 кВ протягом 10 с частина виробів була відбракована. Оскільки технологічний процес уможлиблював провести ідентифікацію обмоткового елемента кожного виробу, був проведений вибір відповідного намотувального верстата з точки зору мінімального впливу на якість ізоляції емальпроводу й дослідження елемента після намотування.

Показники емальпроводу після намотування мали такі значення:

- зовнішній діаметр, мм: 0,296...0,298;
- діаметр провідника, мм: 0,2744...0,2752;
- діаметральна товщина ізоляції, мм: 0,021...0,024;
- відносне видовження, %: 18,0...26,0;

- границя плинності, Н·мм⁻²: 165,7...178,2;
- напруга пробою ізоляції, В: 4600, 6800, 7000, 3900, 5800.

Аналіз серії результатів випробувань свідчить про погіршення нормованих показників емальпроводу: зменшення за абсолютною величиною та збільшення розкиду значень, що, своєю чергою, було наслідком втрати його поздовжньої однорідності. Так, нижня межа коефіцієнта запасу ізоляції по електричній міцності зменшилась майже вдвічі, як і еластичність провідника. Проте абсолютні значення отриманих результатів (навіть якщо вони і відповідали вимогам стандарту, в цьому випадку *IEC 317*) не дали підстави для негативного висновку щодо технології виготовлення обмоткового елемента на конкретному верстаті. Причина погіршення якісних показників, очевидно, полягає не тільки у верстаті, але й у конфігурації самого елемента. Іншим технологічним чинником була пружність провідника емальпроводу: збільшення пружності призвело до недопустимої „бочкоподібності” обмоткового елемента і зумовило підвищення натягу емальпроводу демпфуючими пристроями. У підсумку сумарний натяг зразка емальпроводу з розрахунковою довжиною 200 мм збільшився у 1,7...1,8 рази.

Було допущено, що наявність ділянок зі зниженою товщиною ізоляції емальпроводу, напруженим станом як ізоляції, так і провідника, із затисненими витками на перегибах стала найімовірнішим джерелом погіршення якісних показників обмоткових елементів.

Зважаючи на те, що емальпровід після дії технологічних чинників втратив свою однорідність, дослідження електричної міцності ізоляції вимагало проведення статистичних випробувань з використанням методик, за допомогою яких встановлювався б однозначний причинний зв'язок між ступенем дефектності ізоляції та працездатністю обмоткового елемента у складі електричного апарата.

Відповідно до поставленої мети від обмоткового елемента способом розмотування були відібрані зразки для випробувань за допомогою трьох методик: стандартної („скрутки”), згідно з Інструкцією фірми „Vossloh Schwabe Urbach” („VS”), розробленої для постачальників емальпроводів (двовиткова модель) [3] та згідно з Патентом (метод суцільного контакту) [1].

Для встановлення кількості зразків були використані відомі положення статистичного аналізу [4], увівши такі позначення:

U_{CP}^* – середня напруга пробою за обмеженої кількості зразків;

U_{CP} – дійсна середня напруга пробою (генеральна характеристика) за кількості зразків, яка прагне до нескінченності;

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

σ_n – середньоквадратичне відхилення для цієї кількості випробуваних зразків;

N – кількість випробуваних зразків під час визначення U_{CP}^* ;

а також припущення, що розподіл можливих значень U_{CP}^* буде нормальним із середнім значенням, що дорівнює U_{CP} за середньоквадратичного відхилення 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 за напруги U_k ; $q = N - n_k$ – порядок суми у виразі (1).

Відомо [4], 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 пов'язані ймовірнісним співвідношенням:

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

Обсяг 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: $\alpha^* = 2\alpha - 1$.

В такий спосіб для емальпроводу *Grade 1(L)-0,28 IEC 317-8* з характеристиками ізоляції у вихідному стані: $U_{CP}^* = 8760$ В та $\sigma_n = 1260$ В за похибки визначення напруги пробою ізоляції, що не перевищує 5 % й становить в абсолютному вимірі $\Delta = 440$ В, та довірчій ймовірності α^* на рівні 90 % табличне значення квантилю [5] $u_{0,95} = 1,645$, а обсяг випробувань $N = 22$ зразки. Маємо загальноприйняту кількість – 25 зразків.

Очевидно, що збільшення розкиду значень напруги пробою та довірчої ймовірності за їхньої інтервальної оцінки зумовлює збільшення обсягу випробувань. Так, для довірчої ймовірності $\alpha^* = 0,95$ за незмінних інших характеристик кількість зразків $N = 32$.

1. Стандартний метод („скрутки”).

Результати випробування 25 шт. зразків, відмотаних з обмоткового елемента електричного апарата, подані у статистичній табл. 1 розподілу кількості зразків n_{U1} в інтервалах напруг пробою ізоляції ΔU емальпроводу від мінімального $U_{МИН} = 3500$ В до максимального $U_{МАКС} = 7200$ В значень. Мінімальну кількість інтервалів r та їх крок h визначено з відомих співвідношень (правило Старджесса):

$$r = 1 + 3,3 \lg N = 1 + 3,3 \lg 25 = 5,6 \text{ (прийнято 7);} \quad (4)$$

$$h = \frac{U_{МАКС} - U_{МИН}}{r} = 529 [В] \text{ (прийнято 600 В).} \quad (5)$$

Таблиця 1

Розподіл напруг пробою ізоляції стандартним методом

ΔU , кВ	[3,5...4,1)	[4,1...4,7)	[4,7...5,3)	[5,3...5,9)	[5,9...6,5)	[6,5...7,1)	[7,1...7,7)
n_{U1}	4	7	7	3	2	1	1

Як бачимо, розподіл напруг пробою мав явну асиметрію (порівняно з нормальним законом розподілу) з максимальною частотою значень напруг $\sim (4500...4900)$ В, що вказувало на погіршення якісних показників ізоляції емальпроводу. Однак їх мінімальні значення мали 1,5-кратний запас електричної міцності ізоляції та не виявляли явно причин бракування обмоткових елементів під час випробувань електричної міцності ізоляції апаратів.

2. Метод двовиткового випробування згідно з Інструкцією („ІС”) [3].

Результати випробування $n_{U2} = 25$ шт. зразків подані у табл. 2, де $U_{МИН} = 700$ В, $U_{МАКС} = 4300$ В, $h = 514$ В (прийнято 600 В).

Таблиця 2

Розподіл напруг пробою ізоляції методом двовиткового випробування

ΔU , кВ	[0,5...1,1)	[1,1...1,7)	[1,7...2,3)	[2,3...2,9)	[2,9...3,5)	[3,5...4,1)	[4,1...4,7)
n_{U2}	2	5	5	6	4	2	1

Розподіл напруг пробою був майже рівномірний, хоча й мав деяку асиметрію. Недоліком методу є випробування доволі малої ділянки ізоляції емальпроводу за один раз ($2 \cdot \pi d = 50 [мм]$), що в ~ 5 разів менше від досліджуваної довжини стандартного зразка, та зумовлює щонайменше, зважаючи на поздовжню неоднорідність ізоляції, у стільки ж разів необхідність збільшити обсяг випробувань для отримання більшої кількості показників реальної її міцності.

3. Метод суцільного контакту згідно з патентом [1].

Результати випробування $n_{U3} = 25$ шт. зразків подані у табл. 3, де $U_{МН} = 75$ В, $U_{МАКС} = 1350$ В, $h = 182$ В (прийнято 200 В).

Таблиця 3

Розподіл напруг пробою ізоляції методом суцільного контакту

ΔU , кВ	[0,05...0,25)	[0,25...0,45)	[0,45...0,65)	[0,65...0,85)	[0,85...1,05)	[1,05...1,25)	[1,25...1,45)
n_{U3}	1	3	8	6	4	2	1

Напруги пробою ізоляції розподілені за нормальним законом з деякою асиметрією у бік їх зменшення. Інтервал напруг з максимальною частотою $\sim (500...800)$ В явно вказав на технологічне пошкодження ізоляції емальпроводу та можливість її пробою під час випробування апарата нормованою напругою 2000 В. Під час проведення випробувань внаслідок повного візуального контакту із зразком емальпроводу знайшло підтвердження припущення про розміщення ділянок з мінімальною міцністю ізоляції: на більшому боці обмоткового прямокутного елемента перед місцем згину. Тут розвивалися найбільші зусилля натягу демпфуючого пристрою намотувального верстата.

Особливість методу суцільного контакту у струмопровідній рідині полягає у фіксації напруги пробою найпослабленішого місця ізоляції на нормованій довжині зразка емальпроводу, що дає можливість після необхідного математичного моделювання встановити закон розподілу місць з послабленою ізоляцією (дефектів) вздовж усього обмоткового елемента й визначити ймовірність втрати його працездатності під робочою напругою.

Для підтвердження міркувань про ступінь пошкодження ізоляції емальпроводу під час виготовлення обмоткових елементів апаратів нижче подана табл. 4 результатів випробувань $n_{U0} = 25$ шт. зразків емальпроводу *Grade 1(L)–0,28 IEC 317–8* у вихідному стані, де $U_{МН} = 650$ В, $U_{МАКС} = 3900$ В, $h = 464$ В (прийнято 500 В).

Таблиця 4

Розподіл напруг пробою ізоляції методом суцільного контакту емальпроводу у вихідному стані

ΔU , кВ	[0,65...1,15)	[1,15...1,65)	[1,65...2,15)	[2,15...2,65)	[2,65...3,15)	[3,15...3,65)	[3,65...4,15)
n_{U0}	2	2	3	5	6	4	3

Результати випробувань вказали на фактично нормальний закон розподілу напруг пробою з максимальною частотою значень напруг $\sim (2400...2900)$ В та відчутною асиметрією у бік більших значень. Верхня границя напруг пробою підтвердила результати випробувань емальпроводу стандартним методом („скрутки”), оскільки у ньому пробій ізоляції відбувається ізоляційними проміжками: „емаль – повітря – емаль”, на противагу методу суцільного контакту, де ізоляційним проміжком є шар емалі, а пробій відбувається у її найслабшому місці. Величина напруг нижньої границі вказала на фактично позитивний результат ще одного стандартного тесту: „кількість точкових пошкоджень ізоляції”, за якої величина випробувальної напруги промислової частоти

встановлюється на рівні (90 або 100) В, мінімальний опір ділянки зразка повинен бути не меншим за $10 \cdot 10^3$ Ом (маємо $130 \cdot 10^3$ Ом за фіксуємого струму ($5,0 \pm 0,5$) мА), а довжина зразка дорівнює (25 або 30) м залежно від методики стандарту: *ГОСТ*, *ТУ*, *ТУУ* чи *IEC*, *DIN* відповідно.

Проведемо математичне моделювання одержаних результатів випробувань (див. табл. 3) емальпроводу *Grade 1(L)-0,28 IEC 317-8*, відмотаного з обмоткового елемента апарата, використовуючи для спрощення обчислень серединне в інтервалі зміни напруг пробою значення за змінну x [0,15; 0,35; ... 1,15; 1,35] кВ, а також змінну T [1, 2, ..., 7], пов'язану з x лінійною залежністю: $x = k \cdot T + z$, де $k = 0,20$; $z = -0,05$.

В результаті обчислень матимемо такі статистичні характеристики закону розподілу напруг пробою ізоляції [5]:

– математичне сподівання $M(T) = 3,76$; $\underline{M(x)} = 0,702$ кВ $\approx 0,70$ кВ; мода $m \approx 0,55$ кВ $< M(x)$; дисперсія $D(T) = 1,94$; середньоквадратичне відхилення $\sigma(T) = 1,39$; $\underline{\sigma(x)} = 0,28$ кВ;

– початкові моменти: $\alpha_1 = \sum_{i=1}^7 w_i \cdot T = 3,76$; $\alpha_2 = \sum_{i=1}^7 w_i \cdot T^2 = 16,08$; $\alpha_3 = \sum_{i=1}^7 w_i \cdot T^3 = 76,00$;

$\alpha_4 = \sum_{i=1}^7 w_i \cdot T^4 = 389,04$, де w_i – частість випадкової величини n_{U3} в інтервалі x_i ;

– центральні моменти: $\mu_3(T) = \alpha_3 - 3\alpha_1\alpha_2 + 2\alpha_1^3 = 0,9324$; $\mu_3(x) = \kappa^3 \cdot \mu_3(T) = 0,2^3 \cdot 0,9324 = 0,00746$; $\mu_4(T) = \alpha_4 - 4\alpha_1\alpha_3 + 6\alpha_1^2\alpha_2 - 3\alpha_1^4 = 10,3804$; $\mu_4(x) = \kappa^4 \cdot \mu_4(T) = 0,2^4 \cdot 10,3804 = 0,01661$;

– асиметрія $S_k = \frac{\mu_3(x)}{[\sigma(x)]^3} = 0,34 > 0$; та ексцес $\varepsilon = \frac{\mu_4(x)}{[\sigma(x)]^4} - 3 = -0,30 < 0$.

Отже, графік частоти w_i (відносної кількості зразків n_U) розподілу напруг пробою ізоляції U можна зобразити у вигляді асиметричної різко зростаючої, але дещо менш гостровершинної порівняно з функцією Гаусса кривої з вершиною у її лівій частині (більшою густиною малих значень напруг пробою) та плавно спадаючої правіше вершини (див. рис. 1).

Враховуючи наявну асиметрію, вводилось припущення, що розподіл напруг пробою ізоляції підлягав закону Шарльє, похідного від нормального закону розподілу й такого, що враховує асиметрію та плавність (або гостровершинність) зміни випадкової величини за допомогою коефіцієнтів S_k та ε відповідно з відносною частотою w_s [5]:

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

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

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 через випадкові чинники 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 табл. 5.

Згідно з критерієм узгодженості Колмогорова параметр критерію λ :

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

де $D = \max|F^*(x) - F(x)| = 0,056$, а $N = 25$ – обсяг вибірки.

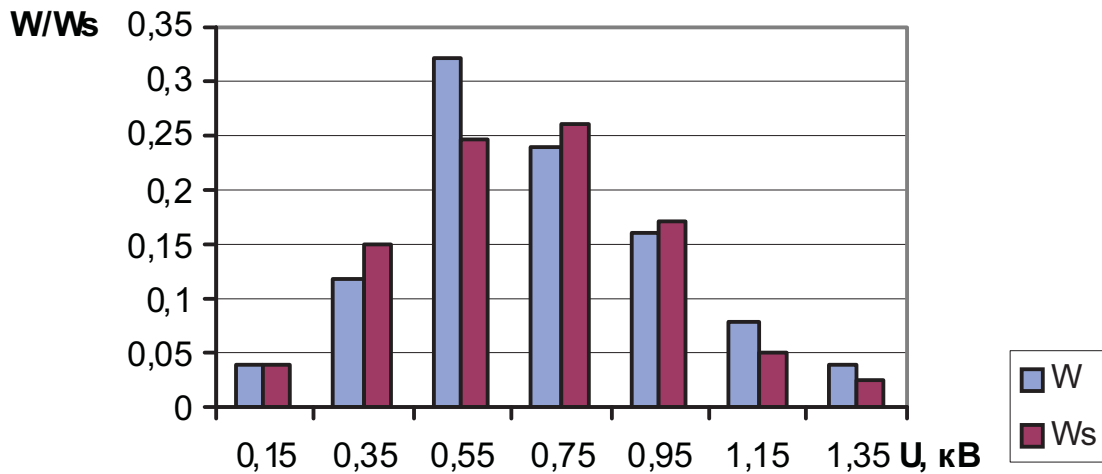


Рис. 1. Гістограми розподілів напруг пробою ізоляції: W – згідно з методикою 1; W_s – згідно з результатами моделювання

Таблиця 5

Частоти та функції розподілу напруг пробою ізоляції емальпроводу

x , кВ	0,15	0,35	0,55	0,75	0,95	1,15	1,35
T	1	2	3	4	5	6	7
y	-1,964	-1,250	-0,536	0,179	0,893	1,607	2,321
$z(y)$	0,0580	0,1827	0,3456	0,3926	0,2678	0,1097	0,0270
S	0,9693	1,1513	0,9873	0,9348	0,9021	0,6255	1,3197
w	0,040	0,120	0,320	0,240	0,160	0,080	0,040
w_s	0,040	0,150	0,244	0,262	0,173	0,049	0,026
$F^*(x)$	0,040	0,160	0,480	0,720	0,880	0,960	1,000
$F(x)$	0,040	0,190	0,434	0,696	0,869	0,918	0,944
$ F^* - F $	0	0,030	0,046	0,024	0,011	0,052	0,056

Тоді [5] ймовірність $P(\lambda) = P(0,28) = 1,00$ вказала на слушність гіпотези про розподіл напруг пробою ізоляції емальпроводу, відмотаного з обмоткового елемента апарата, згідно з законом Шарльє у вигляді відповідної щільності розподілу $f(U)$ з вищезазначеними числовими характеристиками:

$$f(U) = \frac{1}{1,4 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{y^2}{2}} \cdot \left\{ 1 + 0,057 \cdot y \cdot (y^2 - 3) - 0,013 \cdot [y^2 (y^2 - 6) + 3] \right\}, \quad (8)$$

де $y = \frac{U - 0,70}{0,28}$, а U – напруга пробою ізоляції емальпроводу, що змінюється в межах $[0,075 \dots 1,35]$ кВ.

Інтегральний вираз для функції розподілу згідно з поданими у табл. 5 значеннями матиме такий вигляд:

$$F(U) = \int_{-\infty}^U f(U) dU \cong \int_{0,075}^U f(U) d(U). \quad (9)$$

Подані у табл. 5 значення статистичної функції розподілу $F^*(x)$ були використані для визначення медіани розподілу напруг пробою, порогової, найімовірнішої та номінальної електричної міцності ізоляції емальпроводу.

Медіана розподілу μ ділить увесь масив двовимірної множини: кількість зразків n_U – напруга пробою U навпіл і визначається за функції $F^*(x) = 0,5$: $x = \underline{\mu} = (0,55...0,60)$ кВ < $M(x) = 0,70$ кВ, що вказало на зсув щільності розподілу в бік менших значень напруг пробою.

Порогова та номінальна електрична міцність ізоляції визначається за $F^*(x) = 0,1$ та $F^*(x) = 0,75$, відповідно. Оскільки

$$E_{\text{ПОР}}(0,1) = \frac{2 \cdot (0,25...0,30)}{0,021...0,024} = (21...29) \left[\frac{\text{кВ}}{\text{мм}} \right] \geq 20 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}$$

та

$$E_{\text{НОМ}}(0,75) = \frac{2 \cdot (0,80...0,85)}{0,021...0,024} = (66...81) \left[\frac{\text{кВ}}{\text{мм}} \right] \leq 100 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}},$$

то згідно з [1] досліджуваний емальпровід *Grade 1(L)-0,28 IEC 317-8*, відмотаний з обмоткового елемента апарата, був віднесений до класифікаційної групи: ізоляція з високим ступенем дефектності.

Найімовірніша електрична міцність ізоляції визначається за $F^*(x) = 0,5$ і дорівнює:

$$E_{\text{МАКС}}(0,5) = \frac{2 \cdot (0,55...0,60)}{0,021...0,024} = (46...57) \left[\frac{\text{кВ}}{\text{мм}} \right],$$

що в (4...5) разів менше від значень міцності ізоляції емальпроводу у вихідному стані, отриманих методом суцільного контакту: (220...240) кВ·мм⁻¹ (рис. 2).

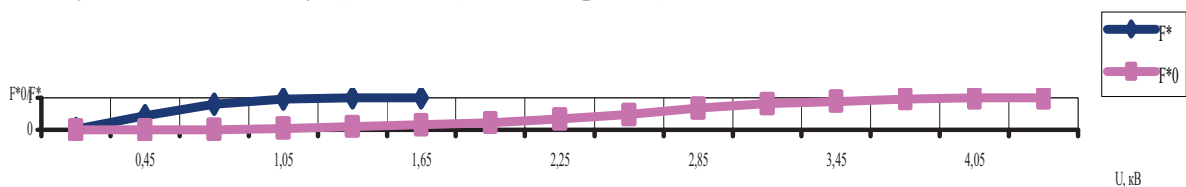


Рис. 2. Зміна дефектності ізоляції емальпроводу *Grade 1(L)-0,28 IEC 317-8* під час дослідження згідно з методикою [1]: F^*0 – функція розподілу напруг пробою у вихідному стані; F^* – те саме після намотування

Висновки. Проведеними дослідженнями підтверджено значне погіршення ізоляції емальпроводу внаслідок дії технологічного й конструктивного чинників – активного зносу ізоляції у демпфуючому пристрої намотувального верстата з підсилювальною дією геометрії обмоткового елемента.

Побудована математична модель щільності розподілу напруг пробою ізоляції у її найбільш дефектованих місцях й проведене її узгодження зі статистичною моделлю, отриманою під час випробувань, що дало змогу кількісно оцінити і спрогнозувати ймовірність пробою ізоляції за дії експлуатаційних навантажень.

Застосування розробленої методики істотно підвищує ефективність діагностування та достовірність результатів випробувань ізоляції емальпроводів, в результаті чого стає можливим налаштування технологічних ланок на бездефектне виготовлення обмоткових елементів електричних апаратів.

1. Патент на винахід 54560 Україна, МПК⁷ G 01 R 31/12. Спосіб оцінки ступеня дефектності ізоляції емальпроводів / О.О. Вакуленко; заявник та патентотримач ВАТ „Ватра”.– №2000042307; заявл. 24.04.00; Опубл. 17.03.03, Бюл. №3. 2. Пешков И.Б. Обмоточные провода: учеб. пособие [для вузов]. – М.: Энергоатомиздат, 1983, – 352 с. 3. Delivery Instructions for Round Enamelled Winding Wires: LS-QW-03.– Vossloh Schwabe Urbach, 1993.– 6 p. 4. Шор Я.Б. Таблицы для анализа и контроля надежности /Я.Б. Шор, Ф.И. Кузьмин. – М.: Сов. радио, 1968.– 288 с. 5. Данко П.Е. Высшая математика в упражнениях и задачах. Ч. 2: учеб. пособие [для студ. вузов] / П.Е. Данко, А.Г. Попов, Т.Я. Кожевникова. – [3-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Высш. шк., 1980. – 365 с.