

С. Ю. АНТОНЕЦЬ, Л. А. ЩЕБЕНЮК, О. В. ГОЛИК, Ю. Г. ГОНТАР, А. Л. ОБОЗНИЙ, О. В. ВАСИЛЬЄВА

## СТАТИСТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ДИНАМІЧНОГО КОНТРОЛЮ ПРИ НЕРУЙНІВНИХ ВИПРОБУВАННЯХ ВИСОКОЮ НАПРУГОЮ НА ПРОХІД

У статті розглянуто аналіз неруйнівного технологічного контролю кількості дефектів в ізоляції емаль-проводу на основі поліімідної ізоляції. Розглянуто застосування статистичного аналізу результатів вимірювання показників контролю за допомогою математичної моделі тренду для їх використання в online-контролі дефектності ізоляції. Запропоновано рекомендації щодо практичного використання параметрів функції тренду для обробки отриманих показників вимірювань. Основними параметрами тренду є припрацювання та період нормального ізолювання впродовж технологічного часу. Теоретично показаний та підтверджений вимірюваннями алгоритм кількісної оцінки тенденції зміни дефектності емаль ізоляції для проводу ПЕЕІДХ2–200 з двошаровою поліімідною ізоляцією впродовж неперервного технологічного циклу. Алгоритм дозволяє забезпечити прийняття технічних рішень як в режимі реального часу, так і віддаленого аналізу. Наведено дані про чутливість такого підходу до технологічних змін.

**Ключові слова:** емаль-провід, поліімідна ізоляція, дефектність, технологічний контроль, випробування напругою.

S. Y. ANTONETS, L. A. SHCHEBENIUK, O. V. HOLYK, Y. H. GONTAR, A. L. OBOZNYI, O. V. VASYLIEVA

## STATISTICAL PROBLEMS OF DYNAMIC CONTROL IN HIGH VOLTAGE NON-DESTRUCTIVE TESTS DURING MANUFACTURING

The article shows the results of non-destructive technological control of the defects number in the enamel insulated wire based on polyimide insulation. The application of statistical analysis of the control indicators measurement results with the help of a mathematical trend model for their use in insulation defects online control is considered. Recommendations for the practical use of the trend function parameters for processing the obtained measurement indicators are offered. The main parameters of the trend are run-in and the period of normal isolation during technological time. Theoretically shown and confirmed by measurements, the algorithm for quantitative assessment of the tendency of enamel insulation defects change for PEEIDH2-200 wire with two-layer polyimide insulation during the inline technological cycle. The algorithm allows for making technical decisions both in real time and remote analysis. Data on the sensitivity of this approach to technological changes are given.

**Keywords:** enamel wire, polyimide insulation, defectiveness, technological control, voltage testing.

**Вступ.** Випробування ізоляції напругою на прохід – масовий вид технологічного контролю в кабельному виробництві. Традиційно такі випробування використовують безпосередньо в процесі руху кабелю чи ізолюваного проводу в технологічній лінії для контролю цілісності або однорідності ізоляційного покриття. Ізолювана жила чи провід рухаються через електрод апарату сухих випробувань (*Spark tester*), на який подається напруга [1].

Головною перевагою динамічних випробувань є те, що контроль відбувається в процесі виробництва, що є економічно виправданим. Головним недоліком є те, що *Spark tester* не фіксує невеликі за розміром сторонні вclusions чи мікропошкодження.

У цілому область динамічних випробувань ізоляції вивчена слабо і такі випробування регламентуються нормативними документами для конкретних видів кабельних виробів. Тому спостерігається неузгодженість вимог до умов випробувань. Наприклад, в європейських країнах і в США [3, 4, 5, 6] передбачено можливість проведення випробувань на прохід змінною, постійною та імпульсною напругою. Випробування на прохід постійною та імпульсною напругою не відповідає вимогам вітчизняної нормативної документації.

Сучасне технічне і програмне забезпечення функціонування інформаційної системи динамічного технологічного контролю високою напругою на прохід демонструють технологічні інновації у виготовленні масової кабельно-провідникової продукції на автоматизованих лініях по виробництву емаль-проводів. Наприклад, дискретне вимірювання струму через ізоляцію емаль-проводу в режимі реального технологічного часу при

дії високої напруги постійного струму забезпечує ліцензована система EFHP компанії MAG-ECOTESTER (рис.3)[1].

Але при використанні автоматизованих імпортованих технологій, саме аналіз результатів конкретного технологічного контролю як основи забезпечення достатньо високого гарантованого рівня експлуатаційних характеристик, залишаються власністю розробника інноваційної технології. Проблема організації і аналізу результатів конкретного технологічного контролю при впровадженні сучасних автоматизованих ліній масового виробництва, – одна з найактуальніших проблем вітчизняної кабельної техніки.

Фундаментом вирішення цієї проблеми, характерної для різних складових вітчизняного кабельного виробництва, є організація функціонування інформаційної системи збереження і аналізу як результатів поточного технологічного контролю, так і відповідних технологічних рішень. Саме функціонування такої інформаційної системи в режимі реального часу забезпечує:

- підвищення рівня надійності масової продукції;
- професійне управління технологічним персоналом.

Ліцензована система EFHP компанії MAG-ECOTESTER [1] забезпечує неруйнівний технологічний контроль в широкому діапазоні параметрів: випробувальна напруга від 300 В до 4000 В з кроком 1 В; критичний струм  $I_{кр}$ , за досягнення якого фіксується дефект ( $e_f$ ) від 4 мкА до 40 мкА з кроком 1 мкА.

Але алгоритм визначення коваранції результатів технологічного online-контролю дефектності ізоляції, який реалізований в оснащенні емаль-агрегатів світових виробників відповідного обладнання, з парамет-

рами надійності емаль-ізоляції під дією експлуатаційних навантажень має бути створений саме для конкретного виробництва і, базуючись на відповідному досягнутому рівні, має забезпечувати вектор підвищення рівня надійності продукції.

**Аналіз досягнутого рівня.** Для оцінювання гарантованого рівня готової продукції використовують комплекс технічних параметрів. Для емаль-проводу з двошаровою ізоляцією основними параметрами є [2]:

$U$  – напруга пробою емаль-ізоляції;

$N$  – механічна міцність емаль-ізоляції при терті;

$\delta$  – відносне видовження при розриві;

$d$  – діаметр емаль-проводу;

$R_{\text{пр}}$  – електричний опір провідника;

$A(F, g)$  – показник адгезії емаль-ізоляції до міді при дії сили  $F$  і прискорення  $g$ ;

$t(\theta, F)$  – показник термопластичності емаль-ізоляції (час до продавлення ізоляції під дією сили  $F$  за температури  $\theta$ );

$e_r$  – число дефектів в емаль-ізоляції на одиничній довжині, зафіксоване при випробуванні високою напругою на прохід.

Всі ці параметри, окрім кількості дефектів  $e_r$  в емаль-ізоляції, визначають на малих вибірках, які не перевищують тисячну долю виготовленої продукції. До того ж процедури їх визначення (крім діаметру  $d$  і електричного опору  $R_{\text{пр}}$ ) є руйнівними, тобто одержані результати засвідчують не гранично допустимий рівень показника, а гарантовано руйнівний його рівень. Єдиним параметром в названому комплексі, придатним для оцінювання гарантованого рівня готової продукції, є кількість дефектів  $e_r$  в емаль-ізоляції, зафіксована при випробуваннях високою напругою на прохід. При цьому процедура контролю є неруйнівною і забезпечує контроль щонайменше 80% довжини готової продукції.

Під дією випробувальної напруги  $U$  постійного струму (імпульси напруги тривалістю 10 мс) відбувається дискретне вимірювання струму через ізоляцію і фіксується кількість дефектів на кожній наступній довжині 100 м. Дефектом є місце довжиною 0,1 м, в якому струм через ізоляцію перевищує  $I_{\text{кр}}$ . Система ЕФНР фіксує на кожній котушці кількість контрольних довжин проводу, які належать до чотирьох груп за кількістю дефектів ( $e_r$ ):

1 –  $e_r < 4$  (практично бездефектна);

2-3 –  $3 < e_r < 9$  та  $8 < e_r < 18$  (малодефектні)

4 –  $e_r > 18$  (найбільш дефектна).

Статистичні показники числа дефектів, зафіксовані для кожної котушки, зберігаються на носіях для подальшого аналізу. Система ЕФНР – приклад сучасного технологічного контролю, за яким критерії прийняття технологічних рішень встановлює виробник, базуючись на відповідному досягнутому рівні, що має забезпечувати вектор підвищення рівня надійності продукції.

**Постановка проблеми.** Між задачами приймального і поточного технологічного контролю значна теоретична і технічна різниця [3]. Для оцінювання гарантованого рівня технічних параметрів продукції впродовж технологічного процесу доцільно використовувати математичний апарат граничних розподілів [4].

В даному разі мова йде про випробування напругою на прохід (тобто безпосередньо в процесі руху кабельного виробу в технологічній лінії), який є масовим динамічним [5] видом неруйнівного контролю в кабельному виробництві.

Традиційно випробування на прохід використовують для перевірки цілісності ізоляції. Тому випробувальна напруга має виявляти грубі дефекти, не погіршуючи стан здорової ізоляції [6].

Теоретично динамічні випробування ізоляції в світі вивчені слабо [5], а в практиці їх використання існують суттєві протиріччя. Так, в багатьох країнах нормованими є випробування на прохід тільки змінною напругою, а в світі використовують і змінну, і імпульсну, і (переважно) постійну напругу [5, 6, 7, 8].

**Мета роботи.** Метою цієї роботи є оцінка рівня дефектності ізоляції емаль-проводів, ізольованих поліімідними співполімерами, при випробуваннях високою напругою на прохід шляхом аналізу тренду технологічного процесу.

**Основні результати.** Сумарна кількість дефектів  $e_r$  ізоляції проводу в процесі виготовлення впродовж 24 годин свідчить про наявність двох різних періодів в неперервному автоматичному процесі (рис. 1).

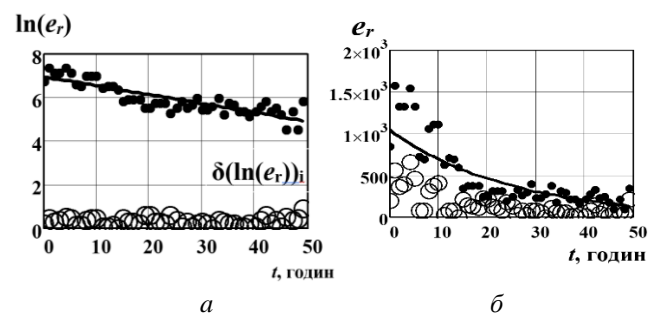


Рис. 1. Ілюстрація розділення масиву даних про кількість дефектів  $e_r$  на котушці (чорні точки) на детерміновану функцію (тренд) і випадкову складову  $\delta_i$  (пусті точки)

Суттєва різниця динаміки зміни дефектності в ці періоди свідчить про те, що в технологічному циклі слід розрізняти періоди припрацювання (підвищена, але швидко спадаюча дефектність на початку технологічного циклу, орієнтовно 15 годин від початку циклу) і періоди нормального ізолювання (дефектність ізоляції стабільна, – понад 35 годин, орієнтовно неперервний цикл може продовжуватись до 100 годин). При цьому сама мета технологічного контролю – виявлення і оцінювання змін в технологічному процесі. Теоретично це означає, що кожен поточний результат може бути елементом невідомого статистичного масиву. Тому для поточного аналізу необхідним є конкретний алгоритм обробки і представлення результатів, що здатен забезпечити прийняття технічних рішень як в режимі реального часу, так і віддаленого аналізу (збереження поточних даних на магнітних носіях).

Основні вимоги до такого алгоритму:

1 – оцінка тенденції змінення контрольного параметру як функції технологічного часу (технологічного тренду) і розділення тренду та випадкових відхилень. Таке розділення можливе за допомогою відомої статисти-

стичної моделі тренду з помилкою і використане в дослідженні для оцінки тренду саме при випробуваннях емаль-ізоляції високою напругою на прохід;

2 – ігнорування класичного принципу «більше вимірювань – більша точність» шляхом виділення елементарного відрізка технологічного часу  $\Delta t$ , для якого виконується статистична обробка даних. Застосування статистичних процедур дискретних інтервальних моделей для аналізу і прийняття поточних технічних рішень щодо кожної котушки проводу (система EFHP) або впродовж визначеного технологічного періоду (година, доба тощо) як частини всього технологічного циклу;

3 – ігнорування нормативних математичних принципів оцінювання надійності технологічних систем, що по суті зумовлюють обмеження кількості параметрів, що контролюються. Таке обмеження може бути зумовлене техніко-економічними міркуваннями, але аж ніяк не математичними. Очевидно, що чим більше контрольних параметрів, тим більше інформації, тим точніший прогноз. Використання відомих універсальних математичних процедур емпіричного оцінювання параметру потоку подій (інтенсивності подій) для оцінки ймовірності знаходження технологічної системи у підконтрольному стані має забезпечити відкритий спектр необхідних для аналізу контрольних параметрів (багатопараметричний контроль).

Необхідність виділення тренду технологічного процесу є принциповою, оскільки можливі зміни в ньому скоріше правило, ніж виключення, а роль оцінки і аналізу причин цих змін лише зростає із автоматизацією виробництва, особливо при використанні інноваційних технологій. Наприклад, очевидний тренд діаметру  $d_p$  мідної проволочки (рис. 2) впродовж проходження маршруту (спостерігається технологічна витяжка).



Рис. 2. Діаметр мідного провідника  $d_p$  після проходження відповідного калібру в маршруті емалювання: впродовж проходження маршруту спостерігається технологічна витяжка, більша одного відсотка

Алгоритм розрахунку параметрів тренду:

$$x_i = f(t_i) + \delta_i \quad (1)$$

Для нормального розподілу з параметрами  $M$  і  $\sigma$ :

$$M = x(t) = a + b(t - t_{cp}), \quad (2)$$

де оцінки параметрів  $a$ ,  $b$  і  $\sigma$ :

$$a^* = x_{cp}; \quad (3)$$

$$b^* = \frac{\sum(t_i - t_{cp})(x_i - x_{cp})}{\sum(t_i - t_{cp})^2}; \quad (4)$$

$$\sigma^* = \left\{ n^{-1} \sum [x_i - a^* - b^*(t_i - t_{cp})]^2 \right\}^{0.5}. \quad (5)$$

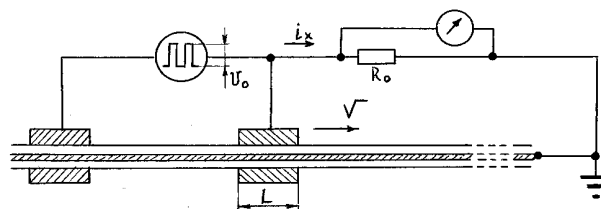


Рис. 3. Схема дискретного вимірювання струму через ізоляцію високою напругою на прохід (система EFHP фірми MAG-ECOTESTER)

Виділення тренду технологічного процесу дає можливість оцінки тенденції зміни контрольного параметру, як результату технологічних причин, які мають бути визначені. Без такої оцінки саме поняття технологічного контролю не є визначеним, оскільки не містить кількісну складову для прийняття технологічних рішень. Така орієнтовна оцінка тренду впродовж достатньо малих  $\Delta t$  дає можливість оперативно оцінювати динаміку змінювання дефектності, в даному разі її зменшення. Але така проста оцінка технологічного тренду окремого параметру доцільна для орієнтовного оцінювання наявності тренду статистичного ансамблю результатів спостережень.

А для оцінювання гарантованого технічного рівня готового емаль-проводу з двошаровою ізоляцією використовують комплекс з восьми дуже різних контрольних параметрів з різними одиницями виміру, частина з них є суто умовними, наприклад  $A(F, g)$  – показник адгезії емаль-ізоляції до міді при дії сили  $F$  і прискорення  $g$ ;  $t(\theta, F)$  – показник термопластичності емаль-ізоляції (час до продавлення ізоляції під дією сили  $F$  за температури  $\theta$ ).

Ні щодо випадкової складової  $\delta_i$  (при математичному сподіванні  $M(\delta) = 0$ ), ні щодо взаємної незалежності контрольних параметрів, ні щодо виду детермінованої функції тренду інформації немає. Навіть оцінки тренду, які для прогнозу мають бути достатньо статистично сталими, такими вочевидь не є (див. розташування точок і лінії тренду на рис. 1а).

Для технологічного контролю по спектру ймовірно взаємозалежних параметрів (див. рис. 4) доцільно тенденцію дрейфу технологічного процесу визначати, використовуючи відносну дисперсію контрольних параметрів. Це дозволяє порівнювати всі параметри спектру і обирати для прийняття технологічних рішень більш чутливі до змін і водночас більш значущі технічно.

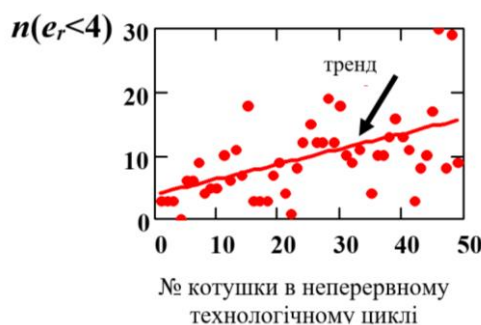


Рис. 4. Аналітичне представлення функції  $e_r(t)$  у вигляді лінійного тренду  $f(t)$  і випадкової складової  $\delta_i$  дозволяє розділити технологічний тренд і розсіяння результатів контролю [11]

Значення коефіцієнту лінійної кореляції на рис. 5 свідчить проти взаємної незалежності двох контрольних параметрів.

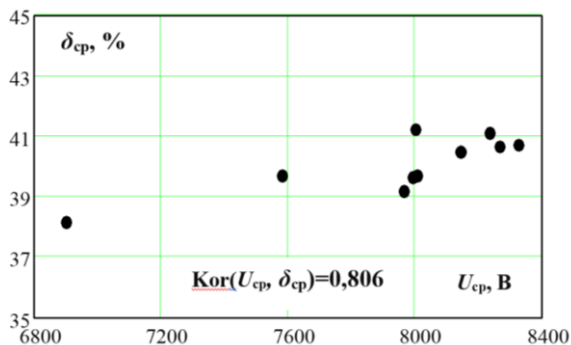


Рис.5. Кореляція середніх значень пробивної напруги  $U_{пр}$  ( $U_{cp}=M [U_{пр}]$ ) і середніх значень відносного видовження при розриві ( $\delta_{cp}=M [\delta]$ ) для 10 послідовних періодів технологічного процесу, в кожному з яких виготовлено 20 котушок емаль-проводу

Кількісною характеристикою взаємозалежності двох одномірних випадкових величин  $\xi$  і  $\eta$  є їх **коваріація**: математичне сподівання добутків відхилень всіх значень кожної з них від її математичного сподівання:

$$cov(\xi, \eta) = M(\xi - M\xi)(\eta - M\eta). \quad (6)$$

Відповідно  $cov(\xi, \eta)$  є характеристикою із складною розмірністю і може приймати як від'ємні, так і додатні значення.

Значення і розмірність статистичної міри спільної мінливості двох випадкових величин, визначеної формулою (6) є чутливими саме до розмірності вихідних масивів даних. Тому коваріація є джерелом інформації про взаємозалежність двох випадкових величин, які стабільно надходять для оброблення і аналізу в умовах контролю продукції автоматизованого виробництва, зокрема при випробуваннях напругою на прохід (тобто безпосередньо в процесі руху кабельного виробу в технологічній лінії), який є масовим динамічним видом неруйнівного контролю в виробництві.

Представлений на рис.1 фрагмент результатів контролю дефектності ізоляції постійною напругою на прохід в режимі реального часу – це безпосередні результати контролю дефектності, як суми кількості дефектів по чотирьом параметрам:  $f_1(t)$ ;  $f_2(t)$ ;  $f_3(t)$ ;  $f_4(t)$ . Ці параметри статистично не є взаємнонезалежними, оскільки пов'язані умовою адекватності:  $\sum f_i(t) = 1$ . Вони суттєво відрізняються, і саме їх різниця є основною інформацією для аналізу результатів контролю. На рис.5 представлені експериментально визначені частоти появи чотирьох згаданих параметрів дефектності впродовж неперервного технологічного часу виготовлення 50 котушок емаль-проводу ПЕЕІДХ2–200 з двошаровою ізоляцією на основі полімідних співполімерів.

Дані рис. 6 свідчать про те, що динаміка появи параметрів дефектності  $f_2(t)$  і  $f_3(t)$  впродовж неперервного технологічного циклу суттєво не відрізняється, тому їх об'єднано в параметр умовно малої сумарної дефектності  $f_s(t)$ :  $3 < e_r < 18$  для співставлення з параметром найбільшої дефектності  $f_4(t)$ .

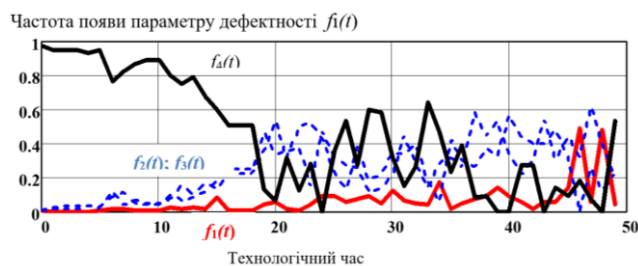


Рис.6. Експериментальні оцінки частоти появи чотирьох параметрів дефектності:  $f_1(t)$ ;  $f_2(t)$ ;  $f_3(t)$ ;  $f_4(t)$  емаль-проводу ПЕЕІДХ2 200 впродовж неперервного технологічного часу виготовлення 50 котушок ( $\approx 3600$  м кожна)

Результати попарного співставлення параметрів  $f_1(t)$ ;  $f_2(t)$ ;  $f_3(t)$ ;  $f_s(t)$ ;  $f_4(t)$  для аналізу динаміки їх взаємозалежності впродовж неперервного технологічного циклу наведені на рис.6 у вигляді змінної коваріації двох одномірних випадкових величин  $\xi$  і  $\eta$  відповідно до формули (6):

$$x(\xi, \eta) = (\xi - M\xi)(\eta - M\eta), \quad (7)$$

де  $M\xi$  і  $M\eta$  – відповідно математичні сподівання цих випадкових величин.

За (7) значення змінної коваріації параметрів  $f_1(t)$ ;  $f_2(t)$ ;  $f_3(t)$ ;  $f_s(t)$ ;  $f_4(t)$  для аналізу спільної мінливості двох випадкових величин впродовж неперервного технологічного циклу обчислені за формулами:

$$x_{14_i}(f_1, f_4) = (f_{1_i} - f_{1_{cp}})(f_{4_i} - f_{4_{cp}}), \quad (8)$$

$$x_{23_i}(f_2, f_3) = (f_{2_i} - f_{2_{cp}})(f_{3_i} - f_{3_{cp}}), \quad (9)$$

$$x_{s_i}(f_s, f_4) = (f_{s_i} - f_{s_{cp}})(f_{4_i} - f_{4_{cp}}). \quad (10)$$

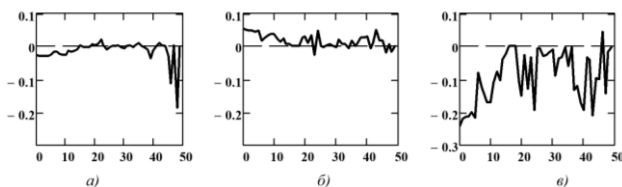


Рис. 7. Залежності змінної коваріації двох одномірних випадкових величин (7) для аналізу спільної мінливості двох параметрів серед спектру частот появи різної дефектності  $f_i(t)$ ;  $f_2(t)$ ;  $f_3(t)$ ;  $f_s(t)$ ;  $f_4(t)$  (рис. 6) впродовж неперервного технологічного циклу виготовлення емаль-проводу ПЕЕІДХ2-200: а) значення змінної коваріації параметрів  $f_1(t)$  і  $f_4(t)$ , що є частотами появи практично бездефектних контрольних довжин  $f_1(t)$   $e_r < 4$  і найбільш дефектних довжин  $f_4(t)$   $e_r > 18$ ; б) значення змінної коваріації параметрів  $f_2(t)$ ;  $f_3(t)$ , що є частотами появи малодфектних контрольних довжин  $f_2(t)$ :  $3 < e_r < 9$ ; і  $f_3(t)$ :  $8 < e_r < 18$ ; в) значення змінної коваріації параметрів  $f_s(t)$  і  $f_4(t)$ , що є сумою частот появи малодфектних контрольних довжин  $f_2(t)$  +  $f_3(t)$  і найбільш дефектних довжин  $f_4(t)$   $e_r > 18$

Дані рис. 7 щодо спільної мінливості пар параметрів серед спектру частот появи різної дефектності засвідчили, що до орієнтовно 14-ї котушки спостерігається стабільна тенденція зменшення від'ємних значень показника коваріації, тобто є поступове зменшення відхилень від середнього рівня для найдефектніших зразків (ці відхилення всі з "+" , з одного боку, і від'ємні відхилення для бездефектних зразків порівняно із їх середнім значенням, з іншого). Тобто, за підвищеної дефектності ізоляції локальні одиночні defe-

кти контроль не фіксує. Це є ознакою відносно швидкого зменшення дефектності, що характерне для так званого періоду припрацювання технологічного процесу.

Після ж 44-ї котушки спостерігаються значні стрибки показника коварачії у область від'ємних значень, які свідчать, з огляду на стабільність кількості самих дефектних зразків, про те, що є пропуски у фіксації 1-го чи 2-х дефектів, роздільна здатність контролю зменшена.

Орієнтовно після 14-ї котушки спостерігається стабільно близькі до нуля додатні значення показника коварачії, що є ознакою надійної оцінки "середньої" дефектності  $f_{s_{cp}}$ . Це є свідченням правильного вибору електричних параметрів контролю (напруги і критичного струму), тобто є свідченням можливості «налаштування» контролю від досягнутого рівня дефектності ізоляції. Також спостерігаються значні від'ємні значення показника коварачії без очевидного тренду зменшення їх по абсолютній величині, що свідчить про достатньо високу роздільну здатність контролю при вибраних параметрах і можливість оцінки умовної дефектності ізоляції в даному конкретному технологічному процесі.

Поява після 44-ї котушки від'ємних значень показника коварачії є сигналом про порушення технологічної стабільності.

В цілому одержані дані свідчать про значну інформативність неруйнівного випробування емаль-ізоляції високою постійною напругою на прохід. Перш за все це інструмент для правильного вибору електричних параметрів контролю (напруги і критичного струму).

Всі кількісні оцінки дефектності є умовними і стають потужним джерелом інформації саме завдяки порівняльному аналізу цілого спектру параметрів, який не обмежується розглянутими експериментальними оцінками частоти появи чотирьох параметрів дефектності:  $f_1(t)$ ;  $f_2(t)$ ;  $f_3(t)$ ;  $f_4(t)$ . Наприклад, система EFHP фіксує на кожній котушці значення максимальної кількості дефектів, зафіксованих на контрольній довжині. Фіксуються також середня кількість дефектів на контрольній довжині і їх середньоквадратичне відхилення, що дає можливість вибору моделі для функції розподілу кількості дефектів на кожній котушці.

#### Висновки.

1. Основним параметром в комплексі технічних випробувань, придатним для оцінювання гарантованого рівня готової продукції, є кількість дефектів в емаль-ізоляції, зафіксована при випробуваннях високою напругою на прохід. Ці випробування є неруйнівними та забезпечують контроль щонайменше 80% довжини готової продукції, що є достатньо високим показником.

2. Існує необхідність відокремлювати періоди припрацювання на початку технологічного циклу від періоду нормального ізолювання для зменшення статистичної похибки. Для online-аналізу якості емаль-проводу необхідно використовувати алгоритм обробки і представлення результатів випробувань напругою на прохід.

3. Принциповим є необхідність виділення тренду технологічного процесу, оскільки це дає можливість оцінки тенденції зміни контрольного параметру, як ре-

зультату технологічних причин. Що мають бути визначеними. Такий підхід дає можливість оперативно оцінювати динаміку зміни дефектності.

4. В цілому одержані дані свідчать про значну інформативність неруйнівного випробування емаль-ізоляції високою постійною напругою на прохід. Перш за все це інструмент для правильного вибору електричних параметрів контролю (напруги і критичного струму), що є свідченням можливості «настройки» контролю від досягнутого рівня дефектності ізоляції.

Тим не менше, значна інформативність неруйнівного випробування емаль-ізоляції високою постійною напругою на прохід в режимі реального часу саме завдяки значному масиву порівняльної інформації зумовлює появу ще більшої кількості запитань. Перш за все щодо дискретної процедури вимірювань при значних швидкостях руху ізоляції через електроди (аж до 1000 м за хвилину). Спроби розроблення практично корисних дискретних моделей для таких вимірювань відомі, але навіть орієнтовна емпірична перевірка їх залишається можливістю для лабораторій, в яких започатковані системи типу EFHP.

#### Список літератури:

- 1 British standard BS 5099:2004. Electric cables – Voltage levels for spark testing.
- 2 Голик, О.В. Исследование дефектности нагревостойких проводов с двойной полиимидной изоляцией при испытаниях высоким напряжением на проход. // Український метрологічний журнал. – Харків, 2009. – Вип. 1. – С. 12 – 17.
- 3 British standard BS EN 50356:2002. Method for spark testing of cables.
- 4 Математичні задачі електроенергетики. Математичне моделювання електропостачальних систем / М. Й. Бурбело. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 185 с.
- 5 CEI/IEC 62230:2006. Electric cables – Spark-test method.
- 6 NEMA Standards Publication WC 56-1986 (R2005). 3.0 kHz Insulation Continuity Proof Testing of Wire and Cable.
- 7 В.М. Золотарьов, О.А. Науменко. Стандартизація випробувань ізоляції на прохід. Силові кабелі низької та середньої напруги. – Харків: Регіон-інформ, 2000. – 376 с.
- 8 Математичне моделювання в електроенергетиці / О. В. Кириленко, М. С. Сегада, О. Ф. Буткевич, Т. А. Мазур. Друге видання. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. - 608 с.
- 9 Antonets Yu.A., Shchebeniuk L.A., Grechko O.M. Technological monitoring of electrical resistance of pressed cable conductors in production conditions. Electrical engineering & electro mechanics, 2019, no. 4, pp. 48-52. doi:10.20998/2074-272X.2019.4.07.
- 10 Petro Vevtukh; Oleksandr Vakulenko. Features of statistical data processing at insulation test-ing of enameled electric wires // Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. – 2016. – № 1 (81). – pp. 98 –105.
- 11 Guryan A.G., Golik O.V., Zolotaryov V.V., Antonets S.Yu., Shchebeniuk L.A., Grechko O.M. A statistical model of monitoring of insulation breakdown voltage stability in the process of enameled wires production. Electrical engineering & electromechanics, 2019, no.1, pp. 46-50. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.08.
- 13 Zolotaryov V.M., Antonets Yu.P., Antonets S.Yu., Golik O.V., Shchebeniuk L.A. Online technological monitoring of insulation defects in enameled wires. Electrical engineering & electromechanics, 2017, no.4, pp. 55-60. doi: 10.20998/2074-272X.2017.4.09.

#### References (transliterated):

- 1 British standard BS 5099:2004. Electric cables – Voltage levels for spark testing.
- 2 Golik, O.V. Issledovanie defektnosti nagrevostoykikh provodov s dvoynoi poliimidnoi izolyatsiei pri ispytaniyakh vysokim napryazheniem na prokhod. // Ukrain'skii metrologich-nii zhurnal. – Kharkiv, 2009. – Vip. 1. – S. 12–17.

- 3 British standard BS EN 50356:2002. *Method for spark testing of cables*.
- 4 *Matematichni zadachi elektroenergetiki. Matematichne modelyuvannya elektropostachal'nikh sistem* / M. I. Burbelo. – Vin-nitsya : VNTU, 2016. – 185 p.
- 5 CEI/IEC 62230:2006. *Electric cables – Spark-test method*.
- 6 NEMA Standards Publication WC 56-1986 (R2005). 3.0 kHz Insulation Continuity Proof Testing of Wire and Cable.
- 7 V.M. Zolotar'ov, O.A. Naumenko. *Standartizatsiya viprobuvan' izolyatsii na prokhid*. Silovi kabeli niz'koї ta seredn'oї naprugi. – Kharkiv: Region-inform, 2000. – 376 p.
- 8 *Matematichne modelyuvannya v elektroenergetitsi* / O. V. Kirilenko, M. S. Segeda, O. F. Butkevich, T. A. Mazur. Druge vidannya. L'viv: Vidavnistvo L'vivs'koї politekhniky, 2013. - 608 p.
- 9 Antonets Yu.A., Shchebeniuk L.A., Grehko O.M. *Technological monitoring of electrical resistance of pressed cable conductors in production conditions*. Electrical engineering & electro mechanics, 2019, no. 4, pp. 48-52. doi:10.20998/2074-272X.2019.4.07.
- 10 Petro Vevtukh; Oleksandr Vakulenko. *Features of statistical data processing at insulation testing of enameled electric wires* // Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. – 2016. – № 1 (81). – pp. 98 –105.
- 11 Guryn A.G., Golik O.V., Zolotaryov V.V., Antonets S.Yu., Shchebeniuk L.A., Grechko O.M. *A statistical model of monitoring of insulation breakdown voltage stability in the process of enameled wires production*. Electrical engineering & electromechanics, 2019, no.1, pp. 46-50. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.08.
- 13 Zolotaryov V.M., Antonets Yu.P., Antonets S.Yu., Golik O.V., Shchebeniuk L.A. *Online technological monitoring of insulation defects in enameled wires*. Electrical engineering & electromechanics, 2017, no.4, pp. 55-60. doi:10.20998/2074-272X.2017.4.09.

Надійшла (received) 02.12.2022

#### **Відомості про авторів / About the Authors**

**Антонець Станіслав Юрійович (Antonets Stanislav)** – кандидат технічних наук, начальник УЗЕЗ, ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

**Щебенюк Леся Артемівна (Shchebeniuk Lesia)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, м. Харків, Україна; e-mail: Lesia.Shchebeniuk@khpri.edu.ua.

**Голік Оксана Вячеславівна (Holiuk Oksana)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, м. Харків, Україна; e-mail: Oksana.Holiuk@khpri.edu.ua

**Гонтар Юлія Григорівна (Gontar Yuliya)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4433-7305>, e-mail: Yuliia.Gontar@khpri.edu.ua.

**Обозний Андрій Леонідович (Oboznii Andrii)** – головний технолог ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

**Васильєва Оксана Володимирівна (Vasylieva Oksana)** – начальник ВОПіЕ ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ»; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua