

УДК 621.315.2

О.В. ГОЛИК, С. Ю. АНТОНЕЦЬ, Л.А. ЩЕБЕНЮК В. В. ЗОЛОТАРЬОВ**ТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТІВ В ЕМАЛЬПРОВОДІ З ПОЛІІМІДНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ**

Представлено результати неруйнівного технологічного контролю кількості дефектів в ізоляції емаль проводу на основі поліімідного полімеру. Розглянуто застосування статистичного методу аналізу результатів вимірювання показників цього контролю за допомогою математичної моделі тренду для використання результатів в активному технологічному контролі. Запропоновано рекомендації щодо практичного використання параметрів функції тренду в технологічному контролі. Параметром тренду є швидкість зменшення (чи збільшення) довжини проводу з заданою дефектністю впродовж технологічного циклу. Теоретично показана і вимірюваннями підтверджена можливість кількісної оцінки тенденції зміни впродовж технологічного циклу дефектності емаль ізоляції для проводу ПЭИДХ2 – 200 з двохшаровою поліімідною ізоляцією номінальним діаметром 0,56 мм. Визначення кількісної оцінки тенденції зміни дефектності емаль ізоляції дозволяє виділити і кількісно оцінити випадкову похибку технологічного процесу – сумарну похибку результатів технологічного контролю, яка є кількісною характеристикою випадкової складової стабільності технологічного процесу і зумовлена багатьма чинниками, впливом кожного з яких можна знехтувати порівняно із сумою. Бібл. 5, рис. 6.

Ключові слова: емаль провод, поліімідна ізоляція, дефектність ізоляції, технологічний контроль, випробування напругою.

Представлены результаты неразрушающего технологического контроля количества дефектов в изоляции эмаль провода на основе полиимидного полимера. Рассмотрено применение статистического метода анализа результатов измерения показателей такого контроля с помощью математической модели тренда для использования результатов в активном технологическом контроле. Предложены рекомендации для практического использования параметров функции тренда в технологическом контроле. Параметром тренда является скорость уменьшения (или увеличения) длины провода с заданной дефектностью в течение технологического цикла. Теоретически показана и измерениями подтверждена возможность количественной оценки тенденции изменения в течение технологического цикла дефектности эмальизоляции для провода ПЭИДХ2 – 200 с двухслойной полиимидной изоляцией номинальным диаметром 0,56 мм. Определение количественной оценки тенденции изменения дефектности эмаль изоляции позволяет выделить и количественно оценить случайную ошибку технологического процесса – суммарную ошибку результатов технологического контроля, которая является количественной характеристикой случайной составляющей стабильности технологического процесса и обусловлена большим количеством причин, влиянием каждого из которых можно пренебречь по сравнению с суммой. Библ. 5, рис. 6.

Ключевые слова: эмаль провод, полиимидная изоляция, дефектность изоляции, технологический контроль, испытания напряжением.

In this paper can be used to not destroying technological monitoring of defects isolation enameled wire with polyimide polymer. The thesis is devoted to the statistical method for processing, comparison and analysis of outcomes of measurements of parameters isolation it enameled wire because of mathematical model of trend for application in active technological monitoring is developed; to development used of the recommendations for parameters of such monitoring. Is theoretically justified and the possibility of a diminution of dependence of an error from a velocity of movement of a wire for want of quantifying of defects enameled isolation not destroying tests by high voltage. The dependence of average value of amount of defects for enameled wire ПЭИДХ2 – 200 with two-sheeted polyimide by isolation in a range of nominal diameter 0,56 mm is experimentally determined. The technological monitoring purpose is the reduce of quantifying defects of enameled isolation.

Key words: enameled wire, polyimide by isolation, defects of isolation, technological monitoring, tests by high voltage.

Постановка проблеми. Умови суворої конкуренції ринкових механізмів при впровадженні масової інноваційної продукції в кабельному виробництві реально диктують використання в якості основного критерію ліквідності ціновий фактор. Такий критерій може входити у протиріччя з технічним рівнем продукції. Це протиріччя стосується не тільки ринку емальпроводів. Але воно особливо актуальне для відносно дорогої інноваційної продукції, якою є емальпровід на основі поліімідних синтетичних співполімерів з температурним індексом 200 °С.

Такі емальпроводи мають найвищі на сьогодні електричні і механічні властивостями ізоляції [1, 2]. Для їх виробництва застосовують складне і дороге технологічне обладнання з високими швидкостями емалювання (до 1000 м/хв.) і глибоким каталітичним спаленням розчинників емальлаків [2]. Впровадження таких інноваційних видів кабельної продукції у виробництво дозволяє забезпечити найвищий сучасний рівень електричної, механічної міцності і нагрівостійкості виткової ізоляції обмоток електричних машин і апаратів. Відповідно забезпечити конкурентоспроможність електромашинобудуван-

ня.

Протиріччя між відносно високою вартістю інноваційної продукції, виготовлення якої базується на використанні сучасних передових технологій і матеріалів, з одного боку, і використання в якості основного критерію ліквідності цінового фактору, з іншого, вимагає від виробника такої продукції впровадження нестандартних технічних і організаційних рішень щодо технологічного забезпечення найвищого сучасного рівня продукції із одночасним зменшенням затрат на її виробництво.

Задача, на перший погляд, здається такою, що не має вирішення для виробників в період освоєння відомої в світі, але інноваційної саме для них продукції. Це наглядно демонструє сучасна концепція “Шість сігм” (“6σ”) [1]. В ній критерієм якості продукції є її однорідність, яка визначається статистичною процедурою нормального розподілу [2]. По суті концепція “Шість сігм” є демонстрацією досягнень і маркетинговим захистом відомого виробника масової продукції. Освоєння інноваційної продукції конкретним виробником вимагає застосування системи оперативного технологічного контролю, який забезпечує ліквідність продукції за досягнутого рів-

ня технічних параметрів. Проблема для конкретного виробника полягає в розробленні і впровадженні нестандартних технічних і організаційних рішень технологічного контролю з обов'язковою прив'язкою технічних параметрів до досягнутого рівня технології виробництва. В даному разі мова йде про емальпровід на основі поліімідних синтетичних співполімерів з подвійною ізоляцією і з температурним індексом 200 °С, виготовлений на вітчизняному кабельному заводі.

Особливістю поліефірімідних і поліамідімідних емальлаків є те, що повне завершення процесу полімеризації відбувається тільки в тонких шарах (не більше 2 ... 3 мкм). Тому на сучасних емальагрегатах застосовують маршрути з кількістю проходів проводу через лак до 24. Дисперсії параметрів проводу визначають після його виготовлення. Такий контроль є пасивним.

Аналіз літератури. Проблему протиріччя між відносно високою вартістю продукції і використанням в якості основного критерію ліквідності цінового фактору для проводів з поліімідною ізоляцією в [1] запропоновано вирішити шляхом встановлення нижчого рівня вимог до напруги пробою і коригування допуску на товщину ізоляції. Наприклад, для низьковольтних виробів менший рівень напруги пробою ізоляції є достатнім. Тобто запропоновано впровадження спектру потреб різних клієнтів, згідно з яким клієнт одержує провід, який максимально відповідає вимогам саме цього клієнта.

В реальній практиці такий підхід існував навіть за ситуації, коли «невідповідність стандарту переслідується за законом». Тепер, коли стандарти мають силу рекомендацій, впровадження спектру технічних вимог відповідно до потреб різних клієнтів значно розширює діапазон застосованих технічних вимог, а це, щонайменше, розмиває діапазони допустимих значень параметрів одного і того ж виробу і ускладнює відносини між виробником і користувачем продукції.

Світові виробники обладнання для емальпроводів на основі поліімідних синтетичних співполімерів [3] для поточного технологічного контролю використовують сучасні високоефективні системи неперервного статистичного контролю питомої кількості дефектів (er) ізоляції в режимі *онлайн*. Кількість дефектів – це кількість місць, в яких струм через ізоляцію перевищує встановлений. Дискретне вимірювання струму через ізоляцію при дії високої напруги постійного струму (рис.1) забезпечує система EFHP фірми MAG-ECOTESTER [3]. Статистичні показники кількості дефектів ізоляції, зафіксовані для кожної котушки зберігаються на магнітних носіях для подальшого аналізу. Це – приклад сучасного технологічного контролю, в якому критерії прийняття технологічних рішень встановлює виробник.

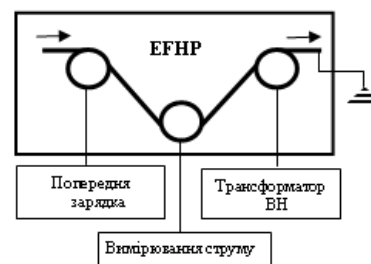


Рис. 1 – Принципова схема моніторингу числа дефектів в емальізоляції при неруйнівних випробуваннях високою напругою на прохід

Необхідність оцінки кількості дефектів ізоляції емальпроводу є загальновизнаною. Саме поняття дефекту ізоляції емальпроводу досить умовне. Від відсутності ізоляції в місці дефекту: в місці співпадання дефектів на сусідніх витках обмотки пробивна напруга дорівнює нулю [4]. До підвищеного струму через емальізоляцію, яке свідчить про наявність в місці дефекту ізоляції [3]. Значення струму, яке в [3] детекторна схема реєструє як дефект, регулюється і, наприклад, для радіальної товщини ізоляції ≈ 30 мкм становить 10 мкА при випробувальній напрузі 1500 В.

Тому одним з основних нормованих контрольних параметрів залишається напруга пробою [1, 3, 4, 5], а дисперсія напруги пробою є параметром, який опосередковано кореспондується з питомою кількістю локальних дефектів ізоляції. Обидві характеристики, і дисперсія напруги пробою, і питома кількість дефектів, відображують однорідність ізоляції.

Контроль дисперсії основних технічних параметрів продукції слугує інформаційною базою для реалізації принципу неперервного підвищення якості згідно ISO 9001:2000. Однак такий контроль не передбачений нормативною технічною документацією. Використання системи EFHP [3] для контролю статистичних показників кількості дефектів ізоляції емальпроводу на основі поліімідних співполімерів є реальним технологічним заходом, який дає необхідну інформацію для реалізації принципу неперервного підвищення якості згідно ISO 9001.

Для визначення статистичних показників дефектності в системі EFHP застосовано уніфіковані статистичні програмні модулі. Для кожної котушки фіксується кількість контрольних ділянок проводу (по 100 м) чотирьох груп дефектності:

1 група – від 0 до 3 дефектів; 2 група – від 4 до 9 дефектів; 3 група – від 10 до 18 дефектів; 4 група – більше 18 дефектів (позначення дефекту er).

Крім того фіксуються три основних статистичних показники: середня кількість дефектів на контрольній ділянці, $M[er]$; кількість дефектів на контрольній ділянці з найбільшою кількістю дефектів, er_m ; середньоквадратичне відхилення кількості дефектів на контрольній ділянці, $\sigma[er]$.

Очевидно, що зафіксовані результати випробування за допомогою системи EFHP залежать від дисперсії багатьох параметрів дроту: механічних характеристик і діаметру провідника d_p , технологічних параметрів емальювання і товщини ізоляції Δ ,

значення випробувальної напруги U і мінімального значення струму через ізоляцію I , за якого система фіксує наявність дефекту.

Тому аналіз результатів поточного технологічного контролю дефектності ізоляції емальпроводу – складна багатовимірна задача. Прийняття технологічних рішень за результатами такого контролю залежить від досвіду відповідального технолога і не є внормованим. У підсумку арбітром при прийнятному контролі залишається напруга пробою і дисперсія напруги пробою [5].

Наявним є не ефективне використання технологічного контролю статистичних показників кількості дефектів емальізоляції, реалізованого у сучасному обладнанні для виготовлення проводів на основі поліімідних співполімерів. На наш погляд ця не ефективність зумовлена фундаментальною відмінністю між безпосередніми задачами приймального і технологічного контролю.

Задача приймального контролю у масовому виробництві – встановлення відповідності рівня основних параметрів готової продукції нормативним технічним вимогам. Задача технологічного контролю – вчасне попередження виходу основних параметрів виробу за межі встановленого технологічного допуску на конкретній технологічній лінії.

Сама задача попередження включає необхідність синхронізації контролю технічних, технологічних параметрів і технологічного часу в тому чи іншому вигляді. Наприклад, для кабелів і проводів при випробуваннях "на прохід" технологічний час визначається довжиною виробу, що пройшла через вимірювач, помноженою на швидкість руху.

Оцінювання тенденції змінювання технічних і технологічних параметрів впродовж технологічного часу є основною задачею технологічного контролю.

Ціль роботи. Виконати аналіз результатів неруйнівних випробувань високою напругою на прохід емальпроводу на основі поліімідних синтетичних співполімерів з подвійною ізоляцією і з температурним індексом 200 °С, виготовлений на вітчизняному кабельному заводі, який дозволяє розділити:

- тренд технологічного процесу – суттєву детерміновану зміну результатів технологічного контролю впродовж технологічного процесу з метою встановлення технологічних чинників, які спричиняють таку зміну для прийняття рішень корекції технологічних параметрів; тренд є детермінованою кількісною характеристикою стабільності технологічного процесу;

- випадкову похибку технологічного процесу – сумарну похибку результатів технологічного контролю, яка є кількісною характеристикою випадкової складової стабільності технологічного процесу і зумовлена багатьма чинниками, впливом кожного з яких можна знехтувати порівняно із сумою.

Метою такого розділення є розроблення детермінованого і статистичного критеріїв стабільності швидкісного автоматизованого технологічного процесу виготовлення емальпроводу на основі поліімідних синтетичних співполімерів з подвійною ізоля-

цією і з температурним індексом 200 °С при неруйнівних випробуваннях високою напругою на прохід.

Основні одержані результати.

Експериментально визначено кількість er дефектів на кожній одиничній довжині 100 м для п'ятидесяти котушок емальпроводу (всього 180000 м проводу) в хронологічній послідовності виготовлення в неперервному автоматичному технологічному процесі.

Поточний контроль діаметра d_p мідного провідника в процесі емалювання (рис. 2) свідчить про наявність в технологічному процесі як тенденції поступової зміни параметрів (впродовж маршруту емалювання відбувається технологічна витяжка провідника – тренд технологічного процесу), так і випадкової складової діаметра d_p (після проходження калібрів № 4 і № 10 збільшення діаметра d_p є похибкою вимірювань), яка є частиною випадкової складової стабільності даного технологічного процесу.



Рис. 2 – Діаметр мідного провідника d_p після проходження відповідного калібру в маршруті емалювання: впродовж маршруту відбувається технологічна витяжка провідника, яка складає більше одного відсотка

Для аналізу ряду спостережень за кількістю er дефектів на кожній одиничній довжині 100 м емальпроводу застосовано статистичну модель тренда з помилкою (тільки помилка є випадковою величиною) для ряду спостережень за значеннями величини x [6]:

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

де t_i – детермінована змінна, яка є технологічним часом, який в даному разі пропорційний номеру виготовленої котушки проводу;

$f(t_i)$ – детермінована функція (тренд технологічного процесу);

δ_i – випадкова величина (випадкова складова стабільності технологічного процесу).

Значення δ_i є незалежними, однаково і нормально розподіленими. Функція $f(t)$ задана формулою або алгоритмом обчислень і залежить від ряду невідомих параметрів $c_1, \dots, c_k$, значення яких визначають методом максимальної правдоподібності.

В разі лінійної функції для кожного t значення x нормально розподілене з середнім $x(t) = a + b(t)$

– t_m) і середньоквадратичним σ . Оцінки невідомих параметрів a , b і σ :

$$a^* = x_m; \quad (2)$$

$$b^* = \Sigma(t_i - t_m)(x_i - x_m) / [\Sigma(t_i - t_m)^2]; \quad (3)$$

$$\sigma^* = \{n^{-1} \Sigma[x_i - a^* - b^*(t_i - t_m)]^2\}^{0.5}, \quad (4)$$

де t_m – середнє значення детермінованої змінної t ;

x_m – середнє ряду спостережень за значеннями величини x .

Достовірні p -процентні границі для $x(t)$ при заданому t визначає параметр γ_p розподілу Стюдента з $n - 2$ ступенями свободи:

$$a^* + b^*(t - t_m) \pm \gamma_p \sigma^* (n - 2)^{-0.5} [1 + (t - t_m)^2 n / \Sigma(t_i - t_m)^2]^{0.5}. \quad (5)$$

Для емальпроводу з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів на рис.3 наведено результати визначення кількості одиничних довжин (100 м), які містять від 18 дефектів і більше. Умовно такі одиничні довжини можна вважати найбільш дефектними (далі: «гірші стометрівки»).

x_i – кількість «гірших стометрівок» на котушці за номером i в неперервному технологічному циклі виготовлення.

$x(er > 18)$

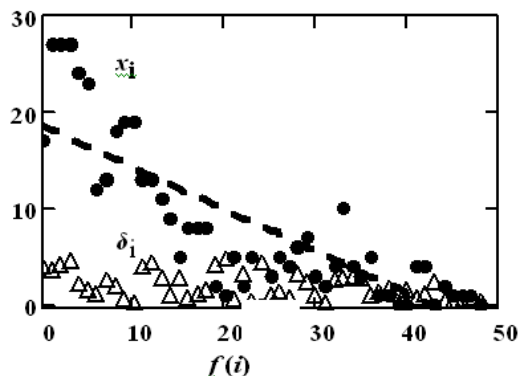


Рис. 3 – Результати визначення кількості одиничних довжин (по 100 м), які містять від 18 дефектів і більше для емальпроводу з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів: x_i – кількість «гірших стометрівок» (18 дефектів і більше) на котушці за номером i в неперервному технологічному циклі виготовлення; $f(i)$ – детермінована функція (тренд процесу), визначена за (2), (3); δ_i – випадкова складова процесу, визначена як $\delta_i = ([x_i - f(i)]^2)^{0.5}$

Тенденцію зменшення кількості «гірших стометрівок» впродовж технологічного періоду спостережень кількісно характеризує детермінована функція $f(i)$.

Випадкову складову стабільності технологічного процесу представлено як масив δ_i абсолютних значень відхилення кількості «гірших стометрівок» x_i від детермінованої функції $f(i)$:

$$\delta_i = ([x_i - f(i)]^2)^{0.5}. \quad (6)$$

В наведеному прикладі масив δ_i не має вираженого тренду і середнє значення δ_m є кількісною

оцінкою технологічної похибки впродовж технологічного періоду спостережень, зокрема – похибки використаного методу контролю.

Дані на рис.3 свідчать про принципову можливість розділення і кількісної оцінки:

по-перше, тренду технологічного процесу, причини якого і відповідні технологічні заходи мають бути встановлені технологічною службою;

по-друге, випадкової складової стабільності технологічного процесу, середнє значення якої є кількісною оцінкою технологічної похибки, яка є предметом статистичного контролю технологічного процесу.

Очевидно, що має бути передбачена можливість наявності тренду випадкової складової стабільності технологічного процесу.

В такому разі має бути застосовано статистичну модель тренда з помилкою до випадкової складової δ_i : формули (1) ... (6), в які δ_i підставлено замість масиви значень x_i .

Послідовність статистичних масивів і відповідних статистичних параметрів, визначених рекурентними процедурами за формулами (2) – (6) наведена в наступній таблиці.

Таблиця 1 – Послідовність статистичних масивів і відповідних статистичних параметрів, визначених рекурентними процедурами

№ п/п	Масиви	Параметри тренду	Статистичні параметри випадкової складової	
			Середнє	Середньоквадратичне відхилення
1	x_i, δ_i	a^*, b^*, σ^*	δ_m	$s\delta$
2	δ_{i1}, δ_{i2}	$a2^*, b2^*, \sigma2^*$	$\delta2_m$	$s\delta2$
3	δ_{i2}, δ_{i3}	$a3^*, b3^*, \sigma3^*$	$\delta3_m$	$s\delta3$
...	...	...	...	...

Параметри тренду, визначені статистично з заданою точністю (формула (5)), є параметрами детермінованих функцій. Серед них технологічно мають бути проаналізовані значення, в першу чергу, параметрів, які характеризують кількісно швидкість зміни контрольної величини впродовж технологічного періоду спостережень.

В прикладі на рис. 3 це параметр b^* функції $f(i)$ – швидкість зменшення кількості «гірших стометрівок»: $b^* = -86,88 \pm 9,25$ (м/год), що орієнтовно становить зменшення на одну «гіршу стометрівку» за час виготовлення двох котушок (зменшення на 1,4 % довжини відносно дефектного емальпроводу на одну котушку).

Автоматизація контролю і статистичної обробки даних, виділення детермінованого тренду і представлення його результатів у вигляді простого кількісного смислу статистичних параметрів забезпечує можливість поточного виявлення і аналізу причини того чи іншого тренду з метою доцільного коригування технологічного процесу.

Одночасне виділення випадкової складової процесу δ_i ($\delta_i = ([x_i - f(i)]^2)^{0.5}$) дозволяє кількісно оцінити похибку процесу, причин появи якої може

бути дуже багато і зниження якої за необхідності потребує комплексного підходу, який в світовій практиці прийнято називати методом Демінга [7].

Наведений приклад, – один лінійний тренд, одна випадкова складова процесу, – найпростіший. Детермінована функція $f(i)$ може не бути лінійною (вона може бути і періодичною [6]).

Наприклад, масив x_i на рис.3 може бути краще описаний спадною експоненційною функцією, яка зміною системи координат може бути зображена прямою. Виконані відповідні розрахунки виявилися більш складними, але технологічні висновки залишилися незмінними.

Більш складною, але доцільною для подальшого технологічного аналізу є наявність тренду випадкової складової стабільності технологічного процесу.

В такому разі слід застосувати статистичну модель тренда з помилкою до випадкової складової δ_i .

На рис. 4 наведені результати статистичного аналізу стабільності технологічного процесу виготовлення того ж емальпроводу по кількості бездефектних одиничних довжин на котушці у вигляді кількості x_i одиничних довжин (по 100 м), які містять менше трьох дефектів: x_i – кількість «кращих стометрівок» на котушці за номером i в неперервному технологічному циклі виготовлення.

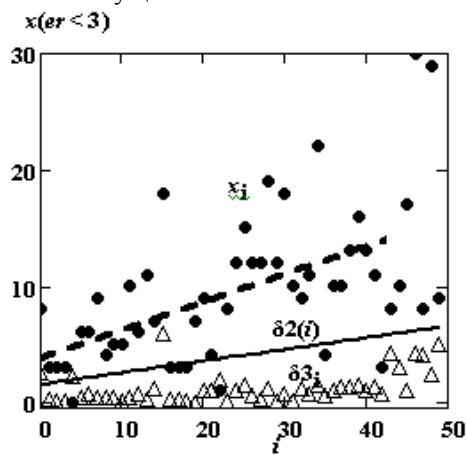


Рис. 4 – Результати визначення кількості одиничних довжин (по 100 м), які містять від 18 дефектів і більше для емальпроводу з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів: x_i – кількість «гірших стометрівок» (18 дефектів і більше) на котушці за номером i в неперервному технологічному циклі виготовлення; $f(i)$ – детермінована функція (тренд процесу), визначена за (2), (3); δ_i – випадкова складова процесу, визначена як $\delta_i = ([x_i - f(i)]^2)^{0.5}$

Теоретично кількість таких рекурентних процедур n може бути необмеженою (поки спостерігається наявність тренду випадкової складової), але вона не повинна бути великою, оскільки дисперсія кожної наступної випадкової складової $D[\delta n]$ швидко наближається до нуля (рис.5).

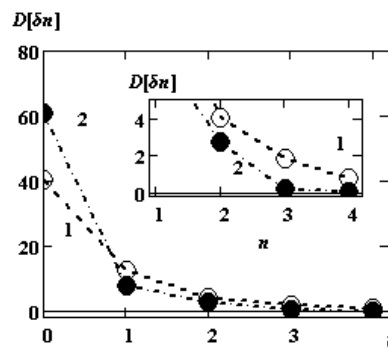


Рис. 5 – Залежність дисперсії випадкової складової $D[\delta n]$ від номеру n рекурентної статистичної процедури:

1 – $D[\delta n(er < 3)]$; 2 – $D[\delta n(er > 18)]$

Для розглянутого процесу нами використано $n = 3$, оскільки при цьому коефіцієнт варіації випадкової складової δ_3 є найбільшим і наближається до одиниці, що свідчить про приблизну рівність середнього δ_{3m} і середньоквадратичного відхилення $\delta \delta_3$ випадкової складової процесу (рис.6). Важливо те, що залежності $V[\delta n] = f(n)$ (рис.6) мають подібний характер для масивів (див. рис. 3,4), які відрізняються і за формою візуальної прогонки (рис.3: експоненційне спадання; рис.4: лінійне зростання), і за напрямом тренду (рис.3: спадання; рис.4: зростання).

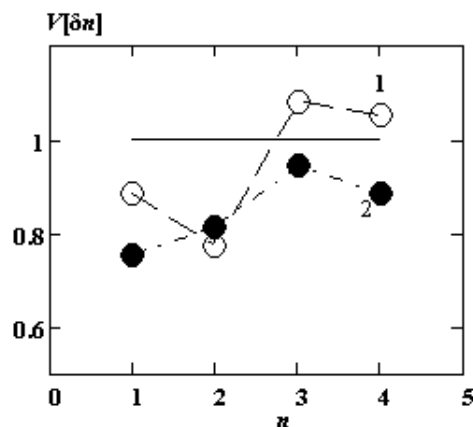


Рис. 6 – Залежність коефіцієнту варіації випадкової складової $V[\delta n]$ від номеру n рекурентної статистичної процедури $V[\delta n] = f(n)$: 1 – $V[\delta n(er < 3)]$; 2 – $V[\delta n(er > 18)]$

Доцільно використати саме коефіцієнт варіації випадкової складової $V[\delta]$ масиву даних як критерій кількості рекурентних процедур n , яка дозволяє виділити випадкову складову технологічного процесу δn_i ($\delta n_i = ([\delta(n-1)_i - \delta(n-1)(i)]^2)^{0.5}$) і тим самим оцінити похибку процесу. На рис.4 – це масив δ_3 з середнім $\delta_{3m} = 1,24$, яке складає менше 13 % від середнього вихідного масиву ($x_m = 9,2$). Тобто реальна випадкова похибка даного технологічного контролю становить ± 1 «краща стометрівка».

Параметри трендів, які є параметрами детермінованих функцій технологічно мають бути проаналізовані, оскільки вони не є випадковими.

Значна різниця між швидкістю збільшення кількості «бездефектних стометрівок» (≈ 48 м/год), з одного боку, і швидкістю зменшення кількості «гі-

рших стометрівок» (≈ -86 м/год), з іншого, одно-значно свідчить про те, що технологічний цикл ізолювання на швидкісних автоматичних емальагрегатах в принципі не є стабільним. В ньому слід розрізняти, використовуючи термінологію технічної надійності, періоди припрацювання (підвищеної дефектності ізоляції), нормального ізолювання (дефектність ізоляції характеризує рівень технології) і період "втоми" (дефектність ізоляції зростає швидше, ніж в період нормального ізолювання).

Тривалість цих періодів, а отже і технологічна логістика емалювання в умовах конкретного виробництва має бути визначена шляхом розділення і кількісної оцінки параметрів дефектності ізоляції, а саме:

трендів дефектності ізоляції, причини яких і відповідні технологічні заходи мають бути встановлені технологічною службою;

випадкової складової стабільності технологічного процесу, середнє значення якої є кількісною оцінкою статистичної похибки технологічного контролю.

В прикладі на рис. 4 параметр b^* функції $f(i)$ – швидкість збільшення кількості «бездефектних стометрівок»: $b^* = 47,8$ м/год, що орієнтовно становить збільшення на одну «бездефектну стометрівку» за час виготовлення чотирьох котушок.

Крім того спостерігається систематичне збільшення розсіювання результатів визначення кількості «бездефектних стометрівок» δ_i , кількісно оцінене параметром функції $\delta_2(i)$: $b_2^* = 20,2$ м/год. Параметр b_2^* є кількісною характеристикою неоднорідності емалізоляції і тому має такий же знак, як параметр b^* функції $f(i)$. Неоднорідність емалізоляції в даному разі – результат її ексцентриситету, нерівностей на поверхні мідного провідника і можливих неоднорідностей в структурі діелектрика.

Висновки.

1. Результати контролю дефектності емалізоляції на основі поліімідних синтетичних співполімерів в процесі неруйнівних технологічних випробувань високою напругою на прохід свідчать про можливість і доцільність виділення **тренду** технологічного процесу – детермінованої кількісної характеристики стабільності технологічного процесу. Доцільність виділення **тренду** полягає у встановленні технологічних чинників, які спричиняють детерміновану зміну контрольного параметру для прийняття рішень корекції технологічного процесу.

2. Виділення **тренду** технологічного процесу дає можливість кількісно оцінити **випадкову похибку** технологічного процесу, яка є кількісною характеристикою випадкової складової стабільності технологічного процесу і зумовлена багатьма чинниками, впливом кожного з яких можна знехтувати порівняно із сумою.

3. Поточний контроль діаметра d_p мідного провідника в процесі емалювання свідчить про наявність в цьому технологічному процесі як тенденції поступової зміни параметрів (впродовж маршруту емалювання відбувається технологічна витяжка

провідника – тренд технологічного процесу), так і випадкової складової діаметра d_p , яка є випадковою складовою стабільності даного технологічного процесу.

4. Виділено **тренд** технологічного процесу ізолювання проводу з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів на швидкісних автоматичних емальагрегатах у вигляді швидкості (параметр тренду b^*) зменшення дефектності впродовж технологічного циклу: $b^* = -86,88 \pm 9,25$ (м/год), що орієнтовно становить зменшення на 1,4 % довжини відносно дефектного емальпроводу на одну котушку.

5. Співставлення швидкості зменшення дефектності в різні періоди технологічного циклу свідчить про те, що технологічний цикл ізолювання на швидкісних автоматичних емальагрегатах в принципі не є стабільним. В ньому слід розрізняти, використовуючи термінологію технічної надійності, періоди припрацювання (підвищеної дефектності ізоляції), нормального ізолювання (дефектність ізоляції стабільна і характеризує рівень технології) і період "втоми" (дефектність ізоляції зростає швидше, ніж в період нормального ізолювання). Тривалість цих періодів, а отже і технологічна логістика емалювання в умовах конкретного виробництва має бути визначена шляхом обмеження тривалості неперервного технологічного циклу періодом нормального ізолювання (дефектність ізоляції стабільна і характеризує рівень технології). Критерієм такого обмеження має бути зміна знака швидкості (параметр тренду b^*) зменшення дефектності впродовж елементів неперервного технологічного циклу, тривалість яких визначена за принципом Мізеса [6].

Список литературы

1. Зеленецкий Ю.А. О совершенствовании технической документации на эмалированные провода. / Ю.А. Зеленецкий // Кабели и провода. – 2013. – № 5. – С. 19 – 23.
2. Шебенюк Л.А. Статистичний апарат забезпечення бездефектності продукції в виробництві емальпроводів. / Л.А. Шебенюк, С.Ю. Антоненко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 23 – С. 43 – 46.
3. Голік О.В. Исследование дефектности нагревостойких проводов с двойной полиимидной эмализацией при испытаниях высоким напряжением на проход / О. В. Голік // Український метрологічний журнал, 2009. – № 1. – С. 12–17.
4. Андрианов А.В. О статистике точечных повреждений обмоточных проводов и витковых замыканий обмоток / А. В. Андрианов, В.К. Андрианов, Е.В. Быков. // Кабели и провода. – 2013. – № 5. – С. 28 – 31.
5. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. –classified: October 2007. – p.18.
6. Тутубалин В.Н. Статистическая обработка рядов наблюдений / В. Н. Тутубалин. – М.: Знание, 1973. – 64 с.
7. Mary Walton The Deming Management Method / Mary Walton. – New York, 1986. – 262 p.

References (transliterated)

1. Zelenetsky Yu. A. [About the improvement of technical documentation for enameled wires]. Cables and wires. 2013. No. 5. pp 19 – 23.
2. Shebenjuk L.A., Antonec S.Ju. [Statistical method purpose is the reduce of quantifying defects of enameled wire]. [Bulletin of NTU KhPI] Kharkov, 2012, no. 23, pp. 43 – 46.
3. Golik O.V. [Quantifying of defects for enameled wire with two-sheeted polyimide isolation by tests by high voltage]. Ukraine metrological magazine. 2009. no. 1. pp.12–17.
4. Andrianov A.V., Andrianov V.K., Bikov E.V. [About the statistics of pin-hole damages of winding wires and inter-turn short-circuits in windings]. [Cables and wires]. Moscow. 2013. no. 5. pp. 28 – 31.
5. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. – classified: October 2007. – p.18
6. Tutubalin V.N. [Statistical data processing]. Moscow Znanie Publ. 1973. – p. 64.
7. Mary Walton. The Deming Management Method. – New York, NY Publ., 1986. 262 p.

Надійшла (received) 05.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Технологічний контроль дефектів в емальпроводі з поліімідною ізоляцією / О. В. Голик, С. Ю. Антоненц, Л. А. Щепенюк, В. М. Золотарьов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 12 – 18. Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2224-0349.

Технологический контроль дефектов в эмальпроводе с полиимидной изоляцией / О. В. Голик, С. Ю. Антоненц, Л. А. Щепенюк, В. М. Золотарев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 12 – 18. Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2224-0349.

Technological monitoring of defects in enameled wire with polyimide isolation / O. V. Golik, S. Y. Antonets, L. A. Scheveniuk, V. V. Zolotarjov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No 31 (1253). – P. 12 – 18. Bibliogr.: 7. – ISSN 2224-0349.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Голик Оксана Вячеславівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків тел.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

Голик Оксана Вячеславовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроизоляционная и кабельная техника» Национального технического университета "Харьковский политехнический институт", г. Харьков;

тел.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

Golik Oksana Vyacheslavovna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

Антоненц Станіслав Юрійович – кандидат технічних наук, аспірант кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; тел.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

Антоненц Станислав Юрьевич – аспирант кафедры «Электроизоляционная и кабельная техника» Национального технического университета "Харьковский политехнический институт", г. Харьков; тел.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

Antonets Stanislav Yuriyovich – postgraduate of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

Щепенюк Леся Артемівна – кандидат технічних наук, професор кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; тел.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

Щепенюк Леся Артемовна – кандидат технических наук, профессор кафедры «Электроизоляционная и кабельная техника» Национального технического университета "Харьковский политехнический институт", г. Харьков;

тел.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

Shchebeniuk Lesia Artemovna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Professor of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

Золотарьов Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, директор департаменту зовнішніх економічних зв'язків приватного акціонерного товариства «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; тел.: 754-52-18; e-mail: antonets.uves@yuzhcable.com.ua.

Золотарев Владимир Владимирович – кандидат технических наук, директор по внешним экономическим связям приватного акционерного общества «ЗАВОД ЮЖКАБЕЛЬ», г. Харьков; тел.: 754-52-18; e-mail: antonets.uves@yuzhcable.com.ua.

Zolotarjov Vladymyr Vladymyrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Director department of Joint Stock Company "ZAVOD JUGCABLE", Kharkov; tel.: 754-52-18; e-mail: antonets.uves@yuzhcable.com.ua.