

О.В. Голик, Л.А. Щебенюк

СТАТИСТИЧНІ АСПЕКТИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТНОСТІ ПОЛІМІДНОЇ ЕМАЛЬ ІЗОЛЯЦІЇ В УМОВАХ ВИРОБНИЦТВА

Представлено результати застосування статистичної моделі тренду до аналізу показників дефектності ізоляції при неруйнівному технологічному контролі емаль проводу на основі поліімідного полімеру в умовах виробництва. Розглянуто застосування цього контролю 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 ПЭЭИДХ2 – 200 з двошаровою поліімідною ізоляцією номінальним діаметром 0,56 мм. Виділення тенденції до збільшення кількості дефектності емаль ізоляції впродовж неперервного технологічного циклу і кількісна оцінка цієї тенденції дозволяє кількісно оцінити випадкову похибку технологічного контролю – сумарну похибку результатів технологічного контролю, яка є характеристикою випадкової складової стабільності технологічного контролю і зумовлена багатьма чинниками, впливом кожного з яких можна знехтувати порівняно із сумою. Бібл. 7, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: емаль провід, поліімідна ізоляція, дефектність ізоляції, статистична модель тренду, технологічний неруйнівний контроль.

Представлены результаты применения статистической модели тренда к анализу показателей дефектности изоляции при неразрушающем технологическом контроле эмаль провода на основе полиимидного полимера в условиях производства. Рассмотрено применение такого контроля 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 ПЭЭИДХ2 – 200 с двухслойной полиимидной изоляцией номинальным диаметром 0,56 мм. Выделение тенденции изменения дефектности эмаль изоляции в течение непрерывного технологического цикла и количественная оценка этой тенденции позволяет количественно оценить случайную ошибку технологического контроля – суммарную ошибку результатов технологического контроля, которая является характеристикой случайной составляющей стабильности технологического контроля и обусловлена большим количеством причин, влиянием каждой из которых можно пренебречь по сравнению с суммой. Библ. 7, табл. 1, рис. 8.

Ключевые слова: эмаль провод, полиимидная изоляция, дефектность изоляции, статистическая модель тренда, технологический неразрушающий контроль.

Постановка проблеми. В кабельному виробництві впровадження відносно дорогої інноваційної продукції зумовлює використання в якості основного критерію ліквідності ціновий фактор. Такою інноваційною продукцією для вітчизняної кабельної промисловості є емаль провід на основі поліімідних синтетичних співполімерів з температурним індексом 200 °С. Такі емаль проводи 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 емаль лаків [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 електромашинобудування.

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.

Вирішення цієї задачі для виробників в період освоєння відомої в світі, але інноваційної саме для них продукції, вимагає нестандартних рішень щодо технологічного контролю з метою суттєвого зменшення кількості продукції, яка не пройшла приймальний контроль. Це наглядно демонструє сучасна концепція «Шість сігм» («6σ») [1]. В ній критерієм якості продукції є її висока однорідність, що забезпечує мінімізацію кількості продукції, яка за характеристиками не відповідає вимогам користувача. По суті концепція «Шість сігм» (визначається статистичною процедурою нормального розподілу [2]) є демонстрацією досягнень у і маркетинговим захистом виробника масової продукції. Освоєння інноваційної продукції конкретним виробником вимагає розроблення і впровадження нестандартних технічних і організаційних рішень технологічного контролю з обов'язковою прив'язкою технічних параметрів до досягнутого рівня технології виробництва. В даному разі представлено таке рішення щодо контролю показників дефект-

ності ізоляції при неруйнівному технологічному контролі емаль проводу на основі поліімідного полімеру в умовах виробництва.

Особливістю поліефірімідних і поліамідімідних емаль лаків є те, що повне завершення процесу полімеризації відбувається тільки в тонких шарах (до 2...3 мкм). Тому на сучасних емаль агрегатах застосовують маршрути з кількістю проходів проводу через лак до 24 при довжині одного проходу через піч до 10 м. Це зумовлює необхідність:

1) використання високих швидкостей емалювання (до 1000 м/хв.);

2) неперервності технологічного циклу виготовлення максимально можливої кількості котушок проводу;

3) автоматичного моніторингу числа дефектів в емаль ізоляції при неруйнівних випробуваннях високою напругою на прохід.

Проблема полягає в тому, що результати такого моніторингу, реалізованого на сучасних емаль агрегатах (наприклад, система EFHP фірми MAG-ECOTESTER [3]), не є нормованими в технічній документації на провід, в якій одним з основних критеріїв є напруга пробою і дисперсія напруги пробою [5]. В даному разі неруйнівний технологічний контроль статистичних показників кількості дефектів емаль ізоляції, реалізований у сучасному емаль агрегаті, який мав би забезпечити активну складову системи контролю, практично не використаний.

Аналіз літератури. 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. 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.

Прикладом сучасного технологічного контролю, в якому критерії прийняття технологічних рішень встановлює виробник, є використання системи неперервного статистичного контролю питомої кількості дефектів (er) ізоляції в режимі *онлайн* [3]. 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].

Необхідність оцінки кількості дефектів ізоляції емаль проводу є загально визнаною. Саме поняття дефекту ізоляції емаль проводу досить умовне:

- від відсутності ізоляції в місці дефекту: в місці співпадання дефектів на сусідніх витках обмотки пробивна напруга дорівнює нулю [4];

- до заданого наперед підвищеного струму через емаль ізоляцію, що свідчить про наявність в даному місці дефекту ізоляції [3].

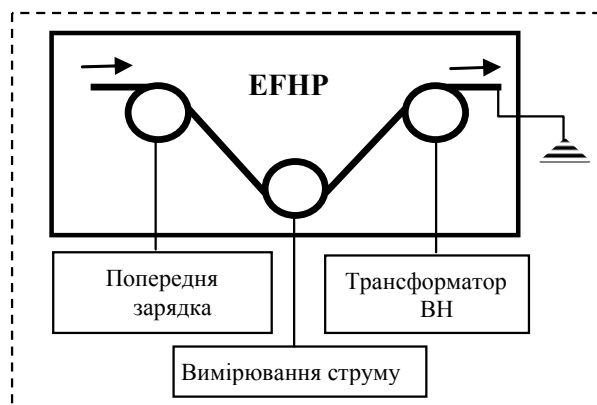


Рис. 1. Принципова схема моніторингу числа дефектів в емаль ізоляції при неруйнівних випробуваннях високою напругою на прохід

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, 3-5], 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 емаль проводу 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 емалювання 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 встановленим. У підсумку арбітром при приймальному контролі залишається напруга пробою і дисперсія напруги пробою [5]. В даному разі контроль статистичних показників кількості дефектів емаль ізоляції, реалізований у сучасному емаль агрегаті, практично не використаний. На наш погляд, це зумовлено фундаментальною відмінністю між 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.

Мета роботи – виконати аналіз результатів неруйнівних випробувань високою напругою на прохід емаль проводу 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 емаль проводу на основі поліімідних синтетичних співполімерів з подвійною ізоляцією і з температурним індексом 200 °С при неруйнівних випробуваннях високою напругою на прохід.

Основні одержані результати. Експериментально визначено кількість er дефектів на кожній оди-

ничній довжині 100 м для п'ятдесяти котушок емаль проводу (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 емаль проводу 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 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 емаль проводу з подвійною ізоляцією 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»).

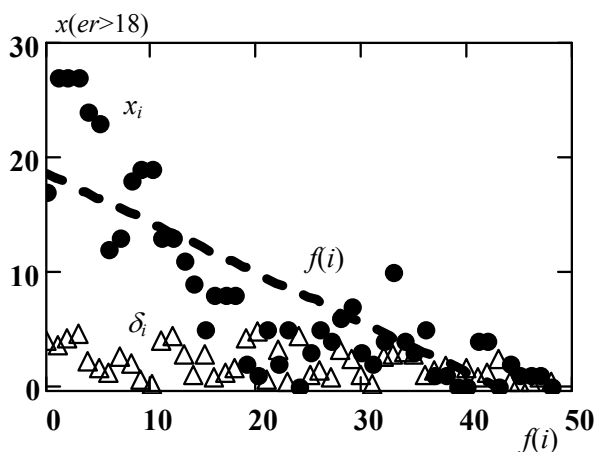


Рис. 3. Результати визначення кількості одиничних довжин (по 100 м), які містять від 18 дефектів і більше для емаль проводу з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів: x_i – кількість «гірших стометрівок» (18 дефектів і більше) на котушці за номером i в неперервному технологічному циклі 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 (рис. 4).

Послідовність статистичних масивів і відповідних статистичних параметрів, визначених рекурентними процедурами за формулами (2) – (6) наведена в табл. 1.

Параметри тренду, визначені статистично з заданою точністю (формула (5)), є параметрами детермінованих функцій. 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 емаль проводу на одну котушку).

Таблиця 1

№ 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}	$a2^*, b2^*, \sigma2^*$	δ_{2m}	$s\delta2$
3	δ_{i1}, δ_{i3}	$a3^*, b3^*, \sigma3^*$	δ_{3m}	$s\delta3$
...	...	...	...	...

Автоматизація контролю і статистичної обробки даних, виділення детермінованого тренду і представлення його результатів у вигляді кількісного параметру тренду забезпечує можливість поточного 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 експоненціальною функцією, яка зміною системи координат може бути зображена прямою. Виконані відповідні розрахунки виявилися більш складними, але технологічні висновки залишилися незмінними.

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

Кількість таких рекурентних процедур n може бути обмеженою наявністю тренду випадкової складової, але вона незначна, оскільки дисперсія кожної наступної випадкової складової $D[\delta n]$ швидко наближається до нуля (рис. 5).

Найбільш ефективною є процедура виділення першого тренду, оскільки при цьому коефіцієнт варіації випадкової складової δ_{i1} наближається до одиниці, що свідчить про приблизну рівність середнього δ_{1m} і середньоквадратичного відхилення $s\delta1$ випадкової складової процесу (рис. 6). Важливо те, що залежності $V[\delta n] = f(n)$ (рис. 5) мають подібний характер для масивів (див. рис. 3 і 4), які відрізняються і за формою візуальної прогонки (рис. 3 – експоненціальне спадання; рис. 4 – лінійне зростання), і за напрямом тренду (рис. 3 – спадання; рис. 4 – зростання).

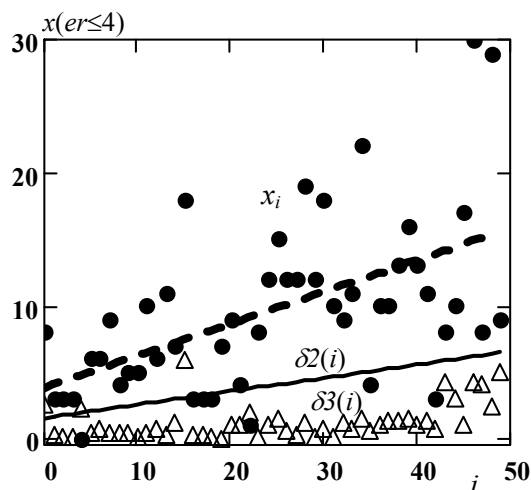


Рис. 4. Кількість одиничних довжин, які містять три або менше дефектів: x_i – кількість «кращих стометрівок» на котушці за номером i в неперервному технологічному циклі виготовлення; $f(i)$ – детермінована функція (тренд процесу), визначена за (2), (3); $\delta_2(i)$ – другий тренд процесу (випадкової складової δ_i); δ_3 – масив випадкової складової

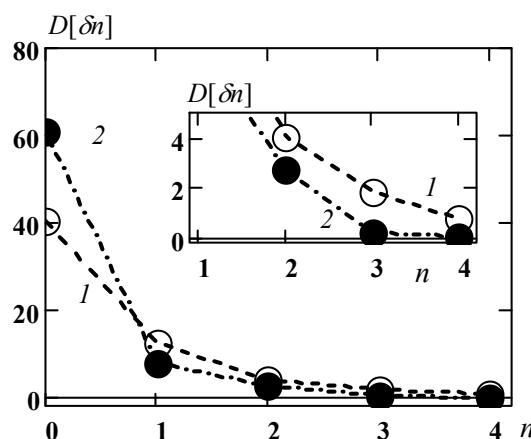


Рис. 5. Залежність дисперсії випадкової складової $D[\delta n]$ від номеру n рекурсивної статистичної процедури: 1 – $D[\delta n(er \leq 3)]$; 2 – $D[\delta n(er > 18)]$

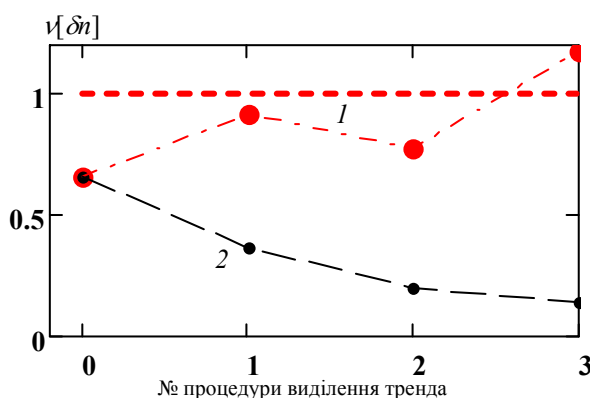


Рис. 6. Залежність коефіцієнту варіації випадкової складової $v[\delta n]$ від номеру n рекурсивної статистичної процедури $v[\delta n] = f(n)$: 1 – $v[\delta n(er \leq 3)]$; коефіцієнт варіації зростає і наближається до одиниці (1), а відносно середньоквадратичне відхилення експоненціально зменшується (2)

Доцільно використати саме коефіцієнт варіації випадкової складової $v[\delta]$ масиву даних як критерій кількості рекурсивних процедур n , яка дозволяє віді-

лити 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. 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 «гірших стометрівок» (≈ -86 м/год), з іншого, однозначно свідчить про те, що технологічний цикл ізолювання на швидкісних автоматичних емаль агрегатах 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.

Для кількісної оцінки відповідних параметрів необхідна модель суперпозиції тренду і випадкової складової масиву даних. На рис. 7 представлена ілюстрація такої моделі для масиву даних, наведених на рис. 4.

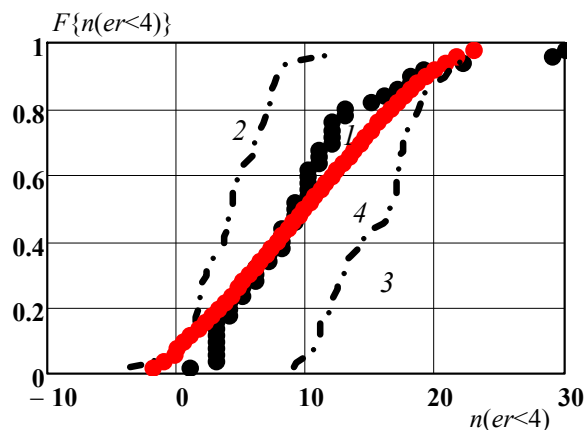


Рис. 7. Модель емпіричної функції розподілу кількості бездефектних контрольних довжин у вигляді нормальної функції розподілу з математичним сподіванням, що лінійно змінюється впродовж технологічному процесу і стабільної дисперсії похибки контролю: 1 – емпірична функція розподілу $F^*\{n(er<4)\}$; 2 – функція розподілу на початку періоду спостереження; 3 – функція розподілу в кінці періоду спостереження; 4 – модель функції розподілу

Оскільки значення контрольного параметру є додатними, а процедура нормального розподілу передбачає в моделі появу від'ємних значень, для визначення випадкової складової застосовано роз-

поділ Вейбула (РВ) (рис. 8), який, по перше, точніше, ніж нормальний розподіл (НР), описує масив даних (для НР критерій Колмогорова становить 0,71; для РВ 0,95).

По-друге, дозволяє оцінити випадкову складову масиву як параметр експоненціального розподілу, в який вироджується РВ при значенні параметра форми, що дорівнює одиниці.

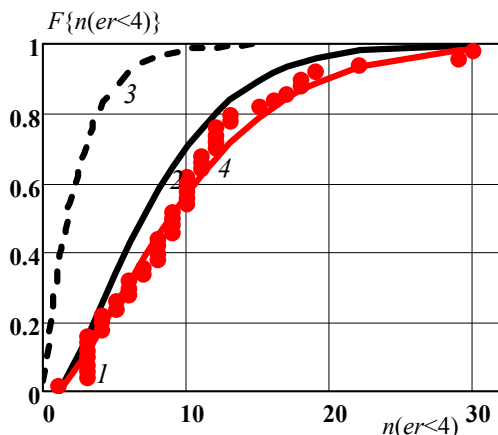


Рис. 8. Модель емпіричної функції розподілу кількості бездефектних контрольних довжин у вигляді функції розподілу Вейбула: 1 – емпірична функція розподілу $F^*\{n(er<4)\}$ (точки); 2 – апроксимація функції $F^*\{n(er<4)\}$ функцією розподілу Вейбула; 3 – функція розподілу випадкової складової масиву (штрихова, параметр форми в розподілі Вейбула $bv = 1,01$); 4 – модель функції розподілу $F\{n(er<4)\}$ як суперпозиція тренду і випадкової складової масиву

Висновки.

1. Результати контролю дефектності емаль ізоляції 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. Виділено **тренд** технологічного процесу ізолювання проводу з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів на швидкісних автоматичних емаль агрегатах 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 емаль проводу на одну котушку.

4. Співставлення швидкості зменшення дефектності в різні періоди технологічного циклу свідчить про те, що технологічний цикл ізолювання на швидкісних автоматичних емаль агрегатах 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 емальовання 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 зменшення дефектності впродовж елементів неперервного технологічного циклу, тривалість яких визначена за принципом Мізеса [6].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зеленецкий Ю.А. О совершенствовании технической документации на эмалированные провода // Кабели и провода. – 2013. – №5. – С. 19-23.
2. Щебенюк Л.А., Антоненко С.Ю. Статистичний апарат забезпечення бездефектності продукції в виробництві емальованих проводів // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – №23. – С. 166-169.
3. Голик О.В. Исследование дефектности нагревостойких проводов с двойной полиимидной эмальизоляцией при испытаниях высоким напряжением на проход // Украинский метрологический журнал. – 2009. – №1. – С. 15-18.
4. Андрианов А.В., Андрианов В.К., Быков Е.В. О статистике точечных повреждений обмоточных проводов и витковых замыканий обмоток // 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. – М.: Знание, 1973. – 64 с.
7. Mary Walton. The Deming Management Method. Foreword by W. Edward Deming. – New York: NY 10016 Copyright, 1986. – 262 p.

REFERENCES

1. Zelenetsky Yu.A. About the improvement of technical documentation for enameled wires. *Cables and wires*, 2013, no.5, pp. 19-23. (Rus).
2. Shchebeniuk L.A., Antonets S.Yu. Statistical method purpose is the reduce of quantifying defects of enameled wire. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2012, no.23, pp. 166-169. (Ukr).
3. Golik O.V. Quantifying of defects for enameled wire with two-sheeted polyimide isolation by tests by high voltage. *Ukrainian metrological journal*, 2009, no.1, pp. 15-18. (Rus).
4. Andrianov A.V., Andrianov V.K., Bykov E.V. About the statistics of pin-hole damages of winding wires and inter-turn short-circuits in windings. *Cables and wires*, 2013, no.5, pp. 28-31. (Rus).
5. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. – classified: October 2007. – p. 18.
6. Tutubalin V.N. *Statisticheskaya obrabotka ryadov nabludeniya* [Statistical analysis of observation series]. Moscow, Znanie Publ., 1973. 64 p. (Rus).
7. Mary Walton. *The Deming Management Method*. Foreword by W. Edward Deming. New York: NY 10016 Copyright, 1986. 262 p.

Надійшла (received) 05.11.2016

Голик Оксана В'ячеславівна¹, к.т.н., доц.,
Щебенюк Леся Артемівна¹, к.т.н., проф.,
¹ Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
61002, Харків, вул. Кирпичова, 21,
e-mail: unona.2013@mail.ru, agurin@kpi.kharkov.ua

O.V. Golik¹, L.A. Shchebeniuk¹

¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

**Statistic methods of polyimide enamel isolation defective
non-destructive control at the conditions of production.**

*In this paper can be used to not-destructive technological testing
of defects isolation enameled wire with polyimide polymer. The
thesis is devoted to the statistical method for processing, com-
parison and analysis of results of measurements of parameters
isolation it enameled wire because of mathematical model of*

*trend for application in active technological monitoring is devel-
oped; to development used of the recommendations for param-
eters of such testing. Is theoretically justified and the possibility of
a diminution of dependence of an error from a velocity of move-
ment of a wire for want of quantifying of defects enameled isola-
tion not destroying tests by high voltage. This work is devoted to
the statistical method for processing, comparison and analysis of
results of measurements of parameters of polyimide isolation. The
method is operating not destroying technological monitoring an
amount of enameled isolation defect. The dependence of average
value of amount of defects for enameled wire ПЭЭИДХ2 – 200
with two-sheeted polyimide by isolation in a range of nominal
diameter 0.56 mm is experimentally determined. The technologi-
cal monitoring purpose is reducing of quantifying of enameled
isolation defect. References 7, tables 1, figures 8.*

Key words: enameled wire, polyimide isolation, isolation
defective, statistical model of the trend, non-destructive testing.