

А.Г. Гурін, О.В. Голик, В.В. Золотарьов, С.Ю. Антонєць, Л.А. Щєбенюк, О.М. Грєчко

СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ КОНТРОЛЮ СТАБІЛЬНОСТІ НАПРУГИ ПРОБЮЮ ІЗОЛЯЦІЇ В ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА ЕМАЛЬПРОВІДІВ

Представлено результати технологічного контролю напруги пробюю ізоляції емаль проводу на основі поліімідного полімеру. Розглянуто застосування статистичного аналізу результатів вимірювання показників контролю за допомогою інтервальної статистичної моделі для використання результатів в активному технологічному контролі. Запропоновано рекомендації щодо практичного використання інтервальної статистичної моделі для визначення гарантованого рівня відносної дисперсії контрольованого параметру. Представлена кількісна оцінка відносної дисперсії δ напруги пробюю U впродовж тривалого технологічного циклу. Теоретично показана і вимірюваннями підтверджена можливість надійної кількісної оцінки тенденції зміни дефектності емаль ізоляції для проводу ПЭЭИДХ2 – 200 з двошаровою поліімідною ізоляцією номінальним діаметром 0,56 мм впродовж тривалого технологічного циклу. Визначення кількісної оцінки тенденції зміни дефектності емаль ізоляції дозволяє також виділити і кількісно оцінити випадкову похибку технологічного процесу – сумарну похибку результатів технологічного контролю, яка є кількісною характеристикою випадкової складової стабільності технологічного процесу. Застосування методів інтервальної статистики дозволяє одержувати достовірні (надійна ймовірність дорівнює одиниці) числові оцінки навіть для окремої серії невеликої кількості вимірів, до яких не ставлять вимоги ні статистичної сталості, ні взаємної незалежності. Бібл. 12, рис. 4.

Ключові слова: емаль провід, поліімідна ізоляція, дефектність ізоляції, технологічний контроль, статистична модель, випробування напругою.

Представлены результаты определения напряжения пробюю изоляции эмаль провода на основе полиимидного полимера. Выполнен статистический анализ результатов с помощью методов интервальной статистики с целью использования интервальной статистической модели в активном технологическом контроле. Представлена количественная оценка относительной дисперсии δ напряжения пробюю U в течение длительного технологического цикла. Теоретически показана и экспериментально подтверждена возможность количественной оценки тенденции изменения дефектности эмальизоляции для провода ПЭЭИДХ2 – 200 с двухслойной полиимидной изоляцией номинальным диаметром 0,56 мм в течение технологического цикла. Это позволяет выделить и количественно оценить случайную ошибку технологического процесса – суммарную ошибку результатов технологического контроля, которая является количественной характеристикой случайной составляющей стабильности технологического процесса. Использование методов интервальной статистики дает возможность получать достоверные (доверительная вероятность единица) интервальные оценки даже для небольшого количества измерений, к которым не предъявляют требования ни статистической устойчивости, ни взаимной независимости. Библ. 12, рис. 4.

Ключевые слова: емаль провод, полиимидная изоляция, дефектность изоляции, технологический контроль, статистическая модель, испытания напряжением.

Постановка проблеми. Впровадження емальпроводів на основі поліімідних синтетичних співполімерів з температурним індексом 200 °С, які мають найвищий сучасний рівень електричної, механічної міцності і мінімальну товщину ізоляції [1, 2], зіткнулось з характерними для інноваційної кабельної продукції протиріччями. Це протиріччя між відносно високою вартістю продукції і необхідністю організації використання передових сучасних технологій контролю. В разі згаданих проводів – це online контроль дефектності ізоляції безпосередньо після виходу з емаль печі шляхом неруйнівного випробування на прохід високою постійною напругою. Система цього контролю є частиною автоматичних ліній з високими швидкостями руху (агрегат МАГ до 1000 м/хв) [2].

Активний online контроль дефектності шляхом неруйнівного випробування на прохід є одним з найперспективніших методів контролю в кабельному виробництві, яке вирізняється значними довжинами продукції з високою однорідністю по довжині. Особливо актуальним online контроль дефектності шляхом неруйнівного випробування на прохід є для емаль проводів, для яких довжина відносно діаметру досягає десятків мільйонів.

Ефективність використання такого контролю для конкретного виробника при впровадженні емальпроводів на основі поліімідних синтетичних співполімерів

полягає в тому, що параметри контролю мають бути визначені користувачем із широких доступних діапазонів (наприклад, випробувальна напруга від 400 В до 4000 В через кожні 100 В), які мають бути визначені для кожного виду продукції. Отже, аналіз результатів і розроблення технічних вимог до кожного виду продукції, є окремою науково-технічною задачею, вирішення якої вимагає значного часу і затрат.

В результаті один з найперспективніших методів контролю в кабельному виробництві, для якого є готове сучасне повірене обладнання, залишається в умовах реального виробництва не використаним.

Проблема полягає в необхідності розробки і впровадження системи технічних і організаційних рішень для використання сучасної системи online контролю дефектності ізоляції при випробуваннях на прохід в умовах виробництва з обов'язковою прив'язкою технічних параметрів контролю до досягнутого рівня технології і технічних вимог, що вимагає значних додаткових затрат.

Проблема, на перший погляд, є такою, що для виробників у період освоєння відомої в світі, але інноваційної саме для цих виробників продукції, не має рішення з економічної точки зору. Опосередкованим, але реальним підтвердженням цього песимістичного висновку може слугувати відома концепція «Шість сигма («6 σ »)» [3]. У ній критерієм якості масової про-

дукції чи послуг в маркетингу є відношення розміру діапазону допустимих значень основного параметру до експериментально визначеного кореня квадратного з дисперсії ($\sigma = \sqrt{D}$). Концепція «Six Sigma Methodology» є демонстрацією досягнень провідних виробників і не містить методології забезпечення досягнень (чому не «7 σ »?). І чим більше технологічний цикл автоматизований, тим проблема організації використання сучасної системи технологічного online контролю дефектності актуальніша, оскільки між задачами приймального і поточного технологічного контролю значна теоретична і технічна різниця [4]. Проблема організації активного технологічного online контролю є концептуальною для автоматизованого масового виробництва.

Аналіз літератури. Перші роботи, присвячені задачам технологічного контролю, датовані початком 60-х років ХХ ст. і підсумок сформульовано в [5], де головне те, що в самій постановці питання про технологічний контроль зафіксована можливість змін у технологічному процесі і необхідність виявлення і кількісного оцінювання цих змін [1]. Теоретично це означає, що кожен результат вимірювання є елементом невідомого статистичного масиву. Тому до результатів вимірювань технологічного контролю не є застосовною класична (канонічна) модель вимірювання, яка вимагає виконання трьох умов [3]:

- час вимірювання не є обмеженим;
- вимірювана величина зберігає істинне значення незмінним впродовж усього циклу вимірювань;
- всі фактори, що впливають на результат визначені.

Жодна з цих умов не може бути умовою виконання і аналізу результатів технологічного контролю.

Оскільки проблема організації використання сучасної системи технологічного online контролю тісно пов'язана з економічною складовою інноваційного масового виробництва, в [11] запропоновано вирішити протиріччя між високою вартістю продукції і ціновим фактором, як критерієм ліквідності саме для проводів с поліімідною ізоляцією шляхом зменшення рівня вимог до напруги пробою, узгодженого з замовником. По суті – це оголошення капітуляції перед проблемою впровадження даної інноваційної продукції, викликане саме складністю організації використання сучасної системи технологічного online контролю дефектності ізоляції, якою оснащені емальагрегати світових виробників відповідного обладнання.

Технологічний контроль в автоматизованих швидкісних неперервних циклах сучасного кабельного виробництва вимагає, крім практично миттєвої оперативності (режим online) [2, 3, 5], розділення детермінованої і випадкової складових масиву результатів вимірювання.

Тому для задач технологічного контролю прийнятними є, по-перше, статистична модель вимірювань, за якої вимірювана величина є послідовністю відображень поточного стану об'єкту вимірювань. При цьому істинне значення вимірюваної величини є невизначеним [2], але їх інтервал на даному відрізку технологічного часу є цілком визначеним.

Інтервальний підхід до статистичного визначення технічних параметрів пропонує концепція «6 σ » [3], за якою коефіцієнт однорідності $K\sigma$ визначають за дисперсією контрольованого параметра X : $K\sigma = |CL - X_{av}|/(D[X])^{0.5}$ при обмеженні знизу, $K\sigma = |CS - X_{av}|/(D[X])^{0.5}$ при обмеженні зверху, де CL , CS – від-

повідно нижня і верхня границі, узгоджені з замовником продукції. Кроком вперед у концепції «6 σ » є визначення коефіцієнта однорідності за значенням допустимої границі параметра, узгодженої з замовником продукції. Але, по-перше для визначення $K\sigma$ необхідні значні масиви даних, одержаних в однакових умовах, що робить неможливим прийняття рішень в умовах оперативного технологічного контролю.

По-друге, в цій концепції відсутні складові, які дозволили б забезпечити поступове зменшення дисперсії параметра, що контролюється, що мало би бути головною метою оперативного технологічного контролю в умовах стабільного виробництва.

Сучасні методи інтервальної статистики базуються на аксіомах, перша з яких: для всіх обмежених ознак f , що належать $J_{00} = \{f: \sup|f(x)| < \infty\}$ існують інтервальні середні $M_{\min}(f)$; $M_{\max}(f)$, що знаходяться в межах значень f . Згідно з аксіомою обернення (transform) [6] для всіх обмежених знизу ознак: $M_{\min}(-f) = -M_{\max}(f)$. Тобто заміна знаку у ознаках класу J_{00} приводить до класу $-J_{00}$, на якому існують нижні середні $M_{\min}(f)$, а на перерізі цих класів існують інтервальні середні [6].

Однозначний зв'язок нижнього і верхнього середніх шляхом заміни знаку масиву, зручний для математичного опису [6], не є застосовним для багатьох контрольних технічних параметрів. В задачах технологічного контролю в кабельній техніці характерною є ситуація, коли вимірюваний параметр x приймає тільки позитивні значення, а технологічна границя може бути як двосторонньою, так і односторонньою. Зокрема при контролі дефектності на MAG в режимі online кількість дефектів er на довжині 100 м є позитивною ($er \geq 0$) [4] (система EFHP фірми MAG-ECOTESTER).

В такому разі весь набір функцій первинних ознак $f(x)$ технологічного контролю може бути представлений мажоруючими функціями $g_{j,i}(x) \geq f_i(x)$, кожна з яких належить напівлінійній оболонці з невід'ємними коефіцієнтами c^+_i і довірливим доданком c для кожної ознаки j : $g(x) = c + \sum c^+_i g_i(x)$. Апроксимація є більш точною, якщо відоме Mg , зокрема якщо $Mg = 0$, тобто мажоруюча функція $g(x)$ центрована [6]. Цього можна досягти використавши в якості первинної ознаки різницю вимірюваного і середнього значень $Y = x - M[x]$.

Побудова вторинних ознак полягає у виборі значень довірливого C і невід'ємних коефіцієнтів $C_i^{(+)}$, щоб вторинні ознаки мінімально (наскільки це можливо) мажорували б первинні, тобто $g_i(Y_j) \geq f_i(Y_j)$. Ця схема може бути застосована для будь-якого параметру. Тому далі позначатимемо просто $g(Y)$, $f(Y)$.

Якщо первинна функція $f(Y) = Y^2$, то мажоруюча $g(Y) = C + C_2^{(+)} Y^2$. Якщо верхня границя як межа можливих значень Y дорівнює E_{\max} , то при $C = 0$; $C_2^{(+)} = 1/E^2$. $g(Y)$ при $Y \geq E_{\max}$ мажоруює $A(Y)$, яка є відносною кількістю значень ознаки $Y = [E, E_{\max}]$:

$$A\{E \leq Y \leq E_{\max}\} \leq Y^2/E^2. \quad (1)$$

За аксіомою збереження порядку, якщо $g(Y)$ мажоруює $A(Y)$, то верхнє середнє його не менше за верхнє середнє $A(Y)$, ця нерівність може бути записана для відповідних математичних сподівань:

$$M_{\max}[A\{E \leq Y \leq E_{\max}\}] \leq M_{\max}[Y^2/E^2], \quad (2)$$

де в лівій частині нерівності верхнє середнє відносної кількості вимірювань, в яких параметр прийняв значення у вказаному інтервалі, є не що інше, як верхня границя інтервальної ймовірності перевищення межі E . Підстановка в (2) статистичної оцінки верхнього середнього $M_{\max}[Y^2] = M^*[Y^2]$ дає статистичну оцінку ймовірності перевищення межі:

$$P_{\max}\{E \leq Y \leq E_{\max}\} \leq M^*[Y^2]/E^2. \quad (3)$$

Якщо первинна ознака $Y = x - M[x]$, то його середнє дорівнює нулю $M[Y - M^*[Y]] = 0$. Тоді мажоруючу функцію можна вибрати у вигляді параболи з трьома параметрами:

$$g(Y - M^*[Y]) = C + C_2^{(+) ((Y - M^*[Y]) - C_1)^2, \quad (4)$$

що після перетворень дає формулу для максимальної ймовірності виходу параметра Y за верхню технологічну межу α :

$$P_{\max}\{0 \leq Y \leq \alpha\} \leq (1 + \alpha^2/M_{\max}[(\Delta Y)^2])^{-1}. \quad (5)$$

Використання (5) дає достовірні (надійна ймовірність дорівнює одиниці) числові оцінки P_{\max} для окремої серії невеликої кількості вимірювань, до яких не ставлять вимоги ні статистичної сталості, ні взаємної незалежності. Нерівність (1) є аналогом відомої нерівності Чебишева, тобто інтервальна модель (5) розширює можливості прикладних статистичних методів без протиріччя з фундаментальною теорією ймовірностей [6].

Основним є те, що використання інтервальних моделей дозволяє створювати уніфіковані статистичні моделі, які є адекватними суті задач технологічного контролю, оскільки ці задачі ставлять під сумнів саме статистичну сталість вимірюваних ознак.

В [12] на основі моделі (5) запропоновано метод контролю виходу технічного параметра за нормативну межу. Технічним інструментом методу є контрольна карта, основана на застосуванні (5) для визначення максимальної ймовірності P_{\max} того, що контрольний технічний параметр (наприклад, пробивна напруга емалі чи інша) вийде за визначену нормативну межу. Контрольна карта P_{\max} може бути застосована до будь-якої технічної характеристики, яку доцільно контролювати. Первинним при такому підході є середнє значення ознаки, а поняття ймовірності відповідає середнім значенням відносної кількості таких значень (частоти появи).

Мета роботи. Для підвищення ефективності технологічного контролю в автоматизованому кабельному виробництві (режим online забезпечується інноваційним обладнанням) необхідне розділення детермінованої і випадкової складових масиву результатів вимірювання технологічного параметру:

- детермінований тренд параметру є свідченням змін в технології, причини яких мають бути визначені і прийняте відповідне технологічне рішення;
- випадкова складова є сумою статистичних похибок технологічного процесу, окремі причини яких в режимі online практично не можливо визначити; ця складова має бути надійно оцінена для всього набору контрольних параметрів як зіставна безрозмірна величина, наприклад, відносна дисперсія параметру.

Для одержання достовірних (надійна ймовірність дорівнює одиниці) числових оцінок відносної дисперсії параметру розробити на основі застосування інтервальних статистичних моделей статистичну контрольну

карту, застосовну для всього набору параметрів, які контролюють в під час виготовлення емаль проводу, і перевірити її застосовність в умовах виробництва.

Використання контрольної карти відносної дисперсії параметру в системі забезпечення однорідності продукції підприємства дозволить уніфікувати визначення випадкової складової для всього набору параметрів (при виробництві емальпроводів на основі поліімідних синтетичних співополімерів більше 10 параметрів), що суттєво зменшить об'єм процедур обробки даних технологічного контролю і підвищить його ефективність.

Основні результати. Результати технологічного контролю є дискретним масивом числових значень χ . Цей масив є вектор первинних ознак $\chi = \{x_1, \dots, x_r\}$, кожному елементу якого можна поставити у відповідність частоту появи даного значення, середні значення яких для даного масиву утворюють вектор ймовірностей:

$$P = \{p_1, \dots, p_r\},$$

де r – кількість вимірюваних значень.

Вектор вторинних ознак: $f = \{fx_1, \dots, fx_r\}$.

Середнім значенням вторинної ознаки масиву χ є скалярний добуток векторів f і P :

$$Mf = \sum fx_i \cdot p_i, \text{ де } i = 1, \dots, r. \quad (6)$$

Ця формула справедлива за точного виконання умови

$$\sum p_i = 1, \text{ де } i = 1, \dots, r, \quad (7)$$

що в дійсності неможливо, найперше, через обмеженість даних. Тож для середнього значення вторинної ознаки масиву χ єдиною достовірною оцінкою є інтервал:

$$M_{\min}f = \inf Mf; \quad M_{\max}f = \sup Mf. \quad (8)$$

Вибір показників і необхідної границі інтервалу оцінювання є суто технічною задачею.

Наприклад експериментальне дослідження впродовж технологічного циклу напруги пробою U ізоляції проводу номінальним діаметром 0,56 мм свідчить, що впродовж різних технологічних періодів динаміка змінення діаметральної товщини t емалі суттєво може відрізнитися (рис. 1).

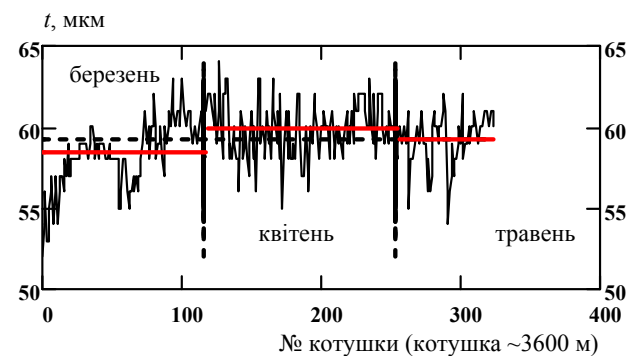


Рис. 1. Динаміка змінення діаметральної товщини t емалі проводу номінальним діаметром 0,56 мм впродовж різних технологічних періодів

Одним з основних показників якості емальпроводу є напруга пробою U . Тому оцінка впливу зазначеної зміни діаметральної товщини t емалі на напругу пробою має вирішальне значення при виборі контрольних показників і необхідних границь інтервалу оцінювання має важливе практичне значення в умовах виробництва.

Для напруги пробою вектор первинної ознаки $\chi = \{U_1, \dots, U_r\}$, вектор вторинної ознаки: $f = \{fU_1, \dots, fU_r\}$, де $fU_i = [(U_{i+1} - U_i)/U_{i+1}]^2 = \delta_i$ з огляду на необхідність центрування ознаки і технічно доцільного обмеження зверху.

При цьому також вирішується проблема порівняння результатів вимірювання різних контрольних параметрів.

За (6) середнім значенням вторинної ознаки масиву χ є скалярний добуток векторів f і P :

$$Mf = \sum \delta_i p_i, \text{ де } i = 2, \dots, r, \quad (9)$$

а для визначення p_i використано нормальний закон розподілу ймовірностей, придатність якого в даному разі ілюструє рис. 2, перевірку придатності за умовою (7) ілюструє рис. 3, де на похідну функції нормального розподілу нанесені експериментальні точки відносної дисперсії напруги пробою.

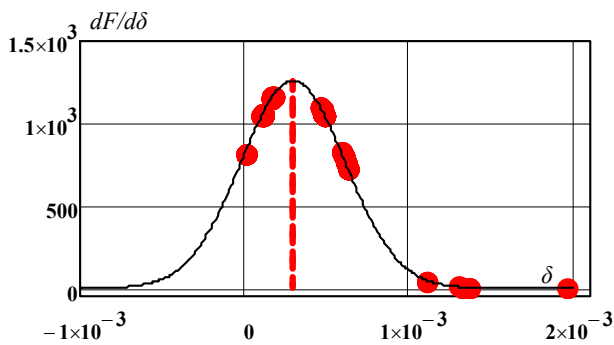


Рис. 2. Порівняння теоретичної густини нормального розподілу (суцільна крива) і апроксимації густини розподілу експериментально визначених значень δ_i за допомогою нормального розподілу (324 експериментальні значення)

Умова (7) (рис. 3) виконується наближено, що додатково свідчить про необхідність використання інтервальних оцінок при контролі технічних параметрів. В наведеному прикладі умова (7) надійно виконується для $r \geq 17$, отже r не може бути вибрано довільно, а має бути вибрано $r = \inf r (\sum p_i = 1)$.

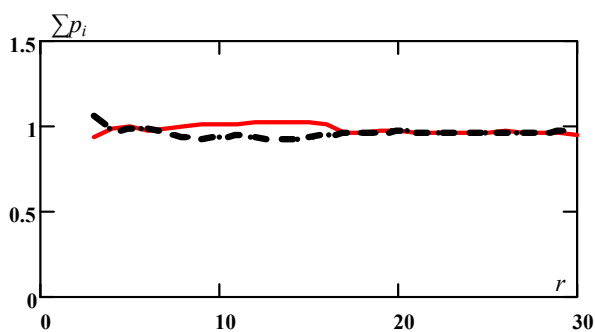


Рис. 3. До перевірки виконання умови (7) для інтервальної оцінки відносної дисперсії напруги пробою проводу номінальним діаметром 0,56 мм

Визначені за (8) середні значення вторинної ознаки для масивів даних при $r = 30$ в різні технологічні періоди наведено на рис. 3, який підтверджує те, що умова (7) надійно виконується для $r \geq 17$.

Оцінки $Mf_{\max} = \sup(Mf_i)$ для $r = 30$ свідчать про те, що в різні технологічні періоди (див. рис. 1) верхні середні відносної дисперсії напруги пробою відрізняються:

$$Mf_{\max 1} (i = 1, \dots, 117) = \sup(Mf_i(i=1, \dots, 117)) = 4,2 \cdot 10^{-4};$$

$$Mf_{\max 2} (i = 118, \dots, 255) = \sup(Mf_i(i=118, \dots, 255)) = 4,3 \cdot 10^{-4};$$

$$Mf_{\max 3} (i = 256, \dots, 324) = \sup(Mf_i(i=256, \dots, 324)) = 4,0 \cdot 10^{-4}.$$

Залежність $Mf(\delta)$ для $r = 30$ впродовж тривалого технологічного періоду на рис.4, на якому видно стабільне зменшення відносної дисперсії напруги пробою для $i = 148, \dots, 255$, тобто впродовж періоду з більшою середньою товщиною ізоляції (див. рис. 1). Рис. 4 є зображенням контрольної карти відносної дисперсії напруги пробою, на якій застосовано жорсткі границі регулювання на основі нормального розподілу [12], що відповідають діапазону $M[\delta] \pm 3\sigma[\delta]$, за яким знаходиться до 30 % значень. З технічних міркувань відносна дисперсія має бути обмежена тільки з максимальним допустимим значенням.

Рис. 4 свідчить про те, що $Mf_{\max} < M[\delta] + 3\sigma[\delta]$, за нормальним розподілом, тобто відповідає відомому критерію максимальної однорідності продукції [12].

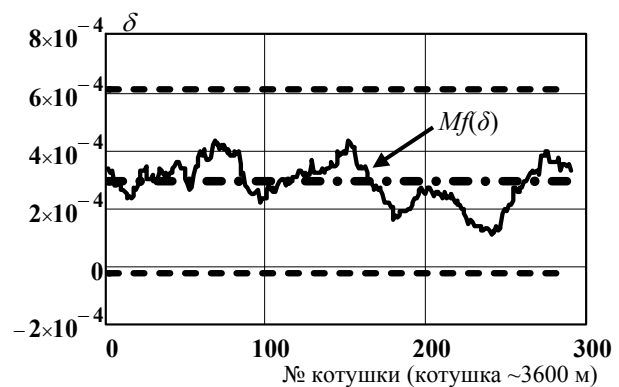


Рис. 4. Статистична контрольна карта залежності $Mf(\delta)$ для $r = 30$, на якій видно стабільне зменшення відносної дисперсії δ напруги пробою впродовж квітня (рис. 1), коли спостерігалась тенденція зменшення товщини емалі

Висновки.

- Для одержання достовірних числових оцінок відносної дисперсії параметру на основі застосування інтервальних статистичних моделей розроблено уніфіковану статистичну контрольну карту відносної дисперсії параметру, застосовної для всього набору параметрів, які контролюють в під час виготовлення емаль проводу. Виконано перевірку її застосовності в умовах виробництва на прикладі контролю напруги пробою U проводу з двошаровою поліімідною ізоляцією номінальним діаметром 0,56 мм. Використання уніфікованої контрольної карти відносної дисперсії параметру в системі забезпечення однорідності продукції підприємства суттєво зменшить об'єм процедур обробки даних технологічного контролю (більше 10 параметрів).

- Впродовж трьох місяців відносна дисперсія напруги пробою проводу не перевищила 0,05 % (надійність оцінки дорівнює одиниці), що свідчить, по-перше, про стабільність технологічного процесу відносно електричної міцності емаль ізоляції, і, по-друге, про доцільність застосування інтервальних статистичних моделей при аналізі результатів технологічного контролю.

- Центрування ознаки і технічно доцільне обмеження для нього зверху дозволяють вирішити проблему порівняння результатів вимірювання різних контрольних параметрів.

4. Оцінки максимального середнього Mf_{\max} відносної дисперсії δ напруги пробою U проводу впродовж тривалого періоду в умовах виробництва і порівняння цих оцінок з динамікою змінення діаметральної товщини t емалі проводу засвідчили, що однією з причин зростання дисперсії напруги пробою є збільшення товщини емалі ізоляції.

5. Застосування інтервальних статистичних моделей для одержання достовірних (надійна ймовірність дорівнює одиниці) числових оцінок навіть для окремих серій з невеликою кількістю вимірів (багаторазові вибірки по 30 штук), до яких не ставлять вимоги ні статистичної сталості, ні взаємної незалежності, є перспективним методом аналізу результатів технологічного контролю в умовах діючого виробництва.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Золотарев В.М., Антоненко Ю.А., Антоненко С.Ю., Голик О.В., Шчебенюк Л.А. Он-лайн контроль дефектності ізоляції в процесі виготовлення емальпроводів // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – №4. – С. 55-60. doi: 10.20998/2074-272X.2017.4.09.
2. Шчебенюк Л.А., Антоненко С.Ю. Статистичний апарат забезпечення бездефектності продукції в виробництві емальпроводів // 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 // Украинський метрологічний журнал. – 2009. – №1. – С. 15-18.
4. Голик О.В. Статистические процедуры при двустороннем ограничении контролируемого параметра в процессе производства кабельно-проводниковой продукции // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – №5. – С. 47-50. doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.07.
5. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
6. Кузнецов В.П. Интервальные статистические модели. М.: Радио и связь. 1991. – 352 с.
7. Тутубалин В.Н. Статистическая обработка рядов наблюдений. – М.: Знание, 1973. – 64 с.
8. 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.
9. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. – classified: October 2007. – p. 18.
10. Mary Walton. The Deming Management Method. Foreword by W. Edward Deming. – New York: NY 10016 Copyright, 1986. – 262 p.
11. Зеленецкий Ю.А. О совершенствовании технической документации на эмалированные провода // Кабели и провода. – 2013. – №5. – С. 19-23.
12. Карпушенко В.П., Шчебенюк Л.А., Антоненко С.Ю., Науменко О.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. Харків: Регіон-інформ, 2000. – 376 с.

REFERENCES

1. 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.
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. Golik O.V. Statistical procedures for two-sided limit of a controlled parameter in the process of production of cable and wire products. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2016, no.5, pp. 47-50. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.07.

5. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.O., Solovjev A.D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti* [Mathematical methods in theory of reliability]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 524 p. (Rus).
6. Kuznetsov V.P. *Interval'nye statisticheskie modeli* [Interval statistical models]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1991. 352 p. (Rus).
7. Tutubalin V.N. *Statisticheskaya obrabotka ryadov nabludeni* [Statistical analysis of observation series]. Moscow, Znanie Publ., 1973. 64 p. (Rus).
8. 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).
9. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. – classified: October 2007. – p. 18.
10. Mary Walton. *The Deming Management Method*. Foreword by W. Edward Deming. New York: NY 10016 Copyright, 1986. 262 p.
11. Zelenetsky Yu.A. About the improvement of technical documentation for enameled wires. *Cables and wires*, 2013, no.5, pp. 19-23. (Rus).
12. Karpushenko V.P., Shchebeniuk L.A., Antonets Yu.O., Naumenko O.A. *Sylovi kabeli nyz'koyi ta seredn'oyi napruhy. Konstruyuvannya, tekhnolohiya, yakist'* [Power cables of low and medium voltage. Designing, technology, quality]. Kharkiv, Region-inform Publ., 2000. 376 p. (Ukr).

Надійшла (received) 28.02.2018

Гурин Анатолій Григорович¹, д.т.н., проф.,
Голик Оксана Вячеславівна¹, к.т.н., доц.,
Золотарьов Володимир Володимирович², к.т.н.,
Антоненко Станіслав Юрійович², к.т.н.,
Шчебенюк Леся Артемівна¹, к.т.н., проф.,
Гречко Олександр Михайлович¹, к.т.н., доц.,

¹ Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,
e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua, unona928@gmail.com,
a.m.grechko@gmail.com
² ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ»,
61099, Харків, вул. Автогенна, 7,
tel/phone +380 57 7545248,
e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

A.G. Guryin¹, O.V. Golik¹, V.V. Zolotaryov², S.Yu. Antonets²,
L.A. Shchebeniuk¹, O.M. Grechko¹

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

² Private Joint-stock company Yuzhcable works,
7, Avtogenaya Str., Kharkiv, 61099, Ukraine.

A statistical model of monitoring of insulation breakdown voltage stability in the process of enameled wires production.

This paper is devoted to non-destructive technological monitoring of defects of insulation of enameled wires with polyimide polymer. The authors present a statistical method for processing, comparison and analysis of outcomes of measurements of parameters of insulation of enameled wires. A mathematical model of trend for application in active technological monitoring is developed to develop recommendations for parameters of such monitoring. It is theoretically justified and the possibility of a diminution of dependence of an error on the velocity of movement of a wire for want of quantifying defects of enameled insulation using non-destructive tests by high voltage is shown. The dependence of average value of amount of defects for enameled wires with two-sheeted polyimide insulation in a range of nominal diameter 0.56 mm is experimentally determined. The technological monitoring purpose is to reduce quantifying defects of enameled insulation. References 12, figures 4.

Key words: enameled wire, polyimide insulation, insulation defectiveness, technological monitoring, statistical model, voltage tests.