

УДК 621.315.2

КОНТРОЛЬ ТА АНАЛІЗ ДИСПЕРСІЇ ПАРАМЕТРІВ КАБЕЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ – ОСНОВА РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИНЦИПУ НЕПЕРЕРВНОГО ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ

О.В. Голик, кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"



Виконано аналіз результатів контролю дисперсії напруги пробною емальдроту з двошаровою ізоляцією на основі поліімідних сополімерів.

The results analysis on monitoring of sigma breakdown voltages for an enameled wire insulated articles with double layer insulation on the basis of polyimide heteropolymers.

Вступ

Впровадження інноваційних видів кабельної продукції дозволяє кабельному виробництву забезпечити найвищий сучасний рівень електричної і механічної міцності ізоляції, її нагрівостійкості. За цих умов контроль і аналіз дисперсії основних технічних параметрів продукції є базовою інформацією для реалізації принципу неперервного підвищення якості згідно з ISO 9001:2000. Однак такий контроль, не кажучи про аналіз, не передбачений нормативною технічною документацією.

Постановка задачі

Вимірювання дисперсії технічного параметра за способом одержання і представлення результатів є опосередкованим і відносним. Тому до цих вимірювань не можна застосувати класичну (канонічну) модель процесу вимірювання. Остання [1] вимагає виконання трьох умов:

- час вимірювання не обмежений і порівняння з мірою може бути достатньо тривалим;
- вимірювана величина зберігає істинне значення незмінним упродовж усього циклу вимірювання;
- усі фактори, що впливають на результат, точно визначено.

Щонайменше перші дві умови в принципі не можуть бути виконані при вимірюванні дисперсії технічного параметра в конкретному завданні поточного технологічного контролю. Тому в цьому разі прийнятною є тільки ймовірнісна модель, за якої вимірювана величина є послідовністю значень, що дають інформацію про стан об'єкту вимірювань, при чому істинне значення величини може

залишатися невизначеним на цьому інтервалі процесу вимірювання [2].

Основними завданнями дослідження є:

- 1) аналіз дисперсії основних параметрів двох видів кабельних виробів, а саме: емальдроту з двошаровою ізоляцією на основі поліімідних сополімерів і кабельних пластмас, що не розповсюджують горіння;
- 2) кількісний аналіз внеску похибки вимірювань у значення згаданих параметрів, які є критеріями однорідності кабельного виробу;
- 3) перевірка можливості застосування в умовах виробництва поточного контролю максимальної ймовірності P_{\max} того, що вимірюваний параметр вийде за задану технологічну границю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У світовій практиці застосовують відому концепцію "6σ" [3], за якою коефіцієнт однорідності K_{σ} визначають за дисперсією контрольованого параметра X :

$$K_{\sigma} = \frac{|C_L - X_{cp}|}{(D[X])^{0,5}} \text{ при обмеженні знизу;}$$

$$K_{\sigma} = \frac{|C_S - X_{cp}|}{(D[X])^{0,5}} \text{ при обмеженні зверху,}$$

де C_L , C_S – відповідно нижня і верхня границі, узгоджені із замовником продукції.

Без сумніву, кроком уперед у концепції "6σ" є визначення коефіцієнта однорідності за значенням допустимої границі параметра, узгодженої із замовником продукції. Але при практичному використанні виникають проблеми:

1) для застосування концепції "6σ" необхідні значні масиви даних, одержаних в однакових умовах, що робить неможливим прийняття оперативних рішень в умовах оперативного технологічного контролю;

2) у методології контролю відсутні складові, які б дозволили забезпечити поступове зменшення дисперсії контрольованого параметра, що б мало бути головною метою оперативного технологічного контролю в умовах стабільного виробництва.

Наприклад, при впровадженні виробництва емальдроту з двошаровою ізоляцією на основі полі-

імідних сополімерів (температурний індекс 200 °С), для яких досягнуто найвищий сучасний рівень електричної і механічної міцності емальізоляції, дисперсія електричної і механічної міцності емальізоляції стає основним показником якості цієї продукції [4]. Дослідження можливості аналізу дефектності таких проводів в умовах виробництва свідчить, що при технологічній швидкості руху проводу, більший за 100 м/хв, відносна похибка вимірювання дефектності помітно зростає [4]. Для зменшення такої похибки запропоновано для ізоляції проводу попередню зарядку, параметри якої залежать від електрофізичних параметрів проводу.

В [5] показано, що при впровадженні у виробництво нових рецептур кабельних пластмас з антипіренами визначення стандартних механічних характеристик для прийняття технологічних рішень не досить, оскільки спостерігається суттєве розсіяння одержаних значень в однакових умовах. Експериментально доведено, що саме дисперсія товщини пластмаси визначає параметри залежності максимального зусилля при одноосному розтягуванні P_m (maximum tensile force) від товщини. Кількісно проаналізовано внесок похибки вимірювання товщини у значення згаданих параметрів, які є критеріями однорідності пластмаси.

У [4] запропоновано використання методу контролю виходу технічного параметра за нормативну межу. Технічним інструментом методу є контрольна карта, що ґрунтується на застосуванні математичного апарата інтервальних статистичних моделей. На такій контрольній карті автоматично фіксується максимальна ймовірність того, що контрольна характеристика (наприклад, пробивна напруга емалі чи інша) вийде за визначену нормативну межу. Відповідно карту позначено P_{\max} і її можна застосовувати до будь-якої технічної характеристики, яку доцільно контролювати.

Наведені приклади свідчать, що впровадження у кабельне виробництво кращих світових досягнень в матеріалах і обладнанні забезпечує досягнення найвищого сучасного рівня електричної і механічної міцності ізоляції кабельних виробів. У цих умовах на перший план виходять проблеми забезпечення на світовому рівні однорідності продукції. Інакше економічні вкладення в інноваційну продукцію, які є безумовно виправданими в сенсі технічного розвитку, можуть викликати суто матеріальні проблеми підприємства. Тільки створення ефективної системи забезпечення неухильного підвищення однорідності продукції від досягнутого рівня здатне забезпечити вирішення цієї проблеми. Основним кількісним критерієм однорідності продукції є дисперсія її основних характеристик.

Основні результати

Експериментальне дослідження впливу параметрів мідного провідника на статистичні характеристики напруги пробою U ізоляції емальдроту

ПЭЭИДХ у діапазоні номінальних діаметрів від 0,10 до 0,63 мм свідчить, що в умовах налагодженого технологічного процесу, який забезпечує відповідність емальдроту всім технічним нормативам, значення напруги пробою U для котушок емальдроту впродовж неперервного технологічного циклу характеризуються суттєвим розсіянням. Близько 5 % котушок мали значення $\inf(U) < U_{\min}$, де U_{\min} – прийнята технологічна границя. Основними чинниками впливу на величину напруги пробою емальізоляції є: дисперсія діаметра d_p мідного провідника (від’ємна лінійна кореляція: $Kor[\sigma[d_p], M[U]] = -0,762$); відносне видовження δ при розриві (позитивна лінійна кореляція: $Kor[M[\delta], M[U]] = 0,806$).

Оскільки однією з технологічних причин розсіяння пробивної напруги емальдроту є нестабільність діаметра дроту, то відповідним кількісним критерієм може бути обрано дисперсію діаметральної товщини емальізоляції, що є різницею між діаметром готового проводу і діаметром мідного провідника: $D[U] = f(D[t])$. Для визначення цієї функції обрано емпіричну залежність середньої пробивної напруги U дроту ПЭЭИДХ від середньої діаметральної товщини t ізоляції:

$$U = 3096 \exp(0,014t), \quad (1)$$

де U у вольтах, t у мікрометрах.

Внесок розсіяння товщини емалі в розсіяння пробивної напруги U може бути проаналізований за допомогою дисперсійного аналізу залежності $U=f(t)$ (1):

$$M[\ln U] = \ln 3096 + 0,014M[2\Delta e \cdot 10^3],$$

де $\Delta e \cdot 10^3$ – радіальна товщина емальізоляції, мкм;

$$D[\ln U] = 0,014^2 D[2\Delta e \cdot 10^3];$$

$$\sqrt{D[\ln U]} = 0,014 \cdot \sqrt{D[2\Delta e \cdot 10^3]}. \quad (4)$$

Вираз (2) дає змогу оцінити вплив розсіяння товщини емалі на розсіяння пробивної напруги U . Видно, що саме похідна функції $U=f(t)$ у лінеаризованих координатах є критерієм впливу. Відповідні експериментальні оцінки правої частини (2) наведено в таблиці. Там само наведено експериментально визначені значення середньоквадратичного відхилення логарифмів пробивної напруги, що розраховані за принципом суперпозиції двох впливів: товщини і відносного видовження при розриві.

Дані таблиці свідчать про те, що саме суперпозиція двох названих факторів впливу зумовлює розсіяння пробивної напруги емальізоляції в умовах нормального процесу емальювання (такого, який забезпечує відповідність продукції нормативним технічним вимогам).

Характерний вигляд карти P_{\max} наведено на рисунку, де відображено контроль у технологічний період, упродовж якого весь виготовлений емальдріт відповідав усім нормативним вимогам. Тобто

Фактори впливу на розсіяння пробивної напруги U

Кількість котушок	Дисперсія значень $\ln U$ $\sqrt{D[\ln U]}$, де U у вольтах	Дисперсія значень діаметральної товщини ізоляції $\sqrt{D[t]}$, де t у міліметрах	Розраховані за принципом суперпозиції двох впливів значення $\sqrt{D[\ln U]}$,
0–19	0,082	$1,265 \cdot 10^{-3}$	0,104
20–39	0,171	$2,594 \cdot 10^{-3}$	0,141
40–59	0,136	$1,828 \cdot 10^{-3}$	0,12

цей контроль направлений на попередження виходу за межі таких вимог. Параметром, що контролюється, у цьому разі є кількість R_0 бездефектних контрольних довжин (100 м), яка фіксується на сучасних емальагрегатах у процесі неперервного комп'ютерного моніторингу наявності слабких місць в емальізоляції шляхом випробувань високою напругою на прохід.

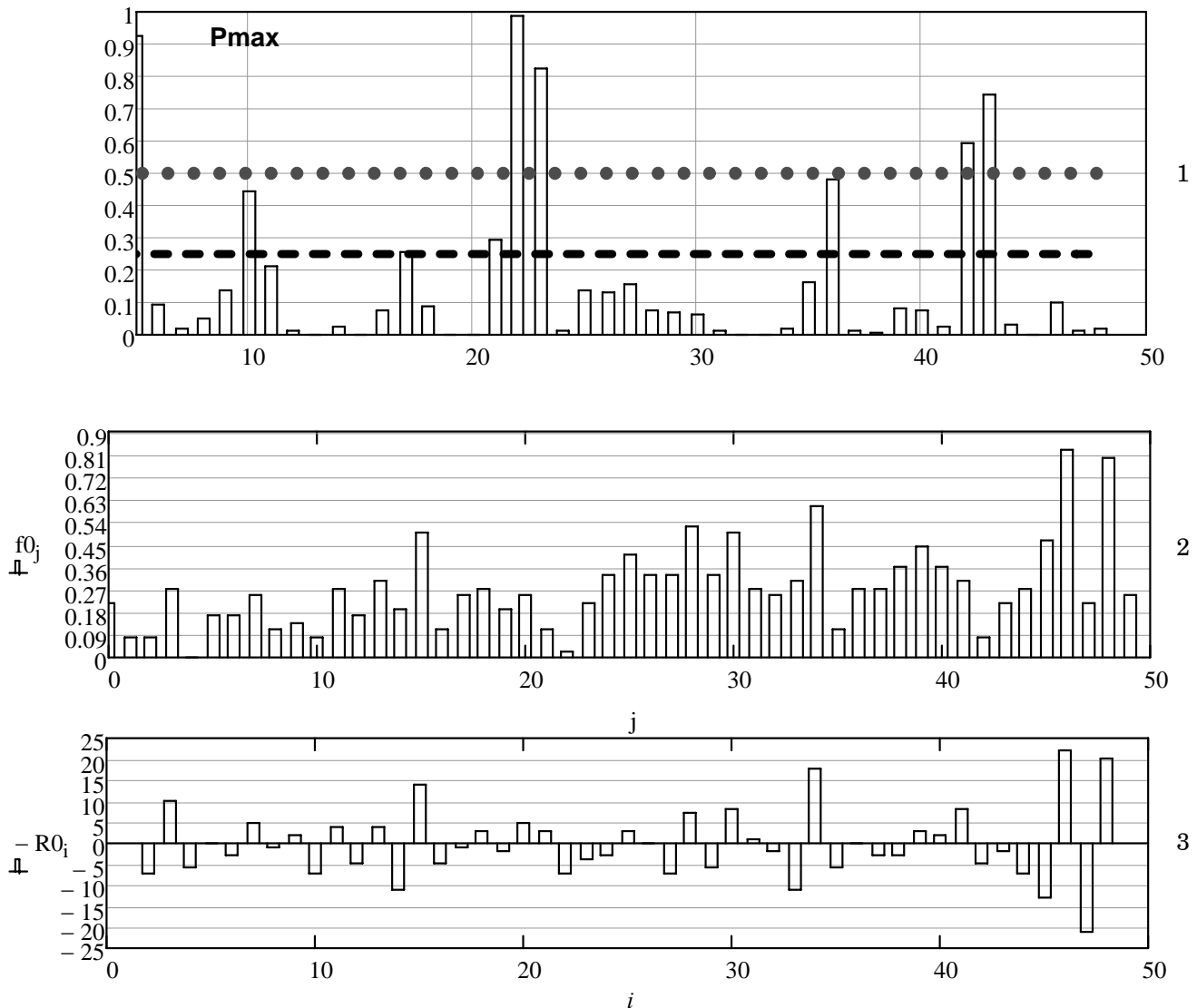
Для порівняння варіантів поточного автоматичного контролю наявності слабких місць в емальізоляції при випробуваннях високою напругою на прохід на рисунку зіставлено результати контролю

лю R_0 за трьома статистичними характеристиками (цифри 1–3 відповідають позначкам на рисунку):

1 – максимально ймовірністю того, що кількість бездефектних контрольних довжин (100 м) на котушці емальдроту вийде за визначену нормативну межу, P_{\max} ;

2 – відносною кількістю (частотою появи f_0) бездефектних контрольних довжин (100 м) на котушці емальдроту;

3 – розмахом значень R_0 на двох послідовно виготовлених котушках емальдроту.



Порівняння методів поточного контролю наявності слабких місць в ізоляції при випробуваннях високою напругою на прохід. По горизонталі – номери котушок емальдроту в хронологічному порядку виготовлення; на кожній котушці (3600 ± 100) м

Розрахунки виконано після визначення дефектності кожної чергової котушки за простим алгоритмом, де R_t – технологічна границя, M_i – середня оцінка за період спостережень, M_{Δ_i} – середнє двох останніх вимірювань:

$$i \in \{2; \dots; n\};$$

$$M_i = \frac{\sum R_{0_i}}{i};$$

$$M_{\Delta_i} = \frac{\sum R_{0_k}}{2}, \text{ де } k \in \{i-1; i\};$$

$$M_{\max_i} = \sup(R_{0_{i-1}} - M_{\Delta_i}; R_{0_i} - M_{\Delta_i});$$

$$\alpha_i = R_t - M_i;$$

$$P_{\max_i} = \frac{M_{\max_i}^2}{M_{\max_i}^2 + \alpha_i^2}.$$

Порівняння різних методів контролю наявності слабких місць в емалізоляції свідчить про те, що за інформативністю і чутливістю до розсіяння P_{\max} є найбільш ефективною. Наприклад, за частотою появи f_0 бездефектних контрольних довжин (рис. 2) найгіршими є котушки № 22 і 42. Контроль за f_0 безпосередньо і оперативно фіксує потрібну технічну характеристику, але має суттєвий недолік: він ділить усі об'єкти на “білі – чорні” за будь-якої вибраної граничної величини $f_{0\text{доп}}$. Вибір $f_{0\text{доп}}$ у “білій” зоні для надання контролю функції попередження появи небажаних значень зумовлює необхідність побудови статистичної моделі з використанням:

1) двох, різних по суті, ймовірностей – ймовірності появи небажаної події і ймовірності того, що першу визначено правильно;

2) фундаментальних уявлень про те, що результати вимірювань належать нескінченно великій кількості таких вимірювань і є взаємно незалежними;

3) нормальної функції розподілу значень вимірюваної характеристики.

Жодна із цих вимог не є адекватною завданню і процедурі поточного технологічного контролю.

Максимальна ймовірність P_{\max} того, що кількість бездефектних контрольних довжин (100 м) на котушці емалдроту вийде за визначену нормативну межу (рис. 1), теж визначає як найгірші котушки № 22 і 42, в яких ця кількість найменша. Для цих і наступних за ними котушок величина перетинає “червону межу”, за якою ймовірність появи небажаної продукції більша за 50 %, що вимагає регулювання технологічного процесу, але без його зупинки і появи продукції, яка не відповідає технічним вимогам. Важливо те, що контрольна карта P_{\max} є інструментом попередження про загрозу виходу за встановлену межу, тобто призначена запобігати появі виробів поза такою межею. При цьому статистична модель, на якій ґрунтується P_{\max} , по-перше, не вимагає виконання п. 1–3,

по-друге, є простою і уніфікованою статистичною процедурою, що, як і “Six Sigma Methodology”, прийнятна для будь-яких характеристик.

Застосування методів інтервальної статистики в технологічному контролі має ті переваги, що, по-перше, виключаються будь-які обмеження для самих масивів даних, по-друге, статистичні оцінки є абсолютно надійними. Та найважливішою є можливість уніфікації статистичних процедур для всіх технічних параметрів, які контролюють. А отже, ці методи забезпечують створення комплексної системи контролю якості з відкритою архітектурою упродовж усього технологічного ланцюга, тобто з можливістю необмеженого розвитку. Очевидно, що покликані попередити появу невідповідної продукції, ці методи є економічно вигіднішими за будь-які методи контролю, направлені на виділення і видалення невідповідної продукції.

Висновки

1. Виконано дисперсійний аналіз залежності напруги пробою емалдроту ПЭЭИДХ у діапазоні номінальних діаметрів від 0,10 до 0,63 мм від товщини емалізоляції. Експериментально визначено значення середньо-квадратичного відхилення логарифмів пробивної напруги і розраховано за принципом суперпозиції двох впливів: товщини і відносного видовження при розриві. Показано, що саме суперпозиція двох названих факторів впливу зумовлює розсіяння пробивної напруги емалізоляції в умовах нормального процесу емалювання (такого, який забезпечує відповідність продукції нормативним технічним вимогам).

2. Запропоновано застосування в умовах виробництва поточного контролю максимальної ймовірності P_{\max} того, що вимірюваний параметр вийде за задану технологічну границю. Подано алгоритм визначення P_{\max} для кожного чергового об'єкта поточного технологічного контролю технічного параметра. Алгоритм базується на математичному апараті інтервальних статистичних моделей.

3. Зазначено, що застосування методів інтервальної статистики в технологічному контролі має ті переваги, що, по-перше, виключаються будь-які обмеження для самих масивів даних, по-друге, статистичні оцінки є абсолютно надійними. Та найважливішою є можливість уніфікації статистичних процедур для всіх технічних параметрів, які контролюють. А отже, ці методи забезпечують створення комплексної системи контролю якості з відкритою архітектурою упродовж усього технологічного ланцюга, тобто з можливістю необмеженого розвитку.

Список літератури

1. Раннев Г.Г. Методы и средства измерений: учебник для студ. вузов / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасен-

- ко. – 3-е изд., стер. – М.: Изд. центр “Академия”, 2006. – 336 с.
2. Информационно-измерительная техника и технологии / В.И. Калашников, С.Ф. Нефедов, А.Б. Путилин [и др.]; под ред. Г.Г. Раннева. – М.: Высшая школа, 2002. – 454 с.
 3. Голик О.В. Исследование дефектности нагревостойких проводов с двойной полиимидной эмальизоляцией при испытаниях высоким напряжением на проход / О.В. Голик // Украинський метрологічний журнал. – 2009. – № 1. – С. 12–17.
 4. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість: підруч. для студ. вузів / В.П. Карпушенко, Л.А. Щебенюк, Ю.О. Антоненко, О.А. Науменко. – Харків: Регіон-інформ, 2000. – 376 с.
 5. Золотарєв В.М. Контроль дисперсії параметрів деформації пластмас для ізоляції і оболочок кабелів в пожаробезопасном исполненіи / В.М. Золотарєв, О.В. Васильєва, Л.А. Щебенюк // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків, 2012. – № 28. – С. 91–95.

УДК 681.518+621.373

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УНИФИЦИРОВАННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН С ЧАСТОТНЫМ ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ ИЗМЕРЯЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ

А.В. Гусельников, аспирант Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”



Статья посвящена разработке математической модели унифицированного преобразователя физических величин с частотным представлением измерительной информации. Приведены функциональная схема и математические

модели такого прибора.

The article is devoted to development of the mathematical model of unified converter of physical quantities with frequency representation of the measured data. The functional diagram and mathematical models of the elements of such setup are presented.

В настоящее время в современных системах измерения, контроля и управления широкое распространение получили измерительные преобразователи физических величин (ИФВ) с частотным представлением измерительной информации. Такие ИФВ, состоящие из автогенераторных датчиков (АГД), содержащих один или два автогенератора (АГ) электрических колебаний с частотозадающими первичными преобразователями (ПП), такими как LRC-цепи, пьезо-, струнные и акустические резонаторы и некоторые другие элементы, с параметрами, которые определяются значением преобразуемой в частоту электрических колебаний величины X , и кодирующих преобразователей (КП) с выходным сигналом в виде цифрового (числоимпульсного) кода [1, 2]. Метод построения унифицированных

ИФВ и способ линеаризации их характеристик преобразования приведены в работе [3].

Целью настоящей работы является разработка математической модели унифицированных преобразователей физических величин с частотным представлением измеряемой информации.

Функция преобразования унифицированного ИФВ с АГД, устанавливающая связь между входным X и выходным N_x сигналами унифицированного ИФВ, в общем виде может быть представлена выражением

$$N_x = SX,$$

где S – статистическая чувствительность:

$$S = \frac{\partial N_x}{\partial X};$$

в случае линейности характеристики преобразования унифицированного ИФВ:

$$S = \frac{N_x}{X}.$$

Функциональная схема унифицированного ИФВ приведена на рисунке.

С учетом зависимостей, приведенных в работе [3], и обозначений на рисунке, определены приведенные в табл. 1 математические модели элементов автогенераторных датчиков, содержащих один АГ, автогенераторных датчиков, содержащих измерительный и компенсационный АГ, и автогенераторных датчиков, содержащих два измерительных АГ, с дифференциально включенными ПП.

Математическая модель всего датчика, в зависимости от варианта исполнения унифици-