

Ю. П. АНТОНЕЦЬ, А. О. КОНОПЛЬОВ, А. А. ШУРУПОВА, Л. А. ЩЕБЕНЮК, О. Г. КЕССАЄВ

АСИМЕТРИЯ РОЗПОДІЛУ КОВАРІАЦІЙ ЯК КРИТЕРІЙ ВЗАЄМНОГО ВПЛИВУ КОНТРОЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ КАБЕЛЬНИХ ВИРОБІВ

Вступ. Якість та стабільність експлуатаційних параметрів кабельних виробів безпосередньо визначаються технологією їх виготовлення. Конструкція кабелю у поперечному перерізі складається з послідовно накладених шарів матеріалів з різними електрофізичними, механічними та тепловими характеристиками, що формуються в умовах безперервного технологічного процесу. Від точності цього процесу залежить дотримання параметрів поширення електромагнітного поля вздовж направляючої системи. **Проблема.** Технологічний процес виготовлення кабелів охоплює десятки контрольних параметрів, більшість із яких взаємопов'язані та не утворюють єдиного статистичного ансамблю. Це ускладнює застосування класичних методів контролю та виявлення відхилень, що можуть впливати на надійність кабельних жил. Виявлення сторонніх факторів впливу під час виробництва часто потребує більш чутливих і комплексних методів аналізу. **Мета.** Розробити підхід до оцінювання взаємного впливу двох ключових контрольних параметрів — електричного опору та маси пресованих алюмінієвих жил — та запропонувати індикатор для виявлення аномальних значень, що можуть впливати на якість і рекламацийний потенціал кабельних виробів. **Методика.** Для дослідження використано результати вимірювань алюмінієвих пресованих жил номінальним перерізом 240 мм² за тривалий технологічний період. Проведено математичний опис масивів вимірювань за допомогою двовірної функції розподілу вектора параметрів r (опір) та m (маса). Запропоновано аналіз асиметричності розподілу добутоків центрованих значень $[ri - M(ri)][mj - M(mj)]$, які є масивом поточних коваріацій, що відображають взаємний вплив параметрів. **Результати.** Застосування запропонованої методики дозволяє з високою чутливістю виявляти асиметричні, аномальні відхилення у взаємному впливі контрольних параметрів. Оцінка за формулою (10) забезпечує можливість своєчасно виявляти сторонні фактори у виробничому процесі, що впливають на стабільність електричного опору та маси кабельних жил. **Практична цінність.** Запропонований підхід може використовуватися для покращення технологічного контролю на кабельних заводах, дозволяючи підвищити точність виявлення аномалій, зменшити рекламацийний ризик, підвищити якість кабельної продукції та забезпечити стабільність параметрів направляючих систем у реальних умовах експлуатації.

Ключові слова: технологічний контроль, асиметрія двовірного розподілу, електричний опір, коваріація, рекламацийний потенціал продукції, статистичний аналіз, контрольні параметри.

JU. ANTONETS, A. KONOPLEV, A. SHURUPOVA, L. SHCHEBENIUK, O. KIESSAIEV

ASYMMETRY OF COVARIANCE DISTRIBUTION AS A CRITERION FOR THE MUTUAL INFLUENCE OF CONTROL PARAMETERS OF CABLE PRODUCTS

Introduction. The quality and stability of the operational parameters of cable products are directly determined by the technology used in their manufacture. The cross-sectional design of a cable consists of sequentially layered materials with different electrophysical, mechanical, and thermal characteristics, which are formed under continuous technological processes. The accuracy of this process determines the compliance with the parameters of electromagnetic field propagation along the guide system. **Problem.** The technological process of cable manufacturing involves dozens of control parameters, most of which are interrelated and do not form a single statistical ensemble. This complicates the application of classical methods of control and detection of deviations that may affect the reliability of cable cores. The detection of extraneous factors during production often requires more sensitive and complex methods of analysis. **Objective.** To develop an approach for assessing the mutual influence of two key control parameters—electrical resistance and the mass of extruded aluminum conductors—and to propose an indicator for detecting abnormal values that may affect the quality and complaint potential of cable products. **Methodology.** The study uses the results of measurements of aluminum pressed cores with a nominal cross-section of 240 mm² over a long technological period. A mathematical description of the measurement arrays was performed using a two-dimensional distribution function of the parameter vectors r (resistance) and m (mass). An analysis of the asymmetry of the distribution of the products of centered values $[ri - M(ri)][mj - M(mj)]$, is proposed, which are an array of current covariances reflecting the mutual influence of parameters. **Results.** The application of the proposed methodology allows for the highly sensitive detection of asymmetric, anomalous deviations in the mutual influence of control parameters. Evaluation using formula (10) makes it possible to timely detect extraneous factors in the production process that affect the stability of the electrical resistance and mass of cable cores. **Practical value.** The proposed approach can be used to improve technological control at cable plants, allowing for increased accuracy in detecting anomalies, reducing the risk of complaints, improving the quality of cable products, and ensuring the stability of guide system parameters in real operating conditions.

Keywords: technological control, asymmetry of two-dimensional distribution, electrical resistance, covariance, product complaint potential, statistical analysis, control parameters.

Вступ. Те, як нерозривний зв'язок зміни електричного і магнітного полів (струм зміщення Максвелла) зумовлює високі вимоги до однорідності по довжині направляючої системи (НС), технологічний процес її виробництва зумовлює високі вимоги до однорідності по довжині технічних параметрів кабельних виробів [1].

Різні елементи конструкції кабельного виробу в поперечному перерізі – це різні за електрофізичними, механічними і тепловими параметрами матеріали, які в процесі виготовлення послідовними шарами накладають поверх попередніх при неперервному рухові через технічні вузли кабельного обладнання [2].

Цей динамічний технологічний процес повинен забезпечити виконання технічних допусків на параметри

розповсюдження електромагнітного поля по довжині направляючої системи (НС).

Відповідно усталена класифікація кабельних виробів за технологічною однорідністю [3] зумовлена саме принциповою нерозривністю конструкторської та технологічної підготовки виробництва, ключову роль в якому відіграють методи технологічного контролю як по довжині виробу, так і впродовж всього технологічного циклу.

При цьому кількість контрольних параметрів – десятки, більшість з них взаємопов'язані, що виключає виконання вимоги взаємної незалежності випадкових величин, яка характерна більшості статистичних методів оброблення і аналізу числових масивів [4].

Наприклад, при випробуваннях в режимі реального часу емаль проводів на основі полієфірімідних співполімерів, що включає дев'ять різних методів випробувань, серед яких лише при неруйнівних випробуваннях напругою на прохід фіксують вісім вочевидь взаємопов'язаних параметрів, значення яких зберігаються на магнітних носіях тривалий час для подальшого аналізу [5].

Обґрунтування актуальності напрямку дослідження. Взагалі проблема організації і аналізу результатів конкретного технологічного контролю в режимі реального часу при впровадженні сучасних автоматичних ліній масового виробництва, – одна з найактуальніших проблем вітчизняної кабельної техніки, продукція якої вирізняється неспівставними повздовжніми і поперечними розмірами [5, 6].

Між задачами приймального і поточного технологічного контролю значна теоретична і технічна різниця, яку умовно можна окреслити словами: невизначеність не є випадковістю (теоретично випадковість вимагає статистичної сталості).

Але аналіз масиву даних першим кроком має використання ймовірнісної моделі (ТР) і відповідних усталених математичних процедур математичної статистики, які дають можливість оброблення великих масивів даних із застосуванням сучасної обчислювальної техніки [6, 7].

Технологічний контроль по суті присвячений пошуку нестабільності і оцінюванню технологічного тренду контрольних параметрів. Тобто масив даних для одного лише параметру складається з елементів різних випадкових величин (незалежна змінна – технологічний час) і середнє цього масиву визначене їх сумою.

У такому разі дисперсія середнього є сума дисперсій плюс сума попарних коваріацій [4]. Таким чином окремі значення контрольного параметру при технологічному контролі не є ні незалежними, ні сталими. Надійне визначення ймовірності появи недопустимих значень випадкової величини дотепер є предметом пошуку конкретних рішень для спеціалістів в царині математичної статистики [1, 2, 3, 5, 6, 9, 10].

Інша проблема зумовлена нерозривністю параметрів конструкції виробу і технології його виробництва: організація контролю нормованої продукції при принциповій зміні технології виготовлення. Зміна технології щонайменше вимагає перевірки придатності усталених методів контролю.

В даному разі розглянуто заміну традиційної технології холодної витяжки (волошіння) на гаряче пресування при виготовленні алюмінієвих жил силових кабелів. Така заміна забезпечує найвищий рівень електропровідності металу з одночасним виключенням затрат на відпалення [8].

При виготовленні волошінням визначають питомий електричний опір ρ , який при цьому збільшується, тому нормативною процедурою контролю після виготовлення жили є оцінка ρ .

В [8] представлено результати вимірювання електричного опору R пресованих алюмінієвих жил номінального перерізу 240 мм^2 впродовж тривалого технологічного періоду виготовлення в умовах виробництва.

На рис. 1 показано, що в разі зміни технології виготовлення, контроль за питомим електричним опором є недостатнім через появу недопустимих значень електричного опору випресуваної алюмінієвої жили (номінальний переріз 240 мм^2 , довжина 1 м , 20°C); штрихова горизонтальна лінія – верхній допуск для R , який суттєво перевищено у 11 зразків. Питомий електричний опір ρ тих же зразків, визначений за традиційним методом контролю, слід визнати таким, що відповідає нормативним вимогам для конкретної продукції.

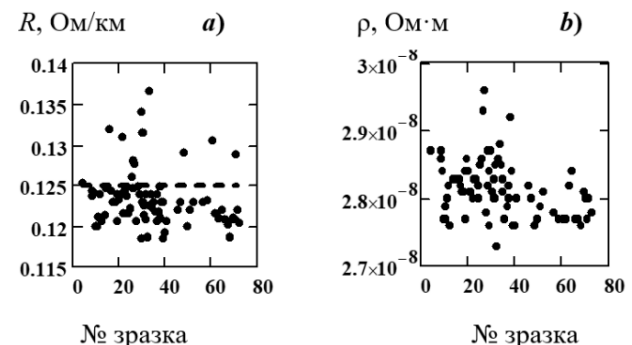


Рис. 1. Залежності: а) електричний опір R випресуваної алюмінієвої жили на довжині 1 м при 20°C ; штрихова горизонтальна лінія – верхній допуск для R ; б) питомий електричний опір ρ тих же зразків визначений за традиційним методом контролю [8]

Дані наведені в [8] засвідчили, що проблема організації і аналізу результатів конкретного технологічного контролю при впровадженні технологічних інновацій у масове виробництво, – одна з актуальних проблем вітчизняної кабельної техніки.

Аналіз літератури. Загальною теоретичною базою математичного опису розподілу кількох випадкових величин у вигляді n -мірної функції розподілу вектору $\vec{X}$ з координатами $x_1, x_2, \dots, x_n$, що є ймовірністю спільного (*common*) виконання нерівностей $x_1 \leq u_1, x_1 \leq u_2, \dots, x_n \leq u_n$, отже функцією n змінних $u_1, u_2, \dots, u_n$ [3, 4]:

$F_X(u_1, u_2, \dots, u_n) = P\{x_1 \leq u_1, x_2 \leq u_2, \dots, x_n \leq u_n\}$, (1)
що має властивості притаманні властивостям функції розподілу скалярної випадкової величини, як і відповідні розподіли густини ймовірності [9].

Зокрема функція розподілу $F_X(u_1, u_2, \dots, u_n)$ є невід'ємною і належить діапазону $[0, \dots, 1]$, а густина ймовірності розподілу вектору $\vec{X}$ є відповідною похідною [4]:

$$f_X(u_1, u_2, \dots, u_n) = [\partial^n F_X(u_1, u_2, \dots, u_n)] / (\partial u_1 \partial u_2 \dots \partial u_n). \quad (2)$$

Для n -мірного нормального розподілу [4]:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\sqrt{B}}{2\pi^{n/2}} e^{-\frac{1}{2}Q(x_1, x_2, \dots, x_n)}, \quad (3)$$

де для $Q(x_1, x_2, \dots, x_n)$ в разі двомірної густини розподілу загальне рішення наступне [11]:

$$Q(x, y) = \frac{(x-a)^2}{2A^2} - r \frac{(x-a)(y-b)}{AB} + \frac{(y-b)^2}{2B^2}, \quad (4)$$

де A і B додатні числа; r, A, B – дійсні числа, причому $-1 < r < +1$.

В даному разі застосовано математичний опис результатів випробувань у вигляді: двомірної функції розподілу вектору $\vec{X}$ з координатами r, m , що є ймовірністю спільного виконання двох нерівностей $r \leq u_1, m \leq$

u_2 , де u_1 і u_2 є відповідними технічними нормативами, що обмежують допустимі значення електричного опору r і маси m технічних виробів у конкретному масовому виробництві:

$$F_X(u_1, u_2) = P\{r \leq u_1, m \leq u_2\}, \quad (5)$$

де r і m масиви результатів вимірювань електричного опору і маси технічних виробів впродовж неперервного технологічного циклу їх виготовлення.

Відповідно для нормального вектору $\tilde{X}$:

$$f(r_i, m_j) = \frac{\sqrt{D}}{2\pi} e^{-0,5 \sum_{i,j} b_{i,j} [r_i - M(r_i)][m_j - M(m_j)]}, \quad (6)$$

де M – символ математичного сподівання, а в разі математичного опису результатів випробувань середнє значення;

$[r_i - M(r_i)][m_j - M(m_j)]$ – добуток центрованих випадкових величин [2], в даному разі результатів вимірювань відповідно електричного опору r_i і маси m_j технічно однакових зразків, які є елементами масиву змінної, середнє значення якої є статистичною оцінкою коваріації, тобто взаємного впливу цих параметрів;

$i, j = 1, 2, \dots, n; b_{i,j}$ – показник дисперсії двох змінних, в даному разі обернений добуток середньоквадратичних відхилень двох параметрів $\sigma(r_i)\sigma(m_i)$, (формула 7), що забезпечує незалежність оцінок від одиниць виміру опору r_i і маси m_j зразків;

$\sqrt{D}$ – показник дисперсії вектору $\tilde{X}$.

Густина ймовірності розподілу для двовірної функції розподілу за (3) і (4) представлена формулою:

$$f(r_i, m_j) = \frac{(1-k^2)^{-0,5}}{2\pi\sigma_r\sigma_m} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-k^2)}\left[\frac{(r_i-M(r_i))^2}{\sigma_r^2} - 2r\frac{(r_i-M(r_i))(m_j-M(m_j))}{\sigma_r\sigma_m} + \frac{(m_j-M(m_j))^2}{\sigma_m^2}\right]\right\}, \quad (7)$$

де k безрозмірний коефіцієнт в межах $-1 < k < +1$ і при $k \neq 1$ обидві випадкові величини розподілені нормально [10, 11].

Розрахунки за формулою (7) для електричного опору r і маси m технічних виробів у конкретному масовому виробництві свідчать, що в даному разі двовірна функція розподілу, по-перше, дає можливість обчислити ймовірність попадання вектору в паралелепіпед з довільними обмеженнями [4], що ілюструє рис.2, і по-друге, є асиметричною.

Щодо асиметрії двовірної функції розподілу (формула (7)) електричного опору r і маси m зразків алюмінієвих жил силових кабелів однакового номінального перерізу впродовж тривалого технологічного контролю, то в (7) перший і третій доданки в дужках є симетрично розподіленими [11] щодо окремо кожного з параметрів r і m . Асиметричним є лише другий доданок в показнику степеню формули (7) – масив центрованих параметрів, математичне сподівання якого відоме як коваріація – статистична характеристика взаємного впливу двох параметрів. Цей масив позначено нами xmR :

$$xmR = \frac{(r_i - M(r_i))(m_j - M(m_j))}{\sigma_r\sigma_m}. \quad (8)$$

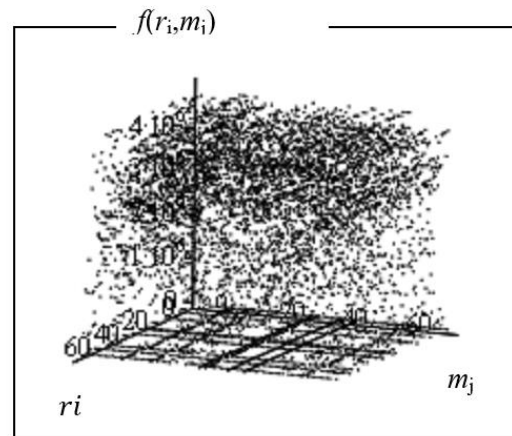


Рис. 2. Асиметрична двовірна функція розподілу (формула (7)) електричного опору r і маси m зразків алюмінієвих жил силових кабелів однакового номінального перерізу і довжини впродовж тривалого технологічного контролю у виробництві

Саме аналіз взаємного впливу результатів вимірювання r і m є вирішальним при прийнятті рішення щодо появи сторонніх факторів на рекламційний потенціал кабельних виробів.

Кількісна оцінка асиметрії розподілу ймовірностей у вигляді коефіцієнту асиметрії відома в кількох варіантах, які можна умовно розділити на дві групи: 1) асиметрія на основі різниці між середнім і модою в унімодалних розподілах (асиметрія Пірсона); 2) асиметрія, що залежить від всіх значень масиву включно з аномальними (наприклад центральний момент третього ступеня).

Вибір має бути пов'язаний з технічною проблемою, в даному разі з оцінюванням рекламційного потенціалу продукції, оскільки електричний опір металевих провідників кабельних виробів є універсальним нормованим параметром, за яким передбачено рекламції.

Мета роботи. Дослідження взаємного впливу технологічних контрольних параметрів кабельного виробництва шляхом оцінювання асиметрії розподілу масиву центрованих параметрів, математичне сподівання якого відоме як коваріація – статистична характеристика взаємного впливу двох параметрів, з метою підвищення чутливості статистичного аналізу результатів контролю до зміни стабільності технологічного процесу в умовах виробництва.

Основні результати. Експериментальну роботу проведено на базі центральної заводської лабораторії ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ» за участі студентів кафедри «Електроізоляційна і кабельна техніка» НТУ «ХПІ».

В умовах виробництва електричний опір силових металевих провідників кабельних виробів є універсальним нормованим параметром, за яким передбачено рекламції. При цьому вимірюють електричний опір r постійному струмові провідника на довжині 1 м при температурі 20 °С.

Контрольним параметром за яким приймається точне технологічне рішення є питомий електричний опір ρ , оскільки саме на цей параметр впливає конкретна технологія виготовлення: $\rho = r \cdot m / \gamma$, де m – маса

зразка довжиною 1 м, γ – питома маса металу. Відповідно фізико-технічний зв'язок між результатами вимірювань r^* і m^* наступний:

$$r^* = \rho \gamma (m^*)^{-1}. \quad (9)$$

Лінійна регресія між результатами вимірювань виражається добутком питомого електричного опору металу на його питому масу $\rho \gamma$. Відповідно з (8) і (9) масив центрованих параметрів доцільно записати:

$$xm^{-1}R = \frac{((r^* - M(r^*))((1/(m^*) - M(1/m^*)))}{\sigma_r \sigma_{(1/m)}}. \quad (10)$$

На рис. 3 представлено ілюстрацію різниці в чутливості до асиметрії розподілу одного і того ж масиву результатів контролю електричного опору r і маси m зразків алюмінієвих жил за використання різних статистичних показників. Асиметричність розподілу змінної $xm^{-1}R$, середнє значення якої є статистичною оцінкою коваріації, тобто взаємного впливу цих параметрів, ілюструє рис.3 б): відношення розмаху результатів до середнього значення дорівнює 15,89 (майже в 16 разів).

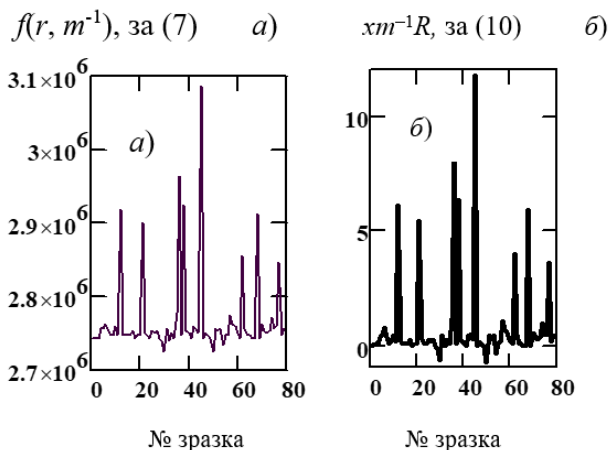


Рис. 3. До асиметричності розподілу взаємного впливу результатів вимірювання r і m : а) густина розподілу за (7) з асиметричним доданком в показнику степеню; б) змінна $xm^{-1}R$ за (10) дає можливість підвищення чутливості виділення аномальних значень такого впливу з високою чутливістю для рішення про появу сторонніх факторів впливу

Для порівняння асиметричність густини розподілу за формулою (7) з тільки другим доданком (асиметричним) в показнику степеню формули (7) на рис.3а): відношення розмаху результатів до середнього значення дорівнює 0,1335. Причому загальний вигляд графіків практично тотожний.

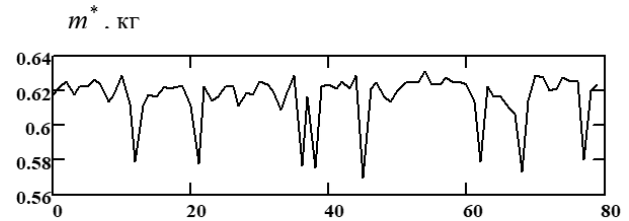
В подальшому для аналізу асиметрії розподілу взаємного впливу електричного опору r і маси m використано масив центрованих лінійно пов'язаних (9) параметрів $(xm^{-1}R)_i$ (10).

За рис. 3б) кількість аномальних взаємних впливів в масиві $xm^{-1}R$ між результатами вимірювань r^* і $(m^*)^{-1}$ орієнтовно 8 з 80, а формула (9), що є частиною методики контролю в виробництві, дає підстави вважати, що причиною цих аномалій в першу чергу є маса m^* . На рис. 4 наведено полігон значень m^* даного статистичного ансамблю.

Рис. 4 свідчить, що причиною появи аномальних взаємних впливів в масиві $xm^{-1}R$ між результатами вимірювань r^* і $(m^*)^{-1}$ є саме маса зразка. Емпірична

частота аномалій $\approx 10\%$ впродовж тривалого технологічного періоду є орієнтовною оцінкою рекламацийного потенціалу конкретної партії.

Використання статистичного ансамблю поточних коваріацій контрольних параметрів дає можливість аналізу впливу фізико-технічних параметрів на асиметрію статистичного ансамблю поточних коваріацій.



№ зразка в порядку виготовлення

Рис. 4. Полігон значень m^* маси зразків при контролі електричного опору алюмінієвих провідників номінального перерізу 240 мм² впродовж тривалого технологічного періоду в умовах виробництва

В даному разі за формулою (9) такими є питомий електричний опір ρ і його питома маса. Для цього необхідна кількісна оцінка асиметрії густини розподілу $f(xm^{-1}R)$. Відповідний графік і оцінка коефіцієнту його асиметрії $\gamma f(xm^{-1}R)$ наведені на рис.5б). В даному разі це асиметрія, що залежить від всіх значень масиву включно з аномальними, - безрозмірний центральний момент третього ступеня густини розподілу.

Аномальні по масі зразки (рис. 4) змінюють видиму асиметрію змінної $xm^{-1}R$ (рис. 5 а), що дозволило (тривалий період спостережень) орієнтовно оцінити ймовірність рекламаций і сформулювати гіпотезу про причину їх появи: характерні локальні зменшення розрахункової площі поперечного перерізу жили $F = m^*/(\gamma L^*)$, де m^* – маса зразка; γ – питома маса металу; L^* – довжина зразка масою m^* .

У підсумку розраховане значення питомого електричного опору ρ для всього періоду спостережень залишалось в межах допустимих значень. Рекомендацією стала зміна контрольного параметру з традиційного ρ (технологія волочіння) на нормований r^* при пресуванні.

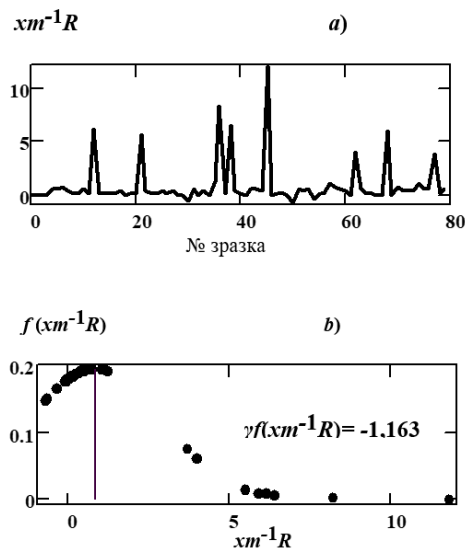


Рис. 5. До оцінки коефіцієнту асиметрії густини розподілу змінної $xm^{-1}R$ (поточних відносних коваріацій):
а) полігон поточних коваріацій (аналог рис. 3б);
б) густина розподілу $f(xm^{-1}R)$: аномалії по масі змінюють видиму асиметрію, - вплив аномальних 8 точок: $3 < xm^{-1}R < 12$; середнє значення 0,788 (чорна вертикаль)

Чутливість густини розподілу $f(xm^{-1}R)$ на рис.5 б) до появи аномальних зразків з алюмінію і можливість кількісно оцінити її асиметричність поставили питання про порівняння цієї оцінки $\gamma f(xm^{-1}R) = -1,163$ з відповідною оцінкою при використанні іншого матеріалу жили, наприклад, міді.

З огляду на фізико-технічний зв'язок між результатами вимірювань r^* і m^* (9), ця формула відображає техніко-фізичну складову причин асиметричності розподілу поточних коваріацій в даному разі.

Оскільки між алюмінієм і міддю велика різниця значень добутків $r\gamma$ (питомого електричного опору металу на його питому масу), то логічно вважати, що статистичні показники коваріації між подібними зразками з алюмінію і міді мають бути пов'язані кількісно із співвідношенням значень добутків $r\gamma$ цих металів.

Відповідно фізико-технічний зв'язок між результатами вимірювань r^* і m^* (формула 9) якісно (більше – менше) може бути встановлено порівнянням оцінок коефіцієнтів асиметрії густини розподілу змінної $xm^{-1}R$ (поточних відносних коваріацій) для алюмінію і аналогічних для мідної катанки (технологія неперервного лиття і прокату, тобто без нагартівки металу).

Ілюстрація впливу фізико-технічного зв'язку між результатами вимірювань r^* і m^* на асиметрію густини розподілу змінної $xm^{-1}R$ наведена на рис.6.

Рис.6 є свідченням того, що фізикотехнічні параметри матеріалу жили суттєво впливають на асиметрію статистичного ансамблю поточних коваріацій між результатами вимірювань електричного опору жили r^* і її маси m^* , а саме:

1) при контролі впливу технології виготовлення жил кабелів на питомий електричний опір металу фізико-технічний зв'язок між результатами вимірювань r^* і m^* за формулою (9) є добутком питомого

електричного опору металу на його питому масу $\rho \cdot \gamma$, тобто для алюмінію АЕ це $7,3 \cdot 10^{-5}$ Ом кг/м²; для міді М1 це $1,5 \cdot 10^{-4}$ Ом кг/м²; співвідношення їх: $1,5 \cdot 10^{-4} / 7,3 \cdot 10^{-5} = 2,05$;

2) співвідношення коефіцієнтів асиметрії функцій розподілу взаємного впливу для лінійного зв'язку електричного опору і маси зразків з алюмінію і міді (рис.6): $-2,394 / -1,162 = 2,06$;

3) на рис.6 загальний характер асиметричності густини розподілу $f(xm^{-1}R)$ поточних коваріацій (формула 10) для міді і алюмінію подібний; кількісно статистичні характеристики асиметричності відрізняються відповідно до фізико-технічної взаємозалежності контрольних параметрів;

4) важливо, що емпіричні оцінки коефіцієнтів кореляції (загально відомий і присутній як статистичний оператор в інтегрованих пакетах програм) цих параметрів (r^* , $1/m^*$) точно співпадають з середніми значеннями запропонованих відносних поточних коваріацій змінної $xm^{-1}R$, середнє значення якої є статистичною оцінкою коваріації, тобто взаємного лінійного впливу електричного опору жили r^* і її маси m^* :

Al corr(r^* , $1/m^*$) = 0,788; mean($xm^{-1}R$) = 0,788;

Cu corr(r^* , $1/m^*$) = 0,863; mean($xm^{-1}R$) = 0,863.

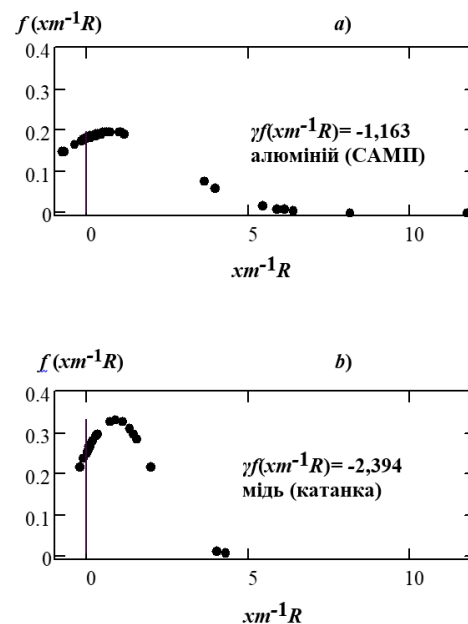


Рис. 6. До порівняння коефіцієнтів асиметрії густини розподілу поточних відносних коваріацій для різних матеріалів суцільного кабельного провідника однакового номінального перерізу: а) випресований алюміній, 80 зразків; б) мідна катанка, 22 зразки

Основні висновки.

1. Розподіл поточних коваріацій двох фундаментальних для кабельної техніки контрольних параметрів (запропонована формула 10), а саме електричного опору r і маси m зразків алюмінієвих жил, розширює діапазон статистичних характеристик двомірного дискретного розподілу контрольних параметрів залишаючись узгодженим з загально відомими статистичними характеристиками.

2. Практично однакові співвідношення між

коефіцієнтами асиметрії функцій розподілу поточних коваріацій і добутками питомого електричного опору металу на його питому масу ($\rho \cdot \gamma$) є свідченням того, що асиметрія вимірюваних при контролі параметрів є безпосереднім наслідком їх фізико-технічної взаємозалежності, яка в масовому виробництві як правило відома.

3. Асиметричність розподілу взаємного впливу результатів вимірювання r і t за запропонованою формулою (10), дає можливість аналізу виділення аномальних значень такого впливу з високою чутливістю для прийняття рішення про появу сторонніх факторів впливу на рекламційний потенціал конкретної партії подібних зразків жил.

4. Практичним наслідком цієї роботи стала зміна нормативної процедури контролю продукції, а саме критичним контрольним параметром має бути електричний опір R постійному струмові провідника на довжині 1 м при температурі 20 °C [8].

Список літератури

1. Кириленко О.В., Сегеда М.С., Буткевич О.Ф., Мазур Т.А. Математичне моделювання в електроенергетиці. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. - 608 с.
2. Бардадим Ю.В., Віленський В.О. Вплив фізичних полів на теплофізичні і діелектричні властивості епоксидних композитів. Фізика і хімія твердого тіла, - 2016 - Т17 - №4 - С. 533 - 539.
3. Argon A.S. The Physics of Deformation and Fracture of Polymers. - New York: Cambridge, 2013. - 511 p
4. T. Andritsch, A. Vaughan and G. C. Stevens, "Novel insulation materials for high voltage cable systems," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 33, no. 4, pp. 27-33, 2017, doi: 10.1109/MEI.2017.7956630.
5. Голик О.В. Статистичні процедури при двосторонньому обмеженні контрольного параметру в процесі виробництва кабельно-провідникової продукції // Електротехніка і електромеханіка.- Харків: НТУ «ХПІ», 2016.- № 5.- С. 47 - 50. doi:10.20998/2074-272X.2016.5.07.
6. Gurin A.G., L. A. Shchebeniuk, Zolotarjov V. V., Antonets S.Yu., Grehko O.M. A Statistical model model of monitoring of insulation breakdown voltage stability in the process of enameled wires production. - Electrical engineering & electro mechanics, 2019, no. 1, pp. 46-50. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.01
7. Bardadym Yu.V., Vilensky V.V. The Influence of Physical Fields on the Properties of Polymer Composites // II International Young Scientists Forum "On Applied Physics and Engineering". - Kharkiv, 2016. - p. 1-4.
8. Antonets Yu.A., Shchebeniuk L.A., Grehko O.M., Technological monitoring of electrical resistance of pressed cable conductors in production conditions. Electrical engineering & electro mechanics, 2019, no. 4, pp. 48-52. doi: 10.20998/2074-272X.2019.4.07
9. NEMA Standards Publication WC 56-1986 (R2005). 3.0 kHz Insulation Continuity Proof Testing of Wire and Cable.
10. CEI/IEC 62230:2006. Electric cables - Spark-test method.

11. M. Kafal, N. Grégis, J. Benoit, N. Ravot, C. Lagomarsini and G. Gobat, "Pilot Tests of FasTR Method for Locating Transient Faults in Medium Voltage Underground Power Networks," in IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 6, pp. 8510-8519, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3034465.
12. Золотарьов В.М. Системний підхід до управління якістю - фундамент перспективного розвитку підприємства / В.М. Золотарьов // Стандартизація, сертифікація, якість. - 2002. - № 1. - С. 57- 61.
13. Карпушенко В.П., Щебенюк Л.А., Антонетс Ю.О., Науменко О.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. Харків: Регіон-Інформ. 2000.- С. 270 - 289.

References (transliterated)

1. Kirilenko O.V., Segeda M.S., Butkevich O.F., Mazur T.A. Mathematical modeling in electric power. - L.: LPI, 2013. - 608 p.
2. Bardadym Yu.V., Vilensky V.V. The Influence of Physical Fields on the Properties of Polymer Composites. Solid state Physics and Khemistry. - 2016 - T17 - no 4 - p. 533 - 539.
3. Argon A.S. The Physics of Deformation and Fracture of Polymers. - New York: Cambridge, 2013. - 511 p
4. T. Andritsch, A. Vaughan and G. C. Stevens, "Novel insulation materials for high voltage cable systems," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 33, no. 4, pp. 27-33, 2017, doi: 10.1109/MEI.2017.7956630.
5. Golik O.V. Statistical procedures with bilateral limitation control parameter in the process of production of cable and conductor products. - Electrical engineering & electro mechanics, 2016, no. 5, pp. 47-50. doi:10.20998/2074-272X.2016.5.07.
6. Gurin A.G., L. A. Shchebeniuk, Zolotarjov V. V., Antonets S.Yu., Grehko O.M. A Statistical model model of monitoring of insulation breakdown voltage stability in the process of enameled wires production. - Electrical engineering & electro mechanics, 2019, no. 1, pp. 46-50. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.01
7. Bardadym Yu.V., Vilensky V.V. The Influence of Physical Fields on the Properties of Polymer Composites // II International Young Scientists Forum "On Applied Physics and Engineering". - Kharkiv, 2016. - p. 1-4.
8. Antonets Yu.A., Shchebeniuk L.A., Grehko O.M., Technological monitoring of electrical resistance of pressed cable conductors in production conditions. Electrical engineering & electro mechanics, 2019, no. 4, pp. 48-52. doi: 10.20998/2074-272X.2019.4.07
9. NEMA Standards Publication WC 56-1986 (R2005). 3.0 kHz Insulation Continuity Proof Testing of Wire and Cable.
10. CEI/IEC 62230:2006. Electric cables - Spark-test method.
11. M. Kafal, N. Grégis, J. Benoit, N. Ravot, C. Lagomarsini and G. Gobat, "Pilot Tests of FasTR Method for Locating Transient Faults in Medium Voltage Underground Power Networks," in IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 6, pp. 8510-8519, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3034465.
12. Zolotarjov V.M. A systematic approach to quality management is the foundation of the company's long-term development // Standartization, certification, quality. - 2002. - № 1. - P. 57- 61.
13. Karpushenko V.P., Shchebeniuk L.A., Antonets Yu.O., Naumenko O.A. Power cables of low and medium voltage. Designing, technology, quality. Kharkiv, Region-inform Publ., 2000. 376 p

Надійшла (received) 27.11.2025

Відомості про авторів / About the authors

Антонетс Юрій Панасович (Antonets Yuriy) – кандидат технічних наук, технічний директор ПАТ «ЗАВОД «ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

Шурупова Аліна Альбертівна (Shurupova Alina) – начальник лабораторії випробувань пластмас ПАТ «ЗАВОД «ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; e-mail: lab@yuzhcable.com.ua

Конопльов Андрій Олександрович (Konoplev Andriy) – начальник лабораторії електричних випробувань та пожежної безпеки ПАТ «ЗАВОД «ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; e-mail: lab@yuzhcable.com.ua

Щебенюк Леся Артемівна (Shchebeniuk Lesia) – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: Lesia.Shchebeniuk@khp.edu.ua

Кіссаєв Олександр Геннадійович (Oleksandr Kiessaiev) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5601-5955>; e-mail: Kiessaiev.Oleksandr@khp.edu.ua