

БУКОВСЬКИЙ Олег

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0008-5471-2229>

e-mail: olbukovskiy@gmail.com

ВИСЛОУХ Сергій

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-2204-2602>

e-mail: vsp1@ukr.net

МЕТОДИКА АДАПТАЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІЖБЛОКОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ

У статті розглянуто питання налаштування автоматизованої системи контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань для різних типів кабельних джгутів. Актуальність роботи зумовлена тим, що силові, сигнальні та комбіновані кабельні джгути мають різну структуру електричних кіл, різні контрольовані параметри, різний рівень чутливості до дефектів і різні вимоги до швидкодії та достовірності контролю. За таких умов використання єдиного універсального режиму перевірки не завжди забезпечує раціональне поєднання точності, повторюваності, продуктивності та надійності прийняття рішення щодо технічного стану виробу.

Метою роботи є розроблення методики адаптації автоматизованої системи контролю, яка дає змогу астановлювати параметри вимірювального циклу, порогові значення, режими контролю та алгоритмічне оброблення вимірювальної інформації до конструктивних і електричних особливостей конкретного типу кабельного джгута. Запропонована методика передбачає послідовне формування еталонної структури з'єднань за таблицею електричних з'єднань, визначення складу контрольованих параметрів, вибір режимів перевірки опору жили, опору замикання та опору ізоляції, встановлення допустимих меж, вибір алгоритмічного профілю оброблення даних, а також проведення первинної перевірки, калібрування та періодичного підтвердження працездатності системи.

У роботі обґрунтовано доцільність переходу від фіксованого режиму контролю до налаштовуваних профілів, орієнтованих на конкретні групи кабельно-провідникової продукції. Такий підхід дозволяє використовувати одну апаратну конфігурацію системи для контролю різних типів виробів без зміни її структури, забезпечити простежуваність результатів, зменшити вплив суб'єктивного фактора оператора та підвищити стабільність контролю в умовах виробничого застосування. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованої методики під час впровадження, налаштування та експлуатації автоматизованих систем контролю кабельно-провідникової продукції.

Keywords: автоматизована система контролю, міжблокові електричні з'єднання, кабельний джгут, кабельно-провідникова продукція, налаштування системи, алгоритмічний профіль контролю, параметричний контроль, вимірювальна інформація.

BUKOVSKYI Oleh, VYSLOUKH Serhii

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

METHODOLOGY FOR ADAPTING AN AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING THE PARAMETERS OF INTERBLOCK ELECTRICAL CONNECTIONS

The article considers the issue of configuring an automated system for monitoring the parameters of interblock electrical connections for different types of cable harnesses. The relevance of the study is determined by the fact that power, signal, and combined cable harnesses have different electrical circuit structures, different controlled parameters, different levels of sensitivity to defects, and different requirements for inspection speed and reliability. Under such conditions, the use of a single universal inspection mode does not always ensure a rational combination of accuracy, repeatability, productivity, and reliability of decision-making regarding the technical condition of the product.

The aim of the study is to develop a methodology for adapting an automated monitoring system, which makes it possible to adjust the parameters of the measurement cycle, threshold values, inspection modes, and algorithmic processing of measurement data to the structural and electrical features of a particular type of cable harness. The proposed methodology provides for the sequential formation of a reference connection structure based on the electrical connection table, determination of the set of controlled parameters, selection of inspection modes for conductor resistance, short-circuit resistance, and insulation resistance, establishment of permissible limits, selection of an algorithmic data processing profile, as well as initial verification, calibration, and periodic confirmation of system operability.

The paper substantiates the expediency of transition from a fixed control mode to configurable profiles focused on specific groups of cable and wire products. This approach makes it possible to use a single hardware configuration of the system for monitoring different types of products without changing its structure, ensure traceability of results, reduce the influence of the operator's subjective factor, and improve the stability of control under production conditions. The practical significance of the obtained results lies in the possibility of using the proposed methodology during the implementation, configuration, and operation of automated systems for monitoring cable and wire products.

Keywords: automated inspection system, interblock electrical connections, cable harness, cable and wire products, system configuration, algorithmic control profile, parametric inspection, measurement data.



ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Кабельно-провідникова продукція є важливою складовою сучасних електротехнічних, робототехнічних та інших технічних систем. Надійність функціонування таких систем значною мірою визначається якістю міжблокових електричних з'єднань, оскільки саме через них забезпечується передавання сигналів керування, живлення, вимірювальної інформації та службових електричних взаємодій між окремими функціональними блоками. Порушення цілісності провідників, наявність помилок комутації, погіршення ізоляційних властивостей або виникнення паразитних провідних зв'язків можуть призводити не лише до відмов окремих каналів, а й до некоректної роботи всієї технічної системи.

У виробничих і випробувальних умовах контроль міжблокових електричних з'єднань традиційно пов'язаний з перевіркою відповідності фактичної структури з'єднань заданій електричній схемі, а також з одночасним вимірюванням основних електричних параметрів. До таких параметрів належать опір жили, опір замикання між незалежними колами та опір ізоляції. Проте практична складність контролю полягає в тому, що кабельні джгути можуть істотно відрізнятися за призначенням, кількістю кіл, довжиною провідників, перерізом жил, наявністю екранів, типом з'єднань і допустимими межами електричних параметрів. Тому процедура контролю, яка є достатньою для одного типу виробу, не завжди може бути безпосередньо перенесена на інший тип кабельного джгута без зміни режимів вимірювання, порогових значень і логіки оброблення результатів.

Особливої актуальності ця проблема набуває для силових, сигнальних і комбінованих кабельних джгутів. Для силових з'єднань критичним є достовірне виявлення збільшення перехідного або контактного опору, оскільки навіть порівняно невелике відхилення може впливати на втрати напруги, нагрівання та довготривалу надійність виробу. Для сигнальних ліній більшого значення набувають стабільність ізоляції, відсутність паразитних зв'язків, вплив екранів і чутливість до слабких дефектних ознак. Комбіновані джгути поєднують силові, сигнальні, допоміжні та екрановані кола, що ускладнює використання єдиної універсальної процедури контролю для всіх ділянок виробу.

Ручні та частково автоматизовані способи контролю не завжди забезпечують необхідну продуктивність і повторюваність результатів, особливо за наявності багатоконтактних виробів і великої кількості контрольованих електричних кіл. За таких умов зростає вплив людського фактора, збільшується тривалість перевірки, ускладнюється документування результатів і знижується можливість простежування історії контролю конкретного виробу. Автоматизовані системи дають змогу зменшити ці обмеження, однак сама наявність апаратно-програмного комплексу ще не гарантує однаково ефективного контролю для різних типів кабельних джгутів.

У зв'язку з цим важливим науково-практичним завданням є не лише створення автоматизованої системи контролю, а й розроблення методики її налаштування під конкретний об'єкт перевірки. Така методика має визначати порядок формування еталонної структури з'єднань, вибір контрольованих параметрів, призначення режимів вимірювання, установлення допустимих меж, вибір способу оброблення вимірювальної інформації та правила формування висновку про технічний стан виробу. Без формалізованої процедури налаштування автоматизована система може працювати як набір окремих вимірювальних засобів, але не як цілісний інструмент стабільного виробничого контролю.

Наукова складова поставленого завдання полягає у необхідності формалізувати зв'язок між типом кабельного джгута, структурою його електричних кіл, контрольованими параметрами, вимірювальними режимами та алгоритмічним профілем оброблення даних. Практична складова полягає у забезпеченні можливості швидкого впровадження системи у виробничий процес, її адаптації до різних груп кабельно-провідникової продукції, зменшення часу підготовки до контролю, підвищення відтворюваності результатів і забезпечення накопичення даних для подальшого аналізу якості.

Отже, загальна проблема, що розглядається у статті, полягає у відсутності уніфікованого підходу до налаштування автоматизованої системи контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань з урахуванням конструктивних та електричних особливостей різних типів кабельних джгутів. Розв'язання цієї задачі є важливим для підвищення достовірності параметричного контролю, зменшення кількості помилкових рішень, забезпечення простежуваності результатів і підвищення ефективності виробничого контролю кабельно-провідникової продукції.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проблематика автоматизованого контролю кабельно-провідникової продукції розглядається в сучасних дослідженнях переважно з позиції підвищення продуктивності перевірки, зменшення впливу

людського фактора та забезпечення повторюваності контрольних операцій. У роботі [1] обґрунтовано доцільність автоматизації тестування кабельних джгутів і показано, що використання апаратно-програмних засобів контролю дає змогу скоротити тривалість перевірки та підвищити стабільність результатів. Разом з тим, основний акцент у таких роботах зроблено на загальній побудові тестових систем, організації апаратної частини та програмному керуванні процесом перевірки. Однак питання адаптації параметрів контролю до конкретного типу кабельного джгута, його електричної структури, складу кіл і допустимих меж параметрів у більшості випадків розглядаються недостатньо.

Нормативні документи [2–4] формують базу для опису кабельної продукції та встановлення вимог до окремих електричних параметрів. Зокрема, у [2] подано термінологічну основу для електричних кабелів, у [3] визначено вимоги до провідників ізолюваних кабелів, а у [4] розглянуто засоби й умови вимірювання опору ізоляції. Ці документи є необхідними для обґрунтування граничних значень контрольованих параметрів і вибору вимірювальних режимів. Проте вони не розв'язують прикладну задачу побудови контрольного циклу в автоматизованій системі, не визначають порядок переходу від таблиці електричних з'єднань до програми контролю і не враховують різницю між силовими, сигнальними та комбінованими кабельними джгутами.

Окрему групу джерел становлять праці та нормативні документи з метрологічного забезпечення вимірювань. Стандарт ISO/IEC 17025 [5] встановлює загальні вимоги до компетентності випробувальних і калібрувальних лабораторій, настанова JCGM 100 [6] визначає підходи до оцінювання невизначеності вимірювань, а рекомендації ILAC-G8 [7] розглядають правила прийняття рішень щодо відповідності з урахуванням невизначеності. Їх використання є важливим для забезпечення достовірності висновків про технічний стан виробу. Водночас ці документи мають загальний характер і не містять спеціалізованої процедури налаштування автоматизованої системи контролю міжблокових електричних з'єднань. Зокрема, у них не визначено, яким чином мають змінюватися порогові значення, режими вимірювання та правила прийняття рішення залежно від типу кабельного виробу.

Практичні особливості низькорівневих електричних вимірювань розглянуто у [8], де увагу приділено вимірюванню малих струмів, напруг і опорів, а також впливу шумів, контактних опорів, паразитних провідностей і нестабільності вимірювального тракту. Ці фактори є суттєвими для контролю кабельних джгутів, оскільки похибки контактних з'єднань, перехідні процеси, витоки через ізоляцію та нестабільність комутації можуть спотворювати результати вимірювання. Однак технічні рекомендації з низькорівневих вимірювань не дають завершеної відповіді на питання, як саме потрібно налаштовувати автоматизовану систему для різних груп кабельно-провідникової продукції та як поєднувати вимірювальні режими з алгоритмічним обробленням даних.

Значну увагу в науковій літературі приділено адаптивним алгоритмам оброблення сигналів і вимірювальних даних. У роботах [9, 10] розглянуто теоретичні основи адаптивної фільтрації, зокрема алгоритми LMS і RLS, які можуть застосовуватися для згладжування вимірювальних рядів і послідовного уточнення оцінок параметрів. У [11] запропоновано алгоритм Adam, який ефективно використовується в задачах оптимізації за наявності шумів і змінних умов оброблення даних. Класичні роботи [12, 13] присвячені методу Левенберга–Марквардта, що застосовується для розв'язання нелінійних задач найменших квадратів і параметричної ідентифікації. Проте зазначені алгоритми у своїй базовій постановці є універсальними математичними інструментами. Вони не визначають, який саме алгоритм доцільно використовувати для конкретного типу кабельного джгута, які параметри контролю повинні бути пріоритетними та як результати оброблення мають бути включені до загальної процедури прийняття рішення.

У попередніх роботах авторів [14, 15] розглянуто питання автоматизації контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань і побудови автоматизованої системи контролю якості кабельної продукції. У цих працях обґрунтовано актуальність автоматизованого контролю, визначено загальну структуру системи та показано можливість її застосування для перевірки кабельно-провідникових виробів. Разом з тим, зазначені дослідження переважно стосуються загальної концепції автоматизації та структурно-функціональної організації системи. Питання прикладного налаштування системи під конкретні типи кабельних джгутів, формування налаштовуваних профілів контролю, вибору режимів вимірювання і порогових значень у них не було предметом окремого розгляду.

Отже, аналіз останніх досліджень показує, що наявні праці та нормативні джерела створюють достатню основу для автоматизації контролю кабельних джгутів, метрологічного забезпечення вимірювань, вибору електричних параметрів і застосування адаптивних алгоритмів оброблення даних. Водночас між цими складовими залишається методичний розрив. З одного боку, відомі апаратно-програмні системи дають змогу автоматизувати процес перевірки, а з іншого — відсутній формалізований порядок їх налаштування для різних типів кабельних джгутів із різною структурою кіл, різними контрольованими параметрами та різними вимогами до точності, швидкодії й достовірності результатів.

ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою досліджень, представлених в даній статті, є розроблення методики адаптації автоматизованої системи контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань для різних типів кабельних джгутів, яка

забезпечує узгодження структури контрольного циклу, вимірювальних режимів, порогових значень і алгоритмічного оброблення вимірювальної інформації з конструктивними та електричними особливостями конкретного об'єкта контролю.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

визначити основні відмінності силових, сигнальних і комбінованих кабельних джгутів, які впливають на вибір режимів контролю та параметрів налаштування автоматизованої системи;

сформувані послідовність підготовки системи до контролю конкретного виробу на основі еталонної таблиці електричних з'єднань, складу контрольованих кіл і допустимих меж електричних параметрів;

обґрунтувати порядок вибору режимів вимірювання для контролю опору жили, опору замикання між незалежними колами та опору ізоляції залежно від типу кабельного джгута;

запропонувати підхід до формування налаштованого алгоритмічного профілю, який поєднує перелік контрольованих параметрів, порогові значення, особливості оброблення вимірювальних даних і правила прийняття рішення щодо технічного стану виробу;

визначити послідовність первинного налаштування, калібрування та періодичної перевірки автоматизованої системи з метою підтримання стабільності її роботи в умовах виробничого застосування;

показати практичну доцільність використання запропонованої методики для адаптації однієї апаратно-програмної конфігурації системи до контролю різних груп кабельно-провідникової продукції.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Налаштування автоматизованої системи контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань доцільно розглядати як окрему інженерно-методичну процедуру, що передуює виконанню серійного контролю кабельно-провідникової продукції. Її призначення полягає не лише у введенні початкових даних про виріб, а й у встановленні узгодженого зв'язку між конструкцією кабельного джгута, таблицею електричних з'єднань, складом контрольованих параметрів, режимами вимірювання, допустимими межами, алгоритмом оброблення вимірювальної інформації та правилом прийняття рішення щодо технічного стану виробу.

У межах цієї роботи під налаштуванням автоматизованої системи контролю розуміється формування такого контрольного профілю, за якого одна апаратно-програмна конфігурація може бути використана для різних типів кабельних джгутів без зміни структурної побудови системи. Відмінність полягає у складі контрольованих кіл, параметрах тестових режимів, межах прийнятності, способі попереднього оброблення вимірювань і критеріях формування підсумкового висновку.

Основою для побудови контрольного профілю є таблиця електричних з'єднань, яка задає еталонну топологію виробу. На її основі визначаються дозволені електричні зв'язки між контактами, незалежні кола, заборонені міжконтактні провідні зв'язки, екрани, корпусні переходи та спеціальні контрольні точки. Отже, таблиця електричних з'єднань виконує не тільки функцію вихідного конструкторського документа, а й функцію формального опису об'єкта контролю для програмного забезпечення автоматизованої системи.

Узагальнену послідовність адаптації автоматизованої системи контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань наведено на рис. 1.

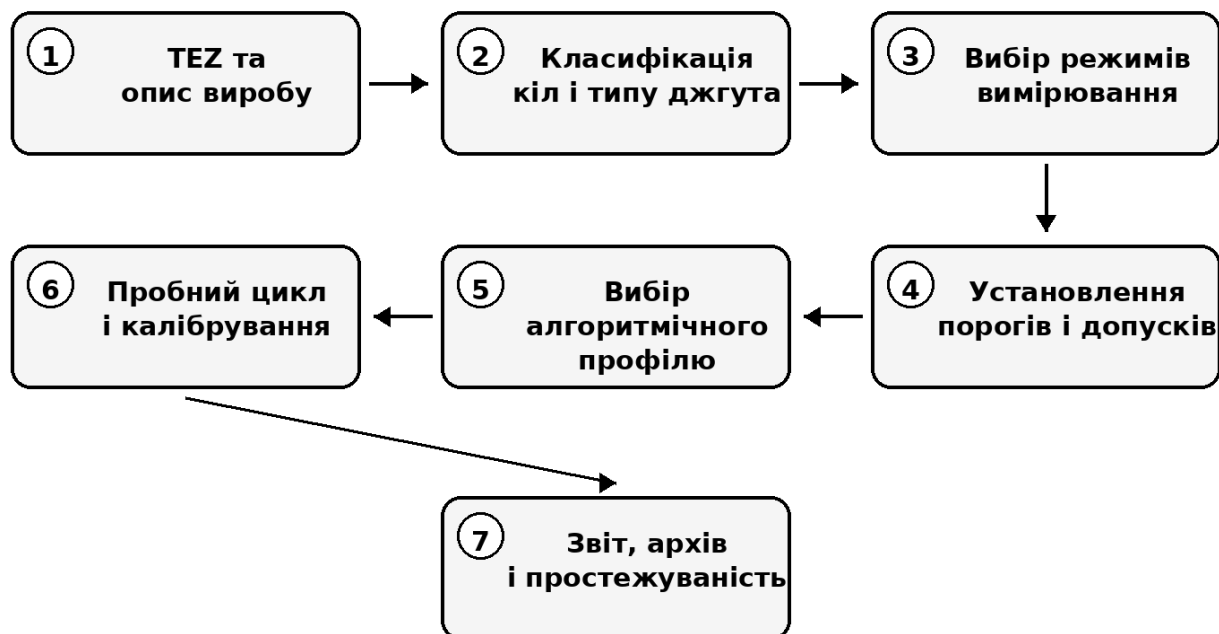


Рис. 1. Узагальнена послідовність адаптації автоматизованої системи контролю

Послідовність, наведена на рис. 1, передбачає перехід від опису виробу до перевіреної конфігурації контролю. Спочатку формується або імпортується еталонна таблиця електричних з'єднань, після чого виконується класифікація виробу за типом джгута та призначенням кіл. Далі для кожної групи кіл призначаються режими вимірювання, порогові значення, допустимі межі та алгоритмічний профіль оброблення даних. Завершальним етапом є пробний цикл контролю, за результатами якого підтверджується працездатність конфігурації або виконується її коригування.

Першим етапом налаштування є формування набору вихідних даних про кабельний джгут. До нього належать кількість контактів і кіл, типи провідників, довжини та перерізи жил, наявність екранів, корпусних переходів, технологічних перемичок, допустимі значення опорів і спеціальні умови контролю. На цьому етапі важливо не обмежуватися лише перевіркою наявності електричного контакту, оскільки для сучасної кабельно-провідникової продукції критичними можуть бути також збільшення контактного опору, зниження опору ізоляції, нестабільність екранних переходів і поява паразитних провідних шляхів.

Для цілей налаштування доцільно виділяти три узагальнені типи кабельних джгутів: силові, сигнальні та комбіновані. Силові джгути характеризуються низькоомними колами живлення та підвищеною чутливістю до зростання перехідного опору. Сигнальні джгути містять низькоструміві та часто екрановані лінії, для яких важливими є ізоляційний стан, відсутність паразитних зв'язків і стабільність слабких сигналів. Комбіновані джгути поєднують силові, сигнальні, допоміжні та екранні кола, тому потребують диференційованого призначення режимів контролю для окремих груп провідників.

Основні відмінності силових, сигнальних і комбінованих кабельних джгутів, які впливають на налаштування автоматизованої системи, узагальнено у таблиці 1. Звідки видно, що тип кабельного джгута безпосередньо визначає не тільки склад контрольованих параметрів, а й характер допустимих рішень. Для силових кіл навіть незначне збільшення опору може мати експлуатаційні наслідки, тоді як для сигнальних кіл більш небезпечними є витoki, паразитні зв'язки та погіршення ізоляційного стану. Для комбінованих виробів універсальна процедура контролю є найменш ефективною, оскільки різні ділянки одного виробу мають контролюватися за різними критеріями.

Таблиця 1.

Вплив типу кабельного джгута на параметри налаштування системи

Тип джгута	Основні особливості	Критичні дефекти	Пріоритетні параметри контролю	Переважаюча логіка налаштування
Силовий	Низькоомні кола живлення, значний вплив контактного та перехідного опору	Обрив, зростання опору жили, міжколове замикання	Опір жили, опір замикання, опір корпусних переходів	Жорсткі межі для опору провідного шляху; підвищена увага до повторюваності вимірювань
Сигнальний	Низькоструміві кола, екрановані ділянки, чутливість до паразитних зв'язків	Витік, погіршення ізоляції, помилкова комутація, нестабільність екрана	Опір ізоляції, опір замикання, цілісність екранів	Підвищений пріоритет ізоляційних вимірювань і контролю заборонених зв'язків
Комбінований	Поєднання силових, сигнальних, допоміжних і екранованих кіл	Комбіновані дефекти, локальне погіршення ізоляції, змішаний вплив опорів	Опір жили, опір ізоляції, опір замикання, екранні переходи	Поділ виробу на функціональні групи з окремими режимами та порогоми контролю

Для забезпечення повторюваності налаштування доцільно описувати конфігурацію контролю у вигляді контрольного профілю. Контрольний профіль є сукупністю даних, які визначають, які саме електричні кола перевіряються, у якому режимі виконується вимірювання, які межі вважаються допустимими, який алгоритм застосовується до вимірювальних даних і за яким правилом формується висновок про стан виробу.

Узагальнено контрольний профіль виробу доцільно подати формулою (1):

$$P = \{T, C, M, L, A, D, V\} \quad (1)$$

де P - контрольний профіль виробу; T - еталонна таблиця електричних з'єднань; C - класифікація кіл за функціональним призначенням; M - множина режимів вимірювання; L - допустимі межі та порогові значення; A - алгоритм або комбінація алгоритмів оброблення даних; D - правило прийняття рішення; V - дані первинної перевірки, калібрування та підтвердження працездатності системи.

Зміст основних елементів контрольного профілю наведено у таблиці 2.

Форма подання профілю, наведена у табл. 2, дає змогу відокремити фізичну структуру виробу від процедурних параметрів контролю. Це важливо для практичного впровадження, оскільки зміна типу джгута не повинна вимагати перепроєктування системи. Достатньо створити новий профіль або модифікувати наявний профіль з урахуванням іншої таблиці з'єднань, іншого складу контрольованих кіл і нових допустимих меж.

Таблиця 2.

Структура контрольного профілю автоматизованої системи

Елемент профілю	Зміст	Джерело формування	Призначення
<i>T</i>	Список дозволених з'єднань, заборонених зв'язків, екранів і корпусних переходів	ТЕЗ, електрична схема, конструкторська документація	Формування еталонної топології виробу
<i>C</i>	Поділ кіл на силові, сигнальні, допоміжні, екранні та спеціальні	Аналіз призначення провідників і роз'ємів	Вибір режимів і пріоритетів контролю
<i>M</i>	Режими "27 В - опір жили", "27 В - опір замикавання", "100 В - опір ізоляції"	Технічні можливості системи та вимоги до виробу	Забезпечення параметричного контролю
<i>L</i>	Граничні значення, допуски, контрольні зони, критерії бракування	Нормативні вимоги, технічні умови, еталонні вимірювання	Формування правил придатності
<i>A</i>	Попереднє згладжування, рекурсивне оцінювання, оптимізаційне уточнення або нелінійна ідентифікація	Тип джгута, шумовий стан, пріоритет точності чи швидкодії	Підвищення стабільності та достовірності результату
<i>D</i>	Логічні умови "придатний", "непридатний", "потребує повторної перевірки"	Порогові межі та невизначеність вимірювання	Автоматизоване формування висновку

Після формування еталонної структури виробу виконується призначення режимів вимірювання. У межах автоматизованого контролю доцільно використовувати три базові режими: вимірювання опору жили, перевірку опору замикавання між незалежними колами та вимірювання опору ізоляції. Ці режими не є взаємозамінними, оскільки кожен з них відповідає окремому фізичному прояву дефекту.

Опір жили характеризує стан провідного шляху між заданими контактами. Його збільшення може бути наслідком погіршення контакту, пошкодження провідника, неякісного паяння або обтиску. Опір замикавання між незалежними колами дає змогу виявити небажаний провідний зв'язок, який може виникнути через монтажну помилку, пошкодження ізоляції або сторонній провідний елемент. Опір ізоляції відображає стан діелектричного середовища між жилами, екранами, корпусом або іншими незалежними елементами виробу.

Базові співвідношення для оцінювання контрольованих параметрів у відповідних режимах наведено у формулах (2)-(4):

$$R_{ж,i} = \frac{\bar{U}_i}{I_i}; \quad (2)$$

$$R_{з,ij} = \frac{U_t}{I_{ij}}; \quad (3)$$

$$R_{із,i} = \frac{U_{випр}}{\bar{I}_{вит,i}}, \quad (4)$$

де $R_{ж,i}$ - оцінка опору i -ї жили, Ом; $\bar{U}_i$ - усереднене значення виміряної напруги, В; I_i - стабілізований тестовий струм, А; $R_{з,ij}$ - оцінка опору небажаного провідного зв'язку між i -м та j -м колами, Ом; U_t - тестова напруга, В; I_{ij} - усереднений струм між незалежними колами, А; $R_{із,i}$ - опір ізоляції, Ом; $U_{випр}$ - випробувальна напруга, В; $\bar{I}_{вит,i}$ - усереднений струм витоку, А.

У процесі налаштування системи для кожного контрольованого кола призначається не тільки режим вимірювання, а й спосіб статистичного представлення результату. Для стабільних низькоомних кіл достатнім може бути усереднення короткої серії вимірювань з подальшим адаптивним уточненням. Для ізоляційних вимірювань, де можливі перехідні процеси та повільне встановлення струму витоку, доцільно передбачати часову витримку або модельне оцінювання усталеного значення.

Рекомендоване призначення режимів контролю для силових, сигнальних і комбінованих джгутів наведено у таблиці 3.

Алгоритмічний профіль визначає, як саме система перетворює послідовність вимірювань у кінцеву оцінку контрольованого параметра. На відміну від простого порогового підходу, у якому рішення приймається за одиничним або усередненим вимірюванням, профільне налаштування дає змогу враховувати шум вимірювального тракту, нестабільність контактів, перехідні процеси та різну інформативність окремих відліків.

Для силових джгутів доцільним є використання алгоритмів, що забезпечують високу повторюваність оцінки низькоомного параметра та здатність виявляти невелике збільшення опору. Для сигнальних і комбінованих виробів важливішою стає здатність алгоритму працювати з неоднорідними даними, слабкими дефектними ознаками та нелінійними проявами ізоляційних процесів. Тому вибір алгоритму не повинен здійснюватися незалежно від типу виробу та мети контролю.

Таблиця 3.

Рекомендоване призначення режимів контролю для різних типів кабельних джгутів

Тип виробу	Опір жили	Опір замикання	Опір ізоляції	Особливість профілю
Силовий джгут	Обов'язковий для всіх силових гілок; підвищена увага до приросту опору	Обов'язковий між незалежними силовими та службовими колами	Контрольний, з урахуванням вимог до безпеки та ізоляції	Пріоритет повторюваності та виявлення малих змін низькоомного параметра
Сигнальний джгут	Для критичних сигнальних ліній і екранних переходів	Обов'язковий для незалежних ліній і екранованих ділянок	Основний режим для оцінювання стану ізоляції та паразитних витоків	Пріоритет чутливості до слабких дефектних ознак
Комбінований джгут	Окремо для силових і сигнальних груп із різними межами	За матрицею заборонених зв'язків між групами кіл	Для сигнальних, екранних і змішаних ділянок	Поділ на функціональні групи з різними алгоритмічними налаштуваннями

У практичному налаштуванні системи доцільно застосовувати принцип домінувального критерію. Якщо для виробу критичною є швидкість циклу, алгоритмічний профіль може бути зорієнтований на мінімізацію часу оброблення за збереження допустимої точності. Якщо пріоритетом є достовірність виявлення слабких дефектів, перевагу слід надавати профілям з глибшим уточненням оцінок і вищою стійкістю до шумів.

Інтегральну оцінку придатності алгоритмічного профілю доцільно задавати за формулою (5):

$$E = w_1 \cdot K_{\text{точн}} + w_2 \cdot K_{\text{повт}} + w_3 \cdot K_{\text{шв}} + w_4 \cdot K_{\text{деф}} + w_5 \cdot K_{\text{ст}} \quad (5)$$

де E - інтегральна оцінка придатності алгоритмічного профілю; $K_{\text{точн}}$ - нормований показник точності; $K_{\text{повт}}$ - показник повторюваності; $K_{\text{шв}}$ - показник швидкодії; $K_{\text{деф}}$ - показник якості виявлення дефектів; $K_{\text{ст}}$ - показник стабільності; $w_1, \dots, w_5$ - вагові коефіцієнти, які задаються відповідно до призначення виробу та умов контролю. Для забезпечення коректності інтегральної оцінки вагові коефіцієнти приймаються у межах $0 \leq w_i \leq 1$.

Узагальнені рекомендації щодо вибору алгоритмічного профілю подано у таблиці 4.

Таблиця 4.

Узагальнені рекомендації щодо вибору алгоритмічного профілю

Тип джгута	Рекомендований профіль	Рациональна альтернатива	Умови вибору
Силовий	RLS-профіль з акцентом на повторюваність низькоомних вимірювань	LM-профіль за пріоритету мінімальної похибки	Контроль силових гілок, контактних переходів і малих приростів опору
Сигнальний	LM-профіль з поглибленим уточненням оцінки	Adam-профіль за потреби скорочення часу циклу	Виявлення слабких дефектних ознак, витоків і нестабільності ізоляції
Комбінований	Диференційований LM-профіль для неоднорідних кіл	Adam-профіль для прискореного контролю	Поєднання силових, сигнальних, допоміжних та екранованих кіл у межах одного виробу

Рекомендації, наведені у таблиці 4, не слід розглядати як жорстку заміну експериментальної перевірки. Їх призначення полягає у формуванні початкової конфігурації системи, яка надалі уточнюється під час пробного циклу контролю. У виробничих умовах це дає можливість скоротити кількість ітерацій налаштування та уникнути випадкового вибору алгоритму без урахування фізичної природи контрольованих параметрів.

Після отримання оцінки контрольованого параметра система повинна сформулювати висновок про технічний стан виробу. Найпростіший підхід передбачає пряме порівняння вимірюваного значення з допустимою межею. Однак для автоматизованого контролю такий підхід є недостатнім, оскільки не враховує невизначеність вимірювання, повторюваність результатів, можливий дрейф контакту та наближення параметра до граничної зони.

Тому під час налаштування профілю доцільно встановлювати не тільки одну межу бракування, а й контрольну зону поблизу порога. У цій зоні рішення може формуватися після повторного вимірювання, збільшення тривалості серії або застосування більш стійкого алгоритмічного профілю. Такий підхід особливо важливий для опору ізоляції та слабких паразитних зв'язків, де одиничне вимірювання може бути недостатньо репрезентативним.

У загальному вигляді правило прийняття рішення для параметра, який не повинен перевищувати верхню допустиму межу, можна подати формулою (6):

$$D = \left\{ \begin{array}{l} \text{придатний, якщо } \hat{R} + U_c \leq L \\ \text{повторити, якщо } \hat{R} + U_c > L \text{ та } \hat{R} \leq L \\ \text{непридатний, якщо } \hat{R} > L \end{array} \right\} \quad (6)$$

де D - рішення системи; $\hat{R}$ - оцінене значення параметра; U_c - складова невизначеності або контрольний запас; L - допустима межа. Для параметрів, які повинні бути не нижчими за встановлену межу, зокрема для опору ізоляції, нерівності застосовуються у зворотному напрямі.

Введення контрольної зони дозволяє зменшити кількість помилкових рішень у ситуаціях, коли виміряне значення перебуває близько до допустимої межі. При цьому система не повинна автоматично визнавати виріб придатним або непридатним лише за одним відліком. Доцільнішим є повторення вимірювання, аналіз стабільності серії та застосування уточненого алгоритмічного профілю.

Створення контрольного профілю не завершується введенням таблиці з'єднань і порогових значень. Перед серійним застосуванням профіль має пройти первинну перевірку. Вона передбачає контроль правильності адресації каналів, перевірку комутаційних маршрутів, тестування вимірювальних режимів на еталонних навантаженнях і зіставлення результатів із контрольними значеннями. Така перевірка дозволяє відокремити помилки налаштування профілю від реальних дефектів виробу.

Доцільно виділяти чотири рівні підтвердження працездатності профілю: програмно-логічний, комутаційний, метрологічний і виробничий. Програмно-логічний рівень передбачає перевірку коректності таблиці з'єднань і відсутності суперечностей у конфігурації. Комутаційний рівень підтверджує відповідність адрес каналів фізичним контактам. Метрологічний рівень пов'язаний із перевіркою вимірювальних режимів на еталонних навантаженнях. Виробничий рівень підтверджує придатність профілю на контрольному зразку кабельного джгута.

Етапи впровадження та подальшого супроводження контрольного профілю наведено у таблиці 5.

Таблиця 5.

Етапи впровадження та супроводження контрольного профілю

Етап	Зміст робіт	Результат	Критерій завершення
Підготовка	Імпорт TEZ, опис контактів, класифікація кіл, вибір типу джгута	Чернетка контрольного профілю	Відсутність логічних суперечностей у структурі з'єднань
Первинна перевірка	Перевірка адресації каналів, комутації, еталонних опорів і режимів напруги	Підтверджена апаратна відповідність	Результати в межах контрольних допусків
Пробний контроль	Виконання циклу на справному зразку та зразках із контрольованими дефектами	Уточнений профіль контролю	Правильне розпізнавання справного та дефектного станів
Експлуатація	Серійний контроль, архівування результатів, формування звітів	Виробниче застосування профілю	Стабільність результатів і простежуваність даних
Супроводження	Періодична перевірка, аналіз відхилень, коригування порогів і алгоритму	Актуалізований профіль	Підтвердження придатності після зміни виробу або умов контролю

Особливу увагу слід приділяти збереженню результатів контролю. Для кожного циклу доцільно фіксувати ідентифікатор виробу, версію контрольного профілю, дату перевірки, оператора, режими вимірювання, отримані значення параметрів, результат алгоритмічного оброблення та сформований висновок. Це забезпечує простежуваність і створює основу для подальшого аналізу стабільності технологічного процесу.

Запропонована методика дозволяє використовувати автоматизовану систему контролю як гнучкий інструмент для різних груп кабельно-провідникової продукції. Її перевага полягає у тому, що адаптація до нового виробу виконується на рівні контрольного профілю, а не шляхом зміни апаратної структури системи. Це скорочує час підготовки до контролю, зменшує ризик помилок оператора та забезпечує однакову логіку документування результатів.

Для виробничого застосування суттєвим є також те, що методика поєднує технічні, метрологічні та інформаційні складові контролю. Технічна складова визначає режими вимірювання і комутації. Метрологічна складова задає межі, контрольні зони та правила поводження з результатами поблизу порогів. Інформаційна складова забезпечує збереження версій профілів, результатів вимірювань і висновків. У сукупності це дає змогу перейти від окремих вимірювальних операцій до відтворюваної процедури контролю, придатної для серійного використання.

Таким чином, налаштовуваний контрольний профіль є ключовим елементом практичного впровадження автоматизованої системи. Він забезпечує зв'язок між конструкторською документацією, вимірювальними режимами, алгоритмами оброблення даних і кінцевим рішенням щодо придатності виробу. Саме наявність такого формалізованого профілю дозволяє зменшити залежність результату від суб'єктивних дій оператора та підвищити стабільність контролю в умовах змінної номенклатури кабельних джгутів.

Для ілюстрації практичної логіки налаштування розглянемо умовну ситуацію підготовки системи до контролю комбінованого кабельного джгута, у складі якого наявні силові лінії живлення, сигнальні кола керування, екрановані ділянки та корпусні переходи. У такому випадку профіль не повинен формуватися як єдина таблиця однакових перевірок для всіх контактів. Рациональнішим є поділ виробу на функціональні групи, кожна з яких отримує власні допустимі межі, режим вимірювання і правило інтерпретації результату.

На першому етапі з таблиці електричних з'єднань виділяють усі дозволені провідні зв'язки та всі пари контактів, між якими провідний зв'язок має бути відсутнім. Далі силові кола включаються до групи контролю опору жили та перевірки небажаних міжколових замикань. Сигнальні та екрановані кола додатково включаються до групи контролю опору ізоляції. Для корпусних переходів формується окреме правило, оскільки їх низький опір може бути нормальною ознакою, а не дефектом.

Після цього задається алгоритмічний профіль. Для силових ділянок може бути обрано профіль з пріоритетом повторюваності низькоомних вимірювань, а для сигнальних і ізоляційних ділянок - профіль з підвищеною чутливістю до нестабільних або слабо виражених дефектних ознак. Якщо виробнича задача вимагає скорочення часу циклу, для частини некритичних перевірок може бути використано прискорений режим оброблення, тоді як для критичних кіл зберігається поглиблене оцінювання.

Приклад формування контрольної конфігурації для комбінованого джгута подано у таблиці 6.

Таблиця 6.

Приклад формування контрольної конфігурації для комбінованого джгута

Група кіл	Режим контролю	Основний параметр	Тип рішення	Особливість налаштування
Силові лінії	27 В - опір жили	Опір провідного шляху	Порівняння з верхньою межею	Контроль малих приростів опору та повторюваності серії
Незалежні силові та сигнальні кола	27 В - опір замикання	Опір небажаного провідного зв'язку	Виявлення забороненого контакту	Формування матриці пар контактів, між якими зв'язок заборонений
Сигнальні та екрановані лінії	100 В - опір ізоляції	Опір ізоляції або струм витoku	Порівняння з нижньою межею	Використання часової витримки або уточнення усталеного значення
Корпусні та екранні переходи	27 В - спеціальна перевірка переходу	Опір переходу екран-корпус	Окреме правило придатності	Відокремлення штатного низького опору від дефектного замикання

Приклад, наведений у таблиці 6, показує, що запропонована методика не зводиться до механічного вибору одного алгоритму або одного вимірювального режиму. Її зміст полягає у поєднанні технічної структури виробу з параметрами вимірювання, алгоритмічним обробленням і правилами прийняття рішення. Завдяки цьому система може працювати з різними виробами в єдиній логіці, але без втрати специфіки конкретного типу кабельного джгута.

Окремим елементом методики є інформаційне забезпечення налаштування. У виробничому застосуванні недостатньо лише виконати контроль і отримати висновок про придатність виробу. Необхідно також зберегти, за яким саме профілем виконувалася перевірка, яка версія таблиці електричних з'єднань використовувалася, які допустимі межі були встановлені, який алгоритмічний профіль застосовано і чи проходила система попередню перевірку перед запуском серійного циклу.

Можливість вибору версії контрольної профілю має особливе значення у випадках, коли конструкція кабельного джгута змінюється, уточнюються технологічні допуски або коригуються правила бракування. Якщо такі зміни не фіксувати, результати різних партій виробів можуть виявитися формально порівнюваними, але фактично отриманими за різними умовами контролю. Тому кожен профіль доцільно супроводжувати ідентифікатором версії, датою введення, підставою зміни та відповідальним виконавцем.

Для забезпечення простежуваності доцільно формувати електронний журнал контролю, у якому кожний запис пов'язує конкретний виріб, контрольний профіль, результати вимірювань і сформоване рішення. Такий журнал може використовуватися не лише для підтвердження якості окремого виробу, а й для аналізу повторюваних відхилень, оцінювання стабільності технологічного процесу та виявлення тенденцій погіршення стану контактних або ізоляційних елементів.

Перелік основних даних, які доцільно зберігати для забезпечення простежуваності контролю, наведено у таблиці 7.

Таким чином, інформаційне забезпечення що входить до складу методики адаптації, забезпечує відтворюваність контрольних процедур, можливість порівняння результатів у часі та підтвердження того, що висновок про технічний стан виробу сформовано за актуальними і перевіреними параметрами контролю.

Узагальнено запропонована методика адаптації може бути подана як послідовність дій, що починається з формалізації об'єкта контролю і завершується введенням підтвердженого профілю у виробничу експлуатацію. Її ключовою особливістю є орієнтація не на універсальний режим контролю для всіх виробів, а на профільне налаштування, у межах якого враховуються тип джгута, функціональне призначення кіл, вимірювальні режими, допустимі межі, алгоритмічна обробка і правила прийняття рішення.

Таблиця 7.

Дані, які доцільно зберігати для забезпечення простежуваності контролю

Група даних	Приклад змісту	Призначення
Дані виробу	Позначення джгута, серійний номер, партія, кількість контактів, тип виробу	Ідентифікація об'єкта контролю
Дані профілю	Версія TEZ, допустимі межі, режими вимірювання, алгоритмічний профіль	Підтвердження умов, за яких виконано контроль
Дані циклу	Дата, оператор, номер тестера, результати вимірювань, службові повідомлення	Відновлення повної історії перевірки
Дані рішення	Статус виробу, причина бракування, контрольна зона, рекомендація повторної перевірки	Документування висновку щодо придатності

Методика є придатною для застосування на етапах підготовки нового виробу до контролю, модернізації існуючої контрольної програми, аналізу причин нестабільності результатів і перенесення системи на іншу номенклатуру кабельно-провідникової продукції. При цьому апаратна частина системи зберігається незмінною, а адаптація виконується через зміну опису контрольного профілю та підтвердження його придатності.

Отже, запропонований підхід до адаптації автоматизованої системи контролю дозволяє поєднати вимоги автоматизації, метрологічної достовірності та виробничої гнучкості. Це створює основу для подальшого розвитку програмних засобів автоматизованого формування профілів контролю на основі електричних схем, таблиць з'єднань і накопичених результатів випробувань.

**ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ
І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ**

У статті розв'язана задача розроблення методики адаптації автоматизованої системи контролю параметрів міжблокових електричних з'єднань для різних типів кабельних джгутів. Показано, що ефективність контролю визначається не лише апаратно-програмною структурою системи, а й правильним вибором вимірювальних режимів, допустимих меж, складу контрольованих параметрів і способів оброблення вимірювальної інформації.

Обґрунтовано, що використання єдиного універсального режиму контролю для силових, сигнальних і комбінованих джгутів є недостатньо ефективним через відмінності у структурі кіл, рівнях опору, вимогах до ізоляції, наявності екранованих ліній і характері можливих дефектів. Це зумовлює необхідність формування окремих налаштовуваних профілів контролю.

Запропоновано методику адаптації автоматизованої системи, яка передбачає формування еталонної таблиці електричних з'єднань, визначення контрольованих параметрів, вибір режимів перевірки опору жили, опору замикання та опору ізоляції, установлення допустимих меж, вибір алгоритмічного профілю оброблення даних і формування правил прийняття рішення щодо технічного стану виробу.

Практичне значення запропонованої методики полягає у можливості адаптації однієї апаратно-програмної конфігурації системи до контролю різних типів кабельно-провідникової продукції без зміни її загальної структури. Це підвищує гнучкість використання системи, скорочує час підготовки до контролю нових виробів, зменшує вплив суб'єктивного фактора та забезпечує простежуваність результатів перевірки.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення бази налаштовуваних профілів, уточнення правил вибору алгоритмічного оброблення даних залежно від типу дефекту та автоматизацію формування конфігурації контролю на основі електричної схеми виробу.

Література

1. Bi Z., Pomalaza-Ráez C., Hershberger D., Dawson J., Lehman A., Yurek J., Ball J. Automation of Electrical Cable Harnesses Testing. *Robotics*. 2018. Vol. 7, No. 1. Article 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics7010001>
2. IEC 60050-461:2008. International Electrotechnical Vocabulary — Part 461: Electric cables. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2008.
3. IEC 60228:2023. Conductors of insulated cables. 4th ed. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2023.
4. IEC 61557-2:2019. Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V AC and 1 500 V DC — Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures — Part 2: Insulation resistance. 3rd ed. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2019.
5. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Geneva : International Organization for Standardization, 2017.
6. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. Joint Committee for Guides in Metrology, 2008. DOI: <https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E>
7. ILAC-G8:09/2019. Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity. Silverwater : International Laboratory Accreditation Cooperation, 2019.

8. Keithley Instruments. Low Level Measurements Handbook: Precision DC Current, Voltage, and Resistance Measurements. 7th ed. Cleveland : Keithley Instruments, 2014.
9. Sayed A. H. Fundamentals of Adaptive Filtering. Hoboken : Wiley-IEEE Press, 2003. 1168 p.
10. Haykin S. Adaptive Filter Theory. 4th ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002.
11. Kingma D. P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization. arXiv preprint. 2014. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>
12. Levenberg K. A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares. Quarterly of Applied Mathematics. 1944. Vol. 2, No. 2. P. 164–168. DOI: <https://doi.org/10.1090/qam/10666>
13. Marquardt D. W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. 1963. Vol. 11, No. 2. P. 431–441. DOI: <https://doi.org/10.1137/0111030>
14. Буковський О. М., Вислоух С. П. Automation of the Process of Monitoring the Parameters of Interblock Electrical Connections. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2024. № 331(1). С. 325–329. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-49>
15. Буковський О. М., Вислоух С. П. Automated Quality Control System for Cable Products. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 2025. № 5(1). С. 74–88. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.5.1.9>

References

1. Bi Z., Pomalaza-Ráez C., Hershberger D., Dawson J., Lehman A., Yurek J., Ball J. Automation of Electrical Cable Harnesses Testing. Robotics. 2018. Vol. 7, No. 1. Article 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics7010001>
2. IEC 60050-461:2008. International Electrotechnical Vocabulary — Part 461: Electric Cables. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2008.
3. IEC 60228:2023. Conductors of Insulated Cables. 4th ed. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2023.
4. IEC 61557-2:2019. Electrical Safety in Low Voltage Distribution Systems up to 1 000 V AC and 1 500 V DC — Equipment for Testing, Measuring or Monitoring of Protective Measures — Part 2: Insulation Resistance. 3rd ed. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2019.
5. ISO/IEC 17025:2017. General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.
6. JCGM 100:2008. Evaluation of Measurement Data — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Joint Committee for Guides in Metrology, 2008. DOI: <https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E>
7. ILAC-G8:09/2019. Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity. Silverwater: International Laboratory Accreditation Cooperation, 2019.
8. Keithley Instruments. Low Level Measurements Handbook: Precision DC Current, Voltage, and Resistance Measurements. 7th ed. Cleveland: Keithley Instruments, 2014.
9. Sayed A. H. Fundamentals of Adaptive Filtering. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2003.
10. Haykin S. Adaptive Filter Theory. 4th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.
11. Kingma D. P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization. arXiv preprint. 2014. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>
12. Levenberg K. A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares. Quarterly of Applied Mathematics. 1944. Vol. 2, No. 2. P. 164–168. DOI: <https://doi.org/10.1090/qam/10666>
13. Marquardt D. W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. 1963. Vol. 11, No. 2. P. 431–441. DOI: <https://doi.org/10.1137/0111030>
14. Bukovskiy O. M., Vysloukh S. P. Automation of the Process of Monitoring the Parameters of Interblock Electrical Connections. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2024. No. 331(1). P. 325–329. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-49>
15. Bukovskiy O. M., Vysloukh S. P. Automated Quality Control System for Cable Products. Tavriiskiy Scientific Herald. Series: Technical Sciences. 2025. No. 5(1). P. 74–88. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.5.1.9>