

DOI: 10.46972/2076-1546.2026.30.12

УДК 004.4:003.26:681.326.3

І. А. Омельчук

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0003-4674-0058>

І. А. Пількевич, д-р техн. наук, проф.

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0001-5064-3272>

Ю. О. Подчашинський, д-р техн. наук, проф.

Державний університет «Житомирська політехніка»

<http://orcid.org/0000-0002-8344-6061>

В. І. Згуря, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.

Національне агентство з акредитації України

<http://orcid.org/0009-0008-5525-7037>

МЕТОД ПЕРЕВІРЯННЯ ЕТАЛОНІВ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ СИСТЕМ

Тривале ведення збройної боротьби Україною проти агресора, а також накопичений міжнародний досвід застосування безпілотних систем у сучасних військових конфліктах стали важливим фактором, який зумовив створення окремого роду військ у складі Збройних Сил України.

У сучасних умовах значущість безпілотних систем у структурі озброєння постійно зростає. Це, у свою чергу, формує потребу в збільшенні обсягів проектування, досліджень зразків прототипів та серійного виробництва новітніх безпілотних комплексів різного призначення. Функціонування таких систем ґрунтується на складних технологічних процесах і включає значну кількість взаємопов'язаних елементів, вузлів та підсистем. Крім того, кожен зразок безпілотної техніки характеризується набором численних параметрів і технічних показників. У зв'язку із цим виникає необхідність проведення комплексних досліджень для підтвердження обґрунтованості прийнятих технічних рішень у нових розробках, а також для ефективного впровадження вже наявних наукових розробок у процесі створення та виробництва безпілотних систем.

Оскільки саме результати випробувань є ключовим джерелом інформації для оцінювання відповідності продукції встановленим вимогам, особливого значення набуває достовірність отриманих даних під час їх проведення. Надійність цих результатів значною мірою залежить від правильності застосованих методів дослідження та рівня компетентності лабораторій, які проводять відповідні вимірювання.

На сучасному етапі одним із загальновизнаних механізмів підтвердження якості та достовірності результатів випробувань є акредитація лабораторій відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO / IEC 17025:2019, який встановлює критерії оцінювання

© І. А. Омельчук, І. А. Пількевич, Ю. О. Подчашинський, В. І. Згуря, 2026

компетентності випробувальних і калібрувальних лабораторій, зокрема щодо забезпечення точності вимірювань та стану їх еталонної бази. Кожне випробування проводиться з використанням засобів вимірювальної техніки – еталонів, що дозволяють виміряти або відтворити відповідні фізичні величини, які характеризують параметри досліджуваних зразків озброєння. Відповідно, кожен із таких засобів вимірювальної техніки повинен мати достатню точність для об'єктивності випробувань. У контексті впровадження стандартів НАТО у сфері випробувань зразків озброєння застосування результатів вимірювань, отриманих в акредитованих лабораторіях, дозволяє забезпечити простежуваність передавання фізичних величин відповідно до національних чи міжнародних еталонів. Це сприяє достовірності результатів під час оцінювання характеристик безпілотних систем та водночас створює передумови для усунення технічних бар'єрів у співпраці з європейськими виробниками озброєння.

Ключові слова: система озброєння; безпілотна система; випробування озброєння; міжнародна співпраця; статистичний метод оцінювання.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Стрімкий розвиток сучасних зразків військової техніки сприяє формуванню нових підходів до ведення бойових дій та активному впровадженню в практику застосування різноманітних дистанційно керованих систем, які виконують широкий спектр завдань і дедалі частіше використовуються під час проведення військових операцій. Водночас ефективність їх застосування значною мірою залежить від наявності чітко визначених тактико-технічних характеристик, що враховують під час планування бойових операцій, тому особливого значення набуває достовірність отриманих даних та можливість їх оцінювання в різних умовах експлуатації. Саме тому дослідження технічних параметрів безпілотних систем (БПС) у процесі випробувань є важливим етапом, який передуює їх прийняттю на озброєння. Інформація про граничні можливості зразка озброєння та його технічні характеристики в різних умовах застосування дає змогу забезпечити найбільш раціональне та ефективне використання техніки під час виконання бойових завдань. Саме тому особливо актуальним є застосування еталонної бази, здатної забезпечувати передавання фізичних одиниць із необхідним рівнем точності та достовірності (метрологічно справної) і методи перевіряння цього рівня точності в ході використання еталонів під час проведення випробувань. Про важливість цього питання наголошено в спільному документі Міжнародної кооперації з акредитації лабораторій (ILAC) та Міжнародної організації законодавчої метрології (OIML), який прийнято як національний стандарт ДСТУ ILAC-G24/OIML D 10. У ньому зазначено, що однією з ключових умов забезпечення простежуваності та надійності результатів вимірювань є встановлення максимально допустимого інтервалу часу між двома послідовними калібруваннями засобів вимірювальної техніки. Крім того, стандарт вказує на те, що використання так званої інженерної інтуїції для визначення міжкалібрувальних інтервалів не може вважатися достатньо обґрунтованим підходом. Так само недостатньо надійною вважається система застосування фіксованих інтервалів калібрування без їх подальшого перегляду. У зв'язку із цим випробувальні та калібрувальні лабораторії повинні розробляти відповідні критерії, які дозволяють коригувати міжкалібрувальні інтервали з урахуванням умов експлуатації

засобів вимірювальної техніки або надавати документальне обґрунтування їх незмінності. Реалізація такого підходу потребує впровадження спеціальних алгоритмів і процедур, що дають змогу оцінювати ступінь наближення показань еталонних засобів до меж допустимих відхилень та своєчасно визначати необхідність проведення їх повторного калібрування. Саме методам проміжного перевіряння еталонної бази під час проведення випробувань БпС і прогнозуванню їх метрологічної справності присвячено цю статтю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання випробування зразків озброєння є широко обговорюваним у колах науковців та практиків – випробувачів військової техніки. Так, в [1] розкрито передумови розвитку безпілотних технологій як важливого елемента забезпечення сучасних військових операцій, проаналізовано законодавче та нормативне підґрунтя процедури приймання безпілотних комплексів на озброєння.

У роботі [2] за результатами проведеного аналізу чинних нормативних документів зроблено висновки про деякі стандарти НАТО та зміни їх статусу в Україні з національного на військовий із введенням обов'язковості їх застосування на підприємствах, в установах та організаціях усіх форм власності, що виконують роботи для потреб оборони. Також виділено групи військових стандартів, що прямо чи опосередковано регламентують вимоги до забезпечення єдності та простежуваності вимірювань у ході випробувань зразків озброєння та військової техніки. Окреслено труднощі в запровадженні стандартів НАТО в нашій державі та шляхи вирішення проблемних питань.

У статті [3] розглянуто деякі питання впровадження та застосування міжнародних нормативних і нормативно-технічних документів, зокрема стандартів НАТО, під час проведення випробувань зразків озброєння. Вказано на певні нюанси щодо співробітництва України з міжнародними партнерами у сфері стандартизації, з-поміж яких варто виокремити відмінності організаційних структур систем стандартизації та фондів стандартів.

Публікація [4] присвячена особливостям випробувань відповідно до стандартів НАТО з гарантування якості (STANAG4107) та вимогам до алгоритмів, методів і порядку проведення випробувань зразків озброєння та військової техніки за різними видами та напрямками. Однак у цій роботі не проаналізовано в достатньому обсязі особливостей впровадження стандартів НАТО в приймальних випробуваннях.

У [5] описано підхід до визначення міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), який ґрунтується на рекомендаціях розділу А.5 стандарту ДСТУ-Н РМГ 74:2009 [6]. У межах цього підходу інтервали Т1 (віяловий) і Т2 (лінійний) трактуються як випадкові процеси, що відображають розподіл дрейфу невизначеності вимірювань відносно нульового значення, їх обчислюють за відповідними формулами. Водночас зазначений метод є досить складним для практичного застосування, оскільки потребує повної інформації про показники надійності ЗВТ, зокрема ймовірність безвідмовної роботи та прогнозований річний ресурс елементів. На практиці зазвичай цих даних немає. Крім того, навіть за їх наявності застосування підходу обмежується низкою припущень, що можуть істотно впливати на достовірність отриманих результатів.

У дослідженні [7] запропоновано альтернативний підхід до коригування міжкалібрувальних інтервалів для наборів плоскопаралельних кінцевих мір довжини, який поєднує елементи методів автоматичного регулювання та контрольних діаграм, наведених у [8]. Вихідними даними слугують результати трьох послідовних калібрувань із періодичністю 12 місяців. На їх основі оцінюють середнє відхилення вимірюваної величини від номінального значення, після чого обчислюють середньоквадратичне відхилення результатів. Далі визначають імовірне відхилення значення, яке відтворює міра (X_p), від номіналу. Рішення щодо зміни міжкалібрувального інтервалу приймається шляхом порівняння отриманого X_p із максимально допустимою похибкою ЗВТ, встановленою виробником або нормативними документами відповідно до вимог методик калібрування чи випробувань. Але цей підхід має певні обмеження, адже в діяльності калібрувальних і випробувальних лабораторій основною характеристикою результатів є невизначеність вимірювань, а не похибка. Тому пряме зіставлення X_p із гранично допустимою похибкою не завжди є коректним. З огляду на це доцільно застосовувати альтернативний підхід, відповідно до якого результати розрахунків порівнюють не лише з допустимими межами похибки, а й із цільовою невизначеністю, встановленою для конкретної лабораторії. Це дає змогу підвищити достовірність результатів метрологічних досліджень. Водночас значення цільової невизначеності має обчислюватися з урахуванням допустимих похибок ЗВТ.

У розробці [9] описано метод прогнозування метрологічної справності ЗВТ на основі обмеженої кількості експериментальних даних. Він дозволяє оцінити кількість вимірювань, яку прилад може виконати до виходу похибки за встановлені межі. Це, у свою чергу, дає можливість визначити фактичний ресурс роботи засобу без додаткового юстування та сприяє підвищенню якості продукції за рахунок зменшення кількості браку. Оброблення результатів вимірювань згідно з цим підходом здійснюється із застосуванням методів експоненційного згладжування, зокрема шляхом розрахунку експоненційних середніх значень.

У статті [10] розглянуто питання щодо впровадження способів перевірки якості методів випробування зразків озброєння, зокрема їх стійкість до зміни вхідних умов, а також створення однозначних математичних моделей, які дозволять оцінити показники якості таких методів. Ці моделі запропоновано будувати з використанням статистичних методів, що дозволяють аналізувати випадкові величини та робити висновки щодо їх кореляції.

Формулювання завдання дослідження. На підставі проаналізованих публікацій та порушених у них проблем можна зробити висновок, що система технічного регулювання в оборонній сфері, зокрема щодо випробування БпС озброєння, знаходиться на етапі становлення та переходу на міжнародні стандарти. Отже, на сьогоднішній день питання розроблення та впровадження методів контролювання метрологічної справності еталонної бази є актуальним. Вимогами до цих методів є аналізування стану еталонної бази за обмеженої можливості проведення міжлабораторних перевірянь еталонів із лабораторіями-провайдерами.

Виклад основного матеріалу. Дослідження присвячено розв'язанню актуальної науково-прикладної задачі з перевіряння метрологічної справності вимірювального устаткування, що використовується для випробування зразків БпС та їх складових, і оцінювання його стабільності протягом міжкалібрувального проміжку часу.

Упровадження в роботу випробувальної лабораторії розроблених документів, які регламентують порядок її роботи, а саме систему управління якістю, є одним із дієвих способів показати, що отримані дані досліджень є достовірними, а тому на них можна покластися для прийняття рішень щодо відповідності зразків озброєння встановленим вимогам. З іншого боку, стандартизація процесів лабораторного аналізу гарантує достатню точність його результатів, а можливі помилки в них зведені до мінімуму.

Отже, одним із показників правильності роботи лабораторії є надання нею документальних доказів відповідності результатів випробування вимогам точності та достовірності.

У практиці як випробувальних, так і калібрувальних лабораторій є процедура верифікації [10], яка передбачає зміну одного з вхідних параметрів в методі випробування й оцінювання кореляції результатів випробувань одного і того ж дослідного зразка. Метою верифікації є підтвердження стабільності результатів випробувань у разі зміни вхідних параметрів випробувань.

Але такий аналіз можна застосувати і для проміжного перевіряння еталонної бази. Річ у тім, що за недостатньої кількості даних про можливі відхилення результатів вимірювань, які можуть бути викликані еталоном, і відсутності можливості проконтролювати точність робочого еталону в умовах лабораторії, постає питання в процедурі підтвердження того, що еталонний засіб зберігає його метрологічну справність.

Водночас часто виникає питання, яким чином підтвердити достовірність показань робочого еталона коли відсутня можливість порівняння його результатів з результатами аналогічного взірця або вихідного еталона, який передає таку саму фізичну величину.

У такому разі може бути корисним застосування методу статистичного оцінювання результатів досліджень. Суть його полягає в порівнянні результатів вимірювань у ході проведення випробувань одного і того ж самого зразка в однакових умовах, але з використанням різних робочих еталонів. При цьому обраховується невизначеність результатів вимірювань з відповідними бюджетами невизначеності, де зазначаються дані калібрування кожного еталона. Цей метод схожий з тим, який використовують під час проведення міжлабораторних перевірянь, але тоді в лабораторії провайдера наявне референсне значення величини з доведеними метрологічними параметрами. У результаті ж проведення перевіряння міжвипробувальними лабораторіями, які не є провайдерами, виникає завдання оцінити збереження точності самих еталонів за відсутності референсних зразків. У такому разі доцільним є оцінювати не самі результати випробувань, а величину їх кореляції між учасниками. Питання полягає в тому, що еталонні засоби вимірювань (еталонні міри) мають як похибку вимірювання чи відтворення, так і певний дрейф метрологічних характеристик, спричинений їх конструктивними особливостями. Зокрема, цей процес значно проявляється в мірах, що є хімічними сполуками, розчинами чи

чистими речовинами – так звані CRM. Відповідно, доцільно використовувати для перевіряння цих еталонних мір метод паралельних вимірювань із застосуванням еталонної бази різних лабораторій та визначенням ступеня кореляції між масивами вимірювань. Суть такого підходу полягає в тому, що однакові міри мають давати практично однакові результати. Саме тут і виникає задача оцінювання тісноти взаємозв'язку результатів випробувань: чи зміняться вони в разі дії інших вхідних параметрів експерименту, тобто за застосування іншого еталона для вимірювань.

Для оцінювання інтенсивності взаємозв'язку використовують коефіцієнт кореляції, абсолютне значення якого знаходиться в межах від -1 до 1. Він дає кількісну оцінку статистичного взаємозв'язку між результатами вимірювань та показує, яка частка варіативності залежної змінної пояснюється регресійною моделлю. Тобто цей показник у застосуванні до випробувань можна інтерпретувати ступенем впливу точності еталона на їх результати, зокрема в експерименті, коли випробування проводяться в первинних нормалізованих початкових умовах або в разі зміни еталонного устаткування під час проведення випробувань.

Розглянемо процедуру методу проміжного перевіряння еталонів. Для зовнішньолабораторного перевіряння необхідно дві лабораторії зі схожими сферами акредитації за видами випробувань, які мають однотипні еталони, одна з них (провайдер) обирає зразок озброєння для випробування, до неї доставляються еталони іншої лабораторії (учасника-опонента). При цьому дотримуються таких умов:

вибираються учасники для проведення перевіряння;

визначають зразок озброєння БпС для випробування з метою проведення проміжного перевіряння еталонів;

еталони для перевіряння доставляються одному з учасників;

учасником-провайдером стабілізуються умови проведення випробування та зберігання еталонів відповідно до їх технічної документації, вони заносяться в протокол.

Лабораторія-провайдер виконує випробування одного й того ж самого дослідного зразка одним оператором в однакових умовах із використанням різних еталонів (провайдера й учасника-опонента), проводиться статистичний обрахунок за допомогою математичного апарату, що описано нижче.

Розглянемо процедуру перевіряння. Запропонований тест забезпечує спосіб визначення того, чи призведе зміна еталонної бази під час випробувань до зміни їх результатів. Для цього проводять два послідовні випробування одного й того самого зразка БпС. При цьому щоразу всі вхідні параметри експерименту зберігаються без змін, окрім еталонної міри (еталонного засобу вимірювальної техніки), що застосовується під час вимірювань і буде змінюватися в ході перевірянь.

Для оцінювання результатів випробування може бути застосовано математичний апарат обрахунку параметричної кореляції (коефіцієнт кореляції Пірсона), є такі передумови застосування цього методу: усі спостереження взаємно незалежні та мають нормальний закон розподілу.

Опис методу. Значення коефіцієнта кореляції розраховуємо за такою формулою:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (1)$$

де X_i – i -те значення результату випробувань під час першого експерименту (нормалізовані умови);

\bar{X} – середнє арифметичне значення результатів випробувань у ході першого експерименту (нормалізовані умови);

Y_i – i -те значення результату випробувань за час проведення другого експерименту (умови зі зміною параметра, вплив якого на результати випробувань досліджується за цим тестом);

\bar{Y} – середнє арифметичне значення результату випробувань під час проведення другого експерименту (умови зі зміною параметра, вплив якого на результати випробувань досліджується за цим тестом);

N – кількість спостережень.

Обрахований результат знаходиться в межах $r = \pm 1$,

де $r = +1$ означає прямо пропорційну кореляційну залежність (рис. 1);

$r = -1$ – обернено пропорційну кореляційну залежність (рис. 2);

$r^2 = 0$ свідчить про 0% збігу, тобто нульову кореляційну залежність (рис. 3).

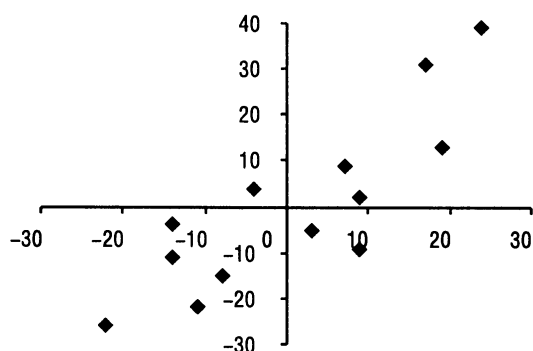


Рис. 1. Приклад прямо пропорційної кореляційної залежності

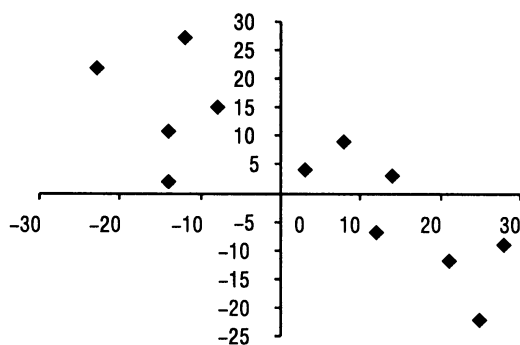


Рис. 2. Приклад обернено пропорційної кореляційної залежності

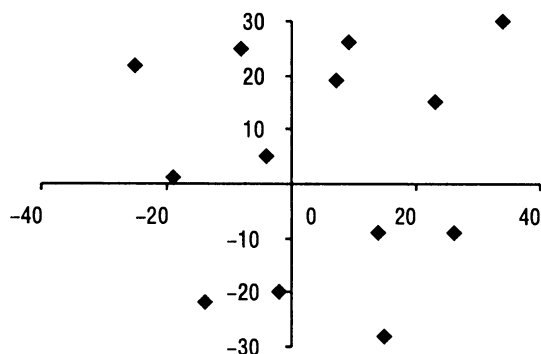


Рис. 3. Приклад нульової кореляційної залежності

Оскільки проводиться обрахунок випадкової величини, то для достовірності результату перевіряння необхідно оцінити статистичну значущість отриманого коефіцієнта кореляції, тобто визначити, наскільки суттєво він відмінний від нуля. Це можна зробити за допомогою критерію Стюдента. Для цього критерій значущості $t_{\text{розр}}$ обчислюємо за такою формулою:

$$t_{\text{розр}} = \frac{r_{xy} \sqrt{(N-2)}}{\sqrt{(1-r_{xy}^2)}}, \quad (2)$$

де r_{xy} – розрахований коефіцієнт кореляції;

N – кількість спостережень.

Якщо $t_{\text{розр}}$ більше або дорівнює табличному значенню коефіцієнта Стюдента, взятого з $N = 2$ ступенями свободи, то нульова гіпотеза відкидається. Це означає, що коефіцієнт кореляції значно відрізняється від нуля (із вибраним рівнем значущості) і кореляція між результатами вимірювань є підтвердженою. Тобто знайдений зв'язок є статистично значущим (не випадковим) та підтверджує припущення методу про наявність кореляції між масивами результатів вимірювань, а відтак, і достовірність вимірювань обома еталонами, що свідчить про їх метрологічну справність.

У разі ж непідтвердження кореляції або наявної обернено пропорційної кореляційної залежності, це може свідчити про дрейф чи зміну крутизни характеристики одного з еталонів. Відповідно, необхідно провести додатковий раунд уже із залученням третього зразка еталонної бази і послідовно перевірити з ним перший та другий зразки із подальшими обрахунками. Тоді за значеннями коефіцієнта кореляції можемо оцінити, який з еталонів виходить за межі метрологічних характеристик або має відхилення від них.

Отже, послідовно проводячи серії випробувань у ході перевіряння еталонів, а саме змінюючи еталони провайдера чи опонента й обраховуючи ступінь кореляції, можна дослідити вплив точності та стабільності еталона на результат випробувань, а також визначити стабільність еталонної міри, яка відтворює певну фізичну величину. Відповідно, якщо один і той самий зразок озброєння дає корельовані результати під час випробування двома мірами, а нормовані похибки мір є однаковими (з урахуванням точності ЗВТ та випадкових похибок), то міри опонента та провайдера можна вважати стабільними в періоді міжкалібрувального інтервалу.

Для внутрішньолабораторного перевіряння, що може бути проведено в умовах лабораторії згідно з графіком проміжного перевіряння еталонів, використовуємо такий алгоритм:

вибираємо дослідний зразок БпС для випробувань і проміжного перевіряння еталонів; вибираємо еталони з наявних у лабораторіях-учасниках та відкаліброваних в установленому порядку, які відтворюють або вимірюють однакову фізичну величину в зіставлених діапазонах (наприклад, комплект світлофільтрів для відтворення коефіцієнта спрямованого оптичного пропускання та набір його мір, виготовлених на основі перхлорату хрому та біхромату калію, або ж інші набори різних виробників, гирі чи динамометри з однаковими діапазонами тощо).

Для обраних еталонів стабілізуються умови проведення випробувань і зберігання еталонної бази відповідно до технічної документації. Один оператор лабораторії виконує два паралельні випробування одного й того самого зразка БпС в ідентичних умовах різними еталонами. Далі проводиться статистичний обрахунок за допомогою запропонованого методу.

Доцільно також проводити оцінювання прогнозованого часу збереження метрологічної справності. За відсутності даних щодо значень первинних технічних характеристик виробника в розрізі заявлених похибок та невизначеностей приладів, а також їх міжкалібрувальних інтервалів, використовуються статистичні методи оброблення результатів вимірювань для доказу того, що обрана лабораторією тривалість експлуатації еталона без його перекалібрування не впливає на правильність результату. При цьому вважається, що похибки вимірювань можна розділити на дві групи: обумовлені випадковими (прецизійність) та систематичними (правильність) причинами.

Зазначені поняття описують якість проведення робіт у певних умовах лабораторії. Модифікувавши запропонований алгоритм, можна його застосувати для оцінювання якості функціонування самого обладнання, зокрема його метрологічних характеристик, тобто правильності еталонної бази (рис. 4).

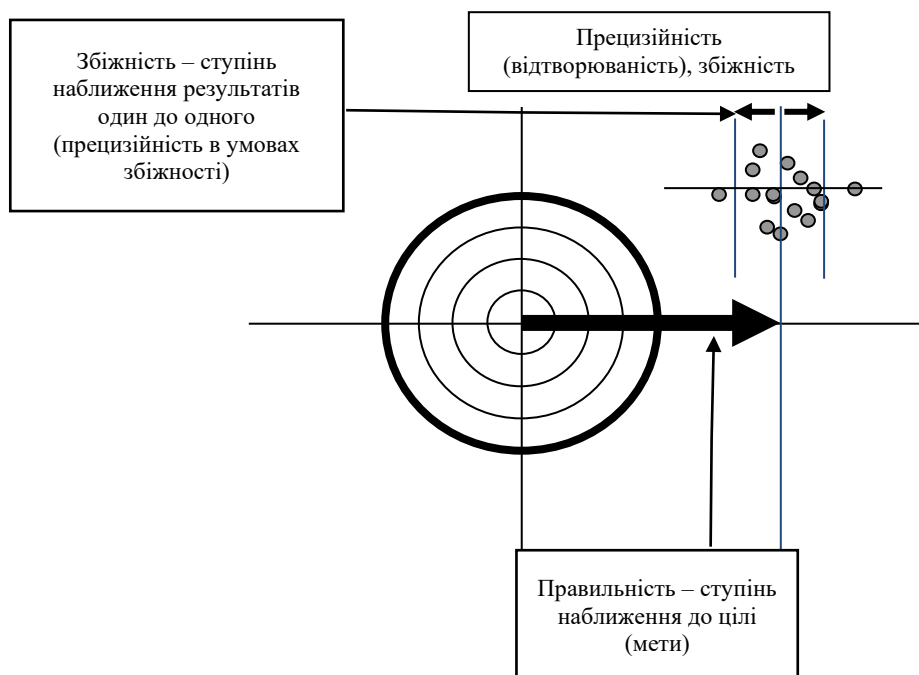


Рис. 4. Графічне зображення понять збіжності та правильності результатів вимірювання

Статистичні методи оброблення результатів є гнучкими щодо можливості оцінювання конкретного процесу дослідження, їх застосування дозволяє провести аналіз якості результатів вимірювань під час проведення випробувань навіть за умови обмеженої можливості використання еталонної бази чи з невеликим масивом вхідних даних.

Методологія оцінювання міжкалібрувальних інтервалів передбачає що згідно з методом оцінювання кореляції, описаним вище, проводяться внутрішньолабораторні проміжні перевіряння, результати яких задокументовані та обраховані. Ці дані є вхідними параметрами для прогнозу моделі, що буде лінію тренду для розвитку значень коефіцієнта кореляції, які були отримані в ході проміжного перевіряння.

Тривалість міжкалібрувального інтервалу може бути оцінена шляхом прогнозування коефіцієнта кореляції на визначену кількість часових інтервалів проміжних перевірянь, протягом яких спрогнозоване значення коефіцієнта кореляції знаходитиметься в межах допуску згідно з математичним апаратом перевіряння еталонів, описаним вище.

Математичний апарат та методика застосування запропонованого методу.

Для опису часових рядів у ході прогнозування використовують математичні моделі.

Часовий ряд x_t , отриманий за результатами вимірювань, можна подати у вигляді суми компонентів:

$$x_t = \xi_t + \varepsilon_t, \quad (3)$$

де величина ε_t утворена випадковим неавтокорельованим процесом з нульовим математичним сподіванням і кінцевою (необов'язково постійною) дисперсією (шуми вимірювань), а величину ξ_t можна отримати випадковим процесом вимірювання (випадкова похибка). Ці величини різняться характером впливу на значення результатів. Змінна ε_t впливає тільки на значення поточного результату, а величина ξ_t певною мірою на значення декількох або всіх наступних результатів вимірювання.

Найпростіша адаптивна модель ґрунтується на обчисленні так званої експонентної середньої. Припустимо, що досліджується ряд результатів вимірювань. Виявлення й аналіз тенденції динамічного ряду результатів замірів часто проводиться за допомогою його вирівнювання або згладжування. Експонентне згладжування – один із найпростіших розповсюджених прийомів вирівнювання ряду даних, в основі якого лежать розрахунки експонентних середніх.

Експонентне згладжування здійснюється за рекурентною формулою:

$$S_t = \alpha x_t + \beta S_{t-1} \quad (4)$$

де S_t – значення експонентної середньої в момент t ;

α – параметр згладжування, $\alpha - \text{const}$, $0 < \alpha < 1$;

$\beta = 1 - \alpha$.

Вираз (3) можна подати в такий спосіб:

$$S_t = \alpha x_t + (1 - \alpha)S_{t-1} = S_{t-1} + \alpha(x_t - S_{t-1}). \quad (5)$$

Експонентна середня на момент t тут виражена як експонентна середня попереднього моменту плюс частка різниці поточного спостереження й експонентної середньої минулого моменту.

Якщо послідовно використовувати рекурентне співвідношення (4), то експонентну середню S_t можна виразити через значення часового ряду x :

$$\begin{aligned} S_t &= \alpha x_t + \beta S_{t-1} = \alpha x_t + \alpha \beta x_{t-1} + \beta^2 S_{t-2} = \dots = \\ &= \alpha x_t + \alpha \beta x_{t-1} + \beta^2 S_{t-2} + \dots + \alpha \beta^l x_{t-l} + \beta^N S_0 = \alpha \sum_{i=0}^{N-l} \beta^l x_{t-i} + \beta^N S_0, \end{aligned} \quad (6)$$

де N – кількість членів ряду;

S_0 – деяка величина, що характеризує початкові умови для першого застосування формули (2), якщо $t = 1$.

Отже,

$$S_t = \alpha \sum_{i=0}^{N-l} \beta^l x_{t-i} + \beta^N S_0, \quad (7)$$

Як бачимо, величина S_t оцінюється як зважена сума всіх членів ряду результатів вимірювань, причому вага внеску кожного результату падає експоненційно залежно від давнини (віку) спостереження конкретного результату. Це й пояснює, чому S_t названо експонентною середньою. Якщо, наприклад, $\alpha = 0,3$, то поточне спостереження буде мати вагу 0,3, а ваги попередніх даних становитимуть відповідно 0,21; 0,147; 0,1029 і т. д.

Таким чином, застосовуючи методи прогнозування і знаючи дані оцінювання коефіцієнтів кореляції в ході перевіряння еталонів, можна спрогнозувати ту кількість циклів процедури, яку може забезпечити еталон до виходу коефіцієнта кореляції за встановлені межі статистичної значущості без перекалібрування.

Отже, застосування методу статистичного оброблення результатів вимірювань дозволить попередньо прогнозувати поведінку окремого, конкретно взятого еталона в часі за отриманими даними, що дасть змогу оцінити інтервал, протягом якого зберігається його робота із заданою точністю без повторного калібрування та юстування.

Висновки. У статті запропоновано один із методів оцінювання придатності еталонної бази під час проведення випробування зразків БпС, який відрізняється простотою та універсальністю щодо використання в умовах лабораторії. Об'єктивність критеріїв оцінювання метрологічної справності та їх однозначність дозволяють надавати чіткі твердження щодо придатності чи непридатності еталонної бази окремо взятої лабораторії. Запропонований алгоритм також надає можливість проводити перевіряння засобів вимірювальної техніки без залучення лабораторій провайдерів, що є економічно ефективним, оскільки не вимагає додатково очікувати проведення ними раундів звіряння. Науковою новизною цього методу оброблення результатів є можливість виявити наявність дрейфу еталона або зміну крутизни його характеристики, оскільки критерій

коефіцієнта кореляції є чутливим до таких відхилень. Крім того, застосування наведеної методики дозволяє одночасно планово контролювати компетентність лабораторій – учасників проміжного перевіряння.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Випробування безпілотних авіаційних комплексів у бойових умовах / О. М. Походенко, Р. В. Місценко, Ю. В. Жежерун та ін. // Зб. наук. праць Держ. наук-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Черкаси, 2024. № 4 (22). С. 106–114. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.22.2024.13>
2. Деякі особливості застосування стандартів НАТО щодо забезпечення єдності вимірювань при випробуваннях виробів озброєння та військової техніки / В. В. Борщ, О. І. Вервейко, М. І. Світенко, А. О. Семироз // Зб. наук. праць Держ. наук-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Черкаси, 2023. № 1 (15). С. 26–33. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.15.2023.04>
3. Проблемні питання нормативно-технічного забезпечення проведення випробувань зразків озброєння та військової техніки / І. М. Лаппо, Ю. М. Добришкін, М. О. Геращенко та ін. // Зб. наук. праць Держ. наук-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Черкаси, 2019. Вип. 2 (2). С. 112–118. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.2.2019.15>
4. Деякі особливості метрологічного забезпечення випробувань озброєння та військової техніки відповідно до стандартів НАТО та провідних країн світу / В. В. Борщ, П. Л. Аркушенко, О. І. Вервейко та ін. // Зб. наук. праць Держ. наук-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Черкаси, 2019. Вип. 2 (2). С. 33–40. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.2.2019.05>
5. Розрахунок міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювальної техніки / О. Ф. Волков, Р. О. Волков, К. С. Колобов та ін. // Автомобільний транспорт. 2015. № 5 (247). С. 11–13.
6. ДСТУ-Н РМГ 74:2009 Метрологія. Методи визначання міжповіркового та міжкалібрувального інтервалів засобів вимірювання (РМГ 74-2004, IDT). Національний стандарт України. [Чинний від 2010-04-01]. 27 с.
7. Косарева О., Дзябенко О. Коригування міжкалібрувальних інтервалів вимірювального обладнання // Метрологія та прилади. 2017. № 3. С. 33–35.
8. ДСТУ ІЛАС-G24/OIML D 10:2013. Метрологія. Настанови щодо визначення міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювальної техніки (ІЛАС-G 24/OIML D 10:2007, IDT). Національний стандарт України. [Чинний від 2014-07-01]. 30 с.
9. Кучерук В., Омельчук І. Прогнозування часу збереження метрологічної справності та оцінювання міжкалібрувальних інтервалів ЗВТ // Метрологія та прилади. 2017. № 5-І (67). С. 78–81.
10. Використання статистичних методів для оцінювання результатів випробування безпілотних систем / І. А. Омельчук, А. М. Токар, В. Л. Рикун, І. В. Свистунович // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних

інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир, ЖВІ, 2026. Вип. 29. С. 164–175.
<https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.29.12>

Стаття надійшла до редакції 01.04.2026.

Прийнято до друку 28.04.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

REFERENCES

1. Pokhodenko, O. M., Mistsenko, R. V., & Zhezherun, Yu. V., et al. (2024). Vyprobuvannia bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv u boiovykh umovakh [Testing of Unmanned Aviation Complexes in Combat Conditions]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification]*, 4 (22), 106–114. Cherkasy. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.22.2024.13> [in Ukrainian].
2. Borshch, V. V., Verveiko, O. I., Svitenko, M. I., & Semyroz, A. O. (2023). Deiaki osoblyvosti zastosuvannia standartiv NATO shchodo zabezpechennia yednosti vymiriuvan pry vyprobuvanniakh vyrobiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Some Features of the Application of NATO Standards Regarding Ensuring the Uniformity of Measurements During Testing of Armament and Military Equipment]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification]*, 1 (15), 26–33. Cherkasy. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.15.2023.04> [in Ukrainian].
3. Lappo, I. M., Dobryshkin, Yu. M., & Herashchenko, M. O., et al. (2019). Problemni pytannia normatyvno-tekhnichnoho zabezpechennia provedennia vyprobuvan zrazkiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Problematic Issues of Regulatory and Technical Support for Testing Samples of Weapons and Military Equipment]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification]*, 2 (2), 112–118. Cherkasy. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.2.2019.15> [in Ukrainian].
4. Borshch, V. V., Arkushenko, P. L., & Verveiko, O. I., et al. (2019). Deiaki osoblyvosti metrolohichnoho zabezpechennia vyprobuvan ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky vidpovidno do standartiv NATO ta providnykh krain svitu [Some Features of Metrological Support for Testing Weapons and Military Equipment in Accordance with NATO Standards and Leading Countries of the World]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification]*, 2 (2), 33–40. Cherkasy. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.2.2019.05> [in Ukrainian].
5. Volkov, O. F., Volkov, R. O., & Kolobov, K. S., et al. (2015). Rozrakhunok mizhkalibruvalnykh intervaliv zasobiv vymiriualnoi tekhniky [Calculation of Intercalibration Intervals of Measuring Instruments]. *Avtomobilnyi transport [Automobile Transport]*, 5 (247), 11–13. [in Ukrainian].
6. DSTU-N RMH 74:2009. *Metrolohiia. Metody vyznachannia mizhpovirkovoho ta*

mizhkalibruvalnoho intervaliv zasobiv vymiriuvannia [Metrology. Methods for Determining the Intercalibration and Intercalibration Intervals of Measuring Instruments] (RMH 74-2004, IDT). Natsionalnyi standart Ukrainy [National Standard of Ukraine]. (2010). [in Ukrainian].

7. Kosarieva, O., & Dziabenko, O. (2017). Koryhuvannia mizhkalibruvalnykh intervaliv vymiriuvannia [Correction of Intercalibration Intervals of Measuring Equipment]. *Metrolohiia ta prylady [Metrology and Instruments]*, 3, 33–35 [in Ukrainian].

8. DSTU ILAC-G24/OIML D 10:2013. Metrolohiia. Nastanovy shchodo vyznachennia mizhkalibruvalnykh intervaliv zasobiv vymiriuvannia tekhniki [Metrology. Guidelines for Determining the Intercalibration Intervals of Measuring Instruments] (ILAC-G 24/OIML D 10:2007, IDT). Natsionalnyi standart Ukrainy [National Standard of Ukraine]. (2014). [in Ukrainian].

9. Kucheruk, V., & Omelchuk, I. (2017). Prohnozuvannia chasu zberezhennia metrolohichnoi spravnosti ta otsiniuvannia mizhkalibruvalnykh intervaliv ZVT [Forecasting the Time of Preservation of Metrological Serviceability and Evaluation of Intercalibration Intervals of Measuring Instruments]. *Metrolohiia ta prylady [Metrology and Instruments]*, 5-I (67), 78–81 [in Ukrainian].

10. Omelchuk, I. A., Tokar, A. M., Rykun, V. L., & Svystunovych, I. V. (2025). Vykorystannia statystychnykh metodiv dlia otsiniuvannia rezultativ vyprobuvannia bezpilotnykh system [Use of Statistical Methods for Evaluating the Results of Testing Unmanned Systems]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 29, 164–175. Zhytomyr: KZhMI. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.29.12> [in Ukrainian].

I. A. Omelchuk, I. A. Pilkevych, Yu. O. Podchashynskyi, V. I. Zghuria

THE METHOD OF VERIFYING THE STANDARDS TO PRESERVE THE RELIABILITY OF THE RESULTS OF THE TESTING OF UNMANNED SYSTEMS

Ukraine's long-term armed struggle against the aggressor, as well as the accumulated international experience of using unmanned systems in modern military conflicts, became an important factor that led to the creation of a separate type of forces within the Armed Forces of Ukraine.

In modern conditions, the importance of unmanned systems in the structure of weapons is constantly growing. This, in turn, creates a need to increase the volume of design, research of prototype samples and serial production of the latest unmanned complexes for various purposes. The functioning of such systems is based on complex technological processes and includes a significant number of interconnected elements, nodes and subsystems. In addition, each sample of unmanned vehicles is characterized by a large set of parameters and technical indicators. In this regard, there is a need to conduct comprehensive research to confirm the validity of technical decisions made in new developments, as well as for the effective implementation of existing scientific developments in the process of creating and manufacturing unmanned systems.

Since it is the test results that are the key source of information for assessing the compliance of products with established requirements, the reliability of the obtained data during their

implementation is of particular importance. The reliability of the results largely depends on the correctness of the applied research methods and the level of competence of the laboratories that conduct the relevant measurements. At the current stage, one of the generally recognized mechanisms for confirming the quality and reliability of test results is the accreditation of laboratories in accordance with the requirements of the international standard ISO / IEC 17025:2019. This standard establishes criteria for evaluating the competence of testing and calibration laboratories, in particular, in terms of ensuring the accuracy of measurements and the state of their reference base. Each test is carried out using measuring equipment – standards that allow measuring or reproducing the corresponding physical values that characterize the parameters of the tested weapons samples. Accordingly, each of these measuring devices must have sufficient accuracy for the objectivity of the tests. In the context of the implementation of NATO standards in the field of testing weapons samples, the use of measurement results obtained in accredited laboratories allows to ensure the traceability of the transfer of physical values to national or international standards. This contributes to the reliability of the results when evaluating the characteristics of unmanned systems and at the same time creates the prerequisites for removing technical barriers in cooperation with European arms manufacturers.

Keywords: *weapon system; unmanned system; weapons testing; international cooperation; statistical method, evaluation.*