

УДК 006.91, 681.2-5

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-15-25

## ОГЛЯД СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ТА СИСТЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ

*А. О. Колесниченко, С. Ю. Плєснецов, Ю. О. Плєснецов*

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;  
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна; e-mail: serhii.pliesnetsov@khpri.edu.ua*

Задачі автоматичного калібрування та налаштування систем є поширеними та виникають у багатьох сферах, у тому числі метрологічного спрямування. У роботі наведено загальний аналіз елементів системи стандартизації України, спрямованих на регулювання задач калібрування метрологічного обладнання. Виконано аналіз українських та зарубіжних інформаційних джерел щодо калібрування метрологічного обладнання, а також калібрування інших систем, підходи до яких можуть бути застосовані у вирішенні задач автоматизації калібрування метрологічного (вимірювального, контрольно-діагностичного) обладнання. Визначено, що в Українських джерелах задача автоматизації процесу або процедури калібрування зустрічається мінімально, і в основному у контексті зарубіжних досліджень, в той час як українські дослідники здебільшого зосереджені на окремих споріднених задачах, таких як віддалена телеметрія та керування метрологічним обладнанням. Розглянуто зарубіжні джерела щодо задач автоматичного, автоматизованого калібрування приладів, систем тощо. Відзначено дві основні дихотомії напрямків роботи зарубіжних дослідників у контексті задач калібрування, а саме: нейромережеве – алгоритмічне (недетерміністичне – детерміністичне), абстраговане до узагальнених систем – спеціалізоване до безпосередньої реалізації. Оскільки задача калібрування є широкою, розглянуті джерела охоплюють більш ніж виключно безпосереднє метрологічне застосування задач калібрування. Розглянуті джерела також включають задачі калібрування програмних та електронних систем неметрологічного призначення. Виявлені методи та рішення для систем калібрування, автоматизації калібрування, реалізовані у формі алгоритмів, приладів, нейромереж, застосовані до приладів, сенсорів, програмних середовищ тощо.

**Ключові слова:** метрологія; вимірювання; стандартизація; огляд; нейромережі; алгоритмізація; програмне забезпечення; приладобудування; калібрування; автоматизація.

The tasks of automatic calibration and adjustment of systems are common and arise in many areas, including the metrology direction. The work provides a general analysis of the elements of Ukraine's standardization system aimed at regulating the calibration tasks of metrological equipment. The analysis of Ukrainian and foreign information sources on the calibration of metrological equipment, as well as the calibration of other systems, approaches to which can be applied in solving the problem of automating the calibration of metrological (measuring, control and diagnostic) equipment was performed. It was determined that in Ukrainian sources, the task of automating the calibration process or procedure occurs minimally, and mainly in the context of foreign research, while Ukrainian researchers are mostly focused on certain related tasks, such as remote telemetry and control of metrological equipment. Considered foreign sources regarding the task of automatic, automated calibration of devices, systems, etc. Two main dichotomies of the work directions of foreign researchers in the context of the calibration task are noted, namely: neural network - algorithmic (non-deterministic - deterministic), abstracted to generalized systems - specialized to direct implementation. Because the calibration task is broad, the sources reviewed cover more than just the direct metrological application of the calibration task. The considered sources also include problems of calibration of software and electronic systems of non-metrological purpose. The identified methods and solutions for calibrating systems, calibration automation, implemented in the form of algorithms, devices, neural networks, applied to devices, sensors, software environments, etc.

**Keywords:** metrology; measurement; standardization; review; neural networks; algorithmization; software; instrument building; calibration; automation.

### Вступ

Завдання автоматичного калібрування та налаштування систем часто зустрічаються й актуальні в різних галузях. Так, зазвичай процес калібрування вимірювального або контрольно-діагностичного приладу є процедурою, що вимагає

відносно багато діяльності, пов'язаної з витратами часу роботи спеціаліста, яка є стандартизованою та механічною. Операція калібрування регламентувалась ДСТУ 3989 «Калібрування засобів вимірювальної техніки» [1], який було виведено з обігу у 2017 році разом із рядом

інших стандартів метрології. На даний момент регламентування виконується за відповідним законом України [2].

Калібрування – це комплекс операцій, які виконуються під час регулювання та періодичного підтвердження градуовальних характеристик вимірювальних чи контрольно-діагностичних приладів та систем, або інших систем чи засобів, що покладаються на аналогічні засади, з метою встановлення кореляції між показаннями та кінцевим результатом [2].

Автоматизація задачі калібрування дозволяє як прискорити процес, так і мінімізувати участь у ньому «людського фактору».

Для вирішення застосовують як програмно-алгоритмічні методи [3], так і неймережеві [4]. Поширеною сферою застосування автоматизованого калібрування та налаштування є задачі комп'ютерного зору [5, 6], але також подібні задачі є актуальними для задач калібрування вимірювальних систем [7, 8].

**Мета роботи** – виконати огляд існуючих досліджень, спрямованих на автоматизацію задачі калібрування вимірювального або контрольно-діагностичного обладнання та визначити актуальні напрямки подальшого розвитку питання.

### **Загальна характеристика процесу калібрування і інтеграції автоматизації**

Принцип автоматичного калібрування зводиться до вирішення задачі пошуку номінальних параметрів роботи системи, тобто до зіставлення поточного значення з еталонним для наявного зразка.

В роботі [9] вказано, що «до недоліків традиційних систем відносять:

- надлишкові витрати часу при транспортуванні засобу вимірювальної техніки до калібрувальної лабораторії;

- зупинка технологічного або іншого виробничого процесу на певний термін під час проведення калібрування засобів вимірювальної техніки (якщо це обладнання використовується в цьому процесі);

- витрата коштів на транспортування;
- надлишкові витрати на оплату праці кваліфікованого персоналу калібрувальної лабораторії під час відвідування лабораторії підприємства;
- надлишкова присутність людського фактору під час проведення процедури, яка має бути виключно об'єктивною та неупередженою».

Процедура калібрування, наприклад, для приладів ультразвукового неруйнівного контролю буде зводитись до наступної послідовності операцій:

- 1) встановлення датчика на калібрувальний зразок;

- 2) визначення положення донного імпульсу;

- 3) виставлення часової розгортки відповідно до позиції донного імпульсу;

- 4) коректування кривої вирівнювання до номінального значення.

Відповідно, автоматизації підлягають ті операції, які мають в собі складову ручного корегування вхідних даних. У вищенаведеному прикладі, керування підлягають операції (2) та (3).

Положення донного імпульсу може бути визначено як положення першого піку після зондуючого імпульсу, причому часове положення донного імпульсу є заздалегідь відомим для стандартного калібрувального зразка.

Окремим питанням постає визначення точності та/або невизначеності для (наприклад) часового положення імпульсу при калібруванні, бо невизначеності додаються калібрувальним обладнанням, контрольним обладнанням тощо.

### **Існуючі стандарти, що регламентують операції калібрування**

З урахуванням того, що стандарт [1] є неіючі, окремі метрологічні операції у кожному випадку регламентуються (за наявності) окремими стандартами. Також існує ряд споріднених стандартів, які регламентують операції вимірювання та вимоги до вимірювального обладнання, процедури тощо.

Стандарт [10] «містить як вимоги, так і настанови щодо запровадження систем

керування вимірюванням і може бути корисним у поліпшенні вимірювальних дій і якості продукції».

Стандарт [11] наводить «інформацію про офіційні заходи, які можуть бути здійснені державою для надання статусу «узаконений» засобам вимірювальної техніки». В ньому «розглянуто всі можливі методи, які треба застосовувати як ефективний метод під час таких офіційних заходів». Такий переклад відображає певну недбалість, яка мала місце при його складанні.

Іншим чинним документом, який є спорідненим до задачі калібрування, є [12], який в першу чергу той, що насамперед регламентує типи обладнання та умови, за яких це обладнання підлягає процедурі повірки.

Прикладом вузькоспеціалізованого стандарт [13] регламентує безпосередньо вимоги до процедури калібрування просторових вимірювальних систем ультразвукових сканерів.

#### **Дослідження та публікації щодо автоматизації калібрування в Україні**

У роботі [14] запропоновано підхід та обґрунтовано доцільність тренування нейронної мережі на базі алгоритмів глибинного навчання з метою автоматизації задач калібрування вимірювального обладнання.

Задачі віддаленого калібрування розглядалися українськими науковцями вже давно. Так, у роботі [15] розглянуто можливості проведення операцій калібрування з використанням засобів інтернет-телеметрії, що можливо для обладнання, виготовленого згідно певних вимог. Пізніше автори пропонують методологію дистанційного калібрування систем для аналізу якості постачання електричної енергії на стороні споживача [16].

У роботі [17] автори зосереджуються на процедурних особливостях калібрування обладнання в межах офіційних операцій налаштування вимірювального обладнання в Україні, і приходять до висновків, що «нагальною

потребою є розробка на національному рівні документів, що роз'яснюють та уніфікують процедури калібрування та оформлення їх результатів», а також що «Необхідно запровадити систему навчання та сертифікації персоналу з метрології, особливо для органів з оцінювання відповідності, які надають послуги з калібрування, і органів, які оцінюють компетентність виконавців таких послуг», не зосереджуючись при цьому на технічних аспектах процедури і напрямках її розвитку.

Робота [18] спрямовує увагу на значущість забезпечення єдності вимірювань у державній метрологічній системі та показує, що «для досягнення єдності вимірювань у сфері метрологічного підтвердження ЗВТ необхідно домогтися єдності міжнародних нормативних документів щодо процедур проведення верифікації та калібрування ЗВТ, а також методик оцінювання точності й достовірності отриманих результатів верифікації та калібрування ЗВТ». Як і попередня робота, даний матеріал не є спрямованим на створення інноваційних технологічних підходів до впровадження засобів автоматизації у задачі калібрування.

Загалом, в Україні напрямок автоматизації калібрування досліджується дуже обмежено, і наявні дослідження здебільшого спрямовані на дистанційне вирішення задачі калібрування, а також на засвоєння у цьому аспекті нейромереж.

#### **Дослідження та публікації щодо автоматизації калібрування в світі**

Закордонні роботи, присвячені питанням автоматичного калібрування, спрямовані на ряд ключових напрямків. *По-перше*, це задачі калібрування абстрагованих систем, приведених до приватних випадків, які, наприклад [19] розглядають калібрування нейромережевої системи для визначення параметрів навантаження аркових конструкцій методом кінцевих елементів (МКЕ). Автори відмічають, що «введення чотирьох незалежних параметрів МКЕ

замість трьох у двоетапне калібрування покращило відповідність між результатами моделювання та експерименту» в одних випадках, однак погіршило відповідність у інших, а також збільшило варіативність параметрів. Автори додають, що окремі методи не обов'язково гірші один за інший, оскільки довільно вибрані функції алгоритмів можуть бути додатково оптимізовані». «Однак така поведінка, пишуть автори, - чітко показує, що введення нового незалежного параметра не завжди є вигідним».

Схожі задачі вирішуються у роботах, [20], де наводяться підходи до алгоритмізації задачі автоматичного калібрування абстрагованої системи.

На рис. 1 наведено ілюстрацію зміни результатів виконання моделі з роботи [20] до та після виконання калібрування.

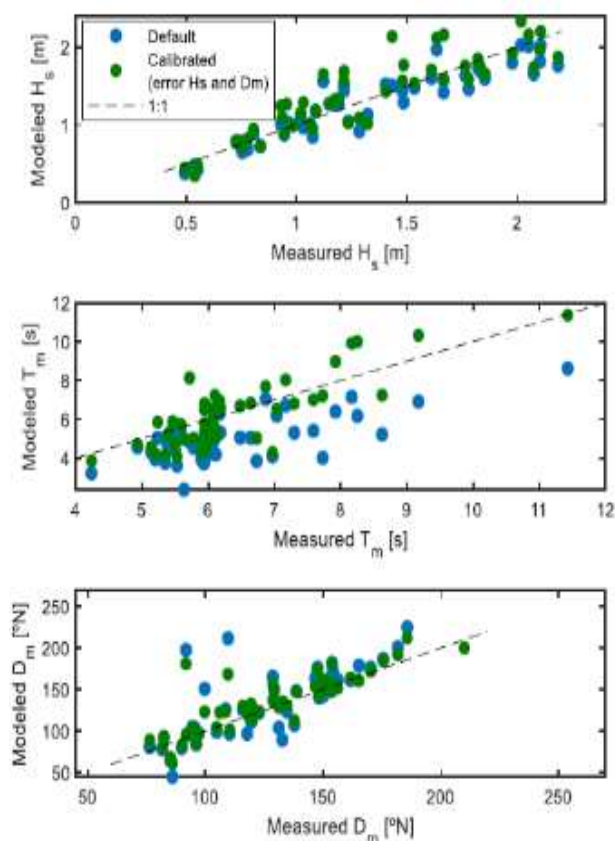


Рисунок 1 – Порівняння моделі призводить до конфігурації за замовчуванням і калібрування за допомогою цільової функції на основі похибок  $H_s$  і  $D_m$  [20]

Авторами роботи [21] запропоновано методологію калібрування алгоритму JOREK («Нелінійний розширений код магнітогідродинаміки JOREK вирішує реалістичну геометрію тороїдальних токамаків X-точок за допомогою безперервної сітки G1, вирівняної за поверхнею потоку, включаючи основну плазму, шар зішкрябання та ділянку відводу» [22]). Як відмічають автори, «вирівнювання моделей п'єдесталів і відповідних магнітогідродинамічних кодів з експериментальними даними є важливою проблемою для того, щоб мати можливість генерувати прогнози для майбутніх пристроїв, наприклад, ITER. Попередні спроби виконати калібрування невідомих параметрів моделі здебільшого були ручним процесом». У статті описується створення структури для автоматичного калібрування JOREK та переформулюється проблема калібрування в задачу оптимізації чорної скриньки, визначивши міру розбіжності між експериментом і еталонною величиною.

Авторами роботи [23] було виконано дослідження задачі калібрування при виконанні аналізу спектрограм. Задача калібрування в у цій сфері, як відмічають автори, завжди залишалась важкою для автоматизації. Автори відмічають: «новий алгоритм автоматичного калібрування довжини хвилі для пасивної диференційної оптико-абсорбційної спектроскопії на основі технології узгодження послідовностей для оцінки спектральних параметрів каналів спектрометра, інтегруючи вдосконалені засоби обробки, такі як покращення структури ознак та субпіксельна інтерполяція. Ці заходи значно зменшують залежність від еталонної роздільної здатності спектру та точно коригують навіть незначні спектральні зсуви. Ми проводимо експерименти з чутливістю, використовуючи синтетичні спектри, щоб визначити оптимальні конфігурації пошуку».

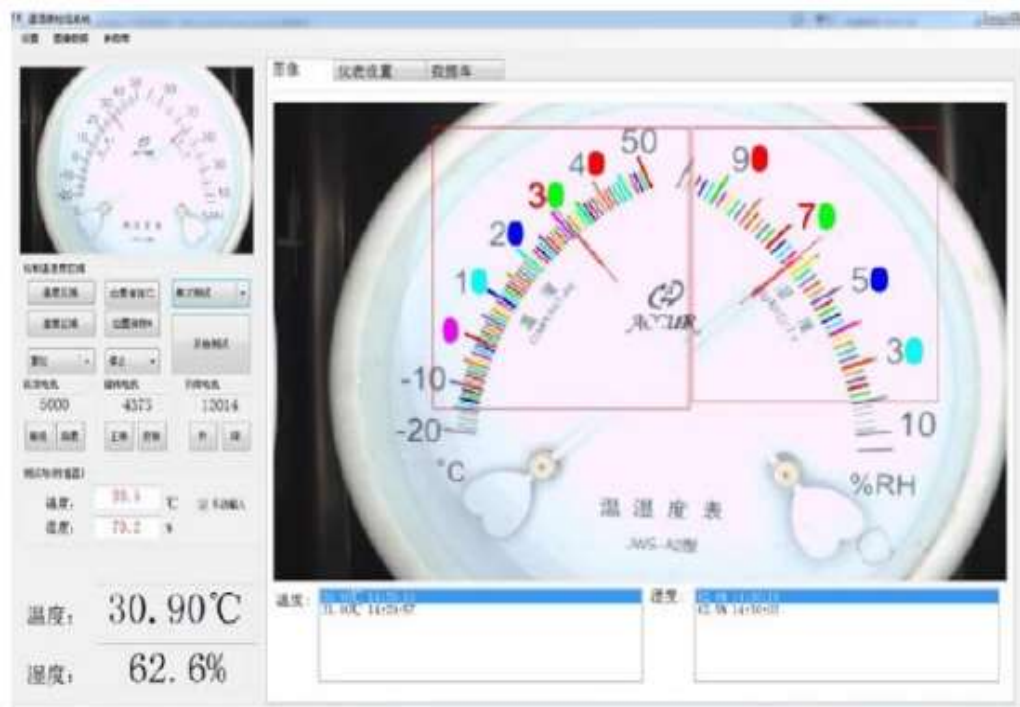


Рисунок 2 – Аналіз показів стрілкового термогігрометра на основі комп'ютерного зору [25, рис. 5]

Другою категорією робіт, присвячених вирішенню задачі автоматичного калібрування, є роботи, автори яких вирішують задачу автоматизації калібрування окремої характеристики приладу чи системи. Так, у роботі [24] авторами розглянуто метод автоматичного калібрування для аберації поля зору в датчику зображення на основі призми Райслі. Як вказують автори у роботі, «Датчики зображення на основі призми Райслі можуть розширити поле зору зображення за допомогою керування променем. Чим більше верхній кут призми, тим вище збільшення поля зору, але в той же час це посилює проблему аберацій зображення, що також висуває вищі вимоги до методу корекції аберацій для призми Райслі». Для покращення характеристик процесу авторами «пропонується автоматичний метод калібрування датчика зображення на основі призми Райслі на основі двовісного поворотного столу. Набори даних зображення калібрувальної пластини з різними кутами повороту призми та відстанями до об'єктів отримані за допомогою двоосьового поворотного

столу. Потім зображення калібрувальної пластини попередньо обробляються за допомогою алгоритму бікубічної інтерполяції. Параметри калібрування остаточно розраховуються, і виконується оптимізація параметрів». Автори вказують, що отримані експериментальні результати підтверджують здійсненність наведеного автоматичного методу калібрування.

Автори роботи [25] спрямували зусилля на автоматизацію калібрування системи термогігromетрів. Автори відмічають у роботі, що створена ними «система, заснована на технології візуального розпізнавання в поєднанні з інтелектуальною автоматизацією, реалізує автоматизацію калібрування термогігromетрів. Нововведення розв'язувати практичні проблеми, викликані традиційним методом», який, як вказано вище та відзначено у статті, є часомістким та включає істотний вплив людського фактору.

Автори відмічають, що створена ними система автоматичного калібрування на основі комп'ютерного зору (рис. 2) «економить робочу силу, зменшує трудовитрати та забезпечує точність

результатів, підвищення ефективності роботи та перевищення очікуваних результатів».

У роботі [26] авторами показано результати роботи над системою імерсивного нанесення покриттів з контрольним модулем, який містить систему автоматичного калібрування.

Як відмічають автори, «проект представляє інструмент для нанесення покриття зануренням із цифровим керуванням часом занурення та швидкістю за допомогою мікроконтролера з автоматичною системою калібрування. Використовуючи підхід до крокового двигуна та математичної формули, інструмент досягає високої точності шляхом автоматичного налаштування параметрів занурення з ключовими показниками, та мінімізує помилки до 0-2% на 20-650 кроках». Відносно підходу до системи калібрування автори вказують наступне: «Метод калібрування для цього інструменту полягає у використанні системи калібрування за точкою, яка фіксує дані калібрування на основі кількох точок швидкості, щоб підвищити точність і точність інструменту та мінімізувати помилки, щоб бути більш точним. Буде шукано кілька відкаліброваних точок швидкості, наближених до швидкості, з якою буде працювати система, які будуть порівнюватись із робочою швидкістю. Після цього ходова швидкість буде скоригована до точки помилки швидкості, отриманої під час калібрування».

У роботі [27] автори зосередили увагу на розробці системи для автоматизації калібрування модулів інерційних вимірювань. Інерційні сенсори використовуються для аналізу кінематичного стану систем при визначенні швидкості, позиціонування, прискорення тощо. Як відмічають автори, «щоб задовольнити потреби автоматичного калібрування та калібрування партії MEMS IMU (модулі інерційних вимірювань мікроелектромеханічних систем) в той же час, пропонується автоматична система калібрування для MEMS IMU. Базуючись

на високоточних тривісних поворотних платформах, схема зв'язку «передній і головний контроль» була застосована для керування кількома вертушками з партією IMU на кожній, щоб можна було здійснити пакетне калібрування малих інерційні компонентів в повністю автоматичному режимі».

Робота [28] спрямована на задачу автоматизації калібрування дисплеїв для систем доповненої реальності. Автори відмічають, що зазвичай для вирішення цієї задачі використовують детерміністичні методи оптимізації. В той же час, вони відмічають набуття популярності і збільшення кількості досліджень, що показують успішне вирішення задач такого типу з використанням недетерміністичних методів. У роботі автори скористались оптимізаційними алгоритмами відпалу, еволюційної стратегії та рою часток у застосуванні до віртуального об'єкту у середовищі доповненої реальності. Творами відзначено успішне застосування кожного з наведених алгоритмів у вирішенні задачі калібрування досліджуваної системи (рис. 3).

Автор роботи [29] виконав аналіз ефекту автоматичного контролю рівня потужності генератора сигналів у калібруванні датчика радіочастотної потужності за допомогою методу прямого порівняння та застосування міліметрових хвиль. Як показує автор, «хоча попередні дослідження рекомендували APLC (автоматичний контроль рівня потужності) для DCTM (метод прямого порівняння), який використовується для надійного та точного калібрування датчиків потужності в багатьох експериментах, це дослідження показало, що калібрування коаксіальних датчиків потужності можна виконувати без APLC на різних рівнях потужності. Для рівнів потужності 0 дБм і -30 дБм було виконано (експериментальне) калібрування коаксіального датчика потужності DCTM з APLC і DCTM без APLC».

Результати вимірювань показали, що розраховані фактори калібрування датчика потужності дослідженого приладу з APLC

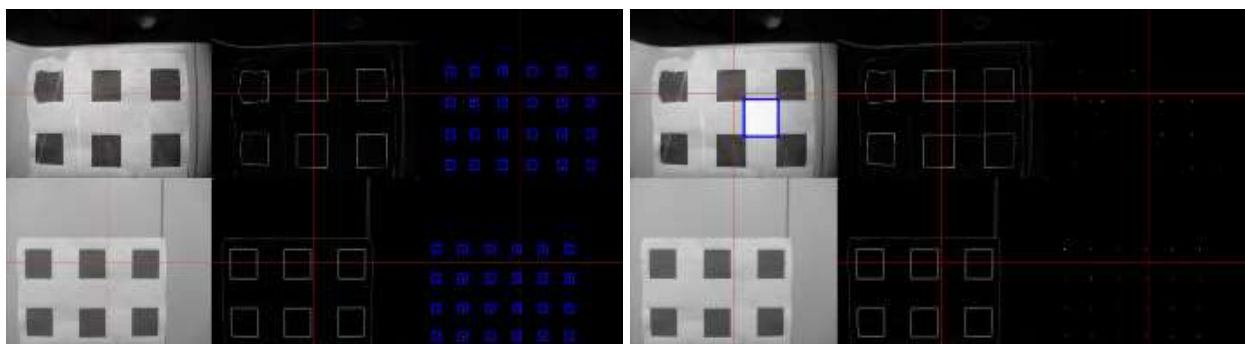


Рисунок 3 – Процес калібрування системи доповненої реальності на базі недетерміністичних методів [28, рис. 7]

і без APLC слідує один за одним з різницею в %0,1. Ці відмінності походять від стандартного відхилення вимірювань».

#### Висновки

1. Виконаний огляд показав, що сучасні українські дослідження мало зосереджені на вирішенні задачі калібрування обладнання, і значною мірою спрямовані на дослідження споріднених задач, таких як телеметрія та віддалений контроль вимірювального обладнання.

2. Визначено два основних напрямки досліджень задачі автоматичного калібрування – вирішення абстрагованих, математичних, програмних задач через створення системи автоматизованого калібрування та прикладна аплікація системи автоматизованого чи частково автоматизованого калібрування до наявного обладнання, або обладнання, що знаходиться у розробці.

3. Визначено, що науковці активно вивчають задачі автоматизації калібрування як детерміністичними, традиційно-алгоритмічними методами, так і з широким залученням недетерміністичних підходів, в першу чергу на базі нейромереж.

#### Список використаних джерел

1. ДСТУ 3989-2000. Метрологія. Калібрування засобів вимірювальної техніки. Основні положення, організація, порядок проведення та оформлення результатів (61379)

2. Про метрологію та метрологічну діяльність. Закон України від 05.06.2014 № 1314-VII.

3. Wei Pengjin, Yan Guohang, Li Yikang, Fang Kun, Cai Xinyu, Liu Wei, Yang Jie. Automatic multi-LiDAR calibration and refinement method. *Measurement Science and Technology*. 2024. 35. DOI: [10.1088/1361-6501/ad3c60](https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad3c60)

4. Chairat Sawrawit, Chaichulee Sittichok Dissaneewate, Tulaya Wangkulangkul, Piyanun, Kongpanichakul, Laliphat. AI-Assisted Assessment of Wound Tissue with Automatic Color and Measurement Calibration on Images Taken with a Smartphone. *Healthcare*. 2023. Vol. 11(2). P. 273. DOI: [10.3390/healthcare11020273](https://doi.org/10.3390/healthcare11020273)

5. Covolan João Pedro Oliveira, Claiton Sanches, S.R.R., Sementille Antonio. Non-deterministic method for semi-automatic calibration of smartphone-based OST HMDs. *Virtual Reality*. 2024. 28. DOI: [10.1007/s10055-024-00978-1](https://doi.org/10.1007/s10055-024-00978-1).

6. Zheng Jiangyi, Xie Pinhua, Tian Xin, Xu Jin, Qin Min, Hu Feng, Lv Yinsheng, Zhang Zhidong, Zhang Qiang, Liu Wenqing. Research on Automatic Wavelength Calibration of Passive DOAS Observations Based on Sequence Matching Method. *Remote Sensing*. 2024. 16. 1485. DOI: [10.3390/rs16091485](https://doi.org/10.3390/rs16091485)

7. Hu Xiaoyin, Li Ye, Zhang Haoyu, Yu Yueling, Kang Zhangyi Design and Application of Automatic Calibration Device for Multi-Channel Resistance Strain Gauge Indicator. *Journal of Physics: Conference*

Series. 2021. 2113. 012040. DOI: [10.1088/1742-6596/2113/1/012040](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2113/1/012040)

8. Jeong Doo, Kim Jong Dae Song, Hye Kim, Yu-Seop Park Chan. Efficient Calibration Tool for Thermistor Temperature Measurements. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. 764-765. 1304-1308. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.764-765.1304](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.764-765.1304)

9. Шведова В.В., Шейнич С.І. Огляд і аналіз існуючих технічних рішень побудови систем калібрування. [електронний ресурс]. URL: <https://naukam.triada.in.ua/index.php/konfeentsiji/66-tridtsyat-p-yata-vseukrajinska-praktichno-piznavalna-internet-konferentsiya/860-oglyad-i-analiz-isnyuychikh-tekhnichnikh-rishen-pobudovi-sistem-kalibruvannya>

10. ДСТУ ISO 10012:2005 Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання (ISO 10012:2003, IDT)

11. ДСТУ OIML D 3:2008 Метрологія. Відповідність засобів вимірювальної техніки законодавчим вимогам (OIML D 3:1979, IDT)

12. Порядок проведення перевірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, та оформлення її результатів. Наказ Міністерства економічного розвитку і торгівлі України №193 від 08.02.2016, Київ, Україна, 2016.

13. ДСТУ EN 61391-1:2018 Ультразвук. Ехо-імпульсні сканери. Частина 1. Методи калібрування просторових вимірювальних систем та вимірювання розсіювання точки функційного відгуку (EN 61391-1:2006, IDT; ІЕС 61391-1:2006, IDT). Зі зміною № 1:2018.

14. Довгополий С.О. Калібрування засобів вимірювальної техніки за допомогою штучних нейронних мереж. Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті. Т. 4: Конференція "Перспективи розвитку інфокомунікацій та інформаційно-вимірювальних технологій": матеріали 28-го Міжнар. молодіж. Форуму. 16–18 квіт. 2024. С. 198 – 200.

15. Величко О.М. Калібровка засобів вимірювальної техніки через інтернет: стан і перспективи впровадження *Український метрологічний журнал*. 2006. №1. С. 45-49.

16. Величко О.Н., Карпенко С.Р., Гурин Р.В. Дистанційне калібрування аналізаторів якості електричної енергії фірми FLUKE *Збірник наукових праць ОДАТРЯ*. 2013. № 1(2).

17. Єременко В.С., Мокійчук В.М., Рамазанова-Стьопкіна О.А., Редько О.О. Національні особливості калібрування. *Український метрологічний журнал*. 2017. №4. С. 12-18.

18. Мотало В.П. Аналіз методик верифікації та калібрування засобів вимірювальної техніки. *Вимірювальна техніка і метрологія*. 2019. Вип. 80, №1. С. 51-66.

19. Kibriya Ghulam, Botzheim János, Orosz Ákos, Bagi Katalin. Automatic calibration of a discrete element model of a masonry arch by swarm intelligence methods. *Computers. Structures*. 2024. 299. 107401. DOI: [10.1016/j.compstruc.2024.107401](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2024.107401)

20. Yilmaz Muhammet. An Automatic Parameter Calibration Method for the TUV Model in Streamflow Modeling. *Journal of the Institute of Science and Technology*. 2024. Vol. 14. P. 773-782. DOI: [10.21597/jist.1406563](https://doi.org/10.21597/jist.1406563)

21. Crovini E., Pamela S. J. P., Duncan A. B., JOREK Team. Automatic JOREK calibration via batch Bayesian optimization. *Phys. Plasmas*. 1 June 2024; 31 (6): 063901. DOI: [10.63/5.0191997](https://doi.org/10.63/5.0191997)

22. The JOREK non-linear MHD Code [електронний ресурс]. URL: <https://www.jorek.eu/>

23. Zheng Jianguyi, Xie Pinhua, Tian Xin, Xu Jin, Qin Min, Hu Feng, Lv Yinsheng, Zhang Zhidong, Zhang Qiang, Liu Wenqing. Research on Automatic Wavelength Calibration of Passive DOAS Observations Based on Sequence Matching Method. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. P. 1485. DOI: [10.3390/rs16091485](https://doi.org/10.3390/rs16091485)

24. Lin Zhonglin, Liu Wenchao, Gan Jinyu, Lu Jilian, Huang Feng, Wu Xianyu, Wang Weixiong. An Automatic Calibration



Method for the Field of View Aberration in a Risley-Prism-Based Image Sensor. *Sensors*. 2023. Vol. 23. P. 7777. DOI: [10.3390/s23187777](https://doi.org/10.3390/s23187777)

25. Yang Ju, Yi Hong, Li Zhangyuan Ren Changqing. Automatic calibration system of thermo-hygrometers. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. 2554. 012002. DOI: [10.1088/1742-6596/2554/1/012002](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2554/1/012002)

26. Rahman Nizar, Sya'roni Imam, Hartanto Anton, Prasetyono Agus, Subiantoro Irfan. Design and build a microcontroller based dip coater tool with an automatic calibration system. *Indonesian Physical Review*. 2024. Vol. 8. P. 48-61. DOI: [10.29303/ipr.v8i1.364](https://doi.org/10.29303/ipr.v8i1.364)

27. Zhu Lihua, Yun Qifan, Wu Zhiqiang, Chen Cheire. Design of Automatic Batch Calibration and Correction System for IMU. *Computers, Materials, Continua*. 2021. Vol. 71. P. 1489-1501. DOI: [10.32604/cmc.2022.0220](https://doi.org/10.32604/cmc.2022.0220)

28. Covolan J.P.M., Oliveira C., Sanches S.R.R. et al. Non-deterministic method for semi-automatic calibration of smartphone-based OST HMDs. *Virtual Reality*. 2024. Vol. 28, P. 77. DOI: [10.1007/s10055-024-00978-1](https://doi.org/10.1007/s10055-024-00978-1)

29. Danacı Erkan. Analyzing the Automatic Power Level Control Effect of a Signal Generator in RF Power Sensor Calibration by a Direct Comparison Transfer Method and a Millimeter Wave Application. *Sensors*. 2024. 24. DOI: [10.3390/s24020609](https://doi.org/10.3390/s24020609)

### References

1. DSTU 3989-2000. Metrolohiia. Kalibruvannia zasobiv vymiriuvanoi tekhniki. Osnovni polozhennia, orhanizatsiia, poriadok provedennia ta oformlennia rezultativ (61379). [in Ukrainian]

2. Pro metrolohiuu ta metrolohichnu diialnist. Zakon Ukrainy vid 05.06.2014 № 1314-VII. [in Ukrainian]

3. Wei Pengjin, Yan Guohang, Li Yikang, Fang Kun, Cai Xinyu, Liu Wei, Yang Jie. Automatic multi-LiDAR calibration and refinement method. *Measurement Science and*

*Technology*. 2024. 35. DOI: [10.1088/1361-6501/ad3c60](https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad3c60)

4. Chairat Sawrawit, Chaichulee Sittichok Dissaneewate, Tulaya Wangkulangkul, Piyanun, Kongpanichakul, Laliphat. AI-Assisted Assessment of Wound Tissue with Automatic Color and Measurement Calibration on Images Taken with a Smartphone. *Healthcare*. 2023. Vol. 11(2). P. 273. DOI: [10.3390/healthcare11020273](https://doi.org/10.3390/healthcare11020273)

5. Covolan João Pedro Oliveira, Claiton Sanches, S.R.R., Sementille Antonio. Non-deterministic method for semi-automatic calibration of smartphone-based OST HMDs. *Virtual Reality*. 2024. 28. DOI: [10.1007/s10055-024-00978-1](https://doi.org/10.1007/s10055-024-00978-1)

6. Zheng Jiangyi, Xie Pinhua, Tian Xin, Xu Jin, Qin Min, Hu Feng, Lv Yinsheng, Zhang Zhidong, Zhang Qiang, Liu Wenqing. Research on Automatic Wavelength Calibration of Passive DOAS Observations Based on Sequence Matching Method. *Remote Sensing*. 2024. 16. 1485. DOI: [10.3390/rs16091485](https://doi.org/10.3390/rs16091485)

7. Hu Xiaoyin, Li Ye, Zhang Haoyu, Yu Yueling, Kang Zhangyi Design and Application of Automatic Calibration Device for Multi-Channel Resistance Strain Gauge Indicator. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. 2113. 012040. DOI: [10.1088/1742-6596/2113/1/012040](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2113/1/012040)

8. Jeong Doo, Kim Jong Dae Song, Hye Kim, Yu-Seop Park Chan. Efficient Calibration Tool for Thermistor Temperature Measurements. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. 764-765. 1304-1308. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.764-765.1304](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.764-765.1304)

9. Shvedova V.V., Sheinykh S.I. Ohliad i analiz isnuichykh tekhnichnykh rishen pobudovy system kalibruvannia. Naukove myslennia [elektronne dzherelo]. URL: <https://naukam.triada.in.ua/index.php/konfeentsiji/66-tridtsyat-p-yata-vseukrajinska-praktichno-piznavalna-internet-konferentsiya/860-oglyad-i-analiz-isnuuychikh-tekhnichnikh-rishen-pobudovi-sistem-kalibruvannya> [in Ukrainian]

10. DSTU ISO 10012:2005 Systemy keruvannia vymiriuvanniam. Vymohy do protsesiv vymiriuvannia ta vymiriuvalnoho obladdannia (ISO 10012:2003, IDT) [in Ukrainian]
11. DSTU OIML D 3:2008 Metrolohii. Vidpovidnist zasobiv vymiriuvalnoi tekhniki zakonodavchym vymoham (OIML D 3:1979, IDT) [in Ukrainian]
12. Poriadok provedennia povirky zakonodavcho rehulovanykh zasobiv vymiriuvalnoi tekhniki, shcho перебуvauiut v ekspluatatsii, ta oformlennia yii rezultativ. Nakaz Ministerstva ekonomichnoho rozvytku i torhivli Ukrainy №193 vid 08.02.2016. Kyiv. Ukraina. 2016. [in Ukrainian]
13. DSTU EN 61391-1:2018 Ultrazvuk. Ekho-impulsni skanery. Chastyna 1. Metody kalibruvannia prostorovykh vymiriuvalnykh system ta vymiriuvannia rozsiuvannia tochky funktsiinoho vidhuku (EN 61391-1:2006, IDT; IEC 61391-1:2006, IDT). Zi zminoiu No 1:2018. [in Ukrainian]
14. Dovhopolyi S.O. Kalibruvannia zasobiv vymiriuvalnoi tekhniki za dopomohoiu shtuchnykh neironnykh merezh. Radioelektronika ta molod u XXI stolitti. T. 4: Konferentsiia "Perspektyvy rozvytku infokomunikatsii ta informatsiino-vymiriuvalnykh tekhnolohii": materialy 28-ho Mizhnar. molodizh. Forumu. 16–18 kvit. 2024. P. 198 – 200. [in Ukrainian]
15. Velychko O.M. Kalibrovka zasobiv vymiriuvalnoi tekhniki cherez internet: stan i perspektyvy vprovadzhennia *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*. 2006. No 1. P. 45-49. [in Ukrainian]
16. Velychko O.N., Karpenko S.R., Hurn R. V. Dystantsiine kalibruvannia analizatoriv yakosti elektrychnoi enerhii firmy FLUKE Zbirnyk naukovykh prats ODATRIa. 2013. No 1(2). [in Ukrainian]
17. Yeremenko V.S., Mokiichuk V.M., Ramazanova-Stopkina O.A., Redko O.O. Natsionalni osoblyvosti kalibruvannia. *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*. 2017. No 4, P. 12-18. [in Ukrainian]
18. Motalo V.P. Analiz metodyk veryfikatsii ta kalibruvannia zasobiv vymiriuvalnoi tekhniki. *Vymiriuvalna tekhnika i metrolohii*. 2019. Vol. 80, Iss. 1. P. 51-66. [in Ukrainian]
19. Kibriya Ghulam, Botzheim János, Orosz Ákos, Bagi Katalin. Automatic calibration of a discrete element model of a masonry arch by swarm intelligence methods. *Computers. Structures*. 2024. 299. 107401. DOI: [10.1016/j.compstruc.2024.107401](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2024.107401)
20. Yilmaz Muhammet. An Automatic Parameter Calibration Method for the TUW Model in Streamflow Modeling. *Journal of the Institute of Science and Technology*. 2024. Vol. 14. P. 773-782. DOI: [10.21597/jist.1406563](https://doi.org/10.21597/jist.1406563)
21. Crovini E., Pamela S. J. P., Duncan A. B., JOREK Team. Automatic JOREK calibration via batch Bayesian optimization. *Phys. Plasmas*. 1 June 2024; 31 (6): 063901. DOI: [10.6390/5.0191997](https://doi.org/10.6390/5.0191997)
22. The JOREK non-linear MHD Code [elektronnyi resurs]. URL: <https://www.jorek.eu/>
23. Zheng Jiangyi, Xie Pinhua, Tian Xin, Xu Jin, Qin Min, Hu Feng, Lv Yinsheng, Zhang Zhidong, Zhang Qiang, Liu Wenqing. Research on Automatic Wavelength Calibration of Passive DOAS Observations Based on Sequence Matching Method. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. P. 1485. DOI: [10.3390/rs16091485](https://doi.org/10.3390/rs16091485)
24. Lin Zhonglin, Liu Wenchao, Gan Jinyu, Lu Jilian, Huang Feng, Wu Xianyu, Wang Weixiong. An Automatic Calibration Method for the Field of View Aberration in a Risley-Prism-Based Image Sensor. *Sensors*. 2023. Vol. 23. P. 7777. DOI: [10.3390/s23187777](https://doi.org/10.3390/s23187777)
25. Yang Ju, Yi Hong, Li Zhangyuan Ren Changqing. Automatic calibration system of thermo-hygrometers. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. 2554. 012002. DOI: [10.1088/1742-6596/2554/1/012002](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2554/1/012002)
26. Rahman Nizar, Sya'roni Imam, Hartanto Anton, Prasetyono Agus, Subiantoro Irfan. Design and build a microcontroller based dip coater tool with an automatic calibration system. *Indonesian Physical Review*. 2024. Vol. 8. P. 48-61. DOI: [10.29303/ipr.v8i1.364](https://doi.org/10.29303/ipr.v8i1.364)

27. Zhu Lihua, Yun Qifan, Wu Zhiqiang, Chen Cheire. Design of Automatic Batch Calibration and Correction System for IMU. *Computers, Materials, Continua*. 2021. Vol. 71. P. 1489-1501. DOI: [10.32604/cmc.2022.0220](https://doi.org/10.32604/cmc.2022.0220)

28. Covolan J.P.M., Oliveira C., Sanches S.R.R. et al. Non-deterministic method for semi-automatic calibration of smartphone-based OST HMDs. *Virtual Reality*. 2024. Vol. 28, P. 77. DOI: [10.1007/s10055-024-00978-1](https://doi.org/10.1007/s10055-024-00978-1)

29. Danacı Erkan. Analyzing the Automatic Power Level Control Effect of a Signal Generator in RF Power Sensor Calibration by a Direct Comparison Transfer Method and a Millimeter Wave Application. *Sensors*. 2024. 24. DOI: [10.3390/s24020609](https://doi.org/10.3390/s24020609)

## REVIEW OF MODERN TOOLS AND SYSTEMS FOR AUTOMATIC CALIBRATION OF EQUIPMENT

A. O. Koliesnychenko, S. Yu. Pliesnetsov,  
Yu. O. Pliesnetsov

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; 2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine;  
e-mail: [serhii.pliesnetsov@khp.edu.ua](mailto:serhii.pliesnetsov@khp.edu.ua)