

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ”

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

УДК 681.2:004.8:004.7

ДИСЕРТАЦІЯ

**ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ЛАБОРАТОРНИХ
ВИПРОБУВАНЬ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ВИМІРЮВАННЯ ТА
КОГНІТИВНОЇ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ**

152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

15 – Автоматизація та приладобудування

Подается на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів
мають посилання на відповідне джерело.

_____ Олег ЧЕРВОТОКА

Науковий керівник: Квасніков Володимир Павлович, Заслужений метролог України,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Червотока О.В. Інформаційно-вимірювальна технологія лабораторних випробувань на основі інтелектуального вимірювання та когнітивної обробки результатів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка (15 – Автоматизація та приладобудування). – Національний університет “Київський авіаційний інститут”, Міністерство освіти і науки України, Київ, 2026.

Дисертація присвячена вирішенню науково-практичної задачі підвищення точності, відтворюваності і трасованості інтелектуальних вимірювань та інтегральної достовірності когнітивної обробки в задачах лабораторних випробувань із забезпеченням адаптивності на усіх етапах замкненого інформаційно-вимірювального циклу на основі інформаційно-вимірювальної технології лабораторних випробувань.

У першому розділі розкрито актуальність дисертаційної роботи та висвітлено сучасний стан розвитку інформаційно-вимірювальних технологій лабораторних випробувань. Проаналізовано тенденції переходу від окремих засобів вимірювальної техніки і автоматизованих робочих місць до інтелектуальних, інтегрованих і кіберфізичних середовищ випробувальних лабораторій. Систематизовано наявні технологічні рішення, нормативні, метрологічні й архітектурні вимоги до їх побудови. Розглянуто підходи до організації інтелектуального вимірювання, граничної обробки даних, забезпечення простежуваності та адаптивності сенсорних мереж у процесах лабораторних випробувань. Проведене узагальнення дало змогу встановити, що існуючі методи та інформаційно-вимірювальні системи не забезпечують одночасного досягнення потрібного рівня точності, відтворюваності, достовірності й трасованості результатів зі збереженням адаптивності у межах єдиного замкненого контуру, на основі чого сформовано науково-практичну задачу дослідження.

У другому розділі розроблено метод інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань, орієнтований на зниження впливу

метрологічного шуму та аномалій на формування інтегрального результату вимірювання. У розділі сформовано модель впливу метрологічного шуму та аномалій на результати інтелектуальних вимірювань, визначено модель вхідних даних для дворівневого процесу інтелектуального вимірювання. Представлено основні етапи методу у формалізованому вигляді, подано його структурно-логічну схему та алгоритм функціонування. Наведено результати експериментальної та порівняльної валідації розробленого методу, що дало змогу підтвердити його ефективність в умовах метрологічного шуму та аномалій під час лабораторних випробувань.

У третьому розділі розроблено метод когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань, призначений для їх когнітивного узагальнення, онтологічної інтерпретації та переходу до змістовного представлення стану сенсорної мережі під час лабораторних випробувань. Сформовано модель вхідних даних для когнітивної обробки і модель когнітивного узагальнення та інтерпретації результатів інтелектуальних вимірювань, яка поєднує результати поточного циклу, релевантні попередні спостереження, онтологічний опис предметної області та когнітивну карту переходів між ситуаціями і рішеннями. Подано формалізований опис основних етапів методу, його структурно-логічну схему та алгоритм реалізації в межах одного циклу когнітивної обробки. Наведено результати симуляційної та порівняльної валідації, що дало змогу підтвердити ефективність розробленого методу за показником інтегральної достовірності результатів когнітивної обробки.

У четвертому розділі розроблено інтелектуальну інформаційно-вимірювальну систему лабораторних випробувань на основі адаптивно реконфігурованої сенсорної мережі, яка поєднує метод інтелектуального вимірювання та метод когнітивної обробки в єдиний замкнений інформаційно-вимірювальний цикл OODA. Сформовано формалізовану модель адаптивної реконфігурації сенсорної мережі, подано структурно-функціональну схему реалізації системи та представлення інформаційних потоків, станів і переходів у процесі її функціонування у графовому і табличному вигляді. Окремо розглянуто функціонування системи в замкненому циклі вимірювання та реконфігурації та супровідний блок захисту інформації для

критичних інформаційних потоків. Наведено результати обчислювального симуляційного та натурного стендового експериментів, виконано порівняння з аналогами та підтверджено ефективність розробленої системи за показниками точності, трасованості при збереженні адаптивності.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше розроблено метод інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань на основі формалізованого механізму локального та глобального зважування вимірювальних коефіцієнтів шляхом використання бутстрепоної агрегації за рахунок прогнозування вибірок, що дозволило забезпечити стійкість інтегрального результату вимірювання до впливу метрологічного шуму та аномалій і підвищити точність та відтворюваність результатів інтелектуальних вимірювань;

- вперше розроблено метод когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань на основі дворівневого зважування за рахунок когнітивного агрегування, інтегрованого з онтологічною інтерпретацією шляхом урахування метрологічних вимог, що дозволило підвищити достовірність результатів обробки;

- удосконалено модель когнітивної реконфігурації сенсорної мережі на основі дворівневого інтелектуального зважування вимірюваних параметрів за рахунок когнітивного управління, що дозволило підвищити точність і трасованість результатів вимірювань при забезпеченні адаптивності на всіх етапах замкненого інформаційно-вимірювального циклу OODA.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленої інформаційно-вимірювальної технології лабораторних випробувань та її структурних складових під час проєктування і реалізації адаптивних інформаційно-вимірювальних систем лабораторних випробувань. Результати роботи доведені до структурно-логічного та системотехнічного забезпечення, придатного для використання в інженерній практиці інформаційно-вимірювального забезпечення лабораторних випробувань. Розроблено відповідне алгоритмічне забезпечення та стенд, що дозволило виконати верифікацію розроблених методів та інформаційної системи.

За результатами обчислювального симуляційного та натурного стендового експериментів підтверджено ефективність розробленої інформаційно-вимірювальної технології лабораторних випробувань на системному рівні, при цьому за результатами порівняння з аналогами досягнуто підвищення точності результатів вимірювань на 38 % і трасованості на 36 %, а натурний стендовий експеримент підтвердив працездатність системи та збереження встановлених тенденцій.

Практична цінність роботи підтверджена актами впровадження основних результатів дисертаційного дослідження: в ТОВ “МОРОЗ ТЕХ” – для удосконалення інформаційно-вимірювального супроводу технологічних процесів, розвитку процедур контролю та розширення можливостей адаптивної організації вимірювальних контурів і для підвищення ефективності контролю якості, об’єктивності оцінювання контрольованих параметрів та покращення обробки вимірювальної інформації та в освітній процес Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького при викладанні освітніх компонентів: “Проектування та розробка IoT”, “Вбудовані системи збору та обробки даних” та “Обробка інформації в режимі реального часу” здобувачам вищої освіти рівня бакалавр та магістр.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система, лабораторні випробування, інтелектуальне вимірювання, математична модель, похибка вимірювань, когнітивна обробка, сенсорна мережа, метрологічний шум та трасованість, калібрування, вібраційні випробування, гіроскоп, алгоритми СЕТ-шифрування, інтегральна достовірність.

ABSTRACT

Chervotoka O.V. Information-measuring technology for laboratory testing based on intelligent measurement and cognitive processing of measurement results. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Specialty 152 – Metrology and information-measuring technique (15 – Automation and instrumentation). – National university “Kyiv aviation institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

The thesis is devoted to solving the scientific and practical problem of improving the accuracy, reproducibility, and traceability of intelligent measurements, as well as the integral reliability of cognitive processing in laboratory testing tasks, while ensuring adaptability at all stages of a closed-loop information-measuring cycle based on an information-measuring technology for laboratory testing.

In the first chapter, the relevance of the thesis is substantiated, and the current state of information-measuring technologies’ development for laboratory testing is examined. The tendencies of transition from individual measuring instruments and automated workstations to intelligent, integrated, and cyber-physical environments of testing laboratories are analyzed. Existing technological solutions, as well as the regulatory, metrological, and architectural requirements for their development, are systematized. Approaches to the organization of intelligent measurement, edge data processing, and the provision of traceability and adaptability of sensor networks in laboratory testing processes are considered. The conducted generalization made it possible to establish that existing methods and information-measuring systems do not ensure the simultaneous achievement of the required levels of accuracy, reproducibility, reliability, and traceability of results while preserving adaptability within a single closed-loop framework, which served as the basis for formulating the scientific and practical problem of the research.

In the second chapter, a method of intelligent measurement in sensor networks for laboratory testing is developed, aimed at reducing the influence of metrological noise and anomalies on the formation of the integral measurement result. The chapter presents a model of the metrological noise and anomalies influence on the results of intelligent

measurements and defines an input data model for the two-level process of intelligent measurement. The main stages of the method are presented in a formalized form, together with its structural-logical scheme and operation algorithm. The results of experimental and comparative validation of the developed method are provided, which made it possible to confirm its effectiveness under conditions of metrological noise and anomalies during laboratory testing.

In the third chapter, a method for cognitive processing of intelligent measurement results is developed, intended for their cognitive generalization, ontological interpretation, and transition to a meaningful representation of the sensor network state during laboratory testing. An input data model for cognitive processing and a model of cognitive generalization and interpretation of intelligent measurement results are formed, combining the results of the current cycle, relevant previous observations, an ontological description of the subject domain, and a cognitive map of transitions between situations and decisions. A formalized description of the method's main stages, its structural-logical scheme, and the implementation algorithm within a single cognitive processing cycle are presented. The results of simulation-based and comparative validation are provided, which made it possible to confirm the effectiveness of the developed method in terms of the integral reliability of cognitive processing results.

In the fourth chapter, an intelligent information-measuring system for laboratory testing based on an adaptively reconfigurable sensor network is developed, integrating the intelligent measurement method and the cognitive processing method into a unified closed-loop OODA information-measuring cycle. A formalized model of adaptive sensor network reconfiguration is developed, and a structural-functional scheme of system implementation, as well as the representation of information flows, states, and transitions during its operation in graph and tabular form, are presented. The functioning of the system in a closed-loop cycle of measurement and reconfiguration, together with the accompanying information protection unit for critical information flows, is considered separately. The results of computational simulation and full-scale bench experiments are presented, comparisons with existing counterparts are carried out, and the effectiveness of

the developed system in terms of accuracy and traceability, while preserving adaptability, is confirmed.

Scientific novelty of the obtained results:

- for the first time, a method of intelligent measurement in sensor networks for laboratory testing has been developed on the basis of a formalized mechanism of local and global weighting of measurement coefficients using bootstrap aggregation through sample prediction, which made it possible to ensure the robustness of the integral measurement result to the influence of metrological noise and anomalies and to improve the accuracy and reproducibility of intelligent measurement results;
- for the first time, a method for cognitive processing of intelligent measurement results has been developed on the basis of two-level weighting through cognitive aggregation integrated with ontological interpretation by taking metrological requirements into account, which made it possible to improve the reliability of processing results;
- the model of cognitive reconfiguration of a sensor network based on two-level intelligent weighting of measured parameters through cognitive control has been improved, which made it possible to enhance the accuracy and traceability of measurement results while ensuring adaptability at all stages of the closed-loop OODA information-measuring cycle.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of using the developed information-measuring technology and its structural components in the design and implementation of adaptive information-measuring systems for laboratory testing. The results of the study have been brought to the level of structural-logical and system-engineering support suitable for use in the engineering practice of information-measuring support for laboratory testing. Appropriate algorithmic support and an experimental bench have been developed, which made it possible to verify the developed methods and the information-measuring system.

The results of computational simulation and full-scale bench experiments confirmed the effectiveness of the developed information-measuring technology for laboratory testing at the system level. In comparison with existing counterparts, an increase in measurement accuracy by 38% and in traceability by 36% was achieved, while the full-

scale bench experiment confirmed the operability of the system and the preservation of the established trends.

The practical value of the work is confirmed by acts of implementation of the main results of the thesis: at MOROZ TECH LLC for improving the information-measuring support of technological processes, developing control procedures, and expanding the capabilities for adaptive organization of measurement loops, as well as for increasing the efficiency of quality control, the objectivity of controlled-parameter assessment, and the processing of measurement information as well as at The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy in teaching the academic disciplines “Design and Development of IoT”, “Embedded Systems for Data Acquisition and Processing”, and “Real-Time Information Processing” to Bachelor’s and Master’s degree students.

Keywords: information and measurement system, laboratory testing, intelligent measurement, mathematical model, measurement error, cognitive processing, sensor network, metrological noise and traceability, calibration, vibration testing, gyroscope, CET encryption algorithms, integral reliability.

Список опублікованих праць за темою дисертації:

– *статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України (категорія “Б”):*

1. Червотока О.В., Тарасенко Я.В. Метод інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2025. № 84(4). С. 99-106. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-12>

2. Червотока О.В., Тарасенко Я.В. Метод когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань у сенсорних мережах лабораторних випробувань. *Наукові праці ВНТУ*. 2025. № 4. DOI: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-4-39-45>

3. Червотока О.В., Квасніков В.П. Інтелектуальна інформаційно-вимірювальна система на основі адаптивно-реконфігурованої сенсорної мережі для лабораторних випробувань. *Збірник наукових праць ОДАТРЯ*. 2025. № 2 (27). С. 95-101. DOI: <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2025-2-27-95-101>

– *статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus:*

4. Tarasenko Ya., Chervotoka O., Orlov S., Lada N., Shapoval V., Piskozub A. A model of a secure information system for cognitive data processing in IoT sensor networks for laboratory climatic testing. *CEUR WS*. 2025. Vol. 4042. P. 90-104. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17501341>

5. Tarasenko Ya., Orlov S., Chervotoka O., Dmitriiev O., Lada N., Osadchyi S. Model of intelligent protection for temperature-based transmitting channels in laboratory sensor networks with embedded information processing. *CEUR WS*. 2025. Vol. 4126. P. 159-170. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.20382882>

– *наукові праці, що засвідчують апробацію результатів дисертації:*

6. Chervotoka O.V., Tarasenko Ya.V., Zaetz I.I. Prospects for the use of Internet of Things technology in the process of laboratory vibration tests of military UAVs. *Актуальні проблеми військово-технічної політики та напрями озброювання Збройних Сил України в умовах воєнного стану: збірник тез доповідей X*

міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 04-05 грудня 2024 р.). 2024. С. 347-348.

7. Тарасенко Я.В., Червотока О.В. Деякі аспекти когнітивної обробки результатів лабораторних випробувань. *Проблемні питання застосування технологій штучного інтелекту в науці та обороні*: збірник тез доповідей I науково-практичної конференції (м. Київ, 30 квітня 2025 р.). 2025. С. 164-166.

8. Червотока О.В., Тарасенко Я.В. Проблеми граничних обчислень в інтелектуальних сенсорних системах лабораторних вимірювань. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси*: збірник тез доповідей XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 20-21 травня 2025 р.). 2025. С. 184-185.

9. Орлов С.В., Червотока О.В., Геращенко М.О. Наукові протиріччя та шляхи оптимізації лабораторних випробувань роботизованих пристроїв та безпілотних літальних апаратів. *Випробування і сертифікація озброєння та військової техніки*: збірник тез доповідей XXV науково-технічної конференції Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (м. Черкаси, 25 вересня 2025 р.). 2025. С. 516-517.

10. Chervotoka O.V., Tarasenko Ya.V. Regulatory and standards support for the application of intelligent information and measurement technology. *Scientific Research in XXI Century: the Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference* (Ottawa, November 16-18, 2025). Ottawa, Canada. P. 186-187.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1. СТАН, ПРОБЛЕМИ ТА НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ	23
1.1 Сучасні виклики та тенденції розвитку інформаційно-вимірювального забезпечення випробувальних лабораторій.....	23
1.2 Аналіз технологічних рішень у сфері інформаційно-вимірювального забезпечення лабораторних випробувань.....	28
1.3 Нормативне забезпечення та вимоги до інформаційно-вимірювальних технологій лабораторних випробувань.....	36
1.4 Обмеження існуючих методів та інформаційно-вимірювальних систем лабораторних випробувань.....	39
1.5 Постановка задачі дослідження.....	42
1.6 Висновки до розділу 1.....	44
РОЗДІЛ 2. МЕТОД ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ВІМІРЮВАННЯ В СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ.....	46
2.1 Модель впливу метрологічного шуму та аномалій на результати інтелектуальних вимірювань в сенсорних мережах лабораторних випробувань ..	46
2.2 Модель вхідних даних для дворівневого процесу інтелектуального вимірювання	53
2.3 Формалізоване представлення методу інтелектуальних вимірювань в сенсорних мережах лабораторних випробувань та алгоритм його роботи	57
2.4 Експериментальна та порівняльна перевірка методу інтелектуальних вимірювань. Умови його застосовності та обмеження	64
2.5 Висновки до розділу 2.....	73
РОЗДІЛ 3. МЕТОД КОГНІТИВНОЇ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ВІМІРЮВАНЬ У СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ	76
3.1 Модель вхідних даних для когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань	76

3.2 Формалізоване представлення методу когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань та алгоритм його реалізації.....	81
3.3 Модель когнітивного узагальнення та інтерпретації результатів інтелектуальних вимірювань.....	90
3.4 Експериментальна та порівняльна валідація методу когнітивної обробки. Умови застосовності та обмеження	97
3.5 Висновки до розділу 3.....	105
РОЗДІЛ 4. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ НА ОСНОВІ АДАПТИВНО РЕКОНФІГУРОВАНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ	107
4.1 Формалізована модель адаптивної реконфігурації сенсорної мережі лабораторних випробувань.....	107
4.2 Структурно-функціональна організація інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи лабораторних випробувань.....	112
4.3 Функціонування інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи лабораторних випробувань у замкнутому циклі вимірювання та адаптивної реконфігурації сенсорної мережі	117
4.4 Експериментальна та порівняльна валідація інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи. Умови застосовності та обмеження	122
4.5 Висновки до розділу 4.....	140
ВИСНОВКИ	142
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	144
ДОДАТКИ	154
Додаток А	155
Додаток Б.....	159
Додаток В	170
Додаток Г.....	170

ВСТУП

В умовах сучасного розвитку випробувальних лабораторій відбувається перехід від використання окремих засобів вимірювальної техніки чи локальної автоматизації вимірювальних процесів до побудови інтегрованих інформаційно-вимірювальних середовищ включно з кіберфізичними. Така трансформація зумовлена загальними тенденціями автоматизації лабораторій, розвитком автономних лабораторій, цифрової метрології, граничної обробки даних у сенсорних мережах та впровадженням інтелектуальних процедур аналізу вимірювальної інформації [1-9]. Вагомий внесок у розвиток зазначених напрямків зробили: Y. Nam, H.-D. Park, G. Tom, N.J. Szymanski, R.J.C. Brown, J.-T. Janssen, L. Wright, C.R.H. Barbosa та ін.

Суттєвий прошарок сучасних досліджень присвячений побудові сенсорних та IoT-орієнтованих вимірювальних середовищ, розподілених інформаційно-вимірювальних систем, кіберфізичних лабораторних інфраструктур і мережових засобів передачі та первинної обробки вимірювальних даних [13-24, 33-35, 51-52]. У цьому напрямку відомими є праці наступних зарубіжних та вітчизняних учених: M.S. BenSaleh, C.-U. Lei, H. Kim, E. Saavedra, P. Daponte, P. Cofta, R.H. Schmitt, C. Voigtmann, R. Saida, E. Elsts, Н. Кучука, А. Крипича, Р. Дячка, О. Сердюка, М. Труфана, М. Павлишина, А. Литовченка, І. Гусара, А. Дудніка, А. Дружиніна, О. Кутракова. Згадані праці доводять доцільність переходу до розподілених і мережево-орієнтованих вимірювальних рішень.

Важливий науковий напрям становлять дослідження, присвячені забезпеченню метрологічної надійності, урахуванню невизначеності, виявленню аномалій і відмов сенсорів, семантичній інтерпретації сенсорних даних, злиттю різнорідної вимірювальної інформації та адаптивній реконфігурації сенсорних мереж [41, 53-56, 72-82]. Серед дослідників, чиї результати є вагомими для розвитку даного спрямування є: P. Harris, D. Li, V. Reppa, A. Bröring, G.M. Honti, J. Liu, S. Pal, M. Gruber, O. Gnawali, L.P. Carloni. Їх роботи формують теоретичне підґрунтя щодо окремих аспектів побудови інтелектуальних вимірювальних рішень.

У задачах лабораторних випробувань застосування розглянутих рішень недостатньо для виконання специфічних вимог. На відміну від інших прикладних сфер застосування зазначених напрацювань, до лабораторних випробувань висуваються підвищені вимоги щодо точності, відтворюваності, темпоральної узгоджуваності, інтерпретованості, простежуваності та можливості повторного використання у регламентованих процедурах [12, 36-50]. За таких умов недостатньо впровадження окремих технологічних рішень. Існує потреба у цілісній інформаційно-вимірювальній технології, яка здатна поєднати формування інтегрального результату інтелектуального вимірювання з його когнітивним узагальненням та інтерпретацією, урахуванням метрологічних вимог, накопиченням історії спостережень й адаптивною реконфігурацією сенсорної мережі.

Незважаючи на наявність значних наукових напрацювань у напрямках цифрової метрології, сенсорних мереж, когнітивної обробки в інформаційно-аналітичних системах, недостатньо дослідженим залишається питання розробки інформаційно-вимірювальної технології лабораторних випробувань з когнітивною складовою із замкненим контуром вимірювальних процедур. Існуючі підходи не забезпечують одночасного виконання вимог до точності, надійності, достовірності, адаптивності, трасованості та інтерпретованості результатів вимірювань у розподілених сенсорних мережах лабораторних випробувань в умовах метрологічного шуму, аномалій і зміни режимів функціонування.

Актуальною є науково-практична задача підвищення точності, надійності, достовірності та трасованості інтелектуальних вимірювань шляхом розробки інформаційно-вимірювальної технології лабораторних випробувань з когнітивною складовою, яка поєднує інтелектуальне вимірювання, когнітивну обробку результатів вимірювань та їх системну інтеграцію в інтелектуальній інформаційно-вимірювальній системі з адаптивною реконфігурацією сенсорної мережі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Одержані в дисертації результати пов'язані з науково-дослідними роботами Черкаського державного технологічного університету: «Методи та засоби синтезу груп симетричних двухоперандних операцій криптографічного кодування для

малоресурсних криптоалгоритмів» (ДР № 0121U114390) та «Дослідження шляхів розвитку потокового шифрування на основі криптографічного кодування» (ДР № 0121U114389), у яких автор був виконавцем.

Тематичне спрямування дисертаційної роботи узгоджується з пріоритетними тематичними напрямами, визначеними такими нормативними документами: Постанові КМУ від 30.04.2024 № 476 “Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 31 грудня року, наступного після припинення або скасування воєнного стану в Україні” розділу “Інформаційні та комунікаційні технології”, зокрема положенням: “Кіберфізичні системи. Інтернет речей. Робототехніка. Комп’ютерна обробка сигналів різних видів та походження” та “Інтелектуальні інтерактивні інформаційно-аналітичні системи. Інтегровані системи баз даних та знань. Національні інформаційні ресурси”; Постанові Президії НАН України від 10.01.2024 № 8 “Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2024-2028 роки”, а саме: п. 1.2.4.8 – “Розроблення теоретико-методологічних засад створення комп’ютерних інформаційно-аналітичних систем та засобів комп’ютерного моделювання сценаріїв аналітичної діяльності”; п. 1.2.4.9 – “Розроблення методів та математичних моделей аналізу даних. Створення баз даних і знань, систем пошуку та розповсюдження комп’ютерної інформації”; п. 1.2.4.12 – “Розроблення і дослідження методів об’єднання різномірної інформації в інтегрованих системах моніторингу зовнішньої обстановки”.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є підвищення точності, відтворюваності та метрологічної трасованості вимірювань, а також інтегральної достовірності результатів когнітивної обробки із забезпеченням адаптивності на всіх етапах замкненого інформаційно-вимірювального циклу шляхом розроблення інформаційно-вимірювальної технології лабораторних випробувань.

Для досягнення мети були поставлені наступні наукові **задачі**:

1. Розробити метод інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань для забезпечення стійкості інтегрального результату вимірювання до впливу метрологічного шуму та аномалій.

2. Розробити метод когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань для їх когнітивного узагальнення та онтологічної інтерпретації.

3. Удосконалити модель когнітивної реконфігурації сенсорної мережі як основу інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи лабораторних випробувань для забезпечення адаптивності на всіх етапах замкненого інформаційно-вимірювального циклу.

Об'єктом дослідження роботи є інформаційно-вимірювальні процеси лабораторних випробувань.

В якості **предмета дослідження** виступають методи, моделі, алгоритми та структурно-функціональні рішення інтелектуального вимірювання, когнітивної обробки, інтерпретації результатів і адаптивної реконфігурації сенсорної мережі у замкненому інформаційно-вимірювальному циклі лабораторних випробувань.

Методи дослідження.

У роботі використано методи аналізу, узагальнення, систематизації та критичного зіставлення наукових джерел і нормативного забезпечення – для дослідження сучасного стану інформаційно-вимірювальних технологій лабораторних випробувань; методи системного аналізу, декомпозиції, формалізації та математичного моделювання – для побудови моделей, методів і вдосконаленої моделі адаптивної реконфігурації сенсорної мережі; методи прогнозування вибірок, бутстрепоної агрегації, когнітивного агрегування, онтологічного та когнітивного моделювання – для побудови й реалізації процедур інтелектуального вимірювання та когнітивної обробки результатів; методи алгоритмізації, структурно-функціонального синтезу, табличного і графового формалізованого подання – для побудови алгоритмів реалізації розроблених методів і структурно-функціональної схеми інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи; методи комп'ютерного імітаційного моделювання, обчислювального та натурного

стендового експерименту – для валідації розроблених рішень; методи порівняльного аналізу, оцінювання ефективності та інтерпретації експериментальних результатів – для зіставлення з аналогами, визначення умов застосовності та обмежень.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. *Вперше розроблено* метод інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань на основі формалізованого механізму локального та глобального зважування вимірювальних коефіцієнтів шляхом використання бутстрепової агрегації за рахунок прогнозування вибірок, що дозволило забезпечити стійкість інтегрального результату вимірювання до впливу метрологічного шуму та аномалій і підвищити точність та відтворюваність результатів інтелектуальних вимірювань.

2. *Вперше розроблено* метод когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань на основі дворівневого зважування за рахунок когнітивного агрегування, інтегрованого з онтологічною інтерпретацією шляхом урахування метрологічних вимог, що дозволило підвищити достовірність результатів обробки.

3. *Удосконалено* модель когнітивної реконфігурації сенсорної мережі на основі дворівневого інтелектуального зважування вимірюваних параметрів за рахунок когнітивного управління, що дозволило підвищити точність і трасованість результатів вимірювань при забезпеченні адаптивності на всіх етапах замкненого інформаційно-вимірювального циклу OODA.

Практичне значення одержаних результатів. Одержані в дисертаційному дослідженні результати: технологія, методи та модель можуть бути використані для проєктування і реалізації інтелектуальних інформаційно-вимірювальних систем лабораторних випробувань, інтегрованих у повний замкнений цикл OODA.

Практична цінність роботи полягає у доведенні одержаних наукових результатів до алгоритмічного, структурно-логічного та системотехнічного забезпечення, придатного для використання в інженерній практиці інформаційно-вимірювального забезпечення лабораторних випробувань:

1. Розроблено алгоритмічне забезпечення блоку інтелектуального вимірювання в сенсорній мережі лабораторних випробувань, який забезпечує

визначення локальних і глобальних вагових коефіцієнтів, зниження впливу метрологічного шуму та аномалій.

2. Розроблено алгоритмічне забезпечення блоку когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань, який забезпечує когнітивне агрегування вимірювальної інформації, її онтологічну інтерпретацію та формування підґрунтя для прийняття рішень щодо реконфігурації сенсорної мережі.

3. Розроблено інтелектуальну інформаційно-вимірювальну систему лабораторних випробувань на основі адаптивно реконфігурованої сенсорної мережі, що забезпечує системну інтеграцію процедур інтелектуального вимірювання, когнітивної обробки, прийняття рішень і реконфігурації у межах повного замкнутого циклу OODA.

4. Реалізовано структурно-функціональні механізми інтеграції процедур інтелектуального вимірювання, когнітивної обробки, прийняття рішень і реконфігурації сенсорної мережі в інтелектуальній інформаційно-вимірювальній системі лабораторних випробувань; їх подано у вигляді структурно-функціональної схеми, що створює основу для моделювання та подальшого впровадження таких систем у практику автоматизованих лабораторних випробувань.

Отримані результати дисертаційної роботи рекомендовані до практичного використання:

1) у діяльності випробувальних лабораторій підприємств, науково-дослідних установ, центрів випробувань та сертифікації – в інформаційно-вимірювальних контурах лабораторних випробувань на основі сенсорних мереж;

2) у проєктно-конструкторських підрозділах і на підприємствах-розробниках випробувального обладнання та вимірювальних комплексів – у системах інформаційно-вимірювального забезпечення лабораторних випробувань на основі сенсорних мереж з адаптивною реконфігурацією;

3) у підрозділах метрологічного забезпечення, технічного контролю та моніторингу складних технічних об'єктів – у підсистемах зважування сенсорних каналів та інтегрування різнорідних вимірювальних даних;

4) у науково-дослідних установах та експериментальних лабораторних комплексах – у засобах моделювання, валідації, порівняльного оцінювання та визначення умов застосовності інформаційно-вимірювальних технологій лабораторних випробувань;

5) у закладах вищої освіти сфери управління Міністерства освіти і науки України – в освітніх компонентах і навчальних дисциплінах, пов'язаних з інформаційно-вимірювальними системами, сенсорними мережами, цифровою метрологією та інтелектуальною обробкою вимірювальної інформації.

Практична цінність роботи підтверджена актами впровадження основних результатів дисертаційного дослідження: для удосконалення інформаційно-вимірювального супроводу технологічних процесів, розвитку процедур контролю та розширення можливостей адаптивної організації вимірювальних контурів і для підвищення ефективності контролю якості, об'єктивності оцінювання контрольованих параметрів та покращення обробки вимірювальної інформації на ТОВ “МОРОЗ ТЕХ” (Акти впровадження від 11.03.2026 р.); в освітній процес Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького на кафедрі інформаційних технологій при викладанні освітніх компонентів “Проектування та розробка IoT”, “Вбудовані системи збору та обробки даних” та “Обробка інформації в режимі реального часу” (Акт впровадження від 03.04.2026 р.).

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійно виконаною завершеною працею здобувача. Сформовані наукові положення та практичні результати, що виносяться на захист, отримані автором самостійно.

У друкованих працях, опублікованих у співавторстві автору належить: метод інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань [59], метод когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань [71], вдосконалена модель когнітивної реконфігурації сенсорних мереж, інтелектуальна інформаційно-вимірювальна система розподіленого типу, представлена у формі гібридної структурно-логічної моделі [81], когнітивна карта обробки даних в IoT-орієнтованих сенсорних мережах на основі переходів концептів онтології лабораторних випробувань, принципова схема взаємодії компонентів системи та

формування алгоритму потокового шифрування при обміні вимірювальною інформацією з блоком когнітивної обробки [74], модульна композиція інтелектуальної складової інформаційно-вимірювальної системи лабораторних випробувань, що включає аналітичний, керуючий, прогностичний та інтегровальний контури [83], узагальнення наукових протиріч підготовки та проведення лабораторних випробувань на основі цифрового моделювання і системної інтеграції інформаційних технологій [12], обґрунтування доцільності використання IoT-сенсорних мереж у лабораторних вібраційних випробуваннях для лабораторної інтеграції у єдиному вимірювальному середовищі [25], узагальнення нормативного забезпечення застосування інтелектуальних інформаційно-вимірювальних технологій і висновки щодо сукупності вимог до їх застосування [50], систематизація проблеми граничних обчислень в інтелектуальних сенсорних системах лабораторних вимірювань та виокремлення ризиків [58], узагальнення концептуальних засад когнітивної обробки результатів лабораторних випробувань і підготовлені положення щодо переходу від інтелектуальної сенсорної мережі до когнітивної інформаційної системи [70].

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційного дослідження були представлені на 7 всеукраїнських і міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях і семінарах (включно із закордонними):

1. X міжнародна науково-технічна конференції “Актуальні проблеми військово-технічної політики та напрями озброювання Збройних Сил України в умовах воєнного стану”, 04-05 грудня 2024 р., м. Київ.

2. I науково-практична конференція “Проблемні питання застосування технологій штучного інтелекту в науці та обороні”, 30 квітня 2025 р., м. Київ.

3. XVIII Міжнародна науково-практична конференція “Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси”, 20-21 травня 2025 р., м. Київ.

4. Workshop (CSDP-II) “Cyber security and data protection”, July 31, 2025, Lviv, Ukraine.

5. XXV науково-технічна конференція Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки

“Випробування і сертифікація озброєння та військової техніки”, 25 вересня 2025 р., м. Черкаси.

6. International Workshop (AISSLE-2025) “Applied Intelligent Security Systems in Law Enforcement”, October 30-31, 2025, Vinnytsia, Ukraine.

7. XVIII International Scientific and Practical Conference “Scientific Research in XXI Century”, November 16-18, 2025, Ottawa, Canada.

Публікації. Результати дослідження висвітлені в 10 наукових публікаціях, у тому числі 5 статтях [59, 71, 74, 81, 83], з яких 3 опубліковані у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України (категорія “Б”) [59, 71, 81], 2 у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus [74, 83], 5 тезах доповідей на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях [12, 25, 50, 58, 70] з яких 1, опублікована у закордонному виданні [50] (Канада).

Структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 173 сторінках, з яких 130 сторінок основного тексту та складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (налічує 94 джерела), 4 додатків та включає 23 рисунки і 6 таблиць.

РОЗДІЛ 1

СТАН, ПРОБЛЕМИ ТА НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ

1.1 Сучасні виклики та тенденції розвитку інформаційно-вимірjuвального забезпечення випробувальних лабораторій

На сучасному етапі розвитку випробувальних лабораторій відбувається перехід від застосування вимірjuвальних окремих засобів вимірjuвальної техніки та автоматизованих робочих місць до впровадження інтегрованих інформаційно-вимірjuвальних середовищ, у тому числі кіберфізичного типу. У таких середовищах окремі процеси вимірjuвання, контролю якості результатів чи підтримки прийняття рішень виступають складовою єдиного технологічного процесу автоматизованих або інтелектуальних вимірjuвань. Оглядова робота [1] доводить, що процеси автоматизації охоплюють доаналітичні, аналітичні та постаналітичні етапи як єдине структурне рішення, відмінне від автоматизацій окремих операцій в галузях лабораторних досліджень. Для випробувальних лабораторій така тенденція визначає зміну ролі інформаційно-вимірjuвального забезпечення у процесах випробувань. Роль такого інформаційно-вимірjuвального забезпечення полягає не лише у реєстрації параметрів, а в узгодженому функціонуванні інфраструктури випробувальної лабораторії.

Подальший розвиток сучасних напрямків автоматизації функціонування випробувальних лабораторій проявляється у переході від автоматизованих до автономних та самокерованих лабораторій. Робота [2] демонструє таку тенденцію на прикладі сучасних хімічних та матеріалознавчих лабораторій. У таких лабораторіях розвиток забезпечення вимірjuвальних процесів проявляється в інтеграції з алгоритмічним плануванням експериментів, роботизованим виконанням операцій та автоматизованим прийняттям рішень щодо виконання подальших дій, що і відносить лабораторні комплекси подібного типу до кіберфізичних систем, у яких автоматизоване прийняття рішень проявляється і у фізичному світі в якості

виконавчих механізмів. У роботі [3] підтверджується практичний аспект застосування описаної логіки. Відзначаються напрямки успішного впровадження замкнених циклів, які передбачають планування, виконання, аналіз та повторення. Значення подібних тенденцій для випробувальних лабораторій полягає у зростаючих вимогах до інформаційно-вимірального забезпечення. У таких рамках інформаційно-вимірального забезпечення виступає технологічною основою для підтримки як спостережень, так і адаптивного процесу випробувань.

Описані тенденції розвитку відображають загальні сучасні напрямки цифрової трансформації метрології. Відповідно до положень роботи [4], існує потреба повного автоматизованого представлення одиниць, значень та невизначеностей, що змінює підхід роботи з вимірними даними. Зазначене твердження нормується Резолюцією 27-ї Генеральної конференції мір і ваг [5], у якій прямо вказано, що для підтримки довіри до вимірювань у цифровому суспільстві існує потреба у створенні повного цифрового представлення СІ. Основним викликом сучасності для випробувальних лабораторій є робота з даними, які на відміну від цифрових записів результатів вимірювань, придатні до автоматизованої інтерпретації та обміну в рамках цифрових екосистем з можливістю простежуваності.

Зазначені тенденції розвитку інформаційно-вимірального забезпечення, зумовлені сучасними викликами та потребами, знайшли відображення у європейському стратегічному документі зі сфери метрології EURAMET 2030-2040 [6]. Відповідно до цього документу окреслено напрямки розвитку метрологічного забезпечення у найближче десятиліття. У документі сформовано орієнтації метрології на формування суверенної індустрії, стійкої цифрової інфраструктури та впровадження інтелектуальних вимірних технологій з використання штучного інтелекту в задачах обробки вимірних показників.

Для випробувальних лабораторій стратегічні напрямки розвитку інформаційно-вимірального забезпечення важливі для формування рамкової стратегії використання їх вимірних задач. Виконання таких задач проводиться в режимі багатоканального середовища, чутливого до темпоральних характеристик. Формуються тенденції переходу від приладоцентричної моделі до моделі, яка

використовує інтелектуальні вимірювальні технології в рамках інформаційно-керуючого циклу.

Для інформаційно-вимірювального забезпечення випробувальних лабораторій ознаки стійкого технологічного тренду проявляються у вигляді переходу до локального інтелектуального опрацювання вимірювальних даних та децентралізації обробки вимірювальної інформації. Актуальність описаних тенденцій підтверджується звітними матеріалами EDGE AI Foundation [7] де одним з провідних напрямків розвитку сучасних інтелектуальних систем є використання штучного інтелекту для граничних обчислень у вимірюваннях (так званий edge-AI). Відповідно до даних, представлених у звіті, edge-AI відбувається перехід до замкнених функціональних циклів збору даних, їх аналітичної інтерпретації, формування рішення та виконання відповідних дій. Кількісне підтвердження такої тенденції за даними [8] представлено на графіку (рис. 1.1).

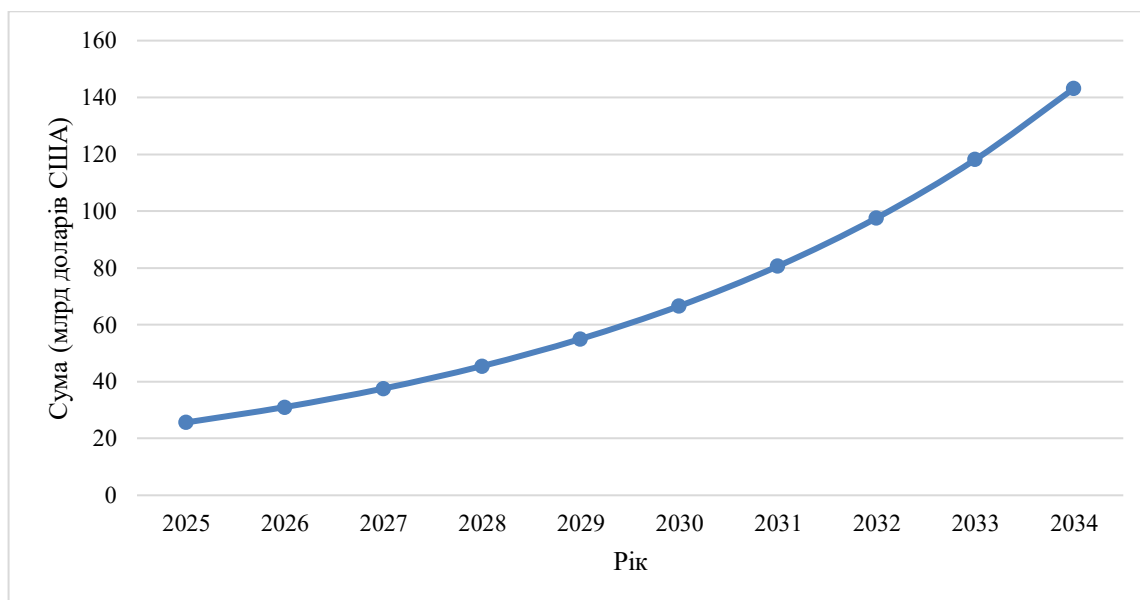


Рисунок 1.1 – Прогноз зростання світового ринку edge-AI у 2025-2034 рр.

Представлений рисунок ілюструє прогнозну динаміку зростання світового ринку edge-AI як одного з технологічних напрямків побудови адаптивних інформаційно-вимірювальних рішень.

На прикладному рівні такі процеси проявляються у зближенні розумного виробництва та цифрової метрології. За розглянутими в роботі [9] проблемними

питаннями, новітні вимірювальні технології в розумному виробництві формуються в рамках вирішення задач обробки великих масивів даних, автоматизованого оцінювання вимірних показників, віртуальних вимірювальних процедур, цифрових сервісів вимірювання та впровадження вимірювальної складової до процесів автоматизованого керування.

Вітчизняні наукові напрямки підтримують світові тенденції, але мають прикладне та предметно орієнтоване спрямування. Дисертаційна робота [10] є підтвердженням розвитку вітчизняних інформаційно-вимірювальних систем у напрямку впровадження мультисенсорних конфігурацій, злиття даних та інтелектуальної складової. Робота [11] присвячена розвитку вітчизняних підходів у напрямку мультіагентних інформаційно-вимірювальних систем, враховуючи їх адаптивність, виявлення аномалій та безперервне коригування даних за темпоральною характеристикою. Вітчизняні наукові розробки за сучасними трендами розвитку інформаційно-вимірювального забезпечення випробувальних лабораторій підтримують світові досягнення і примножують у сфері інтелектуальних систем збору і обробки вимірювальних даних та частково спрямовані на когнітивно орієнтовані вимірювальні технології.

З одного боку, розглянуті тенденції мають вагоме значення для розвитку випробувальних лабораторій, з іншого – впровадження подібних рішень саме у випробувальних лабораторіях породжує окремі виклики. На відміну від інших сфер застосування інтелектуальних вимірювань та сенсорних технологій, лабораторні випробування ускладнюються вимогами до точності, відтворюваності, темпоральної узгоджуваності, інтерпретованості, документованості та можливості повторного використання результатів у формалізованих та суворо регламентованих процедурах лабораторних вимірювань. Основні виклики полягають як у впровадженні нового цифрового та інтелектуального інформаційно-вимірювального забезпечення, так і разом з тим у виконанні вимог класичної метрологічної рамки довіри до результатів вимірювань. Зазначені виклики підтверджуються роботою [12], де доводиться, що чинні підходи до підготовки та проведення лабораторних випробувань недостатньо гнучкі через високу трудомісткість моделювання навантажень і дефіцит вихідних

даних, що підсилює потребу цифрового моделювання та системної інтеграції сучасних інформаційних технологій у єдиний цикл підготовки й проведення випробувань.

У таких умовах формується конфлікт між сучасними загальними цифровими трендами інформаційно-вимірального забезпечення та викликами, зумовленими їх впровадженням у випробувальних лабораторіях. Було узагальнено сучасні тенденції розвитку інформаційно-вимірального забезпечення та сформовано графічне представлення викликів (рис. 1.2).

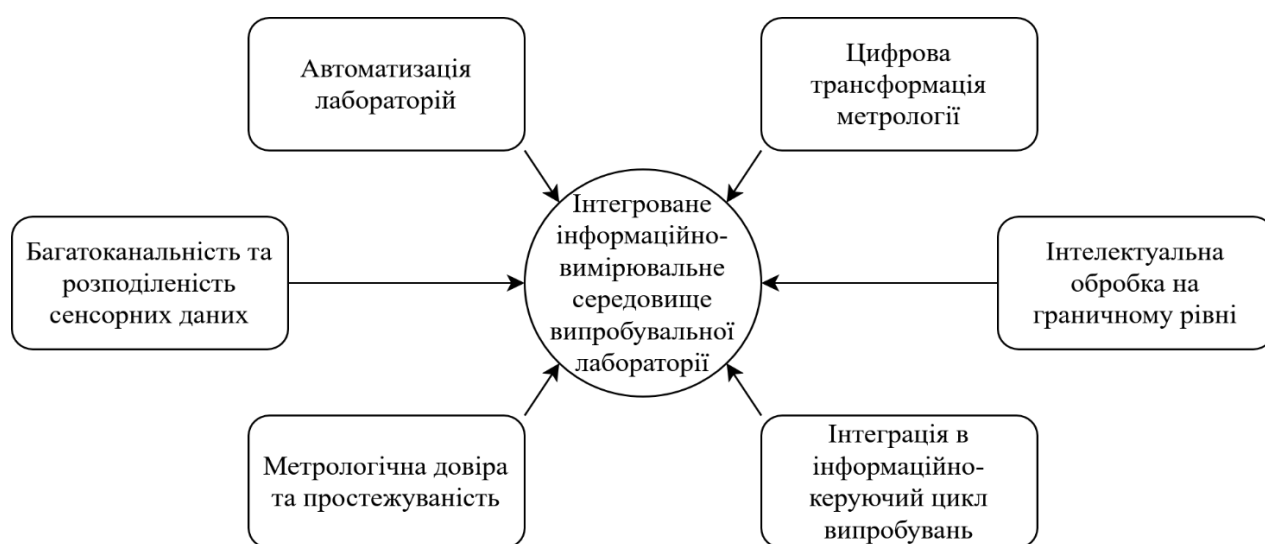


Рисунок 1.2 – Узагальнена схема викликів розвитку інформаційно-вимірального забезпечення випробувальних лабораторій

Як видно з рисунку, основні виклики розвитку інформаційно-вимірального забезпечення випробувальних лабораторій полягають у забезпеченні метрологічної довіри до результатів вимірювань у цифровому середовищі, підтримання простежуваності даних, використання виміральної інфраструктури у вигляді розподілених сенсорних мереж, виконання обробки виміральної інформації на рівні граничних вузлів і реалізації адаптивних механізмів. Формується потреба розробки та впровадження новітніх інформаційно-вимірвальних технологій. Для формування сучасного стану та проблем розвитку інформаційно-вимірвальних технологій лабораторних випробувань виникає необхідність аналізу наявних технологічних рішень.

1.2 Аналіз технологічних рішень у сфері інформаційно-вимірювального забезпечення лабораторних випробувань

Аналіз сучасних наукових праць дозволив класифікувати наявні технологічні рішення у сфері інформаційно-вимірювального забезпечення лабораторних випробувань за рівнем технологічної інтеграції вимірювального процесу. Базовими чинниками, за якими виконувалась класифікація було прийнято: місце і роль первинної обробки інформації, характер взаємодії вимірювальних вузлів, наявність та особливості процедури контролю якості вимірюваних показників, адаптивність конфігурації та вплив вимірювального контуру на подальше керування процесами. Доцільність обраних чинників підтверджується роботою [13], яка присвячена методологіям проектування бездротових сенсорних мереж. У вказаній роботі пояснюється, що технології вимірювання у бездротових сенсорних мережах на сучасному етапі розвитку науки і техніки формуються навколо підходів організації процесів збору, обробки та використання даних у комплексі.

Запропонована класифікація має комбінований характер. Перші два класи ґрунтуються на архітектурно-організаційних ознаках побудови вимірювального середовища. Наступні два класи ґрунтуються на функціонально-технологічних ознаках інтелектуальної обробки даних з урахуванням адаптивності та інтеграції вимірювальних процедур з подальшим прийняттям рішень щодо керування процесами.

Така класифікація виправдана при її застосуванні у контексті лабораторних випробувань. Даний тип комбінованої класифікації надає можливість одночасного врахування як способу організації інфраструктури лабораторії, так і рівня технологічної зрілості рішень.

Технологічні рішення розподіляються за чотирма класами (рис. 1.3): локалізовані та централізовані технології, розподілені мережево-орієнтовані технології, технології інтелектуального вимірювання та адаптивні edge-орієнтовані технології. Зазначені чотири класи з точки зору вимірювальних процесів не розглядаються окремо один від одного. Дані класи відображають послідовне

ускладнення технологічних рішень від організації базового вимірювального середовища до побудови технологій, придатних до інтелектуальної обробки та підтримки прийняття рішень.

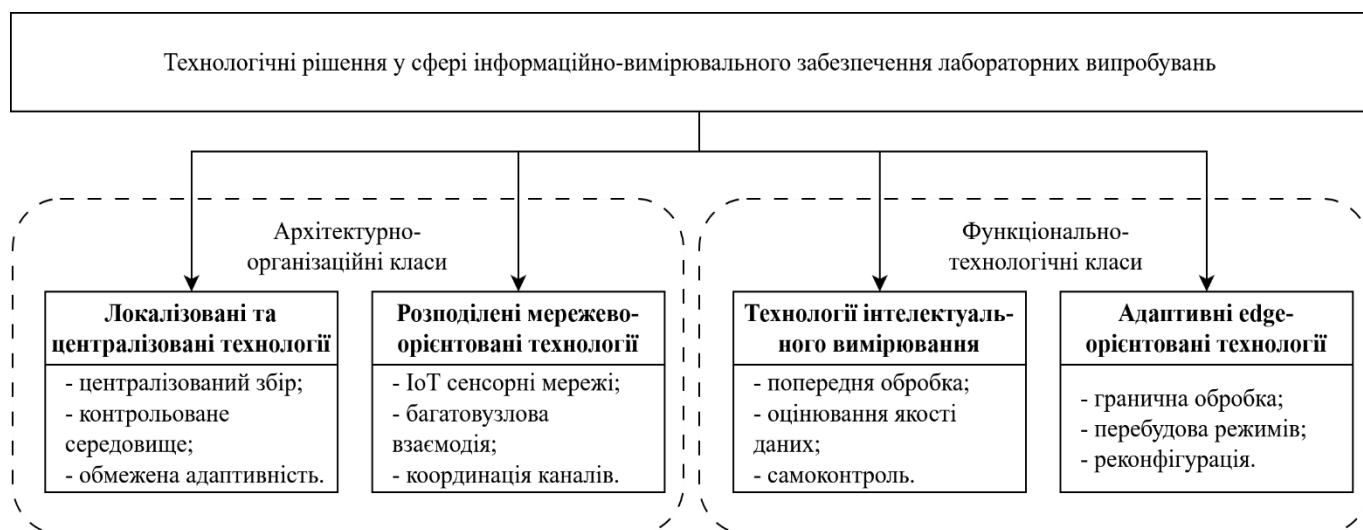


Рисунок 1.3 – Класифікація технологічних рішень у сфері інформаційно-вимірювального забезпечення лабораторних випробувань

У рамках першого класу технологічних рішень — локалізованих та централізованих технологій лабораторних вимірювань основні процедури вимірювання, синхронізації та первинної обробки первинних даних виконується єдиним лабораторним середовищем. У роботі [14] в якості такого лабораторного середовища розглядається кіберфізична система, яка в межах єдиного централізованого вимірювального контуру об'єднує сенсорні канали, обчислювальні компоненти та засоби керування. Ретроспективний аналіз розвитку технологічних рішень в напрямку інтелектуалізації лабораторій показав орієнтації на побудову контрольованого середовища ще на початкових етапах. Такі технологічні рішення концентрувались на узгодженні та інтерпретації параметрів вимірювання.

Масштабність, контрольованість сценарію та відтворюваність лабораторних експериментів визначають потребу централізації технологічних рішень. Цю логіку підкріплює робота [15], присвячена архітектурі великих експериментально-випробувальних платформ на основі бездротових сенсорних мереж. Подальший

розвиток цього класу технологічних рішень представлено у роботі [16]. Універсальне середовище випробувань для IoT-орієнтованих бездротових технологій в межах роботи [16] розглядається як засіб оцінювання латентності помилок і стабільності у порівняльній та не залежно від конкретного протоколу чи апаратної платформи. У межах першого класу, технологічні рішення зводяться до побудови керованої лабораторної інфраструктури. У такій інфраструктурі вимірювальна достовірність забезпечується жорстко контрольованим середовищем та централізованим адмініструванням.

У вітчизняних працях також спостерігається розвиток технологічних рішень за першим класом, але у прикладному напрямку. Підхід поєднання вимірювальних каналів з локальною комп'ютерною обробкою та прогнозуванням параметрів об'єкта застосовано в інформаційно-вимірювальній системі експрес-аналізу параметрів ґрунтів у роботі [17]. Логіка використання централізованого лабораторного рішення застосована і у роботі [18], присвяченій електронній вимірювальній системі для дослідження IoT-сенсорів у кліматичній камері. Підґрунтям такого рішення є контроль умов і можливість відтворюваного дослідження поведінки сенсорів. На відміну від зарубіжних підходів, вітчизняні роботи, присвячені першому класу рішень орієнтовані більшою мірою на прив'язку до конкретного прикладного сценарію вимірювань, аніж на універсальність платформи.

Технологічні рішення першого класу розглядаються як базовий рівень інформаційно-вимірювального забезпечення лабораторних випробувань. До переваг таких рішень варто віднести високу керованість вимірювального середовища, структурна визначеність та придатність до відтворення регламентних сценаріїв. Базовими обмеженнями таких рішень є рівень адаптивності, масштабованості та здатність до розподіленого інтелектуального опрацювання вимірюваних даних.

У рамках другого класу технологічних рішень – розподілених мережевих технологій на основі IoT-орієнтованих сенсорних мереж, вимірювальне середовище виступає у ролі сукупності сенсорних вузлів, що взаємодіють один з одним.

Мережева архітектура спрямована на забезпечення повноти, синхронності та узгодженості спостережень.

У роботі [19] сенсорна інформація розглядається як сервіс мережевого виробничого середовища. Потреба доступності для подальшого використання в адаптивних сценаріях визначає розгляд сенсорної інформації в ролі елементу розподіленої інфраструктури. Даний напрямок підтримує та розширює на рівень формального подання невизначеності в IoT-орієнтованих сенсорних мережах робота [20]. Для лабораторних випробувань ця робота має найбільш вагоме значення через вимогу оцінювання якості вимірювальних даних в рамках використання сенсорної мережі. Ще більшого посилення такий напрямок знайшов у роботі [13], у якій продемонстровано, що в сучасних бездротових сенсорних мережах технологічне рішення формується одночасно на рівні топології, моделей взаємодії, програмування, енергоспоживання та процедур обробки вимірювальних даних. Мережева взаємодія в такому випадку задає архітектуру всього вимірювального контуру і не є надбудовою для простого об'єднання сенсорів.

Вагоме значення другого класу технологічних рішень для випробувальних лабораторій полягає у формуванні можливості інтеграції великої кількості вимірювальних каналів у межах єдиного технологічного контуру при одночасній координації, оцінці невизначеності та підтримці метрологічної надійності.

У вітчизняному науковому полі розвиток мережево-орієнтованих технологічних рішень спрямований у переважній більшості праць на адаптацію мережевих засобів до вирішення конкретних прикладних вимірювальних задач. Так, бездротова мережа у роботі [21] розглядається як складова автоматизованої системи вимірювання фізичних величин. Акцент уваги зміщено на підвищення продуктивності бездротової мережі саме на нижніх рівнях моделі OSI. У роботі [22] проводиться аналіз підтримання метрологічної надійності в розподіленій вимірювальній системі через призму метрологічних вимог. Вітчизняні наукові праці присвячені здебільшого розгляду адаптації мережевої архітектури для побудови спеціалізованих інформаційно-вимірювальних систем, а не в розрізі окремої самостійної вимірювальної технології.

Окремо виділяються роботи [23] та [24], у яких мережа розглядається з точки зору між інфраструктурою та вимірювальною технологією. У роботі [23] кіберфізичні системи розглянуто як перспективне підґрунтя розвитку вимірювальних технологій. У роботі [24] запропоновано прототип багатофункціональної комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи з бездротовою передачею даних для сенсорів вимірювання фізичних величин. У даних двох наукових працях уже простежується направленість на технологічну інтеграцію сенсорів, мережі та обробки вимірювальної інформації, хоча повноцінна логіка адаптивного та / або інтелектуального інформаційно-вимірювального контуру ще повноцінно не сформована. У роботі [25] перспективи використання IoT-сенсорних мереж для задач лабораторних вібраційних випробувань продемонстровано через можливості об'єднання різних типів сенсорів, багаторівневої обробки вимірювальної інформації та інтеграції контролю механічних і кліматичних факторів у межах єдиного вимірювального середовища.

Технологічні рішення другого класу забезпечують перехід від ізольованих вимірювань, які можуть бути виконані в лабораторному середовищі до формування вимірювальної інформації на основі мережевої координації дій. До переваг таких рішень варто віднести можливість масштабування спостережень, функціональний розподіл вузлів та інтеграцію різнорідних вимірювальних даних, отриманих з різних сенсорних каналів. Базовими обмеженням таких рішень є домінантна роль мережевої взаємодії над інтелектуальною інтерпретацією результатів.

У рамках третього класу технологічних рішень – інтелектуального вимірювання та метрологічного самоконтролю, вимірювальні вузли виконують попередню перевірку достовірності, діагностику, самоконтроль чи узагальнення результатів на відміну від перших двох класів рішень, де виконується лише передача вимірювальної інформації.

Концептуальну основу цього класу технологічних рішень закладає робота [26]. У даній роботі розглядається явище самовалідації сенсорів, за якого здатні оцінювати коректність сформованого результату вимірювань. У роботі [27], присвяченій надійності сенсорів у кіберфізичних системах основна ідея, сформована

у попередньо розглянутій роботі набуває подальшого розвитку в контексті IoT-орієнтованих даних. Підкреслюється, що якість вимірювальної інформації повинна виступати внутрішньою властивістю технології, а не зовнішньою процедурою контролю.

Напрямок подальшого розвитку даного класу технологічних рішень лежить у сфері семантичної та онтологічної інтерпретації сенсорних даних. Онтологічний підхід до контекстно залежної інтерпретації сенсорних даних запропоновано в роботі [28]. У роботі [29] семантична складова сенсорних даних розглядається у якості інструменту повторного використання та інтерпретації потоків гетерогенних вимірювань. Метрологічна орієнтація напрямку представлена у роботі [30], де пропонується семантичний опис якості вимірювальних даних у сенсорних мережах через показники, метрики та інтерпретації. Розглянуті роботи дозволяють окреслити світові тенденції інтелектуалізації вимірювань в сучасних технологічних рішеннях. Характерною ознакою є перехід від суто алгоритмічного фільтрування чи діагностики до формального представлення змісту та якості вимірювальної інформації.

Вітчизняні дослідження у даному напрямку присвячені науковому пошуку на межі інформаційно-вимірювальних систем, метрологічної надійності та комп'ютеризованої обробки вимірювальної інформації. Як внутрішня функція вимірювальної системи у роботі [22] розглядається підтримка метрологічної надійності. У роботі [24] демонструється перехід до багатофункціональної комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи. У такій системі збір та попередня обробка вимірювальних даних розглядаються як невід'ємні складові частини єдиного технічного рішення. Вітчизняні напрацювання ще не реалізують повною мірою процеси семантичної інтерпретації чи явище самовалідованого вимірювання, але демонструють шлях вітчизняних технологічних рішень до внутрішнього забезпечення якості даних, зібраних у сенсорних мережах та їх подальшої аналітичної обробки.

Технологічні рішення третього класу забезпечують перехід від простої передачі або узгодження даних до підвищення змістовної якості результату

вимірювань. Основною характерною рисою таких рішень є можливість об'єднання процесів оцінювання достовірності, зважування, самоконтролю та попереднього узагальнення в рамках внутрішніх технологічних функцій процесу вимірювань.

У рамках четвертого класу технологічних рішень – адаптивних та реконфігурованих edge-орієнтованих рішень, вимірювальна інфраструктура здатна змінювати спосіб свого функціонування відповідно до зміни умов середовища, конфігурації сенсорної мережі або сформованих вимог до процесу сенсорного спостереження.

Перехід від статичного середовища до адаптивного стану з можливістю перебудови логіки функціонування підтверджується роботою [31]. У цій роботі запропоновано динамічно реконфігуровану бездротову сенсорну мережу для декількох протоколів маршрутизації. У роботі [32] розглянуто розподілену вимірювальну схему, де існує можливість одночасного виконання вимірювальних задач кількома передавачами одночасно при урахуванні роздільної здатності, надійності та точності. Сучасні технологічні рішення використовують можливість реконфігурації на рівні вимірювальної схеми.

Подальший розвиток даного класу технологічних рішень відбувається на рівні методів проєктування реконфігурованих бездротових сенсорних мереж та граничної (так званої edge) інфраструктури. У роботі [33] представлено модель-орієнтований процес для проєктування таких сенсорних мереж. Відзначається перехід від розрізнених технічних рішень до формалізованих процедур проєктування адаптивних бездротових сенсорних мереж. У четвертому класі технологічне рішення не обмежене лише окремим алгоритмом або фізичним сенсорним вузлом, а формується як адаптивна архітектура, здатна змінювати свою конфігурацію і виконувати перерозподіл обчислювального навантаження при підтримці різних режимів вимірювань.

У вітчизняному науковому полі спостерігається значно менша кількість робіт в рамках четвертого класу технологічних рішень. Проте, вітчизняні наукові дослідження найближче знаходяться до сучасних edge-орієнтованих технологій. Так, у роботі [34] за рахунок граничних обчислень виконується перерозподіл

навантаження на периферійні IoT-орієнтовані вузли. Такий перерозподіл необхідний для зменшення затримок та підвищення оперативності у розподілених інформаційно-вимірювальних системах. У роботі [35] оцінюється латентність IoT-орієнтованого протоколу MQTT у системах хмарного керування спектрометром. Такий напрямок безпосередньо стосується лабораторних випробувань, де на придатність технології до розподіленого лабораторного експерименту впливають транспортні характеристики мережі. На момент проведення дослідження у вітчизняному науковому полі ще не завершено формування повноцінного адаптивного вимірювального контуру. Для лабораторних випробувань вже простежується напрям, характерною властивістю якого є перенесення частини інфраструктурних обчислювальних функцій на рівень граничних обчислень та оцінка мережових характеристик як складової частини єдиної вимірювальної технології.

Технологічні рішення четвертого класу забезпечують вимірювання, локальну обробку, конфігураційну адаптацію, керуючі дії як технологічне рішення найвищого серед усіх класів рівня. Розглянутий четвертий клас найближче знаходиться до побудови повноцінної інформаційно-вимірювальної технології лабораторних випробувань, хоча і розкриває лише окремі аспекти такої технології не у цілісному вигляді.

Проведений аналіз технологічних рішень у сфері інформаційно-вимірювального забезпечення лабораторних випробувань показав еволюційні особливості від централізованих платформ до адаптивних edge-орієнтованих рішень. Закордонні наукові праці показують вищу зрілість у частині архітектурного моделювання, реконфігурації, семантичної інтерпретації та формалізації невизначеності. Вітчизняні роботи детальніше розглядають прикладну адаптацію інформаційно-вимірювальних систем до конкретних вимірювальних сценаріїв. Виділені та розглянуті класи технологічних рішень відображають різні рівні функціональної завершеності та повноти для задач лабораторних випробувань, що визначає потребу їх зіставлення із нормативними вимогами до регламентних процедур предметної області лабораторних випробувань. Відносно нормативних

засад та системи вимог можливе коректне оцінювання придатності застосування розглянутих технологічних рішень в рамках застосування до задач лабораторних випробувань.

1.3 Нормативне забезпечення та вимоги до інформаційно-вимірювальних технологій лабораторних випробувань

Коректне оцінювання придатності розглянутих у підрозділі 1.2 технологічних рішень до вирішення задач лабораторних випробувань можливе лише за наявності чіткої нормативної бази та системи вимог, виведених з технічних документів. Розглянуто документи, які регламентують єдність вимірювань, компетентність лабораторій, керування вимірювальними процесами, застосування технологій IoT, програмного забезпечення, штучного інтелекту та захисту інформації.

Базовий правовий контекст задає Закон України “Про метрологію та метрологічну діяльність” [36]. Нормативний контекст діяльності випробувальних та калібрувальних лабораторій формується положеннями міжнародного стандарту ISO/IEC 17025:2017 [37], які у вітчизняній нормативній базі застосовуються як ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 [38].

Аналіз зазначених нормативних документів дозволив визначити, що для лабораторних випробувань нормативно значущим є не сам факт використання сучасних цифрових чи інтелектуальних засобів вимірювальної техніки, а здатність лабораторії формувати технічно обґрунтовані результати, яким можна довіряти. Відповідно до цього, ключовими вимогами до інформаційно-вимірювальних технологій виступають: компетентність, неупередженість, валідація методик, контроль даних та відтворюваність прийнятих у вимірювальних процедурах рішень. Нормативна база формує не список дозволених технологій, а критерії, яким вони повинні відповідати при використанні у випробувальних лабораторіях.

Метрологічна база вимог до технологічних рішень уточнюється наступними документами: JCGM 100:2008 [39], який задає загальні правила оцінювання та визначення невизначеності вимірювань та ISO 10012:2026 [40], який формує вимоги

до системи керування вимірюваннями для забезпечення довіри до вілідності та надійності результатів. Ці документи показують, що важливою вимогою є можливість інформаційно-вимірювальної технології забезпечити керованість процесу вимірювань, визначення джерел впливу на результат та формальне подання невизначеності. Для задач лабораторних випробувань такі вимоги означають, що інтелектуальні чи когнітивні технологічні рішення повинні бути сумісними з класичною метрологічною логікою. При використанні розподілених сенсорних середовищ, у яких результат формується сукупністю взаємопов'язаних вузлів значення такої вимоги зростає.

У роботі [41] показано недостатність класичних підходів оцінювання невизначеності у сенсорних мережах через просторово-часову розподіленість даних, гетерогенні властивості мережі, вірогідність дрейфу сенсорів та складність вимірювальних моделей. Нормативна вимога щодо оцінювання невизначеності у таких умовах перетворюється у вимогу до архітектури інформаційно-вимірювальної системи підтримувати обробку з урахуванням невизначеності.

До нормативного забезпечення, яке стосується архітектури та мережево-орієнтованих рішень відноситься ISO/IEC 30141:2024 [42], де формується еталонна архітектура IoT. Для задач лабораторних випробувань дане нормативне забезпечення формує потребу структурованого опису ролей сенсорів, каналів передачі, сервісів обробки, сховищ даних та керуючих компонентів у рамках єдиної архітектури. Особливо важливим для інтелектуальних інформаційно-вимірювальних технологій є документ OIML D 31:2023 [43], який дозволяє розглядати алгоритмічну та програмну складову, включно з вимогами до захисту, конфігурації, часових міток, як нормативно значущий елементи вимірювальної системи.

Аналітичне зіставлення цих двох документів ([42] та [43]) формує архітектурну вимогу до інформаційно-вимірювальної технології, яка повинна бути архітектурно формалізованою та програмно контрольованою. Основні передбачувані властивості: структурована модель компонентів, потоків даних та сервісів, а також простежувані стани програмного забезпечення та захист конфігурації.

Окремі вимоги виводяться з нормативних документів, що регламентують застосування штучного інтелекту. ISO/IEC 42001:2023 [44] визначає вимоги до систем менеджменту штучного інтелекту, а ISO/IEC 23894:2023 [45] формує настанови щодо управління ризиками, пов'язаними із системами штучного інтелекту. Стратегічну рамку управління ризиками штучного інтелекту задає NIST AI RMF 1.0 [46]. Дані документи забезпечують перехід процесів інтелектуалізації вимірювань від алгоритмічної коректності до керованості, пояснювальності та відстежуваності змін моделі при контролованому використанні результатів інтелектуальних вимірювань при практичному застосуванні у площині лабораторних випробувань.

Даний аналітичний результат дослідження нормативної документації підтверджується у роботі [47], де довіра до штучного інтелекту з метрологічної точки зору передбачає поєднання прозорості, сертифікаційної придатності та відповідальності за результат. Вимога довіри до результатів застосування штучного інтелекту в розрізі інформаційно-вимірювальної технології лабораторних випробувань інтерпретується через пояснюваність, трасованість, відтворюваність поведінки моделі та відповідність стандартизованим процедурам.

Важлива категорія вимог стосується захисту інформації та визначається стандартом ISO/IEC 27001:2022 [48]. Забезпечення цілісності, конфіденційності і доступності даних під час вимірювань розглядається як системна властивість технології. Будь яке технологічне рішення у сфері інформаційно-вимірювального забезпечення лабораторних випробувань повинно підтримувати захист маршрутів передачі, контроль доступу, цілісність результатів у розподіленій системі вимірювань на основі бездротових сенсорних мереж. Безпека визначених показників прямо впливає на довіру до цифрового результату вимірювань.

Проблеми цифровізації метрології, узагальнені у роботі [49] полягають у нерівномірності цифрової зрілості, відсутності чітких регламентних процедур та потреба в гармонізації цифрових семантик вимірювальної інформації. Проблема нормативного забезпечення інтелектуальних вимірювань в рамках тематики дисертаційної роботи полягає у розпорошеності вимог між метрологічними, IoT

спрямованими, програмними, безпековими документами, та документами, які визначають застосування штучного інтелекту.

Подібний висновок підтверджується роботою [50], де підкреслено, що інтелектуальні інформаційно-вимірювальні технології на практиці змушені одночасно спиратися на кілька різних категорій нормативних документів.

У роботі [51], присвяченій вимірювальним IoT-орієнтованим застосуванням доводиться важливість суміщення різних нормативних шарів, які визначають вимоги до: метрологічних характеристик, архітектури IoT, програмного забезпечення та захисту даних. Інформаційно-вимірювальна технологія лабораторних випробувань проєктується як узгоджена технологічна система, до якої висуваються вимоги з різних регулятивних площин.

Система вимог до інформаційно-вимірювальних технологій лабораторних випробувань включає наступні вимоги: метрологічні, організаційно-процесні, архітектурно-інтероперабельні, до програмного забезпечення, до компонентів штучного інтелекту та до захисту інформації. Важливим етапом аналітичного дослідження є розгляд існуючих методів та інформаційно-вимірювальних систем як складових інформаційно-вимірювальних технологій з точки зору відповідності сформованій системи вимог предметної області лабораторних випробувань.

1.4 Обмеження існуючих методів та інформаційно-вимірювальних систем лабораторних випробувань

Грунтуючись на результатах проведеного аналізу технологічних рішень у сфері інформаційно-вимірювального забезпечення лабораторних випробувань та сформованих вимогах можна стверджувати про невідповідність існуючих технологічних рішень вимогам такого забезпечення. Декомпозиція технологічних рішень на складові частини, якими є методи та інформаційно-вимірювальні системи, дозволяє виявити обмеження таких технологічних складових в задачах лабораторних випробувань.

До обмежень централізованих рішень відноситься низький рівень придатності до складних та динамічних процесів лабораторних випробувань. Великі тестові платформи з розподіленими сенсорними мережами [15] слабо пристосовані до ситуацій, за яких конфігурація мережі, склад вимірювальних каналів та структура даних змінюються у процеси випробувань. В універсальних IoT-орієнтованих рішеннях [16] не передбачено вирішення задачі глибокого узгодження мережових характеристик з метрологічними властивостями результату вимірювання. Подібні рішення без підтримки інших методів та засобів не забезпечують повного переходу до адаптивного вимірювання. Система [18] також володіє обмеженнями даного класу рішень, які полягають у відсутніх можливостях формування механізмів масштабної реконфігурації або контекстно залежної перебудови вимірювальних процесів. В умовах лабораторних випробувань такі методи і засоби залежні від жорстко визначеної структури експерименту.

Обмеження розподілених мережево-орієнтованих рішень полягають у процесах формування метрологічно обґрунтованого результату. Мережеві рішення [13] не дозволяють пов'язати топологію, програмну модель та сценарії з вимогами до інтегральної достовірності вимірювань. Засіб [19] обмежений з точки зору узгодження сервісної організації з лабораторною потребою в контрольованому формуванні результату випробувань. Таке обмеження проявляється при спробах врахування невизначеності у розподілених IoT-орієнтованих середовищах. Модель [20] показує, що джерела невизначеності в таких середовищах мають метрологічний, мережевий, контекстний та організаційний характер. У роботі [52] автори описують спробу поєднати довіру до вузлів мережі та оцінювання невизначеності вимірювань. Такі рішення попри безумовну цінність залишаються переважно на рівні моделювання або концептуальної підтримки і не задають системного замкненого механізму формування інтегрального результату в умовах шуму та аномалій. Відповідно до [22] забезпечення метрологічної надійності часто розглядається окремо від задач інтелектуального узгодження даних. Характерним є розрив між мережею як технічною інфраструктурою та мережею як вимірювальною технологією.

Обмеження методів інтелектуального вимірювання та самодіагностики полягають у роботі на локальному рівні [26]. Відповідно до [53] ефективність методів діагностики несправностей часто залежить від типу моделі, обсягу даних, коректного розподілу нормальної та аномальної поведінки. У роботі [54] додатково підкреслюється, що в задачах діагностики сенсорів головними проблемами залишаються ізольованість кількох одночасних несправностей та чутливість до параметричних невизначеностей. Для лабораторних випробувань такі системи не гарантують метрологічно узгодженого результату. Інтелектуалізація на рівні локального сенсора чи окремої діагностичної процедури не гарантує побудови цілісної технології інтелектуального вимірювання.

Обмеження семантичних та онтологічних підходів інтерпретації сенсорних даних на основі роботи [55] полягають у складних проблемах узгодження словників, сумісності моделей, повторного використання онтологій та додавання нових сенсорів на рівні практичної інтеграції. Практична ефективність семантичних методів залежить від наявності стабільної доменної моделі та якості узгодження. У роботі [56] показано, що семантичні технології в IoT архітектурах залежать від якості формалізації та стикаються з труднощами масштабування і неоднорідності предметних онтологій. Обмеження для лабораторних випробувань полягають у складності роботи під дією шуму, аномалій та зміни конфігурації.

Обмеження адаптивних та реконфігурованих мережевих рішень на прикладі [31] та [33] полягають у підпорядкуванні реконфігурації мережевим та програмним критеріям. У роботі [57] програмна реконфігурація обмежена у використанні як засіб метрологічно обґрунтованого вибору режиму вимірювання. У роботі [58] показано, для лабораторного середовища критичними є ризики пропуску даних, безпека обчислень на вузлі. Вплив випробувального середовища на пристрої обробки та труднощі масштабування. Врахування лабораторної специфіки не може бути реалізовано простим перенесенням методу чи засобу з іншого прикладного домену.

Обмеження мережево-хмарних та дистанційно керованих рішень на прикладі [35] полягають у затримках, які здатні впливати на часові характеристики взаємодії

з вимірювальним обладнанням. Для лабораторних випробувань такі обмеження впливають на часову узгодженість та передбачуваність функціонування розподіленої системи.

Узагальнене представлення виявлених обмежень існуючих методів та інформаційно-вимірювальних систем та наслідків їх прояву для вимірювальних процесів у прикладному домені лабораторних випробувань з формуванням вимог до нових технологічних рішень наведено на рис. 1.4.



Рисунок 1.4 – Узагальнена схема обмежень існуючих рішень та вимог до інформаційно-вимірювальної технології лабораторних випробувань

Рисунок демонструє узагальнений взаємозв'язок між обмеженнями існуючих рішень, наслідками їх прояву у прикладному домені лабораторних випробувань та вимогами до інформаційно-вимірювальної технології лабораторних випробувань.

1.5 Постановка задачі дослідження

Аналіз сучасних викликів та тенденцій розвитку інформаційно-вимірювального забезпечення випробувальних лабораторій, дослідження існуючих технологічних рішень у цій сфері, узагальнення нормативних засад їх побудови та критичний огляд обмежень методів та інформаційно-вимірювальних систем дозволили виділити невирішену науково-практичну задачу. Аналіз показав, що наявні методи та засоби не забезпечують одночасного виконання вимог до точності,

відтворюваності, інтерпретованості, адаптивності та трасованості результатів вимірювань в розподілених сенсорних мережах лабораторних випробувань з урахуванням дії шуму, аномалій та особливостей зміни режимів функціонування мережі.

Виявлена невирішена науково-практична задача зумовлена методичними та архітектурно-системними чинниками. На методичному рівні існуючі методи та засоби обмежені у можливостях забезпечення формування стійкого інтегрального результату вимірювань в умовах дії шуму. Аномальних відхилень, дрейфу та неоднорідності вимірюваних даних у сенсорних каналах. На рівні когнітивної обробки зберігається розрив між числовим результатом вимірювання та його змістовою інтерпретацією при використанні у процесах прийняття рішень. На рівні інформаційно-вимірювальних систем наявні рішення не забезпечують повного поєднання функціональних компонентів (збір даних, мережева взаємодія, інтелектуальне оцінювання, реконфігурація та керування) у межах єдиного замкненого технологічного контуру лабораторних випробувань.

Обмеження існуючих методів та засобів призводять до зниження стійкості та достовірності результатів вимірювань, втрати частини значущої інформації та недостатньої керованості процесами реконфігурації сенсорної мережі. У результаті знижується придатність наявних рішень до використання у задачах лабораторних випробувань.

Існуючі науково-технічні рішення мають потребу в розробці нових методів вимірювань й обробки результатів цих вимірювань та розробки повноцінної інформаційно-вимірювальної технології лабораторних випробувань з когнітивною складовою дослідження вимірюваної інформації.

Науково-практична задача полягає у підвищенні точності, відтворюваності і трасованості інтелектуальних вимірювань та інтегральної достовірності когнітивної обробки в задачах лабораторних випробувань із забезпеченням адаптивності на усіх етапах замкненого інформаційно-вимірювального циклу на основі методів інтелектуального вимірювання та когнітивної обробки вимірювального результату, які системно інтегруються у повноцінній інформаційно-вимірювальній системі.

Вирішення поставленої задачі передбачає розробку методу інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань, який забезпечує формування інтегрального результатів; розробку методу когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань, для узагальнення цих результатів; розробку інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи, що інтегрує ці методи і забезпечує функціонування повного замкненого циклу вимірювань, когнітивної обробки, прийняття рішення та реконфігурації сенсорної мережі.

Логіка побудови дисертації визначена сформованою науково-практичною задачею та її декомпозицією на три окремі складові.

1.6 Висновки до розділу 1

У першому розділі дисертаційної роботи проведено аналітичне дослідження стану, проблем та напрямів розвитку інформаційно-вимірювальних технологій лабораторних випробувань. Досліджено сучасні тенденції розвитку інформаційно-вимірювального забезпечення випробувальних лабораторій та сучасні технологічні рішення, що дало змогу визначити та сформулювати невирішену науково-практичну задачу.

1. Шляхом розгляду сучасних викликів і тенденцій розвитку інформаційно-вимірювального забезпечення випробувальних лабораторій встановлено, що галузь переходить від ізольованих та централізованих засобів вимірювань до інтегрованих кіберфізичних середовищ, які передбачають поєднання процедур спостереження, обробки, оцінювання якості даних і підтримки прийняття рішень у межах єдиного технологічного циклу. Для лабораторних випробувань такі тенденції означають зростання вимог до простежуваності, часової узгодженості, інтерпретованості та метрологічної довіри до результатів вимірювань.

2. У результаті аналізу наявних технологічних рішень запропоновано їх класифікацію в рамках предметної області дисертаційної роботи: локалізовані та централізовані технології, розподілені мережево-орієнтовані рішення, технології інтелектуального вимірювання і самоконтролю та адаптивні edge-орієнтовані

рішення. Класифікація відображає еволюцію вимірювального середовища від базової інфраструктури до адаптивного інтелектуального вимірювання.

3. Узагальнення нормативної документації дозволило встановити, що придатність інформаційно-вимірювальної технології до використання у випробувальній лабораторії визначається здатністю формувати технічно обґрунтовані результати, яким можна довіряти. Сформовано вимоги до таких технологій, які включають метрологічну, організаційну, програмну, інформаційну та безпекову складові.

4. Критичний огляд методів та засобів вимірювання як складових технологічних рішень показав їх обмеження в рамках застосування до задач випробувальних лабораторій. Обмеження полягають у недостатній адаптивності до зміни режимів функціонування, обмеженій стійкості до шуму, аномалій, дрейфу та неоднорідності даних, недостатньому поєднанні вимірювальної, аналітичної та реконфігураційної складових у межах єдиного контуру вимірювань, що ускладнює використання таких рішень у суворо регламентованих процедурах лабораторних випробувань.

5. Сукупність виявлених обмежень в рамках сформульованих вимог дозволила визначити невирішену науково-практичну задачу, яка полягає у підвищенні точності, надійності, достовірності та трасовності інтелектуальних вимірювань у лабораторних випробуваннях за умови забезпечення адаптивності на усіх етапах замкненого циклу вимірювань.

РОЗДІЛ 2

МЕТОД ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ВИМІРЮВАННЯ В СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ

У розділі розглядається розроблення однієї зі складових інформаційно-виміральної технології лабораторних випробувань, пов'язаний із формуванням стійкого інтегрального результату інтелектуального вимірювання в сенсорній мережі. Необхідність такого етапу зумовлена тим, що в умовах лабораторних випробувань вимірвальні дані формуються за наявності метрологічного шуму, аномальних відхилень, неоднорідності сенсорних каналів та різної значущості окремих спостережень для поточного режиму випробувань. За таких умов безпосереднє агрегування вимірвальних даних не забезпечує достатньої стійкості інтегрального результату.

Виклад матеріалу, представленого у розділі спрямовано на побудову моделі впливу метрологічного шуму та аномалій на результати інтелектуальних вимірювань, визначення вхідних даних дворівневого процесу вимірювання, формалізацію методу локального і глобального зважування вимірвальних коефіцієнтів та опис алгоритму його реалізації. Завершальним етапом розділу є експериментальна і порівняльна перевірка методу з визначенням умов його застосовності та обмежень.

2.1 Модель впливу метрологічного шуму та аномалій на результати інтелектуальних вимірювань в сенсорних мережах лабораторних випробувань

Для побудови методу інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань важливо насамперед сформулювати модель впливу метрологічного шуму та аномалій на результати вимірювань. У роботі [59] за темою дисертації представлено розроблений метод інтелектуального вимірювання та роль моделі впливу при його розробці. У процесі лабораторних випробувань вимірювання проводяться у розподіленій сенсорній мережі, де результат

інтелектуального вимірювання формується на основі сукупності взаємопов'язаних спостережень. Інтелектуалізація процесу зумовлює виконання попередньої обробки даних, визначення вагових коефіцієнтів, що характеризують значущість окремих каналів або результатів вимірювань, агрегування результатів та формування підсумкової оцінки. Така модель є теоретичною основою всіх етапів методу, оскільки для зниження впливу шуму та аномалій необхідно формалізувати механізм їх впливу на загальний результат вимірювань.

Модель визначає склад факторів, які спотворюють результати вимірювань первинних даних сенсорами мережі. Завдяки формалізованій моделі створюються передумови для встановлення механізмів впливу цих факторів на формування локальних та глобальних вагових коефіцієнтів під час інтелектуальних вимірювань. Без формалізованого подання моделі впливу неможливо обґрунтувати процедури інтелектуального зважування, агрегування результатів та формування підсумкової оцінки із забезпеченням довіри до результату інтелектуального вимірювання.

У задачах лабораторних випробувань модель впливу набуває визначального значення. Якщо розглядати інтелектуальні вимірювальні процедури як складову комплексного інформаційно-вимірювального контуру, то точність результатів вимірювання є лише одним із необхідних компонентів. До інших важливих компонентів належить стійкість всієї процедури вимірювання до шуму, дрейфу, аномальних відхилень, впливу зовнішніх кліматичних та механічних факторів, які можуть виникати при використанні сенсорної мережі в процесі лабораторних випробувань. За таких умов метрологічний шум та аномалії розглядаються не лише як джерела спотворення окремих вимірювальних показників, а і як чинники, які деформують механізми інтелектуального оцінювання значущості сенсорних даних, що особливо важливо при використанні когнітивного керування процесами лабораторних випробувань. У бездротових сенсорних мережах аномалії даних пов'язують також із помилками зчитування, нетиповими подіями та іншими порушеннями режиму функціонування, тому їх виявлення є необхідним етапом забезпечення якості даних перед аналізом і прийняттям рішень [60]

Модель впливу шуму та аномалій повинна охоплювати не лише викривлення вимірюваного значення, але і зміну параметрів, на основі яких будується процедура інтелектуального зважування вимірюваних показників.

У роботі [41] застосовано модель аналізу невизначеності у сенсорних мережах. Для визначення ступеня впливу шуму та аномалій на результат вимірювання і подальшого врахування цих факторів при зниженні впливу на формування вагових коефіцієнтів при побудові моделі впливу використовувались наступні принципи: представлення похибки через комбінацію систематичних, стохастичних і спорадичних складових, а також моделі опису аномалій. У загальному випадку результат вимірювання i -м сенсором у момент часу t представлено сумою істинного значення вимірюваної величини та сукупності складових, які на нього впливають:

$$Y_{i,t} = S_t + \Delta_i^{sys} + \Delta_i^{drift} + \varepsilon_{i,t}^{met} + A_{i,t}^{anom}, \quad (2.1)$$

де S_t – істинне значення вимірюваної величини; Δ_i^{sys} – систематична похибка сенсора; Δ_i^{drift} – повільна зміна параметрів (дрейф); $\varepsilon_{i,t}^{met}$ – метрологічний шум; $A_{i,t}^{anom}$ – аномальна похибка.

Формула (2.1) відображає базове уявлення про джерела викривлення результату в сенсорному каналі. Аналіз похибки у розподіленій сенсорній мережі, яка використовується під час лабораторних випробувань відрізняється від аналізу в класичній одноканальній схемі вимірювань. В класичному випадку аналіз похибки переважно завершується оцінюванням її абсолютного чи відносного значення. У розподіленій сенсорній мережі кожна складова розглядається як фактор, що впливає на визначення ролі конкретного сенсора у формуванні інтегрального результату вимірювання. Розподіл ролей та вагомості внеску і довіри до кожного окремого сенсора впливає на присвоєння та коригування вагового коефіцієнта під час інтелектуальних вимірювальних процедур. Похибка розглядається не як бінарна ознака наявності чи відсутності, а як багатокомпонентний фактор, що по різному впливає на участь сенсорного каналу у формуванні результату.

У межах запропонованого підходу калібрування враховується як джерело залишкових калібрувальних зсувів і похибок калібрування на відміну від окремої процедури налагодження засобу вимірювальної техніки, що впливає на довіру до сенсорного каналу. Такі складові враховуються під час локального та глобального зважування результатів інтелектуального вимірювання разом із метрологічним шумом, дрейфом і аномальними відхиленнями.

Сумарний вплив похибок на результат інтелектуального вимірювання представлено у вигляді відхилення від істинного значення:

$$\Delta Y_{i,t} = Y_{i,t} - S_t = \Delta_i^{sys} + \Delta_i^{drift} + \varepsilon_{i,t}^{met} + A_{i,t}^{anom}. \quad (2.2)$$

Таке подання дозволяє перейти від простого опису структури вимірювального результату зі складовими, які на нього впливають до формалізації сумарного збурення. Таке збурення є важливою складовою процесу визначення вагових коефіцієнтів під час інтелектуального вимірювання. Загальний вплив похибок у межах інтелектуального вимірювання є комбінацією систематичних, стохастичних та аномальних складових [41]. Системний вплив цих складових визначає ступінь викривлення результату окремого сенсорного каналу.

Інтелектуальна складова вимірювань передбачає формування механізмів інтерпретації результатів вимірювань шляхом впровадження вагових коефіцієнтів. У такому випадку вплив похибок визначається через похідну:

$$f'(Y_{i,t}) = \frac{\partial \hat{S}_t}{\partial Y_{i,t}} \cdot \Delta Y_{i,t}. \quad (2.3)$$

Через похідну обчислюється частковий внесок кожного сенсора у загальну похибку. Визначення такого внеску є необхідним для формування вагових коефіцієнтів у межах методу інтелектуального вимірювання. Основний зміст формули (2.3) полягає у тому, що вплив похибки кожного окремого сенсора сенсорної мережі лабораторних випробувань оцінюється не окремо в ізольованих умовах, а через здатність похибки впливати на підсумковий інтегральний результат $\hat{S}_t$. Модель впливу метрологічного шуму та аномалій повинна враховувати концептуальну відмінність інтелектуальних вимірювань від традиційного підходу.

Така відмінність полягає у врахуванні не лише абсолютного викривлення результату, а саме його системного впливу на процедуру інтеграції даних.

Процеси лабораторних випробувань потребують врахування додаткових факторів. Загальна модель впливу похибок потребує уточнення з урахуванням специфіки випробувального середовища. Додатково звертається увага на таку специфіку лабораторного випробувального середовища: на вплив зовнішніх кліматичних чи механічних факторів, які можуть модифікувати поведінку сенсорів, а також на внутрішньолабораторну повторюваність, яка є важливою характеристикою якості вимірювальної процедури. Модель впливу факторів похибок в умовах лабораторних випробувань описується формулою:

$$Y_{i,t}^r = S_t + \Delta_i^{cal} + \Delta_{i,t}^{drift} + \varepsilon_{i,t}^{inst} + \varepsilon_{i,t}^{env} + \varepsilon_{i,t}^{rep,r} + A_{i,t}^{anom}, \quad (2.4)$$

де $Y_{i,t}^r$ – результат вимірювання сенсора i в момент часу t у повторенні r ; S_t – істинне значення вимірювальної величини; Δ_i^{cal} – калібрувальний зсув для сенсора i ; $\Delta_{i,t}^{drift}$ – дрейф параметрів сенсорного каналу; $\varepsilon_{i,t}^{inst}$ – інструментальний шум, характерний приладу; $\varepsilon_{i,t}^{env}$ – шум від зовнішніх кліматичних чи механічних факторів; $\varepsilon_{i,t}^{rep,r}$ – внутрішньолабораторна повторюваність; $A_{i,t}^{anom}$ – аномалія.

Формула (2.4) відіграє принципову роль для лабораторних випробувань. В умовах відтворення впливів навколишнього середовища результат вимірювань характеризується не лише точністю, але і стійкістю при повторенні процедури випробувань. У типових сенсорних мережах моніторингу допустима орієнтація на усереднений тренд (метрика середнього), то в умовах випробувань відсутність належної повторюваності і відтворюваності знижує цінність навіть максимально точного одиничного результату вимірювань. Кліматичні та механічні впливи у лабораторних умовах не лише можуть збільшити шумові ефекти, але і спричинити спорадичні відхилення. Такі відхилення з точки зору інтеграції різних вимірянних значень у сенсорній мережі набувають ознак аномалій. Лабораторне випробування в такому випадку розглядається як середовище, де аномалія може бути проявом не лише відмови чи збою, але і складної взаємодії сенсорного каналу з імітованими умовами зовнішнього середовища.

Вплив на фінальний результат інтелектуального вимірювання з урахуванням особливостей лабораторних випробувань та вагових коефіцієнтів описується наступною формулою:

$$Y_{lab} = \sum_{i=1}^N \omega_i (x_i + n_i + a_i + \varepsilon_i^{env} + \varepsilon_i^{cal}) , \quad (2.5)$$

де N – кількість сенсорних вузлів у сенсорній мережі; x_i – істинне значення вимірювальної величини; ω_i – вага i -го сенсора в процесі формування результату вимірювань; n_i – метрологічний шум i -го сенсора; a_i – аномальна складова процесу вимірювань; ε_{env} – вплив зовнішніх кліматичних чи механічних факторів; ε_i^{cal} – похибка калібрування.

Формула (2.5) демонструє формування фінального результату інтелектуальних вимірювань як зваженої інтеграції, у якій роль кожного каналу визначається ваговим коефіцієнтом, на відміну від стандартних підходів, де результат вимірювань виступає як усереднення показників сенсорів.

Вплив метрологічного шуму та аномалій на підсумковий результат інтелектуальних вимірювань відбувається за двома напрямками: викривлення первинних сирих даних, які надходять від сенсорів; зміна структури вагових коефіцієнтів за умови їх визначення на основі характеристик точності, стабільності, довіри чи важливості сенсорного каналу.

У контексті лабораторних випробувань важливо знижувати вплив шуму та аномалій не лише на виміряні значення, але й на механізм їх інтелектуального зважування з метою забезпечення достовірності. Кожен з розглянутих шести факторів впливу (систематична похибка, дрейф параметрів сенсора, метрологічний шум, зовнішні кліматичні чи механічні фактори, внутрішньолабораторна повторюваність, аномальні відхилення) може виступати не лише джерелом помилки окремого вимірювання, але і причиною деформації загальної структури інтелектуального вимірювання. Таке формулювання моделі впливу обґрунтовує дворівневий підхід інтелектуального вимірювання з урахуванням локальних та глобальних вагових коефіцієнтів. Подібний підхід узгоджується з сучасними уявленнями про відмови та аномальні стани у бездротових сенсорних мережах, де

порушення коректності даних пов'язують як із впливом зовнішнього середовища, так і з внутрішніми несправностями вузлів, дрейфом параметрів, спорадичними збоями та іншими типами дефектних станів [61].

Структурно-логічне візуальне представлення впливу метрологічного шуму та аномалій, спричинених зовнішніми кліматичними та/або механічними факторами на функціонування інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи наведено на рисунку 2.1.

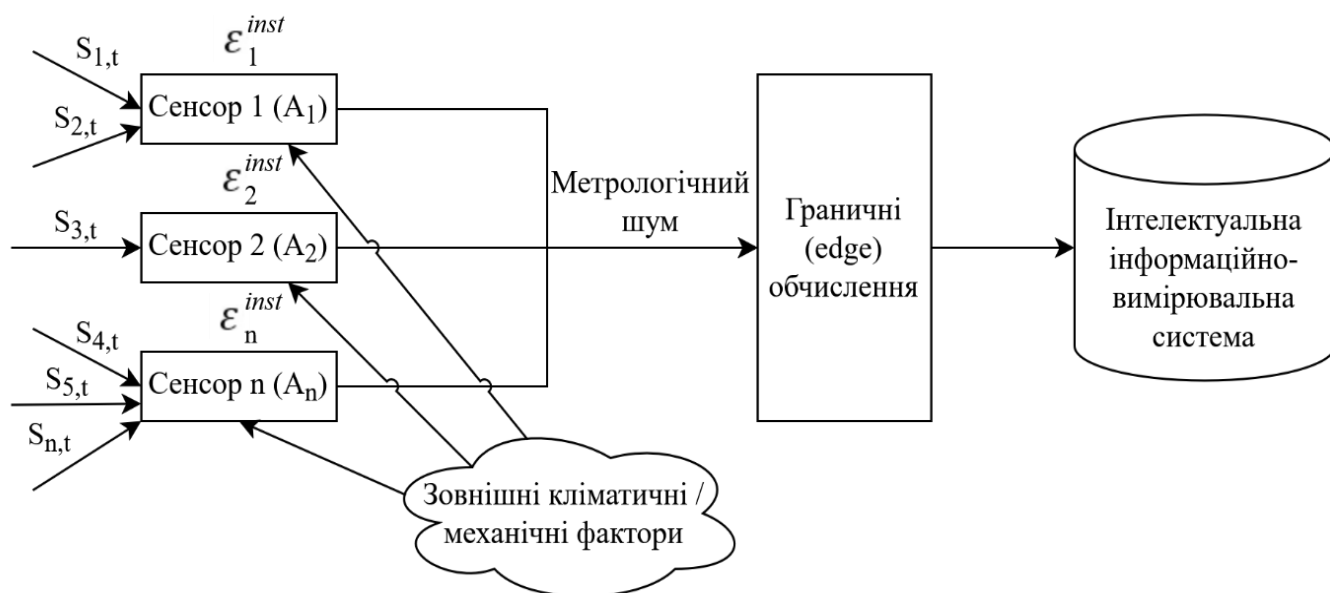


Рисунок 2.1 – Структурно-логічна схема впливу метрологічного шуму та аномалій на результати вимірювань

На рисунку у схематичному вигляді представлено процес формування результату інтелектуального вимірювання в сенсорній мережі лабораторних випробувань з акцентом на вплив компонентів шуму та аномалій. На кожен із сенсорів мережі $A_1, A_2, \dots, A_n$ впливає власний метрологічний шум ε_i . Сукупність сенсорних каналів функціонує в умовах дії зовнішніх кліматичних та механічних факторів, зумовлених особливостями лабораторних випробувань. Сирі вимірювальні дані надходять до модуля граничних обчислень для попереднього оцінювання, первинної обробки та передачі для подальшої інтеграції до інформаційно-вимірювальної системи. Рисунок ілюструє багаторівневий характер впливу похибок

на результати інтелектуальних вимірювань в сенсорній системі лабораторних випробувань. Наведена структурно-логічна схема демонструє необхідність урахування впливу метрологічного шуму та аномалій як на рівні окремих сенсорів так і на рівні інтеграції даних в інформаційно-вимірювальній системі.

2.2 Модель вхідних даних для дворівневого процесу інтелектуального вимірювання

Представлена модель впливу метрологічного шуму та аномалій дозволила визначити склад факторів, які спотворюють результати вимірювань і обґрунтувати дворівневий процес інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань. Для подальшого формалізованого представлення методу, опис похибок є необхідним, але недостатнім компонентом. Важливо також задати модель вхідних даних, яка визначає у якому вигляді сенсори передають первинні дані, супровідні параметри, метадані та службові характеристики до методу дворівневого інтелектуального вимірювання. Модель вхідних даних забезпечує єдність представлення даних на рівні окремих сенсорів, на рівні граничної обробки та на рівні інтеграції в інформаційно-вимірювальній системі.

Представлений у роботі [59] та описаний у підрозділі 2.3 авторський метод інтелектуального вимірювання передбачає використання дворівневого процесу, у першим рівнем є обробка даних на безпосередньо у сенсорах або на границі (edge), а другим рівнем виступає фінальна оцінка вхідних параметрів перед одержанням остаточних результатів вимірювань.

Основною вимогою, висунутою до моделі вхідних даних є відображення як первинних результатів спостережень окремих сенсорів, так і узгодженого набору параметрів для подальшої глобальної інтеграції.

Сенсорна мережа лабораторних випробувань містить наступну множину сенсорів: $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, де N – кількість сенсорних вузлів, залучених до формування інтегрального результату вимірювання. Кожен сенсор A_i у момент часу t та в повторенні r формує значення $Y_{i,t}^r$, яке відповідно до формули (2.4) піддається

шести описаним в підрозділі 2.1 факторів впливу. Відповідно до таких умов, вхідні дані для дворівневого процесу інтелектуального вимірювання в сенсорній мережі лабораторних випробувань не можуть бути обмежені лише представленням у вигляді одиничних скалярних показів сенсорів. Вхідні дані повинні бути представлені у вигляді структурованого набору вимірювальних часових, контекстних та службових параметрів. Подібний підхід узгоджується із сучасними моделями подання потокових сенсорних даних, у межах яких окремі спостереження розглядаються разом із часовими мітками, а метадані, необхідні для аналітики, інтерпретації та оцінювання якості даних, виділяються як окремий структурний компонент моделі [62]. Сукупність даних параметрів і характеризує стан окремого сенсорного каналу в межах поточного циклу лабораторних випробувань.

Первинний набір вхідних даних, сформованих на i -м сенсором представлений у вигляді:

$$X_{i,t}^r = \langle Y_{i,t}^r, t, r, \Delta_i^{cal}, \Delta_{i,t}^{drift}, \varepsilon_{i,t}^{inst}, \varepsilon_{i,t}^{env}, \varepsilon_{i,t}^{rep,r}, A_{i,t}^{anom} \rangle, \quad (2.6)$$

де $Y_{i,t}^r$ – результат вимірювання сенсора A_i ; t – часовий індекс; r – номер повторення.

Кортеж (2.6) представляє мінімально необхідних набір вхідних даних. Такі вхідні дані надають змогу зберігати інформацію про фактори, які визначають ступінь довіри до результату вимірювання в сенсорній мережі на відміну від класичної реєстрації лише виміряного показника.

Для задач інтелектуального вимірювання під час виконання лабораторних випробувань описані характеристики кортежу необхідні через роль сенсору в процесах випробувань. Роль сенсора для формування інтегрального показника інтелектуальних вимірювань залежить не лише від значення $Y_{i,t}^r$, але і від характеристик його якості, стабільності та узгодженості з умовами лабораторних випробувань. У результаті формується можливість врахування комплексу параметрів під час визначення вагових коефіцієнтів при інтелектуальному вимірюванні показників.

До процесу інтелектуального вимірювання застосовано дворівневий підхід, який впливає на структуру моделі вхідних даних. Перший рівень дворівневого

інтелектуального вимірювання пов'язаний із граничними обчисленнями. Для кожного сенсорного каналу вхідні дані розглядаються у формі локального часового фрагменту множини спостережень. У рамках цього фрагменту виконується попередня оцінка стану сенсора, що потребує введення локального часового інтервалу:

$$T_i(t, \tau) = \{t - \tau + 1, \dots, t\}, \quad (2.7)$$

де τ – довжина вікна спостережень, що використовується для локального аналізу.

Локальний вхідний набір даних для сенсора A_i представлено у вигляді:

$$X_{i,t}^{loc} = \{X_{i,\xi}^{loc} | \xi \in T_i(t, \tau)\}, \quad (2.8)$$

де $X_{i,t}^{loc}$ – локальний вхідний набір даних i -го сенсора в момент часу t ; $X_{i,\xi}^{loc}$ – окремий елемент вхідних даних, сформований i -м сенсором у момент часу ξ при r -му повторенні; ξ – часовий індекс у межах локального вікна спостережень; a – локальний часовий інтервал спостережень для i -го сенсора; $T_i(t, \tau)$ – довжина вікна спостережень.

У формулі (2.8) номер повторення r вважається фіксованим для поточного циклу аналізу, а локальний набір даних формується за рахунок часової послідовності спостережень у межах вікна $T_i(t, \tau)$.

Склад локального вхідного набору даних зумовлений об'єктом аналізу локального рівня. Таким об'єктом виступає впорядкована сукупність останніх спостережень сенсора із службовими параметрами. Враховується короткочасна динаміка сенсорного каналу спостережень, тенденції дрейфу, поява аномальних відхилень та зміна зовнішніх умов під час лабораторних випробувань. Спричинена необхідність такого підходу формування вхідних параметрів саме характером впливу метрологічного шуму та аномалій. Такий вплив відрізняється процесним характером та не є одноразовою дією. Із локального вхідного набору даних формуються локальні ваги, механізм формування яких представлено в підрозділі 2.3 дисертації.

Другий рівень дворівневого інтелектуального вимірювання пов'язаний із моделлю даних, які надходять до глобального рівня інтеграції після локальної

граничної обробки. Дані для другого рівня інтелектуального вимірювання повинні бути представлені у вигляді узгоджених локальних оцінок на відміну від першого рівня де проводиться робота з первинними даними. Такі узгоджені оцінки повинні бути придатні до міжсенсорного порівняння та інтегрування в процесі спільного аналізу. Вхід другого рівня описується кортежем:

$$Z_{i,t} = \langle \tilde{Y}_{i,t}, q_{i,t}, d_{i,t}, c_{i,t} \rangle, \quad (2.9)$$

де $\tilde{Y}_{i,t}$ – локально підготоване значення вимірювальної величини; $q_{i,t}$ – узагальнена характеристика якості локальної оцінки; $d_{i,t}$ – параметр, що відображає стабільність чи варіативність локального вимірювального каналу; $c_{i,t}$ – контекстний параметр, який відображає значущість або релевантність каналу для поточного режиму лабораторних випробувань.

Глобальний вхідний набір даних у момент часу t представлено наступним чином:

$$X_t^{glob} = \{Z_{1,t}, Z_{2,t}, \dots, Z_{N,t}\}. \quad (2.10)$$

Роль сформованого представлення глобального вхідного набору даних для побудови методу інтелектуальних вимірювань в сенсорних мережах лабораторних випробувань полягає у відокремленні двох інформаційних рівнів вимірювальних каналів. На першому рівні формуються первинні спостереження з присутністю шумів та аномалій, які є нестабільними за темпоральною характеристикою. На другому рівні формується набір локально підготованих параметрів, що використовується для загального оцінювання вхідних параметрів. Дворівневий процес інтелектуальних вимірювань передбачає перехід від моделі первинних сенсорних спостережень до моделі глобальної інтеграції локально підготованих наборів даних з урахуванням довіри до сенсорних каналів.

Представлена модель вхідних даних враховує неоднорідність сенсорних вимірювальних каналів за природою вимірювальних величин, точністю, чутливістю та функціональною роллю в лабораторному випробуванні. Наведена модель уніфікована за своєю структурою, але залишається гнучкою щодо змісту вимірювальних параметрів. Єдиний спосіб подання для усіх сенсорів сенсорної

мережі лабораторних випробувань забезпечує уніфікацію моделі. Включення до набору вхідних параметрів таких, що описують специфічні властивості окремого сенсорного каналу забезпечують гнучкість моделі. Поєднання уніфікації та гнучкості надає механізми розгляду сенсорів у єдиному інтегрованому контурі при реалізації та застосуванні методу.

В умовах подальшого застосування формалізованої моделі вхідних даних при реалізації інформаційно-вимірювальної системи, повний вхідний простір дворівневого процесу інтелектуального вимірювання складається з трьох взаємопов'язаних груп даних, які в узагальненому вигляді представлені:

$$X_t = \langle Y_t, M_t, C_t \rangle . \quad (2.11)$$

де Y_t – множина первинних вимірних значень; M_t – множина метаданих, які характеризують сенсорні канали; C_t – множина контекстних параметрів, пов'язаних із режимами лабораторних випробувань.

Структура моделі вхідних даних формує підґрунтя для формалізації дворівневого методу інтелектуальних вимірювань в сенсорних мережах лабораторних випробувань з урахуванням локальних та глобальних вагових коефіцієнтів. Модель вхідних даних дозволяє нотаційно узгодити модель впливу метрологічного шуму та аномалій з формалізованим методом інтелектуальних вимірювань.

2.3 Формалізоване представлення методу інтелектуальних вимірювань в сенсорних мережах лабораторних випробувань та алгоритм його роботи

Сформовані модель впливу метрологічного шуму і аномалій та модель вхідних даних для дворівневого процесу інтелектуальних вимірювань дозволили сформувану основу та обґрунтувати структуру методу інтелектуальних вимірювань в сенсорних мережах лабораторних випробувань. Метод включає п'ять взаємопов'язаних етапів: визначення локальних вагових коефіцієнтів, зниження впливу метрологічного шуму та аномалій на локальні вагові коефіцієнти, визначення глобальних вагових коефіцієнтів, зниження впливу метрологічного

шуму та аномалій на глобальні вагові коефіцієнти, формування скоригованого результату інтелектуальних вимірювань.

Характерною особливістю методу є формування підсумкового результату вимірювань на основі дворівневого визначення локальних та глобальних вагових коефіцієнтів з подальшим зниженням впливу метрологічного шуму та аномалій на обох рівнях. Така особливість визначена спрямуванням методу на підвищення точності інтегрального результату та стабілізацію процедури інтелектуального вимірювання в умовах характерних процесам лабораторних випробувань.

Структурно-логічна схема методу (рис. 2.2) відображає відповідність між етапами методу та математичними перетвореннями вхідних параметрів.

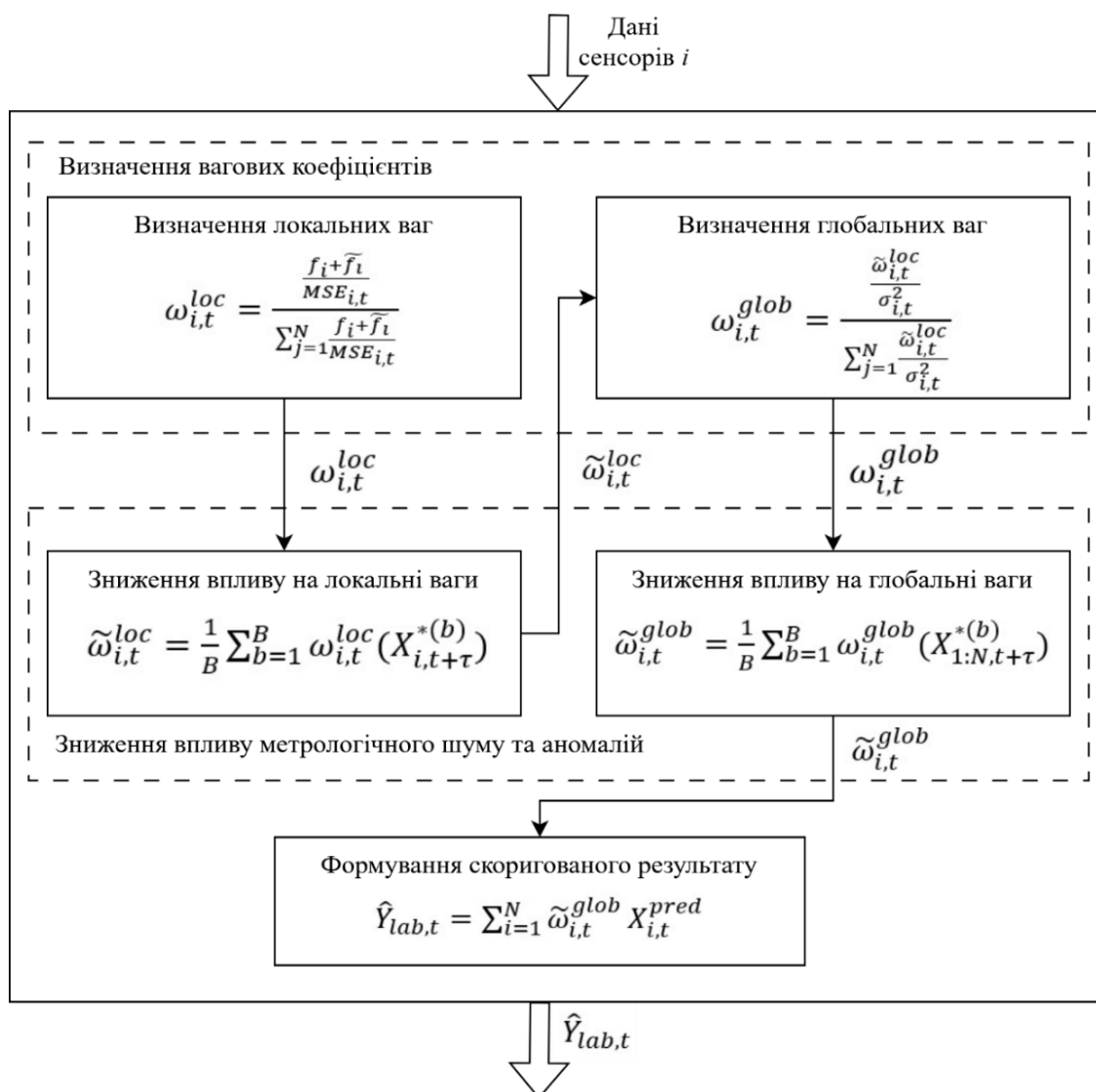


Рисунок 2.2 – Структурно-логічна схема методу інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань

На рисунку представлено п'ять взаємопов'язаних етапів методу, розподілених у блоках за призначенням. Блоки визначення вагових коефіцієнтів, блоки зниження впливу метрологічного шуму та аномалій і блок формування скоригованого результату відображають дворівневий характер методу та логіку переходу від локального оцінювання сенсорних каналів до глобальної інтеграції та формування підсумкового результату.

Розроблений метод не передбачає підміни первинного результату вимірювання, а спрямований на динамічне зниження впливу метрологічних похибок та аномалій на формування інтегральної оцінки шляхом інтелектуального зважування вимірюваних параметрів, що підтверджується подальшим формалізованим представленням методу.

На основі моделі, описаної в підрозділі 2.2 для кожного сенсора A_i у момент часу t в межах поточного циклу аналізу формується набір вхідних даних від сенсорів i , який включає локальний набір $X_{i,t}^{loc}$ та сформована на глобальному рівні сукупність локально підготованих параметрів X_t^{glob} . Формалізоване представлення методу є сукупністю послідовних математичних перетворень, які формують інтегральну оцінку результату вимірювань.

З урахуванням механізму формування вагових коефіцієнтів, описаного в роботі [63] на першому етапі методу виконується визначення локального вагового коефіцієнту $\omega_{i,t}^{loc}$ для кожного сенсора A_i . Даний ваговий коефіцієнт відображає внесок конкретного сенсорного каналу у формування інтегрального результату вимірювань. Локальний ваговий коефіцієнт включає середньоквадратичну помилку локальної оцінки, фактор довіри до сенсора та коефіцієнт важливості його даних. Обчислення локального вагового коефіцієнту виконується за формулою:

$$\omega_{i,t}^{loc} = \frac{\lambda_{i,t}^{loc}}{\sum_{j=1}^N \lambda_{j,t}^{loc}}, \quad (2.12)$$

де $\lambda_{i,t}^{loc}$ – ненормований показник локального внеску; N – кількість сенсорів у мережі.

Ненормований показник локального внеску обчислюється за формулою:

$$\lambda_{i,t}^{loc} = \frac{f_i + \tilde{f}_i}{MSE_{i,t}}, \quad (2.13)$$

де $MSE_{i,t}$ – середньоквадратична помилка локальної оцінки сенсора A_i в момент часу t ; f_i – фактор довіри до сенсора A_i ; $\tilde{f}_i$ – коефіцієнт важливості даних сенсора A_i для поточного лабораторного випробування.

Зі збільшенням довіри до сенсора та значущості його даних в конкретних умовах лабораторних випробувань зростає і локальна вага. Зменшення локальної ваги спричинено збільшенням локальної помилки.

Другий етап методу забезпечує зниження впливу метрологічного шуму та аномалій на локальні вагові коефіцієнти. Для коригування локальних вагових коефіцієнтів застосовується бутстреп-агрегація з прогнозуванням вибірок. Скориговані локальні вагові коефіцієнти обчислюються за формулою:

$$\tilde{\omega}_{i,t}^{loc} = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \omega_{i,t}^{loc} (X_{i,t+\tau}^{*(b)}), \quad (2.14)$$

де B – кількість бутстреп-вибірок; $X_{i,t+\tau}^{*(b)}$ – b -та бутстреп-вибірка локальних спостережень для сенсора A_i , сформована з урахуванням прогнозованого стану каналу на горизонті τ ; $\omega_{i,t}^{loc}(\cdot)$ – оператор обчислення локальної ваги на відповідній вибірці.

Локальна вага формується як усереднена оцінка на множині можливих сценаріїв роботи сенсора, що сприяє зменшенню впливу шумових сплесків, короткочасних аномалій та нестійких локальних відхилень.

Третій етап методу забезпечує формування глобальних $\omega_{i,t}^{glob}$ вагових коефіцієнтів для міжсенсорної інтеграції виміряних даних з урахуванням скоригованих локальних вагових коефіцієнтів. Глобальні вагові коефіцієнти ґрунтуються на обчисленні вагових матриць [64] та визначаються за формулою:

$$\omega_{i,t}^{glob} = \frac{\lambda_{i,t}^{glob}}{\sum_{j=1}^N \lambda_{j,t}^{glob}}, \quad (2.15)$$

де $\lambda_{i,t}^{glob}$ – ненормований показник глобального внеску; N – кількість сенсорів у мережі.

Ненормований показник глобального внеску обчислюється за формулою:

$$\lambda_{i,t}^{glob} = \frac{\tilde{\omega}_{i,t}^{loc}}{\sigma_{i,t}^2}, \quad (2.16)$$

де $\sigma_{i,t}^2$ – дисперсія локально підготованого та скоригованого після граничної обробки сигналу від сенсора A_i в момент часу t .

На глобальному рівні вагове значення сенсора визначається поєднанням стабілізованої локальної значущості з дисперсійною стійкістю його сигналу.

Четвертий етап аналогічно другому забезпечує зниження впливу метрологічного шуму та аномалій на глобальні вагові коефіцієнти. Для повноцінної конфігурації сенсорної мережі застосовується бутстреп-агрегація з прогнозуванням. Зниження впливу забезпечується формулою:

$$\tilde{\omega}_{i,t}^{glob} = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \omega_{i,t}^{glob} (X_{1:N,t+\tau}^{*(b)}), \quad (2.17)$$

де $X_{1:N,t+\tau}^{*(b)}$ – b -та бутстреп-вибірка сукупності вимірювань усіх сенсорів мережі з прогнозуванням на горизонті τ ; $\omega_{i,t}^{glob}(\cdot)$ – оператор обчислення глобальної ваги на відповідній вибірці.

Відмінністю обчислення глобальних вагових коефіцієнтів від обчислення локальних є виконання усереднення для сукупності усіх сенсорів мережі. Така властивість процесу обчислення спрямована на зменшення впливу дестабілізованого міжсенсорного балансу, випадкових збурень та аномальних комбінацій вимірювань, зумовлених умовами лабораторного середовища випробувань.

П'ятий етап методу забезпечує формування скоригованого результату інтелектуального вимірювання. За основу взято описаний в роботі [65] підхід визначення інтегрального результату. Формування проводиться на основі зваженої суми прогнозованих значень вимірювань сенсорів з використанням скоригованих глобальних вагових коефіцієнтів за формулою:

$$\hat{Y}_{lab,t} = \sum_{i=1}^N \tilde{\omega}_{i,t}^{glob} X_{i,t}^{pred}, \quad (2.18)$$

де $\hat{Y}_{lab,t}$ – скоригований результат інтелектуального вимірювання в момент часу t ; $X_{i,t}^{pred}$ – прогнозоване значення вимірювального параметра для сенсора A_i ,

сформоване на основі локального набору даних $X_{i,t}^{loc}$ та використане як вхідна оцінка на етапі фінального агрегування.

На відміну від формування результату за усередненням вимірних значень, на формування результату в представленому методі впливає якість локальної оцінки, значущість даних сенсора, стабільність каналу сенсора, вплив шуму та аномалій на локальному та глобальному рівнях інтелектуального вимірювання та прогнозований стан сенсорної мережі.

З метою формування підґрунтя для подальшої практичної реалізації методу в інформаційно-вимірювальній системі описано алгоритм його роботи. Алгоритм роботи методу (додаток Б) інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань визначає послідовність дій в межах одного циклу інтелектуального вимірювання та складається з наступних кроків:

1) ініціалізація поточного циклу інтелектуального вимірювання: задання множини сенсорів $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, моменту часу t , горизонту прогнозування τ , кількості бутстреп-вибірок B та вікна локального спостереження для кожного сенсора;

2) із результатів вимірювань, часових індексів, параметрів похибок, шумових і аномальних станів формування локального набору вхідних даних $X_{i,t}^{loc}$ для кожного сенсора A_i у межах вікна спостережень;

3) визначення параметрів, необхідних для локального оцінювання (середньоквадратична помилка $MSE_{i,t}$, фактор довіри f_i та коефіцієнт важливості $\tilde{f}_i$) для кожного сенсорного каналу на основі локальних наборів даних;

4) обчислення локальних вагових коефіцієнтів $\omega_{i,t}^{loc}$;

5) формування множини бутстреп-вибірок локальних спостережень для кожного сенсора A_i з урахуванням прогнозування стану каналу на горизонті τ ;

6) обчислення скоригованих локальних вагових коефіцієнтів $\tilde{\omega}_{i,t}^{loc}$ на основі вибірок з метою зменшення впливу випадкових шумових збурень і аномалій;

7) обчислення глобальних вагових коефіцієнтів $\omega_{i,t}^{glob}$ для кожного сенсора A_i на основі скоригованих локальних вагових коефіцієнтів $\tilde{\omega}_{i,t}^{loc}$ та дисперсій $\sigma_{i,t}^2$ локально підготовлених сигналів;

8) формування бутстреп-вибірок із прогнозуванням на горизонті τ для сукупності сенсорів мережі;

9) визначення скоригованих глобальних вагових коефіцієнтів $\tilde{\omega}_{i,t}^{glob}$, які враховують вплив можливого дестабілізованого міжсенсорного балансу та аномальні конфігурації вимірювань;

10) формування прогнозованого значення $X_{i,t}^{pred}$ для кожного сенсора A_i , яке використовується як вхідна оцінка для фінального агрегування з урахуванням скоригованих глобальних вагових коефіцієнтів $\tilde{\omega}_{i,t}^{glob}$;

11) формування скоригованого результату інтелектуального вимірювання $\hat{Y}_{lab,t}$ як зваженої суми прогнозованих значень $X_{i,t}^{pred}$, використовуючи при цьому скориговані глобальні вагові коефіцієнти $\tilde{\omega}_{i,t}^{glob}$;

12) передача одержаного результату $\hat{Y}_{lab,t}$ та відповідних скоригованих локальних $\tilde{\omega}_{i,t}^{loc}$ та глобальних $\tilde{\omega}_{i,t}^{glob}$ вагових коефіцієнтів до інформаційно-вимірювальної системи лабораторних випробувань для подальшої когнітивної інтерпретації, оцінювання і використання при прийнятті реконфігураційних рішень щодо вимірювань у сенсорній мережі.

Розроблений метод інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань реалізує дворівневий підхід до процесу інтелектуальних вимірювань, який проявляється у формуванні вагових коефіцієнтів локального та глобального рівня щодо вимірювальних каналів та виміряних показників. Застосування бутстреп-агрегації з прогнозуванням вибірок на обох рівнях сприяє зниженню впливу метрологічного шуму та аномалій на формування вагових коефіцієнтів з урахуванням обмежень та умов застосовності, описаних в підрозділі 2.4. Метод націлений на забезпечення стійкості та відтворюваності інтегрального результату інтелектуального вимірювання в умовах лабораторних випробувань.

Ефект створення методу супроводжується формуванням якісного показника, яким є стійкість формування інтегрального результату інтелектуального вимірювання до впливу метрологічного шуму та аномалій.

Формалізація представленого методу та алгоритм його практичної роботи створює основу його подальшої експериментальної перевірки з метою визначення показника, який характеризує кількісний ефект від впровадження розробленого методу.

2.4 Експериментальна та порівняльна перевірка методу інтелектуальних вимірювань. Умови його застосовності та обмеження

Експериментальна перевірка розробленого методу інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань проводилась з метою кількісного оцінювання його точності, стабільності та відтворюваності в умовах дії метрологічного шуму та аномалій. Порівняльна перевірка розробленого методу передбачала порівняння як із базовою версією бутстреп-агрегації без прогнозування вибірок, так і з відомими аналогами, які є найбільш ефективними для використання при вирішенні поточних задач. У результаті проведення симуляційного експерименту було отримано достатньо даних для формування умов застосовності та обмежень розробленого методу.

З метою забезпечення валідаційного охоплення симуляційного експерименту:

- 1) змодельовано сценарій функціонування сенсорної мережі лабораторних випробувань, вимірювані дані було згенеровано для експерименту;
- 2) сформовано серії вимірювань для кожного сенсора мережі;
- 3) відтворено вплив метрологічного шуму та модель аномальних відхилень;
- 4) реалізовано бутстреп-агрегацію;
- 5) проведено оцінювання точності розробленого методу;
- 6) оцінено відтворюваність та стабільності результатів експерименту;
- 7) виконано порівняльну перевірку;

8) проведено серію повторних ітерацій експерименту для аналізу розкиду отриманих значень метрик;

9) перевірено умови застосовності розробленого методу на основі проведеної симуляції;

10) визначено обмеження методу

Валідація розробленого методу виконана на основі симуляційного експерименту. Симуляція виконувалась у середовищі Python 3.10 з використанням бібліотек TensorFlow 2.15 та NumPy.

Функціонування аналогів під час симуляції відтворювались не за конкретними техніко-технічними характеристиками інформаційно-вимірювальних систем, а на основі опублікованих у першоджерелах принципів їх функціонування, математичних моделей, структур обробки даних та параметрів, наведених авторами у публікаціях. З метою забезпечення відтворюваності та коректності експерименту, розроблений метод та аналоги були перевірені в єдиному програмно-модельному середовищі при застосовуванні однакових умови для кожного методу: вхідних даних, обсягу вибірок, рівнів шуму й аномалій, умов оцінювання результатів. У випадках, коли першоджерела не містили повних наборів параметрів для реалізації, відтворювання здійснювалось за базовою алгоритмічною логікою з використанням типових налаштувань, прийнятих для цього класу методів.

Було застосовано наступні умови симуляційного експерименту: моделювалась робота мережі з трьох сенсорів. Базовий сигнал кожного сенсора формувался в межах єдиної імітаційної моделі функціонування сенсорної мережі лабораторних випробувань як часовий ряд із 300 послідовних вимірювань для кожного з трьох сенсорів. Для моделювання умов, характерних лабораторним випробуванням, у згенеровані сенсорні дані впроваджувався метрологічний шум, що задавався як адитивне стохастичне збурення з відносною дисперсією 10%. Аномалії додавались як поодинокі адитивні викиди імпульсного типу у 5% спостережень, що для кожного сенсора становило 15 аномальних значень в рамках 300 вимірювань. Розміщення аномалій на часовому ряду визначалось випадковим чином без повторень в межах поточної реалізації симуляції. Для забезпечення повторюваності

обчислювального експерименту було застосовано фіксоване початкове значення генератора випадкових чисел $random\ seed = 42$. У межах реалізації розробленого методу горизонт прогнозування приймався як $\tau = 1$ кроку. Довжина локального вікна спостережень становила 10 вимірювань. Кількість повторних запусків симуляції становила 30. Величина $\sigma_{i,t}^2$ визначалась як дисперсія локально підготовленого та скоригованого після граничної обробки сигналу. Фактор довіри f_i задавався як параметр надійності каналу, а коефіцієнт важливості $\tilde{f}_i$ як параметр значущості даних сенсора для поточного режиму лабораторних випробувань. Для реалізації бутстреп-агрегації використано 100 реплікацій ($B=100$), що продиктовано потребою отримання стабілізованих оцінок вагових коефіцієнтів та перевірки відтворюваності результатів.

Ілюстративний фрагмент часових рядів сенсорних вимірювань, сформованих за параметрами симуляційного експерименту, наведено на рис. 2.3.

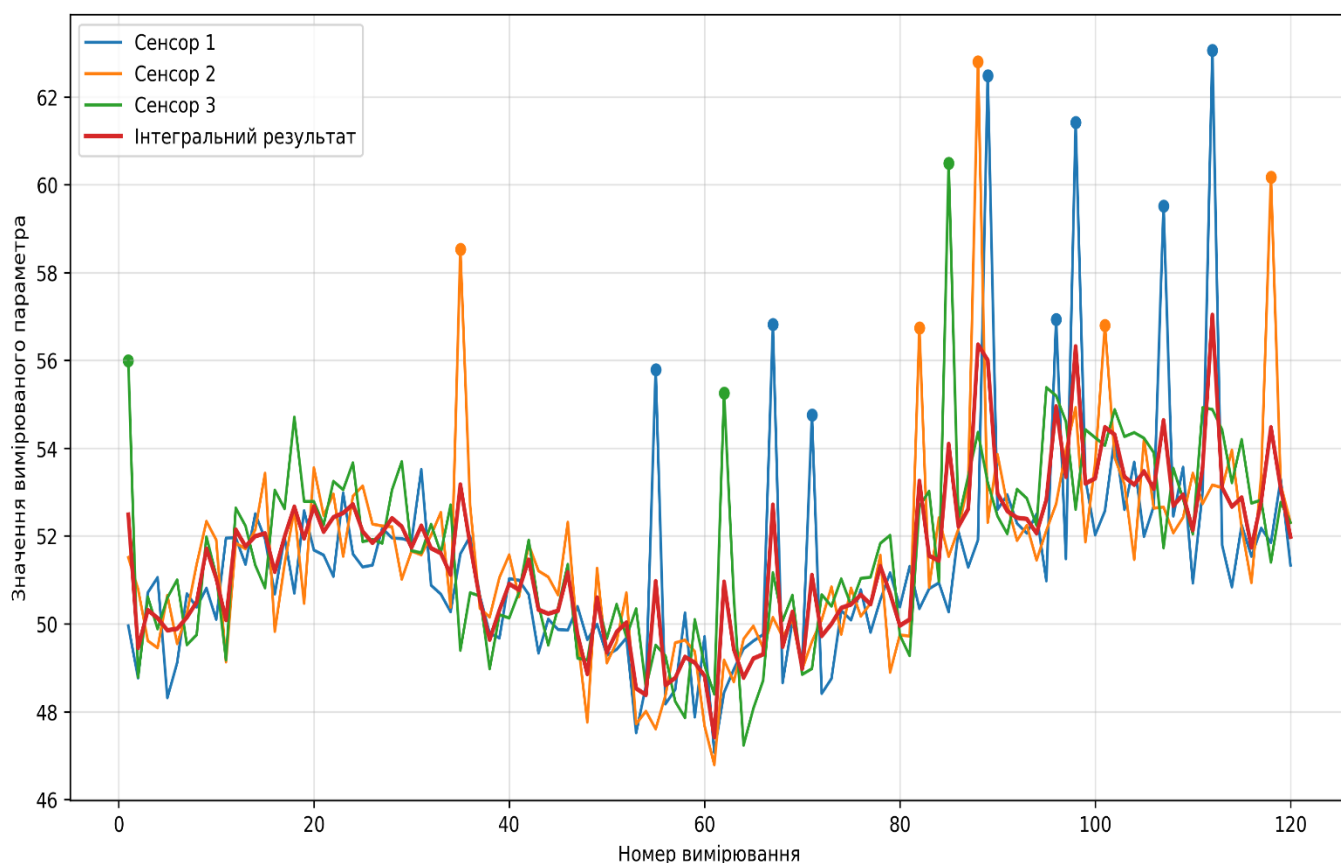


Рисунок 2.3 – Приклад фрагмента сенсорних вимірювань в умовах метрологічного шуму та аномальних відхилень

Для оцінювання ефективності розробленого методу та аналогів використовувались дві метрики: середня абсолютна похибка (MAE) та відтворюваність точності ($STD MAE$).

Середня абсолютна похибка (MAE) характеризує точність інтелектуального вимірювання (чим менше значення тим точніше метод) та обчислювалась за формулою:

$$MAE = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |Y_k^{true} - \hat{Y}_k|, \quad (2.19)$$

де Y_k^{true} – істинне значення вимірювального параметра; $\hat{Y}_k$ – оцінка, сформована методом; K – кількість порівнюваних вимірювань.

Відтворюваність точності ($STD MAE$) характеризує стабільність роботи методу в умовах метрологічного шуму та аномалій та обчислюється через стандартне відхилення значень MAE за формулою:

$$STD_{MAE} = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{l=1}^L (MAE_l - \overline{MAE})^2}, \quad (2.20)$$

де MAE_l – значення середньої абсолютної похибки для l -ї реалізації експерименту; $\overline{MAE}$ – середнє значення похибки; L – кількість реалізацій, за якими оцінюється стабільність.

Нижче значення $STD MAE$ означає вищу стабільність роботи методу в умовах шумів та аномалій (вищу відтворюваність результатів інтелектуального вимірювання).

Для порівняльного аналізу використано як звичайну бутстреп-агрегацію, так і відомі найбільш релевантні поставленій задачі методи. Бутстреп-агрегація без прогнозування вибірок застосовувалась для демонстрації практичного ефекту наукової новизни розробленого методу з метою отримання кількісного показника його роботи. Для порівняння було обрано наступні найбільш релевантні аналоги: BDFU – баєсівське злиття даних з урахуванням невизначеності [66], RLSS – вибір оптимальних сенсорів за допомогою підкріплення [67], DLDM – глибинне виявлення та усунення аномальних вузлів [68]. Використання спеціалізованих

сучасних методів для порівняння робить результати репрезентативними та об'єктивними.

Результати проведеного симуляційного експерименту наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Порівняльні значення метрик якості для досліджуваних моделей

№ з/п	Позначення методу	Джерело	<i>MAE</i>	<i>STD MAE</i>
1	Розроблений	[59]	0,286	0,022
2	Бутстреп без прогнозування вибірок	[69]	0,312	0,041
3	BDFU	[66]	0,302	0,027
4	RLSS	[67]	0,318	0,031
5	DLDM	[68]	0,333	0,045

Розроблений метод продемонстрував найменше (найкраще) значення середньої абсолютної похибки $MAE=0,286$ серед усіх досліджуваних методів. Відповідно до результатів симуляції, розроблений метод забезпечує найвищу точність формування інтегрального результату інтелектуального вимірювання в умовах метрологічного шуму та аномалій. Значення $STD MAE$ для розробленого методу також є найменшим (найкращим) порівняно з аналогами ($STD MAE=0,022$). Таке отримане значення показує найвищу відтворюваність результатів.

Для наочної демонстрації ефекту наведено діаграму (рис. 2.4) значень метрики MAE , отриманих в рамках проведення симуляційного експерименту.

Порівняно із класичною бутстреп-агрегацією без прогнозування вибірок, точність була підвищена на 8,3%, що підтверджує доцільність використання запропонованого в розробленому методі підходу до бутстреп-агрегації. У порівнянні з середнім значенням трьох розглянутих аналогів, відносне підвищення точності наближено дорівнює 10%.

Відносне підвищення надійності, що трактується як стабільність роботи методу в умовах метрологічного шуму та аномалій сягає наближено 36%. У порівнянні з класичною бутстреп-агрегацією підвищення досягає наближено 46,3%.

Для задач лабораторних випробувань важливим фактором виступає не лише середній рівень похибки, але і стабільність її відтворення на повторних реалізаціях симуляційного експерименту.

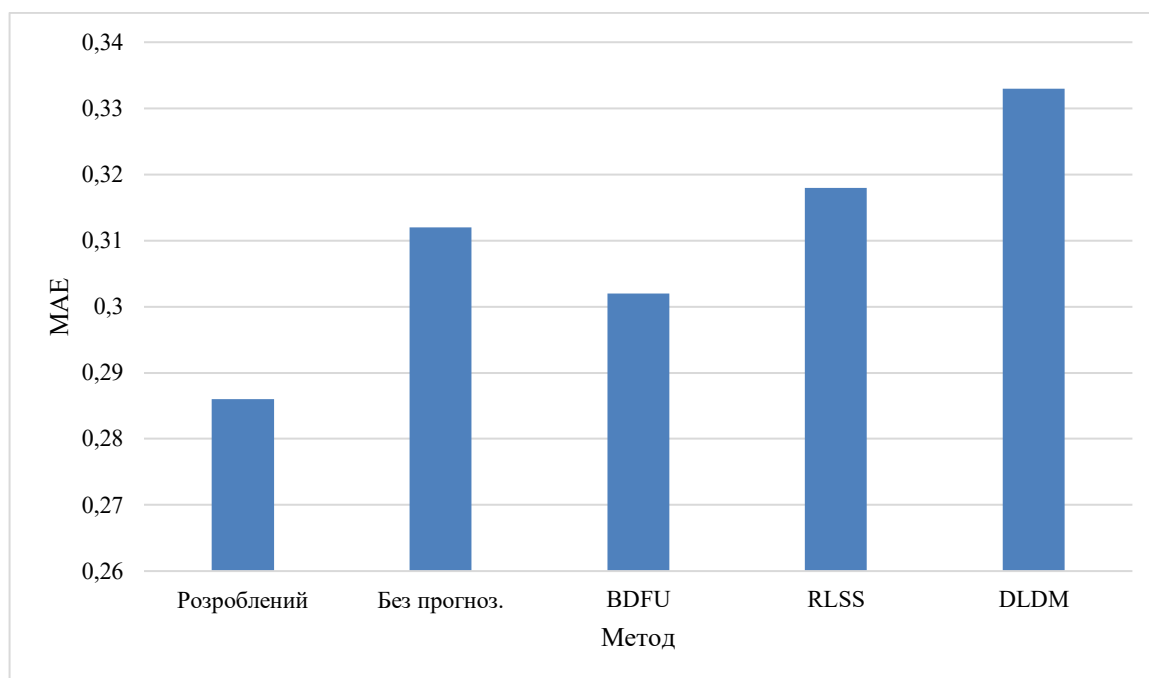


Рисунок 2.4 – Порівняльна діаграма значень метрики MAE для розробленого методу та аналогів

Діаграма показує перевагу розробленого методу над розглянутими аналогами за показником точності.

Для наочного підтвердження відтворюваності результатів інтелектуального вимірювання було сформовано графічне представлення розподілу значень метрики MAE (рис. 2.5), отриманих на 30 повторях симуляційного експерименту для розробленого та аналогічних методів. Графік сформовано засобами Python з використанням бібліотеки Matplotlib за даними отриманими в результаті симуляції.

На рисунку використано діаграму типу boxplot, що дозволяє одночасно відобразити центральне положення, варіативність та розкид значень метрики MAE одночасно для усіх досліджуваних методів. Цей тип діаграми на відміну від звичайного лінійного чи точкового графіку дає змогу на одному зображенні надати результати порівняння середніх значень похибки та стійкості їх розподілу.

Центральна лінія всередині прямокутника відповідає медіані значень метрики MAE . Межі прямокутника відображають міжквартильний розмах (інтервал в межах якого зосереджена основна маса результатів). Лінії відгалудження характеризують загальний діапазон варіації без врахування крайніх викидів. Окремі позначення у вигляді точок біля розробленого методу та глибинного виявлення відображають атипові реалізації експерименту.

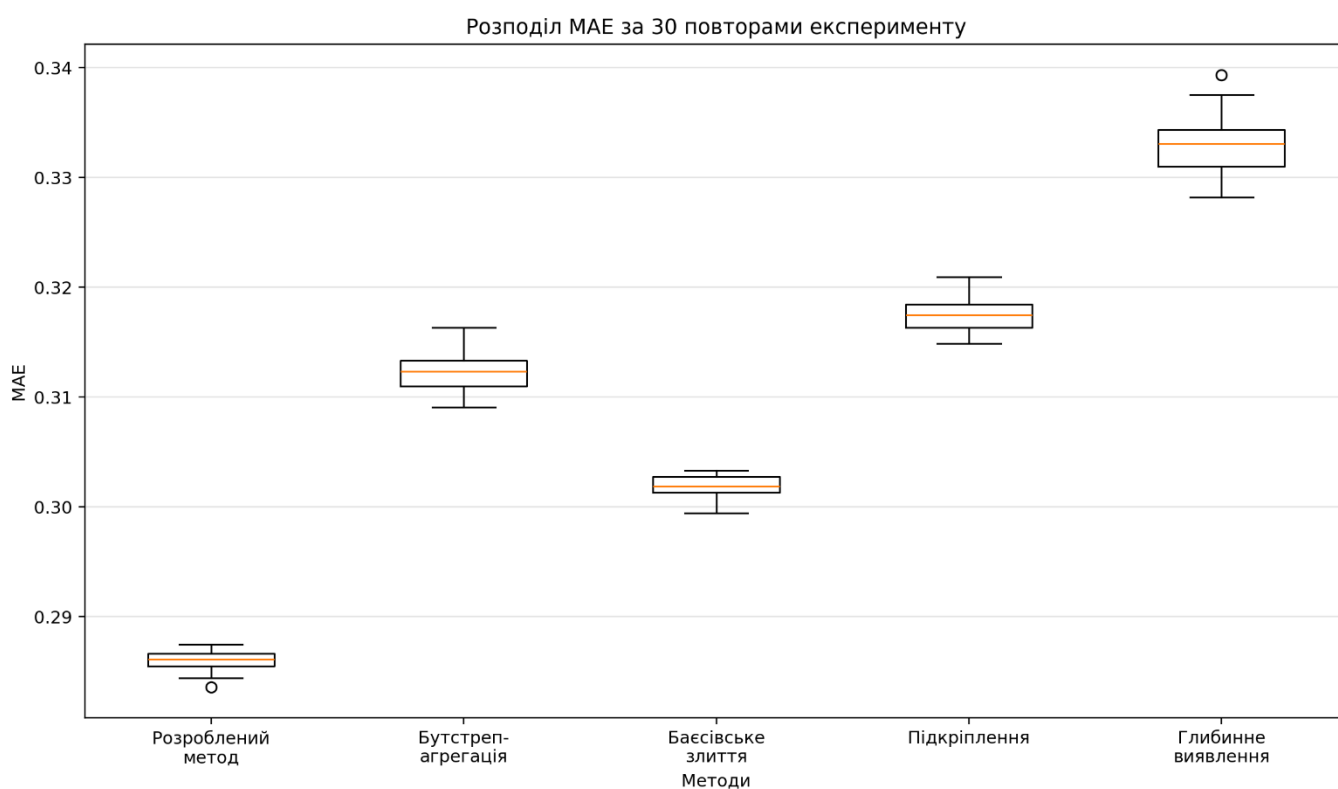


Рисунок 2.5 – Графік розподілу значень MAE на 30 повторах симуляційного експерименту

Графік візуально підтверджує відтворюваність експериментальних результатів. Як видно з графіку, розроблений метод характеризується меншою середньою похибкою та більшою стійкістю результатів у серії повторних симуляцій.

Для узагальненого порівняння точності та відтворюваності досліджуваних методів побудовано було сформовано представлену на рисунку 2.6 площину з урахуванням MAE та $STD MAE$.

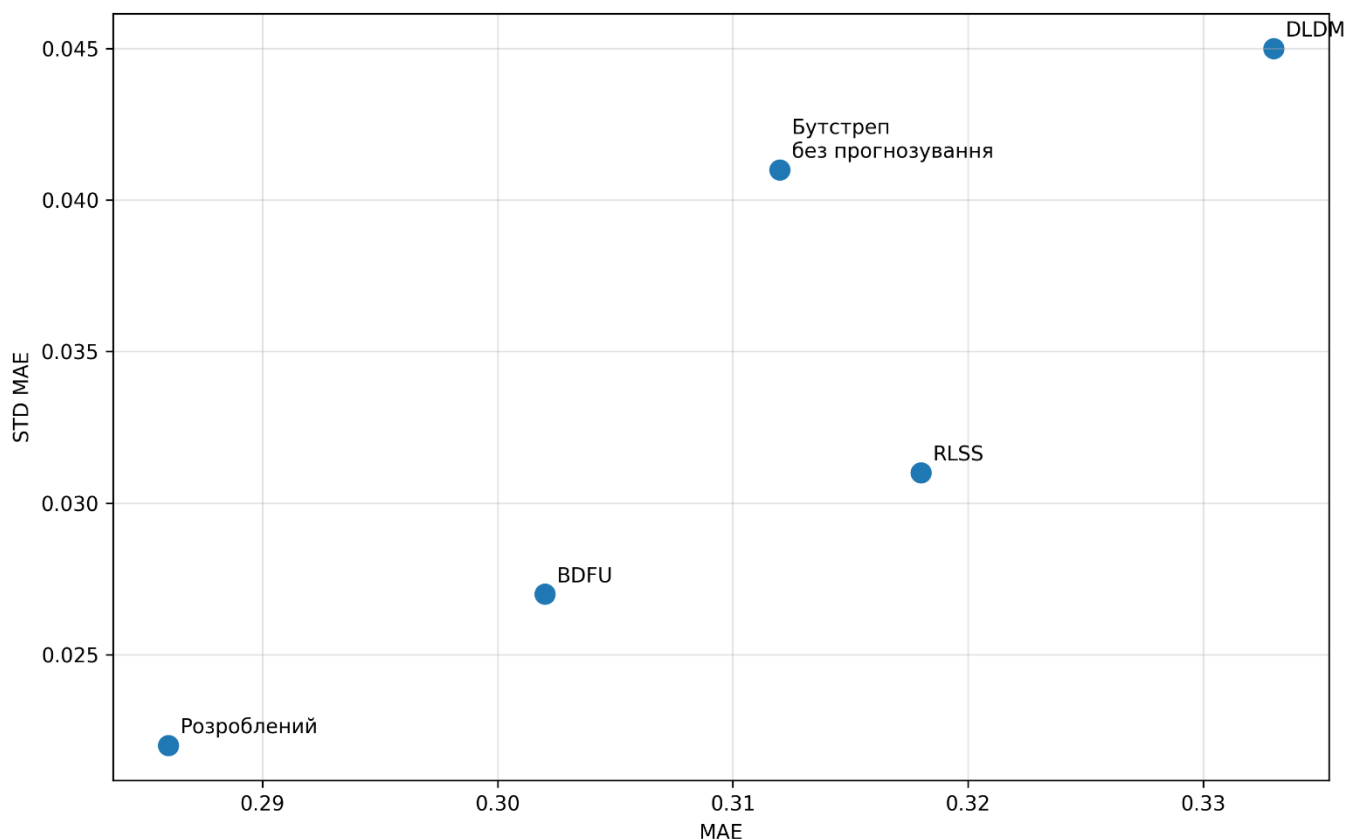


Рисунок 2.6 – Розташування досліджуваних методів у площині точності та відтворюваності

На основі даних, отриманих в ході валідації сформовано умови застосовності розробленого методу, які визначаються особливостями дворівневої організації та використанням прогнозування в процедурі бутстреп-агрегації. Сформовано наступні умови:

1) точність прогнозованого значення повинна бути вищою за точність безпосереднього вимірювання сенсорами мережі (виконання умови $e_{i,t}^{pred} < e_{i,t}^{sens}$, де $e_{i,t}^{pred}$ – похибка прогнозованого значення для i -го сенсора в момент часу t ; $e_{i,t}^{sens}$ – похибка безпосереднього вимірювання того ж сенсора);

2) наявність обсягу темпоральних спостережень, достатнього для формування локальних вибірок, виконання бутстреп-агрегації та оцінювання динаміки стану сенсорного каналу;

3) можливість оцінювання локальних характеристик якості даних, зокрема $MSE_{i,t}$ та дисперсій $\sigma_{i,t}^2$, необхідних для визначення локальних та глобальних вагових коефіцієнтів;

4) для сенсорних каналів повинна бути можливість задати або оцінити фактор довіри f_i та коефіцієнт важливості $\tilde{f}_i$ відповідно до ролі сенсора в поточному режимі лабораторних випробувань;

5) обчислювальні ресурси, включно з рівнем граничних обчислень повинні бути достатніми для реалізації локальної та глобальної бутстреп-агрегації з прогнозуванням вибірок;

6) умови лабораторних випробувань повинні допускати формування узгодженого набору даних для обох (локального і глобального) рівнів інтелектуального вимірювання;

7) структура сенсорної мережі повинна технічно забезпечувати можливість інтеграції даних через приведення до єдиного контуру формування інтегрального результату.

Обмеження розробленого методу пов'язані з межами ефективного використання прогнозування та вагового узгодження в умовах підвищеної невизначеності. До обмежень розробленого методу відноситься:

1) зниження ефективності методу у випадку зниження точності прогнозування порівняно з точністю сенсорів у мережі у випадку, коли прогнозоване значення не забезпечує переваги над безпосереднім сенсорним вимірюванням;

2) чутливість до якості оцінювання локальних параметрів $MSE_{i,t}$, $\sigma_{i,t}^2$, f_i та $\tilde{f}_i$, оскільки помилки у визначенні цих параметрів можуть послабити коректність формування вагових коефіцієнтів;

3) залежність від обсягу темпорального ряду спостережень (закороткі вибірки знижують стабільність прогнозування та обмежують коректність бутстреп-агрегації);

4) зростання обчислювального навантаження зі збільшенням кількості сенсорів у мережі, обсягу спостережень та кількості бутстреп-реплікацій (важливо для реалізації в інформаційно-вимірjuвальних системах з обмеженими ресурсами);

5) зниження коригувального ефекту при зростанні концентрації аномалій або різкого погіршення якості даних у всіх вимірjuвальних каналах одночасно;

6) необхідність узгодженого подання даних на локальному та глобальному рівнях;

7) спрямованість розробленого методу на динамічне зниження впливу похибок без зміни первинного результату вимірjuвань, що впливає на залежність ефективності методу від базової якості сенсорних даних.

Наведені обмеження не спростовують працездатність методу, а визначають межі його коректного застосування та впливають на рівень досягнутого ефекту від його використання. За дотримання сформованих умов застосовності та обмежень, метод забезпечує підвищення точності та відтворюваності інтелектуального вимірjuвання.

2.5 Висновки до розділу 2

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено підвищенню точності та надійності інтелектуальних вимірjuвань, які здійснюються за допомогою сенсорних мереж в процесі проведення лабораторних випробувань в умовах метрологічного шуму та аномалій. Було розроблено метод інтелектуального вимірjuвання в сенсорних мережах лабораторних випробувань на основі формалізованого механізму зниження впливу метрологічного шуму та аномалій на локальні та глобальні ваги вимірjuвальних коефіцієнтів шляхом використання бутстрепової агрегації за рахунок прогнозування вибірок, що дозволило забезпечити стійкість формування інтегрального результату інтелектуального вимірjuвання до впливу метрологічного шуму та аномалій і підвищити точність та відтворюваність результатів інтелектуальних вимірjuвань. При цьому було:

1. Сформовано модель впливу метрологічного шуму та аномалій на результати інтелектуальних вимірювань у сенсорних мережах лабораторних випробувань. Формалізовано загальну структуру відхилення результату вимірювання через систематичну похибку, дрейф, метрологічний шум і аномальні складові, а також уточнено її для умов лабораторних випробувань з урахуванням калібрувального зсуву, впливу зовнішніх кліматичних і механічних факторів та внутрішньолабораторної повторюваності.

2. Сформовано модель вхідних даних для дворівневого процесу інтелектуального вимірювання. Визначено склад первинних вхідних даних, отриманих від сенсорів мережі, який включає результати вимірювань, часові індекси, параметри похибок, шумові та аномальні складові, а також контекстні характеристики режиму випробування. Введено локальний набір вхідних даних для рівня граничних обчислень та глобальний набір локально підготовлених параметрів для рівня міжсенсорної інтеграції.

3. Розроблено та формалізовано метод інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань, а також алгоритм його роботи. Метод включає визначення локальних вагових коефіцієнтів, зниження впливу метрологічного шуму та аномалій на локальні ваги, визначення глобальних вагових коефіцієнтів, зниження впливу метрологічного шуму та аномалій на глобальні ваги та формування скоригованого результату інтелектуального вимірювання. Розроблено структурно-логічну схему методу та алгоритм його реалізації.

4. Проведено експериментальну та порівняльну валідацію розробленого методу у формі симуляційного експерименту функціонування сенсорної мережі лабораторних випробувань. За результатами експерименту встановлено, що розроблений метод забезпечує найменше значення середньої абсолютної похибки $MAE=0,286$ та найменше значення показника розкиду $STD\ MAE=0,022$ досліджених методів. Точність інтелектуального вимірювання підвищена на 8,3% порівняно з бутстреп-агрегацією та приблизно на 10% порівняно із середнім значенням найбільш релевантних аналогів. Розкид похибки зменшено приблизно на 36% порівняно із середнім значенням аналогів і на 46,3% порівняно з класичною

бутстреп-агрегацією, що свідчить про вищу відтворюваність та стійкість розробленого методу в умовах метрологічного шуму та аномалій. За результатами експериментальної перевірки сформульовано умови застосовності методу, а також визначено обмеження методу.

РОЗДІЛ 3

МЕТОД КОГНІТИВНОЇ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ У СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ

У розділі розглядається розроблення ще однієї складової інформаційно-вимірjuвальної технології лабораторних випробувань, що пов'язана з когнітивною обробкою результатів інтелектуальних вимірювань. Якщо в попередньому розділі основну увагу зосереджено на формуванні стійкого інтегрального результату вимірювання в умовах шуму та аномалій, то в цьому розділі результати такого вимірювання розглядаються як вхідна основа для їх подальшого когнітивного узагальнення, онтологічної інтерпретації та підготовки інформації для прийняття рішень щодо стану сенсорної мережі.

Виклад матеріалу розділу спрямований на визначення моделі вхідних даних когнітивної обробки, формалізацію методу когнітивного агрегування та інтерпретації результатів інтелектуальних вимірювань, а також побудову алгоритму його реалізації в межах одного циклу обробки. Окрему увагу приділено зв'язку між вимірювальними результатами, ваговими коефіцієнтами, метаданими, контекстними параметрами та онтологічним описом предметної області. Завершується розділ експериментальною і порівняльною валідацією методу з визначенням умов його застосовності та обмежень.

3.1 Модель вхідних даних для когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань

Розроблений метод когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань є логічним продовженням методу інтелектуальних вимірювань в сенсорних мережах лабораторних випробувань, представленого в розділі 2. Метод когнітивної обробки, функціонує на вищому рівні та використовує у ролі вхідних параметрів результати роботи методу інтелектуальних вимірювань, який забезпечує

формування, інтелектуальну корекцію та зважування результатів вимірювань. Обидва методи забезпечують взаємопов'язані та узгоджені рівні обробки вимірювальної інформації, що формує потребу задання моделі вхідних даних для формалізованого представлення методу когнітивної обробки. Така модель визначає вигляд, у якому до модуля когнітивної обробки передаються результати інтелектуальних вимірювань, вагові коефіцієнти, метадані та контекстні характеристики. Окремі положення щодо когнітивної обробки результатів лабораторних випробувань були попередньо апробовані в роботі [70], де на концептуальному рівні розглядалася необхідність переходу від інтелектуальної сенсорної мережі до когнітивної інформаційної системи, здатної виконувати інтерпретацію, прогнозування та підтримку керуючих рішень у реальному часі.

Основна вимога до моделі вхідних даних у даному випадку полягає у потребі одночасного відображення безпосередніх результатів інтелектуального вимірювання, отриманих від окремих сенсорів сенсорної мережі та узгодженого набору параметрів, придатних для подальшого когнітивного агрегування, онтологічної інтерпретації та використання під час реконфігурації сенсорної мережі.

Сенсорна мережа лабораторних випробувань містить визначену множину сенсорів $A = \{a_i\}$, $i = 1, \dots, N$, де N – кількість сенсорних вузлів, залучених до формування інтегрального результату інтелектуальних вимірювань. Кожен із сенсорів a_i у межах циклу вимірювань k формує локальне значення $x_i(k)$. Локальне значення після застосування методу інтелектуальних вимірювань, представленого у розділі 2, використовується у ролі складової когнітивної обробки. Вимогою до вхідних даних, які надходять на когнітивну обробку є представлення у відмінному від окремих скалярних показів сенсорів вигляді. Вхідні дані подаються у вигляді структурованого набору вимірювальних, вагових, контекстних та службових параметрів. Набір зазначених параметрів у сукупності дозволяє когнітивно інтерпретувати стан кожного окремого сенсорного каналу мережі у межах поточного циклу лабораторних випробувань.

Мінімальний набір вхідних даних для когнітивної обробки складається з двох параметрів: початковий вектор спостережень та вектор локальних вагових коефіцієнтів.

Початковий вектор спостережень у формалізованому вигляді представлений формулою:

$$X(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_N(k)) , \quad (3.1)$$

де $x_i(k)$ – локальне вимірювання, отримане від i -го сенсора у циклі k .

Вектор локальних вагових коефіцієнтів у формалізованому вигляді представлений формулою:

$$W_L(k) = (w_{L,1}(k), w_{L,2}(k), \dots, w_{L,N}(k)) , \quad (3.2)$$

де $w_{L,i}(k)$ – локальний ваговий коефіцієнт i -го сенсора у циклі k , сформований на рівні граничних обчислень з урахуванням метрологічних характеристик сенсорного каналу.

Мінімально необхідний набір вхідних даних для когнітивної обробки представлений кортежем:

$$I(k) = \langle X(k), W_L(k) \rangle . \quad (3.3)$$

Кортеж $I(k)$ визначає мінімально необхідний вхід базового методу когнітивної обробки у тому вигляді, як цей вхід формується у підрозділі 3.2. Для реалізації методу в рамках інформаційно-вимірювальної системи (розділ 4) мінімально необхідний набір вхідних даних розширюється до рівня повного вхідного простору, що враховує скоригований результат інтелектуального вимірювання, глобальні вагові коефіцієнти, метадані та контекстні параметри.

Сукупність вхідних параметрів формує набір даних як про виміряні значення, що важливо для когнітивного аналізу та подальшого автоматизованого прийняття рішень, так й інформацію про ступінь довіри до кожного сенсорного каналу, що є необхідною умовою подальшого когнітивного агрегування результатів вимірювання.

Описаний в (3.3) кортеж відіграє особливо важливу роль для задач когнітивної обробки саме при проведенні лабораторних випробувань через функцію сенсора у

процесі формування інтерпретованого результату вимірювань. Функція сенсору в процесі побудови повного вектора спостережень залежить від вагового коефіцієнта $w_{L,i}(k)$ на рівні із значенням $x_i(k)$.

Мінімально необхідний набір даних відповідає такому, описаному в статті [71], де представлено основні наукові результати щодо розробленого методу когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань. Важливо зазначити, що кортеж мінімально необхідного набору вхідних даних не описує параметри, які передаються на вихід в результаті застосування методу інтелектуального вимірювання, описаного в розділі 2. З метою забезпечення повноцінного функціонування інформаційно-вимірювальної системи, яка реалізує обидва методи, такі параметри потребують розширення та включення скоригованого результату інтелектуального вимірювання разом зі скоригованими локальними і глобальними ваговими коефіцієнтами. Розширення набору вхідних даних дозволяє забезпечити повноту подання, придатного для когнітивної інтерпретації, оцінювання та використання при прийнятті рішень щодо реконфігурації сенсорної мережі в рамках інформаційно-вимірювальної системи, описаної в розділі 4.

Подальші перетворення мінімального набору вхідних даних $I(k)$ пов'язані з формулюванням локальних представлень, повного вектора спостережень та когнітивним агрегуванням, які виконуються на першому етапі методу (підрозділ 3.2). У рамках формування моделі вхідних даних представлено склад вхідних параметрів.

Представлені формулами (3.1)-(3.2) початковий вектор спостережень та вектор локальних вагових коефіцієнтів відповідно представлені у формі позначення, дискретизованому за циклом вимірювання k . Дана форма використовується для розгляду варіанту реалізації методу в межах окремих циклів вимірювання. Для використання цих вхідних параметрів на практиці застосовано форма представлення за безперервною темпоральною характеристикою t . Початковий вектор спостережень у такому випадку набуває виду:

$$x(t) = [x_1(t), \dots, x_N(t)]^T. \quad (3.4)$$

Локальні вагові коефіцієнти набувають виду:

$$w^{loc}(t) = [w_1^{loc}(t), \dots, w_N^{loc}(t)]^T. \quad (3.5)$$

Локальні вагові коефіцієнти формуються на рівні граничних обчислень з урахуванням метрологічних характеристик сенсорів. Ці коефіцієнти утворюються в результаті інтелектуальних вимірювань в сенсорній мережі.

Наведене представлення моделі вхідних даних дозволяє обробляти дані від неоднорідних сенсорних каналів з урахуванням природи вимірюваних величин, точності, чутливості та функціональної ролі у лабораторному випробуванні. Наведена модель за аналогією з моделлю, представленою в підрозділі 2.2 уніфікована за структурою, але враховує гнучкість щодо змісту вимірюваних параметрів. Дана властивість надає можливість розглядати сенсори мережі в єдиному інтегрованому контурі при реалізації та застосуванні методу когнітивної обробки.

Для практичної реалізації методу у вигляді інформаційно-вимірювальної системи важливо сформулювати повний вхідний простір когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань. Даний простір окрім мінімального набору вхідних даних $I(k)$ враховує вхідні параметри, сформовані на етапі інтелектуального вимірювання, метадані та контекстні характеристики:

$$D(k) = \langle X(k), W_L(k), W_G(k), \hat{y}(k), M(k), C(k) \rangle, \quad (3.6)$$

де $X(k)$ – початковий вектор спостережень; $W_L(k)$ – вектор локальних вагових коефіцієнтів, уточнених на етапі інтелектуального вимірювання; $W_G(k)$ – вектор скоригованих глобальних вагових коефіцієнтів; $\hat{y}(k)$ – скоригований результат інтелектуальних вимірювань; $M(k)$ – множина метаданих вимірювального циклу; $C(k)$ – множина контекстних параметрів, пов'язаних з режимами випробувань.

Множина метаданих подається у вигляді кортежу:

$$M(k) = \langle id(k), \tau(k), cal(k), src(k), stat(k) \rangle, \quad (3.7)$$

де $id(k)$ – ідентифікатор циклу вимірювання; $\tau(k)$ – часова мітка; $cal(k)$ – дані про калібрування; $src(k)$ – службова інформація про джерело та маршрут передачі даних; $stat(k)$ – службові ознаки стану сенсорного каналу.

Множина контекстних параметрів циклу лабораторних випробувань визначається кортежем:

$$C(k) = \langle r(k), q(k), e(k), o(k) \rangle, \quad (3.8)$$

де $r(k)$ – режим випробувань; $q(k)$ – етап або сценарій випробувань; $e(k)$ – параметри зовнішнього середовища; $o(k)$ – параметри стану об'єкта випробувань.

Така структура моделі вхідних даних, що враховує метадані та контекстні параметри, формує підґрунтя для подальшого когнітивного оцінювання онтологічної інтерпретації та формування пріоритетів реконфігурації сенсорної мережі у межах замкнутого циклу інтелектуальних вимірювань.

3.2 Формалізоване представлення методу когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань та алгоритм його реалізації

Сформована модель вхідних даних надає інформацію про їх склад, що дозволяє виконати опис послідовності їх перетворення у когнітивно інтерпретований результат та описати це у формалізованому вигляді. Основну структуру методу представлено у роботі [71].

Метод когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань складається з трьох основних етапів: формування повного вектора спостережень, дворівневого зважування та онтологічного формування пріоритетів реконфігурації сенсорної мережі. На кожному з трьох представлених етапів проводиться навчання для забезпечення когнітивної адаптації обробки результатів вимірювань та підвищення їх достовірності.

Окрім основних етапів математичних перетворень, розроблений метод передбачає навчання моделей на кожному з трьох етапів його реалізації. Для навчання застосовано функції втрат з метою забезпечення уточнення параметрів на етапі формування повного вектора спостережень, дворівневого зважування та формування пріоритетів реконфігурації.

Опис формальних перетворень і переходів параметрів наведено на структурно-логічній схемі методу (рис. 3.1).

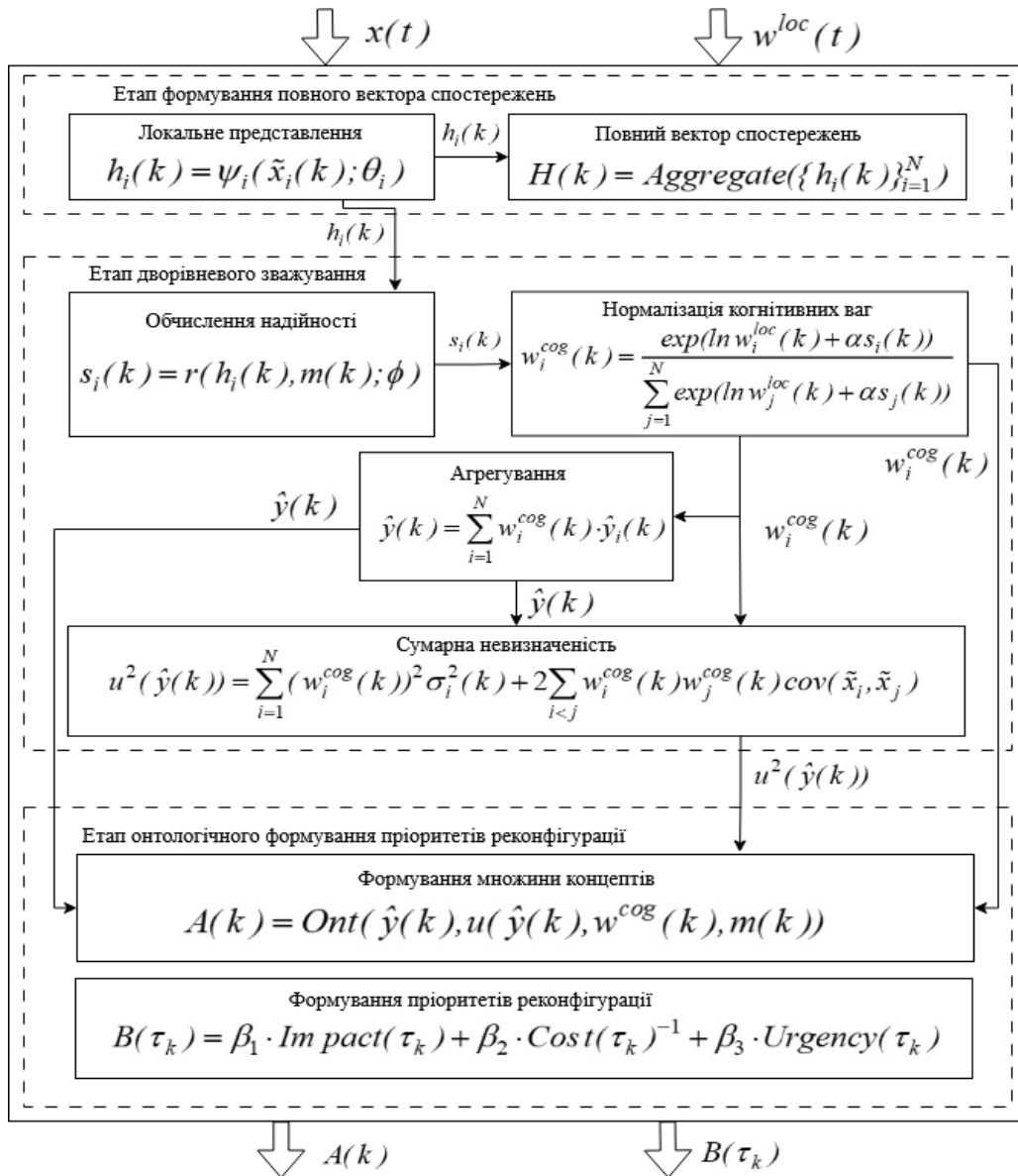


Рисунок 3.1 – Структурно-логічна схема методу когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань

На першому етапі методу виконується формування повного вектора спостережень на основі локального представлення, яке відображає поточний стан сенсора у формі набору ознак, придатних для міжсенсорного порівняння та агрегування. Локальне представлення формується для кожного сенсора на циклі k за формулою:

$$h_i(k) = \psi_i(\tilde{x}_i(k); \theta) , \quad (3.9)$$

де $\tilde{x}_i(k)$ – каліброване значення вимірювань i -го сенсора на циклі k ; $\psi_i(.)$ – функція

видобутку ознак; Θ – параметри функції видобутку ознак для i -го сенсорного каналу.

Параметри Θ визначають конфігурацію функції $\psi_i(\cdot)$. До складу параметрів входить: налаштування попередньої нормалізації, масштабування, виділення ознак і локального пристосування моделі до типу сенсорного каналу. Локальне представлення загалом містить ознаки, достатні для подальшої оцінки надійності вимірювального каналу та когнітивного агрегування завдяки розширенню параметрів. До скоригованого значення $\tilde{x}_i(k)$ додаються наведені ознаки.

Для модуля когнітивної обробки формується повний вектор спостережень з використанням локального представлення. З метою формування повного вектора спостережень когнітивного модуля, виконується агрегування локальних представлень за наступною формулою:

$$H(k) = \text{Aggregate}(\{h_i(k)\}_{i=1}^N), \quad (3.10)$$

де $\text{Aggregate}(\cdot)$ – стандартна операція агрегування локальних представлень, що зберігає структуру даних.

У рамках дисертаційного дослідження $\text{Aggregate}(\cdot)$ виступає операцією узгодженого зведення локальних представлень у спільному просторі спостережень. Необхідною умовою є проведення синхронізації локальних представлень за циклом вимірювання та приведення до форми, придатної для спільної когнітивної обробки ще на етапі, який передуює агрегуванню. Результати інтелектуальних вимірювань на цьому етапі трансформуються з набору сенсорних оцінок до форми узгодженого когнітивного представлення.

В описаному випадку в якості $\text{Aggregate}(\cdot)$ використовується зважене середнє. Використання зваженого середнього зумовлено процедурою оцінювання локальних вагових коефіцієнтів, яка виконується на рівні граничних обчислень. Повний вектор спостережень на етап когнітивної обробки направляється враховуючи параметри надійності усіх використаних у сенсорній мережі сенсорів.

Для адаптації параметрів на етапі формування повного вектора спостережень з метою забезпечення узгодження локальної оцінки та калібрування сенсорних представлень застосовується стандартна функція втрат:

$$L_{vec} = MSE_{loc} + \eta \cdot regularizer , \quad (3.11)$$

MSE_{loc} характеризує локальну середньоквадратичну помилку формування представлень, а $regularizer$ забезпечує регуляризацію параметрів моделі ваговим коефіцієнтом η .

На другому етапі методу проводиться оцінювання надійності сформованих локальних представлень. Важливим процесом другого етапу виступає визначення когнітивних вагових коефіцієнтів.

Для кожного сенсора сенсорної мережі виконується обчислення показника надійності за формулою:

$$s_i(k) = r(h_i(k), m(k); \phi) , \quad (3.12)$$

де $r(.)$ – когнітивна модель оцінки надійності; $m(k)$ – метадані вимірювального циклу (сформовані у підрозділі 3.1); ϕ – параметри моделі оцінювання.

Параметри вимірювального циклу ϕ задають конфігурацію когнітивної оцінки надійності. Ці параметри уточнюються у процесі навчання та накопичення даних.

Когнітивна модель оцінки описується наступною формулою:

$$r(h_i(k), m(k); \phi) = \lambda f_{ml}(h_i(k)) + (1 - \lambda) f_{rule}(m(k)) , \quad (3.13)$$

де $f_{ml}(h_i(k))$ – оцінка якості локального представлення $h_i(k)$, сформована компонентом машинного навчання; $f_{rule}(m(k))$ – коригувальна оцінка, визначена на основі правил урахування метаданих вимірювального циклу; λ – коефіцієнт балансу між оцінкою якості сигналу та правилом урахуванням умов експерименту.

Конкретизація структури моделі оцінки показує, що надійність виступає комбінацією оцінки на основі машинного навчання та корекції на основі правил.

Величина $s_i(k)$ визначається внутрішніми ознаками локального представлення $h_i(k)$ з урахуванням умов проведення випробувань, що відповідає вимогам лабораторних вимірювань. Параметри ϕ задають конфігурацію моделі оцінювання

надійності. Уточнення параметрів відбувається під час навчання та накопичення масиву даних.

Оцінки надійності виступають підґрунтям для нормалізації когнітивних вагових коефіцієнтів. Нормалізація виконується на основі функції Softmax за формулою:

$$w_i^{cog}(k) = \frac{\exp(\ln w_i^{loc}(k) + \alpha s_i(k))}{\sum_{j=1}^N \exp(\ln w_j^{loc}(k) + \alpha s_j(k))}. \quad (3.14)$$

Така форма подання дозволяє одночасно забезпечити врахування вагових коефіцієнтів, отриманих під час інтелектуального вимірювання та врахування поточної когнітивної оцінки надійності сенсорного каналу. Включення локальної ваги сенсора до когнітивно скоригованої оцінки забезпечується використанням $\ln w_i^{loc}(k)$ у складі аргументу експоненційної функції, завдяки чому досягається збереження нормованої форми Softmax перетворення. Чутливість моделі до відмінностей у значеннях $s_i(k)$ забезпечується параметром α . У результаті формується вектор когнітивних ваг із сумою компонентів, рівною 1, завдяки функції Softmax.

Після визначення когнітивних вагових коефіцієнтів виконується злиття локальних оцінок. Така логіка злиття узгоджується з підходами, у яких кожне вимірювання розглядається разом з оцінкою довіри, пов'язаною з дисперсією його похибки, а підсумковий результат формується як зважене об'єднання сенсорних оцінок [72]. Для злиття використовується скоригований локальний результат i -го сенсора. Злиття локальних оцінок виконується з урахуванням скоригованих глобальних вагових коефіцієнтів за формулою:

$$\hat{y}_i(k) = w_i^{glob}(k) \tilde{x}_i(k), \quad (3.15)$$

де $w_i^{glob}(k)$ – скоригований глобальний ваговий коефіцієнт, сформований під час інтелектуального вимірювання.

Таке представлення пояснюється зв'язком методу інтелектуального вимірювання з методом когнітивної обробки, який обробляє результати інтелектуального вимірювання.

Інтегральний результат когнітивної обробки формується за формулою:

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^N w_i^{cog}(k) \cdot \hat{y}_i(k) . \quad (3.16)$$

Інтегральний результат представлений поєднанням трьох складових частин: локально скоригованих значень $\tilde{x}_i(k)$, глобальних ваг $w_i^{glob}(k)$, які призначені для відображення місця сенсора у вимірювальному контурі та когнітивних ваг $w_i^{cog}(k)$, призначених для врахування поточної надійності та значущості спостережень. Інтегральна оцінка є результатом когнітивно скоригованим результатом, придатним для подальшої інтеграції на відміну від результату вимірювального агрегування.

Виникає потреба оцінювання достовірності інтегрального результату. Достовірність обчислюється на основі сумарної невизначеності за формулою:

$$u^2(\hat{y}(k)) = \sum_{i=1}^N (w_i^{cog}(k))^2 \sigma_i^2(k) + 2 \sum_{i < j} w_i^{cog}(k) w_j^{cog}(k) cov(\tilde{x}_i, \tilde{x}_j) , \quad (3.17)$$

де $\sigma_i^2(k)$ – локальна дисперсія результатів i -го сенсора на циклі k ; $cov(\tilde{x}_i, \tilde{x}_j)$ – коваріація між каліброваними значеннями двох сенсорів.

Значення локальної дисперсії $\sigma_i^2(k)$ визначаються як локальні оцінки дисперсії. Коваріаційні члени необхідні для врахування можливої статистичної залежності між сенсорними каналами. Такі випадки, як функціонування сенсорів у спільному фізичному середовищі, яке відтворює лабораторні умови та реакція сенсорів на спільні кліматичні чи механічні впливи вимагають урахування коваріації.

Формула (3.16) надає можливість збереження метрологічної складової достовірності у межах когнітивної обробки. Для сенсорних мереж, які використовуються під час лабораторних випробувань за умов зовнішніх кліматичних та механічних впливів таке збереження метрологічної складової є принциповою умовою.

На етапі дворівневого зважування та злиття даних для оптимізації когнітивних вагових коефіцієнтів застосовано комбіновану функцію втрат, яка враховує точність інтегральної оцінки, регуляризацию та невизначеність:

$$L_{fus} = E[(\hat{y} - y_{true})^2] \lambda_1 L_{reg} + \lambda_2 L_{uncert} , \quad (3.18)$$

де $E[(\hat{y} - y_{true})^2] \lambda_1 L_{reg}$ характеризує середню квадратичну похибку інтегрального результату когнітивної обробки відносно еталонного значення y_{true} ; L_{reg} задає

регуляризаційну складову; L_{uncert} – врахування невизначеності; λ_1, λ_2 – вагові коефіцієнти відповідних компонент.

На третьому етапі методу проводиться онтологічне формування результатів когнітивної обробки. Подібний підхід узгоджується із сучасними семантико-орієнтованими підходами до реконфігурації інтелектуальних сенсорів, у яких рішення про реконфігурацію формуються на основі онтологічних модулів, логічних правил та урахування контексту використання сенсорного середовища [73]. Числові значення оцінок $\hat{y}(k)$, $u(\hat{y}(k))$, $w^{cog}(k)$ та метадані $m(k)$ за рахунок використання онтологічного інжинірингу трансформуються у множину концептів предметної області за формулою:

$$A(k) = \sum_{i=1}^N Ont(\hat{y}(k), u(\hat{y}_i(k)), w^{cog}(k), m(k)). \quad (3.19)$$

Детально про роль онтології вказано у підрозділі 3.3. Важливо конкретизували безпосередню форму результату онтологічного відображення без зміни базового представлення (3.19). Форма результату описується формулою:

$$A(k) = \{\langle type_j(k), value_j(k), conf_j(k) \rangle\}_{j=1}^{J_A}. \quad (3.20)$$

де $\langle type_j(k), value_j(k), conf_j(k) \rangle$ – окремий концепт, сформований на основі онтологічного відображення; $type_j(k)$ – тип концепту; $value_j(k)$ – значення концепту; $conf_j(k)$ – оцінка довіри до концепту.

На основі онтології, яка формує множини концептів, визначається пріоритет реконфігурації сенсорної мережі за формулою:

$$B(\tau_k) = \beta_1 \cdot Impact(\tau_k) + \beta_2 \cdot Cost(\tau_k)^{-1} + \beta_3 \cdot Urgency(\tau_k), \quad (3.21)$$

де τ_k – конкретна операція реконфігурації на циклі k ; $Impact(\tau_k)$ – очікуваний ефект від виконання операції; $Cost(\tau_k)$ – ресурсна вартість; $Urgency(\tau_k)$ – терміновість; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – коефіцієнти важливості критеріїв.

Під очікуваним ефектом $Impact(\tau_k)$ мається на увазі очікуваний позитивний ефект реконфігурації для достовірності, стійкості та адаптивності вимірювального процесу. Під вартістю $Cost(\tau_k)$ в даному випадку розуміють необхідні ресурси ля реалізації операції з реконфігурації, а під терміновістю $Urgency(\tau_k)$ – необхідність виконання відповідної реконфігураційної дії в поточній ситуації випробувань.

Значення трьох критеріїв формуються на основі результатів когнітивної обробки, метаданих поточного циклу та правил оцінювання реконфігураційних дій. Три розглянуті критерії реконфігурації дозволяють сформувати пріоритет на основі узгодженого правила, яке враховує затрачені ресурси (обчислювальні, енергетичні тощо) та ефект, досягнення якого очікується з огляду на обмеження практичної реалізації таких дій.

На етапі формування пріоритету реконфігурації для навчання застосовано типову функцію середньоквадратичної помилки:

$$L_{prior} = MSE(\Delta accuracy, \Delta accuracy_{true}), \quad (3.22)$$

де $\Delta accuracy$ – величина, що характеризує прогнозовану зміну точності або ефективності вимірювального процесу внаслідок виконання дій з реконфігурації; $\Delta accuracy_{true}$ – еталонне значення величини, або фактично досягнуте значення в процесі навчання.

Критично важливою характеристикою розробленого методу є його адаптивність, досягнута за рахунок навчання на усіх трьох рівнях методу: на рівні формування повного вектора спостережень, при дворівневому зважуванні та на рівні онтологічного формування пріоритетів реконфігурації. Завдяки трирівневому навчанню досягається пристосування методу до змін умов лабораторних випробувань, поточної конфігурації сенсорної мережі та накопичення нових даних від сенсорів.

Алгоритм реалізації методу когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань (додаток Б) в межах одного циклу включає наступні кроки:

1) отримання від методу інтелектуального вимірювання вхідних даних циклу k : початкових сенсорних спостережень $X(k)$, локальних $W_L(k)$ і глобальних $W_G(k)$ вагових коефіцієнтів, скоригованих локальних результатів $\hat{y}(k)$ та службової інформації про поточний цикл лабораторних випробувань $M(k)$ та $C(k)$;

2) ініціалізація поточного циклу когнітивної обробки, що включає множину сенсорів $A = \{a_i\}$, локальних представлень $h_i(k)$, оцінок надійності $s_i(k)$,

когнітивних вагових коефіцієнтів $w_i^{cog}(k)$, інтегрального результату когнітивної обробки $\hat{y}(k)$ та множини концептів $A(k)$;

3) формування локальних представлень $h_i(k)$ на основі локально скоригованого значення вимірювання та параметрів функції видобутку ознак для кожного сенсора $a_i, i = 1, \dots, N$;

4) формування повного вектора спостережень $H(k)$ на основі агрегування локальних представлень для всіх сенсорів;

5) обчислення показників надійності сенсорних каналів $s_i(k)$ для кожного сенсора $a_i, i = 1, \dots, N$ на основі локального представлення та метаданих поточного циклу вимірювань;

6) формування вектора когнітивних вагових коефіцієнтів $w_i^{cog}(k)$ при нормалізації отриманих оцінок надійності та локальних вагових коефіцієнтів шляхом Softmax перетворення;

7) формування скоригованих локальних результатів для кожного сенсора $a_i, i = 1, \dots, N$ з урахуванням глобального вагового коефіцієнту;

8) виконання злиття локальних результатів для отримання інтегрального результату когнітивної обробки $\hat{y}(k)$ на основі скоригованих локальних результатів та когнітивних вагових коефіцієнтів;

9) обчислення сумарної невизначеності $u^2(\hat{y}(k))$ з урахуванням локальних дисперсій та коваріаційних складових за наявності статистичної залежності між сенсорними каналами;

10) формування множини концептів $A(k)$ за рахунок онтологічного відображення числових результатів когнітивної обробки, когнітивних вагових коефіцієнтів та супровідних метаданих;

11) формування пріоритету реконфігураційних дій $B(\tau_k)$ на основі критеріїв очікуваного ефекту, вартості та терміновості;

12) передача відповідної дії контуру прийняття реконфігураційних рішень як пріоритетної у випадку перевищення значенням $B(\tau_k)$ встановленого порогу

активації, в іншому ж випадку збереження результатів поточного когнітивного циклу для подальшого когнітивного узагальнення без ініціювання реконфігурації;

13) передача інтегрального результату когнітивної обробки $\hat{y}(k)$, сумарної невизначеності $u^2(\hat{y}(k))$, множини концептів $A(k)$ та пріоритету реконфігурації $B(\tau_k)$ до модуля когнітивного узагальнення та інтерпретації;

14) виконання уточнення параметрів моделей, що використовуються на усіх етапах за наявності нових накопичених даних, зміни умов лабораторних випробувань або після завершення заданої кількості циклів.

Формалізований опис методу когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань формує послідовний перехід від сенсорних спостережень до утворення інтегрального когнітивно скоригованого результату з оцінкою його невизначеності та пріоритетів реконфігурації сенсорної мережі. Формалізований опис фіксує процедуру математичних обчислень методу та логіку передачі результатів вимірювання до подальшої інтерпретації. З метою перетворення результатів когнітивної обробки у форму змістовного представлення станів, залежностей і рішень предметної області наводиться модель когнітивного узагальнення та інтерпретації.

3.3 Модель когнітивного узагальнення та інтерпретації результатів інтелектуальних вимірювань

Формалізоване представлення методу когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань забезпечує формування ряду величин на рівні числових оцінок показників. Змістова інтерпретація цих числових оцінок належить моделі когнітивного узагальнення. Процеси узагальнення та інтерпретації зумовлені потребою утворення завершеного змістовного представлення стану сенсорної мережі в умовах лабораторних випробувань. Модель когнітивного узагальнення та інтерпретації поєднує результати поточного циклу вимірювань, інформації про попередні цикли вимірювань, онтологічний опис предметної області та когнітивну карту переходів між ситуаціями та рішеннями.

У межах когнітивної обробки результатів інтелектуального вимірювання когнітивне узагальнення та інтерпретація розглядається як процедура поєднання результатів поточного циклу інтелектуального вимірювання з найбільш вагомими результатами попередніх вимірювань. Наступним кроком після такого поєднання є перехід до онтологічно інтерпретованого представлення. Завдяки такому підходу когнітивної обробки досягається врахування поточного стану вимірювального контуру на рівні з динамікою його змін, досвідом попередніх випробувань та релевантністю попередніх подій до поточного лабораторного випробування.

У роботі [74] представлено результати дослідження за темою дисертації у напрямку когнітивного моделювання під час обробки даних в IoT-орієнтованих сенсорних мережах з використанням переходів концептів онтології лабораторних випробувань, які дозволили виконувати моделювання процесів автоматизованого прийняття управлінських рішень в інформаційно-вимірювальній системі з когнітивною обробкою даних. Для когнітивних процесів узагальнення та інтерпретації під час лабораторних випробувань застосовується три типи пам'яті: короткострокова, довгострокова та інтегрована змішана. Така концепція ґрунтується на особливостях структурування даних, які формуються у мозку людини та основані на динамічних процесах пам'яті [75]. У якості короткострокової пам'яті виступає сукупність результатів поточного циклу когнітивної обробки вимірювальних даних. Така сукупність результатів описується формулою:

$$K_{cur}(k) = \langle \hat{y}(k), u(\hat{y}(k)), W^{cog}(k), M(k), C(K) \rangle, \quad (3.23)$$

де $\hat{y}(k)$ – інтегральний результат когнітивної обробки; $u(\hat{y}(k))$ – оцінка сумарної невизначеності результату; $W^{cog}(k)$ – вектор когнітивних вагових коефіцієнтів; $M(k)$ – метадані вимірювального циклу; $C(K)$ – контекстні параметри поточного циклу лабораторних випробувань.

У якості довгострокової пам'яті виступає множина найбільш значущих результатів попередніх циклів вимірювань, які зберігаються у базі даних інформаційно-вимірювальної системи. Така множина описується формулою:

$$K_{hist}(k) = \{K_{cur}(q) | q < k, q \in Q_{sig}\}, \quad (3.24)$$

де Q_{sig} – множина попередніх циклів вимірювань, значущих для подальшого когнітивного узагальнення.

Інтеграція короткострокової та довгострокової пам'яті виконується з урахуванням релевантності результатів попередніх циклів вимірювань для поточного циклу на основі множини релевантних прецедентів. Інтегрована змішана пам'ять описується формулою:

$$P(k) = \{K_{cur}(q), \mu(q, k) | q \in Q_{sig}\}, \quad (3.25)$$

де $\mu(q, k)$ – міра подібності між поточним циклом вимірювань k та попереднім q .

Міра подібності відображає ступінь наближення режиму випробувань до стану об'єкта випробувань, параметрів навколишнього середовища, змодельованого у лабораторних умовах та отриманих вимірювальних результатів. Міра подібності обчислюється за формулою:

$$\mu(q, k) = \lambda_1(1 - \frac{\|C(q) - C(k)\|}{d_C}) + \lambda_2(1 - \frac{\|\hat{y}(q) - \hat{y}(k)\|}{d_y}) + \lambda_3(1 - \frac{\|u(\hat{y}(q)) - u(\hat{y}(k))\|}{d_u}) + \lambda_4(1 - \frac{\|W^{cog}(q) - W^{cog}(k)\|}{d_W}), \quad (3.26)$$

де d_C, d_y, d_u, d_W – нормувальні коефіцієнти для відповідних груп параметрів; λ_r – вагові коефіцієнти складових міри подібності ($\sum_{r=1}^4 \lambda_r = 1$).

Множина попередніх циклів вимірювань задається формулою:

$$Q_{sig} = \{q < k | \mu(q, k) \geq \mu_{thr}, |\hat{y}(q) - \hat{y}(k)| \leq \delta_y\}, \quad (3.27)$$

де μ_{thr} – порогове значення релевантності; δ_y – допустиме відхилення інтегрального результату.

Інтегрована пам'ять для когнітивного узагальнення приймає вигляд:

$$K^*(k) = \langle K_{cur}(k), P(k) \rangle. \quad (3.28)$$

Інтегрована пам'ять відіграє ключову роль у процесі змістового тлумачення отриманих результатів. Онтологічна модель когнітивного узагальнення та інтерпретації набуває виду:

$$O(k) = \langle A, T, C, K_{cur}(k), K_{hist}(k), K^*(k), S \rangle, \quad (3.29)$$

де A – множина концептів предметної області; T – множина можливих задач або дій у процесі лабораторних випробувань; C – множина термінів, які розкривають зміст концептів; S – множина інтерпретованих станів.

Онтологія виконує функцію задання словника понять, у термінах якого можуть бути інтерпретовані результати когнітивної обробки та забезпечує зв'язок між числовими оцінками, ситуаціями предметної області і потенційними рішеннями щодо подальших дій у сенсорній мережі лабораторних випробувань.

Множина концептів, що формується під час онтологічного відображення $A(k)$ виступає узагальненим семантичним представленням, у якому поєднуються оцінки вимірювального результату, невизначеності, довіри до сенсорних каналів, службово-контекстні характеристики та релевантні історичні прецеденти. Онтологічне відображення представлено об'єднанням підмножин:

$$A(k) = A_y(k) \cup A_u(k) \cup A_w(k) \cup A_m(k) \cup A_p(k), \quad (3.30)$$

де $A_y(k)$ – концепти, сформовані на основі інтегрального результату $\hat{y}(k)$; $A_u(k)$ – концепти, пов'язані з невизначеністю $u(\hat{y}(k))$; $A_w(k)$ – концепти, що відображають структуру когнітивних ваг $W^{cog}(k)$; $A_m(k)$ – концепти, сформовані з метаданих і контекстних параметрів; $A_p(k)$ – концепти, отримані внаслідок зіставлення поточної ситуації з релевантними прецедентами множини $P(k)$.

Взаємозв'язки між концептами, ситуаціями та рішеннями представлені когнітивною картою, яка будується з використанням механізмів, представлених у роботі [76] та набуває виду орієнтованого знаково-зваженого графа:

$$G_{cog}(k) = \langle V(k), E(k), \sigma(k), w(k), X^{(0)}(k) \rangle, \quad (3.31)$$

де $V(k)$ – множина вершин графа; $X^{(0)}(k)$ – вектор початкових рівнів активації вершин; $E(k) \subseteq V(k) \times V(k)$ – множина дуг; $\sigma(k): E(k) \rightarrow \{-1, +1\}$ – функція знаку впливу; $w(k): E(k) \rightarrow [0,1]$ – функція ваги впливу.

Множина вершин когнітивної карти включає концепти, можливі дії та інтерпретовані стани предметної області і задається як:

$$V(k) = A(k) \cup T \cup S. \quad (3.32)$$

Дуга зі знаком “+” відображає посилення значущості наступної вершини зі зростанням значущості попередньої. Дуга зі знаком “-” відображає послаблення значущості наступної вершини.

Початкові ненульові рівні активації задаються для вершин, що відповідають $A(k)$, сформованим на поточному циклі вимірювань. Поширення впливів між вершинами когнітивної карти виконується для $v \in V(k)$ за наступним правилом:

$$X_v^{(t+1)}(k) = f(X_v^{(t)}(k) + \sum_{u:(u,v) \in E(k)} \sigma_{uv}(k) w_{uv}(k) X_u^{(t)}(k)), \quad (3.33)$$

де $X_v^{(t)}(k)$ – рівень активації вершини v на ітерації t ; $f(\cdot)$ – функція нормалізації, що забезпечує обмеження значень активації в заданому діапазоні; $w_{uv}(k)$ – нормована сила причинно-наслідкового впливу вершини u на вершину v .

Нормована сила визначається на основі бази знань системи та уточняється з урахуванням статистики релевантних прецедентів при тому, що $0 \leq w_{uv}(k) \leq 1$ та $(u, v) \in E(k)$.

Функція нормалізації є сигмоїдною, забезпечує обмеження рівнів активації вершин у діапазоні $[0,1]$ та запобігає неконтрольованому зростанню значень у процесі ітераційного поширення впливів. Функція описується формулою:

$$f(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}. \quad (3.34)$$

Ітераційне поширення впливів виконується до досягнення стаціонарного вектора активації:

$$X^*(k) = X^{(T)}(k), \quad \|X^{(t+1)}(k) - X^{(t)}(k)\| < \varepsilon, \quad (3.35)$$

де ε – наперед заданий поріг збіжності.

Наведена формалізація дозволяє забезпечити обчислювальну функцію когнітивної карти, яка реалізується через ініціацію активації відповідних вершин множиною концептів $A(k)$. Узгоджене представлення поточного стану сенсорної мережі, релевантних дій та наслідків їх реалізації формується через систему знаково-зважених зв'язків.

Когнітивна карта у графічному вигляді представлена на рисунку 3.2.

На вершинах карти позначено концепти ($A(k)$), інтерпретовані стани (S) та дії (T). До концептів належать: a_1 – зниження інтегральної достовірності результату вимірювання; a_2 – зростання сумарної невизначеності; a_3 – дисбаланс когнітивних ваг сенсорів; a_4 – деградація або нестабільність сенсорного каналу; a_5 – аномальний режим зовнішнього середовища випробувань; a_6 – конфлікт показів між сенсорними

каналами. До інтерпретованих станів належать: s_1 – стан локальної нестабільності сенсорного каналу; s_2 – стан вимірювальної невизначеності; s_3 – стан потреби реконфігурації сенсорної мережі. До дій належать: t_1 – переналаштування вагових коефіцієнтів; t_2 – повторне калібрування каналу; t_3 – ізоляція або виключення проблемного каналу; t_4 – перемикання на резервний або альтернативний канал; t_5 – повторний цикл вимірювання.

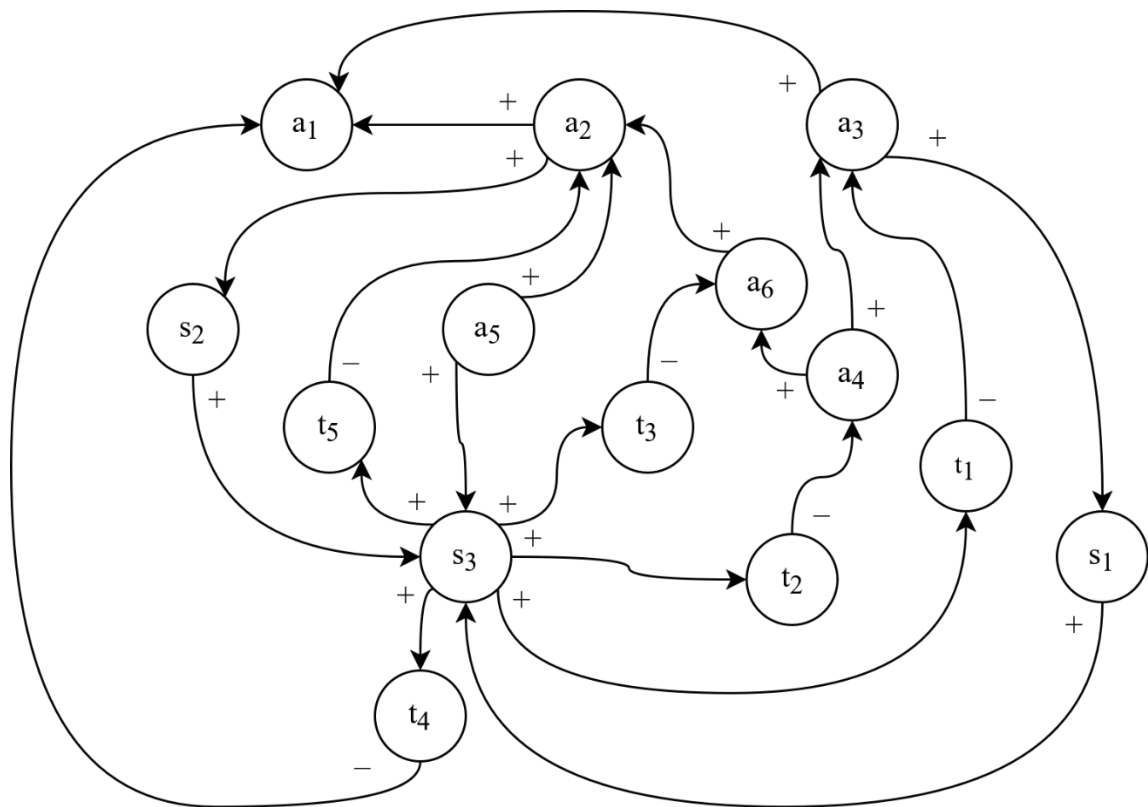


Рисунок 3.2 – Когнітивна карта узагальнення та інтерпретації результатів інтелектуальних вимірювань в сенсорних мережах лабораторних випробувань

Узагальнення результатів когнітивної обробки вимірних даних з використанням когнітивної карти виконується за рахунок побудови шляхів переходу від концептів до рішень і до інтерпретованих станів за формулою:

$$a_i(k) \rightarrow t_l \rightarrow s_j(k). \quad (3.36)$$

де $a_i(k) \in A(k)$ – концепт, сформований за результатами поточного циклу вимірювань; $t_l \in T$ – потенційна дія або задача; $s_j(k) \in S$ – інтерпретований стан, відповідний поточній ситуації вимірювання.

Процедура когнітивної інтерпретації передбачає співвіднесення окремого концепту або узгодженої групи з певною дією та, як наслідок, з інтерпретованим станом системи. Така процедура дозволяє забезпечити перехід від числового результату та формального пріоритету до змістового представлення ситуації лабораторного випробування.

Вибір інтегрально інтерпретованого стану виконується за максимальним стаціонарним рівнем активації відповідної вершини стану в когнітивній карті. Інтегральний інтерпретований стан є підсумком поширення причинно-наслідкових впливів між концептами, станами та діями і формується наступним чином:

$$s^*(k) = \arg \max_{s_j \in S} X^*(k), \quad (3.37)$$

де $X^*(k)$ – стаціонарний рівень активації вершини, що відповідає стану s_j .

Узагальнений результат когнітивної інтерпретації подається у вигляді:

$$I(k) = \langle s^*(k), A(k), \{(t_l, B(t_l))\}_{l=1}^L \rangle, \quad (3.38)$$

де – інтегрально інтерпретований стан поточного циклу; a – множина концептів; a – множина потенційних дій реконфігурації із відповідними пріоритетами.

Вихідний результат методу когнітивної обробки набуває виду, який придатний для змістового опису ситуації, зіставлення її з історичними прецедентами та підготовки до прийняття управлінського рішення. У такому вигляді результат когнітивної обробки вимірювальних даних придатний до використання у моделі реконфігурації сенсорної мережі лабораторних випробувань.

Побудована модель когнітивного узагальнення та інтерпретації результатів інтелектуальних вимірювань дозволяє поєднати короткострокову та довгострокову пам'ять, онтологічний опис предметної області та когнітивну карту переходів між концептами, ситуаціями і рішеннями для досягнення можливості семантичної інтерпретації стану системи та формування когнітивної основи для пояснюваного та відтворюваного прийняття управлінських рішень.

3.4 Експериментальна та порівняльна валідація методу когнітивної обробки. Умови застосовності та обмеження

Експериментальна валідація представленого у розділі методу когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань у сенсорних мережах лабораторних випробувань виконана з метою кількісного оцінювання достовірності сформованого результату когнітивної обробки з урахуванням дії шуму, похибок та аномалій. Порівняння розробленого методу виконано шляхом його зіставлення з відомими аналогічними методами, які є найбільш релевантними поставленій у розділі задачі. На основі отриманих в результаті валідації даних було сформовано умови застосовності та обмеження розробленого методу когнітивної обробки.

Для забезпечення повноти охоплення умов експерименту було виконано:

- 1) моделювання сценарію функціонування сенсорної мережі, за якого результати інтелектуальних вимірювань при лабораторних випробуваннях надходять до модуля когнітивної обробки;
- 2) формування вхідних даних для когнітивної обробки у вигляді результатів вимірювань, вагових коефіцієнтів, метаданих та контекстних параметрів;
- 3) моделювання впливу шуму та аномалій;
- 4) реалізацію умов прийняття когнітивних рішень на основі когнітивної обробки;
- 5) оцінювання достовірності результатів, сформованих розробленим методом;
- 6) порівняння з відтвореною роботою аналогів;
- 7) визначення інтегрального показника достовірності;
- 8) перевірку відтворюваності отриманих значень експерименту;
- 9) формування умов застосовності та обмежень розробленого методу.

Валідація проведена на основі обчислювального експерименту шляхом виконання симіляції у середовищі комп'ютерного моделювання Python 3.10 з використанням бібліотек NumPy та Pandas.

Для забезпечення порівняльної валідації в однакових умовах було змодельовано роботу аналогів. Моделювання функціональних характеристик

аналогів виконувалось не на основі конкретних програмних чи технічних реалізацій, а на основі принципів функціонування, математичних моделей та на основі загальної алгоритмічної логіки. Дані, необхідні для виконання симуляції видобуто з технологічного й алгоритмічного опису, наведеного в першоджерелах.

Відтворюваність та коректність планування експерименту забезпечено за рахунок перевірки в єдиному програмно-модельному середовищі при використанні однакових умов експерименту для розгляду кожного з методів: єдиний сценарій моделювання сенсорної мережі, однаковий склад вхідних даних, однакові параметри симуляції та кількість повторних прогонів, однакові умови оцінювання результатів та правило підсумкового представлення. У випадку недостатньої кількості даних для повного відтворення роботи аналогів, відтворювались типові налаштування та алгоритмічна логіка для даного класу методів.

Обчислювальний експеримент проводився на основі моделювання сенсорної мережі з набором віртуальних сенсорів, які вимірюють кліматичні та механічні параметри під час лабораторних випробувань. Виконано моделювання 50 сенсорів, які передають як аналогові, так і цифрові дані з наявністю шуму та похибок. Загальний обсяг згенерованих даних становив 1000 точок спостережень. Для забезпечення повторюваності експерименту застосовано початкове значення генератора випадкових чисел становило *random seed* = 42. У дані впроваджено базовий шум у межах від 0 до 1,5. Шумова складова моделювалась нормальним розподілом $N(0;1,5)$. Аномальні відхилення задавались як адитивні сплески $N(10;3)$ на $N_a = 100$ випадково обраних індексах. Базова довіра до сенсорних каналів моделювалась незалежними значеннями $N(50;5)$. Оцінювання виконувалось за результатами 30 симуляційних прогонів за фіксованим набором параметрів. У межах кожного прогону реалізація методу здійснювалась для одного циклу когнітивної обробки $k=1$. У межах кожного прогону повний вектор спостережень $H(k)$ формувався шляхом агрегування локальних представлень. У рамках експерименту як операцію агрегування застосовано зважене середнє. Когнітивні вагові коефіцієнти $w_i^{cog}(k)$ формувались шляхом Softmax нормалізації оцінок надійності та локальних вагових коефіцієнтів.

Для оцінювання результатів обчислювального експерименту використано три метрики, які є складовими інтегрального показника: середня абсолютна похибка (MAE), ширина 95%-го довірчого інтервалу ($CI95$) та показник корекції аномалій (AF). Обраний набір метрик спрямований на оцінювання достовірності обробки вимірювальної інформації та охоплює основні властивості сформованого результату, як точність, невизначеність та стійкість до аномальних спотворень.

Середня абсолютна похибка (MAE) характеризує точність сформованого результату когнітивної обробки, де менше значення MAE відповідає вищій точності, та обчислюється за формулою:

$$MAE_i = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |y^*(k) - \hat{y}_i(k)|, \quad (3.39)$$

де K – кількість точок спостереження; $y^*(k)$ – еталонне значення в k -й точці; $\hat{y}_i(k)$ – результат, сформований i -м методом.

Ширина 95%-го довірчого інтервалу ($CI95$) характеризує стійкість результатів до невизначеності, де менше значення відповідає меншій невизначеності результату, та обчислюється за формулою:

$$CI95_i = Q_{0.975}(\hat{y}_i) - Q_{0.025}(\hat{y}_i), \quad (3.40)$$

де $Q_{0.975}(\hat{y}_i)$ та $Q_{0.025}(\hat{y}_i)$ – відповідно верхній і нижній квантілі розподілу результатів, отриманих для i -го методу за серією симуляційних прогонів.

Показник корекції аномалій (AF) характеризує здатність методу послаблювати вплив аномальних відхилень (ефективність когнітивної обробки), де більше значення відповідає вищій ефективності корекції аномалій, та обчислюється за формулою:

$$AF_i = \frac{N_i^{corr}}{N_a}, \quad (3.41)$$

де N_i^{corr} – кількість аномалій, вплив яких було скориговано i -м методом; N_a – загальна кількість змодельованих аномалій.

Жодна з представлених метрик у відриві від інших не дає повної оцінки достовірності результатів вимірювань, отриманих з використанням розробленого методу та аналогів при узагальненому порівнянні. Для повноти представлення

шуканої величини достовірності було введено інтегральний показник, що обчислюється за формулою:

$$R_i = \frac{1}{3} \cdot \frac{MAE_{min}}{MAE_i} + \frac{1}{3} \cdot \frac{CI95_{min}}{CI95_i} + \frac{1}{3} \cdot \frac{AF_i}{AF_{max}}, \quad (3.42)$$

де MAE_{min} – найменше значення середньої абсолютної похибки серед розглянутих методів; $CI95_{min}$ – найменша ширина 95%-го довірчого інтервалу; AF_{max} – найбільше значення показника корекції аномалій; R_i – інтегральний показник достовірності для i -го методу.

Обґрунтованість такої форми інтегрального показника пояснюється комплексним впливом потреби приведення окремих критеріїв до безрозмірного і порівнюваного вигляду, відповідності напрямків дробів напрямку оптимізації метрик та задання рівноважного врахування точності, стійкості та корекції аномалій без пріоритетності одного з критеріїв.

Інтегральний показник демонструє результат порівняння розробленого методу з аналогами за критерієм результатів вимірювань.

Для порівняльної перевірки було обрано три релевантні аналоги: QOD-ONT [77] – використано як аналог для онтологічного представлення та семантичної інтерпретації результатів; UP-IoT [78] – використано як аналог, орієнтований на врахування невизначеності в процесах когнітивних вимірювань; UA-F [79] – використано як аналог агрегування та злиття даних в умовах невизначеності.

Вибір аналогів зумовлений відсутністю одного прямого аналога, який одночасно поєднує когнітивне агрегування, зважування та онтологічну інтерпретацію результатів. Аналогічні методи обирались за принципом покриття ключових етапів розробленого методу. QOD-ONT відповідає етапу формування концептів онтології та пріоритетів реконфігурації; UP-IoT – прийняттю адаптивних рішень; UA-F – етапу дворівневого зважування.

Обрані аналоги у сукупності представляють основні функціональні рівні розробленого методу та формують підґрунтя для його порівняльного аналізу.

Результати обчислювального експерименту, отримані для розробленого методу та розглянутих аналогів за метриками MAE , $CI95$, AF та R наведено в

таблиці 3.1. Значення, наведені в таблиці, отримано усередненням результатів для 30 симуляційних прогонів.

Таблиця 3.1

Порівняльні результати оцінювання розробленого методу та аналогів

№ з/п	Позначення методу	Джерело	<i>MAE</i>	<i>CI95</i>	<i>AF</i>	<i>R</i>
1	Розроблений	[71]	2,70	6,61	0,41	0,892
2	QOD-ONT	[77]	2,17	7,48	0,01	0,598
3	UP-IoT	[78]	2,16	7,43	0,01	0,601
4	UA-F	[79]	2,41	5,79	0,23	0,819

Як видно з таблиці 3.1, розроблений метод не демонструє найкращих показників за усіма окремими метриками. Гірші показники *MAE* та *CI95* при кращому *AF* пояснюються класичним підходом когнітивної обробки, за якого коригування аномалій збільшує розкид. Високі значення *MAE* та *CI95* не доводять достовірність загальної достовірності результату когнітивної обробки за умов слабого показника коригування аномальних відхилень. Здатність розробленого методу краще послаблювати вплив аномальних відхилень на інтегральний результат когнітивної обробки є ключовим показником для задачі, яку вирішує розроблений метод. Інтегральний показник підсумкового порівняння враховує баланс між трьома отриманими метриками, які описують характеристики точності, стійкості до невизначеності та ефективності корекції аномалій. Ілюстративне представлення значення інтегрального показника достовірності для розробленого методу та аналогів зображено на діаграмі (рис. 3.3).

Аналіз значень інтегрального показника доводить, що розроблений метод має найвище значення інтегрального показника достовірності серед усіх розглянутих аналогів. Перевага над найкращим методом (UA-F) складає 8,8%, над найгіршим (QOD-ONT) – 49,2%. Середнє підвищення інтегрального показника достовірності відносно трьох розглянутих аналогів складає близько 36%. Дане значення свідчить про вищу збалансованість поєднання точності, рівня невизначеності та корекції аномалій для розробленого методу в порівнянні з розглянутими аналогами.

Розроблений метод придатний до використання у сенсорних мережах лабораторних випробувань, де вимоги до підсумкового результату зумовлюють одночасне виконання умов точності, стійкості до невизначеності та аномальних відхилень.

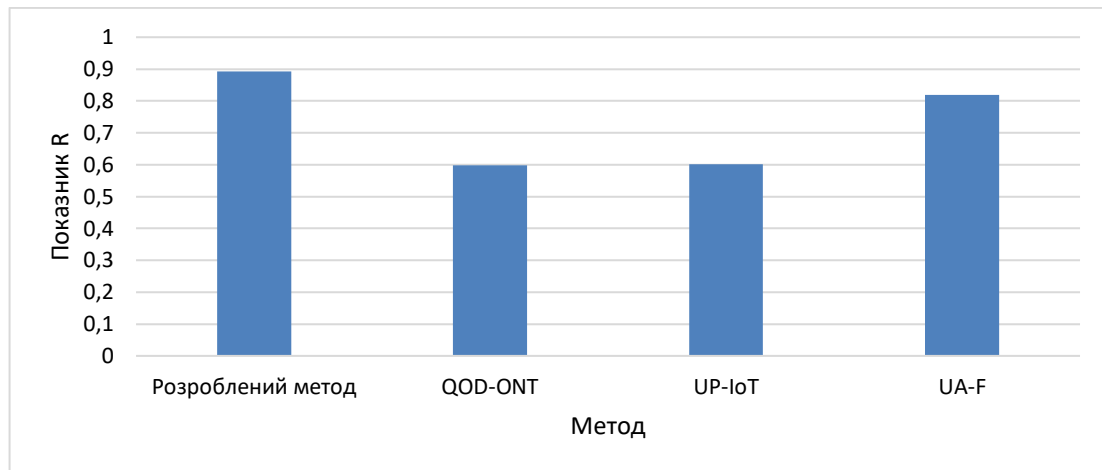


Рисунок 3.3 – Порівняльна діаграма інтегрального показника достовірності для розробленого методу та аналогів

Для підтвердження відтворюваності результатів когнітивної обробки було сформовано графічне представлення розподілу значень інтегрального показника достовірності R (рис. 3.4), отриманих на 30 симуляційних прогонах. За аналогією з рисунком 2.5, графік сформовано засобами Python з використанням бібліотеки Matplotlib з урахуванням усіх особливостей представлення, описаних в підрозділі 2.4, але на основі обчислення інтегрального показника за даними, отриманими в результаті обчислювального експерименту (симуляції).

Розроблений метод має найвище середнє значення показника R та незначний розкид отриманих оцінок у межах повторних прогонів симуляції. Відтворюваність показника R на серії з 30 повторних експериментів підтверджує стійкість отриманого ефекту.

Представлений графік доводить стабільність інтегрального результату когнітивної обробки та відсутність чутливості методу до випадкових флуктуацій в межах симуляційної постановки.

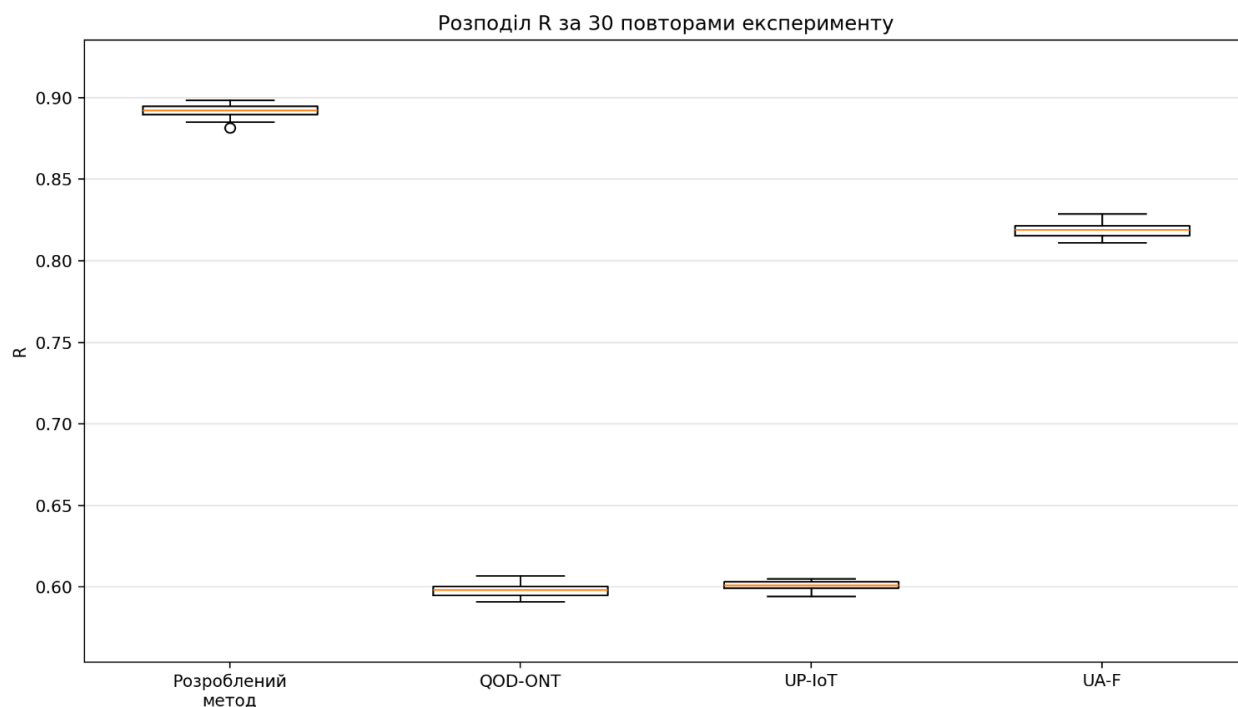


Рисунок 3.4 – Графік розподілу значень R на 30 прогонах симуляції

Нормалізований профіль складових інтегральної достовірності, сформований за метриками MAE, CI95 та AF, наведено на рис. 3.5.

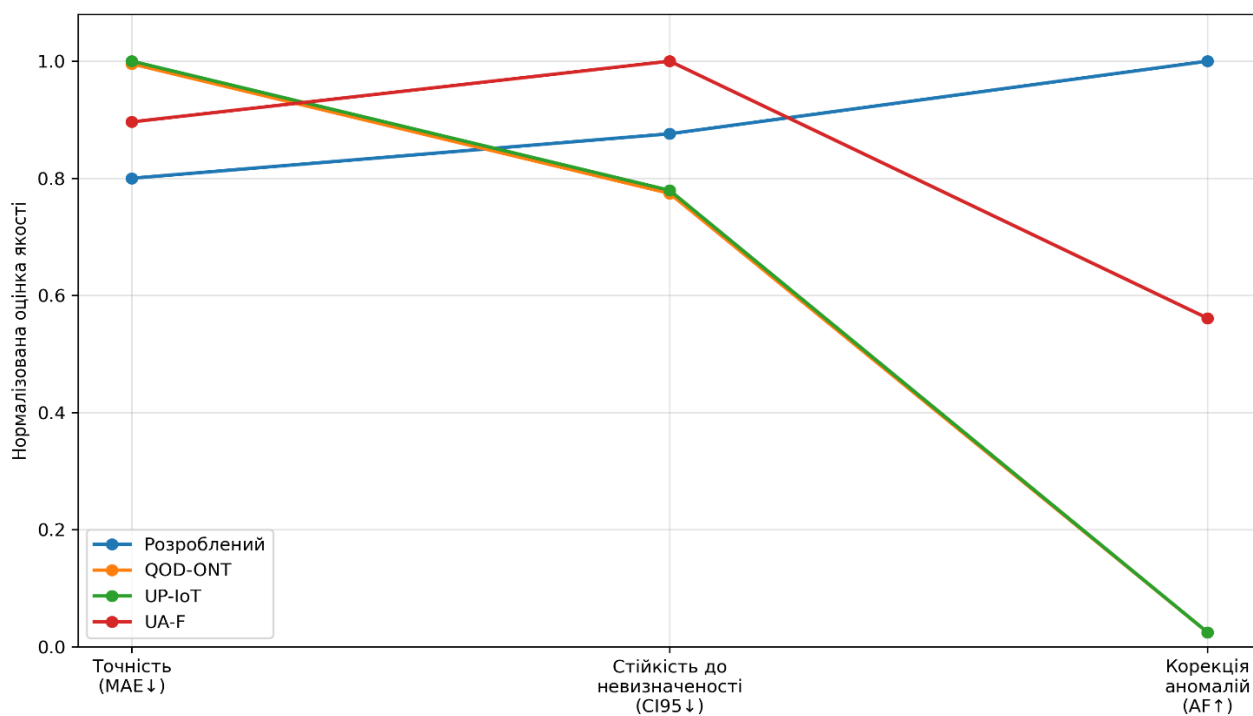


Рисунок 3.5 – Нормалізований профіль якості методів когнітивної обробки за складовими інтегральної достовірності

Результати симуляції надали достатньо даних для формулювання умов застосовності розробленого методу. Розроблений метод когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань доцільно застосовувати у наступних умовах:

- 1) наявність багатоканальної сенсорної структури від множини сенсорних каналів $A = \{a_i\}$;
- 2) надходження на обробку результатів інтелектуальних вимірювань, які пройшли первинну вимірювальну обробку на граничному рівні;
- 3) можливість формування мінімально необхідного набору вхідних даних, що включають початковий вектор спостережень $x(t)$ та вектор локальних вагових коефіцієнтів $w^{loc}(t)$;
- 4) доступність додаткових службових характеристик даних як метадані $M(k)$, контекстні параметри $C(k)$ та за наявності глобальних вагових коефіцієнтів;
- 5) присутність шуму, невизначеності та аномальних відхилень у вимірювальному середовищі;
- 6) потреба когнітивного узгодження даних окрім їх числового об'єднання з урахуванням надійності, ваг та контексту;
- 7) потреба формування інтегрального результату для подальших рішень з метою аналізу стану сенсорної мережі, оцінювання достовірності або підтримки реконфігураційних рішень;
- 8) достатність обчислювальних ресурсів системи для реалізації процедур зважування та злиття даних, де технічно можливо проводити багатокрокову обробку.

Обмеження розробленого методу зумовлені особливостями класичного підходу використання когнітивної обробки, що веде до збільшення розкиду при корекції аномалій. До переліку обмежень розробленого методу входить:

- 1) залежність від якості інтелектуальних вимірювань, за якої недостатньо інформативні або спотворені результати можуть знижувати якість когнітивної обробки;

2) потреба узгодженого подання вхідних даних, що вимагає коректності формування вагових коефіцієнтів, метаданих або контекстних параметрів;

3) можливе погіршення окремих часткових метрик з посиленням стійкості до шуму та аномалій;

4) відсутність невизначеності та аномалій знижує вираженість переваг методу;

5) масштабування методу потребує додаткового налаштування та адаптації параметрів реалізації при переході до більших сенсорних мереж, інших типів сенсорів або інших сценаріїв випробувань.

3.5 Висновки до розділу 3

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено підвищенню достовірності та інтерпретованості результатів вимірювань в сенсорних мережах лабораторних випробувань при їх когнітивній обробці з урахуванням метрологічних вимог та інтеграцією до повного когнітивного циклу вимірювань. Було вперше розроблено метод когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань на основі дворівневого зважування за рахунок когнітивного агрегування, інтегрованого з онтологічною інтерпретацією шляхом урахування метрологічних вимог, що завдяки врахуванню різних рівнів когнітивності дозволяє інтегрувати когнітивний процес у замкнутий цикл вимірювань при лабораторних випробуваннях та підвищує достовірність результатів. У ході роботи було:

1. Сформовано модель вхідних даних для когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань. Визначено мінімально необхідний набір вхідних даних, який включає початковий вектор спостережень та вектор локальних вагових коефіцієнтів та сформовано повний вхідний простір когнітивної обробки. Формалізоване представлення результатів інтелектуальних вимірювань забезпечило можливість когнітивного агрегування й онтологічної інтерпретації.

2. Розроблено і формалізовано метод когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань та алгоритм його реалізації. Метод включає формування повного вектора спостережень з урахуванням локального

представлення; дворівневе зважування на основі нормалізації когнітивних ваг, що дозволило проводити агрегування та обчислювати сумарну невизначеність; онтологічне формування пріоритетів реконфігурації сенсорної мережі. Розроблено структурно-логічну схему методу та алгоритм його реалізації в межах одного циклу когнітивної обробки.

3. Розроблено модель когнітивного узагальнення та інтерпретації результатів інтелектуальних вимірювань. Модель поєднує короткострокову та довгострокову пам'ять, механізм відбору релевантних прецедентів, онтологічне подання предметної області та когнітивну карту переходів між концептами, інтрпретованими станами і можливими діями. Модель дозволила перейти від числових результатів когнітивної обробки до змістового представлення стану сенсорної мережі, пояснюваного формування інтегрально інтерпретованого стану та формування підґрунтя для відтворюваного прийняття рішень щодо реконфігурації сенсорної мережі.

4. Проведено експериментальну та порівняльну валідацію розробленого методу у формі обчислювального експерименту (симуляції) з моделюванням сценарію функціонування сенсорної мережі лабораторних випробувань. Валідацію виконано за метриками середньої абсолютної похибки, довірчого інтервалу і показника корекції аномалій. Інтегральний показник достовірності для розробленого методу становить 0,892 (у межах відхилення 1-2%). Досягнуто підвищення значення інтегрального показника достовірності на 36% у середньому до трьох розглянутих аналогів. За результатами експериментальної перевірки сформульовано умови застосовності розробленого методу та визначено його обмеження.

РОЗДІЛ 4

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ НА ОСНОВІ АДАПТИВНО РЕКОНФІГУРОВАНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

У розділі розглядається системний рівень розробленої інформаційно-вимірювальної технології лабораторних випробувань, на якому метод інтелектуального вимірювання та метод когнітивної обробки інтегруються в інтелектуальну інформаційно-вимірювальну систему на основі адаптивно реконфігурованої сенсорної мережі. Такий перехід є необхідним для узгодження вимірювальних, аналітичних, інтерпретаційних і керуючих процедур у межах єдиного замкненого інформаційно-вимірювального циклу.

Виклад матеріалу розділу спрямований на формалізацію моделі адаптивної реконфігурації сенсорної мережі, визначення структурно-функціональної організації інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи та опис її функціонування в замкненому циклі вимірювання, когнітивної обробки, прийняття рішення і реконфігураційної дії. У межах розділу також розглядається представлення інформаційних потоків, функціональних станів і переходів системи, а також місце допоміжного контуру захисту інформації для критичних потоків даних. Завершальним етапом є експериментальна та порівняльна валідація системи на симуляційному і натурному стендовому рівнях із визначенням умов її застосовності та обмежень.

4.1 Формалізована модель адаптивної реконфігурації сенсорної мережі лабораторних випробувань

Адаптивна реконфігурація сенсорної мережі лабораторних випробувань при використанні інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи виступає внутрішньою властивістю її функціонування в рамках замкнутого циклу OODA. Адаптивна реконфігурація в даному контексті є керованим циклічним процесом

зміни конфігурації сенсорної мережі. Подібний підхід узгоджується із сучасними роботами, в яких динамічна реконфігурація сенсорної мережі реалізується як політико-керований процес автоматичної зміни конфігурації та складових протокольного стеку у відповідь на події й поточні умови функціонування мережі [80]. На зміну конфігурації впливають поточні результати інтелектуальних вимірювань, когнітивна інтерпретація ситуації та вимоги до точності, трасованості й відтворюваності процесів лабораторних випробувань.

У подальшому таке представлення розглядається як формалізована математична модель адаптивної реконфігурації сенсорної мережі, що описує зв'язок між результатами інтелектуального вимірювання, когнітивною інтерпретацією ситуації, вимогами до точності, трасованості й відтворюваності та вибором реконфігураційної дії.

Формалізоване представлення моделі інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи з адаптивною реконфігурацією сенсорної мережі у циклі OODA наводиться в статті [81], де висвітлено основні науково-практичні результати дисертації в частині удосконалення моделі когнітивної реконфігурації. Модель інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи описується кортежем:

$$S(k) = \langle Z(k), \Psi(k), R(k) \rangle, \quad (4.1)$$

де $Z(k)$ – вектор спостережень на циклі k ; $\Psi(k)$ – сукупність операторів інтелектуальної обробки вимірювальної інформації; $R(k)$ – конфігурація сенсорної мережі на поточному циклі. У рамках замкнутого циклу OODA сукупність операторів $\Psi(k)$ включає оператори спостереження, когнітивної орієнтації, прийняття рішення та реалізації реконфігураційної дії.

На етапі спостереження (Observe) відбувається формування вектора спостережень. Вектор спостережень включає значення поточних вимірюваних фізичних величин, оцінки похибок, часові параметри та еталонні значення у відповідності заданому режиму лабораторних випробувань.

Повний вектор спостережень з урахуванням необхідних складових представлений наступною формулою:

$$Z(k) = \{(x_i(k), \Delta_i(k), \tau_i(k), x_i^{ref}(k))\}_{i=1}^N, \quad (4.2)$$

де $x_i(k)$ – поточне значення фізичної величини, виміряне i -м сенсором на циклі k ; $\Delta_i(k)$ – оцінка похибки вимірювання сенсора; $\tau_i(k)$ – затримка надходження даних; $x_i^{ref}(k)$ – еталонне значення вимірюваної величини в лабораторних умовах.

У загальному вигляді етап спостереження описується наступним чином:

$$Z(k) = O(X_s(k), R(k)), \quad (4.3)$$

де $X_s(k)$ – сукупність первинних сенсорних даних поточного циклу вимірювань; $O(.)$ – оператор формування повного вектора спостережень, який забезпечує збір даних від сенсорів, урахування часових параметрів і фіксацію поточної конфігурації сенсорної мережі. У рамках представленої моделі оператор $O(.)$ є системним, визначеним та узгодженим з вектором спостережень. Оператор відображає базові дії вимірювального циклу: приймання вхідних даних та їх впорядкування і прив'язку до поточного стану мережі.

На етапі орієнтації (Orient) виконується оцінювання даних, отриманих на етапі спостереження. Для переходу до етапу орієнтації застосовується розширений вхідний простір, сформований на стику вимірювання та когнітивної обробки результатів вимірювання. Використовуються сутності, сформовані у розділах 2 та 3 як інформаційна основа що є результатом системної інтеграції двох розроблених методів. Для поточного циклу вимірювань використовується скоригований результат інтелектуальних вимірювань $\hat{y}(k)$, вектори уточнених локальних та глобальних вагових коефіцієнтів $W_L(k)$ і $W_G(k)$ відповідно, метадані вимірювального циклу $M(k)$, контекстні параметри, пов'язані з режимами випробувань $C(k)$ та результати когнітивної інтерпретації $I(k)$. У когнітивному аналізі враховується історія попередніх вимірювань і спостережень $H(k)$.

На етапі орієнтації з використанням локальних та глобальних вагових коефіцієнтів виконується формування єдиного пріоритету реконфігурації для кожного сенсорного каналу за формулою:

$$\rho_i(k) = \alpha w_i^L(k) + \beta w_i^G(k), \quad (4.4)$$

де $\rho_i(k)$ – інтегральний пріоритет використання i -го сенсорного каналу в наступній

конфігурації сенсорної мережі; α та β – коефіцієнти відносної вагомості локальної та глобальної оцінок за умови, що $\alpha + \beta = 1$. Локальні та глобальні вагові коефіцієнти виступають основою для формування реконфігураційного пріоритету та дозволяють оцінити важливість сенсора на циклі вимірювань.

На етапі прийняття рішень (Decide) виконується вибір оптимальної конфігурації сенсорної мережі для поточного циклу функціонування сенсорної мережі. На цьому етапі приймається рішення щодо зміни активності сенсорного вузла чи окремого сенсора у відповідності до пріоритетів, сформованих на попередніх етапах циклу OODA. Приймається рішення щодо перерозподілу задач складових частин сенсорної мережі та щодо її оновленої топології. Доцільність урахування зв'язності мережі, топологічної узгодженості та ресурсних обмежень при виборі конфігурації підтверджується сучасними схемами адаптивної топології, орієнтованими на підтримання мережної зв'язності за умов обмежених ресурсів і динамічних змін структури бездротової сенсорної мережі [82]. Вибір оптимальної конфігурації сенсорної мережі для поточного циклу вимірювань виконується на основі максимізації цільової функції:

$$r^*(k) = \arg \max_{r \in R(R(k), I(k))} J(r, k), \quad (4.5)$$

де $r^*(k)$ – рішення щодо реконфігурації сенсорної мережі на вимірювальному циклі k ; $R(R(k), I(k))$ – множина допустимих конфігурацій, сформована з урахуванням поточного стану мережі $R(k)$, інтегрально інтерпретованого стану $I(k)$, множини потенційних реконфігураційних дій, обмежень на активність вузлів, зв'язність мережі, допустимі затримки, режим випробувань і доступність виконавчих дій.

Цільова функція реконфігурації набуває виду:

$$J(r, k) = \lambda_1 A(r, k) + \lambda_2 T(r, k) + \lambda_3 Q(r, k) + \lambda_4 S(r, R(r, k)), \quad (4.6)$$

де $A(r, k)$ – показник точності сенсорної мережі при конфігурації r ; $T(r, k)$ – показник трасованості; $Q(r, k)$ – критерій ресурсної оптимізації; $S(r, R(r, k))$ – показник відповідності нової конфігурації поточному стану мережі; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – вагові коефіцієнти критеріїв.

$A(r, k)$ характеризує здатність обраної конфігурації забезпечувати потрібну якість вимірювань; $T(r, k)$ – збереження простежуваності результату та історії реконфігурації сенсорної мережі; $Q(r, k)$ – допустимість реконфігурації за наявними ресурсами; $S(r, R(r, k))$ – узгодженість нової конфігурації з поточним технічним станом мережі.

На етапі дії (Act) виконується реалізація обраного рішення та завершується поточний цикл реконфігурації сенсорної мережі. Фізична реалізація реконфігурації сенсорної мережі у формалізованому вигляді представлена співвідношенням:

$$R^*(k) = \Gamma(R(k), r^*(k)) , \quad (4.7)$$

де $\Gamma(.)$ – оператор зміни конфігурації сенсорної мережі.

Оператор $\Gamma(.)$ забезпечує включення або виключення окремих вузлів до поточного стану сенсорної мережі, зміну режимів їх опитування, перерозподіл задач між сенсорними вузлами та корекцію топологічних зв'язків сенсорної мережі.

Перехід до наступного циклу функціонування сенсорної мережі в рамках OODA набуває вигляду:

$$S(k + 1) = \langle Z(k + 1), \Psi(k + 1), R^*(k) \rangle . \quad (4.8)$$

У якості результату етапу дії виступає формування нового конфігураційного стану сенсорної мережі в результаті керуючої дії. У рамках нової конфігурації сенсорної мережі відбувається перехід до наступного циклу інтелектуального вимірювання та когнітивної реконфігурації. Реконфігурація сенсорної мережі повторюється на кожному новому циклі OODA у відповідності до потреби у її виконанні та рішень, прийнятих інтелектуальною інформаційно-вимірювальною системою.

У цілому модель адаптивної реконфігурації сенсорної мережі лабораторних випробувань забезпечує послідовний перехід від повного вектора спостережень до трасованого когнітивного вибору та реалізації оптимальної конфігурації сенсорної мережі в рамках поточного циклу OODA. Методи, розроблені в дисертації та представлені у розділах 2 та 3 роботи системно інтегруються для досягнення очікуваного ефекту від когнітивного прийняття рішень щодо реконфігурації

сенсорної мережі на основі оброблених даних в результаті інтелектуального вимірювання.

Модель реконфігурації сенсорної мережі важлива для використання в якості основи інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи.

4.2 Структурно-функціональна організація інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи лабораторних випробувань

Удосконалена модель адаптивної реконфігурації сенсорної мережі лабораторних випробувань, представлена у підрозділі 4.1 визначає формалізоване підґрунтя для розробленої інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи лабораторних випробувань та розглядається як внутрішній механізм її цілісного функціонування. З метою відображення системної інтеграції розроблених методів та ролі удосконаленої моделі реконфігурації в інтелектуальній інформаційно-вимірювальній системі подається схема її структурно-функціональної організації (рис. 4.1) з детальним відображенням складу основних блоків системи, місця у замкнутому циклі OODA, та загальної логіки передачі вимірювальних, службових і керуючих даних під час її функціонування системи на одному циклі вимірювань в рамках OODA.

В основі структурно-функціональної схеми лежить гібридна структурно-логічна графічна модель інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи. Компоненти системи розподілено за чотирма послідовними етапами замкнутого циклу OODA. Відображено інформаційні потоки між блоками. Деталізоване представлення інформаційних потоків в інтегрованому вигляді в рамках функціонування системи у графовому та табличному вигляді представлено у підрозділі 4.3. На рисунку 4.1 відображена загальні переходи керуючих, службових та вимірювальних даних в рамках функціонування компонентів системи в замкнутому циклі OODA. Таке структурно-функціональне відображення дозволяє продемонструвати належність системи до класу саморегульованих інтелектуальних інформаційно-вимірювальних систем.

У рамках структурної організації відображено такі компоненти, як сенсорна підсистема, сенсорний вузол, блок когнітивної обробки, база даних, блок прийняття рішень, блок виконавчих команд та системний вузол. Первинні дані передаються від сенсорів сенсорному вузлу для граничної обробки виміряних значень та формування локального вагового представлення.

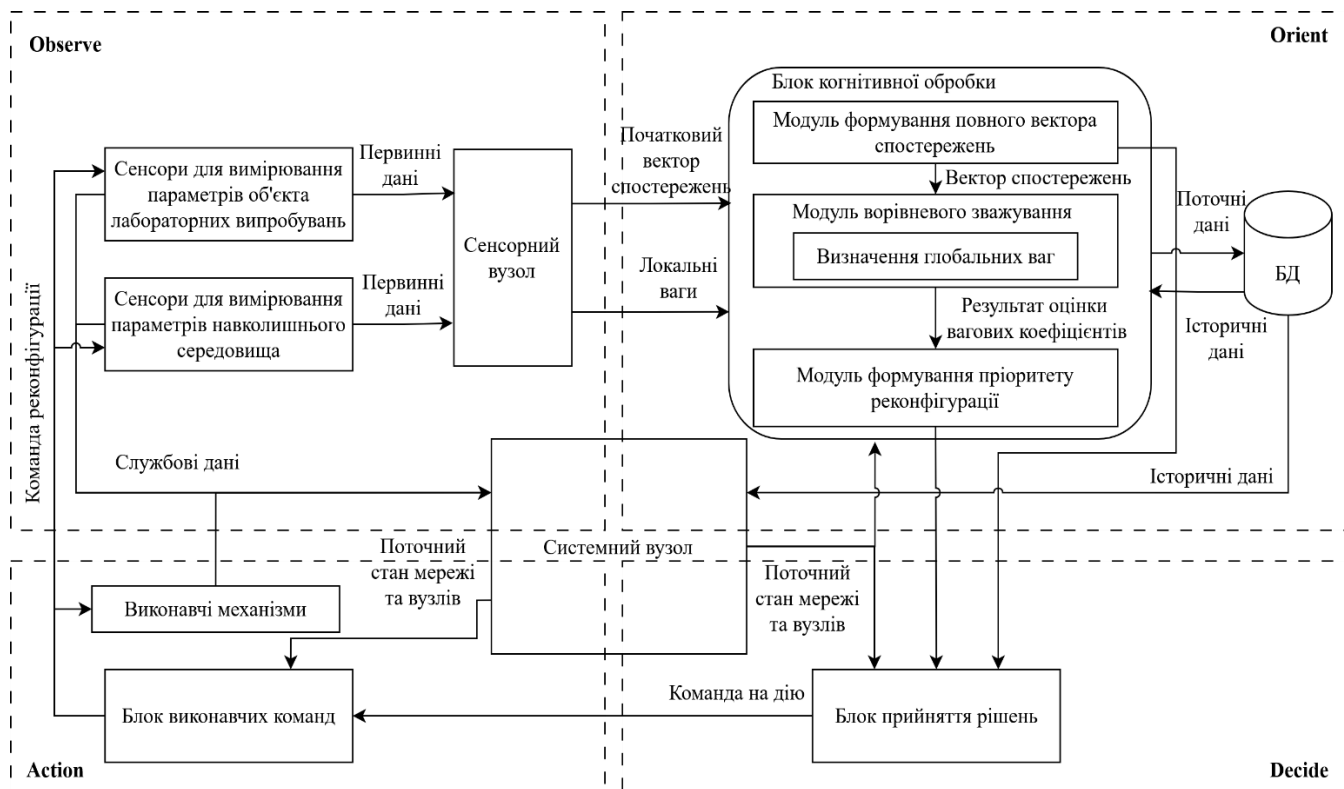


Рисунок 4.1 – Структурно-функціональна схема реалізації інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи лабораторних випробувань

Сформовані початковий вектор спостережень та локальні вагові коефіцієнти передаються до блоку когнітивної обробки. Блок когнітивної обробки, взаємодіючи з базою даних, формує пріоритет реконфігурації сенсорної мережі. Пріоритет реконфігурації передається до блоку прийняття рішень, після чого через блок виконавчих команд реалізується реконфігурація сенсорної мережі. Системний вузол відповідає за об'єднання усіх чотирьох етапів OODA і забезпечує збір та обмін службовою інформацією про поточний стан сенсорної мережі і її вузлів. Кожен блок інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи структурно займає визначене

місце та виконує відведену функцію у загальній логіці замкнутого вимірювально-керуючого циклу OODA.

Формалізоване представлення інтелектуальної складової інформаційно-вимірювальної системи, ґрунтуючись на висвітлених положеннях в роботі [83] базується на модульній композиції її основних функціональних контурів:

$$I_{IMS} = \langle A, D, P, \Phi \rangle . \quad (4.9)$$

де A – аналітичний контур, у рамках якого виконується інтелектуальне вимірювання та когнітивна інтерпретація даних; D – контур інтелектуального прийняття рішення щодо реконфігурації; P – прогностичний контур, який формує оцінки розвитку ситуації та наслідки реконфігурації; Φ – інтегровальна функція взаємодії перелічених вище контурів у складі інформаційно-вимірювальної системи.

Подібний підхід узгоджується із сучасними роботами [84], у яких інформаційно-вимірювальна система розглядається як архітектурний компонент кіберфізичної системи з визначеними функціональними контурами, структурою взаємодії модулів та регламентованими інформаційними потоками.

Інтелектуальна характеристика інформаційно-вимірювальної системи поєднує аналітичний, керуючий, прогностичний та інтегровальний компоненти та демонструє, що інтелектуальна складова є властивістю архітектурної організації системи.

Функціональні характеристики структурних компонентів архітектури інформаційно-вимірювальної системи полягають в наступному. Сенсорна підсистема у представленій архітектурі відповідальна за первинний інформаційний шар про поточний стан об'єкта лабораторних випробувань та параметри відтворених умов навколишнього середовища в лабораторних умовах. Первинний інформаційний шар формує основу інтелектуального вимірювання. Сенсорна складова інформаційно-вимірювальної системи в рамках розробленої структурно-функціональної схеми виступає початковим рівнем перетворення вимірювальної інформації у багаторівневому процесі.

У практичній реалізації сенсорної підсистеми первинний інформаційний шар може формуватися температурними, вологісними, вібраційними,

акселерометричними та гіроскопічними сенсорними каналами. Зокрема, гіроскоп використовується як один із можливих сенсорних засобів реєстрації рухового або орієнтаційного стану об'єкта лабораторних випробувань, тоді як вібраційні та акселерометричні канали характеризують механічні впливи на об'єкт і стан сенсорної мережі.

Функцією сенсорного вузла є гранична обробка вимірювальних даних та формування локального вагового представлення. На сенсорному вузлі виконується перехід від розрізнених сенсорних відліків до локального подання, придатного для інтелектуального вимірювання. Така функціональна особливість відповідає сучасному напрямку інтелектуалізації інформаційно-вимірювальних систем через обробку вимірюваних показників на рівні сенсора (in-sensor), навколо (near-sensor) чи інтелектуальної граничної обробки (edge-AI) [85]. У структурно-функціональному відношенні сенсорний вузол є перехідним елементом між фізичним проявом вимірювального контуру та когнітивно-аналітичним контуром кіберфізичної сенсорної мережі лабораторних випробувань.

Функція блоку когнітивної обробки передбачає забезпечення переходу від вимірюваних та попередньо зважених даних до їх змістової інтерпретації. У структурі інформаційно-вимірювальної системи блок когнітивної обробки виконує функцію математичної обробки сенсорних даних та функцію семантичного узагальнення стану вимірювального процесу для подальшого трасованого прийняття рішень з реконфігурації сенсорної мережі.

Функційна роль бази даних в рамках розробленої системи полягає у накопиченні історичних даних щодо проведених вимірювань, збереженні службових характеристик циклів вимірювання та доступу до попередніх результатів вимірювань. Взаємодія блоку когнітивної обробки та бази даних забезпечує трасованість результатів та врахування історії спостережень. База даних виступає функціональним елементом контекстної та когнітивної підтримки реконфігураційних процесів.

Керуючий контур інформаційно-вимірювальної системи утворених поєднанням блоку прийняття рішень з боком виконавчих команд. Функцією блоку

прийняття рішень є вибір доцільної в поточних умовах реконфігурації. Функцією блоку виконавчих команд є забезпечення перетворення прийнятого рішення у виконавчу команду для сенсорної мережі та виконавчих механізмів. Функційна інтеграція процедур вибору та реалізації рішення забезпечує завершення когнітивного керуючого циклу та адаптивність до змінних умов.

Системний вузол виконує інтеграційну функцію для інформаційно-вимірювальної системи, координацію окремих блоків системи в рамках об'єднаних етапів циклу OODA. Системний вузол акумулює службові дані про стан мережі, вузлів і виконавчих механізмів для підтримки цілісності циклу вимірювань та реконфігурації сенсорної мережі. Системний вузол забезпечує архітектурну єдність усіх структурних елементів інформаційно-вимірювальної системи.

Формально ознаки інтелектуальності у структурно-функціональній схемі забезпечується вхідним простором системи як поєднанням трьох класів параметрів:

$$U(k) = \langle F(k), K(k), P(k) \rangle. \quad (4.10)$$

де $F(k)$ – фізичні параметри, які надходять безпосередньо від сенсорної мережі та характеризують поточний стан об'єкта випробувань та зовнішні кліматичні та/чи механічні впливи; $K(k)$ – аналітичні параметри, сформовані внаслідок обробки, когнітивного зважування та інтрпретації; $P(k)$ – прогностичні параметри, які відображають очікувану динаміку ситуації та вірогідні наслідки реконфігурації.

Формула (4.10) пояснює причини виходу запропонованої системи за рамки класичної автоматизованої вимірювальної системи.

Інтелектуальна складова розробленої системи пояснюється як наявністю блоку когнітивної обробки, так і структурним поєднанням вимірювального, аналітичного, прогностичного та керуючого контурів. Така архітектурна композиція дозволяє вважати розроблену інформаційно-вимірювальну систему інтелектуальною.

Зазначені архітектурні особливості структурних елементів, їх функційні особливості та наведені характерні риси передачі даних структурними елементами вимагають впровадження додаткової супроводжувальної підсистеми захисту інформації. Блок інформаційної безпеки необхідний при супроводженні критичних інформаційних потоків між сенсорними вузлами, блоком когнітивної обробки,

базою даних і контуром реалізації виконавчих команд в бездротовій сенсорній мережі лабораторних випробувань. Детальна організація блоку захисту інформації в рамках функціонування інформаційно-вимірювальної системи наводиться у підрозділі 4.3.

Структурно-функціональна організація поєднує підсистеми через системний вузол в рамках забезпечення цілісного циклу OODA. Інтелектуальний характер системи розкривається через інтеграцію вимірювального, аналітичного, прогностичного та керуючого контурі. Завдяки такому підходу можливості системи не обмежуються реєстрацією параметрів лабораторних випробувань. Система дозволяє здійснювати змістову інтерпретацію параметрів, формувати прогностичні оцінки та реконфігурувати сенсорну мережу для адаптації до зовнішніх умов та вимірювальних даних. Представлена структурно-функціональна схема виступає системною формою реалізації моделі адаптивної реконфігурації сенсорної мережі.

4.3 Функціонування інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи лабораторних випробувань у замкнутому циклі вимірювання та адаптивної реконфігурації сенсорної мережі

У рамках характеристик функціонування інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи розглядається повний замкнений цикл вимірювання та адаптивної реконфігурації сенсорної мережі. Функціонування у таких умовах розглядається як послідовність взаємопов'язаних станів обробки вимірювальної інформації, когнітивної інтерпретації, прийняття рішень щодо дій відносно реконфігурації топології сенсорної мережі та виконання фізичних дій щодо зміни конфігурації сенсорної мережі під час лабораторних випробувань з урахуванням замкненого циклу OODA. Завдяки таким умовам формується підґрунтя для переходу від статичного опису структурно-функціональної організації окремих блоків системи в циклі OODA до формалізованого представлення поведінки системи за темпоральною характеристикою. Процеси вимірювання показників та передачі вимірюваних даних на усіх етапах обробки та прийняття управлінських

рішень на кожному циклі реконфігурації сенсорної мережі лабораторних випробувань потребують жорсткого формалізованого представлення. Таке представлення забезпечується впровадженням F-системи та демонстрацією процесів у табличному і графічному вигляді за допомогою направлено графа станів інформаційно-вимірювальної системи. Таке представлення узгоджується з формальними моделями реконфігурованих сенсорних мереж, у яких функціонування системи подається через графово-мережні структури станів і переходів, придатні для інженерно-однозначного опису перебудови мережі [86].

Подібне представлення забезпечує можливість розгляду інформаційно-вимірювальної системи як узгодженого контуру послідовного перетворення системно інтегрованих результатів інтелектуального вимірювання та когнітивної обробки у дії з реконфігурації сенсорної мережі. Перетворення станів системи описується в рамках логіки OODA.

Запропонована інформаційно-вимірювальна система функціонує за рахунок використання розподіленої сенсорної мережі та передбачає обмін вимірювальними і службовими даними та керуючими командами між сенсорами, когнітивно-аналітичним блоком, базою даних та актуаторами в умовах потенційних загроз інформаційній безпеці. Контур забезпечення кіберзахисту інформаційно-вимірювальної системи з когнітивним блоком керування представлений у роботі [74] та позиціонується як допоміжний блок криптографічного шифрування і розшифрування в рамках функціонування різних складових архітектури інформаційно-вимірювальної системи (рис. 4.2). Криптографічний контур є допоміжним супровідним механізмом забезпечення цілісності і захищеності критичних інформаційних каналів системи.

Функціонування інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи лабораторних випробувань у замкнутому циклі вимірювань та адаптивної реконфігурації сенсорної мережі формалізовано представлено у табличному та графічному вигляді як F-систему. Таке представлення зумовлено потребою забезпечення інженерної однозначності послідовності перетворення вимірювальних

даних та демонстрації функції контуру шифрування в інформаційно-вимірjuвальній системі.

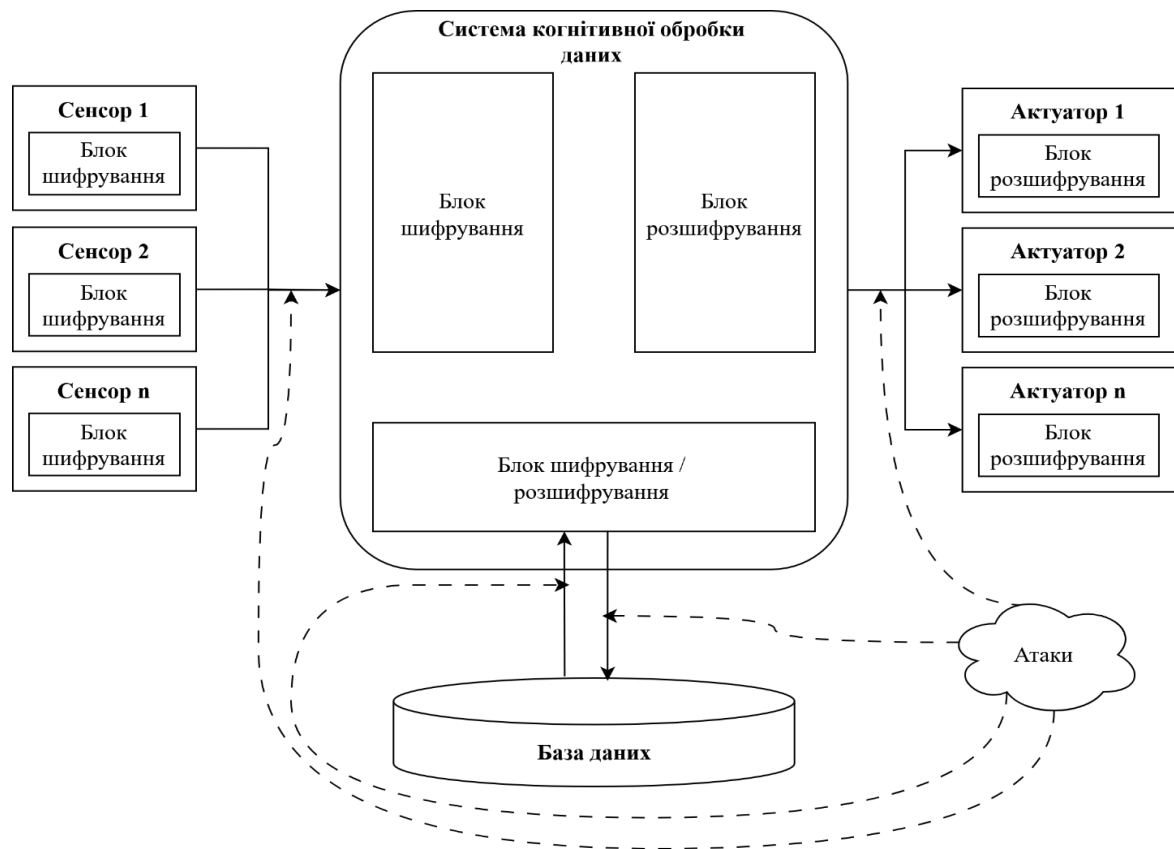


Рисунок 4.2 – Допоміжний контур забезпечення захисту вимірjuвальної, службової та керуючої інформації в інформаційно-вимірjuвальній системі

Функціональна модель інформаційно-вимірjuвальної систему у формалізованому вигляді описується:

$$F_{IMS} = \{Z, X, Y, T, A, z_0\}, \quad (4.11)$$

де Z – множина станів системи; X – множина вхідних потоків; Y – множина вихідних потоків; $T: X \times Z \rightarrow Z$ – функція переходів; $A: Z \rightarrow Y$ – функція виходів; z_0 – початковий стан

Множина станів представлена формулою:

$$Z = \{z_0, z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6, z_7, z_8\}, \quad (4.12)$$

де z_0 – ініціалізація циклу та синхронізація стану мережі; z_1 – приймання первинних вимірjuвальних і службових даних; z_2 – гранична обробка та інтелектуальне

вимірювання; z_3 – когнітивна інтерпретація та звернення до бази даних; z_4 – формування пріоритету реконфігурації; z_5 – вибір реконфігураційного рішення; z_6 – формування, шифрування і передача виконавчої команди ; z_7 – фізична реконфігурація і контроль нового стану мережі; z_8 – видача результату циклу і напуск нового циклу вимірювань.

Множина вхідних потоків представлена формулою:

$$X = \{x_1, x_2\}, \quad (4.13)$$

де x_1 – основний інформаційний потік вимірювальних даних, необхідний для послідовного виконання базової обробки; x_2 – службово-керуючий потік, необхідний для уточнення, підтвердження команд, запуску реконфігурації, повторного вибору рішення або переходу до попереднього стану.

Множина вхідних потоків представлена формулою:

$$Y = \{y_1, y_2, y_3\}, \quad (4.14)$$

де y_1 – службові сигнали ініціації та завершення циклу; y_2 – реконфігураційні рішення і виконавчі команди; y_3 – проміжні та підсумкові результати обробки.

Табличне представлення переходів F-системи (таблиця 4.1) передбачає відображення вихідних потоків y_1 - y_3 , прив'язаних до станів z_0 - z_8 по горизонталі та вхідних потоків x_1 - x_2 по вертикалі. У комірках вказано наступний стан системи. Таблиця задає детерміновану функцію переходів $T(x, z)$.

Таблиця 4.1

Табличне представлення переходів F-системи інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи лабораторних випробувань

	y_1	y_3	y_3	y_3	y_3	y_2	y_2	y_3	y_1
	z_0	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	z_7	z_8
x_1	z_1	z_2	z_3	z_4	z_1	z_4	z_5	z_8	z_1
x_2	z_0	z_1	z_1	z_2	z_5	z_6	z_7	z_5	z_1

У графічному вигляді F-система (рис. 4.3) представлена у вигляді направленої графу переходів. Переходи відображені дугами, стани – вершинами.

У стані z_4 система повертається до z_1 , якщо реконфігурація не потрібна і цикл продовжується як чергове вимірювання, в іншому випадку відбувається перехід до z_5 . У стані z_6 система повертається до z_5 , якщо шифрування не виконано або існує потреба в уточненні даних. Якщо захищена передача виконана коректно система із z_6 переходить у z_7 . У разі виникнення потреби повторного рішення після контролю нового стану система зі стану z_7 повертається до z_5 .

F-система узгоджена з логікою циклу OODA. Стани z_1 - z_2 забезпечують приймання даних та граничне інтелектуальне вимірювання, що відповідає фазі Observe. Стани z_3 - z_4 забезпечують когнітивну інтерпретацію, роботу з історичними даними та оцінку потреби реконфігурації, що відповідає фазі Orient. Стан z_5 забезпечує вибір реконфігураційного рішення, що відповідає фазі Decide. Стани z_6 - z_8 забезпечують захищену передачу даних, фізичну реконфігурацію і контроль нового стану, що відповідає фазі Act.

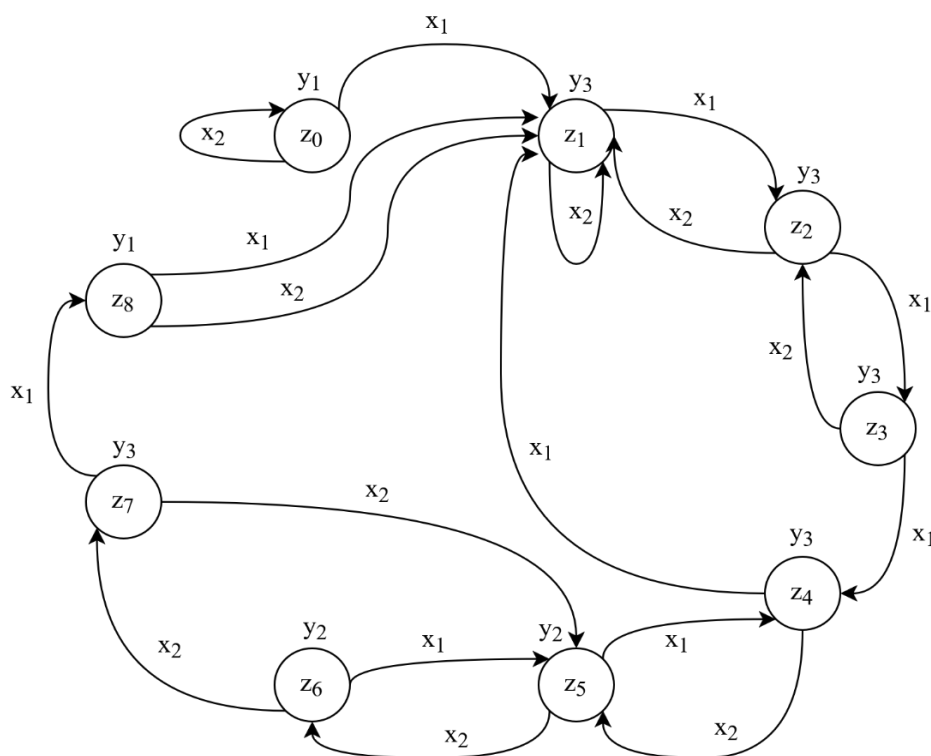


Рисунок 4.3 – Граф функціональних переходів інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи у циклі OODA

Блок захисту інформації реалізовано на основі використання алгоритмів SET-шифрування для супроводження критичних інформаційних потоків між сенсорними вузлами, блоком когнітивної обробки, базою даних і контуром реалізації виконавчих команд. Принципи SET-шифрування використано відповідно до вимог до апаратного та програмного забезпечення інтелектуальних засобів обробки інформації в сенсорних мережах. Обмежені обчислювальні ресурси та вимогливість бутстреп агрегації під час вимірювань визначають потребу застосування малоресурсного SET-шифрування [87]. Такий підхід дозволяє забезпечити надійність захисту інформації під час передачі без критичного зниження швидкодії пристроїв обробки інформації в сенсорній мережі. Його доцільність узгоджується із сучасними оглядами малоресурсної криптографії для IoT-мереж, у яких криптоалгоритми розглядаються як базовий засіб захисту даних у середовищах з обмеженими обчислювальними та комунікаційними ресурсами [88].

Застосовано несиметричні SET-операції. У роботі [74] наведено таблицю з групою двохрозрядних двохоперандних SET-операцій строгого криптографічного кодування з метою побудови криптографічної системи та наведено три варіанти синтезу груп SET-операцій. У складі інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи при обміні інформацією із системою когнітивної обробки застосовано описаний в [74] алгоритм III. Використання даного алгоритму передбачає застосування синтезу прямих та обернених операцій на основі генерації двохоперандних несиметричних SET-операцій з точністю до перестановки результату перетворення.

4.4 Експериментальна та порівняльна валідація інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи. Умови застосовності та обмеження

Експериментальна та порівняльна валідація інформаційно-вимірювальної системи на основі адаптивно реконфігурованої сенсорної мережі була проведена комплексно у комбінованій формі з послідовним застосуванням обчислювального симуляційного та натурного стендового експерименту. Порівняння результатів

симуляції проводилось із результатами симуляції аналогічних систем та з результатами натурного експерименту.

Симуляційний експеримент відтворював у програмному середовищі умови лабораторних випробувань та функціонування замкнутого циклу інтелектуальних вимірювань за логікою OODA. Для порівняння було обрано сучасні моделі реконфігурації сенсорних мереж, релевантні поставленій задачі. Отримані в результаті виконання симуляційного експерименту дані використані в якості складової разом з даними натурного експерименту та їх взаємного порівняння для формування умов застосовності та обмежень розробленої інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи.

У межах такого моделювання механічні впливи розглядались як один із типових класів зовнішніх факторів лабораторних випробувань. До них віднесено, зокрема, вібраційні та ударні навантаження, які можуть змінювати стан об'єкта випробувань, впливати на стабільність сенсорних каналів і зумовлювати появу додаткових відхилень у результатах вимірювання. Тому вібраційні випробування в роботі розглядаються як окремий випадок лабораторних випробувань із механічним впливом на об'єкт і сенсорну мережу.

Умови симуляційного експерименту охоплюють:

- 1) моделювання сценарію функціонування інформаційно-вимірювальної системи на основі сенсорної мережі в умовах лабораторних випробувань;
- 2) формування вхідних даних сенсорної мережі з урахуванням еталонних величин;
- 3) відтворення роботи системи в рамках замкнутого циклу OODA;
- 4) реалізацію процедур реконфігурації сенсорної мережі для кожної з досліджуваних моделей реконфігурації;
- 5) оцінювання точності результатів вимірювання після виконання реконфігураційних дій;
- 6) оцінку трасованості результатів у рамках послідовних циклів реконфігурації сенсорної мережі;
- 7) виконання порівняння з аналогічними моделями;

- 8) агрегування одержаних в рамках експерименту метрик для кожної моделі;
- 9) формування складової для визначення умов застосовності та обмежень.

Симуляційну валідацію виконано в середовищі MATLAB R2023a при використанні скриптові моделі сенсорної мережі з підтримкою стохастичної реконфігурації.

Відтворення роботи аналогів виконувалось не за конкретними програмними реалізаціями, а на основі базових принципів їх функціонування, структур реконфігурації та алгоритмічної логіки, описаних в першоджерелах.

Для забезпечення коректності порівняння результатів симуляції усі моделі досліджувались в єдиному програмно-модельному середовищі за однакових умов обчислювального експерименту. Для відтворення роботи усіх моделей було забезпечено наступні однакові умови: модель сенсорної мережі, однакова кількість сенсорів та циклів реконфігурації, однакові еталонні значення вимірювальних величин, однаковий характер шумових збурень, єдина послідовність циклу (зчитування даних, реконфігурація, повторне вимірювання, обчислення похибки, оцінювання змін між циклами), однакові метрики оцінювання і спосіб агрегування підсумкових показників. У випадку відсутності повного набору параметрів реалізації аналогів, їх відтворення виконувалось на основі загальної алгоритмічної логіки та типових налаштувань, характерних для такого класу моделей.

При виконанні обчислювального експерименту виконувалось моделювання сенсорної мережі, що містить 10 сенсорів, які вимірюють різні фізичні величини з наперед заданими еталонними значеннями. У рамках проведення експерименту виконано 50 циклів реконфігурації, що відповідає 500 первинним сенсорним спостереженням. Для кожного сенсора i на кожному циклі k задавались еталонні (базова довіра) значення $x_{i,k}^{gt}$.

Для забезпечення узгодженого порівняння різнорідних фізичних величин виконувалось попереднє нормування еталонних значень до безрозмірної шкали $[0;100]$. Для забезпечення повторюваності обчислювального експерименту використано фіксоване значення генератора випадкових чисел $random\ seed = 42$. Для

кожної з досліджуваних моделей задавався початковий стан мережі та додавались шумові збурення до еталонних значень вимірювальних величин. Впроваджувався адитивний базовий шум, що моделювався нормальним розподілом $N(0;1,5)$. Аномальні відхилення задавались як адитивні сплески $N(10;3)$. Кількість аномальних позицій приймалась на рівні 10% від загального обсягу спостережень – 50 аномальних значень, розташованих на випадково обраних індексах без повторень у межах окремої реалізації симуляції. Базова довіра до сенсорних каналів моделювалась незалежними значеннями $N(50;5)$. У кожному циклі виконувалось зчитування поточних сенсорних даних, реалізація реконфігурації за логікою досліджуваної моделі, повторне вимірювання величин та обчислення похибки. Для оцінки трасованості порівнювалась зміна результатів на різних циклах реконфігурації. Після завершення серії циклів виконувалось обчислення агрегованих метрик для кожної досліджуваної моделі. Оцінювання виконувалось за результатами 30 симуляційних прогонів.

На кожному циклі реконфігурації k для кожного сенсора s формувалось спостережуване значення за формулою:

$$y_s^{obs}(k) = y_s^{gt} + \xi_s(k), \quad (4.15)$$

де y_s^{gt} – еталонне значення вимірюваної величини для s -го сенсора; $\xi_s(k)$ – шумова складова, що моделює спотворення вимірювань на k -му циклі реконфігурації.

Оцінка результатів симуляції передбачала використання двох метрик: метрику точності (Acc), яка базувалась на середній абсолютній похибці (MAE) та метрику трасованості (TR). Вибір такої групи метрик зумовлений вимогами до лабораторних випробувань: одночасної оцінки відповідності результату еталонному значенню та оцінки здатності системи зберігати узгоджений характер у межах послідовних циклів реконфігурації.

Метрика точності характеризує ступінь наближення результату, сформованого i -ю моделлю до еталонного значення після реконфігурації та є оберненою до MAE представлена у вигляді абсолютної похибки:

$$Acc_{MAE_i} = \frac{1}{KS} \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S \frac{1}{|y_s^{gt} - \hat{y}_{i,s}(k)|}, \quad (4.16)$$

де S – кількість сенсорів у мережі; K – кількість циклів реконфігурації; y_s^{gt} – еталонне значення для s -го сенсора; $\hat{y}_{i,s}(k)$ – результат, сформований i -ю моделлю для s -го сенсора на k -му циклі реконфігурації. Вище значення Acc відповідає вищій точності.

Метрика трасованості характеризує здатність моделі зберігати узгодженість результатів вимірювання на послідовності циклів реконфігурації. TR описується через порівняння зміни результатів між циклами:

$$TR_i = 1 - \frac{1}{(K-1)S} \sum_{k=2}^K \sum_{s=1}^S \frac{|\hat{y}_{i,s}(k) - \hat{y}_{i,s}(k-1)|}{|y_s^{gt}| + \varepsilon}, \quad (4.17)$$

де $\hat{y}_{i,s}(k)$ та $\hat{y}_{i,s}(k-1)$ – результати для s -го сенсора на сусідніх циклах реконфігурації; ε – мала додатна величина для уникнення ділення на нуль. Більше значення TR відповідає вищій трасованості.

Для додаткового метрологічного обґрунтування результатів експериментальної валідації інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи лабораторних випробувань було виконано оцінювання похибки результату системного вимірювання. Доцільність такого оцінювання зумовлена тим, що під час планування та аналізу результатів вимірювань необхідно враховувати вплив кількості спостережень, прийнятої довірчої ймовірності, наявності невиключених систематичних складових похибки, а також виду і форми закону розподілу похибок [89]. Для розробленої інформаційно-вимірювальної системи ці положення мають особливе значення, оскільки результат формується не в межах окремого вимірювального каналу, а як інтегральний результат функціонування сенсорної мережі з локальним і глобальним зважуванням, когнітивною обробкою та адаптивною реконфігурацією.

У класичній метрологічній практиці під час оцінювання похибки результатів вимірювань розрізняють випадки переважання випадкової складової, невиключеної систематичної похибки та їх сумарного впливу [90]. У разі одночасної наявності випадкової та невиключеної систематичної складових сумарну оцінку похибки

доцільно визначати з урахуванням обох цих складових [91]. У дисертаційній роботі напрацювання класичної метрологічної практики використано до оцінювання похибки інтегрального результату роботи інтелектуальної інформаційно-виміральної системи.

У межах експериментальної перевірки для кожного k -го циклу випробування визначалось відхилення результату, сформованого інтелектуальною інформаційно-виміральною системою, від еталонного значення:

$$\Delta_k = \hat{x}_k - x_k^{ref}, \quad (4.18)$$

де $\hat{x}_k$ – результат вимірювання, сформований системою у k -му циклі; x_k^{ref} – еталонне значення вимірювальної величини; Δ_k – відхилення результату системного вимірювання.

Середнє значення відхилення визначалось за формулою:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \Delta_k, \quad (4.19)$$

де K – кількість експериментальних точок (циклів випробувань).

Випадкова складова похибки оцінювалась за середньоквадратичним відхиленням результатів:

$$S_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (\Delta_k - \bar{\Delta})^2}. \quad (4.20)$$

Невиключена систематична складова похибки у межах проведеного експерименту характеризувалась модулем середнього зміщення:

$$\theta_{\Delta} = |\bar{\Delta}|. \quad (4.21)$$

Для узагальненої характеристики похибки результату системного вимірювання використовувалась сумарна оцінка:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\Delta}^2 + \theta_{\Delta}^2}. \quad (4.22)$$

Таке подання дає змогу розмежувати випадкову мінливість результатів, спричинену метрологічним шумом, нестабільністю окремих сенсорних відхилень та залишкове систематичне зміщення, пов'язане з невиключеними складовими похибки. У контексті розробленої інформаційно-виміральної системи зменшення S_{Δ} свідчить про підвищення відтворюваності результатів, зменшення θ_{Δ} – про

зниження систематичного зміщення, а зменшення S_z – про підвищення інтегральної точності системного вимірювання.

Отримана оцінка похибки використовувалась як додатковий метрологічний критерій під час інтерпретації результатів симуляційного та натурного стендового експериментів разом із показниками середньої абсолютної похибки, ширини довірчого інтервалу, трасованості та адаптивності. Завдяки цьому сформовано можливість підтвердити, що підвищення точності досягається за рахунок одночасного послаблення випадкової складової похибки, обмеження впливу залишкових систематичних відхилень і адаптивного перерозподілу ваг сенсорних каналів у замкненому інформаційно-вимірювальному циклі.

Для порівняльної валідації інформаційно-вимірювальної системи на базі удосконаленої моделі реконфігурації сенсорної мережі було обрано три релевантні аналоги: ASC-RL [92] – модель реконфігурації сенсорної мережі на основі підкріплюваного навчання, RLSSA-CDG [93] – модель реконфігурації на основі алгоритму q-навчання, CR [94] – модель, побудована на когнітивному підході з оцінюванням стану середовища.

Розглянуті моделі є сучасними аналогами, призначеними для адаптивної реконфігурації сенсорних мереж. Вибір аналогів зумовлений вимогами релевантності: характеристиками динамічності, підтримкою реконфігурації, наявністю елементів інтелектуального прийняття рішень та спрямування на оптимізацію роботи сенсорної мережі. На відміну від запропонованої моделі, де реконфігурація інтегрована у замкнутий цикл OODA, аналоги відображають близькі за призначенням класи моделей. Методична коректність використання аналогів забезпечується покриттям ними суміжного простору задач реконфігурації сенсорних мереж.

Результати симуляції отримані для розробленої інформаційно-вимірювальної системи на основі використання сенсорної мережі, модель реконфігурації якої порівнюється з аналогами за метриками точності й трасованості наведено в таблиці 4.2. Значення, наведені в таблиці, отримано усередненням результатів для 30 прогонів.

Таблиця 4.2

Порівняльні результати оцінювання розробленого методу та аналогів

№ з/п	Позначення моделі	Джерело	Acc	TR
1	Розробка	[81]	4,17	3,51
2	ASC-RL	[92]	2,46	2,07
3	RLSSA-CDG	[93]	2,18	1,98
4	CR	[94]	3,42	2,94

Удосконалена модель забезпечує найвищі значення обох метрик серед розглянутих аналогів. Для наочного зіставлення отриманих результатів порівняльної валідації побудовано діаграму (рис. 4.4), яка відображає співвідношення значень показників точності та трасованості для усіх досліджуваних моделей з удосконаленою.

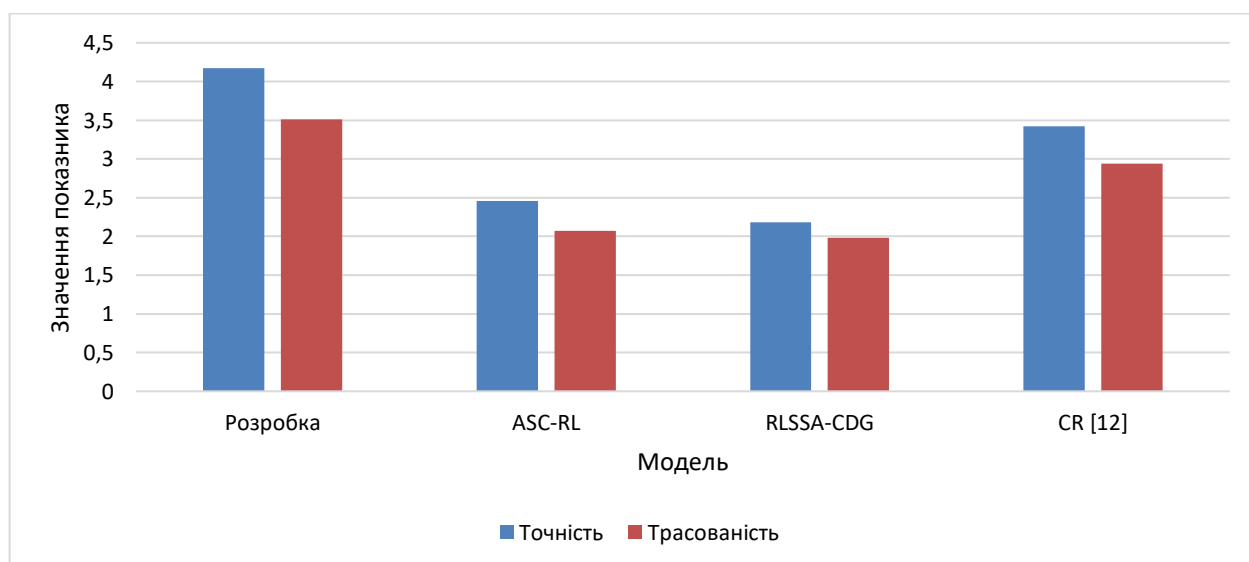


Рисунок 4.4 – Порівняльна діаграма показників точності та трасованості для удосконаленої моделі та аналогів

Для підтвердження відтворюваності результатів реконфігурації було сформовано графічне представлення розподілу значень точності та трасованості (рис. 4.5), отриманих на 30 симуляційних прогонах.

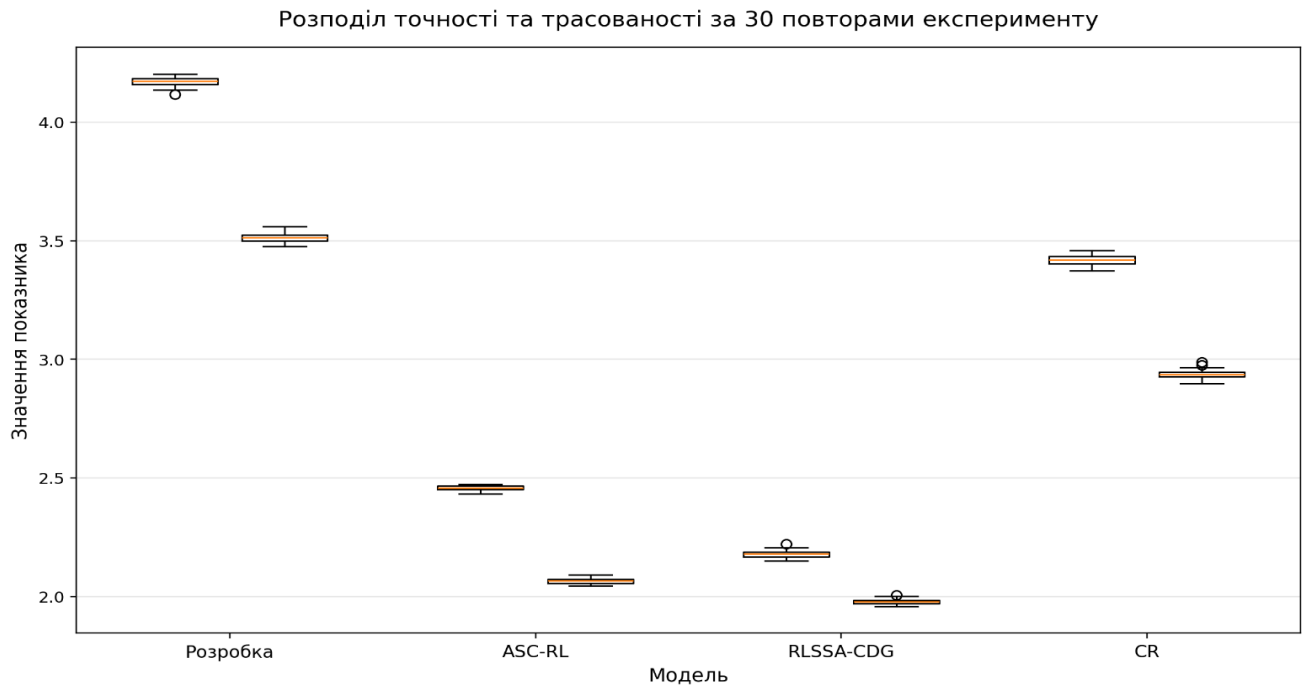


Рисунок 4.5 – Графік розподілу значень точності та трасованості на 30 прогонах симуляції

За аналогією з рисунками 2.5 та 3.4, графік сформовано засобами Python з використанням бібліотеки Matplotlib, враховуючи усі особливості представлення, описані в підрозділі 2.4, але на основі даних, отриманих в результаті обчислювального експерименту (симуляції).

Як видно з представленого графіку, значення точності та трасованості стабільні.

Отримані значення симуляційного експерименту дозволили підтвердити ефективність удосконаленої моделі когнітивної реконфігурації сенсорної мережі у складі інформаційно-вимірювальної системи. Удосконалена модель забезпечує покращення показників точності на 38% та показників трасованості на 36% у порівнянні з середнім значенням показників розглянутих сучасних моделей реконфігурації. Використання когнітивного управління та дворівневого зважування є доцільним для підвищення ефективності адаптивної реконфігурації сенсорної мережі у рамках використання у замкнутому циклі вимірювань OODA.

Отримані результати симуляційного експерименту підтвердили працездатність удосконаленої моделі та доцільність подальшої перевірки в умовах,

максимально наближених до реального використання сенсорної мережі під час лабораторних випробувань. Наступним етапом валідації було проведення натурального експерименту для перевірки збереження виявлених закономірностей на реальному вимірювальному стенді.

Після застосування обчислювального експерименту було проведено стендовий натурний експеримент для дослідження функціонування інформаційно-вимірювальної системи на основі адаптивно реконфігурованої сенсорної мережі.

Метою стендового натурального експерименту була перевірка працездатності стендової сенсорної мережі та оцінювання стійкості її роботи в умовах порушення конфігурації. Важливим етапом було встановлення ступеня узгодженості між результатами натурального та симуляційного експериментів. Умови та метрики для стендового натурального експерименту використовувались аналогічні симуляційному. Логіка обробки даних використана тотожна. Передбачалось виконання локального зважування і локальної корекції на нижньому рівні та глобального зважування, когнітивної інтерпретації, визначення пріоритету реконфігурації і реалізації керуючої дії на верхньому рівні.

Для проведення натурального експерименту було сформовано двокластерний стенд сенсорної мережі (рис. 4.6).

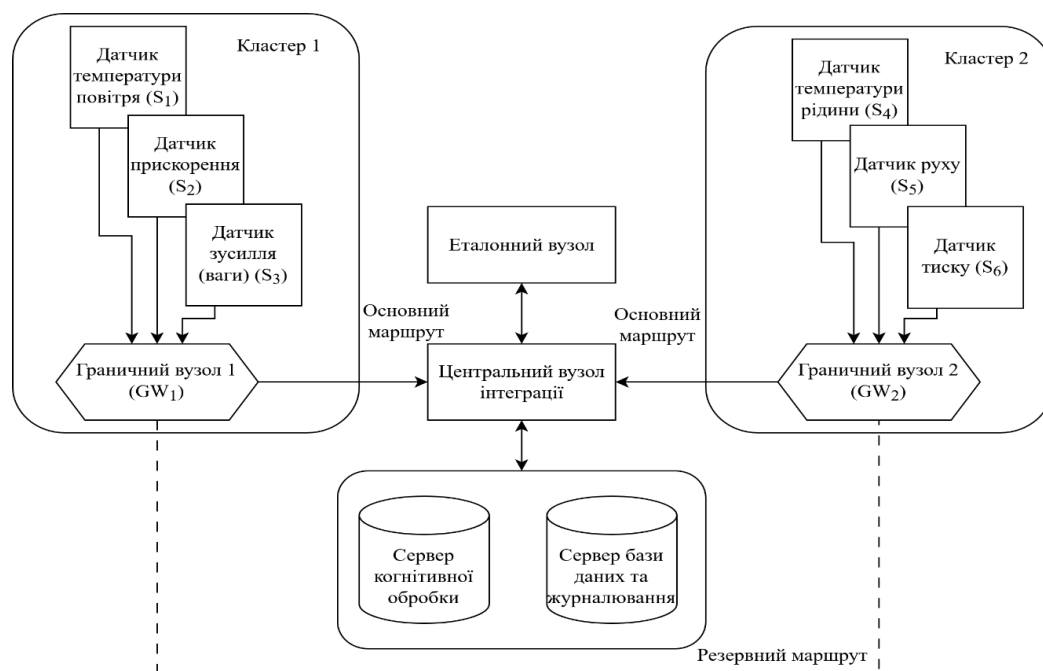


Рисунок 4.6 – Схематичне представлення стенду натурального експерименту

До складу мережі увійшло шість сенсорних вузлів $S_1, \dots, S_6$, які формують гетерогенну сенсорну мережу лабораторних випробувань. Використано датчик температури повітря, датчик температури рідини, датчик прискорення, датчик руху, датчик зусилля (ваги) та датчик тиску. До мережі додано два граничні вузли обробки GW_1 та GW_2 , центральний вузол інтеграції та еталонний вузол. Зазначений набір сенсорів охоплював як швидкозмінні, так і повільнозмінні параметри і поєднував кліматичні та механічні канали спостережень, що відповідає вимогам інтелектуальних вимірювань у сенсорній мережі лабораторних випробувань. Доцільність гетерогенного складу сенсорів зумовлена необхідністю представлення кожного сенсорного каналу у вигляді структурованого набору параметрів з урахуванням вимірювальних, часових, контекстних та службових даних. Було імітовано роботу серверу когнітивної обробки та серверу бази даних і журналювання історичних даних. До складу першого кластеру увійшли вузли $S_1, \dots, S_3$, до складу другого – $S_4, \dots, S_6$. Між граничними вузлами закладено у топологію резервний міжкластерний маршрут. Призначення резервного маршруту в активації у випадку порушення основної маршрутизації або деградації роботи вузлів вищого рівня. Побудований стенд функціонально відповідав повному циклу OODA.

Для забезпечення відтворюваності виконання кожного сценарію було зафіксовані наступні умови: по 30 повторних серій по 300 вимірювальних циклів із тривалістю верхньорівневого циклу інтеграції та когнітивної реконфігурації 1 с. Загальна кількість циклів на один сценарій складала 9000. Еталонна фізична величина задавалась квазістаціонарним профілем у рамках штатного робочого діапазону стенду. Для сенсорних каналів додатково введено калібрувальні зсуви, повільний дрейф, метрологічний шум, шум від зовнішніх впливів, випадкові втрати пакетів та аномальні сплески. Для повільнозмінних каналів (температура повітря, температура рідини, тиск, зусилля) цикл, рівний 1 с використовувався як цикл безпосереднього оновлення даних на рівні інтеграції. Для швидкозмінних каналів (прискорення, рух) у межах кожного циклу в 1 с реалізовувалося локальне внутрішньоциклове високочастотне зняття сигналу з передачею агрегованих ознак на верхній рівень. Завдяки такому підходу зняття показників було узгоджено єдиний

цикл когнітивної обробки з різною фізичною динамікою сенсорних каналів для забезпечення відповідності логіці розробленого методу – вхідні дані розглядаються як структурований набір параметрів.

До метаданих вимірювальної інформації включено ідентифікатор циклу, часову мітку, дані про калібрування, інформацію про джерело і маршрут передачі даних, ознаки стану сенсорного каналу. Службова інформація включала режим випробувань, етап або сценарій, параметри навколишнього середовища, параметри стану об'єкта випробувань.

Для об'єктивного оцінювання результатів експерименту використано базові метрики, застосовані у симуляційному експерименті: MAE , $CI95$ та AF . У натурному експерименті додатково акцентовано увагу на системних метриках реконфігурації: точність Acc , трасованість TR та середній час реконфігурації t . MAE характеризує відхилення інтегрального результату від еталонного значення, $CI95$ відтворюваність результатів за 30 повторів, AF ступінь послаблення впливу аномальних спостережень, Acc нормовану точність інтегрального результату, TR узгодженість і відстежуваність реконфігураційних переходів, а t оперативність реконфігурації.

З огляду на гетерогенний склад сенсорної мережі сценарії реконфігурації формувалися з урахуванням різної фізичної природи каналів спостереження. Оцінювалась мережева стійкість системи до маршрутних і вузлових порушень, здатність зберігати коректність інтегрального результату при частковій деградації чи аномальній поведінці окремих каналів. У рамках проведення експерименту для натурного відтворення було сформовано п'ять базових сценаріїв:

1) штатне функціонування сенсорної мережі (рис. В 1) для формування базової довіри (еталонного профілю роботи) за відсутності порушень передачі даних, відмов вузлів та аномалій і подальшої оцінки за відповідними метриками;

2) відтворення умов відмови основного каналу зв'язку між першим граничним вузлом і центральним (рис. В 2) з метою перевірки здатності системи реалізувати повноцінну реконфігурацію сенсорної мережі без втрати вимірювального контуру втраченого кластера, що надало дані щодо ефективності резервного маршруту та стійкості вимірювального процесу до порушень передачі даних;

3) відтворення умов відмови окремого сенсорного вузла (рис. В 3) з метою перевірки можливості зберігати працездатність при втраті одного з вимірювальних вузлів без необхідності перебудови топології у цілому, що дозволили перевірити здатність дворівневого механізму зважування локально адаптувати інтегральний результат до часткової втрати вимірювальної інформації;

4) відтворення аномальної поведінки одного сенсора у вигляді викидів та нестійких значень (рис. В 4) для перевірки здатності агрегування даних та послаблення впливу аномального каналу за рахунок локальних та глобальних вагових коефіцієнтів;

5) відтворення порушення роботи одного з граничних вузлів або втрати його зв'язку з центральним вузлом з метою перевірки працездатності підмережі та системної стійкості реконфігурації на кластерному рівні (рис. В 5).

Результати проведеного стендового натурального експерименту за описаними сценаріями представлені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Результати стендового натурального експерименту за сценаріями реконфігурації

Сценарій	<i>MAE</i>	<i>CI95</i>	<i>AF</i> , %	<i>Acc</i> , %	<i>TR</i> , %	<i>t</i> , с	Висновок
Штатний режим	0,239	0,521	71,09	94,03	90,58	—	Стабільна робота системи
Відмова основного каналу	0,257	0,557	77,21	93,59	88,38	1,86	Кластер працездатний завдяки резервному маршруту
Відмова сенсорного вузла	0,279	0,736	72,59	93,03	88,68	1,24	Втрата одного вузла не руйнує інтегральний результат
Аномальна поведінка сенсора	0,281	0,731	96,92	92,98	88,37	1,06	Механізм зважування ефективно пригнічує внесок аномалій
Порушення роботи шлюзу	0,281	0,723	80,27	92,97	86,20	2,45	Система працездатна, складність трасування зростає
Середнє значення за сценаріями	0,267	0,654	79,62	93,32	88,44	1,65	Система працездатна в усіх сценаріях

У штатному режимі реконфігурація не проводилась, тому час реконфігурації не визначався.

Як видно із результатів наведених в таблиці, система продемонструвала найкращі значення усіх основних метрик. Такі значення підтверджують, що запропонована архітектура дозволяє забезпечити стабільне функціонування вимірювального контуру, вузький діапазон розкиду результатів та відтворюваність рішень за умов відсутності порушень на транспортному рівні та аномалій сенсорних каналів.

Узагальнення результатів за п'ятьма сценаріями доводить збереження системою високого рівня точності та прийняттого рівня пояснюваності й відстежуваності за умов наявних різномірних порушень. Характер зміни показників змістовно узгоджений та контрольований. Найменше погіршення спостерігалось у випадку маршрутної реконфігурації, найбільше – у випадку перебудови підмережі.

Для наочного зіставлення поведінки системи у п'яти базових сценаріях натурного експерименту побудовано теплову карту нормалізованих показників якості (рис. 4.7).

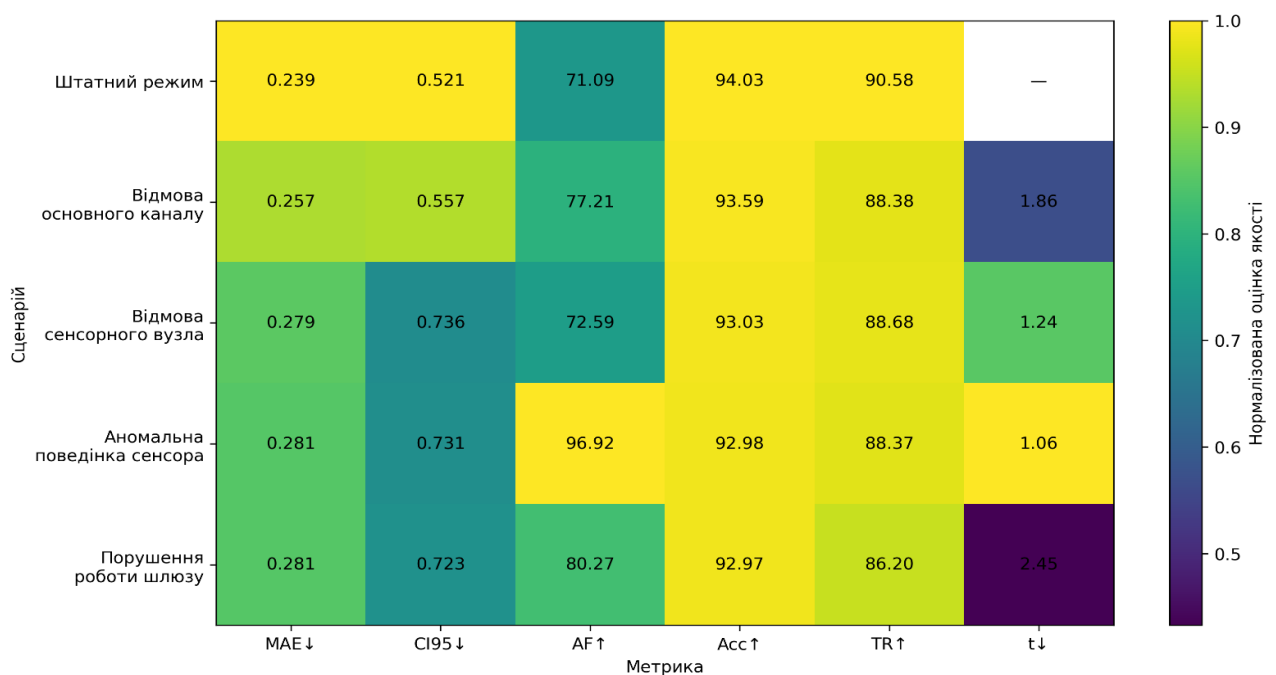


Рисунок 4.7 – Теплова карта зміни показників функціонування ІВС за сценаріями натурного експерименту

У сценарії відмови основного каналу спостерігалось помірне погіршення показників. Введення резервного маршруту до топології обґрунтоване та дозволило зберегти цілісність вимірювального процесу при порушенні основного транспортного рівня. У сценарії відмови окремого сенсорного вузла система не потребувала перебудови топології загалом. Було виконано локальну адаптацію структури зважування та перерозподіл внеску інших сенсорних каналів у формування інтегрального результату. Зміна показників порівняно із штатним режимом мінімальна та не впливала на загальних результат в рамках задачі. Сценарій аномальної поведінки сенсора продемонстрував найвище значення показника корекції аномалій та дозволив провести оцінку послаблення впливу аномальних станів за рахунок інтелектуального локального та глобального зважування. Спостерігалось несуттєве погіршення абсолютних характеристик точності при суттєвому пригніченні аномальних внесків. Система запобігла неконтрольованому впливу аномальних внесків на інтегральний результат. Сценарій порушення роботи граничного вузла, за якого конфігурація передбачала перебудову підмережі на відміну від перебудови окремої лінії чи сенсорного каналу. Спостерігалось контрольоване погіршення показників, зростання складності трасування та середній час реконфігурації. Система залишалась працездатною, критичного для ефективного функціонування системи зменшення показників не зафіксовано.

Натурний експеримент підтвердив працездатність розробленої інформаційно-вимірювальної системи як у штатних, так і у нештатних умовах функціонування.

Зіставлення із попередніми етапами дослідження та симуляційної валідації системи проводилось за метриками *MAE*, точності, трасованості та часу реконфігурації. Результати порівняння симуляційного та натурального експериментів наведено в таблиці 4.4. Для зіставлення було виконано додаткове нормування Асс до відсоткової шкали точності.

Таблиця 4.4

Порівняння результатів натурального і симуляційного експериментів

Показник	Натурний експеримент	Симуляційний експеримент	Відхилення
<i>MAE</i>	0,267	0,240	+11,25%
Точність, %	93,32	94,00	−0,68 в.п
Трасованість, %	88,44	87,75	+0,69 в.п
Середній час реконфігурації	1,65	1,21	+36,6%
Загальна тенденція	Збережена	Базова модель	Узгодженість підтверджено

Дані, наведені у таблиці свідчать про узгодженість результатів натурального та симуляційного експерименту.

Узгодженість результатів натурального та симуляційного експериментів за основними показниками відображено на рис. 4.8.

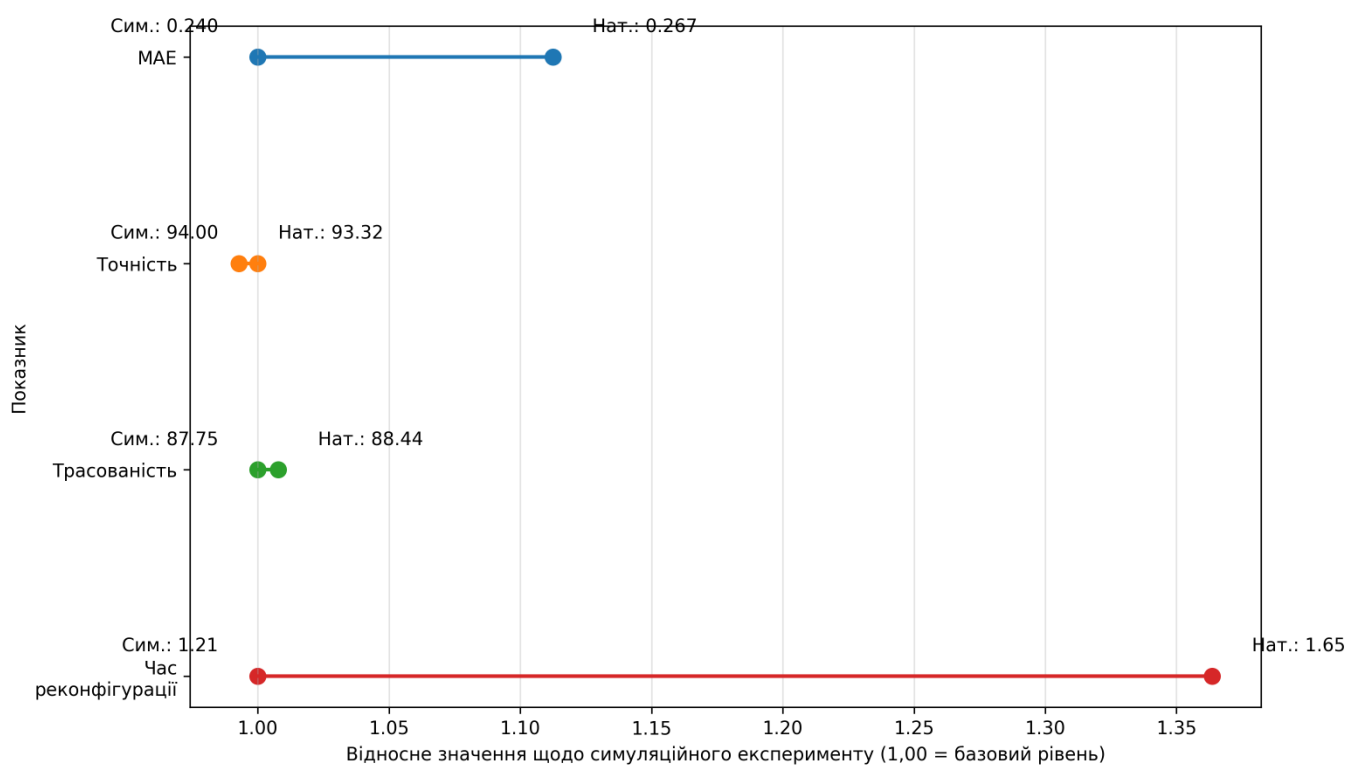


Рисунок 4.8 – Порівняння результатів натурального та симуляційного експериментів

Зміна показників натурального експерименту пояснюється впливом реальних часових затримок, нестабільністю каналів зв'язку, службових втрат пакетів та

неідеальності фізичного середовища. Відхилення показників під час натурального експерименту має обмежений характер а загальна тенденція до підвищення точності та трасованості реконфігурації зберігається, що підтверджує адекватність симуляційної моделі, практичну придатність розробленої інформаційно-вимірювальної системи та підвищення надійності й керованості лабораторних випробувань.

У результаті проведення обчислювального симуляційного та стендового натурального експериментів, порівняльної оцінки експериментального дослідження було отримано достатньо даних для практичного формування умов застосовності та обмежень представленої інформаційно-вимірювальної системи.

Запропоновані інтелектуальна інформаційно-вимірювальна система є найбільш ефективною за наступних умов її застосування:

1) система функціонує в межах розподіленого вимірювального контуру з формуванням результатів на основі множини сенсорних вузлів;

2) подача вхідних даних забезпечується у вигляді структурованого набору вимірювальних, часових, контекстних і службових параметрів, достатніх для локального та глобального зважування, для когнітивної інтерпретації та реконфігурації сенсорної мережі;

3) забезпечення можливості оцінки метрологічних характеристик для сенсорних каналів (стабільності, похибки, дисперсії, рівня довіри тощо);

4) обсяг темпоральних спостережень достатній для формування локальних вибірок, накопичення історичних даних щодо вимірювань, забезпечення трасованості прийнятих рішень;

5) підтримка дворівневої організації обробки даних, закладена в архітектурних особливостях системи, що передбачає локальну оцінку на граничному рівні та глобальне зважування і когнітивне узагальнення на верхньому рівні;

6) забезпечення нормування та уніфікованого представлення різномірних каналів для гетерогенних сенсорних мереж з метою інтеграції різномірних параметрів;

7) реалізація внутрішньоциклового локального вимірювання для швидкозмінних параметрів;

8) можливість збереження історії спостережень, рішень і виконавчих дій з метою пояснюваної реконфігурації та відтворюваного аналізу причин переходів між станами системи;

9) існування потреби прийняття рішень щодо адаптації або реконфігурації сенсорної мережі;

10) можливі локальні відмови, аномалії сенсорних каналів, маршрутні порушення та зміни конфігурації сенсорної мережі.

Особливості побудови та експериментальна валідація системи дозволили окреслити наступні обмеження її застосування:

1) ефективність системи знижується у випадках, коли прогнозована або скоригована оцінка не забезпечує переваг порівняно з безпосереднім виміряним значенням через послаблення ефекту від адаптивного зважування;

2) зниження результативності зі зниженням обсягу темпоральних даних через неможливість формування стійких локальних оцінок та забезпечення належного рівня трасованості;

3) ускладнення застосування за відсутності можливості оцінки метрологічних та експлуатаційних характеристик окремих сенсорних каналів через зменшення обґрунтованості локального та глобального зважування;

4) якість когнітивної інтерпретації знижується за умов неповних метаданих чи контекстних параметрів;

5) потреба узгодження локальної частоти вимірювання з верхньорівневим циклом інтеграції для швидкозмінних сигналів;

6) ускладнення роботи у сценаріях, пов'язаних з кластерним порушенням або деградацією вузлів вищого рівня;

7) орієнтація реалізації інформаційно-вимірювальної системи на задачі розподілених інтелектуальних вимірювань з реконфігурацією сенсорної мережі;

8) потреба окремого розвитку моделей когнітивної адаптації для подальшого розширення системи до складніших багаторівневих або гібридних конфігурацій;

Межі застосування інформаційно-вимірювальної системи визначаються ефективністю класу задач, для виконання яких вона реалізована. Розглядалась не універсальність при застосуванні будь-якої сенсорної мережі, а задачі інтелектуальних вимірювань, когнітивної інтерпретації та реконфігурації в умовах лабораторних випробувань. Наведені умови застосовності та обмеження формують рамки найбільш ефективного використання системи у межах дослідженого в роботі класу задач.

Висновки до розділу 4

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячено розробленню інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи лабораторних випробувань на основі адаптивно реконфігурованої сенсорної мережі у межах повного замкнутого циклу OODA. Удосконалено модель когнітивної реконфігурації сенсорної мережі на основі дворівневого інтелектуального зважування вимірюваних параметрів за рахунок когнітивного управління при автоматизованому прийнятті рішень, що дозволило підвищити точність і трасованість результатів вимірювань при збереженні адаптивності системи та врахувати чотири етапи замкнутого циклу інтелектуальних вимірювань OODA. При цьому було отримано наступні результати:

1. Удосконалено та формалізовано модель адаптивної реконфігурації сенсорної мережі лабораторних випробувань у складі інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи. Модель описує функціонування системи як послідовність етапів OODA, у межах яких формуються повний вектор спостережень, інтегральні пріоритети реконфігурації, цільова функція вибору конфігурації та оператор зміни конфігурації сенсорної мережі, що дозволило перейти від окремих процедур вимірювання й обробки до цілісного формалізованого контуру керованої реконфігурації.

2. Розроблено структурно-функціональну схему організації інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи лабораторних випробувань. У її складі визначено сенсорну підсистему, сенсорний вузол, блок когнітивної обробки, базу

даних, блок прийняття рішень, блок виконавчих команд і системний вузол. Встановлено місце складових частин у замкнутому циклі OODA. Показано, що інтелектуальні властивості системи забезпечуються поєднанням вимірювального, аналітичного, прогностичного та керуючого контурів і використанням фізичних, аналітичних та прогностичних параметрів у вхідному просторі системи.

3. Формалізовано функціональну модель реалізації системи в інтегрованому поданні потоків, станів і переходів. Для цього використано графічне представлення F-системи у вигляді спрямованого графу та табличне представлення. Описано послідовність перетворення вимірювальних, службових і керуючих даних у межах одного циклу функціонування системи. Окремо відображено контур захисту інформації при передаванні критичних даних між сенсорними вузлами, блоком когнітивної обробки, базою даних та виконавчим контуром, що забезпечує завершеність системної реалізації запропонованої архітектури.

4. Проведено експериментальну та порівняльну валідацію розробленої інформаційно-вимірювальної системи у комбінованій формі: за результатами симуляційного та стендового натурного експерименту. У порівнянні з трьома сучасними аналогами удосконалена модель продемонструвала найвищі значення показників точності й трасованості: покращення становило 38 % за точністю та 36 % за трасованістю відносно середніх значень аналогів. У натурному експерименті на двокластерному стенді з шістьма сенсорними вузлами підтверджено працездатність запропонованої моделі когнітивної реконфігурації сенсорної мережі в умовах реального функціонування розподіленого вимірювального контуру, а також узгодженість основних тенденцій із результатами попередньої симуляційної валідації. На основі результатів симуляційного та натурного експериментів сформульовано умови застосовності й визначено обмеження інформаційно-вимірювальної системи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу розроблення інформаційно-вимірювальної технології лабораторних випробувань, яка забезпечує підвищення точності, відтворюваності та метрологічної трасованості вимірювань, а також інтегральної достовірності результатів когнітивної обробки при забезпеченні адаптивності на всіх етапах замкненого інформаційно-вимірювального циклу. При цьому отримані такі результати:

1. Розроблено метод інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань на основі формалізованого механізму зниження впливу метрологічного шуму та аномалій на показники локального та глобального зважування вимірювальних коефіцієнтів шляхом використання бутстрепової агрегації за рахунок прогнозування вибірок та дворівневої організації процесу інтелектуального вимірювання, що дозволило забезпечити стійкість формування інтегрального результату інтелектуального вимірювання до впливу метрологічного шуму та аномалій і підвищити точність результатів інтелектуальних вимірювань на 10 % та відтворюваність результатів за рахунок зменшення розкиду похибки на 36 % порівняно із середнім значенням аналогів.

2. Розроблено метод когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань на основі дворівневого зважування за рахунок когнітивного агрегування, інтегрованого з онтологічною інтерпретацією шляхом урахування метрологічних вимог та моделі когнітивного узагальнення й інтерпретації результатів, що завдяки врахуванню різних рівнів когнітивної обробки дозволило інтегрувати когнітивний процес у замкнутий цикл вимірювань при лабораторних випробуваннях та підвищити інтегральну достовірність результатів когнітивної обробки на 36% порівняно із середнім значенням розглянутих аналогів.

3. Удосконалено модель когнітивної реконфігурації сенсорної мережі на основі дворівневого інтелектуального зважування вимірюваних параметрів за рахунок когнітивного управління при автоматизованому формуванні і прийнятті управлінських рішень щодо реконфігурації сенсорної мережі в циклі OODA, як

основу інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи лабораторних випробувань, що дозволило забезпечити адаптивність на всіх етапах замкненого інформаційно-вимірювального циклу та підвищити на 38 % точність і на 36 % трасованість результатів вимірювань порівняно із середнім значенням розглянутих аналогів.

Розроблена в роботі технологія та методи, які є її структурними складовими системно доведені до алгоритмічного, структурно-логічного та системотехнічного забезпечення, придатного для використання в інженерній практиці інформаційно-вимірювального забезпечення лабораторних випробувань.

За результатами обчислювального симуляційного та натурного стендового експериментів підтверджено ефективність розробленої інформаційно-вимірювальної технології лабораторних випробувань на системному рівні, при цьому за результатами порівняння з аналогами досягнуто підвищення точності результатів вимірювань на 38 % і трасованості на 36 %, а натурний стендовий експеримент підтвердив працездатність системи та збереження встановлених тенденцій.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені в ТОВ “МОРОЗ ТЕХ” – для удосконалення інформаційно-вимірювального супроводу технологічних процесів, розвитку процедур контролю та розширення можливостей адаптивної організації вимірювальних контурів і для підвищення ефективності контролю якості, об’єктивності оцінювання контрольованих параметрів та покращення обробки вимірювальної інформації та в освітній процес Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького при викладанні освітніх компонентів: “Проектування та розробка IoT”, “Вбудовані системи збору та обробки даних” та “Обробка інформації в режимі реального часу” здобувачам вищої освіти рівня бакалавр та магістр.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Nam Y., Park H.-D. Revolutionizing laboratory practices: pioneering trends in total laboratory automation. *Annals of Laboratory Medicine*. 2025. Vol. 45, № 5. P. 472-483.
2. Self-driving laboratories for chemistry and materials science / G. Tom et al. *Chemical Reviews*. 2024. Vol. 124, Issue 16. P. 9633-9732.
3. An autonomous laboratory for the accelerated synthesis of inorganic materials / N.J. Szymanski et al. *Nature*. 2023. Vol. 624. P. 86-91.
4. Brown R.J.C., Janssen J.-T., Wright L. Why a digital framework for the SI? *Measurement*. 2022. Vol. 187. URL: <http://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110309> (дата звернення: 08.10.2025).
5. Resolution 2 of the 27th CGPM (2022). On the global digital transformation and the International System of Units. In: *Proceedings of the 27th CGPM (2022)*. Sèvres : Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 2024. P. 395.
6. EURAMET e.V. Metrology for a stronger Europe: A European Metrology Agenda for the next decade. Braunschweig : EURAMET e.V., 2024. 14 p.
7. EDGE AI Foundation. The 2025 Edge AI technology report. EDGE AI Foundation, 2025. 87 p. URL: <https://www.edgeaifoundation.org/edgeai-content/the-2025-edge-ai-technology-report> (дата звернення: 08.10.2025).
8. Precedence Research. Edge AI Market Size, Share and Trends 2025 to 2034. 2025. URL: <https://www.precedenceresearch.com/edge-ai-market> (дата звернення: 18.12.2025).
9. Smart manufacturing and digitalization of metrology: a systematic literature review and a research agenda / C.R.H. Barbosa et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, № 16. URL: <https://doi.org/10.3390/s22166114> (дата звернення: 09.10.2025).
10. Дячок Р.В. Методи та засоби інтелектуалізації інформаційно-вимірювальних систем з мультисенсорною конфігурацією : дис. ... д-ра філософії : 123 – комп'ютерна інженерія. Львів, 2023. 201 с.

11. Сердюк О., Труфан М. Теоретичні основи алгоритму подвійного контролю в мультиагентних інформаційно-вимірювальних системах. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2025. Вип. 86, № 1. С. 5-12.
12. Орлов С.В., Червотока О.В., Геращенко М.О. Наукові протиріччя та шляхи оптимізації лабораторних випробувань роботизованих пристроїв та безпілотних літальних апаратів. *Випробування і сертифікація озброєння та військової техніки: збірник тез доповідей XXV науково-технічної конференції Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (м. Черкаси, 25 вересня 2025 р.)*. 2025. С. 516-517.
13. Wireless sensor network design methodologies: a survey / M.S. BenSaleh et al. *Journal of sensors*. 2020. Vol. 2020. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/9592836> (дата звернення: 01.11.2025).
14. Building an intelligent laboratory environment via a cyber-physical system / C.-U. Lei et al. *International journal of distributed sensor networks*. 2013. Vol. 9, № 12. URL: <https://doi.org/10.1155/2013/109014> (дата звернення: 01.11.2025).
15. Experimental research testbeds for large-scale WSNS: a survey from the architectural perspective / H. Kim et al. *International journal of distributed sensor networks*. 2015. Vol. 11, № 3. URL: <https://doi.org/10.1155/2015/630210> (дата звернення: 05.11.2025).
16. A universal testbed for IoT wireless technologies: abstracting latency, error rate and stability from the IoT protocol and hardware platform / E. Saavedra et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, № 11. URL: <https://doi.org/10.3390/s22114159> (дата звернення: 05.11.2025).
17. Павлишин М., Литовченко А., Гусар І. Інтелектуальна інформаційно-вимірювальна система експрес-аналізу параметрів ґрунтів. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*. 2020. Вип. 26 (40). С. 236-245.
18. Electronic measurement system for IoT sensors studying / V. Brailovsky et al. *Security of Infocommunication Systems and Internet of Things*. 2023. Vol. 1, № 2. URL: <https://doi.org/10.31861/sisiot2023.2.02003> (дата звернення: 07.11.2025).

19. Schmitt R. H., Voigtmann C. Sensor information as a service – component of networked production. *Journal of sensors and sensor systems*. 2018. Vol. 7, № 1. P. 389-402.
20. Cofta P., Karatzas K., Orłowski C. A conceptual model of measurement uncertainty in IoT sensor networks. *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 5. URL: <https://doi.org/10.3390/s21051827> (дата звернення: 09.11.2025).
21. Дуднік А. Моделі та методи підвищення продуктивності безпроводових мереж у складі комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин. *Інформаційні технології та суспільство*. 2021. № 2(2). С. 6-14.
22. Забезпечення метрологічної надійності в розпорошених вимірювальних системах / В. Яцук та ін. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2018. Вип. 79 (3). С. 71-82.
23. Бубела Т., Федішин Т. Аналіз потенціалу кіберфізичних систем для застосування у агросекторі. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2019. Вип. 80 (4). С. 23-30.
24. Druzhynin A., Kuttrakov O., Nichkalo S. Informational measuring system with wireless data transferring for sensors of physical values. *Computational problems of electrical engineering*. 2022. Vol. 12, № 2. P. 26-30.
25. Chervotoka O.V., Tarasenko Ya.V., Zaetz I.I. Prospects for the use of Internet of Things technology in the process of laboratory vibration tests of military UAVs. *Актуальні проблеми військово-технічної політики та напрями озброювання Збройних Сил України в умовах воєнного стану: збірник тез доповідей X міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 04-05 грудня 2024 р.)*. 2024. С. 347-348.
26. Feng Z., Wang Q., Shida K. A review of self-validating sensor technology. *Sensor review*. 2007. Vol. 27, № 1. P. 48-56.
27. Sensor reliability in cyber-physical systems using Internet-of-Things data: a review and case study / F. Castaño et al. *Remote sensing*. 2019. Vol. 11, № 19. URL: <https://doi.org/10.3390/rs11192252> (дата звернення: 12.11.2025).

28. SmartOntoSensor: ontology for semantic interpretation of smartphone sensors data for context-aware applications / S. Ali et al. *Journal of sensors*. 2017. Vol. 2017. URL: <https://doi.org/10.1155/2017/8790198> (дата звернення: 12.11.2025).

29. Towards semantic sensor data: an ontology approach / J. Liu et al. *Sensors*. 2019. Vol. 19, № 5. URL: <https://doi.org/10.3390/s19051193> (дата звернення: 04.11.2025).

30. Semantic description of quality of data in sensor networks / A.P. Vedurmudi et al. *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 19. URL: <https://doi.org/10.3390/s21196462> (дата звернення: 19.11.2025).

31. Jiang W., Gu C., Wu J. A dynamically reconfigurable wireless sensor network testbed for multiple routing protocols. *Wireless communications and mobile computing*. 2017. Vol. 2017. URL: <https://doi.org/10.1155/2017/1594270> (дата звернення: 01.12.2025).

32. DEWS: A distributed measurement scheme for efficient wireless sensing / M. Pang et al. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*. 2024. Vol. 8, № 4. URL: <https://doi.org/10.1145/3699728> (дата звернення: 04.12.2025).

33. A model based process for reconfigurable wireless sensor network development / R. Saida et al. *Wireless networks*. 2022. Vol. 28, № 2. P. 567-585.

34. Applying edge computing in the execution IoT operative transactions / N. Kuchuk et al. *Advanced Information Systems*. 2024. Vol. 8, № 4. P. 49-59.

35. Krupych A., Elsts E. MQTT latency evaluation in cloud-based spectrometer control. *Advances in Cyber-Physical Systems*. 2025. Vol. 10, № 2. P. 151-157.

36. Про метрологію та метрологічну діяльність : Закон України від 05.06.2014 р. № 1314-VII. *Відомості Верховної Ради України*. 2014. № 30. Ст. 1008.

37. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Geneva : International Organization for Standardization (ISO) ; International Electrotechnical Commission (IEC), 2017. 30 p.

38. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. Чинний від 2021-01-01. Вид. офіц. Київ : ДП “УкрНДНЦ”, 2019. 30 с.

39. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. Sèvres : Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), 2008. 134 p.
40. ISO 10012:2026. Quality management – Requirements for measurement management systems. Geneva : International Organization for Standardization (ISO), 2026. 46 p.
41. Measurement uncertainty evaluation for sensor network metrology / P. Harris et al. *Metrology*. 2025. Vol. 5, № 1. URL: <https://doi.org/10.3390/metrology5010003> (дата звернення: 17.12.2025).
42. ISO/IEC 30141:2024. Internet of Things (IoT) – Reference architecture. Geneva : International Organization for Standardization (ISO) ; International Electrotechnical Commission (IEC), 2024. 53 p.
43. OIML D 31:2023. General requirements for software-controlled measuring instruments. Paris : International Organization of Legal Metrology (OIML), 2023. 91 p.
44. ISO/IEC 42001:2023. Information technology – Artificial intelligence – Management system. Geneva : International Organization for Standardization (ISO) ; International Electrotechnical Commission (IEC), 2023. 51 p.
45. ISO/IEC 23894:2023. Information technology – Artificial intelligence – Guidance on risk management. Geneva : International Organization for Standardization (ISO) ; International Electrotechnical Commission (IEC), 2023. 26 p.
46. National Institute of Standards and Technology (NIST). Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0). Gaithersburg, MD : NIST, 2023. 48 p.
47. Trustworthy artificial intelligence in the context of metrology / T. Adel et al. *Studies in computational intelligence*. Cham, 2024. P. 53-75.
48. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements. Geneva : International Organization for Standardization (ISO) ; International Electrotechnical Commission (IEC), 2022. 46 p.
49. Eichstädt S., Delak K., Kulka-Peschke C. Digital transformation in legal metrology: Insights from the OIML DTG Survey 2024. OIML Bulletin. 2025. Vol. LXVI,

№ 3. URL: <https://www.oiml.org/en/publications/oiml-bulletin/2025-03/20250307> (дата звернення: 15.12.2025).

50. Chervotoka O.V., Tarasenko Ya.V. Regulatory and standards support for the application of intelligent information and measurement technology. *Scientific Research in XXI Century: the Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference* (Ottawa, November 16-18, 2025). Ottawa, Canada. P. 186-187.

51. A survey of measurement applications based on IoT / P. Daponte et al. *2018 workshop on metrology for industry 4.0 and IoT*, Brescia, 16-18 April 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/metroi4.2018.8428335> (дата звернення: 12.12.2025).

52. Cofta P., Orłowski C., Lebiedz J. Trust-Based model for the assessment of the uncertainty of measurements in hybrid IoT networks. *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 23. URL: <https://doi.org/10.3390/s20236956> (дата звернення: 13.12.2025).

53. Recent advances in sensor fault diagnosis: a review / D. Li et al. *Sensors and actuators A: physical*. 2020. Vol. 309. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111990> (дата звернення: 13.12.2026).

54. Reppa V., Polycarpou M.M., Panayiotou C.G. Sensor fault diagnosis. *Foundations and trends in systems and control*. 2016. Vol. 3, № 1-2. P. 1-248.

55. Semantic challenges for sensor plug and play / A. Bröring et al. *Web and wireless geographical information systems*. Berlin, Heidelberg, 2009. P. 72-86.

56. Honti G.M., Abonyi J. A review of semantic sensor technologies in Internet of Things architectures. *Complexity*. 2019. Vol. 2019. URL: <https://doi.org/10.1155/2019/6473160> (дата звернення: 15.12.2025).

57. ReWiSe: a new component model for lightweight software reconfiguration in wireless sensor networks / A. Taherkordi et al. *On the move to meaningful Internet systems: OTM 2008 workshops*. Berlin, Heidelberg, 2008. P. 415-425.

58. Червотока О.В., Тарасенко Я.В. Проблеми граничних обчислень в інтелектуальних сенсорних системах лабораторних вимірювань. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси: збірник тез доповідей XVIII Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Київ, 20-21 травня 2025 р.). 2025. С. 184-185.

59. Червотока О.В., Тарасенко Я.В. Метод інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2025. № 84(4). С. 99-106.

60. Rassam M., Zainal A., Maarof M. Advancements of data anomaly detection research in wireless sensor networks: a survey and open issues. *Sensors*. 2013. Vol. 13, № 8. P. 10087-10122.

61. A survey on fault diagnosis in wireless sensor networks / Z. Zhang et al. *IEEE access*. 2018. Vol. 6. P. 11349-11364.

62. IoT-Stream: a lightweight ontology for Internet of Things data streams and its use with data analytics and event detection services / T. Elsaleh et al. *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 4. URL: <https://doi.org/10.3390/s20040953> (дата звернення: 25.12.2025).

63. A real-time smooth weighted data fusion algorithm for greenhouse sensing based on wireless sensor networks / T. Zou et al. *Sensors*. 2017. Vol. 17, № 11. URL: <https://doi.org/10.3390/s17112555> (дата звернення: 25.12.2025).

64. In-Network computation of the optimal weighting matrix for distributed consensus on wireless sensor networks / X. Insausti et al. *Sensors*. 2017. Vol. 17, № 8. URL: <https://doi.org/10.3390/s17081702> (дата звернення: 26.12.2025).

65. Deep learning-based intelligent measurement methods and system for CMM / Z.-Y. Cheng et al. *Measurement*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113474> (дата звернення: 25.12.2025).

66. Kendall A., Gal Y. What Uncertainties Do We Need in Bayesian Deep Learning for Computer Vision? *arXiv preprint arXiv:1703.04977*. 2017. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.04977> (дата звернення: 24.12.2025).

67. A federated learning and deep reinforcement learning-based method with two types of agents for computation offload / S. Liu et al. *Sensors*. 2023. Vol. 23, № 4. URL: <https://doi.org/10.3390/s23042243> (дата звернення: 23.12.2025).

68. An anomaly node detection method for wireless sensor networks based on deep metric learning with fusion of spatial-temporal features / Z. Wang et al. *Sensors*. 2025. Vol. 25, № 10. URL: <https://doi.org/10.3390/s25103033> (дата звернення: 24.12.2025).

69. Dong R.-H., Yan H.-H., Zhang Q.-Y. An Intrusion Detection Model for Wireless Sensor Network Based on Information Gain Ratio and Bagging Algorithm. *International Journal of Network Security*. 2020. Vol. 22, № 2. P. 218-230.

70. Тарасенко Я.В., Червотока О.В. Деякі аспекти когнітивної обробки результатів лабораторних випробувань. *Проблемні питання застосування технологій штучного інтелекту в науці та обороні: збірник тез доповідей І науково-практичної конференції* (м. Київ, 30 квітня 2025 р.). 2025. С. 164-166.

71. Червотока О.В., Тарасенко Я.В. Метод когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань у сенсорних мережах лабораторних випробувань. *Наукові праці ВНТУ*. 2025. № 4. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-4-39-45> (дата звернення: 05.01.2026).

72. Elmenreich W. Fusion of continuous-valued sensor measurements using confidence-weighted averaging. *Journal of vibration and control*. 2007. Vol. 13, № 9-10. P. 1303-1312.

73. Dynamic reconfiguration of smart sensors: a semantic web based approach / S. Sagar et al. *IEEE sensors journal*. 2020. Vol. 20, № 3. P. 1619-1629.

74. A model of a secure information system for cognitive data processing in IoT sensor networks for laboratory climatic testing / Ya. Tarasenko et al. *CEUR WS*. 2025. Vol. 4042. P. 90-104.

75. Yu Y., Yan Y., Jin Y. Structural knowledge: from brain to artificial intelligence. *Artificial Intelligence Review*. 2025. Vol. 58, № 9. URL: <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11270-2> (дата звернення: 01.12.2025).

76. Карпунін І., Зінченко Н. Когнітивне моделювання інтелектуальних систем аналізу фінансового стану суб'єкта господарювання. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2023. Том 1, № 21. С. 75-85.

77. Towards semantic sensor data: an ontology approach / J. Liu et al. *Sensors*. 2019. Vol. 19, № 5. URL: <https://doi.org/10.3390/s19051193> (дата звернення: 02.12.2025).

78. Uncertainty propagation in the Internet of Things / S. Pal et al. *Discover Internet of Things*. 2024. Vol. 4, № 1. URL: <https://doi.org/10.1007/s43926-024-00085-2> (дата звернення: 14.12.2025).

79. D2.2 uncertainty-aware sensor fusion in sensor networks / M. Gruber et al. *SMSI 2021, digital*, 3-6 May 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.5162/smsi2021/d2.2> (дата звернення: 02.12.2025).

80. Szczodrak M., Gnawali O., Carloni L.P. Dynamic reconfiguration of wireless sensor networks to support heterogeneous applications. 2013 *IEEE international conference on distributed computing in sensor systems (DCOSS)*, Cambridge, MA, USA, 20-23 May 2013. 2013. URL: <https://doi.org/10.1109/dcoss.2013.21> (дата звернення: 02.12.2025).

81. Червотока О.В., Квасніков В.П. Інтелектуальна інформаційно-вимірювальна система на основі адаптивно-реконфігурованої сенсорної мережі для лабораторних випробувань. *Збірник наукових праць ОДАТРЯ*. 2025. № 2 (27). С. 95-101.

82. An adaptive topology management scheme to maintain network connectivity in wireless sensor networks / M.Z.U. Haq et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, № 8. URL: <https://doi.org/10.3390/s22082855> (date of access: 29.11.2025).

83. Tarasenko Ya., Orlov S., Chervotoka O., Dmitriiev O., Lada N., Osadchyi S. Model of intelligent protection for temperature-based transmitting channels in laboratory sensor networks with embedded information processing. *CEUR WS*. 2025. Vol. 4126. P. 159-170. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.20382882>

84. Vasylenko O., Ivchenko S., Snizhnoi H. Design of information and measurement systems within the Industry 4.0 paradigm. *Radioelectronic and computer systems*. 2023. № 1. P. 45-54.

85. Edge intelligence through in-sensor and near-sensor computing for the artificial intelligence of things / Y. Baek et al. *Npj unconventional computing*. 2025. Vol. 2, № 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s44335-025-00040-6> (дата звернення: 22.12.2025).

86. Kuo C.-H., Siao J.-W. Petri net based reconfigurable wireless sensor networks for intelligent monitoring systems. 2009 *International conference on computational science and engineering*, Vancouver, BC, Canada, 29-31 August 2009. 2009. URL: <https://doi.org/10.1109/cse.2009.252> (дата звернення: 15.11.2025).

87. Генерація послідовності несиметричних СЕТ-операцій з точністю до перестановки другого операнда / В. Рудницький та ін. *Інформаційні технології та суспільство*. 2025. № 1 (16). С. 221-226.

88. Rana M., Mamun Q., Islam R. Lightweight cryptography in IoT networks: a survey. *Future generation computer systems*. 2022. Vol. 129. P. 77-89.

89. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2018. Невизначеність вимірювань. Частина 3. Настанова щодо подання невизначеності у вимірюванні (GUM:1995) (ISO/IEC Guide 98-3:2008, IDT). [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 123 с.

90. Farrance I., Frenkel R. Uncertainty of measurement: a review of the rules for calculating uncertainty components through functional relationships. *The Clinical Biochemist Reviews*. 2012. Vol. 33(2). P. 49-75.

91. Systematic errors and measurement uncertainty: An experimental approach / F. Attivissimo et al. *Measurement*. 2011. Vol. 44, № 9. P. 1781-1789.

92. Khan M.N., Lee S., Shah M. Adaptive scheduling in cognitive IoT sensors for optimizing network performance using reinforcement learning. *Applied sciences*. 2025. Vol. 15, № 10. URL: <https://doi.org/10.3390/app15105573> (дата звернення: 17.12.2025).

93. Wang X., Chen H., Li S. A reinforcement learning-based sleep scheduling algorithm for compressive data gathering in wireless sensor networks. *EURASIP journal on wireless communications and networking*. 2023. Vol. 2023, № 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s13638-023-02237-4> (дата звернення: 27.12.2025).

94. Reconfigurable sensing time in cooperative cognitive network using machine learning / N. Gul et al. *Computers, materials & continua*. 2023. Vol. 74, № 3. P. 5209-5227.

ДОДАТКИ

**ДОКУМЕНТИ, ЯКІ ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. ректора Черкаського національного
університету імені Богдана Хмельницького

Микола РУДЕНКО

2026 р.

**про впровадження матеріалів дисертаційного дослідження
Червотоки Олега Вікторовича в навчальний процес
Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького**

Результати дисертаційної роботи, одержані здобувачем освітньо-наукового рівня доктора філософії Червотоки О.В. використано кафедрою інформаційних технологій в освітньому процесі при викладанні обов'язкових та вибірових освітніх компонентів "Проектування та розробка IoT", "Вбудовані системи збору та обробки даних" та "Обробка інформації в режимі реального часу" здобувачам вищої освіти рівнів бакалавра та магістра усіх форм навчання.

До лекційних курсів включено такі результати, одержані автором:

1. Метод інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань – в освітньому компоненті "Вбудовані системи збору та обробки даних" у частині організації збору вимірювальної інформації, граничної обробки даних на сенсорних вузлах, зниження впливу метрологічного шуму та аномалій.

2. Метод когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань – в освітньому компоненті "Обробка інформації в режимі реального часу" у частині циклічної обробки вимірювальної інформації, когнітивного агрегування, онтологічної інтерпретації результатів та організації замкненого інформаційно-вимірювального циклу.

3. Архітектурно-алгоритмічні та системотехнічні рішення інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи лабораторних випробувань – в освітньому компоненті "Проектування та розробка IoT" у частині побудови архітектури сенсорних мереж, проектування адаптивних IoT-систем, організації інформаційних потоків, реконфігурації сенсорної мережі.

Впровадження зазначених результатів у навчальний процес дозволило: підвищити змістовність і сучасний науково-методичний рівень викладання вказаних освітніх компонентів, розширити матеріал курсів сучасними підходами до побудови інформаційно-вимірювальних технологій, сенсорних мереж, інтелектуального вимірювання та когнітивної обробки.

В.о. зав. кафедри ІТ, к.т.н.

Богдан МИСНИК

Доцент кафедри ІТ, к.т.н.

Тетяна СТАБЕЦЬКА

Викладач кафедри ІТ, д.т.н., доц.

Ярослав ТАРАСЕНКО

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ "МОРОЗ ТЕХ"


Роман МОРОЗ

"11" березня 2026 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційного дослідження
Червотоки Олега Вікторовича
на ТОВ "МОРОЗ ТЕХ"

Для удосконалення інформаційно-вимірювального супроводу технологічних процесів, розвитку процедур контролю та розширення можливостей адаптивної організації вимірювальних контурів на ТОВ "МОРОЗ ТЕХ" у практичну діяльність впроваджено одержані в дисертаційному дослідженні Червотоки Олега Вікторовича наукові результати, а саме удосконалену модель когнітивної реконфігурації сенсорної мережі. Зокрема, практичне впровадження отримали:

- структурно-функціональні механізми інтеграції процедур інтелектуального вимірювання, когнітивної обробки, прийняття рішень та реконфігурації вимірювальних контурів;
- структурно-логічні та системотехнічні рішення інформаційно-вимірювального супроводу технологічних процесів.

Практичне використання одержаних у дисертаційній роботі наукових результатів дозволило підвищити якість організації інформаційно-вимірювального супроводу технологічних процесів, забезпечити узгоджене функціонування вимірювальних контурів і сформуванню основу для застосування адаптивних підходів до обробки, інтерпретації та використання результатів вимірювань.

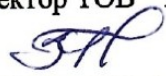
Вищезазначені наукові результати впроваджені у структурно-логічному та системотехнічному вигляді як основа інтеграції інтелектуальної складової в інформаційно-вимірювальні контури підприємства.

Директор

Роман МОРОЗ



ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ "МОРОЗ ТЕХ"


Роман МОРОЗ

"11" березня 2026 р.

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційного дослідження
Червотоки Олега Вікторовича
на ТОВ "МОРОЗ ТЕХ"**

На ТОВ "МОРОЗ ТЕХ" з метою підвищення ефективності контролю якості, об'єктивності оцінювання контрольованих параметрів та покращення обробки вимірювальної інформації було використано наукові результати, одержані Червотокою Олегом Вікторовичем у дисертаційному дослідженні. Використано метод інтелектуального вимірювання та метод когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань. Застосовано технічну реалізацію:

- алгоритмічного забезпечення блоку інтелектуального вимірювання;
- алгоритмічного забезпечення блоку когнітивної обробки.

Використання зазначених наукових результатів дало можливість підвищити об'єктивність оцінювання контрольованих параметрів, покращити якість первинної та вторинної обробки вимірювальної інформації, а також розширити можливості застосування інтелектуальних процедур аналізу для прийняття контрольних і коригувальних рішень.

Вказані наукові результати реалізовані у вигляді алгоритмічного забезпечення для оцінювання параметрів та обробки вимірювальної інформації у системах виробничого контролю та системах підтримки прийняття рішень.

Директор

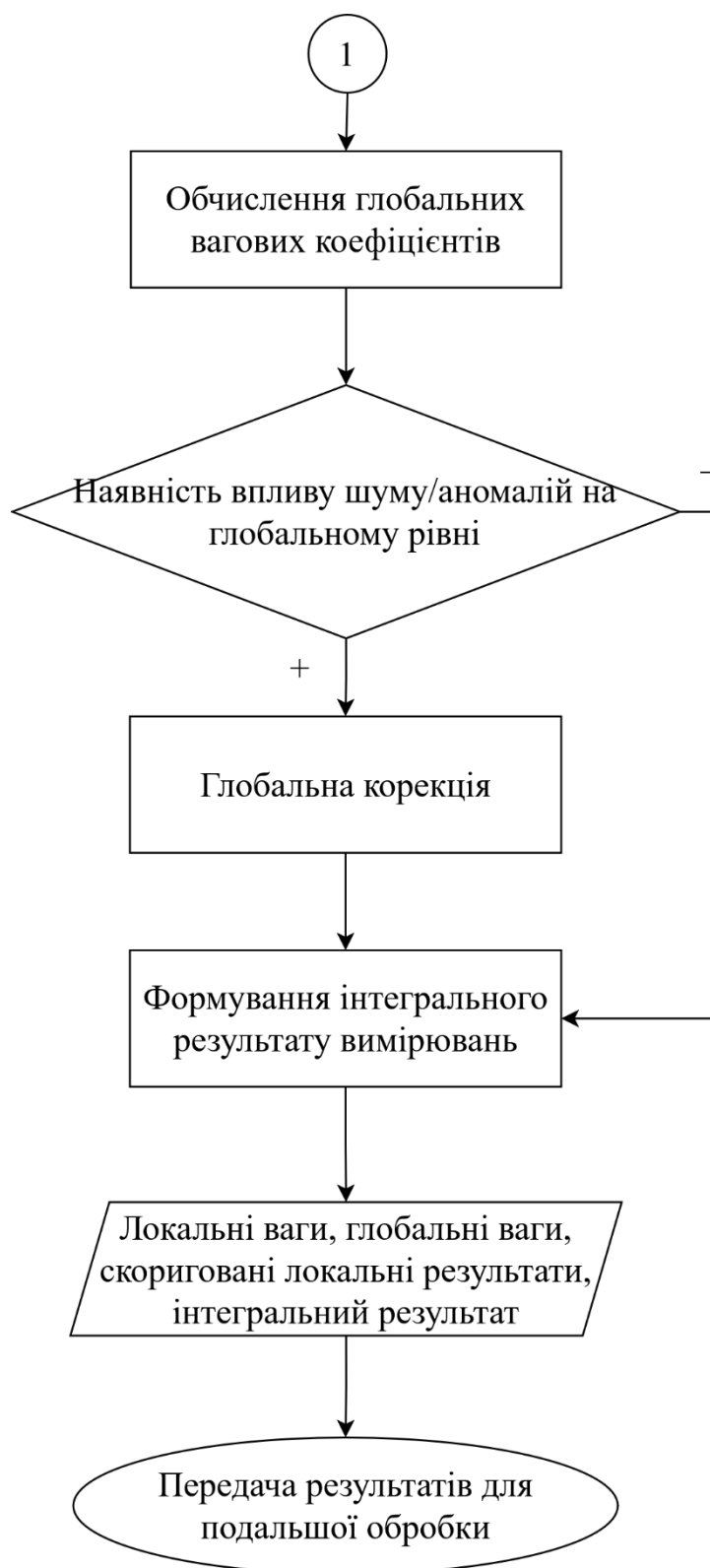


Роман МОРОЗ

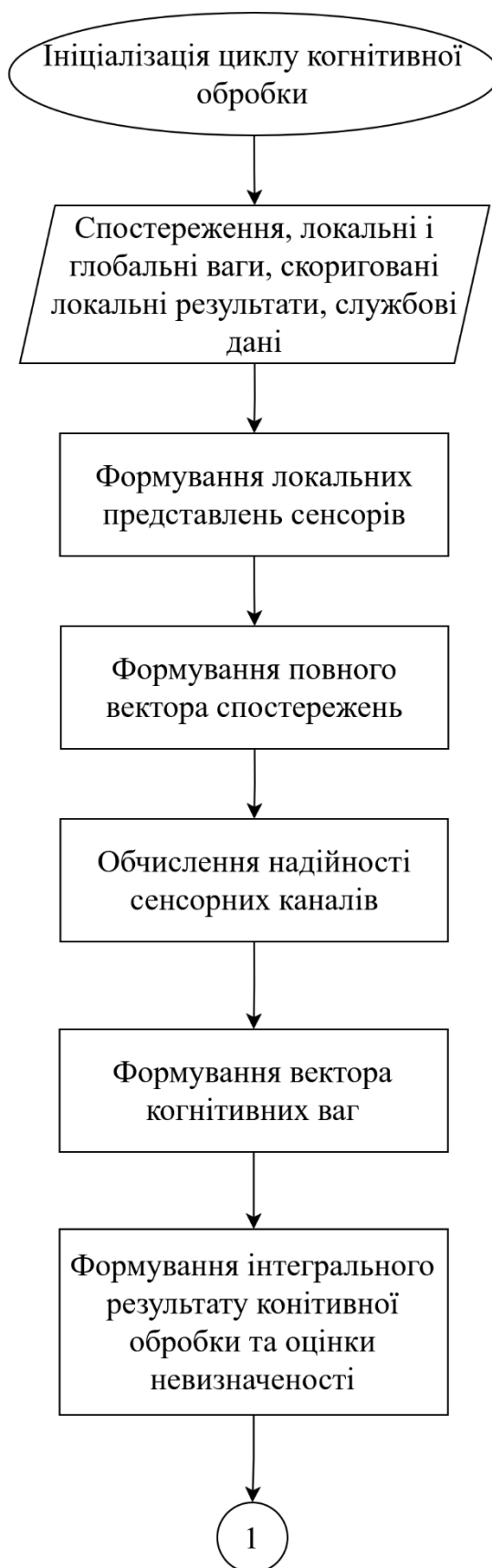
АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ

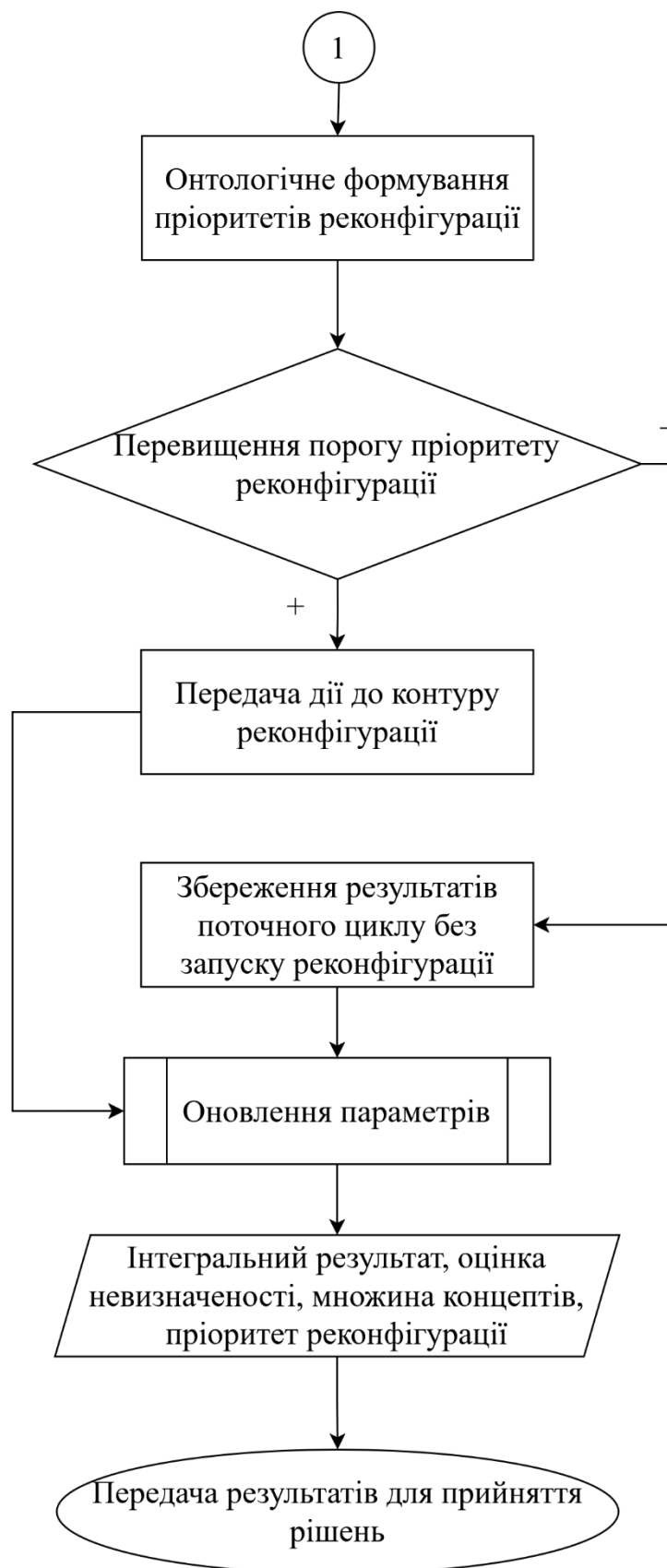
Алгоритм роботи методу інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань





Алгоритм роботи методу когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань в сенсорних мережах лабораторних випробувань





**ДЕТАЛІЗОВАНІ ІНЖЕНЕРНІ СХЕМИ СЦЕНАРІЇВ НАТУРНОГО
СТЕНДОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ**

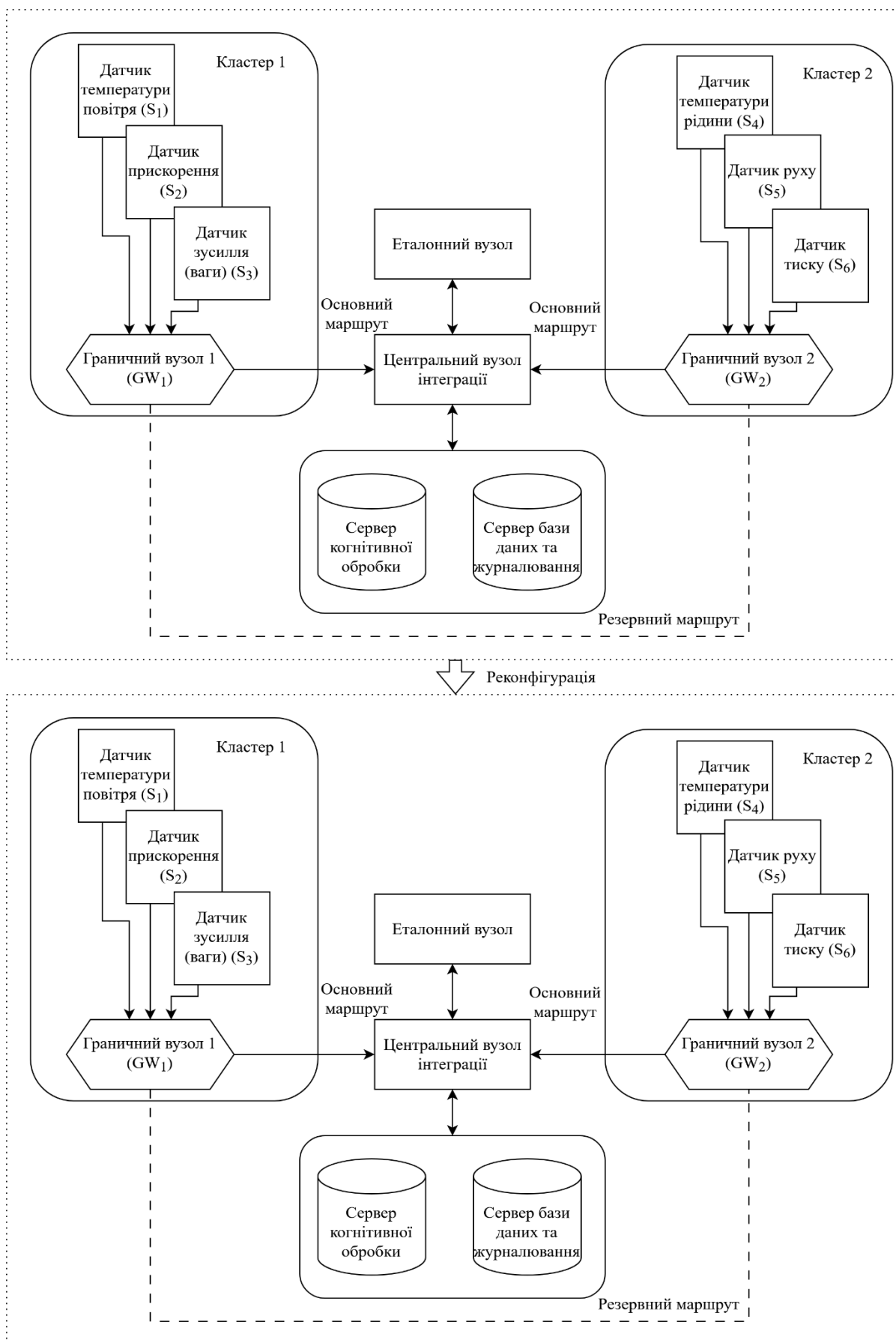


Рисунок В.1 – Деталізована інженерна схема сценарію 1 (штатний режим функціонування стенду)

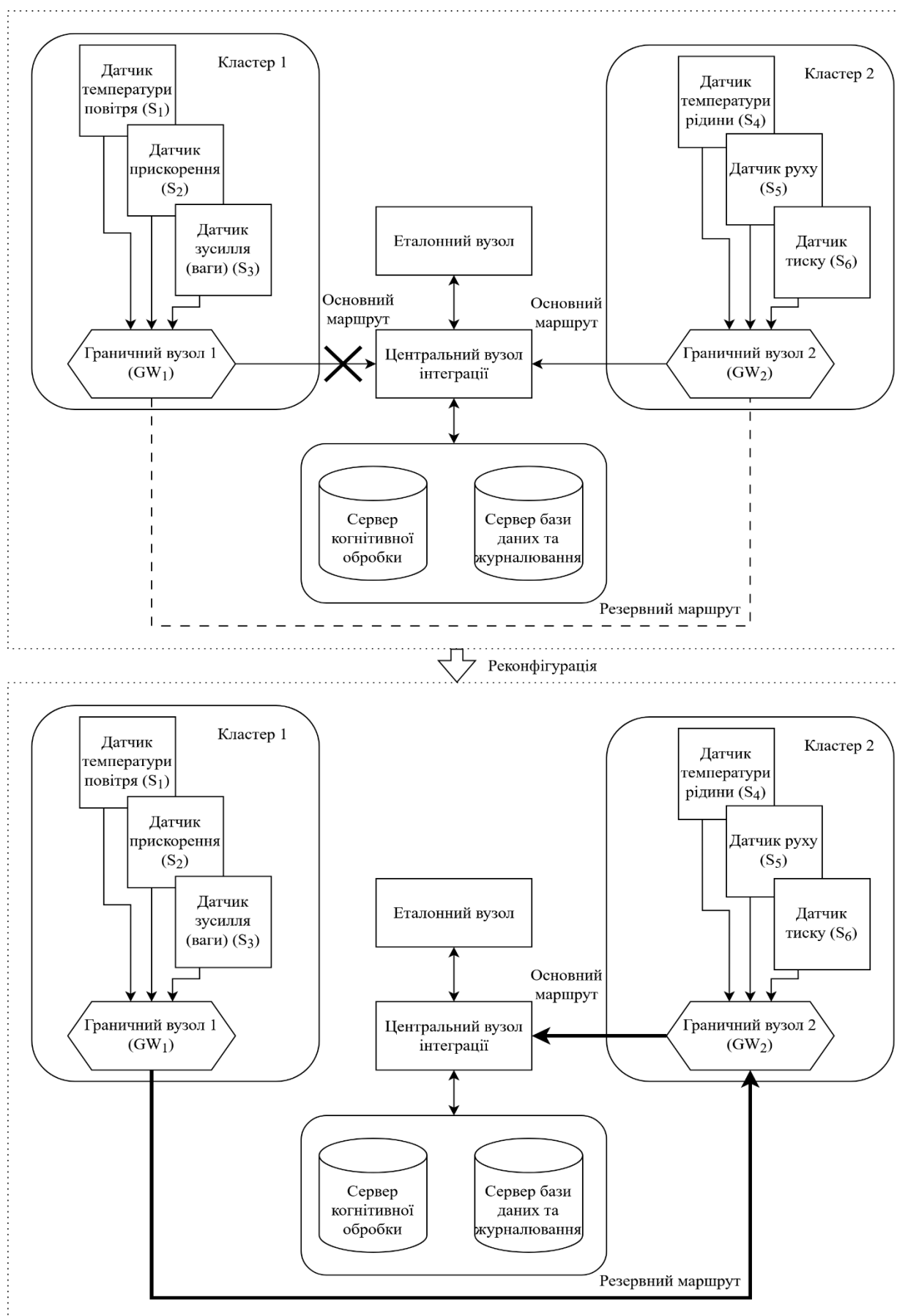


Рисунок В.2 – Деталізована інженерна схема сценарію 2 (втрата основного каналу зв'язку)

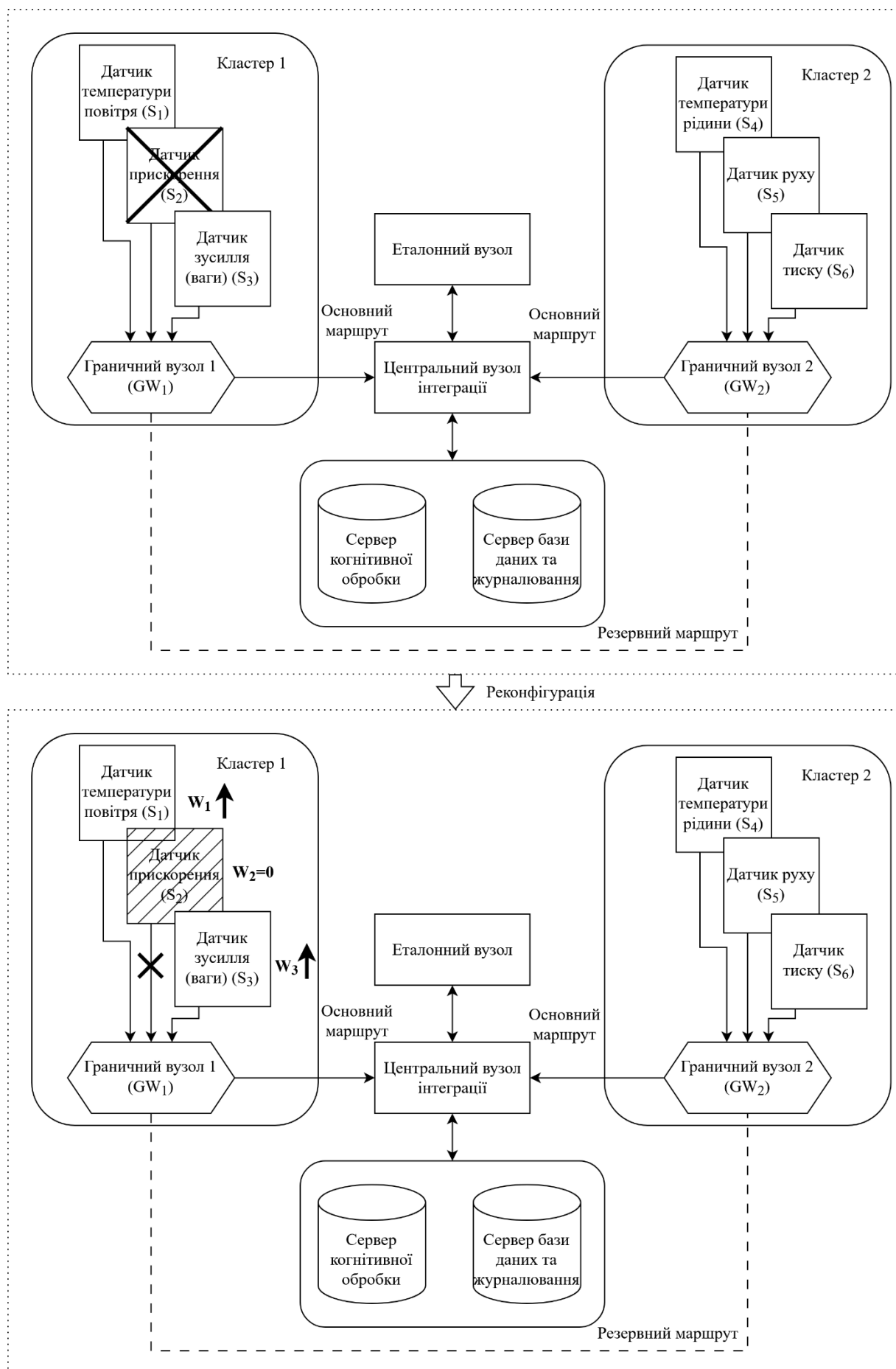


Рисунок В.3 – Деталізована інженерна схема сценарію 3 (відмова сенсорного вузла)

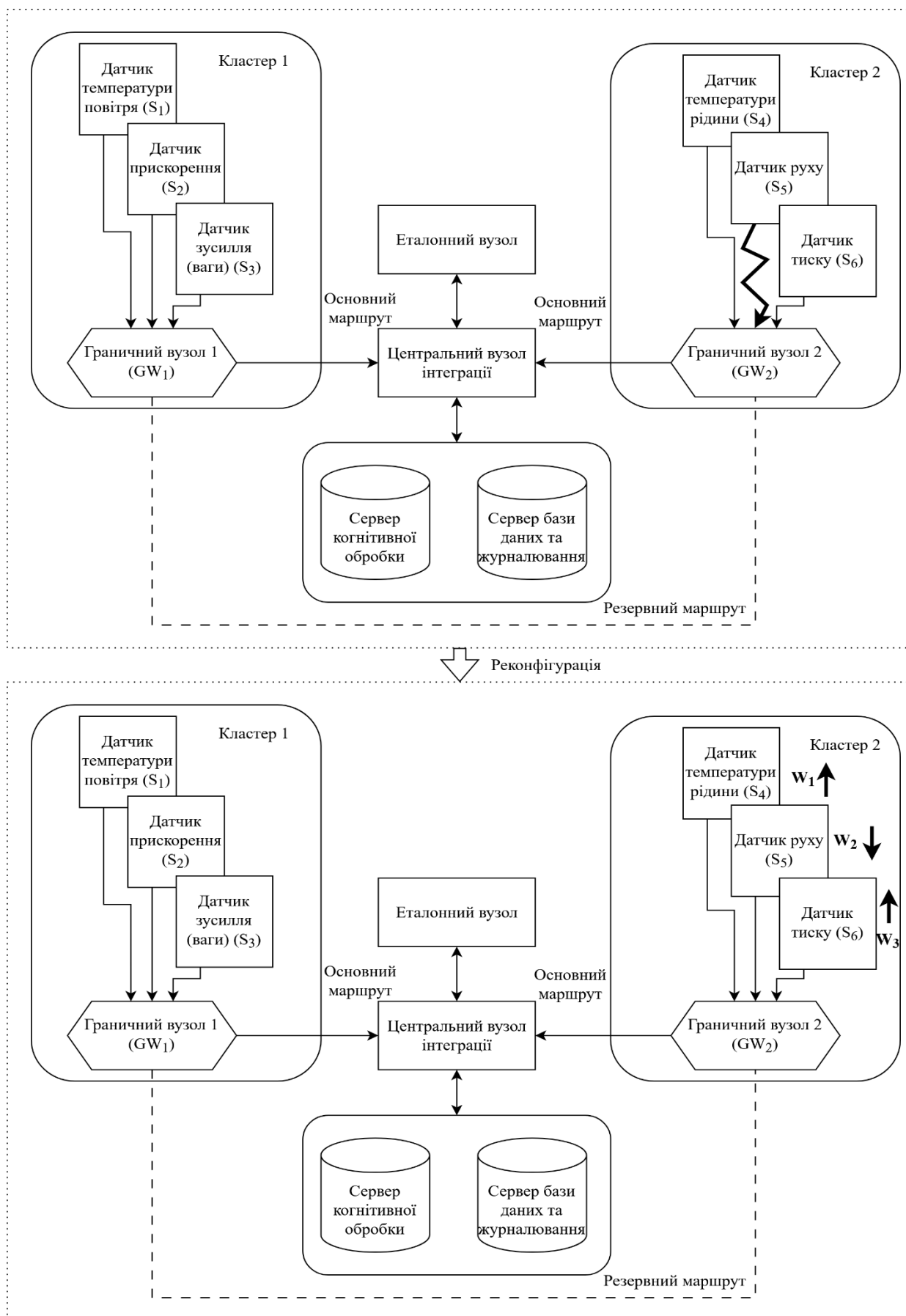


Рисунок В.4 – Деталізована інженерна схема сценарію 4 (аномальна поведінка сенсора)

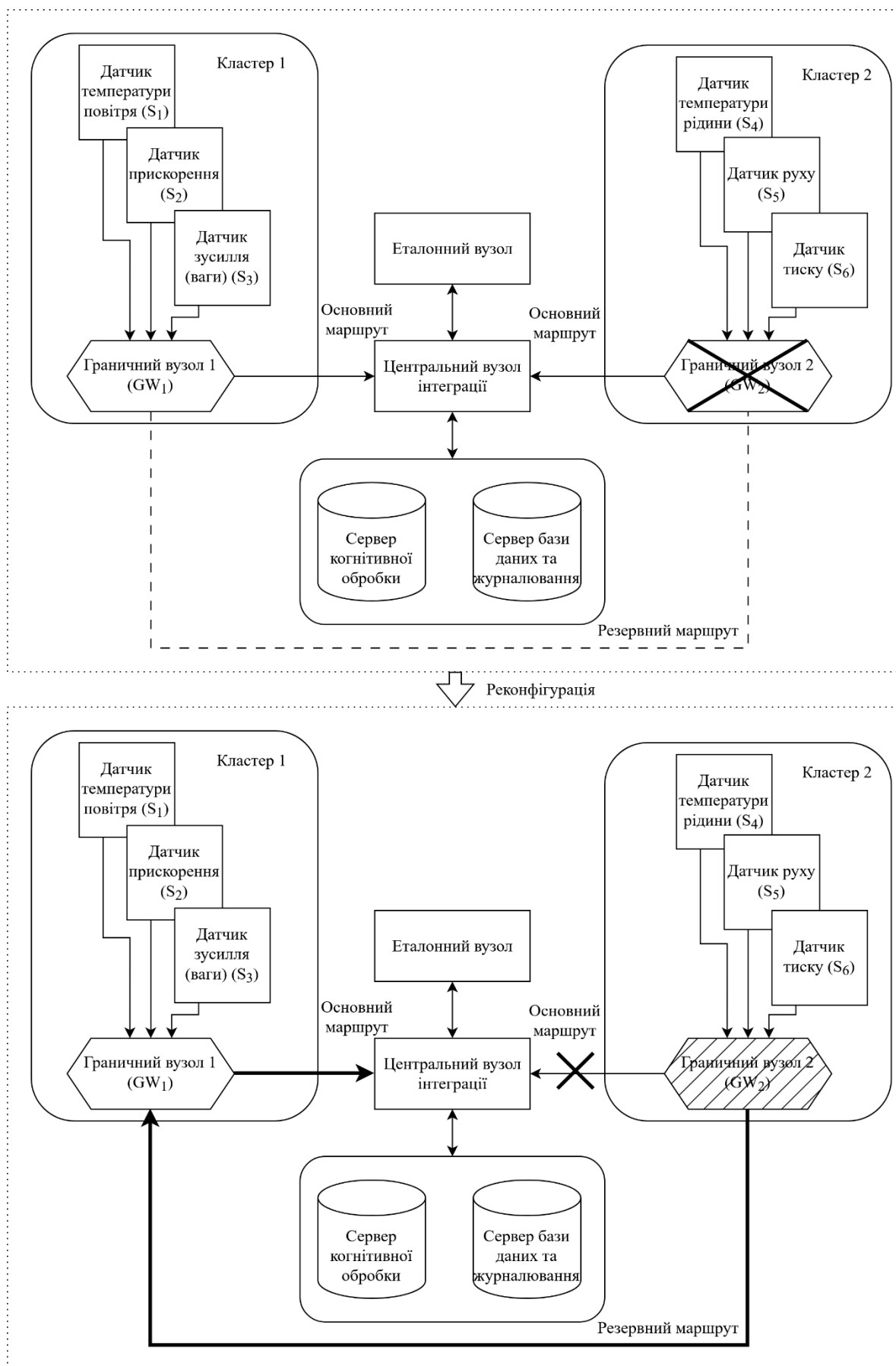


Рисунок В.5 – Деталізована інженерна схема сценарію 5 (порушення роботи граничного вузла / шлюзу)

**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ**

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України (категорія “Б”)

1. Червотока О.В., Тарасенко Я.В. Метод інтелектуального вимірювання в сенсорних мережах лабораторних випробувань. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2025. № 84(4). С. 99-106. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-12>

2. Червотока О.В., Тарасенко Я.В. Метод когнітивної обробки результатів інтелектуальних вимірювань у сенсорних мережах лабораторних випробувань. *Наукові праці ВНТУ*. 2025. № 4. DOI: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-4-39-45>

3. Червотока О.В., Квасніков В.П. Інтелектуальна інформаційно-вимірювальна система на основі адаптивно-реконфігурованої сенсорної мережі для лабораторних випробувань. *Збірник наукових праць ОДАТРЯ*. 2025. № 2 (27). С. 95-101. DOI: <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2025-2-27-95-101>

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus

1. Tarasenko Ya., Chervotoka O., Orlov S., Lada N., Shapoval V., Piskozub A. A model of a secure information system for cognitive data processing in IoT sensor networks for laboratory climatic testing. *CEUR WS*. 2025. Vol. 4042. P. 90-104. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17501341>

2. Tarasenko Ya., Orlov S., Chervotoka O., Dmitriiev O., Lada N., Osadchyi S. Model of intelligent protection for temperature-based transmitting channels in laboratory sensor networks with embedded information processing. *CEUR WS*. 2025. Vol. 4126. P. 159-170. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.20382882>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Chervotoka O.V., Tarasenko Ya.V., Zaetz I.I. Prospects for the use of Internet of Things technology in the process of laboratory vibration tests of military UAVs.

Актуальні проблеми військово-технічної політики та напрями озброювання Збройних Сил України в умовах воєнного стану: збірник тез доповідей X міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 04-05 грудня 2024 р.). 2024. С. 347-348.

2. Тарасенко Я.В., Червотока О.В. Деякі аспекти когнітивної обробки результатів лабораторних випробувань. *Проблемні питання застосування технологій штучного інтелекту в науці та обороні: збірник тез доповідей I науково-практичної конференції (м. Київ, 30 квітня 2025 р.). 2025. С. 164-166.*

3. Червотока О.В., Тарасенко Я.В. Проблеми граничних обчислень в інтелектуальних сенсорних системах лабораторних вимірювань. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси: збірник тез доповідей XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 20-21 травня 2025 р.). 2025. С. 184-185.*

4. Орлов С.В., Червотока О.В., Геращенко М.О. Наукові протиріччя та шляхи оптимізації лабораторних випробувань роботизованих пристроїв та безпілотних літальних апаратів. *Випробування і сертифікація озброєння та військової техніки: збірник тез доповідей XXV науково-технічної конференції Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (м. Черкаси, 25 вересня 2025 р.). 2025. С. 516-517.*

5. Chervotoka O.V., Tarasenko Ya.V. Regulatory and standards support for the application of intelligent information and measurement technology. *Scientific Research in XXI Century: the Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference (Ottawa, November 16-18, 2025). Ottawa, Canada. P. 186-187.*

Апробація результатів дисертаційної роботи

№ з/п	Тип конференції	Назва конференції	Місце і дата проведення	Тип участі
1.	Міжнародна науково-технічна конференція	Актуальні проблеми військово-технічної політики та напрями озброювання Збройних Сил України в умовах воєнного стану	Київ, 04-05.12.2024	заочна
2.	Всеукраїнська науково-практична конференція	Проблемні питання застосування технологій штучного інтелекту в науці та обороні	Київ, 30.04.2025	очна
3.	Міжнародна науково-практична конференція	Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси	Київ, 20-21.05.2025	дистанційна
4.	Всеукраїнська науково-технічна конференція	Випробування і сертифікація озброєння та військової техніки	Черкаси, 25.09.2025	очна
5.	International Scientific and Practical Conference	Scientific Research in XXI Century	Оттава, 16-18.11.2025	дистанційна
6.	Workshop	Cyber security and data protection	Львів, 31.07.2025	очна
7.	International Workshop	Applied Intelligent Security Systems in Law Enforcement	Вінниця, 30-31.10.2025	очна