

ПАНОВИК Уляна

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-9663-4328>

e-mail: uliana.p.panovyk@lpnu.ua

ГІДЕЙ Роман

Національний університет «Львівська політехніка»

e-mail: roman.v.hidei@lpnu.ua

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ АГРЕГАЦІЇ ТА ОБРОБКИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В АВТОМАТИЗОВАНИХ МЕТРОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ

У статті розглянуто математичну модель процесу агрегації вимірювальної інформації в автоматизованих метрологічних системах моніторингу. Запропоновано формалізований підхід до об'єднання даних із різномірних сенсорів з урахуванням їх метрологічних характеристик, таких як точність, повторюваність, своєчасність та репрезентативність. Введено інтегральний показник якості агрегованої інформації, який дає можливість кількісно оцінити вірогідність оброблених результатів та приймати рішення про їх подальше використання. Представлено структуровану схему алгоритму агрегації, розроблено адаптивну модель вагових коефіцієнтів і виконано аналітичне моделювання впливу ключових параметрів на загальну якість інформації. Отримані результати можуть бути використані для побудови надійних та інтелектуальних систем контролю технологічних процесів у промисловому середовищі.

Ключові слова: агрегація даних, математичне моделювання, метрологічна інформація, автоматизовані системи моніторингу, показник якості, адаптивне зважування, вірогідність даних.

PANOVYK Ulyana, HIDEI Roman

Lviv Polytechnic National University

MATHEMATICAL MODELING OF AGGREGATION AND PROCESSING OF MEASUREMENT DATA IN AUTOMATED METROLOGICAL MONITORING SYSTEMS

The article presents a comprehensive mathematical model for the aggregation and processing of measurement data within automated metrological monitoring systems. It addresses the challenges of synthesizing heterogeneous data streams from various sensors, emphasizing the necessity to maintain key metrological characteristics such as accuracy, repeatability, timeliness, and representativeness. To achieve this, the study introduces a formalized, multi-stage aggregation algorithm that includes preprocessing, normalization, adaptive weighting, and validation stages. This structure ensures the algorithm can dynamically adjust to varying quality and availability of input data, thus improving the robustness and scalability of real-time monitoring applications.

A central component of the model is the introduction of an integral quality indicator, designed to evaluate both the reliability and the practical usability of aggregated data. This indicator supports real-time decision-making by highlighting deviations in input quality and triggering appropriate aggregation responses. A novel feature of the model is the adaptive weighting mechanism, which modulates the contribution of each sensor's data based on its individual quality profile. This enables the system to prioritize high-quality sources while down-weighting or even excluding unreliable ones.

The model's effectiveness is validated through analytical simulations under several hypothetical but realistic scenarios, such as degradation in precision, delayed transmission, and incomplete data sampling. These case studies illustrate how the integral quality indicator reacts to various disruptions and guides the system's response to maintain optimal data fusion. The proposed approach enhances the trustworthiness and resilience of metrological systems, making it particularly suitable for deployment in Industry 4.0 environments, where the ability to integrate diverse sensor inputs in real time is critical. Furthermore, the model facilitates the early detection of faulty data sources and supports automated reconfiguration of the aggregation logic, thereby increasing operational efficiency and decision support capabilities.

Keywords: data aggregation, mathematical modeling, metrological systems, measurement quality, automated monitoring, adaptive weighting, reliability assessment, industrial data processing.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 04.05.2025

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

У сучасних умовах розвитку автоматизованих систем управління та контролю технологічних процесів однією з ключових компонент забезпечення їх ефективності є якісна обробка вимірювальної інформації. Зростання обсягів даних, що надходять від великої кількості сенсорів і вимірювальних пристроїв у режимі реального часу, створює нові виклики для метрологічного супроводу виробництва, особливо в контексті інтеграції в цифрове середовище. У системах моніторингу важливо не лише здійснювати збір параметрів, але й гарантувати їхню точність, актуальність, повноту та узгодженість для подальшого використання в алгоритмах прийняття рішень. Недостатньо обґрунтовані або надлишкові масиви інформації

можуть ускладнити процеси аналізу, призвести до спотворення висновків або до перевантаження інформаційно-технічної інфраструктури.

В умовах автоматизованого виробництва метрологічні системи стикаються з необхідністю об'єднання даних, що надходять із різномірних джерел, мають відмінні метрологічні характеристики, частоту оновлення, ступінь довіри та інформативність. Зростання складності вимірювального середовища зумовлює потребу у впровадженні формалізованих підходів до агрегації інформації, що дають можливість інтегрувати різномірні сигнали в структуровані набори даних для подальшої обробки. Водночас важливо зберегти метрологічно-значущі властивості первинної інформації, мінімізуючи втрати точності та спотворення контексту [5].

На тлі швидкої еволюції технологій обробки даних, включно з застосуванням машинного навчання, предикативної аналітики та систем з адаптивним управлінням, математичне обґрунтування процесу агрегації набуває особливої актуальності. Це обґрунтування має базуватися не лише на структурній сумісності даних, але й на кількісних критеріях якості інформації. Отже, постає завдання розроблення математичної моделі агрегації вимірювальної інформації, яка враховувала б основні метрологічні аспекти – точність, своєчасність, повноту та репрезентативність. Такий підхід дасть змогу створити уніфікований механізм формування цілісного інформаційного потоку в автоматизованих метрологічних системах моніторингу та сприятиме підвищенню їх вірогідності, адаптивності та ефективності в умовах реального виробництва.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

В умовах ускладнення технологічних процесів та переходу до автоматизованих форм управління підвищується значення точного збору, агрегації та обробки вимірювальної інформації. Актуальність завдання підтверджується результатами сучасних наукових досліджень, присвячених проблематиці метрологічного супроводу, формалізації вимог до даних, а також підвищенню ефективності систем моніторингу. Забезпечення точності та достовірності вимірювальної інформації в автоматизованих системах регламентується рядом нормативних документів, серед яких ключову роль відіграє ДСТУ 4134-2002 [2]. Стандарт встановлює вимоги до вимірювальних каналів у системах автоматизованого управління, окреслюючи принципи структурованої передачі, контролю точності та уніфікації даних, що безпосередньо пов'язано з формалізацією агрегаційних процесів. Поглиблення методичних підходів демонструє робота [3], у якій розглянуто особливості адаптивної агрегації сенсорних даних у контексті екологічного моніторингу, з урахуванням часових характеристик і метрологічної достовірності інформації.

Питання формалізації та нормалізації вимірювальних потоків докладно розкрито в посібнику [4], де описано засоби обробки даних у комп'ютерно-інтегрованих системах технічної діагностики. Зі схожих позицій підходить дослідження, присвячене автоматизованому метрологічному забезпеченню цифрових приладів, у якому акцентовано роль інформаційних технологій в об'єднанні даних із множини джерел у режимі реального часу [1]. В іноземних публікаціях, зокрема, у [9] розглядаються сучасні методи автоматизації в сенсорній метрології, включаючи способи злиття розподіленої інформації з урахуванням невизначеності та метрологічних параметрів.

Практичний аспект агрегації вимірювальних даних висвітлено в статті [6], де окреслено підходи до трансформації інформації у виробничі інсайти. У роботі [8] обґрунтовано, що якісна агрегація є передумовою ефективного застосування штучного інтелекту в автоматизованих середовищах. Нарешті, у матеріалі [7] наведено приклад побудови агрегованого індикатора технічного стану обладнання на основі об'єднання сенсорних сигналів, що підтверджує практичну реалізованість подібних моделей.

Аналіз зазначених джерел засвідчує значну увагу до тематики агрегації вимірювальної інформації, однак вказує на недостатню глибину математичної формалізації цього процесу. Саме тому виникає потреба в побудові уніфікованої моделі агрегації з урахуванням метрологічних характеристик, придатної для подальшого застосування в автоматизованих системах моніторингу.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є розроблення математичної моделі агрегації вимірювальної інформації в автоматизованих метрологічних системах моніторингу, яка враховує критично важливі характеристики даних, зокрема, повноту, точність, своєчасність та репрезентативність. Запропонована модель має забезпечити формалізований підхід до об'єднання вимірювальних даних із різних джерел, що надходять із різною частотою, похибкою та вірогідністю, з подальшим формуванням уніфікованого інформаційного потоку для аналітичної обробки.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

У контексті сучасних автоматизованих метрологічних систем агрегація вимірювальної інформації виступає ключовим етапом обробки, що забезпечує зменшення обсягу даних, оптимізацію обчислювальних ресурсів та підвищення якості подальшого аналізу. Під агрегацією в метрології доцільно розуміти формалізований процес об'єднання множини вимірювальних значень, отриманих із різних сенсорних каналів

або упродовж певного інтервалу часу, у скорочене представлення, яке зберігає необхідний рівень інформативності для прийняття рішень.

Цей процес передбачає не просто злиття даних, а зважене перетворення, за якого враховуються метрологічні характеристики джерел інформації, параметри точності, допустимі відхилення, стабільність сигналу та часові інтервали вимірювань. Метою агрегації є досягнення балансу між компактністю результату та збереженням суттєвих ознак вимірюваної величини. Крім зменшення обсягу інформації, завданням є підтримка репрезентативності даних, тобто їхньої здатності відображати реальний стан контролюваного процесу, навіть у випадках часткової втрати, шуму чи нестабільної генерації значень.

До основних цілей агрегації вимірювальних даних належать:

- Зменшення обсягу даних – оптимізація передачі та зберігання інформації, особливо в розподілених системах.
- Збереження інформативності – максимальне наближення агрегованих значень до характеристик повного набору вимірів.
- Компенсація похибок і шумів – зменшення впливу одиничних збурень, відхилень або нестабільної поведінки сенсорів.
- Уніфікація структури даних – підготовка інформації до подальшої обробки або виводу в єдиний формат.

Процес агрегації не може бути ефективним без урахування базових метрологічних характеристик, які визначають якість кожного етапу: від збору до подання результату. Найважливішими характеристиками, що мають бути інтегровані в агрегаційні алгоритми, є:

- Точність – ступінь наближеності результату вимірювання до істинного значення. Визначає коректність даних і впливає на вагу кожного елемента в об'єднаному потоці.
- Повторюваність – здатність системи відтворювати близькі результати за однакових умов. Відображає стабільність джерела вимірювання.
- Своєчасність – відповідність часової структури даних допустимому інтервалу оновлення інформації. Забезпечує оперативність реагування на зміну параметрів.
- Репрезентативність – здатність підмножини даних або агрегованого значення відображати характеристики повного набору вимірів або об'єкта спостереження.

Ці характеристики мають бути враховані не лише в контексті оцінки окремого сенсорного модуля, а й на рівні всієї інформаційної підсистеми, оскільки саме їхнє узгоджене функціонування визначає ефективність та надійність агрегованих даних у метрологічній системі (табл. 1).

Таблиця 1

Ключові метрологічні характеристики в агрегації вимірювальної інформації

Характеристика	Опис	Вплив на агрегацію
Точність	Відхилення між результатом вимірювання та істинним значенням	Визначає вагу значень у підсумковій функції агрегації
Повторюваність	Стабільність результатів за однакових умов вимірювання	Дає змогу фільтрувати нестабільні сигнали
Своєчасність	Відповідність даних заданому часовому вікну	Забезпечує актуальність об'єднаної інформації
Репрезентативність	Ступінь відображення повної вибірки чи стану об'єкта в агрегованому вигляді	Дає змогу зменшити обсяг без втрати змісту

У типових метрологічних системах автоматизованого моніторингу вимірювальна інформація надходить із різних сенсорних каналів, кожен із яких має власні характеристики: частоту оновлення, допустиму похибку, достовірність, чутливість до зовнішніх впливів. Об'єднання таких даних в уніфіковане агреговане представлення є нетривіальним завданням, що вимагає математичної формалізації структури вхідного потоку, постановки вимог до результату та введення системи обмежень, які відображають фізичні та інформаційні особливості процесу вимірювання.

Розглянемо загальний випадок, коли система отримує дані від N сенсорних каналів, кожен із яких передає множину значень $x_i(t)$, де $i=1,2,\dots,N$, а t – відмітка часу. У загальному вигляді формалізована структура вхідного потоку може бути подана у вигляді:

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)\}, \quad (1)$$

де $X(t)$ – вектор вимірюваних параметрів у момент часу t . Дані в цьому векторі можуть бути як скалярними (одновимірними), так і векторними або структурованими (наприклад, з атрибутами достовірності, джерела, типу сигналу тощо).

Метою агрегації є побудова агрегованого значення $X_a(t)$, що характеризуватиме стан об'єкта моніторингу на основі вхідних даних, з урахуванням їхньої якості, вагової значущості та метрологічних характеристик. Водночас агреговане значення має відповідати таким вимогам:

- відображати середнє або зважене уявлення про параметри системи;
- бути стабільним до поодиноких аномалій або шумових спотворень;
- забезпечувати своєчасне оновлення без критичних затримок;
- містити інформацію, достатню для подальшої обробки або візуалізації.

З огляду на це, агреговане значення доцільно визначати як зважену функцію від значень усіх каналів:

$$X_a(t) = \sum_{i=1}^N w_i(t) \cdot x_i(t), \quad (2)$$

де $w_i(t)$ – ваговий коефіцієнт, що відображає ступінь довіри до каналу i у момент часу t . Значення w_i може бути статичним (наприклад, залежним від класу точності сенсора) або динамічним (із врахуванням актуальних умов, трендів, змін характеристик).

Формалізація задачі потребує також введення обмежень, які забезпечують коректність та фізичну реалізованість процесу агрегації. До таких обмежень належать:

- нормування вагових коефіцієнтів: $\sum_{i=1}^N w_i(t) = 1$, $w_i(t) \in [0,1]$;
- допустимі інтервали часу між надходженням даних: $\Delta t_i \leq \Delta t_{max}$, $\forall i$;
- граничне значення узагальненої похибки: $\delta(X_a(t)) \leq \delta_{допустима}$;
- структурна узгодженість: усі дані мають бути приведені до одного формату, одиниць вимірювання та інтервалу часу.

Для спрощення математичного моделювання вводяться такі припущення: усі сенсорні канали працюють незалежно один від одного; похибка вимірювання є адитивною, нормально розподіленою та симетричною; дані, що надходять до моменту t , синхронізовані або приведені до уніфікованого часово-просторового представлення; кількість сенсорів N є сталою в межах кожного циклу агрегації.

Таким чином, поставлене завдання зводиться до визначення алгоритму побудови агрегованого значення $X_a(t)$ з урахуванням вагової корекції, метрологічної якості джерел та обмежень на час, формат і похибку. Для побудови формалізованої системи агрегації даних у автоматизованих метрологічних системах необхідно враховувати не лише структурну сумісність вхідних потоків, а і якість інформації, яку вони містять. Це зумовлює необхідність створення інтегральної функції якості агрегованої інформації, яка оцінює ступінь її придатності до подальшого використання у функціях моніторингу та прийняття рішень.

Зважаючи на аналіз ключових характеристик, запропонуємо таку інтегральну функцію якості агрегованої інформації:

$$I_q = w_1 \cdot C + w_2 \cdot A + w_3 \cdot T + w_4 \cdot R, \quad (3)$$

де C – повнота даних (Completeness), A – точність (Accuracy), T – своєчасність (Timeliness), R – репрезентативність (Representativeness), w_i – вагові коефіцієнти, що відображають пріоритетність кожного з параметрів відповідно до вимог конкретної системи.

Значення кожного з критеріїв нормується в інтервалі $[0;1]$ для уніфікації підходу до оцінки, а сума вагових коефіцієнтів задовольняє умову: $\sum_{i=1}^4 w_i(t) = 1$, $w_i \in [0,1]$. Призначення коефіцієнтів w_i залежить від специфіки застосування. Наприклад, у системах контролю динамічних параметрів (температура, тиск) вищий пріоритет може надаватися своєчасності, тоді як у задачах довгострокового аналізу – точності або репрезентативності. Ваги можуть бути встановлені експертно або адаптивно, з урахуванням історичних характеристик каналів.

Для забезпечення гнучкості пропонується використання моделі адаптивної вагової нормалізації, що дозволяє змінювати значення w_i залежно від оціненого стану джерела даних. Нехай q_i – поточне значення показника якості каналу (наприклад, на основі похибки, стабільності або часу затримки), тоді ваговий коефіцієнт може бути визначений як:

$$w_i = q_i / \sum_{j=1}^N q_j, \quad (4)$$

де N – кількість сенсорних каналів, а $q_i \in [\varepsilon;1]$, де ε – мінімальний поріг врахування неякісного сигналу.

Отож, ваги автоматично адаптуються до зміни якості каналів у реальному часі, посилюючи вплив достовірних джерел і зменшуючи вагу даних із порушенням метрологічних вимог. Це дозволяє сформулювати агреговане значення, що не просто усереднює інформацію, а адаптивно підлаштовується до поточних умов системи.

Важливим аспектом функціонування математичної моделі є врахування невизначеності при агрегації. Оскільки кожне значення $x_i(t)$ супроводжується похибкою δ_i , підсумкове значення $X_a(t)$ також має бути представлене з інтервалом або ймовірнісною характеристикою. Для адитивного зваженого агрегування сумарна похибка визначається як:

$$\delta_{X_a} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (w_i \cdot \delta_i)^2}. \quad (5)$$

Ця формула ґрунтується на припущенні статистичної незалежності похибок окремих каналів. За потреби можуть застосовуватись інші підходи до оцінки, наприклад, через довірчі інтервали або розподіли ймовірностей для кожного $x_i(t)$.

Щоб забезпечити формалізовану реалізацію агрегаційного алгоритму, у моделі передбачено етап перевірки допустимості значення δ_{X_a} . Якщо похибка перевищує встановлений поріг $\delta_{\text{допустима}}$, результат може бути відкинтий або позначений як ненадійний для подальшої обробки.

Ефективне функціонування автоматизованої системи моніторингу (АСМ) значною мірою залежить від здатності системи інтегрувати та інтерпретувати дані, що надходять із різномірних сенсорних джерел. Реалізація агрегації вимірювальної інформації потребує побудови чіткого алгоритму, який забезпечує послідовну обробку інформаційного потоку, враховує метрологічні характеристики джерел, синхронізацію даних у часі та структурує результати відповідно до вимог подальшої інтерпретації (рис. 1).

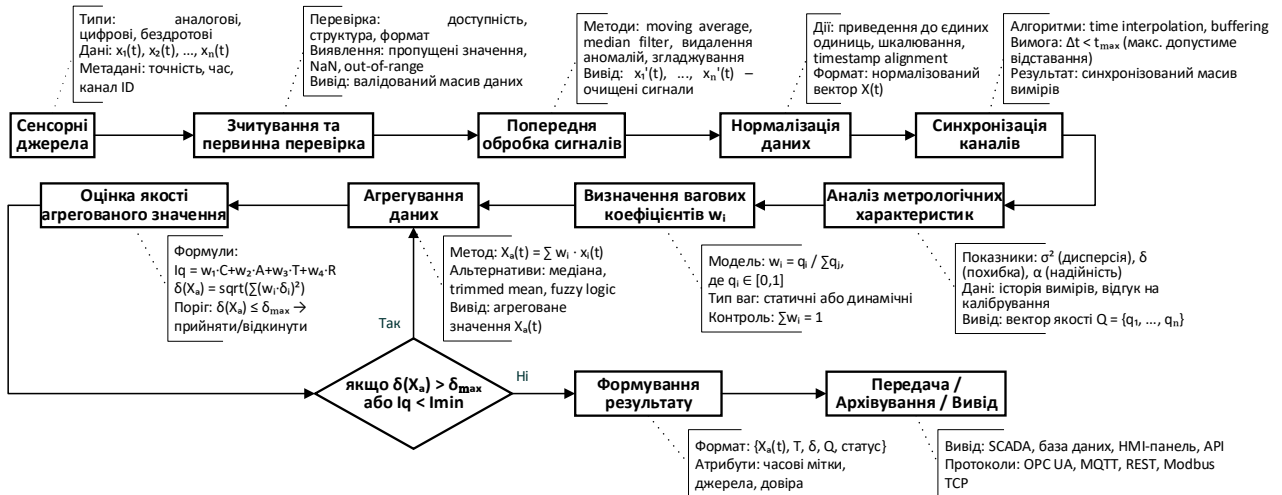


Рис. 1. Алгоритм агрегації вимірювальної інформації в АСМ

Алгоритм агрегації вимірювальної інформації в автоматизованій системі моніторингу реалізує послідовну обробку даних від сенсорних джерел до формування достовірного агрегованого результату. На початковому етапі здійснюється зчитування даних та їх первинна перевірка на доступність, цілісність і відповідність формату. Далі виконується попередня обробка сигналів, що включає фільтрацію шуму, згладжування та усунення аномалій. Отримані значення нормалізуються: приводяться до єдиних одиниць виміру, масштабу та часової шкали. Після цього дані синхронізуються в часі, усуваються затримки між каналами. На основі аналізу метрологічних характеристик (точності, стабільності, повторюваності тощо) визначається якість кожного каналу. Ця інформація використовується для обчислення вагових коефіцієнтів, які адаптуються відповідно до поточного стану джерел.

Подальший етап передбачає агрегацію – об'єднання нормалізованих даних із різних каналів за допомогою вагових коефіцієнтів. Отриманий результат оцінюється за інтегральним показником якості, який враховує повноту, точність, своєчасність і репрезентативність. Якщо похибка результату перевищує допустимі межі або інтегральний показник нижчий за мінімальний поріг, активується повторне агрегування з виключенням ненадійних джерел. У фіналі формується остаточне агреговане значення разом з атрибутами – часом вимірювання, рівнем довіри та ідентифікаторами каналів. Результати передаються або архівуються в системі моніторингу за допомогою стандартних промислових протоколів.

Розроблений алгоритм має властивості модульності, адаптивності та масштабованості, що дає можливість його впровадження як у централізованих, так і в розподілених АСМ із різним ступенем автоматизації.

Для верифікації побудованої моделі агрегації доцільно виконати аналітичне моделювання поведінки інтегрального показника якості агрегованої інформації I_q у типових сценаріях зміни вхідних параметрів. Таке моделювання дозволяє дослідити чутливість системи до факторів точності, затримки (своєчасності) та

повноти інформації, які найчастіше зазнають змін у реальних умовах функціонування автоматизованих систем моніторингу.

Розглянемо чотири типові ситуації, для яких інтегральний показник якості було визначено за формулою (4), а вагові коефіцієнти: $w_1=0.2, w_2=0.4, w_3=0.2, w_4=0.2$:

1. Базовий сценарій (нормальні умови). Дані повні, точні, приходять у встановлений термін: $C=1.0, A=1.0, T=1.0, R=1.0$.
2. Зниження точності через зношення сенсора: $C=1.0, A=0.6, T=1.0, R=0.9$.
3. Запізнення сигналу: $C=1.0, A=0.95, T=0.4, R=0.9$.
4. Неповна вибірка (втрата даних): $C=0.5, A=0.95, T=0.95, R=0.8$.

Аналіз результатів із табл. 2 показує, як зміна параметрів вимірювальної інформації впливає на інтегральний показник якості Iq і достовірність агрегованих даних. У базовому сценарії при оптимальних значеннях усіх параметрів ($C=A=T=R=1.0$) досягається максимальне значення $Iq=1.000$, що приймається за стандарт.

У сценарії зі зниженням точності до $A=0.6$ показник падає до $Iq=0.820$, що підтверджує високу чутливість моделі до цього параметра (вага $w_2=0.4$). Затримка сигналу ($T=0.4$) при інших незмінних параметрах призводить до зниження до $Iq=0.840$, що вказує на важливість своєчасного доставлення даних. У випадку з неповнотою ($C=0.5$) отримано $Iq=0.830$, що демонструє вплив втрати частини вибірки, навіть, при збереженні точності.

Таким чином, найбільший вплив на загальну якість мають параметри з вищими ваговими коефіцієнтами насамперед точність. Погіршення, навіть одного з них суттєво знижує оцінку надійності. Моделювання підтверджує ефективність запропонованого показника Iq як інструменту для контролю якості агрегованої інформації і адаптивного реагування на її зміну.

Таблиця 2

Результати моделювання інтегрального показника Iq

Сценарій	C	A	T	R	Iq
1. Базовий	1.00	1.00	1.00	1.00	1.000
2. Зниження точності	1.00	0.60	1.00	0.90	0.820
3. Запізнення сигналу	1.00	0.95	0.40	0.90	0.840
4. Неповна вибірка	0.50	0.95	0.95	0.80	0.830

Для практичної оцінки достовірності агрегованої інформації доцільно встановити межові порогові значення інтегрального показника якості Iq , що дозволяють автоматизованій системі приймати обґрунтовані рішення щодо подальшого використання результатів обробки. В табл. 3 представлено типову градацію якісних рівнів Iq з відповідними інтерпретаціями та рекомендованими діями з боку системи.

Таблиця 3

Критерії прийняття рішення на основі значення інтегрального показника Iq

Діапазон значень Iq	Інтерпретація	Рекомендації щодо використання даних
$Iq \geq 0.95$	Висока якість	Дані повністю придатні до аналізу, виводу, архіву
$0.85 \leq Iq < 0.95$	Задовільна якість	Дані використовуються з позначенням рівня довіри
$0.75 \leq Iq < 0.85$	Гранична придатність	Рекомендовано додаткову перевірку та повторну оцінку
$Iq < 0.75$	Низька якість, ненадійність	Агреговані дані не використовуються без додаткового аналізу

Як видно з наведених критеріїв, ключовою межею прийнятності є поріг $Iq=0.75$, нижче якого агреговані дані вважаються ненадійними та підлягають виключенню або повторній агрегації. Такий статус присвоюється в системі не лише на основі зниження інтегрального показника, але й за рядом додаткових умов, що можуть свідчити про погіршення якості вхідних даних чи відмову сенсорних каналів.

Зокрема, агреговані значення в автоматизованій системі моніторингу визначаються як ненадійні, якщо:

- Значення $Iq < 0.75$ – це свідчить про те, що принаймні один із ключових параметрів, таких як точність, повнота або своєчасність, опинився на неприйнятно низькому рівні, що суттєво впливає на достовірність агрегованого результату.
- Похибка агрегованого значення перевищує допустиме значення – $\delta_{\text{Ха}} > \delta_{\text{допустима}}$. Такий випадок означає, що сумарна зважена похибка обчисленого значення виходить за межі встановленого нормативу для конкретної метрологічної задачі.
- Вхідні дані надходили із суттєвою затримкою або неповно: якщо понад 30% сенсорів передають значення із часовим зсувом, що перевищує критичний поріг $\Delta t_{\text{крит}}$, система втрачає узгодженість у часовій шкалі.
- Зафіксовано нестабільність або флуктуації в одному з основних каналів, що проявляється в різкій зміні значень, зниженні повторюваності або невідповідності очікуванім

трендам. Це суттєво впливає на репрезентативність і порушує функціонування алгоритму вагового агрегування.

У разі настання будь-якої з перелічених умов, автоматизована система маркує відповідні агреговані дані як «ненадійні», після чого:

- вони не передаються до SCADA або MES-систем без попереднього погодження або повторної валідації;
- під час візуалізації значення або приховуються, або позначаються попередженням, наприклад, «низька довіра»;
- автоматично активується механізм повторного агрегування із виключенням аномальних або некоректних каналів та переглядом вагових коефіцієнтів.

Таким чином, аналітична модель не лише дозволяє кількісно оцінювати якість агрегованої інформації, а й формує основу для побудови механізмів адаптивного контролю, фільтрації та відновлення інформаційного потоку, що є критично важливим для стабільної роботи автоматизованих метрологічних систем у динамічних умовах.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У процесі дослідження було представлено формалізований підхід до математичного моделювання процесу агрегації вимірювальної інформації в автоматизованих метрологічних системах моніторингу виробничих процесів. Запропонована структура охоплює ключові етапи — від попередньої обробки даних і нормалізації до розрахунку інтегрального показника якості та прийняття рішення щодо надійності агрегованої інформації.

Основною науковою новизною дослідження є побудова адаптивної математичної моделі вагового агрегування з урахуванням метрологічних характеристик каналів, а також впровадження інтегральної функції якості I_q , яка дозволяє кількісно оцінити достовірність отриманого результату. Аналітичне моделювання показало чутливість показника до змін точності, своєчасності та повноти даних, що підтвердило доцільність використання багатофакторної оцінки при обробці потоків із різнорідних сенсорів.

У межах дослідження було розроблено структурований алгоритм агрегації, представлений у вигляді покрокової схеми з розмежуванням функціональних етапів. Також сформульовано критерії прийняття рішення щодо якості результату та побудовано таблицю порогових значень для автоматизованого контролю довіри до агрегованих даних.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі пов'язані з удосконаленням математичної моделі шляхом інтеграції елементів нечіткої логіки для роботи з неповною або суперечливою інформацією, а також із розробленням механізмів самонавчання вагових коефіцієнтів на основі історичних даних каналів. Важливим кроком є програмна реалізація моделі в середовищах SCADA або MES з подальшою інтеграцією в промислові IT-системи. Крім того, необхідною є експериментальна перевірка моделі на реальних виробничих даних для оцінки її точності та ефективності. Результати дослідження створюють основу для побудови адаптивних систем моніторингу, здатних автоматично оцінювати рівень довіри до вимірювальної інформації, приймати рішення щодо її використання та забезпечувати надійне керування технологічними процесами в реальному часі.

Література

1. Глухов С., Сакович, Л., Козел В., Семеха С., Бабій О. Побудова автоматизованої системи метрологічного забезпечення цифрових вимірювальних приладів з використанням інформаційних технологій. *InterConf*. 2024. № 45(201). С. 603–607. URL: <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.05.2024.061>
2. ДСТУ 4134-2002 Метрологія. Канали вимірювальні вимірювальних інформаційних систем та автоматизованих систем керування технологічними процесами. Вимоги до структури та змісту методик виконання вимірювань. *БУДСТАНДАРТ Online*. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=67557&utm_source=chatgpt.com
3. Защепкіна Н., Рудницький Р. Застосування процесу агрегації даних на основі сенсорів у завданнях екологічного моніторингу та контролю показників виробничих процесів. *Measuring And Computing Devices In Technological Processes*. 2024. № 2. С. 258–265. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-30>
4. Куц Ю. В., Лисенко Ю. Ю., Момот А. С. Новітні системи та технології. Частина I. Загальні питання побудови та опрацювання даних в комп'ютерно-інтегрованих системах НКДТ: навч. посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 123 с.
5. Пановик У. П., Гідей Р.В., Богоніс О.О. Інтегровані метрологічні системи в індустрії 4.0. *Наукові записки*, № 1(68), 2024, С. 71–82. URL: <https://doi.org/10.32403/1998-6912-2024-1-68-71-82>

6. Converting Measurement Data into Actionable Insights to Improve Manufacturing Processes. *Metrology and Quality News*. URL: https://metrology.news/converting-measurement-data-into-actionable-insights-to-improve-manufacturing-processes/?utm_source=chatgpt.com
7. Phillips K., Schneider C., Cambraia P., Munson M. Automated Aggregation of Data for Asset Health Analysis. *T&D World*. 2021. URL: <https://www.tdworld.com/asset-management/article/21164616/automated-aggregation-of-data-for-asset-health-analysis>
8. Unlocking the Potential of AI in Industrial Automation: Key Considerations in Data Acquisition, Aggregation, and Ownership. *Manufacturing X.0 Midwest: Advancing Digital Transformation*. URL: https://www.mx0midwest.com/post/unlocking-the-potential-of-ai-in-industrial-automation-key-considerations-in-data-acquisition-aggregation-and-ownership?utm_source=chatgpt.com
9. Vedurmudi A. P. et al. (2025). Automation in sensor network metrology: An overview of methods and their implementations. *Measurement: Sensors*. 2025. P. 101799. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101799>

References

1. Glukhov S., Sakovych L., Koziol V., Semecha S., Babii O. (2024). Construction of an automated system of metrological support for digital measuring instruments using information technologies. *InterConf*, No. 45(201), pp. 603–607. URL: <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.05.2024.061>
2. DSTU 4134-2002. (2002). Metrology. Measuring channels of information-measuring systems and automated control systems of technological processes. Requirements for the structure and content of measurement methods. *BUDSTANDART Online*. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=67557&utm_source=chatgpt.com
3. Zashchepkina N., Rudnytskyi R. (2024). Application of data aggregation processes based on sensors for environmental monitoring and production process control. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, No. 2, pp. 258–265. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-30>
4. Kuts Yu. V., Lysenko Yu. Yu., Momot A. S. (2022). Modern Systems and Technologies. Part I. General issues of construction and data processing in computer-integrated NDT systems: textbook. Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi. 123 p.
5. Panovyyk U. P., Hidei R. V., Bohonis O. O. (2024). Integrated metrological systems in Industry 4.0. *Scientific Notes*, No. 1(68), pp. 71–82. URL: <https://doi.org/10.32403/1998-6912-2024-1-68-71-82>
6. Converting Measurement Data into Actionable Insights to Improve Manufacturing Processes. *Metrology and Quality News*. URL: https://metrology.news/converting-measurement-data-into-actionable-insights-to-improve-manufacturing-processes/?utm_source=chatgpt.com
7. Phillips K., Schneider C., Cambraia P., Munson M. Automated Aggregation of Data for Asset Health Analysis. *T&D World*. 2021. URL: <https://www.tdworld.com/asset-management/article/21164616/automated-aggregation-of-data-for-asset-health-analysis>
8. Unlocking the Potential of AI in Industrial Automation: Key Considerations in Data Acquisition, Aggregation, and Ownership. *Manufacturing X.0 Midwest: Advancing Digital Transformation*. URL: https://www.mx0midwest.com/post/unlocking-the-potential-of-ai-in-industrial-automation-key-considerations-in-data-acquisition-aggregation-and-ownership?utm_source=chatgpt.com
1. Vedurmudi A. P. et al. (2025). Automation in sensor network metrology: An overview of methods and their implementations. *Measurement: Sensors*. 2025. P. 101799. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101799>