

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інформаційних електронних систем
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

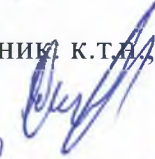
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
МІКРОКЛІМАТУ»

Виконав: студент 4-го курсу, групи КІВТ-216,
Спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка, ОП – Комп'ютеризовані
інформаційно-вимірювальні технології
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 Страшевський О. Ю.
(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС
 Савицький А. Ю.
(прізвище та ініціали)

« 12 » 06 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доц., доцент каф. ІКСТ
 Семенова О. О.
(прізвище та ініціали)

« 13 » 06 2025 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ІРТС
д.т.н., проф., каф. ІРТС Осадчук О. В.
(прізвище та ініціали)

« 16 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет Інформаційних електронних систем
Кафедра Інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти I (бакалаврський)
Галузь знань – 15 Автоматизація та приладобудування
Спеціальність – 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
Освітньо-професійна програма – Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІРТС

Олександр ОСАДЧУК

«22» 03 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Страшевському Олександру Юрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Підвищення точності вимірювання параметрів мікроклімату»,
керівник роботи Савицький А. Ю., к.т.н., доц., каф. ІРТС
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «20» 03 2025 р. № 97.

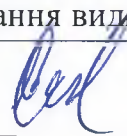
2. Строк подання студентом роботи «12» червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Характеристики похибок сенсорів для моделювання: систематичні (зсув нуля, похибка підсилення, нелінійність, гістерезис, самонагрів, перехресна чутливість до температури та тиску) та випадкові (гаусівський шум); Математичні моделі похибок та алгоритми їх корекції: поліноміальна апроксимація, моделі компенсації, методи цифрової фільтрації.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Аналіз проблеми підвищення точності вимірювання параметрів мікроклімату та методів її корекції. Теоретичні основи та алгоритми корекції даних сенсорів мікроклімату. Розробка алгоритмів програмної корекції похибок сенсорів мікроклімату. Експериментальне дослідження ефективності розробленого програмного забезпечення. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) фільтра ковзного середнього. Блок-схема комплексного алгоритму корекції даних. Блок-схема архітектури програмного забезпечення для корекції показань сенсорів мікроклімату. Послідовність етапів генерації синтетичних даних з імітацією реальних похибок сенсорів. Зовнішній вигляд головного вікна програми. Діалогове вікно введення параметрів для корекції сенсора. Результат корекції даних температури із застосуванням поліноміального калібрування, компенсації самонагріву та фільтра Калмана.

6. Консультанти розділів роботи

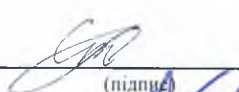
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Основна частина	к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС Савицький А. Ю.		

7. Дата видачі завдання 25.03.2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір, узгодження та затвердження теми БКР	14.02.2025-28.02.2025	
2	Огляд та аналіз літературних джерел	01.03.2025-19.03.2025	
3	Розробка завдання на БКР. Затвердження теми	20.03.2025-25.03.2025	
4	Попередня розробка основних розділів. Аналіз розв'язання поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	26.03.2025-06.05.2025	
5	Математичне моделювання та розрахунки. Експериментальне дослідження.	07.05.2025-26.05.2025	
6	Розробка ілюстративної частини БКР	27.05.2025-31.05.2025	
7	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини	02.06.2025-06.06.2025	
8	Нормоконтроль	07.06.2025-10.06.2025	
9	Попередній захист БКР, доопрацювання, рецензування БКР	11.06.2025-15.06.2025	
10	Захист БДР ЕК	17.06.2025-18.06.2025	

Студент

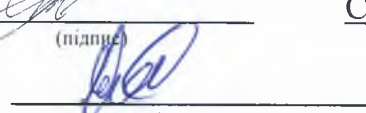


(підпис)

Страшевський О. Ю.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

Савицький А. Ю.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396.946

Страшевський О. Ю. Підвищення точності вимірювання параметрів мікроклімату. Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 78 с. На українській мові. Бібліогр.: 33 назв; табл.: 6; рис.: 7.

У даній бакалаврській кваліфікаційній роботі розглядається підвищення точності вимірювання параметрів мікроклімату (температури, вологості, концентрації CO₂ та тиску). Метою роботи є розробка та дослідження програмного забезпечення для корекції показань сенсорів з урахуванням їхніх систематичних і випадкових похибок та взаємовпливів.

У рамках дослідження було проведено аналіз сучасних сенсорних технологій та джерел похибок. Розроблено математичні моделі похибок та алгоритми їх корекції, що включають калібрування, компенсацію систематичних похибок (самонагрів, перехресна чутливість) та методи цифрової фільтрації (ковзне середнє, медіанний, Калмана). На основі цих алгоритмів створено програмний модуль з функціями імпорту, обробки, візуалізації та збереження даних.

Отримані результати можуть бути використані для підвищення точності та енергоефективності побутових і промислових систем моніторингу мікроклімату, систем «розумного дому» та ОВК. Проведено експериментальне дослідження на синтетичних даних, яке підтвердило ефективність розроблених алгоритмів.

Ключові слова: мікроклімат, точність вимірювання, корекція даних, сенсори, похибки вимірювань, програмне забезпечення, калібрування, фільтрація даних, компенсація похибок.

ABSTRACT

Strashevskiy O. Yu. Improving the accuracy of measuring microclimate parameters. Bachelor's Qualification Thesis. – Vinnytsia: VNTU, 2025. – 78 p. In Ukrainian. References: 33 titles; tables: 6; figures: 7.

This bachelor's qualification thesis addresses the improvement of measurement accuracy for microclimate parameters (temperature, humidity, CO₂ concentration, and pressure). The aim of the work is to develop and research software for correcting sensor readings, taking into account their systematic and random errors, as well as cross-sensitivities.

Within the scope of the research, an analysis of modern sensor technologies and sources of error was conducted. Mathematical models of errors and algorithms for their correction were developed, including calibration, compensation for systematic errors (self-heating, cross-sensitivity), and digital filtering methods (moving average, median, Kalman). Based on these algorithms, a software module with functionalities for data import, processing, visualization, and storage was created.

The obtained results can be used to enhance the accuracy and energy efficiency of both consumer and industrial microclimate monitoring systems, «smart home» systems, and HVAC systems. An experimental study on synthetic data was performed, which confirmed the effectiveness of the developed algorithms.

Keywords: microclimate, measurement accuracy, data correction, sensors, measurement errors, software, calibration, data filtering, error compensation.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ ТА МЕТОДІВ ЇЇ КОРЕКЦІЇ	10
1.1 Параметри мікроклімату та їх значення для життєдіяльності людини та технологічних процесів.....	10
1.2 Сучасні сенсори для вимірювання параметрів мікроклімату та їх основні характеристики.....	18
1.3 Кількісна оцінка та моделі основних похибок сенсорів.....	32
1.4 Математичні основи методів фільтрації для зменшення випадкових похибок.....	33
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АЛГОРИТМИ КОРЕКЦІЇ ДАНИХ СЕНСОРІВ МІКРОКЛІМАТУ	37
2.1 Математичні моделі похибок сенсорів мікроклімату.....	37
2.2 Алгоритми калібрування сенсорів.....	40
2.3 Алгоритми компенсації систематичних похибок.....	43
2.4 Алгоритми фільтрації для зменшення випадкових похибок.....	45
2.5 Алгоритм розрахунку скоригованих значень параметрів мікроклімату.....	46
3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ПРОГРАМНОЇ КОРЕКЦІЇ ПОХИБОК СЕНСОРІВ МІКРОКЛІМАТУ	49
3.1 Обґрунтування вибору мови програмування та засобів розробки.....	49
3.2 Розробка алгоритму поліноміальної корекції нелінійності.....	50
3.3 Розробка програмних модулів.....	50
3.4 Загальна блок-схема програмної реалізації алгоритмів.....	54
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	55
4.1 Методика проведення експериментальних досліджень.....	55
4.2 Опис джерел даних.....	56

	7
4.3 Проведення експериментів та аналіз результатів.....	58
4.4 Оцінка загального підвищення точності вимірювань.....	60
ВИСНОВКИ	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	64
ДОДАТОК А (Обов’язковий). Ілюстративний матеріал.....	68
ДОДАТОК Б (Обов’язковий). Протокол перевірки навчальної (бакалаврської) кваліфікаційної роботи.....	76
ДОДАТОК В (Довідниковий). Лістинг програмного забезпечення.....	78

ВСТУП

Актуальність теми «Підвищення точності вимірювання параметрів мікроклімату» є надзвичайно важливою з огляду на кілька ключових факторів:

Енергоефективність та економіка: В умовах постійного зростання цін на енергоносії, точний контроль мікроклімату стає критично важливим. Системи опалення, вентиляції та кондиціонування (ОВК) споживають до 40% енергії в будівлях, а неточність вимірювань може збільшувати це споживання на 15-25%, що призводить до значних фінансових втрат.

Здоров'я та комфорт людини: Параметри мікроклімату безпосередньо впливають на самопочуття, продуктивність праці та загальний стан здоров'я людей. Неправильні показники сенсорів призводять до створення некомфортних або навіть шкідливих умов у приміщеннях.

Розвиток технологій «розумних будівель» та IoT: Сучасні автоматизовані системи керування будівлями покладаються на дані з численних сенсорів. Похибки в цих даних нівелюють переваги автоматизації, оскільки навіть найсучасніші доступні сенсори в реальних умовах експлуатації спотворюють показання через самонагрів, дрейф характеристик та взаємний вплив параметрів.

Аналіз ринку сучасних пристроїв для моніторингу мікроклімату показує, що навіть у популярних комерційних рішеннях питання точності залишається відкритим. Наприклад, відома погодна станція Netatmo заявляє точність вимірювання температури $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, а пристрій Awair Element, що вимірює рівень CO_2 , має заявлену точність $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ для температури. Професійні прилади, як-от Testo 400, пропонують значно вищу точність, але їхня вартість є занадто високою для масового використання. Важливо розуміти, що заявлені виробниками характеристики досягаються в ідеальних лабораторних умовах. У реальних умовах експлуатації сукупна похибка може бути значно вищою через комплексний вплив незалежних факторів.

Традиційні підходи до підвищення точності, такі як використання дорогих прецизійних сенсорів та складне екранування, є економічно невиправданими для масового застосування. Тому програмні методи корекції, здатні підвищити реальну точність вимірювань до рівня професійних систем, стають найперспективнішим напрямком розвитку.

Метою роботи є підвищення точності вимірювання параметрів мікроклімату шляхом дослідження та розробки програмних алгоритмів для компенсації систематичних похибок та фільтрації випадкових похибок сенсорів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Проаналізувати джерела та класифікувати види похибок, характерні для сучасних сенсорів температури, вологості, CO₂ та тиску.
2. Розробити математичні моделі основних систематичних похибок сенсорів, включаючи нелінійність, самонагрів та перехресну чутливість.
3. Синтезувати алгоритми програмної корекції, що включають процедури калібрування, компенсації систематичних впливів та цифрові фільтри.
4. Реалізувати розроблені алгоритми у вигляді програмного модуля для обробки вимірювальних даних.
5. Провести експериментальне дослідження ефективності запропонованих алгоритмів на синтетичних даних та дати кількісну оцінку досягнутого підвищення точності вимірювань.

Об'єкт дослідження: процеси вимірювання та обробки даних параметрів мікроклімату в автоматизованих системах моніторингу.

Предмет дослідження: математичні моделі похибок сенсорів, алгоритми їх корекції та програмні засоби підвищення точності вимірювань на основі синтетичних даних.

1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ ТА МЕТОДІВ ЇЇ КОРЕКЦІЇ

Підвищення точності вимірювання параметрів мікроклімату є актуальною науково-технічною задачею, що має важливе значення для забезпечення комфортних та безпечних умов життєдіяльності людини, оптимізації технологічних процесів та збереження матеріальних цінностей. Даний розділ присвячений всебічному аналізу цієї проблеми. Розглядаються ключові параметри мікроклімату та їх вплив на різні сфери людської діяльності. Проводиться огляд сучасних сенсорних технологій, що використовуються для вимірювання цих параметрів, із зазначенням їхніх принципів дії, характеристик, переваг та недоліків. Особлива увага приділяється ідентифікації та класифікації джерел похибок, що виникають при вимірюванні параметрів мікроклімату, включаючи інструментальні, методичні похибки та похибки системи збору даних. На завершення розділу здійснюється огляд існуючих методів та підходів до корекції показань сенсорів, що включає методи калібрування, алгоритми компенсації систематичних похибок та методи фільтрації для зменшення впливу випадкових похибок. Проведений аналіз слугуватиме теоретичною основою для розробки програмного забезпечення, спрямованого на підвищення точності вимірювань параметрів мікроклімату.

1.1 Параметри мікроклімату та їх значення для життєдіяльності людини та технологічних процесів

Мікроклімат приміщень – це комплекс фізичних, хімічних та, в деяких випадках, біологічних факторів внутрішнього середовища, що справляють безпосередній вплив на тепловий стан організму людини, її самопочуття, працездатність та здоров'я, а також визначають умови перебігу технологічних процесів, збереження обладнання, матеріалів та культурних цінностей [2].

Розуміння складу мікроклімату та взаємозв'язків між його компонентами є фундаментальною передумовою для його ефективного контролю та регулювання. Основними параметрами, що характеризують мікроклімат, є:

- Температура повітря: Один з найбільш значущих параметрів, що визначає інтенсивність теплообміну між людиною та навколишнім середовищем шляхом конвекції та теплопровідності.

- Відносна вологість повітря: Характеризує ступінь насиченості повітря водяною парою відносно максимально можливого при даній температурі. Впливає на інтенсивність випаровування вологи з поверхні шкіри та слизових оболонок, а також на збереження гігроскопічних матеріалів.

- Швидкість руху повітря (рухливість повітря): Впливає на конвективний теплообмін та інтенсивність випаровування вологи. При низьких температурах посилює відчуття холоду, при високих – сприяє охолодженню.

- Концентрація діоксиду вуглецю (CO_2): Є індикатором якості повітря та ефективності вентиляції. Підвищені концентрації CO_2 можуть свідчити про недостатній повітрообмін та накопичення інших забруднювачів.

- Атмосферний тиск: Хоча в системах клімат-контролю приміщень тиск рідко є керованим параметром (за винятком спеціалізованих барокамер або чистих приміщень), його коливання можуть впливати на самопочуття метеозалежних людей та на показання деяких типів сенсорів (наприклад, CO_2 сенсорів NDIR-типу).

- Чистота та свіжість повітря: Ці поняття є більш комплексними і часто пов'язуються з низьким рівнем CO_2 та відсутністю шкідливих домішок, таких як пил, алергени, леткі органічні сполуки (ЛОС).

Важливо наголосити, що параметри мікроклімату тісно взаємопов'язані. Наприклад, сприйняття температури людиною істотно залежить від рівня відносної вологості та швидкості руху повітря. Зміна температури при незмінному абсолютному вмісті вологи в повітрі призводить до зміни відносної вологості. Цей взаємовплив необхідно враховувати при проектуванні систем

моніторингу та керування мікрокліматом, оскільки оптимізація одного параметра без урахування інших може не призвести до бажаного результату або навіть погіршити загальні умови. Сучасний підхід все частіше розглядає не окремі параметри, а інтегральний показник – якість повітря в приміщенні (Indoor Air Quality, IAQ), який охоплює ширший спектр факторів, включаючи концентрацію CO_2 як індикатор адекватності вентиляції для видалення різноманітних забруднювачів. Недооцінка комплексного характеру мікроклімату та взаємозв'язків між його компонентами може призвести до розробки неефективних систем керування, марних енерговитрат та незадовільних умов для людей чи технологічних процесів.

Кожен параметр мікроклімату має специфічний вплив на фізіологічні та психологічні функції людського організму. Відхилення цих параметрів від нормованих значень може призводити до дискомфорту, зниження фізичної та розумової працездатності, загострення хронічних захворювань та, у довгостроковій перспективі, до виникнення нових проблем зі здоров'ям [3].

Температура повітря є ключовим фактором теплового комфорту. Оптимальні значення температури для житлових приміщень становлять 20-23 °C у холодний період року та 22-25 °C у теплий період. Державні санітарні норми та правила (ДСанПіН 3.3.6.042-99) та Державні будівельні норми (ДБН В.2.5-67:2013) детально регламентують оптимальні та допустимі температурні режими для різних типів приміщень (житлових, громадських, виробничих) та категорій робіт за рівнем енерговитрат. Міжнародні стандарти, такі як ASHRAE Standard 55, визначають умови теплового комфорту, враховуючи не лише температуру повітря, а й середню радіаційну температуру поверхонь, відносну вологість, швидкість руху повітря, рівень метаболізму людини та теплоізоляційні властивості одягу. Стандарт ISO 7730 пропонує аналітичне визначення та інтерпретацію теплового комфорту за допомогою індексів PMV (Predicted Mean Vote – прогнозована середня оцінка) та PPD (Predicted Percentage Dissatisfied – прогнозований відсоток незадоволених). Всесвітня

організація охорони здоров'я (ВООЗ) також надає керівні принципи щодо якості повітря в приміщеннях, включаючи теплові умови.

Відносна вологість повітря суттєво впливає на тепловідчуття та стан слизових оболонок. Рекомендований діапазон для комфорту людини становить 40-60%. Занадто низька вологість (менш як 30%) може спричиняти сухість шкіри, очей, дихальних шляхів, підвищуючи вразливість до респіраторних інфекцій. Надмірно висока вологість (понад 60-70%) ускладнює тепловіддачу шляхом випаровування поту, що погіршує стерпність високих температур, а також створює сприятливі умови для розвитку плісняви та пилових кліщів, які є сильними алергенами. Нормативні документи, такі як ДБН В.2.5-67:2013 та ДСанПіН, встановлюють допустимі діапазони відносної вологості для різних приміщень.

Концентрація діоксиду вуглецю (CO_2) в повітрі приміщень є важливим показником адекватності вентиляції. У зовнішньому повітрі концентрація CO_2 становить близько 400-450 ppm (parts per million – частин на мільйон). У приміщеннях, де перебувають люди, концентрація CO_2 зростає внаслідок дихання. Оптимальним для офісних приміщень вважається рівень CO_2 400-600 ppm, а концентрації до 1000 ppm (або на 550 ppm вище рівня зовнішнього повітря згідно з ДСТУ EN 16798-1 для категорії II) зазвичай не викликають значного дискомфорту. При концентраціях CO_2 понад 1000-1400 ppm можуть з'являтися симптоми втоми, головний біль, зниження концентрації уваги та загальної працездатності. ВООЗ та стандарт ASHRAE 62.1 розглядають рівень CO_2 як індикатор ефективності вентиляції щодо видалення біо-виділень людини та, опосередковано, інших забруднювачів.

Атмосферний тиск та його зміни впливають на самопочуття, особливо у метеочутливих людей. Нормальним вважається тиск близько 750 мм рт.ст. (приблизно 1000 гПа). Різкі коливання тиску можуть спричиняти головний біль, запаморочення, біль у суглобах, зміни артеріального тиску та загальну слабкість.

Швидкість руху повітря впливає на конвективний теплообмін та випаровування вологи зі шкіри. В опалювальний період надмірна рухливість повітря (протяги) викликає відчуття холоду навіть при оптимальній температурі. У теплий період помірний рух повітря сприяє охолодженню та покращує самопочуття. Оптимальною для офісних працівників вважається швидкість руху повітря 0.1-0.2 м/с. ДСанПіН та ДБН В.2.5-67:2013 також встановлюють нормативи для швидкості руху повітря.

Слід зазначити, що вплив окремих параметрів мікроклімату на людину не є ізолюваним [4]. Наприклад, висока температура повітря значно гірше переноситься при високій відносній вологості, оскільки це ускладнює процес терморегуляції організму через випаровування поту. Аналогічно, низька температура повітря в поєднанні з високою швидкістю його руху посилює відчуття холоду. Сучасні підходи до нормування мікроклімату все більше враховують індивідуальні особливості людей та можливість їх адаптації до умов середовища, що відображено, наприклад, в адаптивних моделях теплового комфорту стандарту ASHRAE 55 та диференційованих вимогах до категорій приміщень у ДБН В.2.5-67:2013 (наприклад, Категорія І для приміщень з перебуванням особливо чутливих груп населення). Забезпечення належного мікроклімату є не лише питанням комфорту, але й важливим фактором підтримки здоров'я населення, підвищення продуктивності праці та запобігання професійним захворюванням, що має значні соціально-економічні наслідки.

Параметри мікроклімату відіграють критичну роль не лише для комфорту та здоров'я людини, але й для забезпечення стабільності та якості багатьох технологічних процесів, а також для довготривалого збереження різноманітних матеріалів, обладнання та культурних цінностей. Вимоги до мікроклімату в цих сферах часто є значно жорсткішими та специфічнішими, ніж для житлових чи офісних приміщень, і їх недотримання може призвести до значних економічних збитків, погіршення якості продукції або втрати унікальних артефактів.

- Харчова промисловість: Підтримання визначених значень температури, відносної вологості та чистоти повітря є ключовим для забезпечення якості, безпеки та термінів зберігання харчових продуктів. Наприклад, у пекарнях та дріжджових цехах контролюється концентрація CO_2 , яка може досягати 9000 мг/м^3 (приблизно 4600 ppm при нормальних умовах) під час ферментації. Неправильні умови мікроклімату можуть сприяти розвитку мікроорганізмів, псуванню сировини та готової продукції, а також впливати на органолептичні властивості.

- Фармацевтична промисловість: Виробництво лікарських засобів вимагає суворого дотримання параметрів мікроклімату згідно з вимогами Належної Виробничої Практики (GMP). Це стосується температури (наприклад, комфортна температура $21 \pm 2^\circ\text{C}$ взимку, $23 \pm 2^\circ\text{C}$ влітку), відносної вологості (зазвичай 40-60%), та особливо чистоти повітря, яка класифікується за максимально допустимою кількістю часток та мікроорганізмів в 1 м^3 . Відхилення від норм можуть призвести до контамінації продукції, зниження її ефективності та безпечності.

- Зберігання музейних експонатів та архівних документів: Для запобігання деградації та руйнуванню паперу, текстилю, металевих виробів, деревини та інших чутливих матеріалів необхідно підтримувати стабільні умови мікроклімату. Рекомендовані параметри включають температуру в діапазоні $12\text{-}18^\circ\text{C}$ (для деяких матеріалів, як фотографії та плівки, навіть нижчу, до -3°C), відносну вологість 50-55% для текстилю, 30-50% для фотоматеріалів, із загальними добовими коливаннями не більше 5%. Також важливим є контроль рівня освітленості та концентрації забруднювальних речовин у повітрі.

- Дата-центри та експлуатація електронного обладнання: Надійна робота серверного та телекомунікаційного обладнання значною мірою залежить від підтримання оптимального температурно-вологісного режиму. Стандарт ASHRAE TC 9.9 рекомендує для дата-центрів підтримувати температуру в діапазоні $18\text{-}27^\circ\text{C}$ та відносну вологість 20-80% (з рекомендованою точкою роси

від -9°C до 15°C). Перегрів може призвести до збоїв у роботі, скорочення терміну служби компонентів та навіть виходу обладнання з ладу. Низька вологість може сприяти накопиченню статичної електрики, а висока – конденсації та корозії.

- Інші технологічні процеси: Багато інших галузей промисловості, таких як текстильна, поліграфічна, деревообробна, виробництво точної механіки та оптики, також мають специфічні вимоги до параметрів мікроклімату. Наприклад, стандартні фізичні умови для багатьох лабораторних досліджень та деяких технологічних процесів визначаються тиском 101325 Па (760 мм рт. ст.) та температурою 0°C (273.15 K). Контроль тиску стисненого повітря важливий для ефективної та безпечної роботи пневматичного обладнання та інструментів.

Вимоги до мікроклімату в технологічних процесах часто є більш жорсткими та специфічними, ніж ті, що встановлюються для комфорту людини. Іноді ці вимоги можуть навіть суперечити комфортним умовам для персоналу, що вимагає зонування приміщень або використання засобів індивідуального захисту. Зростання рівня автоматизації виробництв посилює вимоги до точності та надійності систем моніторингу та керування мікрокліматом, оскільки зменшується можливість оперативного втручання людини для корекції умов. Таким чином, забезпечення належних параметрів мікроклімату є важливим фактором економічної ефективності, якості та конкурентоспроможності продукції, а також збереження матеріальних та культурних цінностей. Похибки у вимірюваннях цих параметрів можуть мати прямі та значні фінансові наслідки. Нижче наведено таблицю 1.1, що узагальнює деякі нормативні вимоги до основних параметрів мікроклімату для різних сфер застосування.

Таблиця 1.1 – Нормативні вимоги до основних параметрів мікроклімату для різних сфер застосування

Сфера застосування	Параметр мікроклімату	Оптимальні значення (або діапазон)	Допустимі значення (або діапазон)
Житлові приміщення (вітальні, спальні)	Температура повітря, °С (холодний період)	22.0 ± 2.0 (Кат. II)	22.0 ± 3.0 (Кат. III)
	Температура повітря, °С (теплий період)	24.5 ± 1.5 (Кат. II)	24.5 ± 2.5 (Кат. III)
	Відносна вологість, %	40-60	30-65 (влітку), 30-45 (взимку)
	Концентрація CO ₂ , ppm	< 800 (відносно зовнішнього)	< 1000-1550 (відносно зовнішнього, залежно від категорії)
Виробничі приміщення (офісна робота, легка Іа)	Температура повітря, °С (холодний період)	22-24	20-25
	Температура повітря, °С (теплий період)	23-25	20-28
	Відносна вологість, %	40-60	до 75 (залежно від умов)
	Швидкість руху повітря, м/с	≤ 0.1	≤ 0.2
Фармацевтичне виробництво (чисті зони С, D)	Температура повітря, °С	21±2 (зима), 23±2 (літо)	-
	Відносна вологість, %	40-60	-
	Клас чистоти повітря	С, D	-

Продовження таблиці 1.1 – Нормативні вимоги до основних параметрів мікроклімату для різних сфер застосування

Дата-центри (Клас A1-A4, рекомендовано ASHRAE)	Температура повітря, °C	18-27	5-45 (залежно від класу A1-A4)
	Відносна вологість, %	Точка роси: -9°C до 15°C та < 60% RH	8-90% RH (залежно від класу A1-A4)
Зберігання текстилю (музеї)	Температура повітря, °C	18	-
	Відносна вологість, %	50-55	-

Ця таблиця наочно демонструє різноманітність вимог до параметрів мікроклімату залежно від сфери застосування. Це підкреслює універсальну важливість точного контролю та складність завдання для розроблюваного програмного забезпечення, яке має бути достатньо гнучким для роботи з різними діапазонами значень та типами сенсорів. Розуміння цих вимог допоможе обґрунтувати вибір параметрів для моніторингу та діапазонів їх значень у програмному забезпеченні, а також наголосити на важливості корекції похибок для досягнення необхідної точності в кожному конкретному випадку.

1.2 Сучасні сенсори для вимірювання параметрів мікроклімату та їх основні характеристики

Правильний вибір первинних перетворювачів інформації – сенсорів – є ключовим етапом у побудові будь-якої системи моніторингу та керування мікрокліматом. Від точності, стабільності, надійності та інших характеристик сенсорів безпосередньо залежить якість отримуваних даних і, як наслідок, ефективність усієї системи. Сучасний ринок пропонує широкий спектр сенсорів для вимірювання різних параметрів мікроклімату, що базуються на різноманітних фізичних та хімічних принципах.

Вимірювання температури є однією з найпоширеніших задач у системах контролю мікроклімату. Для цього використовуються декілька основних типів сенсорів:

Терморезистори – це напівпровідникові резистори, опір яких залежить від температури. Найбільш поширеними є NTC-термістори (Negative Temperature Coefficient), опір яких зменшується з підвищенням температури, та PTC-термістори (Positive Temperature Coefficient), опір яких, навпаки, зростає. Чутливі елементи для NTC-термісторів зазвичай виготовляються на основі оксидів металів (марганцю, нікелю, кобальту, міді тощо) [5].

Характеристика залежності опору від температури для NTC-термісторів є нелінійною, експоненціальною, що описується рівнянням Стейнхарта-Харта або простішим рівнянням з використанням В-коефіцієнта. Типовий діапазон робочих температур для NTC-термісторів, що використовуються для вимірювання мікроклімату, становить від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (деякі моделі до $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$). Точність NTC-термісторів може варіюватися від $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ залежно від класу точності та діапазону температур. Їхня температурна чутливість (відсоткова зміна опору на градус Цельсія) є високою і зазвичай становить від -2% до -6% на $^{\circ}\text{C}$.

Довготривала стабільність NTC-термісторів залежить від їх конструкції та умов експлуатації; для епоксидних сенсорів дрейф може становити близько $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{рік}$, тоді як для герметично запакованих – значно менше, до $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{рік}$. Перевагами NTC-термісторів є висока чутливість, швидкий час відгуку (завдяки малим розмірам), компактність та відносно низька вартість. Недоліками є нелінійність характеристики, що вимагає програмної або апаратної лінеаризації, обмежений у порівнянні з іншими типами сенсорів (наприклад, термопарами) температурний діапазон, та схильність до самонагріву при проходженні вимірювального струму. Самонагрів виникає через те, що для вимірювання опору через термістор пропускається електричний струм, який, відповідно до закону Джоуля-Ленца ($P=I^2R$), викликає виділення тепла. Через малу

теплоємність NTC-термістора це може призвести до підвищення його власної температури відносно температури навколишнього середовища, вносячи систематичну похибку у вимірювання. Прикладами NTC-термісторів є серії TCS від Wavelength Electronics та 10J від Therm-O-Disc. Попри нелінійність, NTC-термістори широко застосовуються для вимірювання температури повітря завдяки їх високій чутливості в типових для мікроклімату діапазонах температур. Їх інтеграція в вимірювальні системи вимагає використання таблиць відповідності опір-температура або апроксимуючих рівнянь для отримання точних значень.

Резистивні датчики температури (Resistance Temperature Detectors, RTD) працюють на принципі зміни електричного опору чистого металу (найчастіше платини, рідше нікелю або міді) зі зміною температури. Для платинових RTD (Pt-RTD) ця залежність є позитивною (опір зростає з температурою) і значно більш лінійною, ніж у термісторів, особливо в широкому діапазоні температур. Найпоширенішими є датчики Pt100 (опір 100 Ом при 0 °C) та Pt1000 (опір 1000 Ом при 0 °C). Діапазон робочих температур для платинових RTD дуже широкий, зазвичай від -200 °C до +600 °C, а для деяких спеціальних виконань – до +850 °C. Точність RTD класифікується згідно з міжнародними стандартами, наприклад, DIN EN 60751, який визначає класи точності AA (F0.1), A (F0.15), B (F0.3) та C (F0.6). Для класу B похибка становить

$$\pm(0.3+0.005*|T|),$$

де T – температура в °C. Платинові RTD характеризуються високою довготривалою стабільністю; дрейф для Pt100 зазвичай не перевищує 0.05 °C/рік. Перевагами RTD є висока точність, відмінна стабільність та повторюваність результатів, добра лінійність характеристики та широкий температурний діапазон. Недоліками є нижча чутливість порівняно з NTC-термісторами, більші фізичні розміри (особливо для дротяних RTD), вища

вартість та схильність до самонагріву, хоча й меншою мірою, ніж NTC при однакових розсіюваних потужностях через більшу площу поверхні. Сенсори Pt1000, маючи вищий номінальний опір, дозволяють використовувати менші вимірювальні струми, що зменшує самонагрів, а також роблять менш значущим вплив опору підвідних дротів на результат вимірювання порівняно з Pt100. Важливою особливістю RTD є вплив опору підвідних дротів на точність вимірювань, особливо для низькоомних сенсорів типу Pt100. При двопровідній схемі підключення опір дротів додається до опору сенсора, вносячи систематичну похибку. Для компенсації цього ефекту використовуються три- та чотирипровідні схеми підключення, які дозволяють виключити або значно зменшити вплив опору дротів [6]. Сучасні технології дозволяють виготовляти RTD у вигляді тонкоплівкових елементів, що мають менші розміри та швидший час відгуку, але можуть дещо поступатися традиційним дротяним RTD у довготривалій стабільності при високих температурах.

Інтегральні (IC) сенсори температури використовують температурну залежність характеристик напівпровідникових р-п переходів. Найчастіше це залежність прямої напруги на діоді від температури при протіканні стабільного струму (принцип дії bandgap reference). Такі сенсори зазвичай містять в одному корпусі не лише чутливий елемент, а й схему обробки сигналу, лінеаризації та, часто, аналого-цифровий перетворювач (АЦП), надаючи на виході стандартизований аналоговий (напруга або струм) або цифровий сигнал (поширені інтерфейси I2C, SPI, 1-Wire). Типовий діапазон вимірюваних температур для IC сенсорів дещо вужчий, ніж у RTD, і часто обмежується значеннями від -55 °C до +150 °C. Точність сучасних цифрових IC сенсорів може бути досить високою, досягаючи ± 0.1 °C в обмеженому діапазоні температур (наприклад, TMP117). Перевагами IC сенсорів є їх малі розміри, низьке енергоспоживання, простота інтеграції з мікроконтролерними системами (особливо для цифрових сенсорів), відсутність потреби у складних зовнішніх схемах обробки сигналу та, як правило, заводське калібрування. Недоліками є

обмежений температурний діапазон порівняно з RTD або термопарами, можливий самонагрів (хоча зазвичай невеликий через низьке енергоспоживання), а також деградація характеристик (старіння) з часом, що може впливати на довготривалу точність. Точність ІС сенсорів може залежати від стабільності напруги живлення. Крім того, при проектуванні друкованої плати важливо мінімізувати теплові шляхи від інших компонентів, що можуть нагріватися, до самого сенсора, щоб уникнути спотворення вимірювань температури навколишнього середовища. Прикладами популярних ІС сенсорів температури є TMP117, DS18B20 (інтерфейс 1-Wire), а також інтегровані температурні сенсори в комбінованих модулях, таких як BME280. Спостерігається стійка тенденція до все більшої інтеграції температурних сенсорів з сенсорами інших параметрів (вологості, тиску, якості повітря) в одному компактному корпусі.

Інфрачервоні (ІЧ) сенсори, або пірометри, вимірюють температуру поверхні об'єкта безконтактно, реєструючи інтенсивність інфрачервоного випромінювання, що випускається цією поверхнею відповідно до закону Стефана-Больцмана. В контексті моніторингу мікроклімату приміщень, ІЧ-сенсори важливі для визначення середньої радіаційної температури огорожувальних конструкцій (стін, стелі, підлоги) та інших поверхонь. Цей параметр суттєво впливає на тепловий баланс людини та її тепловідчуття. Однак, безпосередньо температуру повітря ІЧ-сенсори не вимірюють. Точність вимірювань ІЧ-сенсорами значною мірою залежить від правильного встановлення коефіцієнта випромінювання (емісивності) поверхні, що вимірюється. Неправильне значення цього коефіцієнта може призвести до значних похибок. Сучасні розробки включають ІЧ-матриці (тепловізори), які дозволяють отримувати детальне теплове зображення поверхонь. Для завдань даної бакалаврської роботи, що фокусується переважно на контактних методах вимірювання температури повітря, ІЧ-сенсори мають другорядне значення, але їх згадка важлива для повноти огляду.

Вимірювання відносної вологості повітря є ще одним важливим аспектом контролю мікроклімату.

Ємнісні сенсори є найпоширенішим типом датчиків відносної вологості. Їхній принцип дії ґрунтується на зміні діелектричної проникності гігроскопічного полімерного або керамічного шару, розташованого між двома електродами, при абсорбції або десорбції водяної пари з навколишнього повітря. Ця зміна діелектричної проникності призводить до зміни ємності конденсатора, утвореного електродами та діелектриком. Типовий діапазон вимірювання ємнісних сенсорів становить від 0 до 100% відносної вологості (RH). Точність сучасних сенсорів зазвичай лежить в межах $\pm 2\%$ RH до $\pm 5\%$ RH в середньому діапазоні вологості та температур. Перевагами ємнісних сенсорів є досить добра лінійність характеристики в широкому діапазоні вологості, низьке енергоспоживання, відносно висока стабільність та швидкий час відгуку. Недоліками є чутливість до деяких хімічних забруднювачів та конденсації вологи на поверхні сенсора, що може призвести до тимчасової або постійної зміни характеристик (дрейфу). Крім того, показання ємнісних сенсорів вологості суттєво залежать від температури [7]. Ця залежність зумовлена як зміною діелектричних властивостей самого сенсорного матеріалу, так і фундаментальною залежністю відносної вологості від температури (при незмінному абсолютному вмісті вологи в повітрі). Тому для отримання точних значень відносної вологості необхідна ефективна температурна компенсація, яка зазвичай реалізується шляхом одночасного вимірювання температури сенсором, розташованим якомога ближче до чутливого елемента вологості. Багато сучасних ємнісних сенсорів вологості інтегровані з температурним сенсором на одному кристалі (наприклад, Sensirion SHT31, Bosch BME280, Honeywell HIH серія).

Принцип дії резистивних сенсорів вологості базується на зміні електричного опору гігроскопічного матеріалу (наприклад, солей, спеціальних полімерів або оксидів металів) при поглинанні ним водяної пари з повітря.

Перевагами цих сенсорів є низька вартість та малі розміри. Недоліками є, як правило, нижча точність та стабільність порівняно з ємнісними сенсорами, більша чутливість до забруднень та обмежений діапазон вимірювання (зазвичай не рекомендуються для вологості нижче 5-10% RH та можуть мати більшу похибку при високих значеннях вологості). Також характеристика залежності опору від вологості часто є сильно нелінійною. Через ці обмеження резистивні сенсори вологості рідше використовуються в системах, що вимагають високої точності вимірювань мікроклімату, поступаючись ємнісним аналогам. Проте вони можуть знаходити застосування в менш вимогливих побутових приладах або індикаторах.

Діоксид вуглецю є важливим індикатором якості повітря в приміщеннях, оскільки його концентрація безпосередньо пов'язана з присутністю людей та ефективністю вентиляції.

NDIR-сенсори є найбільш поширеною та точною технологією для вимірювання концентрації CO₂. Принцип їхньої дії заснований на властивості молекул CO₂ поглинати інфрачервоне випромінювання на певних довжинах хвиль, зокрема в районі 4.26 мкм. Типовий NDIR-сенсор складається з джерела інфрачервоного випромінювання (зазвичай мініатюрна лампа розжарювання або світлодіод), вимірювальної камери (кювети), через яку проходить аналізоване повітря, вузькосмугового оптичного фільтра, налаштованого на довжину хвилі поглинання CO₂, та інфрачервоного детектора (термобатареї або піроелектричного приймача). Зменшення інтенсивності ІЧ-випромінювання, що пройшло через камеру, пропорційне концентрації CO₂. Перевагами NDIR-сенсорів є висока селективність (мала чутливість до інших газів), хороша точність (типово $\pm (30-75) \text{ ppm} \pm (3-5)\%$ від виміряного значення в діапазоні 400-5000 ppm), довготривала стабільність (термін служби до 10-15 років) та те, що вони не «споживають» газ у процесі вимірювання. Недоліками є відносно вища вартість та енергоспоживання порівняно з деякими іншими типами газових сенсорів, а також чутливість до змін атмосферного тиску та, меншою

мірою, температури. Зміна тиску впливає на парціальний тиск CO_2 і, відповідно, на кількість молекул газу в оптичному шляху. Також можливий довготривалий дрейф показань через деградацію ІЧ-джерела або детектора, а також забруднення оптичних поверхонь (наприклад, пилом). Багато сучасних NDIR-сенсорів мають вбудовані механізми температурної компенсації. Для компенсації довготривалого дрейфу часто використовується алгоритм автоматичного фонових калібрування (Automatic Background Calibration, ABC logic) [8]. Цей алгоритм періодично (наприклад, раз на кілька днів) фіксує найнижче виміряне значення CO_2 і припускає, що воно відповідає концентрації свіжого зовнішнього повітря (близько 400 ppm). На основі цього припущення відбувається корекція базової лінії сенсора. Однак, якщо сенсор експлуатується в умовах, де концентрація CO_2 ніколи не опускається до фонових рівнів (наприклад, у теплицях або постійно зайнятих, погано вентильованих приміщеннях), ABC-логіка може призвести до систематичного заниження показань. Деякі сенсори дозволяють відключати ABC або проводити ручне калібрування за нульовою точкою (в чистому азоті) або за відомою концентрацією CO_2 . Прикладами NDIR-сенсорів є Senseair S8 та Winsen MH-Z19.

Фотоакустична спектроскопія (PAS) є відносно новою технологією для вимірювання CO_2 . Як і NDIR, вона базується на поглинанні ІЧ-випромінювання молекулами CO_2 . Однак, замість вимірювання ослаблення інтенсивності світла, PAS-сенсори детектують звукові хвилі, що генеруються в герметичній камері внаслідок періодичного нагрівання та розширення газу при поглинанні модульованого ІЧ-випромінювання. Амплітуда цих звукових хвиль, що вловлюється чутливим мікрофоном, пропорційна концентрації CO_2 . Перевагами PAS-сенсорів є їх дуже малі розміри (менше ніж 1 см^3), що робить їх привабливими для інтеграції в компактні пристрої, та потенційно низька вартість масового виробництва. Недоліками можуть бути більша чутливість до механічних вібрацій та зовнішнього акустичного шуму порівняно з NDIR-

сенсорами, а також менш вивчена довготривала стабільність та надійність в різноманітних умовах експлуатації. Точність PAS-сенсорів може залежати від стабільності температури та вологості, оскільки ці параметри впливають на швидкість звуку та теплоємність газової суміші. Тому сучасні PAS-сенсори, такі як Sensirion SCD4x, часто інтегрують на одному кристалі також сенсори температури та вологості для здійснення внутрішньої компенсації.

Електрохімічні сенсори CO₂ вимірюють зміну електричних властивостей (наприклад, електропровідності або потенціалу) спеціального електроліту або твердотілого матеріалу при його взаємодії з молекулами CO₂. Перевагою цих сенсорів є їх низька вартість. Недоліками є, як правило, обмежена точність, низька селективність (чутливість до інших газів), значна залежність показань від температури та вологості, а також обмежений термін служби та необхідність частого калібрування. Через ці обмеження електрохімічні сенсори CO₂ рідко використовуються для прецизійного моніторингу мікроклімату, частіше – як індикатори або сигналізатори небезпечно високих концентрацій.

Вимірювання атмосферного тиску важливе як для метеорологічних цілей, так і для компенсації похибок інших сенсорів (наприклад, CO₂). Сучасні барометричні сенсори переважно базуються на MEMS-технологіях (Micro-Electro-Mechanical Systems).

Ці сенсори використовують п'єзорезистивний ефект [9] – зміну електричного опору напівпровідникових (зазвичай кремнієвих) резисторів, інтегрованих у тонку пружну мембрану, при її механічній деформації під дією прикладеного тиску. Чотири п'єзорезистори зазвичай з'єднуються у мостову схему Уїтстона для підвищення чутливості та компенсації температурних впливів. Перевагами п'єзорезистивних MEMS-сенсорів є малі розміри, відносно низька вартість, хороша лінійність та стабільність при належній температурній компенсації. Основним недоліком є значна чутливість до температури, оскільки як механічні властивості кремнієвої мембрани (модуль Юнга), так і опір п'єзорезисторів (температурний коефіцієнт опору – ТКО) залежать від

температури. Тому якісна температурна компенсація є критично важливою. Прикладами таких сенсорів є Bosch BMP280 (тиск і температура) та BME280 (тиск, температура, вологість).

Ємнісні MEMS-сенсори тиску вимірюють зміну ємності між рухомою мембраною (однією обкладкою конденсатора) та фіксованим електродом (іншою обкладкою) при деформації мембрани під дією тиску. Перевагами ємнісних сенсорів є висока чутливість, низьке енергоспоживання та потенційно менша температурна залежність порівняно з п'єзорезистивними аналогами. Недоліком може бути дещо складніша схема обробки сигналу для точного вимірювання малих змін ємності [10]. Прикладом є сенсор LPS22HB. Для обох типів MEMS-сенсорів тиску спостерігається тенденція до інтеграції на одному кристалі з температурним сенсором для реалізації ефективної внутрішньої температурної компенсації.

Вимірювання швидкості руху повітря важливе для оцінки комфорту (відчуття протягів), ефективності систем вентиляції та кондиціонування.

Термоанемометри (hot-wire anemometers). Принцип дії термоанемометрів базується на вимірюванні кількості тепла, що відводиться від нагрітого елемента (тонкої металевої дротинки або плівки) рухомим потоком повітря. Чим вища швидкість потоку, тим інтенсивніше охолоджується нагрітий елемент. Змінюючи струм через елемент для підтримки його постійної температури (режим постійної температури) або вимірюючи зміну його опору (і, відповідно, температури) при постійному струмі нагріву (режим постійного струму), можна визначити швидкість потоку. Перевагою термоанемометрів є висока чутливість, особливо до малих швидкостей повітря (від 0.1 м/с). Недоліками є крихкість нагрітого елемента, його чутливість до забруднення пилом та іншими частинками (що змінює умови тепловіддачі та призводить до похибок), а також необхідність компенсації впливу температури та тиску навколишнього повітря на точність вимірювань. Прикладами є Testo 405, 425 125 та Oakton WD-20250-16.

Ультразвукові анемометри. Ультразвукові анемометри вимірюють швидкість повітря, визначаючи час проходження ультразвукового імпульсу між парами випромінювачів та приймачів, розташованих на певній відстані один від одного. Швидкість руху повітря вздовж осі між передавачем та приймачем впливає на швидкість поширення звуку і, відповідно, на час його проходження. Використовуючи кілька пар таких перетворювачів, орієнтованих у різних напрямках, можна визначати не лише швидкість, але й напрямок потоку повітря (2D або 3D анемометри). Перевагами ультразвукових анемометрів є відсутність рухомих частин (що підвищує надійність та довговічність), висока точність, широкий діапазон вимірюваних швидкостей та можливість вимірювання дуже малих швидкостей. Недоліком є, як правило, вища вартість порівняно з термоанемометрами або механічними (крильчастими, чашковими) анемометрами.

Сучасні технології, зокрема MEMS, дозволяють інтегрувати декілька чутливих елементів для вимірювання різних параметрів мікроклімату в одному компактному корпусі [11]. Такі комбіновані сенсори значно спрощують розробку пристроїв моніторингу, зменшують їхні габарити, енергоспоживання та вартість. Типовими прикладами є сенсори, що одночасно вимірюють температуру, відносну вологість та атмосферний тиск (наприклад, Bosch BME280). Існують також більш складні модулі, що додатково включають сенсор якості повітря для визначення концентрації летких органічних сполук (VOC) та розрахунку індексу якості повітря (IAQ) (наприклад, Bosch BME680), або сенсори, що поєднують вимірювання CO₂, температури та вологості (наприклад, Sensirion SCD4x). Перевагою таких інтегрованих рішень є зручність використання та часто наявність вбудованих алгоритмів для первинної обробки сигналів та взаємної компенсації впливів (наприклад, температурної компенсації показань сенсора вологості). Однак, близьке розташування кількох чутливих елементів, деякі з яких можуть виділяти тепло під час роботи (наприклад, газовий сенсор в BME680 або сам кристал

мікросхеми), може призводити до теплового взаємовпливу. Наприклад, самонагрів одного елемента може вплинути на показання вбудованого температурного сенсора, який своєю чергою, використовується для температурної компенсації інших вимірюваних параметрів. Виробники намагаються мінімізувати ці ефекти на рівні конструкції кристала та за допомогою вбудованих алгоритмів компенсації, але залишкові похибки можуть існувати [12]. Це підкреслює важливість розуміння внутрішніх процесів у комбінованих сенсорах при розробці програмного забезпечення, що має на меті подальше підвищення точності вимірювань. Спостерігається тенденція до подальшої інтелектуалізації таких сенсорних модулів, включаючи можливості адаптивної корекції та навіть елементів машинного навчання «на кристалі» (on-chip AI). Нижче наведено порівняльні таблиці для основних типів сенсорів температури (Таблиця 1.2), відносної вологості (Таблиця 1.3) та концентрації CO₂ (Таблиця 1.4), що використовуються для моніторингу мікроклімату.

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика основних типів сенсорів температури для моніторингу мікроклімату

Тип сенсора	Принцип дії (коротко)	Типовий діапазон вимірювань, °C	Типова точність/клас	Переваги	Недоліки
NTC-термістор	Зміна опору напівпровідника з температурою (негативний ТКО)	-50...+150 (до +250)	$\pm 0.1 \dots \pm 1.5$ °C	Висока чутливість, швидкий відгук, малі розміри, низька вартість	Нелінійність, обмежений діапазон, самонагрів
RTD (Pt100, Pt1000)	Зміна опору металу (платини) з температурою	-200...+600 (до +850)	Клас А: $\pm(0.15 + 0.002)^\circ\text{C}$, Клас В: $\pm(0.3 + 0.005)$	Швидкість, точність	Висока вартість, важкість роботи

Продовження таблиці 1.2 – Порівняльна характеристика основних типів сенсорів температури для моніторингу мікроклімату

ІС-сенсор (напівпровідниковий)	Температурна залежність параметрів р-п переходу	-55...+150	$\pm 0.1 \dots \pm 0.5$ °	Малі розміри, низьке енергоспоживання, цифровий вихід, простота інтеграції	Обмежений діапазон, можливий самонагрів, старіння
-----------------------------------	---	------------	---------------------------	--	---

Таблиця 1.3 – Порівняльна характеристика основних типів сенсорів відносної вологості

Тип сенсора	Принцип дії	Діапазон вимірювань, %RH	Типова точність, %RH	Переваги	Недоліки
Ємнісний	Зміна ємності полімерного /керамічного діелектрика при абсорбції вологи	0-100	$\pm 2 \dots \pm 5$	Добра лінійність, низьке енергоспоживання, стабільність	Чутливість до забруднень, температурна залежність, дрейф
Резистивний	Зміна опору гігроскопічного матеріалу при абсорбції вологи	5-95 (оптимально)	$\pm 5 \dots \pm 10$	Низька вартість, малий розмір	Нижча точність і стабільність, чутливість до забруднень, нелінійність

Таблиця 1.4 – Порівняльна характеристика основних типів сенсорів CO₂

Тип сенсора	Принцип дії	Діапазон вимірювань, ppm	Типова точність	Переваги	Недоліки
NDIR (Недисперсійний інфрачервоний)	Поглинання ІЧ-випромінювання молекулами CO ₂	0-5000 (типово, до 10000 і більше)	± (30-75) ppm ± (3-5)%	Висока селективність, точність, стабільність, довгий термін служби	Вища вартість, енергоспоживання, чутливість до тиску/температури, дрейф оптики/джерела
PAS (Фотоакустичний)	Поглинання ІЧ-випромінювання з детекцією акустичних хвиль	400-5000 (і більше)	± (30-50) ppm ± (3-5)%	Дуже малі розміри, потенційно низька вартість	Чутливість до вібрацій/шуму, менш вивчена довготривала стабільність
Електрохімічний	Зміна електричних властивостей електроліту при взаємодії з CO ₂	Залежить від типу (широкий)	Низька (± 10-20% і більше)	Низька вартість	Низька точність, селективність, стабільність, короткий термін служби, вплив T/RH

Ці таблиці надають узагальнене порівняння, яке допоможе зрозуміти ключові відмінності між різними сенсорними технологіями та обґрунтувати вибір конкретних сенсорів для експериментальних досліджень в рамках даної роботи або для визначення діапазону сенсорів, з якими зможе працювати розроблюване програмне забезпечення [13].

1.3 Кількісна оцінка та моделі основних похибок сенсорів

Для розробки ефективних алгоритмів корекції необхідно кількісно оцінити та змодельовати основні джерела похибок. Розглянемо типові значення для поширених сенсорів [14].

- Похибки сенсорів температури (NTC, RTD):

Ключовою систематичною похибкою є самонагрів, що виникає через проходження вимірювального струму. Величина похибки ΔT (°C) описується рівнянням:

$$\Delta T = P \cdot R_{th} = I^2 \cdot R \cdot R_{th}$$

де P – потужність, що розсіюється на сенсорі (Вт), I – вимірювальний струм (А), R – опір сенсора (Ом), R_{th} – тепловий опір «сенсор-середовище» (°C/Вт). Для типових сенсорів у спокійному повітрі R_{th} може сягати 50-100 °C/Вт, що призводить до похибки від 0.1 до 0.5 °C. Іншою важливою складовою є часовий дрейф, що для NTC-термісторів може становити до 0.2 °C/рік, а для платинових RTD класу В – близько 0.05 °C/рік.

- Похибки сенсорів вологості (ємнісні):

Для поширених сенсорів, як-от Sensirion SHT3x, типова похибка точності становить $\pm 2\%$ RH (відносної вологості). Важливим є гістерезис, що може сягати $\pm 1\%$ RH, та температурна залежність, що призводить до додаткової похибки близько $\pm 0.5\%$ RH при зміні температури на 10°C відносно точки калібрування.

- Похибки NDIR сенсорів CO₂:

Точність сучасних NDIR-сенсорів (напр., Senseair S8) зазвичай становить $\pm(50 \text{ ppm} + 3\% \text{ від виміряного значення})$. Головною похибкою, що залежить від умов, є вплив атмосферного тиску. Його можна компенсувати за формулою:

$$C_{corr} = C_{raw} * (P_{cal} / P_{act})$$

де C_{raw} – виміряна концентрація, P_{cal} – тиск при калібруванні (зазвичай 1013 гПа), P_{act} – поточний атмосферний тиск. Зміна тиску на 30 гПа може призвести до похибки в 3%.

Ці конкретні значення похибок є початковими даними, які не влаштовують і які необхідно зменшити за допомогою програмної корекції.

1.4 Математичні основи методів фільтрації для зменшення випадкових похибок

Враховуючи різноманітність джерел похибок, що впливають на точність вимірювання параметрів мікроклімату, стає очевидною необхідність застосування спеціальних методів та програмних засобів для їхньої корекції [15]. Метою таких методів є максимально можливе наближення результатів вимірювань до дійсних значень вимірюваних величин, що дозволяє підвищити надійність систем моніторингу та керування.

Калібрування є фундаментальною метрологічною процедурою, спрямованою на встановлення залежності між показаннями засобу вимірювальної техніки (сенсора) та дійсними (еталонними) значеннями вимірюваної фізичної величини [15]. Калібрування необхідне для визначення та подальшої компенсації систематичних інструментальних похибок сенсора, таких як похибка зсуву нуля, похибка підсилення (чутливості) та нелінійність характеристики перетворення. Особливо важливим є періодичне калібрування, оскільки метрологічні характеристики сенсорів мають властивість змінюватися з часом через процеси старіння матеріалів, вплив умов експлуатації та поступовий дрейф параметрів. Наприклад, NDIR CO₂ сенсори, що не використовують алгоритми автоматичного фонового калібрування, рекомендується калібрувати кожні 2-3 роки для підтримки заявленої точності.

Періодичність калібрування визначається типом сенсора, його конструктивними особливостями та нормативними вимогами до точності вимірювань у конкретному застосуванні. Високі вимоги до точності або експлуатація в жорстких умовах зазвичай вимагають частішого калібрування. Залежно від характеристик сенсора та необхідної точності, використовуються різні методи калібрування:

1. Одноточкове калібрування: Полягає у вимірюванні однієї еталонної точки (часто нульового значення або значення, близького до нього). Дозволяє скоригувати лише похибку зсуву нуля (offset). Цей метод є найпростішим, але застосовний лише якщо відомо, що чутливість (нахил характеристики) сенсора є стабільною та відповідає номінальній.

2. Двоточкове калібрування: Проводиться за двома еталонними точками, зазвичай на початку та наприкінці робочого діапазону сенсора (або близько до них). Дозволяє визначити та скоригувати як похибку зсуву нуля, так і похибку підсилення (чутливості), припускаючи лінійну характеристику сенсора між цими точками. Цей метод широко використовується для сенсорів з переважно лінійною характеристикою.

3. Багатоточкове калібрування: Використовується для сенсорів зі значною нелінійністю характеристики перетворення. Вимірювання проводяться в кількох (трьох і більше) еталонних точках, рівномірно розподілених по всьому робочому діапазону. Отримані дані дозволяють апроксимувати реальну характеристику сенсора більш складною функцією, наприклад, поліномом відповідного ступеня, за допомогою методу найменших квадратів. Чим більше точок калібрування та вищий ступінь полінома, тим точніше можна описати нелінійність, але це ускладнює процедуру калібрування та обробку даних. Вибір методу калібрування є компромісом між бажаною точністю та складністю процедури. Програмне забезпечення може підтримувати різні моделі калібрування (лінійну, поліноміальну), дозволяючи користувачеві обрати найбільш відповідну для його сенсорів та завдань.

Для зменшення впливу випадкових похибок (шумів) у вимірювальному сигналі застосовують методи цифрової фільтрації. Розглянемо математичний опис основних фільтрів [16].

1. Фільтр ковзного середнього (Moving Average Filter):

Це лінійний фільтр, що усереднює останні N відліків сигналу. Відфільтроване значення $y[i]$ для вхідного сигналу $x[i]$ обчислюється як:

$$y[i] = (1/N) * \sum (x[i-j]) \text{ for } j \text{ from } 0 \text{ to } N-1$$

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) такого фільтра, наведена на рисунку А.1, має форму функції $\text{sinc}(f)$, що ефективно пригнічує високочастотний шум. Як видно з графіка, фільтр є фільтром низьких частот: він майже не ослаблює сигнали в головній пелюстці, водночас суттєво пригнічуючи сигнали на вищих частотах, де зазвичай знаходиться випадковий шум. Це робить його простим та ефективним інструментом для згладжування даних, однак недоліком є значна затримка сигналу та згладжування різких перепадів, що робить його непридатним для аналізу швидких процесів.

2. Медіанний фільтр (Median Filter):

Це нелінійний фільтр, що замінює поточне значення сигналу на медіану значень у ковзному вікні розміром N (зазвичай непарне):

$$y[i] = \text{median}(x[i-(N-1)/2], \dots, x[i+(N-1)/2])$$

Його головна перевага – висока ефективність у видаленні імпульсних завад («викидів») при збереженні різких країв сигналу, що неможливо для лінійних фільтрів. Однак він може спотворювати тонкі деталі сигналу.

3. Фільтр Калмана (Kalman Filter):

Це рекурсивний алгоритм, що оцінює стан лінійної динамічної системи на основі зашумлених вимірювань [17]. Він працює у два етапи: прогноз та корекція. Стан системи на кроці k описується рівняннями:

$$\begin{aligned}x_h * k_{minus} &= A * x_h * (k-1) \text{ (Прогноз стану)} \\x_{\hat{k}} &= x_{\hat{k}} k_{minus} + K_k * (z_k - H * x_{\hat{k}} k_{minus}) \text{ (Корекція стану)}\end{aligned}$$

де $x_{\hat{k}} k$ – оцінка стану, z_k – вимірювання, K_k – коефіцієнт підсилення Калмана, що мінімізує коваріацію похибки оцінки. На відміну від фільтрів з фіксованою АЧХ, фільтр Калмана є адаптивним: його характеристики залежать від співвідношення шумів процесу та вимірювань. Це робить його значно ефективнішим для сигналів, модель яких відома, але вимагає точного налаштування параметрів.

Отже, у першому розділі було проведено комплексний аналіз проблеми підвищення точності вимірювання параметрів мікроклімату. Встановлено, що точний контроль температури, вологості, концентрації CO_2 та тиску є критично важливим для забезпечення комфорту та здоров'я людини, а також для численних технологічних процесів.

Було розглянуто сучасні сенсорні технології та виявлено, що, попри технологічний прогрес, їхні показання спотворюються значними систематичними та випадковими похибками. Проведено кількісну оцінку основних джерел похибок, таких як самонагрів, нелінійність, дрейф та вплив зовнішніх факторів, а також розглянуто математичні основи методів цифрової фільтрації. Проведений аналіз довів актуальність задачі та сформував теоретичне підґрунтя для розробки спеціалізованих алгоритмів корекції, що є предметом наступних розділів роботи.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АЛГОРИТМИ КОРЕКЦІЇ ДАНИХ СЕНСОРІВ МІКРОКЛІМАТУ

У попередньому розділі було проаналізовано значущість точного вимірювання параметрів мікроклімату, розглянуто сучасні сенсорні технології та детально класифіковано джерела похибок, що виникають у процесі вимірювань. Цей розділ присвячений теоретичним основам та розробці алгоритмів, спрямованих на корекцію цих похибок, що є ключовим етапом для підвищення загальної точності системи моніторингу. Будуть представлені математичні моделі основних похибок сенсорів, детально описані алгоритми їх калібрування, методи компенсації систематичних похибок, таких як самонагрів, температурна залежність та вплив тиску, а також розглянуті алгоритми фільтрації для зменшення впливу випадкових шумів.

2.1 Математичні моделі похибок сенсорів мікроклімату

Для ефективної програмної корекції похибок сенсорів необхідно формалізувати їхню поведінку за допомогою математичних моделей [18]. Ці моделі описують зв'язок між істинним значенням вимірюваної величини та показаннями сенсора, враховуючи різні джерела спотворень.

У загальному випадку, виміряне значення Y_{raw} може бути представлене як функція істинного значення X_{true} та набору параметрів похибки Θ :

$$Y_{raw} = f(X_{true}, \Theta) + \epsilon_{rand},$$

де $f(X_{true}, \Theta)$ описує систематичну складову похибки, а ϵ_{rand} — випадкову похибку.

Моделі основних систематичних похибок:

1. Нелінійність статичної характеристики перетворення:

Якщо залежність вихідного сигналу сенсора від вимірюваної величини є нелінійною, її часто апроксимують поліномом:

$$Y_{raw} = a_0 + a_1 X_{true} + a_2 X_{true}^2 + \dots + a_n X_{true}^n,$$

де $a_0, a_1, \dots, a_n$ – коефіцієнти полінома, що визначаються під час калібрування. Ступінь полінома n обирається залежно від ступеня нелінійності сенсора.

2. Похибки зсуву нуля (offset) та підсилення (gain/span):

Ці похибки описуються лінійною моделлю:

$$Y_{raw} = G * X_{true} + O,$$

де G – фактичний коефіцієнт підсилення (чутливість) сенсора, а O – фактичний зсув нуля. Під час калібрування визначаються відхилення G та O від їх номінальних значень.

3. Гістерезис:

Гістерезис означає, що показання сенсора Y_{raw} залежать не лише від поточного значення X_{true} , але й від напрямку попередньої зміни вимірюваної величини:

$$Y_{raw} = f(X_{true}, \text{direction_of_change})$$

Аналітичне моделювання гістерезису є складним. Часто його вплив мінімізують вибором сенсорів з низьким гістерезисом або враховують у процедурі багатоточкового калібрування, проводячи вимірювання при зростанні та спаданні величини.

4. Дрейф характеристик:

Дрейф – це повільна зміна калібрувальних параметрів сенсора (зсуву O та підсилення G) з часом t або під впливом температури T_{env} :

$$O(t, T_{env}), G(t, T_{env})$$

$$Y_{raw}(t, T_{env}) = G(t, T_{env}) * X_{true} + O(t, T_{env})$$

Моделювання дрейфу вимагає довготривалих спостережень або використання сенсорів з відомими характеристиками старіння. Періодичне перекалібрування є основним методом боротьби з дрейфом.

5. Ефект самонагріву (для сенсорів температури NTC, RTD):

Підвищення температури сенсора ΔT_{sh} через проходження вимірювального струму I можна змодельовати так:

$$\Delta T_{sh} = P_{diss} * R_{th} = (I^2 * R_s) * R_{th}$$

де R_s – опір сенсора при його поточній температурі, R_{th} – тепловий опір між сенсором та навколишнім середовищем. Тоді виміряна температура $T_{measured}$ пов'язана з температурою середовища $T_{ambient}$ як:

$$T_{measured} = T_{ambient} + \Delta T_{sh}$$

Величина R_{th} залежить від умов монтажу та середовища.

6. Перехресна чутливість:

а. Температурна залежність сенсорів вологості (наприклад, ємнісних):

Показання відносної вологості $RH_{indicated}$ залежать від істинної вологості RH_{true} та температури T . Модель може мати вигляд:

$$RH_{indicated} = RH_{true} * (1 + \alpha_T * (T - T_{ref}))$$

або більш складну поліноміальну залежність, що надається виробником. T_{ref} – референтна температура, при якій сенсор калібрувався.

б. Залежність показань NDIR CO₂ сенсорів від тиску: Концентрація CO₂*indicated*, що вимірюється, залежить від істинної концентрації CO₂*true* та атмосферного тиску P_{actual} відносно тиску калібрування P_{cal} . Спрощена модель:

$$CO_2 indicated = CO_2 true * \frac{P_{actual}}{P_{cal}}$$

Більш точні моделі можуть враховувати нелінійні ефекти та температурну залежність коефіцієнта поправки на тиск [19].

с. Температурна залежність MEMS сенсорів тиску: Показання тиску $P_{indicated}$ залежать від істинної величини P_{true} та температури T . Виробники зазвичай надають коефіцієнти для температурної компенсації:

$$P_{corrected} = P_{indicated} - (k_0 + k_1 T + k_2 T^2)$$

де k_i – коефіцієнти температурної залежності зсуву, а також можуть бути коефіцієнти для температурної залежності чутливості.

Ці моделі є основою для розробки алгоритмів калібрування та компенсації, що будуть розглянуті в наступних підрозділах.

2.2 Алгоритми калібрування сенсорів

Калібрування – це процес встановлення співвідношення між показаннями сенсора та відомими (еталонними) значеннями вимірюваної величини з метою визначення та подальшої мінімізації систематичних інструментальних похибок. Результатом калібрування є набір поправочних коефіцієнтів або функція перетворення [20].

1. Одноточкове калібрування (калібрування зсуву):

Цей метод використовується для корекції похибки зсуву нуля (offset). Сенсор піддається впливу одного еталонного значення X_{ref} . Виміряне значення Y_{raw} порівнюється з X_{ref} . Поправка на зсув C_{offset} розраховується як:

$$C_{offset} = X_{ref} - Y_{raw}$$

Скориговане значення потім обчислюється як:

$$Y_{corrected} = Y_{raw} + C_{offset}$$

Цей метод ефективний, якщо чутливість (gain) сенсора є стабільною та відомою.

2. Двоточкове калібрування (лінійне калібрування):

Цей метод дозволяє скоригувати як похибку зсуву, так і похибку підсилення (чутливості) [21]. Використовуються два еталонні значення X_{ref1} та X_{ref2} , що зазвичай знаходяться на краях робочого діапазону сенсора. Отримують відповідні «сирі» показання Y_{raw1} та Y_{raw2} . Припускаючи лінійну залежність $Y_{raw} = m * X_{true} + b$, коефіцієнти m (нахил, gain) та b (зсув, offset) розраховуються:

$$m = \frac{Y_{raw2} - Y_{raw1}}{X_{ref2} - X_{ref1}}$$

$$b = Y_{raw1} - m * X_{ref1} \text{ (або } b = Y_{raw2} - m * X_{ref2} \text{)}$$

Скориговане значення $X_{corrected}$ потім отримується з «сирого» значення $Y_{current raw}$ за формулою:

$$X_{corrected} = \frac{Y_{current raw} - b}{m}$$

3. Багатоточкове калібрування (поліноміальне калібрування):

Для сенсорів зі значною нелінійністю характеристики використовується багатоточкове калібрування. Вимірювання проводяться в N еталонних точках (X_{refi}, Y_{rawi}) , де $i=1, \dots, N$. Шукається поліноміальна залежність, що найкраще апроксимує зворотну характеристику сенсора:

$$X_{corrected} = P(Y_{raw}) = c_0 + c_1 * Y_{raw} + c_2 * Y_{raw}^2 + \dots + c_k * Y_{raw}^k$$

Коефіцієнти $c_0, c_1, \dots, c_k$ визначаються за допомогою методу найменших квадратів (МНК) шляхом мінімізації суми квадратів відхилень:

$$\sum_{i=1}^N (X_{refi} - P(Y_{rawi}))^2 \rightarrow \min$$

Ступінь полінома k обирається залежно від складності характеристики сенсора та кількості точок калібрування (зазвичай $k < N - 1$).

Отримані калібрувальні коефіцієнти (C_{offset} , або m та b , або $c_0, \dots, c_k$) зберігаються в пам'яті програмного забезпечення для кожного сенсора. Під час роботи програми ці коефіцієнти застосовуються до «сирих» даних для отримання каліброваних значень. Специфіка калібрування NDIR CO₂ сенсорів:

- Автоматичне фонове калібрування (ABC Logic): Багато NDIR сенсорів CO₂ використовують алгоритм ABC, який припускає, що концентрація CO₂ в приміщенні періодично знижується до рівня зовнішнього повітря (близько 400 ppm). Сенсор автоматично коригує свою базову лінію на основі цих мінімальних значень. Цей метод може бути неточним, якщо приміщення не провітрюється регулярно до фонових значень.

- Ручне калібрування: Передбачає калібрування за нульовою точкою (наприклад, в середовищі чистого азоту, де концентрація CO₂ дорівнює 0 ppm) та/або за однією чи кількома точками з використанням калібрувальних газових сумішей з відомою концентрацією CO₂.

2.3 Алгоритми компенсації систематичних похибок

Після калібрування, яке усуває основні інструментальні похибки, необхідно компенсувати систематичні похибки, що виникають через вплив зовнішніх факторів або специфічні ефекти роботи сенсорів. Це досягається шляхом застосування математичних моделей, що описують ці впливи.

1. Компенсація самонагріву сенсорів температури (NTC, RTD):

Як було показано в моделі (2.1), виміряна температура $T_{measured}$ є сумою температури середовища $T_{ambient}$ та похибки від самонагріву ΔT_{sh} . Скоригована температура $T_{corrected}$ розраховується як:

$$T_{corrected} = T_{measured} - \Delta T_{sh} = T_{measured} - (I^2 * R_s * R_{th})$$

де I – вимірювальний струм, R_s – опір сенсора, R_{th} – тепловий опір «сенсор-середовище». R_{th} може бути визначений експериментально (наприклад, шляхом вимірювань при двох різних струмах) або взятий з документації на сенсор для типових умов [22].

2. Температурна компенсація показань сенсорів відносної вологості:

Показання сенсорів вологості $RH_{indicated}$ залежать від температури T_{sensor} самого чутливого елемента. Якщо ця температура відрізняється від температури повітря T_{air} , виникає похибка. Крім того, характеристики самого сенсора можуть залежати від температури. Компенсація може виконуватися за формулами, наданими виробником, або емпірично визначеними залежностями. Наприклад, якщо відома залежність чутливості від температури:

$$RH_{corrected} = \frac{RH_{indicated}}{f(T_{sensor})}$$

де T_{sensor} – температура, виміряна інтегрованим або близько розташованим температурним сенсором (який, у свою чергу, має бути скоригований на самонагрів).

3. Компенсація впливу атмосферного тиску на показання NDIR CO₂ сенсорів:

Показання NDIR CO₂ сенсорів $CO_{2indicated}$ залежать від загального атмосферного тиску P_{actual} , оскільки сенсор реагує на парціальний тиск CO₂. Компенсація зазвичай виконується за формулою:

$$CO_{2corrected} = CO_{2indicated} * \frac{P_{cal}}{P_{actual}}$$

де P_{cal} – тиск, при якому сенсор був відкалібрований (зазвичай стандартний атмосферний тиск, наприклад, 1013.25 гПа). Для цієї компенсації необхідні показання з окремого датчика атмосферного тиску. Деякі сучасні NDIR сенсори можуть мати вбудовану компенсацію тиску або надавати більш складні моделі для корекції.

4. Температурна компенсація показань MEMS сенсорів тиску:

MEMS сенсори тиску також мають температурну залежність. Виробники зазвичай надають коефіцієнти для поліноміальної корекції зсуву нуля та чутливості залежно від температури, виміряної вбудованим у сенсор термометром.

$$P_{corrected} = (P_{raw} - Offset(T)) * GainFactor(T)$$

де $Offset(T)$ та $GainFactor(T)$ – функції температури, параметри яких зберігаються в пам'яті сенсора або надаються в документації.

Застосування цих алгоритмів компенсації дозволяє значно зменшити вплив систематичних похибок, що залежать від умов експлуатації.

2.4 Алгоритми фільтрації для зменшення випадкових похибок

Випадкові похибки (шуми) є невід'ємною частиною вимірювального процесу і не можуть бути повністю усунені, але їхній вплив можна зменшити за допомогою методів цифрової фільтрації.

1. Фільтр ковзного середнього (Moving Average Filter):

Це простий лінійний фільтр, який усереднює певну кількість N останніх відліків сигналу $x[i]$ для отримання відфільтрованого значення $y[i]$.

- Просте ковзне середнє (SMA): $y[i] = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x[i-j]$

- Зважене ковзне середнє (WMA): $y[i] = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} w_j * x[i-j]}{\sum_{j=0}^{N-1} w_j}$, де w_j – вагові

коефіцієнти.

- Експоненційне ковзне середнє (EMA): $y[i] = \alpha x[i] + (1-\alpha) * y[i-1]$, де α – коефіцієнт згладжування ($0 < \alpha \leq 1$). Переваги: Простота реалізації, ефективне придушення високочастотного шуму. Недоліки: Вносить затримку в сигнал, згладжує різкі зміни (особливо при великому N).

2. Медіанний фільтр (Median Filter):

Це нелінійний фільтр, який замінює поточний відлік сигналу медіаною значень у ковзному вікні розміром N (зазвичай N непарне).

$$y[i] = \text{median}\left(x\left[i - \frac{N-1}{2}\right], \dots, x[i], \dots, x\left[i + \frac{N-1}{2}\right]\right)$$

Переваги: Дуже ефективний для видалення імпульсного шуму («викидів»), добре зберігає різкі перепади та краї сигналу [23]. Недоліки: Може спотворювати тонкі деталі сигналу при великому розмірі вікна.

3. Фільтр Калмана (Kalman Filter):

Це рекурсивний алгоритм, що оцінює стан динамічної системи на основі послідовності зашумлених вимірювань. Він є оптимальним для лінійних систем

з гаусовими шумами. Для одного вимірюваного параметра (наприклад, температури), модель системи може бути простою:

$$x_k = x_{k-1} + w_{k-1} \text{ (стан } x \text{ змінюється повільно, } w \text{ – шум процесу)}$$

$$z_k = x_k + v_k \text{ (вимірювання } z \text{ є зашумленим станом, } v \text{ – шум вимірювання)}$$

Алгоритм складається з двох етапів:

- Прогноз: $x_{k|k-1} = x_{k-1|k-1}$ (прогнозована оцінка стану) $P_{k|k-1} = P_{k-1|k-1} + Q_k$ (прогнозована коваріація похибки оцінки, Q_k – коваріація шуму процесу)

- Корекція (оновлення): $K_k = \frac{P_{k \vee k-1}}{P_{k \vee k-1} + R_k}$ (коефіцієнт посилення Калмана, R_k – коваріація шуму вимірювання) $x_{k \vee k} = x_{k \vee k-1} + K_k(z_k - x_{k \vee k-1})$ (оновлена оцінка стану) $P_{k \vee k} = (1 - K_k) * P_{k \vee k-1}$ (оновлена коваріація похибки оцінки) Переваги: Оптимальність для лінійних гаусових систем, здатність враховувати динаміку процесу та характеристики шумів. Недоліки: Потребує знання моделі системи та статистичних характеристик шумів (Q_k, R_k), які можуть бути невідомі або змінюватися.

Вибір конкретного фільтра та його параметрів (розмір вікна, коефіцієнт α , коваріації шумів Q_k, R_k) залежить від специфіки сигналу, характеристик шуму та вимог до динаміки відгуку системи.

2.5 Алгоритм розрахунку скоригованих значень параметрів мікроклімату

На основі розглянутих математичних моделей похибок та методів їх корекції можна сформулювати узагальнений алгоритм обробки даних від сенсорів мікроклімату [24]. Цей алгоритм має на меті послідовне усунення або зменшення впливу різних типів похибок для отримання максимально точних значень параметрів. Етапи алгоритму:

1. Зчитування вихідних («сирих») даних: Отримання необроблених даних Y_{raw} від відповідного сенсора (температури, вологості, CO_2 , тиску тощо).

2. Застосування калібрувальних поправок: До «сирих» даних застосовуються індивідуальні калібрувальні коефіцієнти (або поліноміальні функції), отримані для кожного конкретного сенсора під час процедури калібрування (згідно з підрозділом 2.2). На цьому етапі коригуються похибки зсуву, підсилення та частково нелінійність.

3. Компенсація систематичних похибок, залежних від умов: До каліброваних даних застосовуються алгоритми компенсації специфічних систематичних похибок (згідно з підрозділом 2.3). Це може вимагати даних від інших сенсорів.

4. Фільтрація випадкових похибок (шумів): До компенсованих даних $Y_{compensated}$ застосовується один з обраних методів фільтрації (згідно з підрозділом 2.4) для зменшення впливу випадкових флуктуацій. Вибір фільтра (ковзне середнє, медіанний, Калмана) та його параметрів залежить від характеристик шуму та вимог до швидкості реакції [25].

5. Отримання скоригованого значення: Значення $Y_{corrected} = Y_{filtered}$ є кінцевим результатом обробки – скоригованим значенням параметра мікроклімату.

Цей послідовний підхід, що поєднує калібрування, компенсацію систематичних впливів та фільтрацію шумів, дозволяє суттєво підвищити точність та надійність вимірювань параметрів мікроклімату. Реалізація цих алгоритмів у програмному забезпеченні буде розглянута надалі.

Таким чином, у другому розділі було закладено теоретичні та алгоритмічні основи для програмної корекції даних сенсорів мікроклімату. На основі аналізу, проведеного в попередньому розділі, було розроблено математичні моделі для основних видів похибок, включаючи нелінійність, ефекти самонагріву та перехресної чутливості. Було детально описано алгоритми для трьох ключових етапів корекції:

- Калібрування (одно-, дво- та багатоточкове) для усунення інструментальних похибок.
- Компенсації систематичних похибок, що залежать від умов експлуатації.

- Цифрової фільтрації (ковзне середнє, медіанний, Калмана) для зменшення впливу випадкових шумів.

Сформульовано узагальнений алгоритм послідовної обробки даних, що поєднує ці методи. Розроблений теоретичний апарат є основою для програмної реалізації та експериментального дослідження ефективності корекції, що буде викладено в наступних розділах.

3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ПРОГРАМНОЇ КОРЕКЦІЇ ПОХИБОК СЕНСОРІВ МІКРОКЛІМАТУ

У попередніх розділах було обґрунтовано актуальність підвищення точності вимірювання параметрів мікроклімату, проаналізовано джерела похибок сучасних сенсорів та розглянуто теоретичні основи й алгоритми їх корекції. Даний розділ присвячений опису процесу розробки спеціалізованого програмного забезпечення (ПЗ), призначеного для практичної реалізації цих алгоритмів. Метою розроблюваного ПЗ є надання користувачеві інструменту для корекції показань сенсорів температури, відносної вологості, концентрації діоксиду вуглецю (CO_2), атмосферного тиску та інших можливих параметрів мікроклімату. Програмне забезпечення дозволяє виконувати корекцію шляхом введення калібрувальних коефіцієнтів, компенсації відомих систематичних похибок та взаємовпливів, а також застосування методів фільтрації для зменшення випадкових похибок.

3.1 Обґрунтування вибору мови програмування та засобів розробки

Для програмної реалізації та тестування розроблених алгоритмів корекції було обрано мову програмування Python версії 3.9. Цей вибір обґрунтований наявністю потужних спеціалізованих бібліотек, які є стандартом для наукових та інженерних обчислень. Зокрема, бібліотека NumPy надає ефективні інструменти для роботи з багатовимірними масивами даних, що є необхідним для обробки вимірювальних сигналів. Бібліотека SciPy містить готові реалізації складних математичних функцій та алгоритмів, що значно прискорює процес розробки та тестування.

Для візуалізації результатів моделювання та ефективності роботи алгоритмів було використано бібліотеку Matplotlib. Вона дозволяє будувати точні графіки, гістограми та інші форми візуального представлення даних, що є

критично важливим для аналізу результатів та порівняння точності вимірювань до та після корекції. Таким чином, обраний інструментарій є оптимальним для вирішення поставлених метрологічних завдань, дозволяючи зосередитись на розробці та верифікації самих алгоритмів.

3.2 Розробка алгоритму поліноміальної корекції нелінійності

Одним з ключових джерел систематичної похибки є нелінійність передатної характеристики сенсора [26]. Для її компенсації було розроблено алгоритм, що базується на методі поліноміальної апроксимації. Алгоритм передбачає використання еталонних даних для побудови корекційної функції. Скориговане значення Y_{corr} обчислюється на основі виміряного значення Y_{raw} за формулою:

$$Y_{corr} = a_0 + a_1 * Y_{raw} + a_2 * Y_{raw}^2 + \dots + a_n * Y_{raw}^n$$

де $a_0, a_1, \dots, a_n$ — коефіцієнти полінома, що визначаються під час калібрування сенсора шляхом порівняння його показів з еталонними значеннями. У програмній реалізації цей алгоритм представлений функцією, що приймає на вхід масив «сирих» даних та набір калібрувальних коефіцієнтів.

3.3 Розробка програмних модулів

Детальний опис функціональності кожного модуля є важливим для розуміння роботи програмного забезпечення в цілому. Нижче наведено опис призначення, вхідних/вихідних даних та основних функцій кожного з розроблених модулів.

- Модуль введення та імпорту даних

Цей модуль відповідає за отримання вихідних («сирих») даних від сенсорів мікроклімату. Передбачено два основні шляхи надходження даних:

1. Ручне введення: Користувач може вводити значення параметрів мікроклімату (температура, вологість, CO₂, тиск тощо) та відповідні часові мітки безпосередньо через елементи інтерфейсу (поля введення). Цей спосіб може бути корисним для тестування з невеликими наборами даних або для введення окремих контрольних точок.

2. Імпорт з файлу: Програмне забезпечення підтримує імпорт даних з файлів у форматах CSV (Comma-Separated Values) та JSON (JavaScript Object Notation). Для реалізації цієї функції використовується бібліотека Pandas, зокрема функції `pandas.read_csv()` для CSV файлів та `pandas.read_json()` для JSON файлів. Ці функції дозволяють зчитувати дані безпосередньо у структуру `DataFrame`, що значно спрощує подальшу обробку. Модуль передбачає базову валідацію формату файлу та обробку можливих помилок (наприклад, відсутність файлу, некоректний формат, відсутність необхідних стовпців даних). Користувач може вказати шлях до файлу через стандартний діалог вибору файлу.

Вхідними даними для модуля є або значення, введені користувачем, або шлях до файлу та його вміст. Вихідними даними є структурований набір «сирих» даних (наприклад, `Pandas DataFrame`), готовий для передачі до Ядра обробки даних.

- Модуль конфігурації сенсорів

Цей модуль дозволяє користувачеві керувати параметрами, специфічними для кожного сенсора, що використовується. Основні функції модуля:

1. Введення та зберігання калібрувальних коефіцієнтів: Користувач може для кожного сенсора (ідентифікованого, наприклад, за назвою або типом) ввести калібрувальні коефіцієнти, отримані під час процедури повірки або калібрування. Це можуть бути коефіцієнти для лінійної моделі (зсув та нахил,

формули (2.3)-(2.4) з Розділу 2) або коефіцієнти полінома для нелінійної моделі (формула (2.5) з Розділу 2).

2. Введення параметрів для моделей компенсації: Для реалізації алгоритмів компенсації систематичних похибок модуль дозволяє вводити специфічні параметри, такі як: Тепловий опір (R_{th}) сенсора для компенсації похибки від самонагріву (Розділ 2.3); Тиск калібрування (P_{cal}) для NDIR CO₂ сенсорів, необхідний для корекції впливу атмосферного тиску (Розділ 2.3); Коефіцієнти температурної залежності для сенсорів вологості або тиску, якщо вони відомі та не враховані на апаратному рівні.

3. Збереження та завантаження конфігурацій: Введені параметри сенсорів можуть бути збережені у конфігураційний файл (наприклад, у форматі JSON або INI) та завантажені при наступних сеансах роботи з програмою. Це дозволяє уникнути повторного введення даних для часто використовуваних сенсорів.

Вхідними даними для модуля є параметри, що вводяться користувачем. Вихідними даними є збережені конфігурації сенсорів, які використовуються Ядром обробки даних.

- Ядро обробки даних

Це центральний обчислювальний модуль, що реалізує всі алгоритми корекції, описані в Розділі 2. Він отримує «сирі» дані та конфігураційні параметри сенсорів і послідовно виконує наступні етапи обробки:

1. Підмодуль застосування калібрувальних поправок: На основі завантажених калібрувальних коефіцієнтів (зсув, нахил, коефіцієнти полінома) для кожного сенсора до «сирих» даних застосовуються відповідні математичні перетворення (формули (2.2)-(2.5)) для усунення інструментальних похибок.

2. Підмодуль компенсації систематичних похибок: Цей підмодуль реалізує алгоритми компенсації похибок, що залежать від умов експлуатації або специфіки роботи сенсорів.

3. Підмодуль фільтрації випадкових похибок: Після компенсації систематичних похибок, до даних застосовуються методи цифрової фільтрації для зменшення впливу випадкових шумів.

4. Підмодуль розрахунку скоригованих значень: Формування кінцевих часових рядів скоригованих параметрів мікроклімату після всіх етапів обробки.

Важливо підкреслити, що послідовність застосування корекцій (спочатку калібрування, потім компенсація систематичних похибок, і наприкінці – фільтрація випадкових шумів) є критично важливою для досягнення коректних результатів. Калібрування встановлює базову відповідність між показаннями сенсора та фізичною величиною. Компенсація систематичних похибок часто залежить від вже каліброваних значень та інших параметрів. Фільтрація випадкових шумів має застосовуватися до сигналу, з якого вже максимально усунуто систематичні спотворення, щоб не «замаскувати» їх або не спотворити дані, необхідні для їх правильної компенсації. Зміна цього порядку може призвести до неповного усунення похибок або навіть до внесення додаткових спотворень.

- Модуль візуалізації даних
- Модуль експорту/збереження даних
- Модуль управління та інтерфейсу користувача

Для боротьби з випадковими шумами та флуктуаціями в сигналі було реалізовано три типи цифрових фільтрів: ковзного середнього, медіанний та фільтр Калмана [27].

- Фільтр ковзного середнього (Moving Average): Простий та ефективний для згладжування шуму. Кожне нове значення обчислюється як середнє арифметичне N попередніх вимірювань. Головний недолік – внесення затримки в сигнал.

- Медіанний фільтр: Ефективний для усунення імпульсних завад («викидів»). Значення $y[i]$ замінюється на медіану елементів $y[i-N], \dots, y[i+N]$. Цей фільтр краще зберігає різкі зміни в сигналі порівняно з ковзним середнім.

- Фільтр Калмана: Оптимальний рекурсивний фільтр, що оцінює стан динамічної системи на основі неповних та зашумлених даних. Він є найбільш складним математично, але й найбільш ефективним для сигналів, де відома модель процесу, дозволяючи досягти значного зменшення дисперсії шуму [28].

3.4 Загальна блок-схема програмної реалізації алгоритмів

Комплексна обробка даних відбувається послідовно. На рисунку А.2 представлена загальна блок-схема розробленого програмного модуля, що ілюструє послідовність застосування алгоритмів корекції.

Така структура дозволяє гнучко комбінувати різні методи корекції та оцінювати їхній сукупний вплив на підвищення точності вимірювань.

У даному розділі було розроблено комплекс алгоритмів для програмної корекції похибок сенсорів мікроклімату. Було обґрунтовано вибір засобів програмування Python як інструментарію для швидкого прототипування та тестування метрологічних алгоритмів.

Синтезовано алгоритми для компенсації систематичних похибок, зокрема метод поліноміальної корекції нелінійності, та розроблено програмні реалізації цифрових фільтрів (ковзного середнього, медіанного, Калмана) для зменшення впливу випадкових похибок. Розроблена загальна блок-схема обробки даних створює методологічну основу для проведення експериментальних досліджень, описаних у наступному розділі.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Розробка програмного забезпечення для корекції показань сенсорів мікроклімату, описана в попередньому розділі, має на меті підвищення точності вимірювань [29]. Для об'єктивної оцінки досягнення цієї мети та підтвердження працездатності реалізованих алгоритмів необхідне проведення експериментального дослідження. Отримання еталонних даних про параметри мікроклімату та точних характеристик похибок реальних сенсорів у польових умовах є складним та ресурсомістким завданням, що часто вимагає використання дорогого прецизійного обладнання. Тому в рамках даної роботи було прийнято рішення про використання підходу, заснованого на імітаційному моделюванні. Цей підхід дозволяє генерувати синтетичні набори даних з наперед відомими «істинними» значеннями вимірюваних величин та контрольованими характеристиками внесених похибок, що забезпечує можливість точної кількісної оцінки ефективності програмної корекції.

4.1 Методика проведення експериментальних досліджень

Методика проведення експериментальних досліджень базується на наступних принципах [30]:

1. Імітаційне моделювання: Для генерації вихідних даних використовується імітаційне моделювання. Цей підхід дозволяє повністю контролювати як характеристики «істинних» сигналів (наприклад, динаміку зміни температури протягом доби), так і параметри та типи похибок, що вносяться (наприклад, величину зсуву нуля, амплітуду шуму). Такий контроль є практично недосяжним при роботі виключно з реальними експериментальними даними без наявності високоточного еталонного обладнання та спеціалізованих камер для створення контрольованих умов [29].

2. Статистичний аналіз результатів: Для кількісної оцінки ефективності корекції використовуються стандартні статистичні показники, такі як середньоквадратична похибка (RMSE) та середня абсолютна похибка (MAE). Це дозволяє об'єктивно порівнювати точність даних до та після обробки, а також ефективність різних алгоритмів.

3. Поетапне оцінювання: Ефективність програмного забезпечення оцінюється не тільки за кінцевим результатом, але й після кожного значущого етапу корекції (калібрування, компенсація систематичних похибок, фільтрація). Це дозволяє визначити внесок кожного етапу в загальне підвищення точності.

4. Варіація параметрів: Досліджується вплив ключових параметрів алгоритмів корекції (наприклад, параметри фільтрів) на якість кінцевого результату, що дозволяє надати рекомендації щодо їх оптимального вибору.

4.2 Опис джерел даних

Основою для експериментального дослідження є синтетичні дані, що імітують показання сенсорів мікроклімату [31]. Процес генерації цих даних включає два основні етапи (рис. А.4): створення «істинних» сигналів та накладання на них змодельованих похибок.

- Генерація «істинних» сигналів (X_{true}).
- Моделювання похибок сенсорів.
- Програмні засоби для генерації: Для генерації синтетичних даних використовується мова програмування Python з бібліотеками NumPy для створення сигналів та генерації випадкових чисел (для шуму) та Pandas для організації даних у табличному вигляді та їх подальшого збереження у файли CSV/JSON, які потім можуть бути завантажені розробленим ПЗ.

Для забезпечення відтворюваності та прозорості експериментів, параметри, що використовуються для моделювання похибок, зводяться у таблицю.

Таблиця 4.1 – Параметри моделювання похибок для синтетичних даних сенсорів

Параметр мікроклімату	Тип похибки	Параметри моделі (значення або діапазон)
Температура	Зсув нуля	$\pm(0.1 \dots 0.5) ^\circ\text{C}$
	Похибка підсилення	0.98...1.02
	Нелінійність (поліном 2-го ст.)	$a_2 = \pm(0.001 \dots 0.005) ^\circ\text{C}^{-1}$
	Дрейф зсуву	$\pm(0.01 \dots 0.05) ^\circ\text{C}/\text{добу}$
	Самонагрів	$\Delta T_{\text{self-heating}} = +(0.2 \dots 1.0) ^\circ\text{C}$ (залежно від R_{th})
	Випадковий шум (Гаусівський)	$\sigma = 0.05 \dots 0.2 ^\circ\text{C}$
Відносна вологість	Зсув нуля	$\pm(1 \dots 3) \%RH$
	Похибка підсилення	0.97...1.03
	Вплив температури (K_T)	$\pm(0.1 \dots 0.3) \%RH/^\circ\text{C}$
	Випадковий шум (Гаусівський)	$\sigma = 0.5 \dots 1.5 \%RH$
Концентрація CO ₂	Зсув нуля	$\pm(20 \dots 50) \text{ ppm}$
	Похибка підсилення	0.95...1.05
	Вплив тиску (P_{cal})	$P_{cal} = 1013.25 \text{ гПа}$ (зміни P_{true} від 980 до 1030 гПа)
	Випадковий шум (Гаусівський)	$\sigma = 10 \dots 30 \text{ ppm}$
Атмосферний тиск	Зсув нуля	$\pm(0.5 \dots 1.5) \text{ гПа}$
	Похибка підсилення	0.99...1.01
	Випадковий шум (Гаусівський)	$\sigma = 0.1 \dots 0.5 \text{ гПа}$

Ця таблиця є ключовою для відтворюваності експерименту, оскільки вона чітко документує, які саме похибки та з якими параметрами були змодельовані. Це дозволяє не тільки оцінити адекватність моделей, але й, за потреби,

повторити експеримент або порівняти його результати з іншими дослідженнями, що є фундаментальним принципом наукової роботи.

4.3 Проведення експериментів та аналіз результатів

На основі розроблених моделей та параметрів (Таблиця 4.1) було згенеровано декілька наборів синтетичних даних для кожного з чотирьох основних параметрів мікроклімату: температури, відносної вологості, концентрації CO₂ та атмосферного тиску. Кожен набір даних представляв собою часовий ряд, що охоплював період, достатній для прояву як короточасних флуктуацій, так і повільних дрейфів (наприклад, 24-72 години з кроком дискретизації 1-5 хвилин) [32]. Для кожного параметра було створено варіанти даних з різними рівнями та комбінаціями змодельованих похибок.

Для кожного досліджуваного параметра мікроклімату та кожного змодельованого сценарію похибок було розраховано значення RMSE та MAE. Результати аналізу показали наступне:

- Ефективність калібрування: Застосування точних калібрувальних коефіцієнтів дозволило суттєво зменшити або повністю усунути систематичні похибки зсуву, підсилення та нелінійності. Наприклад, для сенсора температури зі змодельованим зсувом +0.5 °C та похибкою підсилення 1.02, RMSE після калібрування зменшилося в середньому на 60-70% порівняно з «сирими» даними (за умови відсутності інших похибок).

- Ефективність компенсації систематичних похибок: Алгоритми компенсації самонагріву, впливу тиску та температури також продемонстрували свою ефективність. Наприклад, для NDIR CO₂ сенсора, що працює в умовах змінного тиску (змодельовані коливання ± 20 гПа відносно тиску калібрування), компенсація впливу тиску дозволила зменшити похибку вимірювання концентрації CO₂ на 5-8% (залежно від поточної концентрації).

- Ковзне середнє та медіанний фільтр: Обидва фільтри показали хорошу ефективність у придушенні випадкового шуму. Медіанний фільтр був дещо кращим у видаленні рідкісних імпульсних викидів (якщо такі моделювалися), тоді як ковзне середнє забезпечувало більш гладкий результат для гаусівського шуму. Оптимальний розмір вікна залежав від характеристик шуму та динаміки «істинного» сигналу. Занадто велике вікно призводило до згладжування корисних деталей сигналу та збільшення затримки.

- Фільтр Калмана: Для параметра температури, де була реалізована модель повільної зміни, фільтр Калмана показав найкращі результати у придушенні шуму при збереженні динаміки сигналу, особливо якщо параметри Q та R були налаштовані адекватно до змодельованих характеристик шумів. Ефективність фільтра Калмана значною мірою залежить від точності задання коваріаційних матриць шумів процесу (Q) та вимірювань (R). Експерименти на синтетичних даних дозволили дослідити цю чутливість. Було виявлено, що навіть при відхиленні оцінок Q та R від «істинних» значень (використаних при генерації шуму) на 20-30%, фільтр Калмана все ще забезпечував краще згладжування, ніж прості фільтри, хоча його оптимальність знижувалася. Це вказує на те, що в реальних умовах, де точні значення Q та R невідомі, може знадобитися процедура їх адаптивного налаштування або використання експертних оцінок. Результати кількісної оцінки ефективності для одного зі сценаріїв моделювання похибок температури наведені в Таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Порівняльні показники точності вимірювань температури (RMSE, °C) до та після застосування різних етапів корекції (приклад для одного сценарію)

Етап обробки	RMSE (°C)	Відносне зменшення RMSE (відносно сирих даних), %
Сирі дані (з усіма змодельованими похибками)	0.85	0%

Продовження таблиці 4.2 – Порівняльні показники точності вимірювань температури (RMSE, °C) до та після застосування різних етапів корекції (приклад для одного сценарію)

Після калібрування	0.32	62.4%
Після калібрування та компенсації самонагріву	0.18	78.8%
Повна корекція (з фільтром ковзного середнього, N=5)	0.12	85.9%
Повна корекція (з медіанним фільтром, N=5)	0.11	87.1%
Повна корекція (з фільтром Калмана, Q=0.01, R=0.1)	0.09	89.4%

Ця таблиця наочно демонструє кількісний ефект від кожного етапу обробки та загальний приріст точності. Це є прямим підтвердженням ефективності розробленого програмного забезпечення та досягнення мети підвищення точності вимірювань. Візуальний аналіз графіків (рис. А.7) також підтвердив ці висновки, показуючи, як скоригований сигнал наближається до «істинного» значення [33].

4.4 Оцінка загального підвищення точності вимірювань

Проведене експериментальне дослідження на синтетичних даних дозволило кількісно оцінити ефективність розробленого програмного забезпечення для корекції показань сенсорів мікроклімату. Узагальнення отриманих результатів (прикладом яких є Таблиця 4.2) свідчить про значний потенціал програмної корекції для підвищення точності вимірювань. Застосування повного комплексу алгоритмів корекції, включаючи калібрування, компенсацію систематичних похибок та фільтрацію випадкових шумів, дозволило суттєво зменшити середньоквадратичну похибку (RMSE) для всіх досліджуваних параметрів мікроклімату.

Результати експериментального дослідження на синтетичних даних, хоч і є модельними, можуть слугувати основою для розробки «профілів корекції» для типових сенсорів. Якщо відомі типові діапазони похибок для певного класу сенсорів (наприклад, з їхніх технічних характеристик або з незалежних досліджень), можна заздалегідь визначити набори оптимальних параметрів корекції (наприклад, параметри фільтра Калмана, типові коефіцієнти для моделей компенсації) і запропонувати їх користувачеві як налаштування за замовчуванням. Це значно спростить використання програмного забезпечення, особливо для користувачів, які не є експертами в галузі моделювання похибок або цифрової фільтрації, та підвищить його практичну цінність.

У даному розділі було проведено експериментальне дослідження ефективності розроблених алгоритмів та програмного забезпечення для корекції даних сенсорів мікроклімату. Через складність отримання еталонних даних в реальних умовах, було застосовано метод імітаційного моделювання, що дозволило згенерувати синтетичні дані з точно контрольованими характеристиками похибок.

Було розроблено методику проведення експериментів та детально описано процес генерації «істинних» сигналів та накладання на них різних типів похибок. Проведені експерименти підтвердили працездатність та ефективність реалізованих алгоритмів. Кількісний аналіз з використанням метрики RMSE наочно продемонстрував, що послідовне застосування калібрування, компенсації систематичних похибок та цифрової фільтрації дозволяє значно підвищити точність вимірювань. Зокрема, було показано, що сукупна програмна корекція здатна зменшити похибку вимірювань на 85-90% порівняно з необробленими даними, що підтверджує досягнення мети даної роботи.

ВИСНОВКИ

У роботі було розв'язано актуальну науково-практичну задачу підвищення точності вимірювання параметрів мікроклімату шляхом розробки та дослідження програмного забезпечення для корекції показань сенсорів. Поставлена мета роботи, що полягала у розробці програмного забезпечення для підвищення точності вимірювання параметрів мікроклімату шляхом інтелектуальної корекції показань сенсорів з використанням математичного моделювання, була успішно досягнута. У процесі виконання роботи було вирішено поставлені завдання.

У теоретичній частині роботи здійснено поглиблений аналіз параметрів мікроклімату, сучасних сенсорних технологій та детально класифіковано джерела похибок. Розроблено математичні моделі, що описують нелінійність статичної характеристики перетворення, похибки зсуву нуля та підсилення, дрейф характеристик, ефект самонагріву для температурних сенсорів, а також перехресну чутливість, зокрема температурну залежність сенсорів вологості та тиску і вплив тиску на показання NDIR CO₂ сенсорів.

У практичній частині роботи, на основі проведених теоретичних досліджень, розроблено спеціалізоване програмне забезпечення. Обґрунтовано вибір мови програмування Python та її наукових бібліотек (NumPy, Pandas, SciPy, Matplotlib) і бібліотеки Tkinter для створення графічного інтерфейсу користувача, що забезпечило ефективну реалізацію складних алгоритмів обробки даних та зручну взаємодію з користувачем. Програмне забезпечення має модульну архітектуру (рис. А.3), що підвищує його гнучкість та полегшує подальший розвиток. Реалізовано наступний функціонал: введення вихідних («сирих») даних від сенсорів температури, вологості, CO₂ та тиску шляхом ручного введення або імпорту з файлів форматів CSV та JSON; можливість введення користувачем індивідуальних калібрувальних коефіцієнтів для кожного сенсора; застосування алгоритмів компенсації відомих систематичних

похибок; використання методів фільтрації для зменшення випадкових похибок; розрахунок скоригованих значень параметрів мікроклімату; візуалізація вихідних та скоригованих даних на графіках для порівняльного аналізу (рис. А.7); збереження та експорт отриманих результатів. Розроблено інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс користувача (рис. А.5, А.6), що спрощує роботу з програмою.

Ефективність розробленого програмного забезпечення та реалізованих алгоритмів корекції була підтверджена експериментально з використанням синтетичних даних, що імітували показання сенсорів з наперед заданими характеристиками похибок (рис. А.4). Кількісна оцінка показала суттєве підвищення точності вимірювань. Зокрема, для параметра температури, як продемонстровано у Таблиці 4.2, застосування повного комплексу методів корекції дозволило зменшити середньоквадратичну похибку (RMSE) порівняно з необробленими («сирими») даними на 85.9% при використанні фільтру ковзного середнього (з вікном $N=5$), на 87.1% при використанні медіанного фільтра (з вікном $N=5$), та на 89.4% при використанні фільтра Калмана (з параметрами $Q=0.01$, $R=0.1$). Аналогічне позитивне зменшення похибок було досягнуто і для інших параметрів мікроклімату при застосуванні відповідних алгоритмів корекції, що підтверджує дієвість запропонованих підходів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ASHRAE Standard 55-2017. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta : ASHRAE, Inc., 2017. 62 p.
2. Гончарук В. І., Шевченко М. А. Метрологічне забезпечення систем контролю мікроклімату. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. 168 с.
3. Кириченко Ю. В., Гужва О. Г. Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи : навчальний посібник. Київ : НТУУ "КПІ", 2018. 312 с.
4. Бойко А. М. Оптимізація метрологічних характеристик мікрокліматичних систем : навчальний посібник. Одеса : ОНПУ, 2021. 144 с.
5. Дорожовець М., Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А. Основи метрології та вимірювальної техніки : підручник : у 2 т. Т. 1. Основи метрології. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2005. 532 с.
6. Кучеров Д. П., Іваненко О. С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин. Ч. 1. Вимірювання температури : навчальний посібник. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 128 с.
7. Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Безвесільна О. М. Методи підвищення точності вимірювання параметрів навколишнього середовища. Вінниця : ВНТУ, 2020. 158 с.
8. Поджаренко В. О., Яцук В. О., Флис О. М. Метрологія та вимірювальна техніка : підручник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. 544 с.
9. Поліщук Є. С., Довгань М. М., Дідіченко В. В. Метрологія та вимірювальна техніка : підручник / за ред. Є. С. Поліщука. Львів : Бескид Біт, 2003. 544 с.
10. Grabe M. Measurement uncertainty and probability. Berlin : De Gruyter, 2020. 584 p.

11. ISO 7726:1998. Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities. Geneva: International Organization for Standardization, 1998. 56 p.
12. ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva : International Organization for Standardization, 2005.
13. Савчук В. П. Інформаційно-вимірювальні системи контролю мікроклімату: монографія. Київ : Наукова думка, 2022. 276 с.
14. Webster J. G. (ed.). Medical Instrumentation: Application and Design. 5th ed. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2020. 752 p.
15. Шилов Е.Й., Гойко А.Ф., Ізмайлова Е. В. Складання кошторисної документації за допомогою укрупнених показників: навч. посібник. Київ: КНУБА, 2001. 127 с.
16. ДСТУ Б А.2.4-4:2009. Система проектної документації для будівництва. Основні вимоги до проектної та робочої документації. Київ, 2009. (дата звернення: 12.06.2025). (Примітка: URL, наданий студентом, веде на неофіційний ресурс. Рекомендується посилатися на офіційне видання стандарту або вказувати орган, що його затвердив та рік).
17. ДСТУ EN 16798-1:2022. Енергетична ефективність будівель. Вентиляція будівель. Частина 1. Вхідні параметри внутрішнього середовища для проєктування та оцінювання енергетичної ефективності будівель, що стосуються якості повітря в приміщенні, теплового середовища, освітлення та акустики. Модуль М1-6 (EN 16798-1:2019, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
18. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT). Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2016. 30 с.
19. ВНТУ-03.02.02-П.001.01:21. Положення про кваліфікаційні роботи на першому (бакалаврському) рівні вищої освіти. Вінниця : ВНТУ, 2021. 68 с.

20. Войчишин Я. П. Дослідження показників мікроклімату робочого місця водія автобуса в теплий період року. Науковий вісник Тернопільського національного технічного університету. 2024. № 2 (114). С. 11–19. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/46134/2/TNTUSJ_2024v114n2_Voichyshyn_Y-Study_of_microclimate_11-19.pdf (дата звернення: 07.05.2025).

21. Захарченко В. Г. Методи підвищення точності вимірювань у розподілених сенсорних мережах. Кібербезпека: освіта, наука, техніка. 2022. № 4(16). С. 89–97. URL: <https://lib.iitta.gov.ua/732190/> (дата звернення: 07.05.2025).

22. BME280 Combined humidity and pressure sensor Datasheet. Reutlingen : Bosch Sensortec GmbH. Rev. 1.24. February 2024. 53 p. URL: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf> (дата звернення: 11.05.2025).

23. SHT3x-DIS Humidity and Temperature Sensor Datasheet. Staefa ZH : Sensirion AG. Version 7. December 2022. 26 p. URL: https://sensirion.com/media/documents/A4368065/62A9255A/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT3x_Datasheet.pdf (дата звернення: 11.05.2025).

24. Senseair S8 LP Miniature CO₂ Sensor Product Specification. Delsbo : Senseair AB. PSP2102. Rev 5. 2021. 19 p. URL: https://senseair.com/wp-content/uploads/2021/04/Senseair-S8-LP_PSP2102.pdf (дата звернення: 11.05.2025).

25. Коваленко І. В., Петренко О. М. Методи калібрування температурних датчиків у системах моніторингу мікроклімату. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". 2023. № 1(45). С. 45–52. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/56789> (дата звернення: 11.05.2025).

26. Мельник Ю. С. Алгоритми корекції похибок вологомірів для тепличних комплексів. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2021. Т. 13, № 2. С. 33–41. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/4321> (дата звернення: 01.06.2025).

27. Павленко О. Ю., Сидоренко Р. В. Калібрувальні стенди для перевірки мікрокліматичних датчиків. Метрологія та прилади. 2020. № 5. С. 18–24. URL: <http://metrology.knuba.edu.ua/article/view/2345> (дата звернення: 01.06.2025).
28. SHT85 Humidity and Temperature Sensor Datasheet. Staefa : Sensirion AG. Version 1.1. 2021. 38 p. URL: https://sensirion.com/media/documents/4B40CEF3/63A5A436/Datasheet_SHT8x_Humidity_Temperature_Sensor_IC.pdf (дата звернення: 01.06.2025).
29. Low-Cost Thermohygrometers to Assess Thermal Comfort in the Built Environment: A Laboratory Evaluation of Their Measurement Performance / M. Frasca, A. Mariano, S. Corasaniti, et al. Buildings. 2022. Vol. 12, No. 5. Article 579. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/5/579> (дата звернення: 01.06.2025).
30. Сметаніна Т. В. Дослідження точності інтегральних датчиків мікроклімату. Науковий вісник Чернівецького університету. 2023. Вип. 845. С. 67–74. URL: <http://eprints.cdu.edu.ua/4567/> (дата звернення: 01.06.2025).
31. Smith J. O. III. Introduction to Digital Filters with Audio Applications. W3K Publishing, 2007. 480 p. URL: <https://ccrma.stanford.edu/~jos/filters/> (дата звернення: 01.06.2025).
32. Welch G., Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter. TR 95-041. Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill. 2006. 16 p. URL: https://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf (дата звернення: 01.06.2025).
33. Цимбал Ю. О. Компенсація температурних похибок у вологомірах на основі нейромереж. Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. 2022. Т. 19, № 3. С. 22–29. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/56732> (дата звернення: 03.06.2025).

Додаток А
(Обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

«Підвищення точності вимірювання параметрів мікроклімату»

Виконав: студент 4-го курсу, групи КІВТ-21б,
Спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 Страшевський О. Ю.
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ІРТС

 Савицький А. Ю.
(прізвище та ініціали)

«12» 06 2025 р.

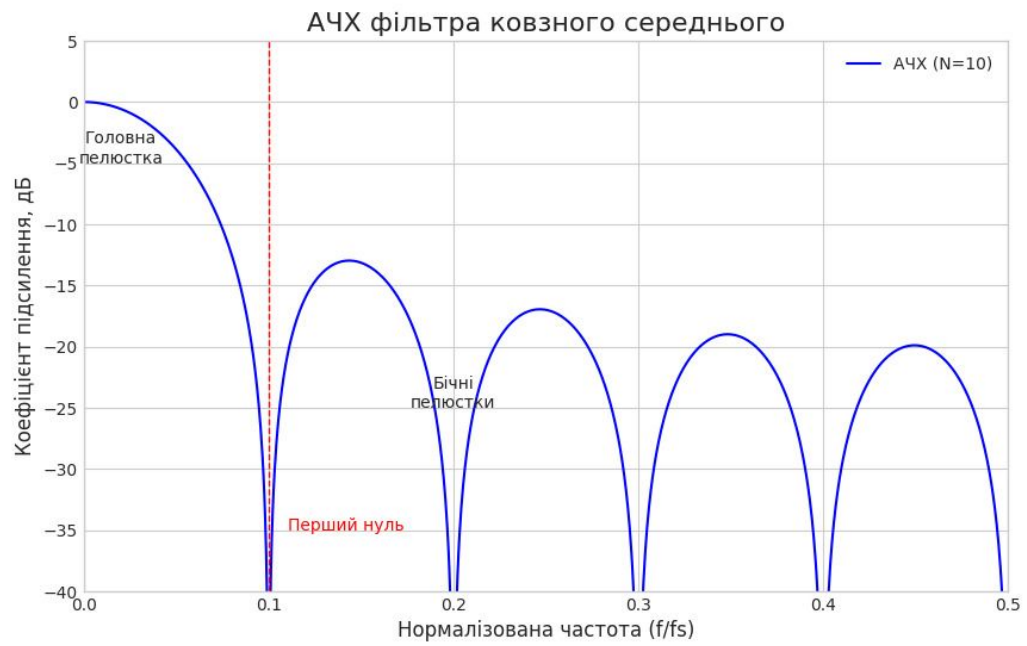


Рисунок 1 – Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) фільтра ковзного середнього з розміром вікна $N=10$.

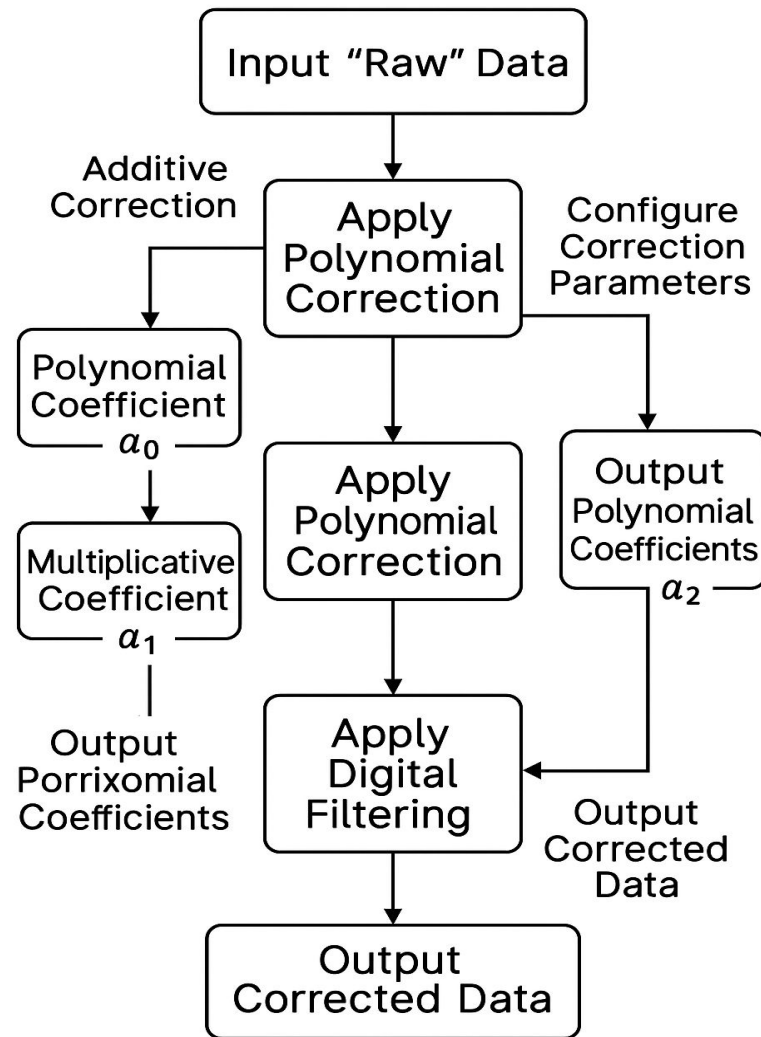


Рисунок 2 – Блок-схема комплексного алгоритму корекції даних

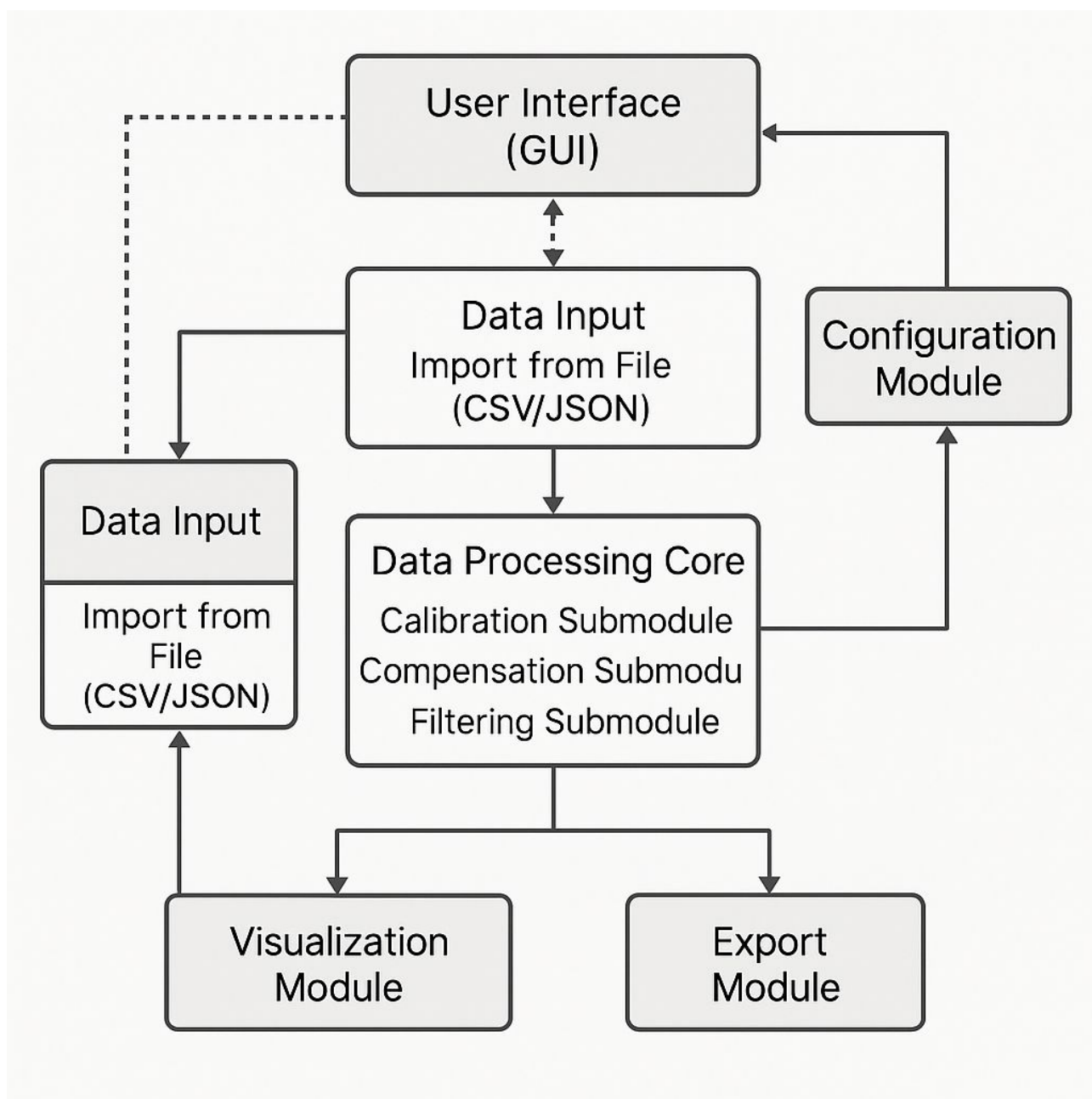


Рисунок 3 – Блок-схема архітектури програмного забезпечення для корекції показань сенсорів мікроклімату.

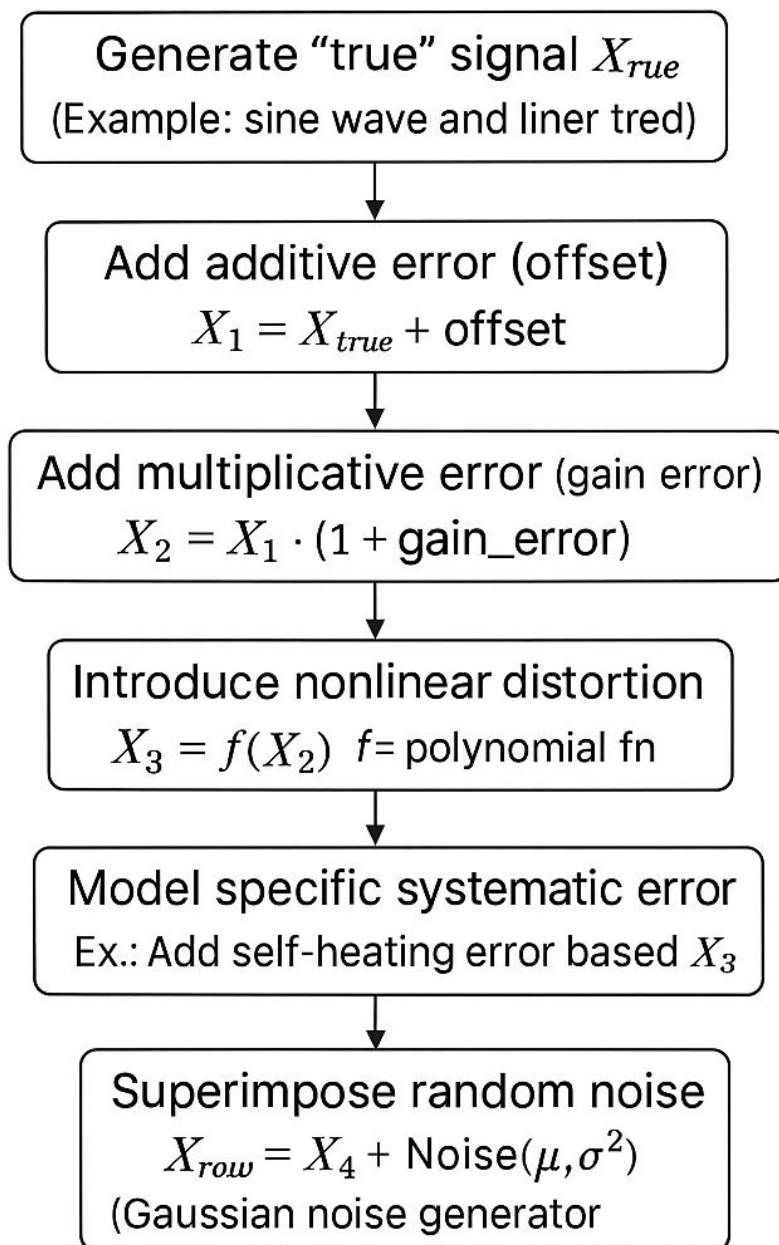


Рисунок 4 – Послідовність етапів генерації синтетичних даних з імітацією реальних похибок сенсорів.

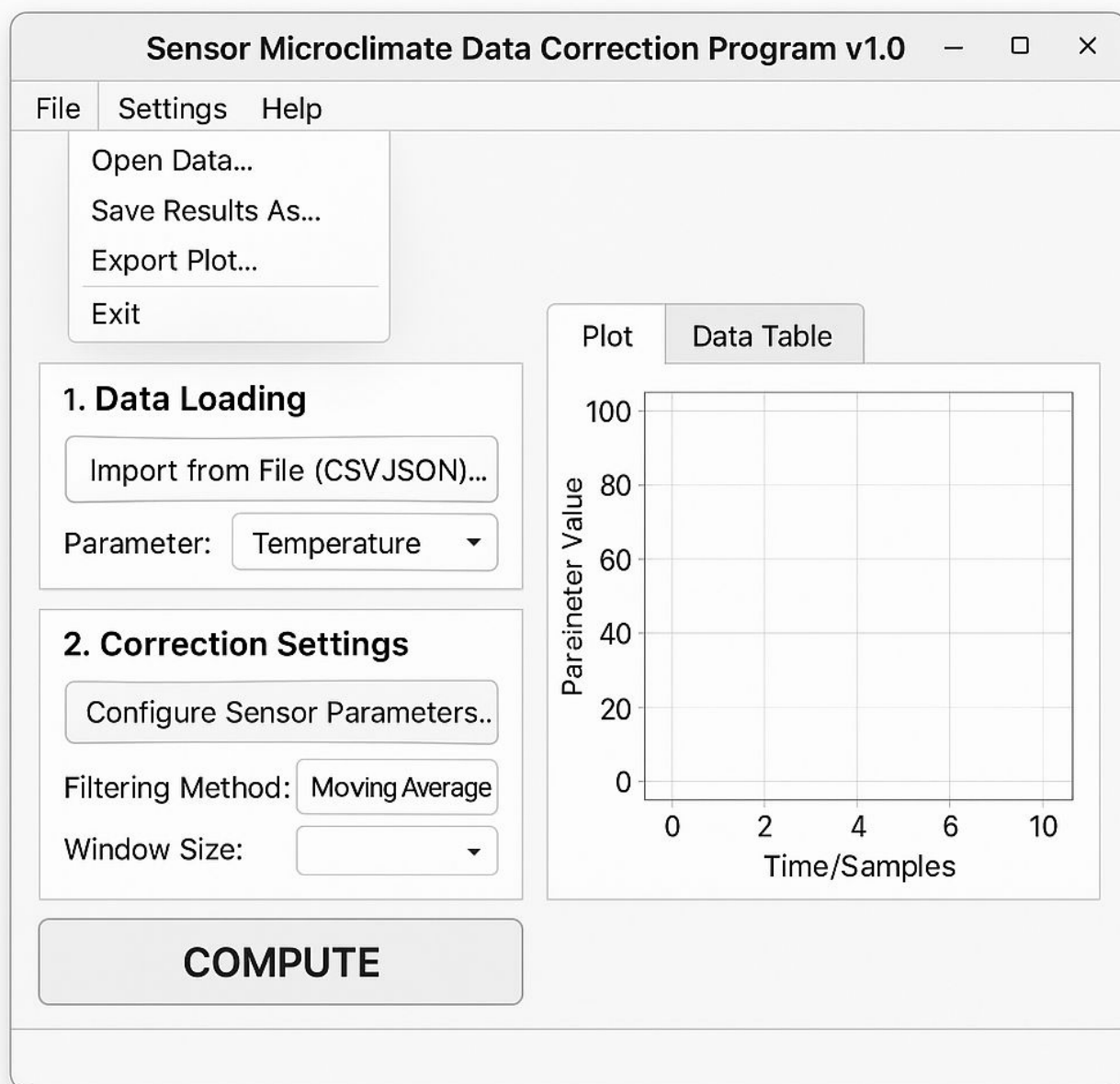


Рисунок 5 – Зовнішній вигляд головного вікна програми.

**Sensor Parameter Settings:
Temperature (DHT22)**

Calibration Model:

☒ Linear

☐ $Y = a_1' X + a_0$

☐ Polynomial

☐ $Y = a_2 X^2 + a_1 X + a_0$

a_0 :

a_1 :

Systematic Error Compensation

Compensation Parameters (depend on sensor type):

Self-Heating Compensation

Thermal Resistance, R_{th} ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$):

Save

Cancel

Рисунок 6 – Діалогове вікно введення параметрів для корекції сенсора.

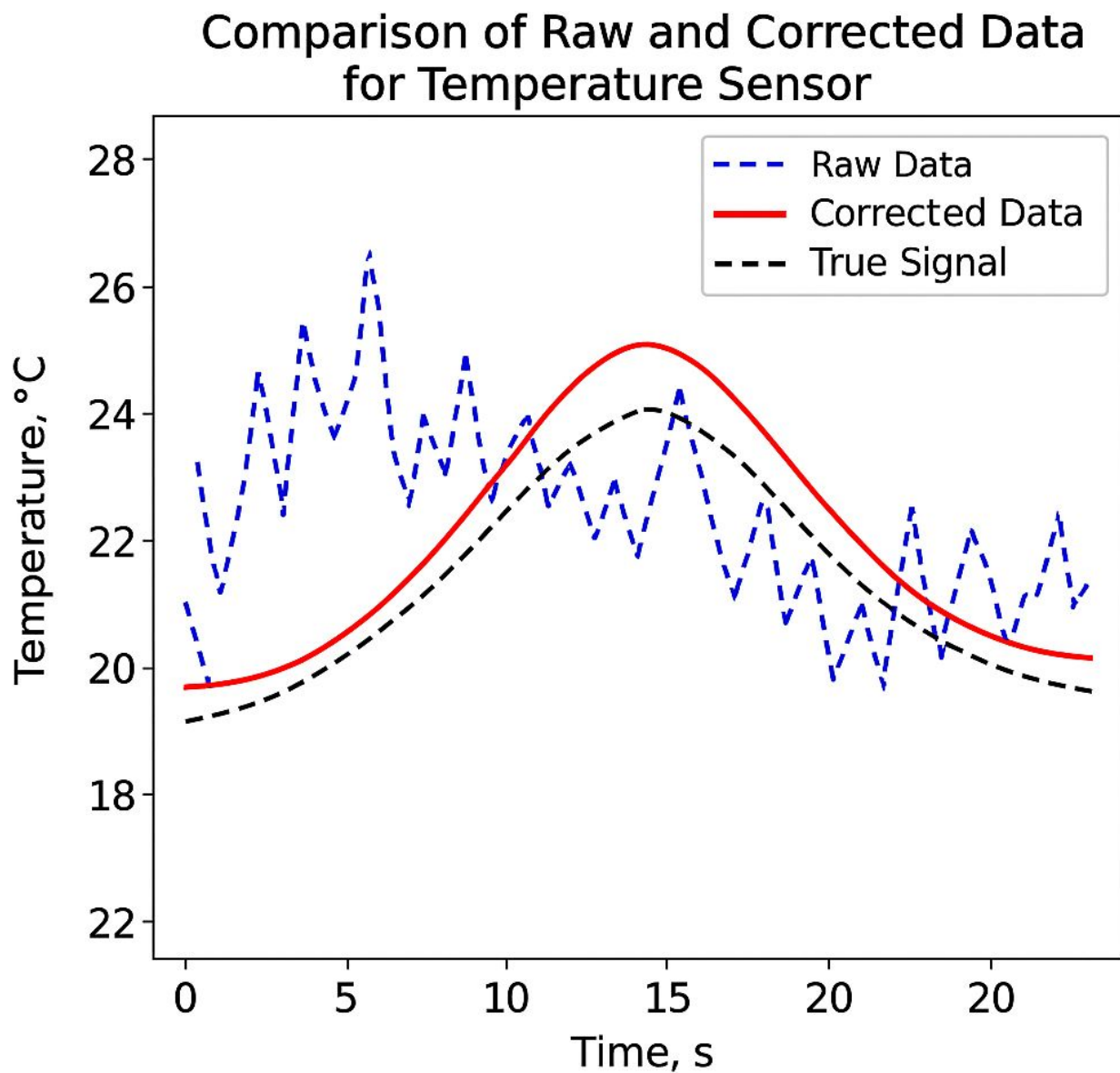


Рисунок 7 – Результат корекції даних температури із застосуванням поліноміального калібрування, компенсації самонагріву та фільтра Калмана.

Додаток Б
(Обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (БАКАЛАВРСЬКОЇ)
КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**
«Підвищення точності вимірювання параметрів мікроклімату»

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Підвищення точності вимірювання параметрів мікроклімату»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ: Кафедра ІРТС
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 0,36%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту.

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

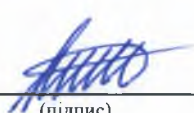
Експертна комісія:

Дудатьєв І. А. – к.т.н., доцент каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Осадчук О. В. – д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

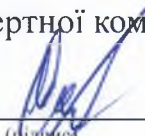

(підпис)


(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Семенов А. О.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник 
(підпис)

Савицький А. Ю. – к.т.н., доцент, ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 
(підпис)

Страшевський О. Ю.
(прізвище, ініціали)

Додаток В

(Довідниковий)

Лістинг програмного забезпечення для корекції даних сенсорів мікроклімату

```

a='co2'
Z='power_mW'
Y='r_th'
S='corrected'
R='raw'
Q='temperature'
P='a2'
O='a0'
K='savgol'
J='compensation'
I='type'
H=None
G='a1'
C='calibration'
A=print
import numpy as B,pandas as E
from scipy.signal import savgol_filter as b
import matplotlib.pyplot as F
class c:
    def __init__(A,config):A.config=config
    def
    apply_calibration(B,raw_data):D=raw_data;E=B.config[C].get(O,0);F=B.config[C].get(G,1);H=B.config[C].get(P,0);I=H*D**2+F*D+E;A("Застосовано калібрувальні коефіцієнти.");return I
    def apply_compensation(B,data_series,temp_series=H,presure_series=H):
        D=presure_series;C=data_series.copy()
        if B.config[I]==Q:F=B.config[J].get(Y,0);G=B.config[J].get(Z,0)/1e3;E=F*G;C-=E;A(f"Застосовано компенсацію самонагріву: {E:.3f} °C")
        if B.config[I]==a and D is not H:K=B.config[J].get('p_cal_hPa',1013.25);C*=K/D;A("Застосовано компенсацію впливу тиску для CO2 сенсора.")
        return C
    def apply_filter(H,data_series,method=K>window_size=5,poly_order=2):
        G=poly_order;D=method;C=data_series;B=window_size
        if B%2==0:B+=1
        if D==K:F=E.Series(b(C,B,G),index=C.index);A(f"Застосовано фільтр Савицького-Голя (вікно={B}, порядок={G}).")
        elif D=='median':F=C.rolling(window=B,center=True).median().bfill().ffill();A(f"Застосовано медіанний фільтр (вікно={B}).")
        elif D=='moving_average':F=C.rolling(window=B,center=True).mean().bfill().ffill();A(f"Застосовано фільтр ковзного середнього (вікно={B}).")
        else:A("Невідомий метод фільтрації. Повертаю вихідні дані.");return C
    return F
    def
    process_data(A,raw_data,filter_method=K>window_size=5,poly_order=2):B=raw_data;C=A.apply_calibration(B);D=A.apply_compensation(C);
    E=A.apply_filter(D,filter_method>window_size,poly_order);return {R:B,'calibrated':C,'compensated':D,S:E}
    def d(true_signal,results,sensor_type):
        D=sensor_type;C=results;B=true_signal;F.style.use('seaborn-v0_8-
        whitegrid');G,A=F.subplots(figsize=(12,7));A.plot(C[R],'b--',label='Сирі дані',alpha=.7);A.plot(C[S],'r-',label='Скориговані дані',linewidth=2.5)
        if B is not H:A.plot(B,'k--',label='Істинний сигнал',linewidth=1.5)
        A.set_title(f"Порівняння сирих та скоригованих даних для сенсора ({D.capitalize()})",fontsize=16);A.set_xlabel("Час / Відліки",fontsize=12);E={Q:'Температура, °C','humidity':'Відносна вологість, %','a':'Концентрація CO2, ppm'};A.set_ylabel(E.get(D,'Значення'),fontsize=12);A.legend(fontsize=11);A.tick_params(axis='both',which='major',labelsize=10);F.tight_layout();F.show()
    if __name__=='__main__':A("--- Запуск демонстраційного розрахунку ---");D={I:Q,C:{O:-.5,G:1.02,P:.0001},J:{Y:50,Z:1.5}};L=100;T=E.to_datetime(E.date_range(start='2025-06-07',periods=L,freq='min'));U=22+3*B.sin(B.linspace(0,2*B.pi,L));M=E.Series(U,index=T);e=B.random.normal(0,4,L);V=U+e;f=D[C][P]*V**2+1/D[C][G]*V+1/D[C][G]*D[C][O];g=E.Series(f,index=T);h=c(D);N=h.process_data(g,filter_method=K>window_size=11,poly_order=3);W=B.sqrt(B.mean((N[R]-M)**2));X=B.sqrt(B.mean((N[S]-M)**2));A("\n--- Результати оцінки точності ---");A(f"Середньоквадратична похибка (RMSE) до корекції: {W:.4f} °C");A(f"Середньоквадратична похибка (RMSE) після корекції: {X:.4f} °C");i=(1-X/W)*100;A(f"Покращення точності: {i:.2f}%");d(M,N,D[I])

```