

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

ЗАПОРОЖЕЦЬ АРТУР ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 681.2:543.6: 502.3/7

РЕФЕРАТ
НАУКОВО-ПРАКТИЧНІ ЗАСАДИ СТВОРЕННЯ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДІВ
КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ ОБ'ЄКТАМИ ЕНЕРГЕТИКИ

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин
Галузь знань 15 – автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.223.01,
канд. техн. наук, ст. досл.



 Олег ДЕКУША

Науковий консультант: **Бабак Віталій Павлович**, доктор технічних наук,
професор

Київ – 2022

Запорожець А.О. Науково-практичні засади створення засобів та методів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» (152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка). – Інститут загальної енергетики НАН України, Київ, 2022.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Забруднення атмосфери стало складовою частиною сучасного життя. Основним джерелом забруднення атмосфери на теперішній час можна вважати процеси горіння, що пов'язані з діяльністю енергоємних підприємств. Домішки, що містяться в паливі, відхилення від стехіометричного складу суміші «паливо - повітря» при горінні, а також занадто висока або занадто низька температура горіння призводять до збільшення утворення таких побічних продуктів, як монооксид вуглецю, оксиди сірки та азоту, сажі, незгорілі вуглеводні та ін. Всі ці речовини вносять вклад в забруднення атмосфери.

Незважаючи на достатньо диверсифікований енергетичний баланс, енергоємні підприємства, зокрема ТЕС, ТЕЦ, котельні тощо, споживають близько третини видобутого палива. Частка викопного палива (вугілля, торф, газ), що використовується для генерування електричної енергії, складає більше 60%, при тому, що цей тренд має тенденцію до зростання. Тому об'єкти енергетики, в тому числі і теплоенергетики, як однієї з найбільших споживачів енергетичних ресурсів, залишаються одними з найбільших забруднювачів навколишнього середовища, зокрема і повітря.

Об'єкти енергетики відносяться до кола критично важливих та потенційно небезпечних об'єктів. Виконання міжнародних та державних програм по захисту

навколишнього середовища (особливо середовища в місцях розміщення об'єктів енергетики) вимагає проведення постійного контролю за станом забруднення повітря. Крім того, організація такого контролю є важливою ланкою в переліку заходів щодо підтримки енергетичної безпеки будь-якої країни.

На теперішній час переважна кількість систем контролю забруднення повітря в околі об'єктів енергетики функціонують на базі стаціонарних наземних пунктів, що використовують морально застарілий методологічний та апаратно-програмний інструментарій. До недоліків таких систем можна віднести неможливість визначення рівня забруднення повітря на різних висотах; недостатню кількість постів спостереження (ПС) для формування полів забруднення; низьку якість даних; низький рівень інформативності; недостатню швидкість реагування при виникненні надзвичайних ситуацій.

Проблематиці контролю забруднення повітря об'єктами енергетики присвячено багато досліджень. Вагомий внесок у розвиток цього напрямку зробили закордонні та українські вчені: M. Aleixandre, M. Badura, M. Bart, L. Bertrand, C. Borrego, N. Castell, M. Gerboles, P. Kumar, A. Lewis, X. Liu, L. Morawska, D. Oletic, X. Pang, R. Piedrahita, L. Spinelle, L. Sun, D.E. Williams, Y. Zhang, В.П. Бабак, В.О. Артемчук, А.Н. Некос, О.О. Попов, М.М. Харитонов, А.В. Яцицин та ін.

Дослідження цих вчених акцентують увагу на необхідності розвитку методологічного та апаратно-програмного забезпечення контролю забруднення повітря, що дозволить попередити позаштатні ситуації на енергоємних підприємствах (зокрема об'єктах енергетики), знизити рівень екологічного навантаження урбанізованих територій, виявити джерела надлишкового забруднення повітря та в цілому покращити рівень життя населення.

Одним із важливих аспектів цього розвитку є необхідність створення умов для безперервного збору та аналізу даних про стан повітря з необхідними

частотою опитування сенсорів і просторовим охопленням. Тому створення теоретичних засад, розроблення та практичне застосування засобів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що забезпечує локалізацію джерел забруднення повітря на базі просторово розгалужених бездротових сенсорних мереж, є актуальною науково-прикладною проблемою, що потребує вирішення.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розвиток науково-технічних засад побудови, практичного використання та дослідження засобів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики та локалізація джерел забруднення на базі просторово розгалужених бездротових low-cost сенсорних мереж.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасний рівень споживання різних видів енергоресурсів в Україні та світі, і дослідити вплив енергоносіїв та галузей, що їх споживають, на забруднення атмосферного повітря;

- провести аналіз сучасного методологічного та апаратно-програмного забезпечення контролю забруднення повітря об'єктами енергетики та дослідити стан хімічного забруднення повітря в Україні;

- розробити принципи побудови систем контролю забруднення повітря на базі просторово-розгалуженої бездротової low-cost сенсорної мережі;

- розвинути методологію формування результату контролю досліджуваної величини з використанням фізичних та ймовірнісних мір;

- розробити математичні моделі, алгоритми та методи для визначення та прогнозування інформаційних параметрів системи контролю забруднення повітря, що дозволить локалізувати джерела забруднення;

- запропонувати варіанти конструктивних рішень вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря для підвищення рівня інформативності про стан функціонування різних типів об'єктів енергетики;

– дослідити збіжність результатів контролю сенсорів мілкодисперсного пилю для обґрунтування можливості їх використання в системі контролю забруднення повітря;

– провести оцінювання динамічних характеристик low-cost сенсорів та запропонувати інформаційні параметри для визначення технічного стану сенсорів системи контролю забруднення повітря;

– на основі проведених досліджень сформувані перспективні напрями розвитку методологічного та апаратно-програмного забезпечення контролю забруднення повітря об'єктами енергетики.

Об'єкт дослідження – процес контролю забруднення повітря об'єктами енергетики та локалізації джерел забруднення.

Предмет дослідження – методи, моделі та засоби контролю забруднення повітря об'єктами енергетики.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Удосконалено науково-практичні засади статистичного дослідження впливу складових енергетичного балансу (типів спожитих енергоносіїв, галузей, що їх споживають, і секторів перетворення) на викиди забруднюючих речовин у повітря (CO_2 , SO_2 , NO_2 , CO , $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10}) із використанням оцінки коефіцієнта їх кореляції за малих обсягів досліджуваних вибірок, що дало змогу встановити зв'язки між досліджуваними параметрами, та визначити пріоритетні об'єкти, що потребують впровадження системи контролю забруднення повітря.

2. Вперше запропоновано ітераційний метод розв'язання оберненої задачі розповсюдження забруднюючих речовин у повітрі, а саме локалізації джерела забруднення та визначення концентрації його викидів, із використанням розроблених оптимізаційних моделей та модифікованого методу Ньютона, що дало змогу підвищити швидкодію розробленого методу та більше ніж в 3 рази зменшити обчислювальну складність (у порівнянні із застосуванням класичного

методу Ньютона), і, як наслідок, скоротити час локалізації джерел забруднення та створити передумови попередження значного забруднення атмосферного повітря.

3. Вперше розроблено метод прогнозування концентрації кисню в повітрі, що базується на аналізі метеорологічних параметрів повітря (температури, відносної вологості, абсолютного тиску), із застосуванням оберненої функціональної залежності, встановленої за допомогою дискретного перетворення Фур'є, що дає можливість оптимізувати процес спалювання палива на енергоємних підприємствах та зменшити викиди забруднюючих речовин.

4. Вперше запропоновано матричний метод формування даних вимірювальних модулів для контролю забруднення атмосферного повітря, що ґрунтується на деталізації властивостей сформованих груп даних та відповідних мір (Евклідової відстані, квадрату Евклідової відстані, Манхеттенської відстані, відстані Чебишова чи степеневі відстані), що дає змогу кількісно оцінити параметри функціонування системи контролю та сформувані профілі ретроспективних даних для вибраних об'єктів.

5. Вперше запропоновано використання набору лінійних математичних моделей для градування сенсорів дрібнодисперсного пилу, що встановлюють зв'язок між характеристиками даних вимірювальних модулів (максимальне, мінімальне, середнє значення, середнє квадратичне відхилення) та відповідними даними еталонного засобу контролю (ВАМ-пристрою), що дало змогу обґрунтувати застосування low-cost сенсорів у розроблених засобах контролю.

6. Розвинуто науково-практичні аспекти оцінювання технічного стану сенсорів вимірювальних модулів багатоканальних мереж контролю забруднення повітря із використанням ряду статистичних мір (коефіцієнта детермінації R^2 , коефіцієнта кореляції r , розмаху R та коефіцієнта варіації C_v) як динамічних характеристик, що дозволяє встановити ступінь варіативності результатів

контролю та підвищити достовірність контролю за рахунок завчасного виявлення технічно несправних сенсорів.

7. Отримала подальший розвиток методологія створення систем контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що базується на сучасній теорії використання моделей інформаційних полів та статистичних методах опрацювання даних, що дало можливість обґрунтувати вимоги до вимірювальних модулів системи контролю та запропонувати сукупності фізичних та ймовірнісних характеристик розроблених апаратно-програмних засобів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Створено ієрархічну структуру системи контролю забруднення повітря, що дозволило виділити бази даних екологічної інформації та надати до них доступ відповідним групам користувачів, а також сформувані зворотній зв'язок від центрів прийняття рішень до об'єктів контролю, що дозволяє регулювати кількість забруднюючих речовин, що надходить у повітря.

2. Розроблено систему контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що дозволило комплексно оцінити вплив енергоємних підприємств на екологічний стан навколишнього середовища.

3. Розроблено ряд вимірювальних модулів, що базуються на використанні low-cost сенсорів метеорологічних параметрів (температури, відносної вологості, абсолютного тиску) та забруднюючих речовин (мілкодисперсний пил (PM₁, PM_{2,5}, PM₁₀), CO, CO₂, NO₂, SO₂, CH₂O, NH₃ та ін.), що дозволило реалізувати просторово-розгалужену бездротову сенсорну мережу для контролю забруднення повітря об'єктами енергетики.

4. Запропоновано інформативні критерії для оцінювання справності сенсорів системи контролю, що дало змогу визначити несправні сенсори, попередити використання неякісних даних, встановити та попередити аномальні

режими функціонування об'єктів контролю, та в цілому визначити технічний стан системи контролю забруднення повітря об'єктів енергетики.

5. Розроблено програмне забезпечення системи контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що дозволяє зберігати, опрацьовувати та аналізувати отримані дані, спростити доступ користувачів до екологічної інформації, підвищити кількість інформативних параметрів, завчасно інформувати про аномальні збільшення контролюючих параметрів, локалізувати джерела забруднення та в цілому підвищити рівень інформативності системи контролю.

6. Проведено експериментальні дослідження статистичних характеристик сенсорів вимірювальних модулів, що дозволило обґрунтувати їх використання для системи контролю забруднення повітря.

7. Результати дослідження впроваджено на підприємствах країни та у навчальному процесі вищих навчальних закладів, зокрема: алгоритми, схеми, методи та програмне забезпечення багаторівневої системи моніторингу енергетичного обладнання впроваджено в ДП «Завод «Електроважмаш»» (м. Харків, акт від 23 жовтня 2018 р.), ТОВ «Укрекоконсалт» (м. Київ, акт від 18 грудня 2018 р.); вимірювальний модуль системи екологічного моніторингу стану забруднення навколишнього повітря та метод непрямого вимірювання концентрації кисню в повітря впроваджено на ТОВ «Буд-Буд» (м. Лубни Полтавської області, акт від 2 вересня 2019 р.), ТОВ «Передові мембранні технології» (м. Київ, акт від 27 листопада 2019 р.); моделі прогнозування концентрації складових повітря на базі дискретного перетворення Фур'є та ретроспективної інформації впроваджено в ТОВ «Науковий парк Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління «ЧОРНОБИЛЬ»» (м. Київ, акт від 14 грудня 2021 р.); теоретичні та практичні результати, що представлені в монографіях «Diagnostic Systems For Energy Equipments», «Control

of Fuel Combustion in Boilers», «Control of Overhead Power Lines with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)», «Models and Measures in Measurements and Monitoring», впроваджені в навчальний процес кафедри хімії і хімічної технології Національного авіаційного університету (м. Київ, акти від 3 грудня 2019 р. та 10 грудня 2020 р.) та кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет» (акти від 15 грудня 2021 р.).

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати, що виносяться на захист, отримані автором самостійно на основі результатів досліджень, проведених як індивідуально, так і колективно. В дисертації не використовувались ідеї та результати, що належать співавторам наукових праць.

Роботи [5, 7, 8, 18, 34, 35, 37, 41, 50] написані здобувачем одноосібно. У працях, опублікованих у співавторстві, автору належить: розроблення методів і засобів оцінювання технічного стану сенсорів і систем контролю [1, 13]; методологія створення і використання систем контролю забруднення повітря в околі об'єктів енергетики [2, 14, 33, 46]; розроблення методів визначення та прогнозування концентрації кисню у повітрі, та перспективи його використання [3, 21, 27, 32]; обґрунтування технічних рішень для створення вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря та їх експериментальні дослідження [4, 10, 12, 22, 24, 30, 42, 43, 49]; опис запропонованих математичних моделей [6, 11, 19, 25, 26, 36, 38, 47]; обґрунтування особливостей використання безпілотних літальних апаратів для контролю енерго-екологічних характеристики об'єктів енергетики [9, 16, 17, 20, 40]; обґрунтування концепції використання інструментарію інформаційно-вимірювальних технологій в енергетичній інформатиці [15, 28]; обґрунтування технічних рішень для зменшення викидів [23, 44]; аналіз методів виявлення аномальних режимів функціонування об'єктів контролю [29, 39]; аналіз протоколів маршрутизації в

IoT-системах [31]; опрацювання експериментальних даних [45], постановка задач контролю забруднення повітря [48].

Основний зміст роботи. Дисертаційна робота присвячена розвитку теоретичних засад, методологічного апарату та апаратно-програмних засобів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики на базі просторово-розгалужених бездротових сенсорних мереж, що відповідатимуть сучасними вимогами щодо швидкодії та рівню інформативності, з локалізацією джерел забруднення.

У вступі відображено актуальність даного напрямку досліджень та обґрунтовано вибір теми дисертаційної роботи, зв'язок з науковими програмами, темами, планами, грантами, методи досліджень, сформульовано мету і завдання дослідження, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, стан публікацій та апробацію результатів дисертаційного дослідження, наведено відомості про їх впровадження та зазначено структуру роботи.

У *першому розділі* «**Аналіз стану і тенденцій розвитку енергетики та її вплив на забруднення повітря**» проведено аналіз сучасного стану енергетичного балансу України та світу, та показано, що одними із головних споживачів енергетичних ресурсів є ТЕС, ТЕЦ, котельні, що спалюють викопне паливо та генерують великі об'єми забруднюючих речовин, що потрапляють в навколишнє середовище, в тому числі і повітря.

Аналіз показав, що значний рівень викидів забруднюючих речовин в повітря від енергетичних об'єктів спричинений тим, що серед газоочисного обладнання на енергетичних підприємствах наявні тільки пиловловлювачі, що були введені в експлуатацію разом з основним обладнання цих підприємств, та вже давно не відповідають проектним показникам та сучасним екологічним вимогам. Це зумовило прийняття ряду нормативних та законодавчих документів, зокрема і

Національного плану скорочення викидів від великих спалювальних установок (ВСУ), серед цілей якого: модернізація існуючих ВСУ, заміна застарілих пиловловлювачів на електрофільтри чи тканинні фільтри, створення систем очищення вихідних газів від NO_x . Враховуючи поточний стан енергетичного обладнання, актуальним є забезпечення контролю забруднення повітря від цих об'єктів.

Дослідження актуальних нормативних актів та вітчизняних наукових публікацій показало, що для кількісної оцінки забруднення повітря в Україні використовуються морально застарілі інформаційні показники, що не відповідають сучасним вимогам щодо швидкодії та доступності, наприклад індекс забруднення атмосфери (ІЗА).

Проаналізовано та візуалізовано наявну статистичну інформацію щодо викидів забруднюючих речовин (CO_2 , SO_2 , NO_2 , CO , PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, ПАВ, Zn , Pb , Cu , Cr , Ni , As) в повітря від стаціонарних джерел забруднення за період 1990-2018 рр.

Проведено аналіз low-cost сенсорів забруднюючих речовин, що можуть бути використанні при створенні систем контролю забруднення повітря.

На основі проведеного аналізу методологічного та апаратного забезпечення систем контролю забруднення повітря визначено ключові напрями їх розвитку та сформульовано науково-прикладну проблему, що полягає у створенні теоретичних засад, розробленні та практичному застосуванні засобів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що забезпечує локалізацію джерел забруднення на базі просторово-розгалужених бездротових сенсорних мереж. Визначені основні завдання для вирішення поставленої проблеми.

У *другому розділі* «**Методологічне забезпечення системи контролю забруднення повітря**» сформовано методологію контролю забруднення повітря на базі просторово-розгалужених бездротових сенсорних мереж, що базується на

3-х напрямках розвитку науково-практичних засад: теоретичному, методичному та апаратно-програмному забезпеченні.

Як елемент комплексної системи контролю складних технічних об'єктів (СТО), запропоновано ієрархічну структуру системи контролю забруднення повітря (рис. 1) в рамках концепції Smart Energy, що є елементом концепції Smart City. Головними завданнями Smart Energy є забезпечення надійності, підвищення енергоефективності та енергозбереження на всіх етапах генерування, транспортування та споживання енергії; підвищення ефективності, надійності та пропускної здатності енергомереж; забезпечення принципів диверсифікації в енергетиці для сталого розвитку та ін. Особливістю такої структури є формування відповідних даних на різних ієрархічних рівнях та доступу до них відповідних груп користувачів: локальний рівень – працівники об'єкта контролю, наукові працівники, інші фахівці; регіональний рівень – засоби масової інформації, громадські організації, спеціалізовані web-платформи; центральний рівень – центри транскордонного забруднення, служби статистики, центри моніторингу інших держав. Запропонована структура системи контролю забруднення повітря забезпечує надійність та безпеку функціонування об'єктів енергетики, сприяє зменшенню екологічного навантаження на повітря в межах міст чи агломерацій та покращенню самопочуття населення.

Сформовано мету, задачі та вимоги до даних системи контролю забруднення повітря. Задачі контролю забруднення повітря є унікальними для різних мереж, та можуть формуватися з врахування значної кількості факторів. Серед задач контролю стану забруднення повітря: локалізація джерел забруднення, оцінка експозиції та її вплив на організм, інформування населення про стан забруднення повітря, попередження населення про небезпечні рівні забруднення, виявлення факторів небезпеки для біосистем, формування політики в сфері екології, контроль за дотриманням державних норм. Для досягнення мети та задач

контролю, дані повинні відповідати наступним вимогам: єдність та точність вимірювань, міжнародна сумісність та гармонізація, співставність даних, адаптація до метрологічних стандартів, повнота отримання даних в часі і просторі, просторова репрезентативність.

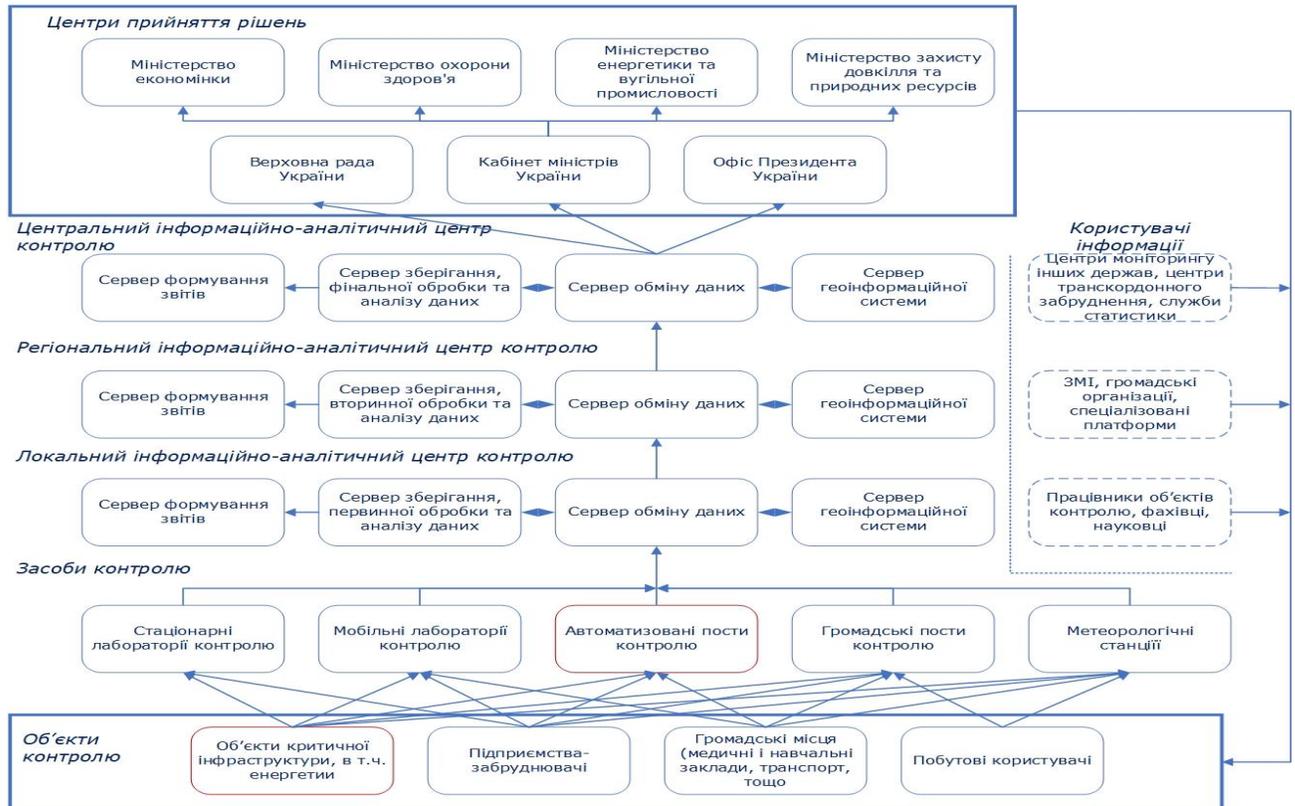


Рис. 1. Ієрархічна структура системи контролю забруднення повітря в рамках Smart Energy

Дотримання запропонованих вимог дозволить використовувати дані систем контролю забруднення повітря, що базуються на базі low-cost сенсорів, в системі державного контролю забруднення повітря.

Фізична коректність і необхідність постановки вимірювальних експериментів, виконання завдань і умов їх проведення, обґрунтування адекватних моделей і мір суттєво впливають на отримуваний результат контролю. При цьому досягнення більш високих метрологічних характеристик базується в першу чергу на удосконаленнях та розвитку моделей і мір. Так, для

контролю забруднення повітря важливо відмітити вплив середовища контролю, а саме атмосфери, на безпосередньо процес та результат контролю. Атмосфера характеризується відсутністю ізотропності, неоднорідністю та високим ступенем просторово-часової мінливості, що значно ускладнює процес контролю її локальних характеристик.

Як складова частина методології, запропоновано математичні моделі поля забруднення повітря у виді векторного випадкового поля, неоднорідного за просторовими аргументами, нестационарного в часі, та такого, що залежить від впливу різних факторів. Запропоновані математичні моделі інтенсивності інформаційних параметрів забруднення повітря (ІПЗП) в просторі і часі сформульовані наступним чином:

1. Загальна модель – n -вимірне випадкове поле (вкладене поле в генеральну сукупність атмосферного поля)

$$\Xi_n(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{r}, t) = \left\{ \xi_i(\boldsymbol{\omega}_i, \mathbf{r}, t), i = \overline{1, n} \right\} \in_{n \ll N} \left\{ \xi_j(\boldsymbol{\omega}_j, \mathbf{r}, t), j = \overline{1, N} \right\}; \quad (1)$$

2. n -вимірний випадковий процес

$$\Xi_{n, r_0}(\boldsymbol{\omega}, t) = \left\{ \xi_i(\omega_i, t), i = \overline{1, n} \right\}, \quad (2)$$

$$\Xi_n(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{r}, t) \Big|_{r=r_0} = \begin{Bmatrix} [1] & \xi_1(\omega_1, t) \\ [2] & \xi_2(\omega_2, t) \\ \vdots & \vdots \\ [n] & \xi_n(\omega_n, t) \end{Bmatrix}; \quad (3)$$

3. Матриця даних вимірювань – n -вимірна сукупність часових рядів ІПЗП

$$\begin{Bmatrix} u_1(t_1) & \dots & u_1(t_k) \\ u_2(t_1) & \dots & u_2(t_k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_n(t_1) & \dots & u_n(t_k) \end{Bmatrix} = \left\{ u_i(t_j), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k} \right\}, \quad (4)$$

на виході n -канального модуля ІПЗП, де ξ – випадкова функція поля забруднення Ξ ; ω – концентрація забруднюючої речовини із деякого поля Ξ ; r

– координати; t – час; $[n]$ – сенсор, що визначає концентрацію забруднюючої речовини; $u_n(t_k)$ – k -результат вимірювання n -ої забруднюючої речовини.

Застосування математичних моделей такого виду дає змогу виконувати дослідження із визначенням просторово-часових характеристик за умови проведення контролю у різних обмежених областях простору на скінченних інтервалах часу. Це забезпечує також можливість проведення подальшого порівняльного аналізу результатів контролю з метою перевірки адекватності запропонованих моделей, прогнозування динаміки зміни основних характеристик об'єктів контролю у просторі і часі, та інше

У випадку дослідження просторово-часових сигналів з використанням випадкових моделей визначаються, як правило, статистичні оцінки характеристик сигнальних полів в рамках кореляційної (енергетичної) теорії. Так для випадкового поля $\xi(\omega, \mathbf{r}, t)$ оцінюються:

- математичне сподівання поля

$$a(\mathbf{r}, t) = \mathbf{M}\{\xi(\omega, \mathbf{r}, t)\}; \quad (5)$$

- дисперсія поля

$$\sigma^2(\mathbf{r}, t) = \mathbf{D}\{\xi(\omega, \mathbf{r}, t)\} = \mathbf{M}\{[\xi(\omega, \mathbf{r}, t) - a(\mathbf{r}, t)]^2\}; \quad (6)$$

- автокореляційна функція поля

$$R(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, t_1, t_2) = \mathbf{M}\{[\xi(\omega, \mathbf{r}_1, t_1) - a(\mathbf{r}_1, t_1)] \times [\xi(\omega, \mathbf{r}_2, t_2) - a(\mathbf{r}_2, t_2)]\}; \quad (7)$$

- структурна функція поля

$$B(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, t, t_1) = \mathbf{M}[(\xi(\omega, \mathbf{r}_1, t_1) - \xi(\omega, \mathbf{r}_2, t_2))^2]. \quad (8)$$

Запропонована система тверджень визначення завдань використання ресурсів системи контролю забруднення повітря для вирішення проблем енергетичної інформатики (ЕІ), основою якої є первинні дані. Для виконання завдань використання ресурсів системи контролю при вирішенні проблем ЕІ використовуються три варіанти формування первинної інформації при взаємодії

і взаємозв'язку об'єкта досліджень (ОД) із сенсорними засобами системи контролю (рис. 2):

а) ОД є джерелом (генератором) такої інформації;

б) ОД є лінійним чи нелінійним, інерційним чи безінерційним, одновимірним чи багатовимірним перетворювачем впливу (сигналу), що діє на ОД, і який умовно називають тестовим, а сам ОД описується певним оператором перетворення $Z[\cdot]$;

в) ОД є джерелом, яке формує власний, відмінний від вхідного сигналу, відгук, а вхідний сигнал впливу вважають стимулом чи подразником.

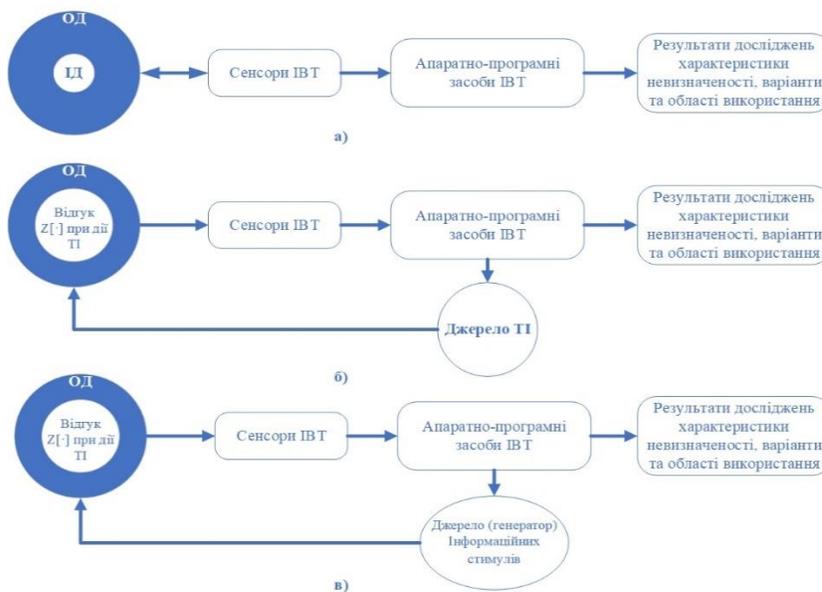


Рис. 2. Схематичне зображення трьох варіантів (а, б, в) формування первинної інформації досліджень методами і апаратно-програмними засобами системи контролю (ІД – інформація досліджень, ТІ – тестова інформація)

Третій розділ «Методи опрацювання даних контролю забруднення повітря об'єктами енергетики» присвячено розвитку методів статистичного опрацювання даних контролю системи забруднення повітря.

Запропонований алгоритм кореляційного аналізу між складовими енергетичного балансу (X – типами енергетичних ресурсів, сектором перетворення та галузями-споживачами енергоресурсів) та викидами

забруднюючих речовин ($Y - \text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_2, \text{CO}, \text{PM}_{10}, \text{PM}_{2.5}$) на прикладі України. Загалом сформовано та розглянуто 153 набори даних ($A_1 - A_{153}$), що характеризують взаємозв'язок між складовими енергетичного балансу та викидами забруднюючих речовин.

Із-за відносно малих розмірів вибірок, в якості інформативного параметра кореляційного аналізу використана скоригована оцінка коефіцієнта кореляції \hat{r}' .

$$\hat{r}' = \hat{r} \left[1 + \frac{1 - \hat{r}^2}{2(n-3)} \right], \quad (9)$$

$$\text{де } \hat{r} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}.$$

Значущість коефіцієнта кореляції була перевірена за допомогою 2-х гіпотез: 1) про випадковість відхилення від 0 (H_0) за допомогою t -розподілу з $(n-2)$ степенями вільності та рівнем значущості $\alpha=0,05$; 2) про зв'язок між випадковими величинами з граничним значенням r_α (H_1).

Довірчі границі коефіцієнта кореляції з ймовірністю $P=0,95$ розраховані за допомогою Z -перетворення Фішера:

$$\text{tgh} Z_1^* \leq r \leq \text{tgh} Z_2^*, \quad (10)$$

де $Z_{1,2}^* = Z \mp \frac{u_{(1+P)/2}}{\sqrt{n-3}}$, $u_{(1+P)/2}$ - квантиль нормального розподілу, а Z визначається за

формулою

$$Z = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \hat{r}}{1 - \hat{r}} \right) = 1,1513 \lg \left(\frac{1 + \hat{r}}{1 - \hat{r}} \right), \quad \hat{r} \neq 1. \quad (11)$$

На рис. 3, як приклад, наведено значення скоригованого коефіцієнта кореляції та його верхня і нижня границі для наборів величин $A_1 - A_5$.

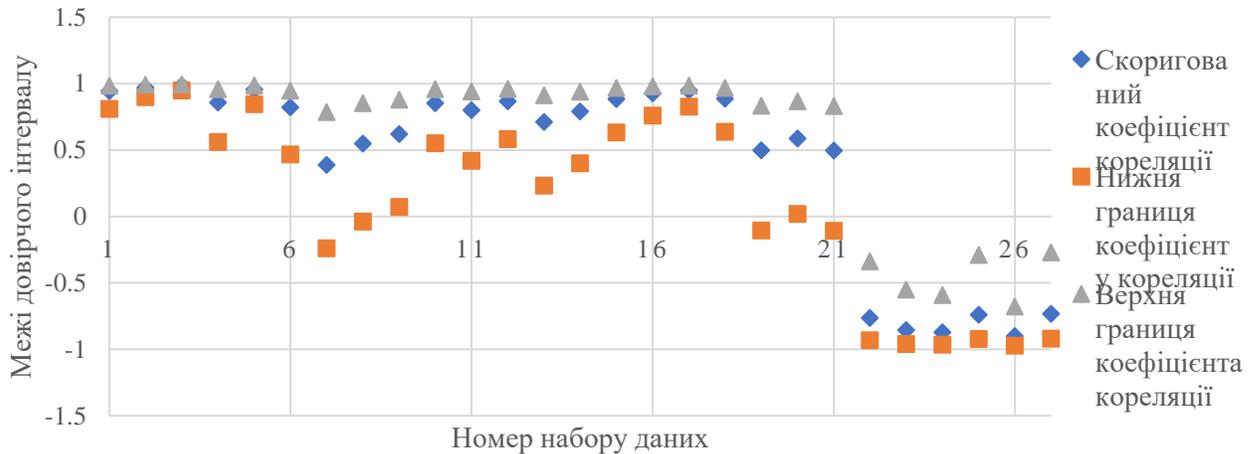


Рис. 3. Значення \hat{r}' , $tghZ_1^*$ та $tghZ_2^*$ для наборів A_1-A_5

Показано, що загалом 70% розглянутих сукупностей мають додатній кореляційний зв'язок, а більше 24% – від'ємний кореляційний зв'язок. Найбільший вплив на забруднення атмосферного повітря (SO_2 , NO_2 , PM_{10}) має вугілля та торф ($\hat{r}' > 0,95$). Найменше значення \hat{r}' зафіксовано між газовими підприємствами та викидами PM_{10} (-0,907).

Розглянуті особливості застосування регресійного та дисперсійного аналізу, та запропоновані алгоритми опрацювання даних контролю забруднення повітря, що реалізуються з використанням критеріїв Фішера, Ектона, Тітьєна-Мура-Бекмана, Бартлєта, Кохрана, Неймана-Пірсона, Бліса-Кохрана-Тьюкі, Хартлі, Кедуела-Леслі-Брауна. Запропоновані алгоритми дозволяють значно спростити процес опрацювання даних та отримати ряд інформативних параметрів, що можуть бути застосовані для оцінювання стану забруднення повітря об'єктами енергетики та технічного стану сенсорів і системи контролю загалом.

Запропоновано матричний метод визначення подібності даних вимірювальних модулів для контролю забруднення повітря, що дозволяє кількісно та якісно оцінити параметри функціонування засобів контролю та

Для подальшої обробки отримані дані необхідно систематизувати. В загальному, для цього можуть бути використані методи кластерного аналізу: генетичний алгоритм, нейронні мережі, методи нечіткої кластеризації, методи k -середніх чи k -медіан, EM-алгоритм та інші методи. Як міри схожості між об'єктами можуть бути використані наступні метрики, наведені в табл. 1.

В задачах порівняння наборів даних систем контролю, зокрема систем контролю забруднення повітря, виникають певні складнощі, зокрема з тим, що такі системи генерують великі об'єми даних. Тому при формуванні груп даних X , необхідно виділити властивості (параметри) B , якими має володіти ця група, та класифікувати її. Так, в бінарному варіанті, в розглянутій матриці A із поля K можна виділити 2 групи даних X , що володіють чи не володіють заданою властивістю B :

$$\begin{cases} X = 1, X_i \in B, \\ X = 0, X_i \notin B. \end{cases} \quad (16)$$

Таблиця 1 – Метрики, що використовуються як міри схожості між об'єктами

№	Назва	Формула
1	Евклідова відстань	$\rho(x, x') = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2}$,
2	Квадрат Евклідової відстані	$\rho(x, x') = \sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2$,
3	Мангеттенська відстань	$\rho(x, x') = x_i - x'_i $,
4	Відстань Чебишова	$\rho(x, x') = \max(x_i - x'_i)$,
5	Степенева відстань	$\rho(x, x') = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^p}$.

З таким підходом (16) можна констатувати відбулось вимірювання параметру чи не відбулось. Але часто системи контролю характеризуються

(рис. 4), де 25 да 35 – відповідно кількість рядків, що відображають номер місяця спостереження, а 31 – кількість стовпчиків, що відповідають номеру дня спостереження.

Таблиця 2 – Характеристики ПС № 3, 5, 7, 20

№	Параметри	Час активації
3	PM, SO ₂ , CO, NO ₂ , CH ₂ O	Серпень 2018
5	PM, SO ₂ , CO, NO ₂ , CH ₂ O	Серпень 2018
7	PM, SO ₂ , CO, NO ₂ , HF, HCl, CH ₂ O	Жовтень 2017
20	PM, SO ₂ , CO, NO ₂ , NO, HF, NH ₃ , CH ₂ O	Жовтень 2017

На основі експериментальної верифікації запропонованого методу показано, що рівень коректного функціонування вибраних ПС системи контролю забруднення повітря за розглянуті періоди часу складає від 56,6% до 76,3%. Встановлено, що розглянуті набори груп для ПС №3-5 збігаються у 96,6% випадків (749 із 775), тоді як для наборів груп ПС №7-20 – у 91% випадків (985 із 1085).

Таблиця 3 – Параметри розглянутих груп даних

№	Параметр	Значення параметру	Колір
1	3	Отримано 100% запланованих даних	Зелений
2	2	Отримано даних в межах (0%;100%)	Жовтий
3	1	Дані не отримано	Червоний
4	0	Дати контролю не існує	Блакитний

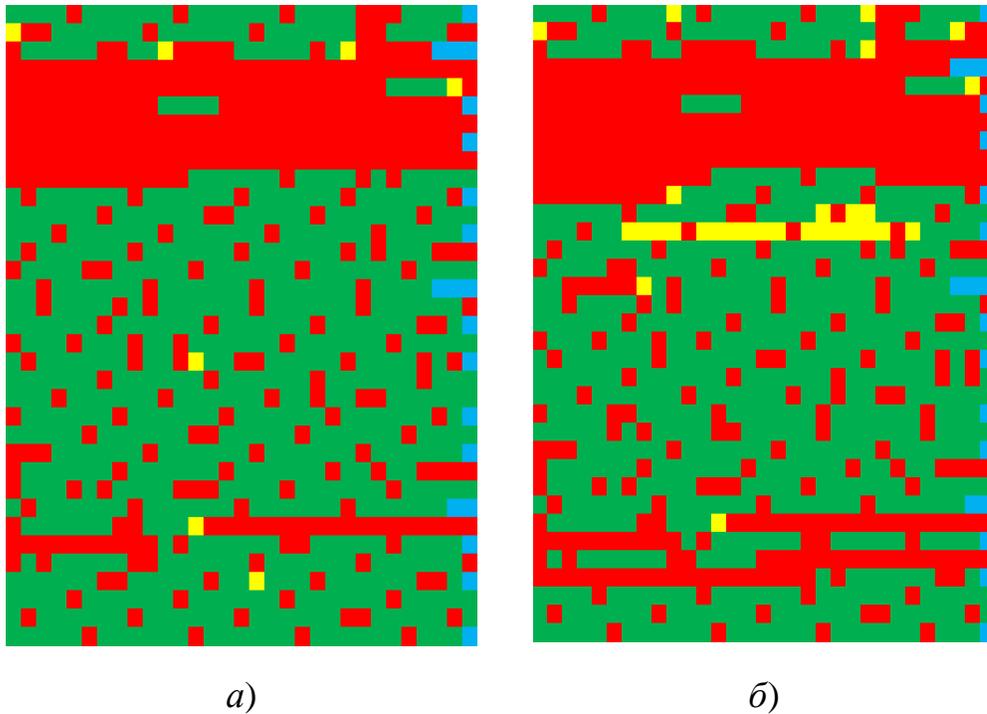


Рис. 4.
Порівняння
результатів
матричного
аналізу
даних ПС
№7 (а) та
№20 (б)

Таким чином, запропонований метод може бути використаний для оцінювання подібності результатів контролю забруднення повітря.

Запропоновано метод прогнозування об'ємної концентрації кисню в повітрі, що базується на використанні математичної моделі залежності концентрації кисню в повітрі від метеорологічних параметрів (температури, відносної вологості, абсолютного тиску).

Для вирішення завдання прогнозування об'ємної концентрації кисню необхідно визначити вид та коефіцієнти математичної апроксимації. Прогнозоване значення знаходиться шляхом підстановки у знайдене рівняння порядкового номера дня року як аргументу. Для пошуку рівняння моделі було використано:

а) залежність, яка візуально найближче описує характер зміни даних на всьому діапазоні значень (рис. 5а);

б) залежність, визначена вбудованими функціями програмного пакету MathCAD (рис. 5б);

в) залежність, визначена із застосуванням рядів Фур'є (рис. 5в).

Коефіцієнт детермінації R^2 функціональної залежності наведеної на рис. 5а становить 0,450, а її аналітичне представлення має вигляд:

$$[O_2]_{\text{пр}}(t) = 20,728 + 0,182 \cdot \sin\left(\frac{t}{59,279} - 4,85\right). \quad (18)$$

Коефіцієнт детермінації R^2 функціональної залежності наведеної на рис. 5б становить 0,709, а її аналітичне представлення має вигляд:

$$[O_2]_{\text{пр}}(t) = 20,761 + 0,126 \cdot \sin\left(\frac{t}{58,885} - 5,015\right). \quad (19)$$

Вибір дискретного перетворення Фур'є для апроксимації даних зумовлений їх квазіперіодичним характером та можливістю пошуку функціональної залежності з коефіцієнтом детермінації близьким до 1. Модель апроксимації має вигляд виразу оберненого перетворення Фур'є:

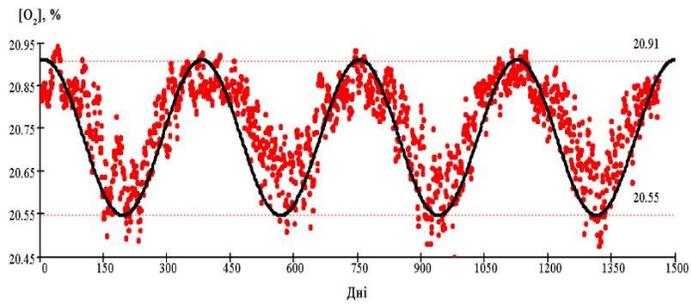
$$[O_2]_{\text{пр}}(t) = C_0 + 2 \cdot \sum_{j=1}^m C_{k_j} \cos(\omega_0 \cdot k_j \cdot t - \theta_{k_j}), \quad (20)$$

де m – кількість коефіцієнтів ряду Фур'є; $C_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ – дійсний коефіцієнт Фур'є, $k = \overline{0, m}$; $\theta_k = \arctg \frac{b_k}{a_k}$ – початкова фаза; $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ – кругова частота; T –

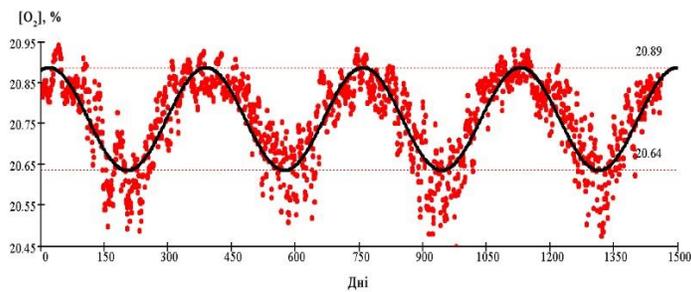
період дискретної послідовності рівний кількості спостережень; $a_k = \text{Re}[X_k]$;

$b_k = \text{Im}[X_k]$; $X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i \cdot k \cdot n}$ – N комплексних амплітуд косинусоїдальних

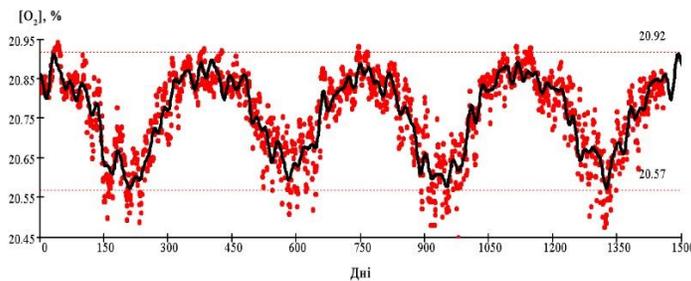
складових ряду Фур'є (пряме перетворення Фур'є), $e^{-i \cdot k \cdot t} = \cos kt + i \sin kt$; x_n – дискретні значення n апостеріорних даних.



а)



б)



в)

Рис. 5. Визначені функціональні залежності розрахованого значення об'ємної концентрації кисню від часу (точками відображені розраховані значення об'ємної концентрації кисню в повітрі, суцільною лінією – функція апроксимації, пунктирною лінією – мінімальне та максимальне значення функції апроксимації):
 а) функція апроксимації, яка візуально найближче описує характер зміни даних на всьому діапазоні значень; б) функція апроксимації, визначена функціями MathCAD;
 в) функція апроксимації, визначена за формулою (20)

Членами ряду Фур'є слугували гармоніки з найбільшим значенням комплексного коефіцієнту C_k . Коефіцієнт детермінації R^2 функціональної залежності прогнозованого значення об'ємної концентрації кисню від часу, отриманої за 15 гармоніками (рис. 5в), становить 0,803, $R^2 = 0,870$ при $m = 50$, $R^2 = 0,917$ при $m = 100$, $R^2 = 0,944$ при $m = 150$, $R^2 = 0,961$ при $m = 200$.

Як видно з рис. 5, область значень знайдених функцій прогнозованої об'ємної концентрації кисню вужче, ніж область апостеріорних значень. У якості

прогнозованого значення об'ємної концентрації кисню пропонується використовувати:

- значення функції ряду Фур'є згідно формули (21). Значення параметрів функції ті самі, що і для функції (20). Аргументом функції є сума порядкового номеру дня у році та періоду ряду Фур'є. Поправка на високосний рік не враховується;

$$[O_2]_{\text{пр.1}}(t) = C_0 + 2 \cdot \sum_{j=1}^m C_{k_j} \cos(\omega_0 \cdot k_j \cdot (t + q \cdot T) - \theta_{k_j}), \quad (21)$$

де $q = 0, 1, 2, \dots, n$;

- середнє прогнозованих значень об'ємної концентрації кисню у повітрі розрахованих за формулою (21) для відповідного аргументу з періодом 365 днів;

$$[O_2]_{\text{пр.2}}(t) = C_0 + \frac{2 \cdot \sum_{l=0}^{y-1} \sum_{j=1}^m C_{k_j} \cos(\omega_0 \cdot k_j \cdot (t + l \cdot 365) - \theta_{k_j})}{y}, \quad (22)$$

де y – ціле значення кількості років, яке відповідає експериментальним даним за якими визначалась функція апроксимації за формулою (20), $y = \lfloor T/365 \rfloor$.

Четвертий розділ «Методи локалізації джерел забруднення повітря на базі розподіленої сенсорної мережі» присвячено методичним особливостями локалізації джерел забруднення на базі просторово-розгалуженої бездротової сенсорної мережі.

Досліджено склад забруднюючих речовин, що утворюється в процесі спалювання різних видів палива, та особливості їх поширення під дією різних метеорологічних факторів. Показано, що основний вплив на атмосферну турбулентність здійснюють 2 процеси: конвективна турбулентність (пов'язана з природніми конвективними потоками) та механічна турбулентність (пов'язана з тертям рухомих повітряних потоків та земної поверхні). Розглянуті особливості перемішування повітряних мас під дією інверсійної стратифікації. Сформовані та

описані можливі варіанти розповсюдження полів забруднення при різних градієнтах температури повітря навколишнього середовища.

Розглянуті особливості розрахунків концентрацій забруднюючих речовин від об'єктів енергетики (на прикладі джерел викидів з круглим та прямокутним отвором), що використовуються для вирішення прямих задач в екологічних дослідженнях.

Запропоновано використання ізотропної та анізотропної Гаусових моделей для побудови функцій щільності розподілу напрямку вітру.

Ізотропна Гаусова модель характеристик вітру базується на наступних гіпотезах: а) наявність переважного напрямку вітру; б) складові швидкості вітру для переважного напрямку вітру (повздовжня компонента v_y) та перпендикулярного до нього напрямку (поперечна компонента v_x) є випадковими величинами, що описуються нормальним розподілом; в) повздовжня та поперечна компоненти швидкості вітру є незалежними величинами; г) дисперсії повздовжньої σ_y^2 та поперечної компонент σ_x^2 є рівними; д) середнє значення повздовжньої компоненти u_y є відмінним від нуля, а середнє значення поперечної компоненти $u_x = 0$.

Згідно цієї моделі, повздовжня та поперечна компоненти описуються функціями розподілу щільності ймовірності виду:

$$F_y(v_y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{(v_y - u_y)^2}{2\sigma_y^2}}; \quad (23)$$

$$F_x^1(v_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{v_x^2}{2\sigma_x^2}}. \quad (24)$$

У відповідності з вищенаведеною гіпотезою (в), їх спільна двовимірна функція щільності розподілу визначається як добуток функцій (23) та (24).

Переходячи до полярної системи координат, що задається рівняннями (25), спільна двовимірна функція щільності розподілу (26) стає залежною від швидкості та кута:

$$v_x = v \sin \theta; \quad v_y = v \cos \theta; \quad (25)$$

$$F(v, \theta) = \frac{v}{2\pi\sigma_y^2} e^{-\frac{u_y^2}{2\sigma_y^2}} e^{-\frac{v^2 - 2u_y v \cos \theta}{2\sigma_y^2}}. \quad (26)$$

Після інтегрування по v рівняння (26), отримаємо функцію щільності розподілу кута θ :

$$F(\theta) = \frac{1}{2\pi} e^{(-\mu^2/2)} \left[1 - \sqrt{\pi} \xi \phi(\xi) e^{\xi^2} \right]; \quad (27)$$

$$0 < \theta < 2\pi,$$

де

$$\mu = u_y / \sigma_y; \quad \xi = -\mu \cos \theta / \sqrt{2}; \quad \phi(\xi) = 2 \int_{\xi}^{\infty} e^{-t^2} dt / \sqrt{\pi}. \quad (28)$$

Після інтегрування по θ рівняння (26), отримаємо функцію щільності розподілу швидкості v :

$$F(v) = I_0 \left(v^2 u_y / \sigma_y^4 \right) e^{(-v^2 - u_y^2) / 2\sigma_y^2}; \quad (29)$$

$$0 < v < \infty,$$

де I_0 – модифікована функція Беселя першого роду та нульового порядку.

Анізотропна Гаусова модель використовує ті ж гіпотези, що й ізотропна модель, окрім гіпотези (г). Анізотропна модель передбачає, що дисперсії σ_y^2 та σ_x^2 не обов'язково мають бути рівними.

Відповідно до даної моделі, повздовжні та поперечні компоненти описуються функціями розподілу щільності ймовірності, що задаються рівняннями (23) та (30):

$$F_x^2(v_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{(v_x)^2}{2\sigma_x^2}}. \quad (30)$$

У відповідності з вищенаведеною гіпотезою (в), їх спільна функція щільності розподілу визначається як добуток функцій (23) та (30). Переходячи до полярної системи координат, що задається рівняннями (25), спільна функція щільності розподілу стає залежною від швидкості та кута, що формує вісь швидкості вітру з віссю переважаючого напрямку вітру

$$F'(v, \theta) = v e^{-\left[\frac{(v \cos \theta - u_y)^2}{2\sigma_y^2} - \frac{v^2 \sin^2 \theta}{2\sigma_x^2} \right]} / 2\pi\sigma_y\sigma_x. \quad (31)$$

Після інтегрування по v рівняння (31), отримаємо функцію щільності розподілу кута θ :

$$F'(\theta) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{\mu^2}{2}\right) \left[\frac{\gamma}{\gamma^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta} \right] \times \left[1 - \sqrt{\pi} \eta \exp(\eta^2) \phi(\eta) \right]; \quad (32)$$

$$0 < \theta < 2\pi,$$

де

$$\gamma = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}; \quad \eta = -\frac{\mu \cos \theta}{\sqrt{2 \cos^2 \theta + 2\gamma \sin^2 \theta}}. \quad (33)$$

Після інтегрування по θ рівняння (31), отримаємо функцію щільності розподілу швидкості v :

$$F'(v) = I_0 \frac{v^2 u_y}{\sigma_y^3 \sigma_x} \exp\left(-\frac{\mu^2}{2}\right) \times \int_0^{2\pi} \exp\left[-\frac{v^2}{2\sigma_y^2} (\cos^2 \theta + \gamma^2 \sin^2 \theta)\right] d\theta; \quad (34)$$

$$0 < v < \infty.$$

Функції щільності розподілу швидкості та напрямку вітру згідно ізотропної та анізотропної Гаусових моделей дозволяють визначити переважний напрям поширення забруднювачів. Знаючи цей напрямок можна локалізувати зону, де розміщено джерело забруднення атмосфери і тим самим отримати результат

розв'язання оберненої задачі. Наведені результати доповнюють зазначену методику, використовуючи ймовірнісний підхід опрацювання даних контролю.

Розроблено оптимізаційні математичні моделі для вирішення оберненої задачі екологічних досліджень, а саме локалізації джерела забруднення та визначення концентрації викидів забруднюючих речовин.

Для моделювання забруднення навколишнього середовища використано рівняння турбулентної дифузії, що розглядалося в розрахунковій області $\Omega = [0;1]^2$:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (35)$$

де $u = 0,25$; $w = 0,03$; $k_x = k_z = 1$; $t = [0;0,5]$ с.

Початкова умова для (35) має вигляд:

$$C(x, z, 0) \Big|_{(x,z) \in \Omega} = 0. \quad (36)$$

Умови на границі Γ розрахункової області Ω в (35) мають вигляд:

$$\left(\partial C(x, z, t) / \partial \vec{n} \right) \Big|_{\Gamma} = 0, \quad (37)$$

де \vec{n} – вектор нормалі до границі Γ розрахункової області Ω .

Внутрішня умова на джерелі забруднення для (35) має вигляд:

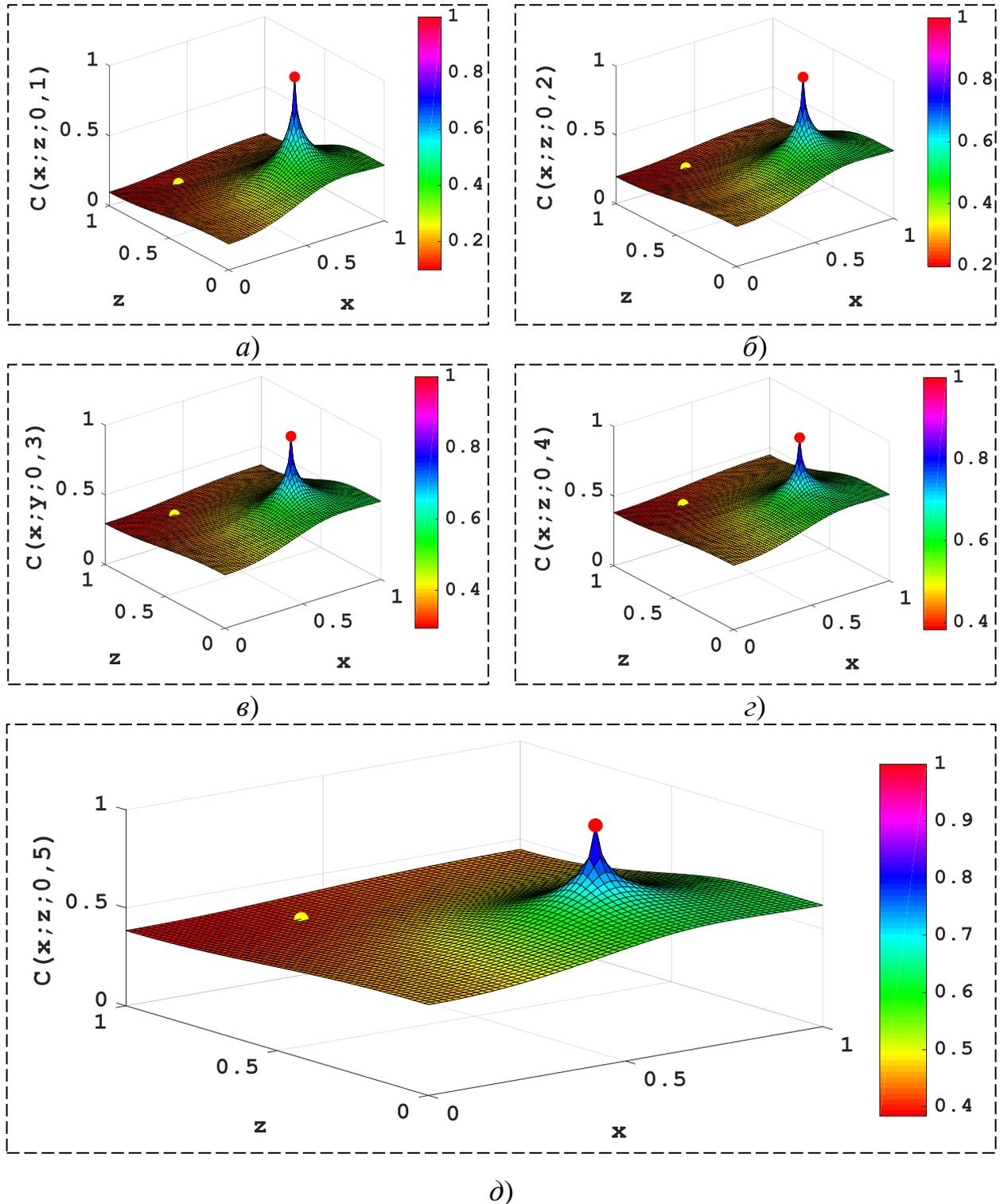
$$C(x_{Src}, z_{Src}, t) = 1. \quad (38)$$

Дані, що отримуються сенсором можна записати так:

$$C_{DS} = C(x_S, z_S, t), t \in [0;0,5], \quad (39)$$

Поставлена задача (35)–(38) змодельована у прикладному програмному пакеті MATLAB 2019b. Результати моделювання показані на рис. 6.

Графічне представлення даних, отриманих сенсором згідно (39), наведено на рис. 7.



д)
Рис. 6. Результати розв'язування задачі (35)–(38) з джерелом забруднення (червоним) та сенсором (жовтим), який визначає рівень забруднення: (а–д) – розподіли концентрації $C(x, z, t)$ у моменти часу $t = 0,1 c$; $t = 0,2 c$; $t = 0,3 c$; $t = 0,4 c$; $t = 0,5 c$ відповідно

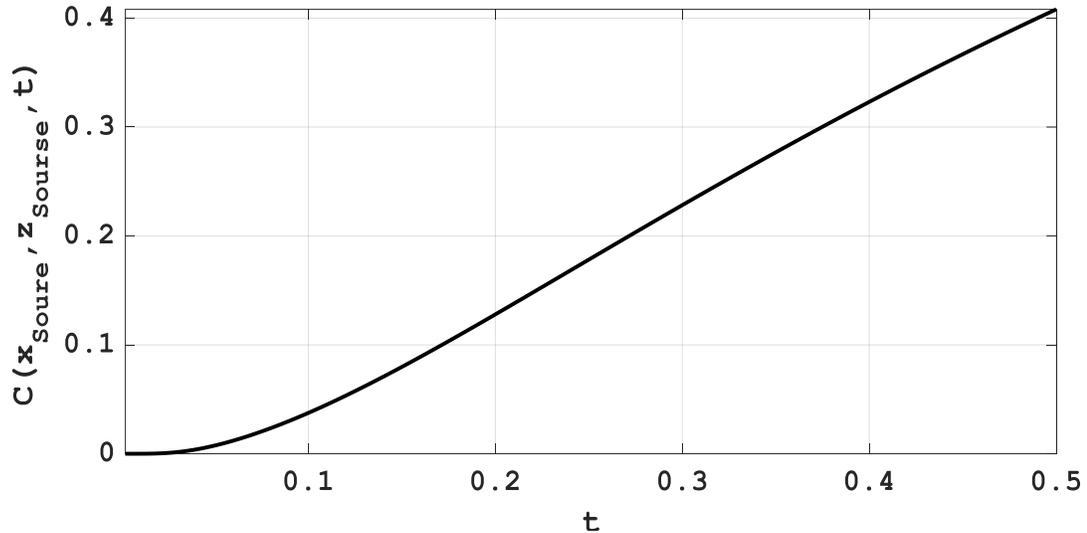


Рис. 7. Дані, отримані сенсором, згідно (39)

За сенсорними даними можна побудувати першу математичну модель оберненої задачі на базі рівняння турбулентної дифузії (35) – модель визначення висоти положення труби джерела забруднення та концентрації викидів на ньому:

$$J(z_{Src}, C_{Src}) = \int_{\tau_{beg}}^{\tau_{end}} \left(C_{DS}(C_{Src}(x_{Src}, z_{Src}), t) - C_{DS}(t) \right)^2 dt, \quad (40)$$

де $C_{DS}(t)$ – дані концентрації повітря, які отримані сенсором, що знаходиться у положенні (x_S, z_S) ; $C_{DS}(C_{Src}(x_{Src}, z_{Src}), t)$ – значення концентрації на сенсорі, яке отримуються в результаті обчислень. Це значення залежить від точкового положення джерела забруднення та його концентрації C_{Src} .

Друга математична модель оберненої задачі на базі рівняння турбулентної дифузії (35) – модель визначення повного розташування труби джерела забруднення та концентрації викидів на ньому.

$$J(x_{Src}, z_{Src}, C_{Src}) = \int_{\tau_{beg}}^{\tau_{end}} \left(C_{DS}(C_{Src}(x_{Src}, z_{Src}), t) - C_{DS}(t) \right)^2 dt. \quad (41)$$

Розроблено модифікацію класичного методу Ньютона для знаходження чисельного розв'язку побудованих математичних моделей (40)-(41) визначення параметрів джерела забруднення повітря. Методи цього типу замінюють процедуру розв'язання нелінійної системи рівнянь виду $F_i(\vec{x}) = F_i(x_1, \dots, x_n) = 0$, $i = \overline{1, N}$ процедурою пошуку розв'язку послідовності систем алгебраїчних рівнянь виду:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1}(\vec{x}^{(k)}) & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial x_n}(\vec{x}^{(k)}) \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F_n}{\partial x_1}(\vec{x}^{(k)}) & \dots & \frac{\partial F_n}{\partial x_n}(\vec{x}^{(k)}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^{(k+1)} - x_1^{(k)} \\ \dots \\ x_n^{(k+1)} - x_n^{(k)} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} F_1(\vec{x}^{(k)}) \\ \dots \\ F_n(\vec{x}^{(k)}) \end{pmatrix}. \quad (42)$$

Матрицею системи (42) буде гессіан вихідної системи:

$$H(\vec{x}^{(k)}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 J}{\partial x_1^2}(\vec{x}^{(k)}) & \dots & \frac{\partial^2 J}{\partial x_1 \partial x_n}(\vec{x}^{(k)}) \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 J}{\partial x_n \partial x_1}(\vec{x}^{(k)}) & \dots & \frac{\partial^2 J}{\partial x_n^2}(\vec{x}^{(k)}) \end{pmatrix}. \quad (43)$$

Оскільки для розрахунку гессіана в (43) здійснюється диференціювання розв'язку за невідомими параметрами функціоналів, то, в загальному випадку, знайти похідну аналітично у подібних задачах просто неможливо. Її потрібно знаходити чисельно з використанням урізаного ряду Тейлора. Для чисельного пошуку другої похідної необхідно мати значення диференційованої функції в трьох точках, а для пошуку мішаної похідної – в чотирьох точках.

Підвищити швидкодію класичного методу Ньютона можна за рахунок наступного підходу. Нехай потрібно розв'язати диференціальне рівняння виду $y' = f(x)$. Інтегруючи обидві його частини, отримаємо вираз:

$$\left\{ \int_{x_k}^{x_{k+1}} y' dx = \int_{x_k}^{x_{k+1}} f(x) dx \right\} = \left\{ y_{k+1} - y_k = \int_{x_k}^{x_{k+1}} f(x) dx \right\} =$$

$$= \left\{ y_{k+1} = y_k + \int_{x_k}^{x_{k+1}} y'(x) dx \right\}. \quad (44)$$

Очевидно, що процедура знаходження інтеграла тісно пов'язана з точністю обрахунків. Використовуючи формулу правих прямокутників, рівняння (44) можна переписати в такому вигляді:

$$\left\{ y_{k+1} = y_k + \int_{x_k}^{x_{k+1}} y'(x) dx \right\} = \left\{ y_{k+1} = y_k + hy'(x_k) \right\} =$$

$$= \left\{ y_{k+1} = y_k + (x_{k+1} - x_k) y'(x_k) \right\}. \quad (45)$$

Дані перетворення зводяться до класичного методу Ньютона, якщо в (45) взяти $y_{k+1} = 0$ та розв'язати рівняння відносно x_{k+1} . Підвищити швидкодію одного кроку при розв'язуванні рівняння можна, використовуючи метод предиктор-коректор. При застосуванні методу трапецій для знаходження інтеграла будемо мати:

$$\left\{ y_{k+1} = y_k + \int_{x_k}^{x_{k+1}} y'(x) dx \right\} = \left\{ y_{k+1} = y_k + 0,5h(y'(x_k) + y'(x_{k+1})) \right\},$$

$$\left\{ y_{k+1} = y_k + 0,5(x_{k+1} - x_k)(y'(x_k) + y'(x_{k+1})) \right\}. \quad (46)$$

У виразі (46) значення $y'(x_{k+1})$ невідоме. Воно визначається за методом ламаних таким виразом:

$$z = x_k - \beta \frac{y_k}{y'_k}, \quad x_{k+1} = x_k - \frac{2y_k}{y'(x_k) + y'(z)}. \quad (47)$$

Параметр β можна взяти рівний одиниці. Для прискорення обрахунків шляхом зменшення їх загальної кількості цей параметр можна шукати з використанням методу найшвидшого спуску на кожній ітерації в (47).

Отже, остаточно отриманий вираз методу оптимізації розглянутих функціоналів має такий вигляд:

$$\vec{z} = \vec{x}^{(k)} - \beta H^{-1} \left(\vec{x}^{(k)} \right) J \left(\vec{x}^{(k)} \right), \quad \vec{x}^{(k+1)} = \vec{x}^{(k)} - 2 \left(H \left(\vec{x}^{(k)} \right) + J \left(\vec{z} \right) \right)^{-1} J \left(\vec{x}^{(k)} \right). \quad (48)$$

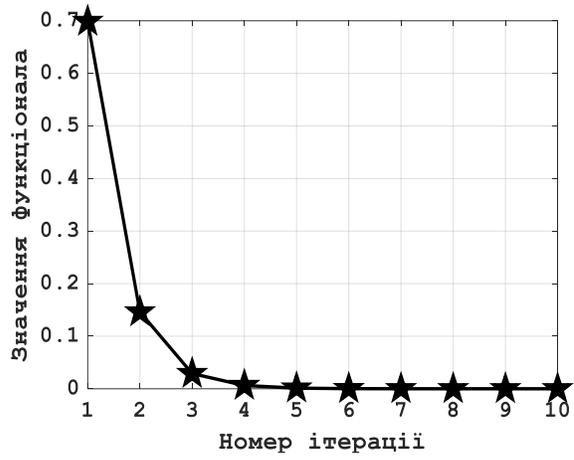
На рис. 8 та рис. 9 графічно представлені результати збіжності методу (48) для оптимізаційних задач з функціоналами (40) та (41) відповідно.

Таблиця 4 містить порівняння результатів отриманого методу з класичним методом Ньютона, а також із урахуванням метода найшвидшого спуску для визначення оптимального значення параметра β .

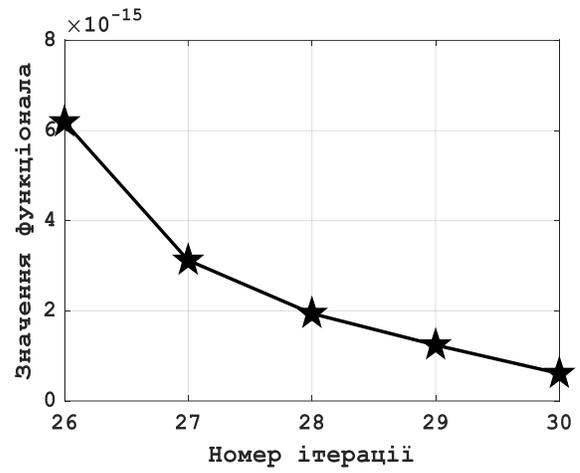
Таблиця 4 – Порівняльний аналіз кількості ітерацій (48) з різними значеннями β відносно класичного методу Ньютона

Метод / Функціонал	Метод (48) для постійного значення $\beta = 1$	Метод (48) для β , отриманого методом найшвидшого спуску	Класичний метод Ньютона
Функціонал (40)	65%	29%	100%
Функціонал (41)	73%	31%	100%

Запропонована модель є окремим випадком, що вирішує обернену задачу екологічних досліджень з використанням 1 джерела забруднення та 1 ПС. Перевагами запропонованого підходу є: 1) зменшення загальної кількості обчислень у більш ніж 3 рази для двох різних функціоналів порівняно з класичним методом Ньютона; 2) підвищення швидкодії модифікованого методу порівняно з класичним методом Ньютона за рахунок вибору оптимального параметра β , який безпосередньо використовується для отримання чисельних розв'язків на кожній ітерації.



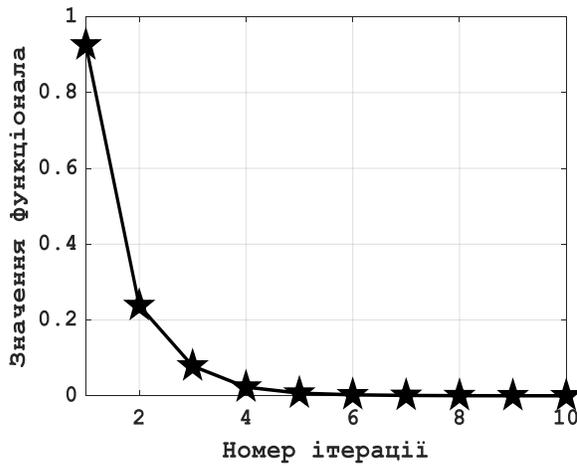
a)



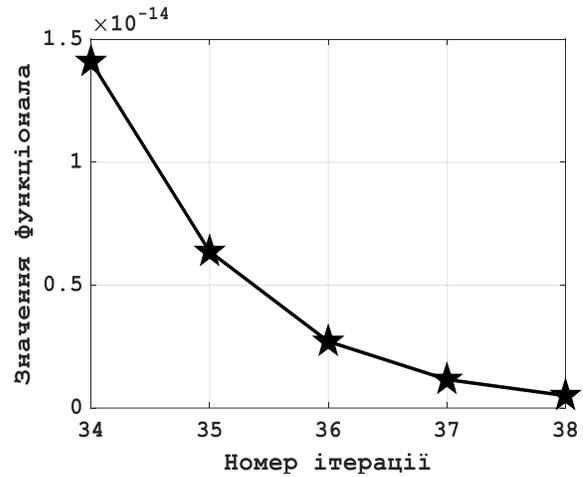
б)

Рис. 8. Значення функціоналу (40):

a) перші 10 ітерацій; б) останні 5 ітерацій



a)



б)

Рис. 9. Значення функціоналу (41):

a) перші 10 ітерацій; б) останні 5 ітерацій

У п'ятому розділі «Апаратно-програмна реалізація системи контролю забруднення повітря на базі бездротової сенсорної мережі» наведена апаратно-програмна реалізація системи контролю забруднення повітря на базі бездротової сенсорної мережі. На базі проведеного аналізу low-cost сенсорів, запропоновано набір сенсорів (PMS 5003/7003 (PM), SDS 011 (PM), BME 280 (температура, відносна вологість, абсолютний тиск), MICS-6814 (NO₂, CO, NH₃), ZE25-O3 (O₃), ZE03-SO2 (SO₂), ZE08-CH2O (CH₂O), MH-Z19 (CO₂), RadKit (рівень радіації)), що можуть бути використані для реалізації системи контролю забруднення повітря. Їх вибрані технічні характеристики наведені в табл. 5.

Розроблено структуру вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря, що базується на використанні low-cost сенсорів. На рис. 10 наведено фото вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря. Наведені технічні характеристики вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря (табл. 6).

Розроблена структура програмного пакету системи контролю забруднення повітря, що базується на використанні 4-х блоків: 1) блоку взаємодії з апаратним забезпеченням; 2) блоку керування; 3) блоку візуалізації інформації; 4) блоку статистичного опрацювання даних (рис. 11).

Блок взаємодії з апаратним забезпеченням дозволяє узгоджувати функціонування апаратних модулів системи контролю із розробленим програмним забезпеченням за допомогою драйверів, що дозволяють виконувати такі операції як пошук та підключення пристрою; генерування ідентифікатору пристрою; зчитування даних та передача їх по інформаційному каналу для подальшого опрацювання; перевірка поточного стану підключеного пристрою; завершення роботи з пристроєм та ін.

Таблиця 5 – Вибрані технічні характеристики сенсорів системи контролю забруднення атмосферного повітря в околі об'єктів енергетики

Сенсор	Тип сенсора	Параметр	Од. вим.	Роздільна здатність	Вимірювальний діапазон	Похибка вимірювання	Час розігріву	Час відгуку	Тривалість роботи
PMS 5003/7003	Оптичний	PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₁₀	мкг/м ³	0,1	0-1000	±10 мкг/м ³ (0-100 мкг/м ³); ±10% (100-1000 мкг/м ³)	—	1 с	2 роки
SDS011	Оптичний	PM _{2.5} , PM ₁₀	мкг/м ³	0,1	0-1000	±10 мкг/м ³ (0-100 мкг/м ³); ±15% (100-1000 мкг/м ³)	—	1 с	2 роки
BME280		Температура	°C	0,01	-40...85	±1 °C (0-85 °C); ±1,5 °C (-40...0 °C)	—	1 с	>5 років
		В. вологість	%	0,01	0...100	±3%			
		Абс. тиск	гПа	0,01	300...1100	± 1 гПа (0-65 °C); ±1,7 гПа (-20-0 °C)			
MICS-6814	MOS	NO ₂	ppm	0,001	0.02...20	~±20%	~ 3 год	1 с	1 рік
		CO			1...1000				
		NH ₃			1...300				
ZE25-O3	EC	O ₃	ppm	0,01	0...10	~±10 ppb	~ 3 хв	~ 90 с	2 роки
ZE03-SO2	EC	SO ₂	ppm	0,01	0...20	~±10 ppb	~ 3 хв	~ 30 с	2 роки
ZE08-CH2O	EC	CH ₂ O	ppb	10	0...5000	~±10 ppb	~ 180 с	~ 60 с	2 роки
MH-Z19	EC	CO ₂	ppm	1	0...5000	± (50 ppm +5%)	~ 180 с	~ 60 с	>5 років
RadKit	Електро магніт.	Рівень радіції	мкР/год	1	0...1000	~±10%	~ 60 с	~ 60 с	2 роки

Таблиця 6 – Технічні характеристики вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря

Параметр	Значення
PM сенсор	PMS 5003/7003 та/або SDS011
Метеорологічні сенсори	BME 280, DHT-22, 3xDS18B20
Підтримка інших сенсорів	<ul style="list-style-type: none"> • формальдегід (CH₂O) • монооксид вуглецю (CO) • діоксид вуглецю (CO₂) • монооксиду азоту (NO) • діоксид азоту (NO₂) • діоксид сірки (SO₂) • аміак (NH₃) • озон (O₃)
Джерело живлення	5В (USB-сумісний), вбудований акумулятор (3,7 В, 2000 мАч) та альтернативне джерело живлення (сонячна панель)
Зв'язок	GSM, Wi-Fi та Mesh модулі
Розміри	155x120x50мм
Монтаж	ABS корпус з 4 монтажними отворами для завінчування коробки або закріплення за допомогою стяжок

Блок керування реалізує такі функції як вибір режиму роботи системи; налаштування параметрів роботи; градування сенсорів; сповіщення про несправні сенсори та їх відключення; надання доступу до даних; синхронізація із зовнішнім програмним забезпеченням та ін.



Рис. 10. Зовнішній вигляд розроблених вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря: а) з індикацією результатів вимірювань; б) без індикації результатів вимірювань



Рис. 11. Структура розробленого програмного пакету системи контролю забруднення повітря

Блок візуалізації інформації реалізує інтерфейс користувача; відображення результатів контролю та зміни інформативних параметрів у просторі і часі; формування полів забруднюючих речовин; формування звітів за результатами контролю тощо.

Запропонована структура блоку статистичного опрацювання, що складається із блоку попереднього опрацювання даних, блоку кореляційного аналізу, блоку регресійного аналізу та блоку дисперсійного аналізу. Структура блоку статистичного опрацювання даних та відповідні процедури, що реалізуються внутрішніми блоками, наведені на рис. 12.

Блок попереднього опрацювання даних дозволяє визначити закон розподілу отриманих даних, відповідні статистичні параметри цих розподілів, точкові та інтервальні оцінки параметрів закону розподілу даних, та провести перевірку значущості статистичних параметрів експериментальних даних.

Запропоновано науково-практичні аспекти визначення технічної справності сенсорів вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря, що базується на використанні статистичних характеристик вибірок даних (коефіцієнта детермінації R^2 , розмаху R та коефіцієнта варіації C_v) (рис. 13).

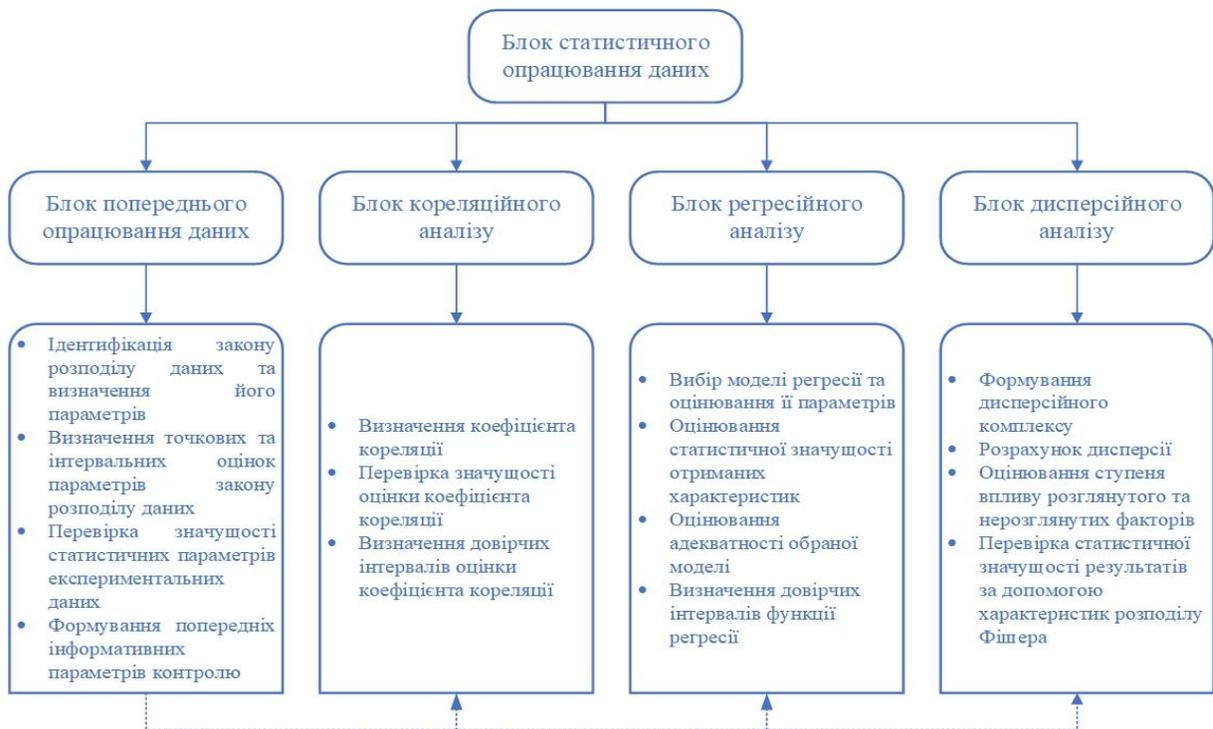


Рис. 12. Блок статистичного опрацювання даних системи контролю забруднення повітря

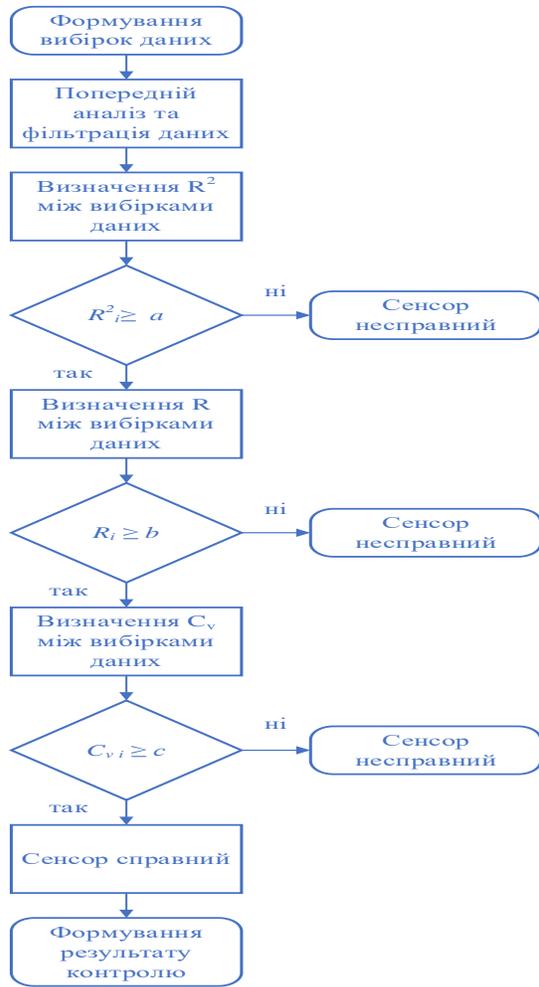


Рис. 13. Алгоритм визначення технічної справності сенсорів вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря за статистичними характеристиками вибірок даних (a , b , c – граничні значення R^2 , R та C_v відповідно)

Розроблений програмний пакет має наступні переваги: висока інформативність, зумовлена підтримкою широкого ряду сенсорів забруднюючих речовин та метеорологічних сенсорів; достовірність контролю, що досягається використанням запропонованих методів та алгоритмів в блоці опрацювання статистичної інформації; селективність даних, що реалізується вибіркоким доступом до даних; зручний інтерфейс.

Для формування бездротової сенсорної мережі розглянуті особливості бездротових технологій зв'язку. Показано, що одним із перспективних видів бездротового зв'язку, що може бути використаний для реалізації просторово розгалуженої системи контролю забруднення повітря є mesh-зв'язок, що реалізується на базі технології Wi-Fi. Серед переваг цього виду зв'язку, окрім

переваг Wi-Fi технології, - самоорганізація та самовідновлення, що дозволяє створювати та підтримувати мережу контролю в автономному режимі.

Запропоновано використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) гелікоптерного типу як платформ для вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря. Модульна структура БПЛА дозволяє швидко і порівняно недорого замінювати пошкоджені елементи. Наявність спеціального підвісу також дозволяє швидко змінювати контрольні-вимірювальну апаратуру, що адаптує БПЛА для дослідження різних забруднюючих речовин.

На основі даних аеродинамічних досліджень показано, що зона під квадрокоптером характеризується відсутністю чи відносно слабкими повітряними потоками, що робить можливим розташування там вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря.

На рис. 14 наведена блок схема процесу контролю забруднення повітря, що реалізуються за допомогою БПЛА гелікоптерного типу та встановленого на ньому вимірювального модулю.

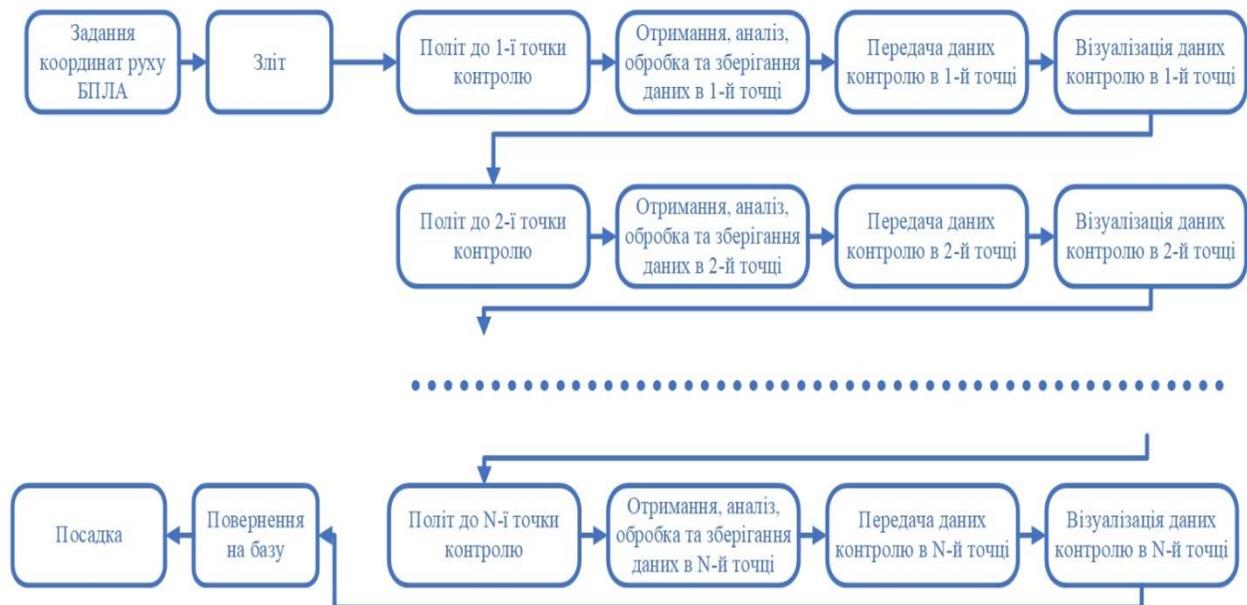


Рис. 14. Блок схема алгоритму проведення контролю забруднення повітря на базі БПЛА гелікоптерного типу

Використання БПЛА як платформи для мобільного контролю забруднення повітря дозволяє сформувавши поля концентрації забруднюючих речовин на різних висотах. При цьому пропонується використання *air quality index* (AQI) як інформативного параметру контролю.

У шостому розділі «**Експериментальні дослідження системи контролю забруднення повітря**» розглянуто результати експериментальних досліджень розробленої системи контролю забруднення повітря.

Проведені експериментальні дослідження стану забруднення повітря в м. Києві з використанням існуючої системи контролю забруднення повітря. На основі отриманих даних зафіксовано рівні забруднення для кожної з досліджуваних речовин (SO_2 , CO , NO_2 , NO , HF , HCl , CH_2O , NH_3 , завислі речовини) на відповідних ПС за період досліджень. Встановлено факти багаторазового перевищення гранично-допустимих концентрацій відповідних речовин в повітрі м. Києві.

Проведено експериментальні дослідження розроблених вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря. Дослідження проводились на базі 2 вимірювальних модулів, оснащених сенсорами BME280, SDS011, MICS-6814, ZE25-O3, ZE08-CH2O, MH-Z19, RadKit. За час досліджень було отримано 5933 наборів даних для кожного вимірювального модулю. Візуалізовано отримані експериментальні дані щодо вимірювання метеорологічних параметрів (температури, відносної вологості та абсолютного тиску), мікродисперсного пилу ($\text{PM}_{2,5}$, PM_{10}), NO_2 , CO , NH_3 , O_3 , CH_2O , CO_2 та рівня радіації (рис. 15).

Отримані дані загалом характеризуються достатньо високим значенням коефіцієнта кореляції r ($\geq 0,93$) та коефіцієнтом детермінації R^2 ($\geq 0,87$) (табл. 7). В ході експерименту проведено дослідження щодо сили кореляційного зв'язку між метеорологічними параметрами та концентраціями забруднюючих речовин,

що показало позитивний взаємозв'язок між значенням концентрацій NO_2 , CO , O_3 та температурою і відносною вологістю повітря (табл. 8).

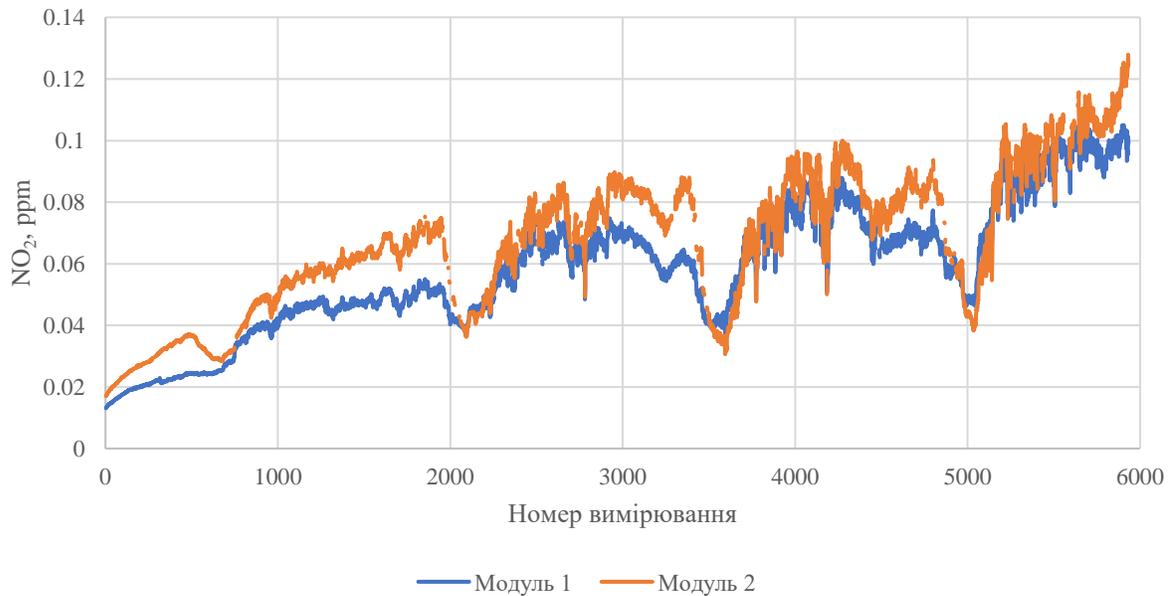


Рис. 15. Експериментальні дані концентрації NO_2 , отримані за допомогою розроблених вимірювальних модулів

Таблиця 7 – Рівень працездатності системи контролю забруднення повітря та деякі статистичні характеристики експериментальних досліджень

Параметр	Модуль 1	Модуль 2	Система (модулі 1+2)		
				r	R^2
Температура	5725/96,5%	5278/89%	5909/99,6%	0,99	0,99
Вологість	5725/96,5%	5278/89%	5909/99,6%	0,99	0,99
Тиск	5725/96,5%	5278/89%	5909/99,6%	0,99	0,99
$\text{PM}_{2,5}$	2735/46,1%	5140/86,6%	5548/93,5%	0,96	0,93
PM_{10}	2735/46,1%	5140/86,6%	5548/93,5%	0,97	0,93
NO_2	5725/96,5%	5278/89%	5909/99,6%	0,96	0,92
CO	5725/96,5%	5278/89%	5909/99,6%	0,95	0,90
NH_3	5725/96,5%	5278/89%	5909/99,6%	0,93	0,87
O_3	5724/96,5%	5278/89%	5909/99,6%	0,94	0,87
CH_2O	5725/96,5%	5278/89%	5909/99,6%	0,82	0,67
CO_2	5725/96,5%	5278/89%	5909/99,6%	0	0
Рів. радіації	5725/96,5%	5278/89%	5909/99,6%	0,02	0

Таблиця 8 – Результати досліджень щодо сили кореляційного зв'язку між метеорологічними параметрами та концентраціями забруднюючих речовин

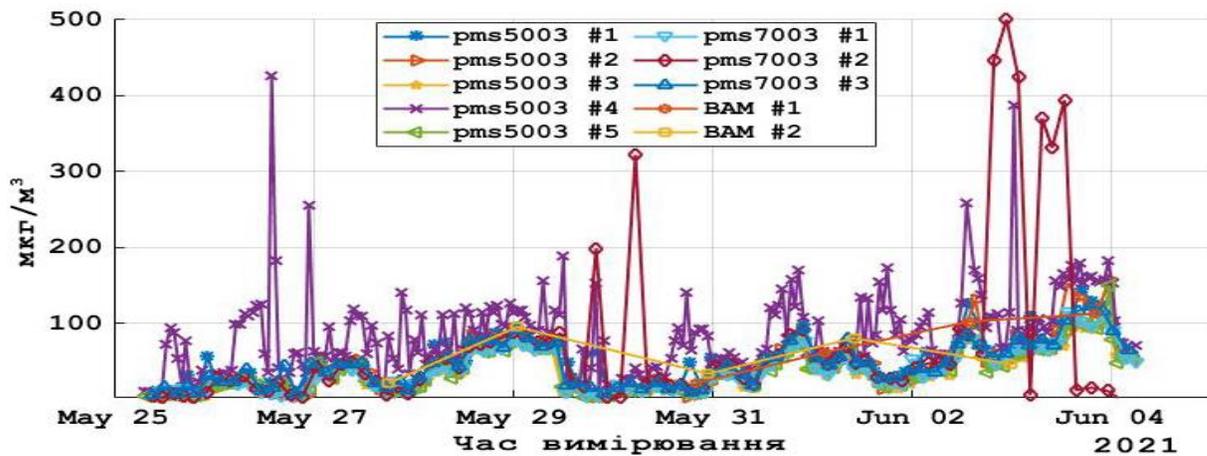
Параметр	Модуль	Температура		Вологість		Тиск	
		r	R^2	r	R^2	r	R^2
PM _{2,5}	1	-0,21	0,04	0,30	0,09	0,02	0
	2	-0,41	0,17	0,60	0,36	0,17	0,03
PM ₁₀	1	0,03	0	-0,01	0	-0,04	0
	2	-0,04	0	0,09	0,01	0	0
NO ₂	1	0,57	0,32	-0,61	0,37	-0,82	0,67
	2	0,33	0,11	-0,46	0,21	-0,72	0,52
CO	1	0,59	0,35	-0,35	0,12	-0,57	0,33
	2	0,74	0,55	-0,56	0,32	-0,64	0,41
NH ₃	1	0,03	0	0,22	0,05	0,40	0,16
	2	0,28	0,08	0,01	0	0,17	0,03
O ₃	1	-0,51	0,26	0,50	0,25	-0,19	0,04
	2	-0,55	0,30	0,53	0,28	-0,16	0,03
CH ₂ O	1	-0,12	0,01	0,08	0,01	0,15	0,02
	2	-0,08	0,01	0,13	0,02	0,17	0,03
CO ₂	1	-0,20	0,04	0,31	0,10	-0,24	0,06
	2	0,12	0,01	0,01	0	-0,34	0,11

Проведені експериментальні дослідження щодо статистичних характеристик сенсорів мілкодисперсного пилу в польових умовах з використанням 5 сенсорів PMS 5003, 3 сенсорів PMS 7003 та ВАР-пристрою як еталонного пристрою. Зведені результати щодо вимірювання концентрації мілкодисперсного пилу наведені на рис. 16.

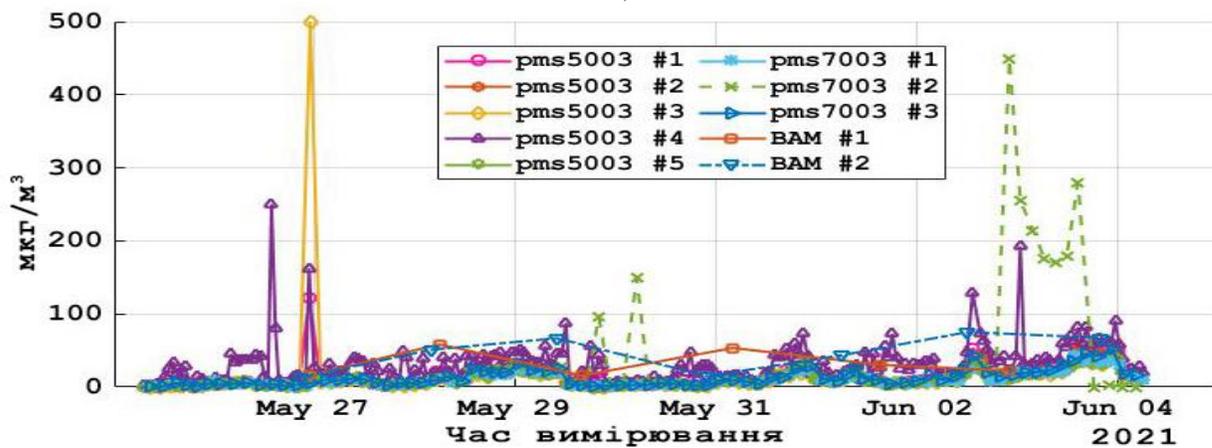
Згідно отриманих експериментальних результатів можна стверджувати про те, що такі статистичні параметри як коефіцієнт детермінації R^2 , розмах R та коефіцієнт варіації C_v можуть бути використані як інформативні параметри технічного стану вимірювальних модулів та системи контролю забруднення повітря загалом. Встановлено, що значення коефіцієнта варіації C_v більше ніж 300% інформує про несправність сенсора (такий сенсор потребує заміни

/очищення). Знаходження значення коефіцієнта варіації в межах від 200% до 300% потребує підвищеної уваги оператора системи контролю до цього сенсора.

Для побудови лінійних градувальних характеристик сенсорів мілкодисперсного пилу проведено регресійний аналіз даних між сенсорами PMS 5003 та PMS 7003, і BAM-пристроєм. На рис. 17 наведені відповідні залежності еталонних вимірювань $PM_{2.5}$ від деяких значень вибірок експериментальних даних для сенсору PMS 5003#1. Загалом було сформовано 64 лінійні регресії, що можуть бути використані для градування відповідних low-cost сенсорів. Встановлено, що для градування low-cost сенсорів мілкодисперсного пилу можуть використовуватися мінімальні та середні значення погодинних вибірок.



a)



б)

Рис. 16. Результати експериментальних досліджень вимірювання концентрації мілкодисперсного пилу в повітрі: а) $PM_{2.5}$; б) PM_{10}

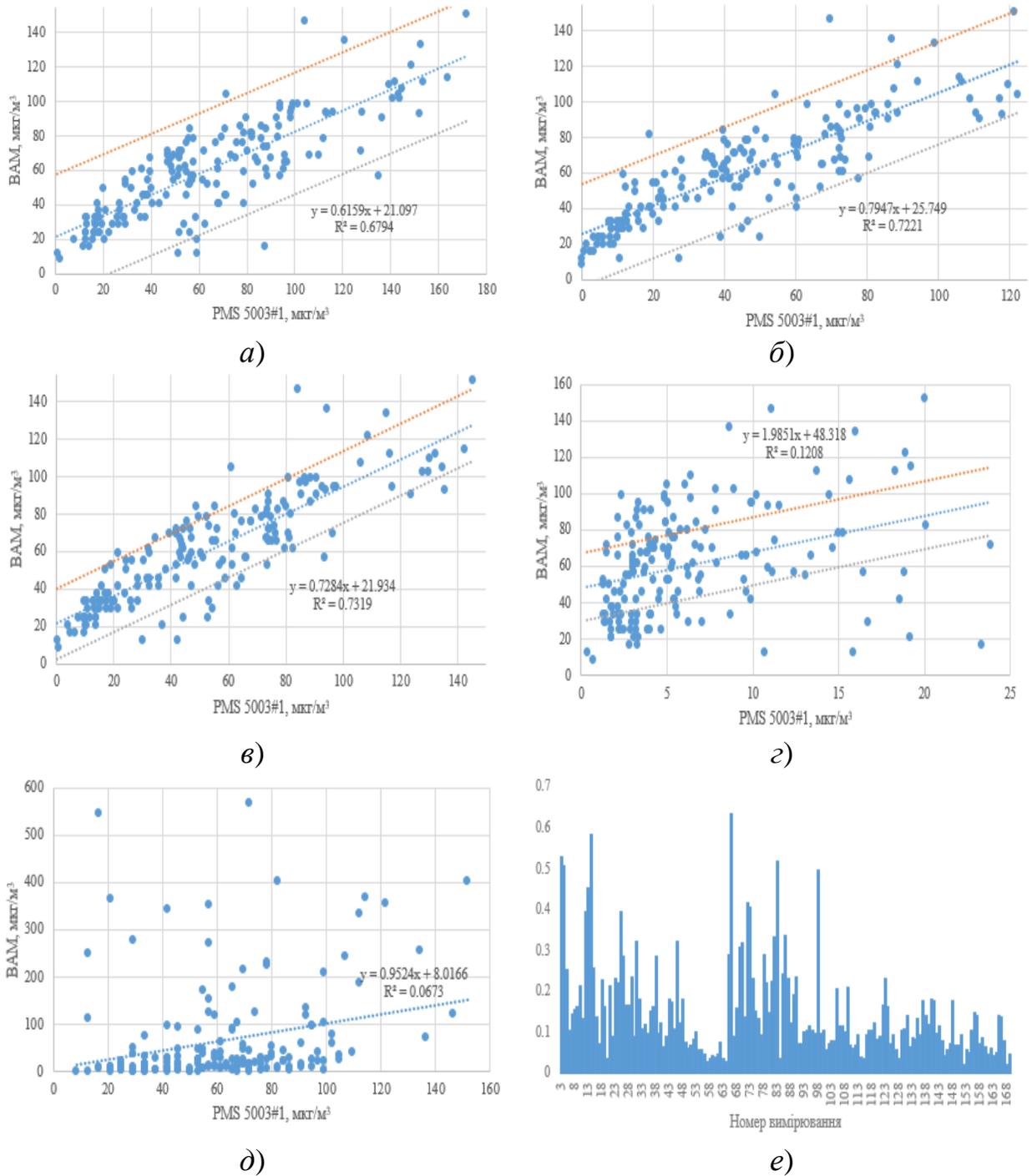


Рис. 17. Залежності еталонних вимірювань $PM_{2,5}$ від деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 5003#1 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – середньоквадратичного відхилення, д – дисперсії) та значення коефіцієнта варіації (е)

Таблиця 9 – Оцінювання статистичних характеристик регресійних моделей

Сенсор	R_{max}^2	r_{max}	$K_{max}, \%$	R_{min}^2	r_{min}	$K_{min}, \%$	R_{av}^2	r_{av}	$K_{av}, \%$	R_S^2	r_S	$K_S, \%$
PM _{2,5}												
PMS 5003 #1	0,68	0,82	88,30	0,72	0,85	82,46	0,73	0,86	66,08	0,12	0,35	6,47
PMS 5003 #2	0,78	0,89	87,65	0,77	0,88	86,13	0,79	0,89	76,02	0,25	0,50	5,88
PMS 5003 #3	0,77	0,88	84,21	0,74	0,86	95,95	0,77	0,88	92,98	0,20	0,45	100
PMS 5003 #4	0,03	0,23	39,31	0,71	0,84	71,10	0,45	0,67	66,47	0,05	-0,22	90,12
PMS 5003 #5	0,76	0,87	88,30	0,77	0,88	94,19	0,77	0,88	92,98	0,03	0,17	100
PMS 7003 #1	0,74	0,86	90,64	0,74	0,86	64,74	0,71	0,85	83,24	0,11	0,33	47,95
PMS 7003 #2	0,42	0,65	93,29	0,84	0,92	52,17	0,44	0,67	91,95	0,01	0,11	51,01
PMS 7003 #3	0,74	0,86	93,57	0,75	0,87	78,03	0,73	0,85	91,91	0,09	0,29	50,29
PM ₁₀												
PMS 5003 #1	0,61	0,78	58,94	0,67	0,82	38,76	0,63	0,79	48,56	0,19	0,43	47,83
PMS 5003 #2	0,67	0,82	53,88	0,68	0,82	39,23	0,69	0,83	43,00	0,14	0,55	11,59
PMS 5003 #3	0,67	0,82	41,55	0,68	0,83	34,93	0,69	0,83	36,23	0,29	0,53	46,86
PMS 5003 #4	0,01	0,09	87,98	0,58	0,76	60,77	0,22	0,46	91,87	0,03	-0,17	59,13
PMS 5003 #5	0,66	0,81	41,06	0,69	0,83	34,93	0,70	0,83	36,72	0,18	0,42	50,72
PMS 7003 #1	0,64	0,80	48,79	0,67	0,82	37,32	0,61	0,78	45,45	0,22	0,47	49,76
PMS 7003 #2	0,01	0,09	72,73	0,07	0,25	60,77	0,04	0,20	69,38	0,01	-0,08	53,11
PMS 7003 #3	0,67	0,82	50,00	0,67	0,82	39,71	0,69	0,83	43,27	0,23	0,48	49,03

Проведено оцінювання статистичних характеристик отриманих регресійних моделей (табл. 9), а саме коефіцієнтів детермінації R^2 , коефіцієнтів кореляції r , та достовірності результатів контролю K . Зеленим кольором виділені максимальні значення коефіцієнта кореляції r для кожного сенсору серед розглянутих погодинних вибірок експериментальних даних. Достовірність контролю, що здійснюється з використанням розроблених модулів, оцінювалась як відносний показник попадання результату контролю в довірчий інтервал значень розрахованих за регресією.

Встановлено перспективні напрями розвитку систем контролю забруднення повітря, що базуються на використанні методів дистанційного зондування Землі та спектрального аналізу. Використання розробленої системи контролю забруднення повітря разом із перспективними методами контролю дозволить значно збільшити інформативність контролю шляхом зростання кількості досліджуваних забруднювачів, що продукуються об'єктами енергетики, розширити території контролю, підвищити точність моделювання розповсюдження забруднювачів, та в цілому сприяти покращенню життя населення.

Висновки. В дисертаційній роботі сформульовано та вирішено **актуальну науково-прикладну проблему** створення теоретичних засад, розроблення та практичного застосування засобів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що забезпечує локалізацію джерел забруднення повітря на базі просторово розгалужених бездротових сенсорних мереж.

1. Показано, що **головні споживачі природних енергоресурсів** – електростанції, ТЕЦ, котельні, та інші **об'єкти генерування та перетворення енергії**, що продукують значний обсяг викидів забруднюючих речовин у повітря. На базі методів кореляційного аналізу запропоновано алгоритм дослідження взаємозв'язку складових енергетичного балансу та викидів забруднюючих речовин в повітря (CO_2 , SO_2 , NO_2 , CO , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}). Показано, що сильна

залежність спостерігається між споживанням вугілля/торфу та викидами NO_2 , SO_2 та PM_{10} ($\hat{r}' > 0,95$). Загалом 73% розглянутих сукупностей мають додатній кореляційний зв'язок, що свідчить про необхідність постійного контролю забруднення повітря в околі об'єктів енергетики.

2. Аналіз стану методологічного та апаратно-програмного забезпечення контролю забруднення повітря показав, що нормативи та засоби контролю, які сьогодні застосовуються, морально застаріли. Зокрема, існуюча мережа стаціонарних постів спостереження за станом була створена відповідно до вимог РД 52.04.186-89 і до цього часу не змінилась. Відбір проб на постах проводиться на визначених часових інтервалах, що не дозволяє дослідити динаміку розповсюдження забруднюючих речовин в повітрі. Також для оцінки рівня забруднення певних територій використовується індекс забруднення атмосфери, значення якого не дозволяє комплексно оцінити ступінь цього забруднення. Це обумовлює **необхідність розроблення науково-практичних засад створення засобів та методів контролю забруднення повітря** на базі просторово-розгалуженої бездротової сенсорної мережі.

3. Розроблено **принципи побудови систем контролю забруднення повітря** на базі просторово-розгалуженої low-cost сенсорної мережі та з використанням концепції Smart Energy, що відповідає сучасним вимогам до якості даних, рівня інформативності та доступності.

Запропоновано узагальнену ієрархічну структуру систем контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, особливістю якої є визначення ієрархічних рівнів інформації, що формуються певними інформаційно-аналітичними центрами, та доступу до цієї інформації різних типів користувачів. Також структура передбачає зворотний зв'язок від центрів прийняття рішень, що впливають на функціонування об'єктів контролю, і як наслідок, регулюється кількість забруднюючих речовин, що надходить у повітря.

Використання запропонованих принципів дозволяє вирішити ряд важливих задач контролю забруднення повітря об'єктами енергетики: формування оперативної та достовірної інформації, локалізацію джерел забруднення, інформування населення про стан забруднення, оцінку експозиції та її вплив на організм, попередження населення про небезпечні рівні забруднення, виявлення факторів небезпеки для біосистем, формування політики в сфері екології, контроль за дотриманням державних норм. У рамках запропонованих принципів обґрунтовано відповідні вимоги до даних контролю забруднення повітря, такі як просторова репрезентативність; єдність та достовірність результатів контролю; співставність та повнота отриманих даних в часі і просторі.

4. Запропоновано математичні моделі для визначення та прогнозування інформаційних параметрів системи контролю забруднення повітря. Зокрема, розроблено математичні моделі інтенсивності інформаційних параметрів забруднення повітря у вигляді векторного випадкового поля, неоднорідного за просторовими аргументами, нестационарного в часі, та такого, що залежить від впливу різних факторів. Застосування математичних моделей такого виду дає змогу виконувати дослідження із визначенням просторово-часових характеристик за умови проведення контролю у різних обмежених областях простору на скінченних інтервалах часу. Це забезпечує також можливість проведення подальшого порівняльного аналізу результатів контролю з метою перевірки адекватності запропонованих моделей, прогнозування динаміки зміни основних характеристик об'єктів контролю та інше.

5. Розроблено ряд математичних моделей, методів та алгоритмів для визначення та прогнозування інформаційних параметрів системи контролю забруднення повітря.

Запропоновано матричний метод визначення подібності даних вимірювальних модулів для контролю забруднення повітря, що дозволяє

кількісно та якісно оцінити параметри функціонування засобів контролю та сформувати профілі ретроспективних даних для вибраних об'єктів.

Запропоновано метод прогнозування об'ємної концентрації кисню в повітрі, що базується на використанні метеорологічних параметрів навколишнього середовища (температури, відносної вологості, абсолютного тиску) та дискретного перетворення Фур'є. Вибір дискретного перетворення Фур'є для апроксимації даних зумовлений їх квазіперіодичним характером. Модель визначалася шляхом пошуку апроксимуючої функції з коефіцієнтом детермінації, максимально наближеним до 1. Обґрунтовано використання даного методу в енергетиці, екології, медицині, аграрному секторі.

Запропоновано використання ізотропної та анізотропної Гаусових моделей для побудови функцій щільності розподілу швидкості та напрямку вітру, що дозволяють визначити переважний напрям поширення забруднюючих речовин, і, як наслідок, локалізувати зону розміщення джерела забруднення атмосфери.

Розроблено оптимізаційні математичні моделі для вирішення оберненої задачі екологічних досліджень, а саме локалізації джерела забруднення та визначення концентрації викидів забруднюючих речовин. Розроблено модифікацію класичного методу Ньютона для знаходження чисельного розв'язку побудованих математичних моделей ідентифікації параметрів джерела забруднення повітря. Перевагами запропонованого підходу є: 1) зменшення загальної кількості обчислень у більш ніж 3 рази для двох різних функціоналів порівняно з класичним методом Ньютона; 2) підвищення швидкодії модифікованого методу порівняно з класичним методом Ньютона за рахунок вибору оптимального параметра β , який безпосередньо використовується для отримання чисельних розв'язків на кожній ітерації.

Запропоновані алгоритми опрацювання даних контролю забруднення повітря, що реалізуються з використанням критеріїв Фішера, Ектона, Тітьєна-

Мура-Бекмана, Бартлета, Кохрана, Неймана-Пірсона, Бліса-Кохрана-Тьюкі, Хартлі, Кедуела-Леслі-Брауна. Запропоновані алгоритми дозволяють значно спростити процес опрацювання даних та отримати ряд інформативних параметрів, що можуть бути застосовані для оцінювання стану забруднення повітря об'єктами енергетики та технічного стану сенсорів і системи контролю загалом.

6. На базі розробленої структури, запропоновані варіанти конструктивних рішень вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря, що можуть включати сенсори метеорологічних факторів (температури, відносної вологості, абсолютного тиску), мілкодисперсного пилу (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_{10}), CO, CO₂, NO₂, SO₂, CH₂O, NH₃, рівня радіації тощо. Розроблені модулі мають порівняно невеликі розмір та вагу (155x120x50 мм та ~400 г у найменшій комплектації), що робить можливим їх встановлення у необхідному місці. Запропоновано використання БПЛА як платформи для вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря. Розроблено алгоритм контролю забруднення повітря з використанням БПЛА гелікоптерного типу.

7. Розроблено методику обґрунтування вибору сенсорів для системи контролю забруднення повітря на основі аналізу збіжності результатів контролю. Проведені дослідження збіжності результатів контролю для 2-х типів сенсорів (PMS 5003 та PMS 7003) мілкодисперсного пилу в межах двох фракцій – $PM_{2.5}$ та PM_{10} . Всього у дослідженні використовувалась 5 сенсорів моделі PMS 5003 та 3 сенсори моделі PMS 7003. Для оцінювання збіжності результатів використовувався коефіцієнт детермінації R^2 , розрахований попарно для різних груп сенсорів та фракцій мілкодисперсного пилу – для $PM_{2.5}$ – від 0,87 до 0,95 для сенсорів PMS 5003, та від 0,9 до 0,99 – для сенсорів PMS 7003; PM_{10} – від 0,89 до 0,99 для сенсорів PMS 5003, та від 0,91 до 0,99 – для сенсорів PMS 7003. Отримані результати характеризуються високим рівнем збіжності даних.

8. Проведене оцінювання різних динамічних характеристик low-cost сенсорів мілкодисперсного пилу. На основі експериментальних даних розроблено 64 лінійні моделі, що можуть бути використані для градування low-cost сенсорів. Встановлено, що для градування low-cost сенсорів мілкодисперсного пилу можуть використовуватися мінімальні та середні значення погодинних вибірок. Проведено оцінювання статистичних характеристик отриманих регресійних моделей, а саме коефіцієнтів детермінації R^2 , коефіцієнтів кореляції r , та достовірності результатів контролю K .

Показано, що коефіцієнт детермінації R^2 , розмах R та коефіцієнт варіації C_v можуть бути використані як інформативні параметри технічного стану вимірювальних модулів та системи контролю забруднення повітря загалом. На основі експериментальних даних встановлено, що значення C_v більше 300% вказує на несправність сенсора системи контролю, а значення C_v в межах від 200% до 300% вказує на потребу в підвищеній увазі оператора системи контролю до відповідного сенсора.

9. На основі проведених досліджень сформовано перспективні напрями розвитку методологічного та апаратно-програмного забезпечення для контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що в цілому розширюють можливості системи контролю забруднення повітря.

Список публікацій здобувача

Публікації, які відображають основний зміст дисертації:

1. Babak, V. P., Babak, S. V., Myslovych, M. V., **Zaporozhets, A. O.**, Zvaritch, V. M. (2020). *Diagnostic Systems For Energy Equipments*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3>. ISBN 978-3-030-44442-6

2. Babak, V.P., Babak, S.V., Eremenko, V.S., Kuts, Yu. V., Myslovych, M.V., Scherbak, L.M., **Zaporozhets, A.O.** (2021). *Models and Measures in Measurements and Monitoring*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70783-5>. ISBN 978-3-030-70782-8

3. **Zaporozhets, A.O.**, Redko, O.O., Babak, V.P., Eremenko, V.S., Mokiychuk, V.M. (2018). Method of indirect measurement of oxygen concentration in the air. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 105-114. <http://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/14> (*Scopus, Q2*, ISSN 2223-2362).
4. **Zaporozhets, A.**, Eremenko, V., Serhienko, R., Ivanov, S. (2019). Methods and Hardware for Diagnosing Thermal Power Equipment Based on Smart Grid Technology. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 871, 476-489. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01069-0_34 (*Scopus, Q3*, ISSN 2194-5365).
5. **Zaporozhets, A.** (2019) Analysis of control system of fuel combustion in boilers with oxygen sensor. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 64(4), 241-248. <https://doi.org/10.3311/PPme.12572> (*Scopus, Q2*, ISSN 1587-379X)
6. **Zaporozhets, A.**, Khaidurov, V. (2020). Mathematical Models of Inverse Problems for Finding the Main Characteristics of Air Pollution Sources. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(12), 563. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04933-z> (*Scopus Q2, Web of Science*, ISSN 1573-2932).
7. **Zaporozhets, A.** (2020). Overview of Quadcopters for Energy and Ecological Monitoring. *Studies in Systems, Decision and Control*, 298, 15-36. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_2 (*Scopus, Q4*, ISSN 2198-4190).
8. **Zaporozhets, A.** (2021). Correlation Analysis Between the Components of Energy Balance and Pollutant Emissions. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(3), 114. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05048-9> (*Scopus Q2, Web of Science*, ISSN 1573-2932).
9. Rezinkina, M. M., Sokol, Y. I., **Zaporozhets, A. O.**, Gryb, O. G., Karpaliuk, I. T., Shvets, S. V. (2021). Monitoring of energy objects parameters with using UAVs. *Studies in Systems, Decision and Control*, 359, 1-8. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69752-5_1 (*Scopus, Q4*, ISSN 2198-4190).
10. **Zaporozhets, A.**, Babak, V., Sverdlova, A., Isaienko, V., Babikova, K. (2021). Development of a System for Diagnosing Heat Power Equipment Based on IEEE 802.11s. *Studies in Systems, Decision and Control*, 346, 141-151. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_8 (*Scopus, Q4*, ISSN 2198-4190).
11. **Zaporozhets, A.**, Khaidurov, V., Tsiupii, T. (2022). Creation of High-Speed Methods for Solving Mathematical Models of Inverse Problems of Heat Power Engineering. *Studies in Systems, Decision and Control*, 399, 41-74. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87675-3_3 (*Scopus, Q4*, ISSN 2198-4190).
12. **Запорожец, А.А.**, Свєрдлова, А.Д. (2017). Особенности применения технологии Smart Grid в системах мониторинга и диагностирования теплоэнергетических объектов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 33-41. <http://doi.org/10.15407/tdnk2017.02.05>. ISSN 0235-3474 (*фахове видання*).
13. **Запорожець, А.О.**, Свєрдлова, А.Д. (2017). Аналіз методів діагностування теплоенєргетичних об'єктів. *Наукоємні технології*, 35(3), 259-

265. <http://doi.org/10.18372/2310-5461.35.11846> ISSN 2075-0781 (фахове видання).

14. Isaienko, V., **Zaporozhets, A.**, Babikova, K., Gulevets, D., & Savchenko, S. (2019). Review of methods and means of monitoring the air pollution. *Advances in Aerospace Technology*, 3(80), 61-70. <http://doi.org/10.18372/2306-1472.80.14275>. ISSN 1813-1166 (фахове видання).

15. Бабак, В.П., **Запорожець, А.О.**, Куц, Ю.В., Щербак, Л.М. (2020). Моделі і міри в теорії та практиці вимірювань. *Теплофізика та теплоенергетика*, 42(4), 5-18. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2020.1>. ISSN 2663-7243 (фахове видання).

16. Gryb, O., Karpaliuk, I., Shvets, S., **Zaporozhets, A.** (2020). Recognition of corona discharge presence by acoustic system installed on unmanned aerial vehicle. *Advances in Aerospace Technology*, 85(4), 46-52. <https://doi.org/10.18372/2306-1472.85.15138>. ISSN 1813-1166 (фахове видання).

17. Babak, V., **Zaporozhets, A.**, Kovtun, S., Serhienko, R. (2018). Methods and means of heat losses monitoring for heat pipelines. *International Journal "NDT Days"*, 2(1), 213-221. ISSN 2603-4646 (фахове іноземне видання).

18. **Zaporozhets, A.** (2019). System for Diagnosing Main Pipelines of Heat Networks Based on UAVs. *International Journal "NDT Days"*, 1(2), 69-77. ISSN 2603-4646 (фахове іноземне видання).

19. Патент на винахід №117967, Україна, МПК G01R 31/01, G06F 17/18. Спосіб визначення взаємної кореляційної функції шумових сигналів / Бабак, В.П., **Запорожець, А.О.**, Мартинюк, Г.В., Щербак, Л.М.; заявник та патентовласник Інститут технічної теплофізики НАН України; заявл. 14.12.2016; опубл. 25.10.2018. Бюл. №20.

20. Патент на винахід №121084, Україна, МПК F17D 5/02, G01K 17/00. Спосіб діагностування технічного стану магістральних трубопроводів теплових мереж / **Запорожець, А.О.**, Ковтун, С.І.; заявник та патентовласник Інститут технічної теплофізики НАН України; заявл. 15.11.2018; опубл. 25.03.2020. Бюл. №6.

Публікації, які засвідчують апробацію результатів дисертації:

21. Redko, A., **Zaporozhets, A.** (2017). Effect of changing oxygen concentration on formation of air-fuel mixture in aviation engines. *Abstract book of International Symposium on Sustainable Aviation 2017*, 10-13 September 2017. Kyiv: National Aviation University. P. 78.

22. **Запорожець, А.О.**, Сverdlova, A.D. (2018). Розроблення вимірювальних модулів ієрархічної системи діагностування енергетичного обладнання на базі Smart Grid технологій. *Збірник тез XXXVI науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в*

енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (до 100-річчя Національної академії наук України), 16 травня 2018 р. Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. С.65-66.

23. Іванов, С.О., Сергієнко, Р.В., **Запорожець, А.О.**, Бурова, З.А. (2018). Засоби підвищення ефективності виготовлення, контролю якості та спалювання палива з рослинної біомаси. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: виклики для університетів наук про життя»*, 23-25 травня 2018 р. Київ: НУБІП. С. 148-150.

24. **Zaporozhets, A.O.**, Eremenko, V.S., Serhienko, R.V., Ivanov, S.A. (2018). Development of an intelligent system for diagnosing the technical condition of the heat power equipment. *2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, 11-14 September 2018. Lviv: «Vezha i Ko». P. 48-51. <http://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2018.8526742> (*Scopus, Web of Science*).

25. Babak, S., Babak, V., **Zaporozhets, A.**, Sverdlova, A. (2019). Method of Statistical Spline Functions for Solving Problems of Data Approximation and Prediction of Objects State. *CEUR Workshop Proceedings*, 2353, 810-821. <http://ceur-ws.org/Vol-2353/paper64.pdf> (*Scopus*, ISSN 1613-0073).

26. Eremenko, V., **Zaporozhets, A.**, Isaenko, V., Babikova, K. (2019). Application of Wavelet Transform for Determining Diagnostic Signs. *CEUR Workshop Proceedings*, 2387, 202-214. <http://ceur-ws.org/Vol-2387/20190202.pdf> (*Scopus*, ISSN 1613-0073).

27. **Zaporozhets, A.**, Eremenko, V., Redko, O. (2019). Metrological assessment of the indirect method of measuring the concentration of oxygen in the air. *Proceedings of the International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers*, 2019, 640-643. <https://doi.org/10.1109/CAOL46282.2019.9019506> (*Scopus*, ISSN 2160-1518)

28. Babak, V., Scherbak, L., Kuts, Y., **Zaporozhets, A.** (2021). Information and measurement technologies for solving problems of energy informatics. *CEUR Workshop Proceedings*, 3039, 24-31. <http://ceur-ws.org/Vol-3039/short20.pdf> (*Scopus*, ISSN 1613-0073).

29. Sverdlova, A., **Zaporozhets, A.** (2021). Predicting anomaly conditions of energy equipment using neural networks. *E3S Web of Conferences*, 280, 09005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128009005> (*Scopus*, ISSN 2267-1242).

30. **Zaporozhets, A.O.**, Sverdlova, A.D., Ivaschenko, T.G., Kovach, V.O., Artemchuk, V.O. (2022). Electronic circuits of measuring modules of air pollution monitoring system based on low-cost sensors. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1049, 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012016> (*Scopus*, ISSN 1755-1315).

31. Sverdlova, A.D., **Zaporozhets, A.O.**, Bohachev, I.V., Popov, O.O., Iatsyshyn, A.V., Iatsyshyn, A.V., Kovach, V.O., Artemchuk, V.O., Hrushchynska, N.M. (2021). Self-organizing network topology for autonomous IoT systems. *CEUR*

Workshop Proceedings, 2850, 57-70. <http://ceur-ws.org/Vol-2850/paper4.pdf> (*Scopus*, ISSN 1613-0073).

32. **Запорожець, А.О.**, Редько О.О. (2019). Концентрація кисню як інформативний параметр якості атмосферного повітря. *Збірник тез XXXVII науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, 15 травня 2019 р. Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. С. 60-61.

33. Бабак, В.П., **Запорожець, А.О.**, Свердлова, А.Д. (2019). Моніторинг забруднення повітря на базі розподілених мультисенсорних мереж. *Тези III Міжнародної науково-практичної конференції “Мехатронні системи: інновації та інжиніринг”*, 10 жовтня 2019 р. Київ: КНУТД. С. 13-14.

34. **Запорожець, А.О.** (2019). Система моніторингу забруднення повітря для контролю функціонування об'єктів енергетики. *Збірник доповідей 9-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2019»*. Київ: УТ НКТД. С. 107-112.

35. **Запорожець, А.О.** (2020). Безпілотні літальні апарати для систем моніторингу в енергетиці та екології. *Збірник тез XXXVIII науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, 15 травня 2020 р. Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. С. 40-42.

36. **Запорожець, А.О.**, Мартинюк, І.Д., Куценко, В.О., Коваленко, О.М. (2021). Математичні засоби для оцінювання впливу золівдвалів на ґрунти та підземні води. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку»*, 11-21 березня 2021 р. Черкаси: Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького. С. 93-97.

37. **Запорожець, А.О.** (2021). Статистичний аналіз впливу енергетичного сектору України на забруднення атмосферного повітря. *Збірник тез XXXIX науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, 12 травня 2021 р. Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. С. 98-100.

38. Яцишин, А., **Запорожець, А.**, Коваленко, В. (2021). Математичні засоби оцінки рівня забруднення атмосферного повітря від пиління золошлаковідвалів об'єктів теплоенергетики. *Матеріали IX Міжнародної науково-практичної Internet-конференції “Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні 2021”*, 13-14 травня 2021. Київ: НУБіП України. С. 181-184.

39. Свердлова, А.Д., **Запорожець, А.О.** (2021). Діагностування складних теплоенергетичних об'єктів із використанням нейронних мереж. *Матеріали XII Міжнародної онлайн-конференції “Проблеми теплофізики та*

теплоенергетики”, 26-27 жовтня 2021 р. Київ: Інститут технічної теплофізики НАН України. С. 115.

40. Rezinkina M., Rezinkin, O., **Zaporozhets, A.** (2021). UAVs Application in Power Engineering. *2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD)*, 19-21 October 2021. Kyiv: IEEE. P. 161-164. <https://doi.org/10.1109/APUAVD53804.2021.9615423> (*Scopus*).

41. **Запорожець, А.О.** (2022). Дисперсійний аналіз в задачах моніторингу забруднення атмосферного повітря. *XL науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, 11 травня 2022 р. Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. С.107-109.

42. **Запорожець, А.О.**, Свердлова, А.Д., Артемчук, В.О., Ковач, В.О., Куценко В.О. (2022). Вимірювальні модулі системи моніторингу забруднення атмосферного повітря на базі low-cost сенсорів. *XL науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, 11 травня 2022 р. Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. С.112.

43. **Zaporozhets, A.**, Popov, O., Artemchuk, O., Kovach, V., Kutsenko, V. (2022). Air pollution monitoring system from energy objects based on mesh network. *3rd International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters*, 24-27 May 2022. Kryvyi Rih: Kryvyi Rih State Pedagogical University. P. 35.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

44. Артемчук, В.О., Білан, Т.Р., Блінов, І.В., Декуша, О.Л., **Запорожець, А.О.**, Іванов, Г.А., Іванов, С.О., Ковач, В.О., Ковтун, С.І., Марасін, О.В., та ін. *Теоретичні та прикладні основи економічного, екологічного та технологічного функціонування об'єктів енергетики*. Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України, 2017. ISBN 978-966-02-8331-2.

45. Babak, V.P., **Zaporozhets, A.O.**, Nazarenko, O.O., Redko, O.O. (2017) Аналіз апроксимації результатів вимірювань теплового потоку бомбового калориметра в нестационарному режимі. *ScienceRise*, 37(8), 24-32. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.108935> (ISSN 2313-8416)

46. **Zaporozhets, A.**, Babak, V., Isaienko, V., Babikova, K. (2020). Analysis of the Air Pollution Monitoring System in Ukraine. *Studies in Systems, Decision and Control*, 298, 85-110. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_6 (*Scopus, Q4*, ISSN 2198-4190).

47. **Zaporozhets, A.**, Khaidurov, V., Tsiupii, T. (2021). Optimization Models of Industrial Furnaces and Methods for Obtaining Their Numerical Solution. *Studies in Systems, Decision and Control*, 346, 121-139. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_7 (*Scopus, Q4*, ISSN 2198-4190).

48. Iatsyshyn, A., Artemchuk, V., **Zaporozhets, A.**, Popov, O., Kovach, V., Taraduda, D. (2021). Development of Teaching Methodology in the Field of Environmental Monitoring of Atmosphere. *Studies in Systems, Decision and Control*, 346, 121-139. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_18 (*Scopus, Q4*, ISSN 2198-4190).

49. Патент на корисну модель №149325, Україна, МПК G01N 27/00, G01N 27/10, G08B 25/00, F01B 25/04. Модульна сенсорна платформа / **Запорожець, А.О.**, Бабак, В.П., Свердлова, А.Д.; заявник та патентовласник Інститут технічної теплофізики НАН України; заявл. 16.10.2018, опубл. 10.11.2021. Бюл. №45.

50. **Запорожець, А.О.** (2019). Дистанційне діагностування технічного стану тепломереж на базі квадрокоптерів. *Тези XI Міжнародної конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»*, 21-22 травня 2019 р. Київ: Інститут технічної теплофізики НАН України.