НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЗАПОРОЖЕЦЬ АРТУР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 681.2:543.6: 502.3/.7

ДИСЕРТАЦІЯ
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

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ А.О. Запорожець

Всі примірники дисертації ідентичні

Науковий консультант: **Бабак Віталій Павлович**, член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 26.223.01
старший дослідник к.т.н
Декуша О.А.

Київ – 2022



АНОТАЦІЯ

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.

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 сучасним вимогам щодо швидкодії та рівню інформативності, з локалізацією джерел забруднення.

У вступі відображено актуальність даного напряму досліджень та обґрунтовано вибір теми дисертаційної роботи, зв’язок з науковими програмами, темами, планами, грантами, методи досліджень, сформульовано мету і завдання дослідження, наукову новизні 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* проведено аналіз сучасної структури 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. При цьому, частка викопних палив у енергобалансі країн складає більше 60% і цей показник має тренд до зростання.

Проаналізовано поточний технічний стан об’єктів енергетики, зокрема теплоенергетики, відображені основні проблеми галузі та наведені заходи щодо модернізації енергетичного обладнання.

Досліджено поточний методологічний апарат щодо контролю забруднення повітря, та показано, що для кількісної оцінки забруднення повітря використовуються морально застарілі інформативні параметри, що не відповідають сучасним вимогам щодо швидкодії та доступності. Досліджено поточний стан апаратно-програмних засобів контролю забруднення повітря та стан забруднення повітря в різних містах та областях. Проаналізовано та візуалізовано статистичну інформацію щодо викидів забруднюючих речовин (CO_2, SO_2, NO_2, CO, Zn, Pb, Cu, Cr, Ni, As, PM_{10}, $PM_{2,5}$, ПАВ) 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. Показано, що наразі існує велике число low-cost сенсорів для вимірювання концентрацій $PM_{2,5}$, PM_{10}, NO_2, SO_2, CO, O_3, CO_2, ЛОР та інших речовин. Розглянуті технічні і метрологічні характеристики цих сенсорів. Розглянуті переваги та недоліки металоксидних (МОС) та електрохімічних (ЕС) сенсорів різних газоподібних речовин (NO_2, CO, O_3) та сформовані відповідні рекомендації щодо їх використання в системах 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.

У *другому розділі* сформовано методологію контролю забруднення повітря на базі просторово-розгалужених бездротових сенсорних мереж, що

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

Запропоновано ієрархічну структуру теплоенергетичної системи як складного технічного об’єкта (СТО), що дозволило застосувати концепцію Smart Energy для комплексного контролю теплотехнічного обладнання. Як елемент комплексної системи контролю СТО, запропоновано ієрархічну структуру системи контролю забруднення повітря, особливістю якої є формування відповідних даних на різних ієрархічних рівнях та надання доступу до них відповідних груп користувачів. Використання такої структури 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. Дані систем контролю забруднення повітря повинні забезпечувати єдність та точність вимірювань, міжнародну сумісність та гармонізацію, співставність, адаптацію до метрологічних стандартів, просторову репрезентативність.

Запропоновані математичні моделі поля забруднення повітря у виді векторного випадкового поля, неоднорідного за просторовими аргументами, нестаціонарного 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.

Запропонована система тверджень визначення завдань використання ресурсів інформаційно-вимірювальних технологій для вирішення проблем енергетичної інформатики, основою якої є первинні дані, зокрема і дані систем контролю забруднення повітря.

Третій розділ присвячено розвитку методів статистичного опрацювання даних контролю системи забруднення повітря.

Запропоновано алгоритм дослідження впливу складових енергетичного балансу на викиди забруднюючих речовин в повітря, що базується на використанні теорії кореляційного аналізу. Показано, що 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).

Запропоновані алгоритми опрацювання даних контролю забруднення повітря з використання регресійного та дисперсійного аналізу, що реалізуються з використанням критеріїв Фішера, Ектона, Тітьєна-Мура-Бекмана, Бартлета, Кохрана, Неймана-Пірсона, Бліса-Кохрана-Тьюкі, Хартлі, Кедуела-Леслі-Брауна. Ці алгоритми дозволять 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 сформувати профілі ретроспективних даних для вибраних об'єктів. Як міри схожості між об'єктами використані елементи кластерного аналізу: Евклідова відстань, квадрат Евклідової відстані, Мангеттенська відстань, відстань Чебишова чи степенева відстань. Проведено верифікацію методу з використанням даних державної системи контролю забруднення повітря.

Запропоновано метод прогнозування об'ємної концентрації кисню в повітрі, що базується на використанні визначеної функціональної залежності. Даний метод може бути використаний в енергетиці для налаштування оптимальних параметрів функціонування котельних агрегатів, а також в медицині, аграрному секторі, екології тощо

Четвертий розділ присвячено методичним особливостями локалізації джерел забруднення на базі просторово-розгалуженої бездротової сенсорної мережі.

Досліджено склад забруднюючих речовин, що утворюються в процесі спалювання різних видів палива, та особливості їх поширення під дією різних метеорологічних факторів.

Розглянуто особливості поширення забруднюючих речовин на основі математичного описання рівняння турбулентної дифузії. Проведені теоретичні розрахунки розподілу концентрації забруднюючих речовин в повітрі *C* на відстані *x* від точкового джерела різної висоти *H*.

Запропоновано використання ізотропної та анізотропної Гаусових моделей для побудови функцій щільності розподілу напряму вітру, що дозволяють визначити переважний напрям поширення забруднюючих речовин, що, в свою чергу, дозволяє локалізувати зону розміщення джерела забруднення атмосфери.

Запропоновані 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, що дозволить значно скоротити кількість обчислень та пришвидшити локалізацію джерела забруднення. Запропоновані підходи дозволяють розвинути існуючий методичний апарат контролю забруднення повітря, та доповнити існуючу методику, використовуючи ймовірнісній підхід опрацювання даних контролю.

У *п’ятому розділі* наведена апаратно-програмна реалізація системи контролю забруднення повітря на базі бездротової сенсорної мережі. Приведені відповідні принципові схеми елементів, функціональна схема, топологія друкованої плати, 3D-модель та фото вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря. Запропонована елементна база

вимірювальних модулів, що може змінюватись в залежності від потреб системи контролю. Запропоновано використання mesh-зв'язку, що базується на технології Wi-Fi, як базового у системі контролю забруднення повітря, що використовує low-cost сенсори.

Розроблена структура програмного пакету системи контроля забруднення повітря, що базується на використанні 4-х блоків: 1) блоку керування; 2) блоку статистичного опрацювання даних; 3) блоку візуалізації інформації; 4) блоку взаємодії з апаратним забезпеченням. Запропонована структура блоку статистичного опрацювання даних контролю, що складається із підблоків попереднього опрацювання даних, блоку кореляційного аналізу, блоку регресійного аналізу та блоку дисперсійного аналізу. Розроблений програмний пакет характеризується високою інформативністю і достовірністю контролю, селективністю даних та зручним інтерфейсом.

Запропоновано алгоритм 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).

Запропоновано використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як платформ для вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря. На основі аеродинамічних досліджень, визначено місце розташування вимірювальних модулів системи контролю, що характеризується відсутністю чи відносно слабкими повітряними потоками. Запропонована блок-схема алгоритму контролю забруднення повітря на базі БПЛА гелікоптерного типу.

У *шостому розділі* розглянуто результати експериментальних досліджень розробленої 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), мілкодисперсного пилу ($PM_{2,5}$, PM_{10}), NO_2, CO, NH_3, O_3, CH_2O, CO_2 та рівня радіації. Отримані дані загалом характеризуються достатньо високим значенням коефіцієнта кореляції r (≥0,93) та коефіцієнтом детермінації R^2 (≥0,87). 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.

Проведено верифікацію методу локалізації джерела забруднення атмосферного повітря із використанням 16-ти променевої рози вітрів.

Проведені експериментальні дослідження щодо статистичних характеристик сенсорів мілкодисперсного пилу в польових умовах. На основі отриманих результатів можна стверджувати про те, що такі статистичні параметри як коефіцієнт детермінації R^2, коефіцієнт кореляції r, 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.

Встановлено, що для градуювання low-cost сенсорів мілкодисперсного пилу можуть використовуватися мінімальні та середні значення погодинних їх вибірок.

Проведено оцінювання статистичних характеристик отриманих регресійних моделей, а саме коефіцієнтів детермінації R^2, коефіцієнтів кореляції r, та достовірності результатів контролю K. 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 розроблених методологічних підходів та апаратно-програмних засобів, разом із засобами, що базуються на методах дистанційного зондування Землі та спектрального аналізу.

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, $PM_{2,5}$, 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 степеневої відстані), що дає змогу кількісно оцінити параметри функціонування системи контролю та сформувати профілі ретроспективних даних для вибраних об’єктів.

5. Вперше запропоновано використання набору лінійних математичних моделей для градуювання 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 сформувати 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 використані low-cost сенсорів метеорологічних параметрів (температури, відносної вологості, абсолютного тиску) та забруднюючих речовин (мілкодисперсний пил (PM_1, $PM_{2,5}$, PM_{10}), CO, CO_2, NO_2, SO_2, CH_2O, NH_3 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.).

Ключові слова: забруднення повітря, енергетика, ТЕС, мілкодисперсний пил, газові забруднювачі, поле забруднення, система контролю, вимірювальний модуль, інформаційні параметри, статистичний аналіз, статистичні характеристики, оцінка рівня забруднення.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати 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., Serhiienko, 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 Quadrocopters 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.**, Свердлова, 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.**, Свердлова, А.Д. (2017). Аналіз методів діагностування теплоенергетичних 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/ttpe.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., Serhiienko, 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.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів 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.**, Свердлова, А.Д. (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., Serhiienko, R.V., Ivanov, S.A. (2018). Development of an intelligent system for diagnosing the technical condition of the heat power equipment. *Proceedings of the 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. *Збірник тез 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 золовідвалів 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 пилiння золошлаковідвалів об'єктів теплоенергетики. *Матеріали IX Міжнародної науково-практичної Інтернет-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. *Proceedings of the 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. *Збірник тез XL науково-технічної конференції 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. *Збірник тез XL науково-технічної конференції 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. *Abstract book of 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. (2017). *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 нестаціонарному 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.

ABSTRACT

Zaporozhets A.O. Scientific and practical principles of creating means and methods for controlling of air pollution by energy objects. – Qualifying scientific work on the rights of manuscript

Thesis for the degree obtaining of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.11.13 «Devices and methods for controlling and determining the composition of substances» (152 – Metrology and information-measuring technique). – Institute of General Energy of NAS of Ukraine, Kyiv, 2022

The dissertation work is devoted to the development of theoretical foundations, methodological apparatus and hardware and software tools for controlling of air pollution by energy objects based on spatially branched wireless sensor networks that will meet modern requirements for speed and level of information content, with the localization of pollution sources.

The introduction reflects the relevance of this area of research and substantiates the choice of the topic of the thesis, the connection with scientific programs, themes, plans, grants, research methods, the goals and objectives of the study, the scientific novelty and practical significance of the obtained results are formulated, the personal contribution of the applicant, the state of publications and approbation the results of the dissertation research, information about their implementation are given and the structure of the thesis is indicated.

The *first chapter* analyzes the current state of the energy balance of Ukraine and the world, and shows that one of the main consumers of energy resources are thermal power plants and boiler houses that burn fossil fuels and generate large volumes of pollutants entering the environment, including air. At the same time, the share of fossil fuels in the energy balance of countries is more than 60%, and this indicator has an upward trend.

The current technical condition of energy objects, in particular, thermal power engineering, is analyzed, the main problems of the industry are reflected and activities for the modernization of energy equipment are given.

The current methodological apparatus for air pollution control is investigated, and it is shown that outdated informative parameters that do not meet to modern requirements for speed and accessibility are used to quantitative assessment of air pollution. The current state of hardware and software tools for air pollution control and the state of air pollution in different cities and regions have been studied. Statistical information on pollutants' emissions (CO_2, SO_2, NO_2, CO, PM_{10}, $PM_{2.5}$, SAS, Zn, Pb, Cu, Cr, Ni, As) into the air from stationary pollution sources for the period 1990-2018 are analyzed and visualized.

The analysis of low-cost sensors of pollutants, which can be used in the creation of air pollution control systems, has been carried out. It is shown that there are a large number of low-cost sensors for measuring the concentrations of $PM_{2.5}$, PM_{10}, NO_2, SO_2, CO, O_3, CO_2, VOC and other substances. The technical and metrological properties of these sensors are considered. The advantages and disadvantages of MOS and EC sensors for various gaseous substances (NO_2, CO, O_3) are considered and appropriate recommendations are made for their use in air pollution control systems.

Based on the analysis of the methodological and hardware tools of air pollution control systems, the key directions of their development are identified and scientific and applied problem is formulated related to the development of scientific and practical foundations for air pollution control, which will ensure the localization of air pollution sources and will help increase the information content of the state of air pollution generally.

In the *second chapter*, a methodology for air pollution control based on spatially branched wireless sensor networks is formed, based on 3 directions for the development of scientific and practical foundations: theoretical, methodological, and hardware/software.

A hierarchical structure of the heat power system as a complex technical object (CTO) is proposed, which made it possible to apply the Smart Energy concept for the integrated control of heat engineering equipment. As an element of the complex control system of CTO, a hierarchical structure of the air pollution control system is proposed, a feature of which is the formation of relevant data at different hierarchical levels and access to them by the relevant user groups. The use of such structure ensures the reliability and safety of the functioning of energy objects, helps to reduce the environmental load on the air in cities or agglomerations, and improves the well-being of the population.

The goals, objectives and requirements for the data of the air pollution control system are formed. These air pollution control systems should ensure the unity and accuracy of measurements, international compatibility and harmonization, comparability, adaptation to metrological standards, and spatial representativeness.

Mathematical models of the air pollution field are proposed in the form of a vector random field, non-uniform in spatial arguments, non-stationary in time, and depending on the influence of various factors. The use of mathematical models of this type makes it possible to carry out studies with the determination of space-time characteristics during testing in various limited areas of space at finite time intervals.

A system of statements for determining the tasks of using the resources of information and measuring technologies for solving the problems of energy informatics is proposed, the basis of which is primary data, including data from air pollution control systems.

The *third chapter* is devoted to the development of statistical data processing methods of air pollution control system.

A mathematical algorithm is proposed for studying the influence of energy balance components on pollutant emissions into the air, based on the use of correlation analysis. It is shown that 70% of the considered samples have a positive correlation, and more than 24% have a negative correlation. Coal and peat have the greatest impact on atmospheric air pollution (SO_2, NO_2, PM_{10}) ($\hat{r}' > 0.95$). The lowest value of $\hat{r}'$ was recorded between gas enterprises and PM_{10} emissions (-0.907).

Algorithms for processing air pollution controlling data using regression and variance analysis are proposed, implemented using the criteria of Fisher, Acton, Titien-Moore-Beckman, Bartlet, Cochran, Neiman-Pearson, Blees-Cochran-Tukey, Hartley, Cadwell-Leslie-Brown. These algorithms will greatly simplify the data processing and obtain a number of informative parameters that can be used to assess the state of air pollution by energy objects and the technical condition of sensors and the control system as a whole.

A matrix method for assessing the data similarity of measuring modules for air pollution control is proposed, which makes it possible to quantitatively and qualitatively evaluate the parameters of the functioning of control devices and form retrospective data profiles for selected objects. Elements of cluster analysis were used as similarity measures between objects: Euclidean distance, squared Euclidean distance, Mangettan distance, Chebyshev distance or power-law distance. The method was verified using data from the state air pollution control system.

The *fourth chapter* is devoted to the methodological features of the localization of pollution sources on the basis of a spatially branched wireless sensor network.

The composition of pollutants formed during the combustion of various types of fuel and the features of their distribution under the influence of various meteorological factors have been studied.

The features of the pollutants' distribution are considered on the basis of a mathematical description of the turbulent diffusion equation. Theoretical calculations of the distribution of the pollutants' concentration C in the air at a distance x from a point source of different heights H are made.

It is proposed to use an isotropic and anisotropic Gaussian model for constructing wind direction distribution density functions, which make it possible to determine the predominant direction of pollutant propagation, which, in turn, will allow localizing the area of the atmospheric pollution source.

Optimization mathematical models are proposed for solving the inverse problem of environmental studies, namely, the localization of the pollution source and the determination of the concentration of pollutant emissions. A modification of

the classical Newton method has been developed to find a numerical solution of the constructed mathematical models for identifying the parameters of an air pollution source, which will significantly reduce the number of calculations and speed up the localization of the pollution source. The proposed approaches make it possible to develop the existing methodological apparatus for air pollution control and supplement the existing methodology using a statistical probabilistic approach to processing control data.

The *fifth chapter* presents the hardware and software implementation of air pollution control system based on a wireless sensor network. The corresponding circuit diagrams of elements, functional diagram, printed circuit board topology, 3D model and photo of the measuring module of the air pollution control system are given. An element base of measuring modules is proposed, which may vary depending on the needs of the control system. It is proposed to use meshnet based on Wi-Fi technology as a base in an air pollution control system using low-cost sensors.

The structure of the software package for the air pollution control system has been developed, based on the use of 4 blocks: 1) control unit; 2) block of statistical data processing; 3) information visualization block; 4) block of interaction with hardware. The structure of the block of statistical data processing is proposed, which consists of subblocks of preliminary data processing, correlation analysis, regression analysis and dispersion analysis. The developed software package is distinguished by high information content and reliability of control, data selectivity and user-friendly interface.

An algorithm for determining the technical serviceability of sensors of measuring modules of an air pollution control system based on the use of statistical characteristics of data samples (determination coefficient R^2, range R and coefficient of variation C_v) is proposed.

The use of UAVs as platforms for measuring modules of the air pollution control system is proposed. On the basis of aerodynamic studies, the location of the measuring modules of the control system was determined, which is characterized by

the absence or relatively weak air flows. A block diagram of an air pollution control algorithm based on a helicopter UAV is proposed.

In the *sixth chapter*, the results of experimental studies of the developed air pollution control system are considered. The studies were carried out on the basis of 2 measuring modules equipped with sensors BME280, SDS011, MICS-6814, ZE25-O3, ZE08-CH2O, MH-Z19, RadKit. During the research, 5933 data sets were obtained for each measuring module. Experimental data on the measurement of meteorological parameters (temperature, relative humidity and absolute pressure), fine dust ($PM_{2.5}$, PM_{10}), NO_2, CO, NH_3, O_3, CH_2O, CO_2 and radiation levels are visualized. The obtained data are characterized by a rather high value of the correlation coefficient r ($\geq$0.93) and the coefficient of determination R^2 ($\geq$0.87). During the experiment, a study was made of the strength of the correlation connection between meteorological parameters and concentrations of pollutants, which showed a positive relationship between the value of NO_2, CO, O_3 concentrations and temperature/relative humidity.

Verification of the method of localization of the source of atmospheric air pollution was carried out using the 16th ray wind rose.

Experimental studies have been carried out on the statistical characteristics of PM sensors in the field. Based on the obtained results, it can be argued that such statistical parameters as the coefficient of determination R^2, the correlation coefficient r, the range R and the coefficient of variation C_v can be used as informative parameters of the technical condition of the measuring modules and the air pollution control system as a whole. It has been established that the value of the coefficient of variation C_v of more than 300% informs about a sensor malfunction (such a sensor requires replacement/cleaning). Finding the value of the coefficient of variation in the range from 200 to 300% requires increased attention of the control system operator to this sensor.

It has been established that the minimum and average values of the hourly samples can be used to calibrate low-cost PM sensors.

The evaluation of the statistical characteristics of the obtained regression models, namely the coefficients of determination R^2, the correlation coefficients r and the reliability of the control results K, was carried out. The reliability of the control, which is carried out using the developed modules, was evaluated as a relative indicator of the control result falling into the confidence interval of the values calculated from the regression.

Perspective directions for the development of air pollution control systems based on the use of the developed methodological approaches and hardware and software tools, together with tools based on methods of remote sensing of the Earth and spectral analysis, have been established.

Scientific novelty of the obtained results:

1. Improved scientific and practical foundations for the statistical study of the impact of energy balance components (types of consumed energy carriers, industries that consume them and sectors of transformation) on emissions of pollutants into the air (CO_2, SO_2, NO_2, CO, $PM_{2.5}$, PM_{10}) using assessment of their correlation coefficient with small volumes of the studied samples, which made it possible to establish relationships between the studied parameters and determine priority objects that require the introduction of an air pollution control system.

2. For the first time, an iterative method for solving the inverse problem of the distribution of pollutants in the air, namely, localizing the source of pollution and determining the concentration of its emissions, was proposed using the developed optimization models and the modified Newton method, which made it possible to increase the stability of the developed method and reduce the computational complexity by more than 3 times (compared to the classical Newton method), and, as a result, reduce the time for localization of pollution sources and create prerequisites for preventing significant air pollution.

3. For the first time, a method has been developed for predicting the oxygen concentration in the air, based on the analysis of meteorological parameters of the air (temperature, relative humidity, absolute pressure), using the inverse functional dependence established using the discrete Fourier transform, which makes it

possible to optimize the process of fuel combustion at energy-intensive enterprises and reduce pollutant emissions.

4. For the first time, a matrix method for generating data from measuring modules for atmospheric air pollution control is proposed, based on detailing the properties of the generated data groups and the corresponding measures (Euclidean distance, squared Euclidean distance, Manhattan distance, Chebyshev distance or power-law distance), which makes it possible to quantify the measurement parameters of control systems and generate profiles of retrospective data for selected objects.

5. For the first time, a set of mathematical models is proposed for graduation of fine dust sensors, establishing a relationship between the characteristics of these measuring modules (maximum, minimum, average value, standard deviation) and the corresponding data of the reference control device (BAM device), which made it possible to justify the use of low-cost sensors in the developed control tools.

6. Scientific and practical aspects of assessing the technical condition of sensors of measuring modules of multichannel air pollution control networks have been developed using a number of statistical measures (determination coefficient R^2, correlation coefficient r, range R and coefficient of variation C_v) as dynamic statistical characteristics of control results, to increase the reliability control by early detection of technically faulty sensors.

7. The methodology for creating air pollution control systems by energy facilities, based on the modern theory of using information field models and statistical data processing methods, was further developed, which made it possible to substantiate the requirements for measuring modules of the control system and propose a set of physical and probabilistic characteristics of the developed hardware and software control tools of air pollution by energy objects.

Practical significance of the obtained results:

1. A hierarchical structure of the air pollution control system has been created, which made it possible to distinguish databases of environmental information and provide access to them to the relevant user groups, as well as to form feedback from

decision-making centers to control objects, which makes it possible to regulate the volume of pollutants entering to the atmosphere.

2. A system for controlling of air pollution by energy objects has been developed, which made it possible to comprehensively assess the impact of energy-intensive enterprises on the ecological state of the environment.

3. Number of measurement modules have been developed based on the use of low-cost sensors of meteorological parameters (temperature, relative humidity, absolute pressure) and pollutants (fine dust (PM_1, $PM_{2.5}$, PM_{10}), CO, CO_2, NO_2, SO_2, CH_2O, NH_3, etc.), which made it possible to implement a spatially branched wireless sensor network for controlling air pollution by energy objects.

4. Informative criteria are proposed for assessing the technical condition of the sensors of the control system, which made it possible to identify faulty sensors, prevent the use of low-quality data, establish and prevent anomalous modes of operation of control objects, and, in general, determine the technical condition of the air pollution control system of energy objects.

5. Software has been developed for the air pollution control system by energy objects, which allows storing, processing and analyzing the obtained data, simplifying user access to environmental information, increasing the number of informative parameters, informing in advance about abnormal increases in control parameters, localizing pollution sources and generally increasing the level of information content of control systems.

6. Experimental studies of the statistical characteristics of the sensors of the measuring modules were carried out, which made it possible to justify their use for the air pollution control system.

7. The results of the study have been implemented at the enterprises of the country and in the educational process of higher educational institutions, in particular SE "Plant" Elektrotyazhmash "" (Kharkiv, act dated October 23, 2018), LLC "Ukrekoconsult" (Kyiv, act dated December 18, 2018)); Bud-Bud LLC (Lubny, Poltava region, act dated September 2, 2019), Advanced Membrane Technologies LLC (Kyiv, act dated November 27, 2019); LLC "Science Park of the

State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management" CHERNOBYL"" (Kyiv, act dated December 14, 2021); Department of Chemistry and Chemical Technology of the National Aviation University (Kyiv, acts dated December 3, 2019 and December 10, 2020) and the Department of Automation and Cyber Security of Power Systems of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic University" (acts dated December 15, 2021) .

Keywords: air pollution, energy, thermal power plant, fine dust, gas pollutants, pollution field, control system, measuring module, information parameters, statistical analysis, statistical characteristics, pollution level assessment.

List of publications

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation were published:

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

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

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

4. **Zaporozhets, A.**, Eremenko, V., Serhiienko, 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

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

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

7. **Zaporozhets, A.** (2020). Overview of Quadrocopters 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

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

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

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

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

12. **Zaporozhets, A.A.**, Sverdlova, A.D. (2017). Peculiarities of application of Smart Grid technology in systems for monitoring and diagnostics of heat-and-power engineering objects.. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing* 2, 33-41. http://doi.org/10.15407/tdnk2017.02.05

13. **Zaporozhets, A.O.**, Sverdlova, A.D. (2017). Analysis of methods for diagnosing heat energy objects. *Science-based technologies*, 35(3), 259-265. http://doi.org/10.18372/2310-5461.35.11846.

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.

15. Babak, V.P., **Zaporozhets, A.O.**, Kuts, Yu.V., Scherbak, L.M. (2020). Models and measures in theory and practice of measurements. *Thermophysics and thermal power engineering*, 42(4), 5-18. https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2020.1

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

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

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

19. Patent UA117967C2, IPC G01R 31/01, G06F 17/18. Method of determination of mutual correlation function of noise signals / Babak, V.P., **Zaporozhets, A.O.**, Martynyuk, G.V., Scherbak, L.M.; applicant and patent owner Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine; decl. 14.12.2016; publ. 25.10.2018. Bul. №20.

20. Patent UA121084C2, IPC F17D 5/02, G01K 17/00. Method of diagnosing the technical condition of main heat network pipelines / **Zaporozhets, A.O.**, Kovtun, S.I.; applicant and patent owner Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine; decl. 15.11.2018; publ. 25.03.2020. Bul. №6.

Scientific works certifying the approval of the thesis materials:

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. **Zaporozhets, A.O.**, Sverdlova, A.D. (2018). Development of measuring modules of a hierarchical system of diagnosing energy equipment based on Smart Grid technologies. *Abstract book of the XXXVI Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists of the Institute of Modeling Problems in Energy named after G.E. Pukhov NAS of Ukraine (to the 100th anniversary of the NAS of Ukraine)*, May 16, 2018. Kyiv: G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of NAS of Ukraine. P.65-66.

23. Ivanov, S.O., Serhiienko, R.V., **Zaporozhets, A.O.**, Burova, Z.A. (2018). Means of increasing the efficiency of production, quality control and combustion of fuel from plant biomass. *Proceedings of the international scientific and practical conference «Sustainable development goals of the third millennium: challenges for universities of life sciences»*, May 23-25, 2018. Kyiv: National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. P. 148-150.

24. **Zaporozhets, A.O.**, Eremenko, V.S., Serhiienko, 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

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

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

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

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

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

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

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

32. **Zaporozhets, A.O.**, Redko O.O. (2019). Oxygen concentration as an informative parameter of atmospheric air quality. *Abstract book of the XXXVII scientific and technical conference of young scientists and specialists of the G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of NAS of Ukraine*, May 15, 2019. Kyiv: G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of NAS of Ukraine. P. 60-61.

33. Babak, V.P., **Zaporozhets, A.O.**, Sverdlova, A.D. (2019). Air pollution monitoring based on distributed multisensor networks. *Abstracts book of the III*

International scientific and practical conference "Mechatronic systems: innovations and engineering", October 10, 2019. Kyiv: KNUTD. P. 13-14.

34. **Zaporozhets, A.O.** (2019). Air pollution monitoring system to control the operation of energy facilities. *Abstract book of the 9th National Scientific and Technical Conference "Non-destructive testing and technical diagnostics – UkrNDT-2019»*. Kyiv: Ukrainian Society for Non-Destructive Testing. P. 107-112.

35. **Zaporozhets, A.O.** (2020). Unmanned aerial vehicles for monitoring systems in energy and ecology. *Abstract book of the XXXVIII scientific and technical conference of young scientists and specialists of the G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of NAS of Ukraine*, May 15, 2020. Kyiv: G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of NAS of Ukraine. P. 40-42.

36. **Zaporozhets, A.O.**, Martynyuk, I.D., Kutsenko, V.O., Kovalenko, O.M. (2021). Mathematical tools for assessing the impact of ash dumps on soils and groundwater. *Proceedings of the All-Ukrainian scientific and practical Internet conference "Automation and computer-integrated technologies in production and education: state, achievements, development prospects"*, March 11-21, 2021. Cherkasy: Cherkasy National University named after Bohdan Khmelnytskyi. P. 93-97.

37. **Zaporozhets, A.O.** (2021). Statistical analysis of the influence of the energy sector of Ukraine on atmospheric air pollution. *Abstract book of the XXXIX scientific and technical conference of young scientists and specialists of the G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of NAS of Ukraine*, May 12, 2021. Kyiv: G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of NAS of Ukraine. P. 98-100.

38. Yatsyshyn, A., **Zaporozhets, A.**, Kovalenko, V. (2021). Mathematical means of estimating the level of atmospheric air pollution from the dusting of ash and slag pits of thermal power facilities. *Proceedings of the IX International Scientific and Practical Internet Conference "Global and Regional Informatization Problems in Society and Nature Management 2021"*, May 13-14, 2021. Kyiv: National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. P. 181-184.

39. Sverdlova, A.D., **Zaporozhets, A.O.** (2021). Diagnosis of complex thermal energy objects using neural networks. *Proceedings of the XII International online conference "Problems of thermal physics and thermal energy"*, October 26-27, 2021. Kyiv: Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine. P. 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

41. **Zaporozhets, A.O.** (2022). Dispersion analysis in the tasks of monitoring atmospheric air pollution. *Abstract book of the XL scientific and technical conference of young scientists and specialists of the G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of NAS of Ukraine*, May 11, 2022. Kyiv: G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of NAS of Ukraine. P.107-109.

42. **Zaporozhets, A.O.**, Sverdlova, A.D., Artemchuk, V.O., Kovach, V.O., Kutsenko, V.O. (2022). Measuring modules of the atmospheric air pollution monitoring system based on low-cost sensors. *Abstract book of the scientific and technical conference of young scientists and specialists of the G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of NAS of Ukraine*, May 11, 2022. Kyiv: *G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of NAS of Ukraine*. P.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.

Scientific works that additionally reflect the scientific results of the thesis:

44. Artemchuk, V.O., Bilan, T.R., Blinov, I.V., Dekusha, O.L., **Zaporozhets, A.O.**, Ivanov, G.A., Ivanov, S.O., Kovach, V.O., Kovtun, S.I., Marasin, O.V. et al. (2017). *Theoretical and applied bases of economic, ecological*

and technological functioning of energy objects. Department of Physical and Technical Problems of Energy of the NAS of Ukraine, 2017.

45. Babak, V.P., **Zaporozhets, A.O.**, Nazarenko, O.O., Redko, O.O. (2017). Approximation analysis of measurement of heat flow bomb calorimeter in non-stationary mode. *ScienceRise*, 37(8), 24-32. https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.108935

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

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

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

49. Patent UA149325U, IPC G01N 27/00, G01N 27/10, G08B 25/00, F01B 25/04. Modular sensory platform / **Zaporozhets, A.O.**, Babak, V.P., Sverdlova, A.D.; applicant and patent owner Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine; decl. 16.10.2018, publ. 10.11.2021. Bul. №45.

50. **Zaporozhets, A.O.** (2019). Remote diagnostics of the technical condition of heat networks based on quadcopters. *Abstract book of the XI International Conference "Problems of Thermal Physics and Thermal Power Engineering"*, May 21-22, 2019. Kyiv: Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ…… 43
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ…… 45
ВСТУП…… 47
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ І ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ……. 59
1.1. Огляд енергетичного балансу України та світу…… 59
1.2. Сучасний стан енергетичної галузі та шляхи її модернізації…….. 69
1.3. Аналіз національного плану скорочення викидів від великих спалювальних установок…… 71
1.4. Загальна характеристика хімічного забруднення атмосферного повітря в Україні…….. 75
1.5. Аналіз засобів та систем контролю забруднення повітря……. 89
1.6Аналіз low-cost сенсорів забруднюючих речовин ($PM_{2,5}$, PM_{10}, NO_2, CO, O_3)…….. 106
1.7. Вплив хімічного забруднення повітря на здоров’я людини……. 133
1.8. Формулювання науково-прикладної проблеми та постановка завдань дослідження……... 135
1.9. Висновки до розділу…… 139
РОЗДІЛ 2 МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ…… 143
2.1. Контроль забруднення повітря як елемент концепції Smart Energy……... 143
2.2. Планування та функціонування системи контролю забруднення повітря на базі бездротових сенсорних мереж……. 154
2.2.1. Роль контролю в управління якістю повітря……. 154

2.2.2. Цілі, задачі та вимоги до даних контролю забруднення повітря…….. 157
2.2.3. Забезпечення стандартів якості при контролі забруднення повітря…….. 163
2.3. Моделі та міри в теорії і практиці контролю забруднення повітря…….. 165
2.4. Інформаційно-вимірювальні технології контролю забруднення повітря для вирішення задач енергетичної інформатики…… 186
2.5. Висновки до розділу……. 196
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ ОБ'ЄКТАМИ ЕНЕРГЕТИКИ……... 199
3.1. Особливості кореляційного аналізу для пошуку взаємозв'язку між складовими енергетичного балансу та рівнем викидів забруднюючих речовин……. 199
3.2. Алгоритм опрацювання даних контролю забруднення повітря в задачах регресійного аналізу ……. 210
3.3. Алгоритм опрацювання даних контролю забруднення повітря в задачах дисперсійного аналізу …….. 215
3.4. Матричний метод визначення подібності даних контролю забруднення повітря…… 219
3.5. Прогнозування об'ємної концентрації кисню в повітрі на базі дискретного перетворення Фур'є…….. 229
3.6. Висновки до розділу……..... 240
РОЗДІЛ 4 МЕТОДИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЖЕРЕЛ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ НА БАЗІ РОЗПОДІЛЕНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ…….. 242
4.1. Основні забруднюючі речовини у продуктах спалювання палива та їх поширення у атмосфері……. 242

4.2. Методичні особливості вирішення прямої задачі забруднення атмосферного повітря від об’єктів енергетики…… 255
4.3. Ізотропна та анізотропна Гаусові моделі для формування функції щільності розподілу напряму вітру…… 266
4.4. Математичні моделі обернених задач для знаходження основних характеристик джерел забруднення повітря……. 271
Висновки до розділу…… 284
РОЗДІЛ 5 АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ НА БАЗІ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ…… 286
5.1. Вимірювальний модуль системи контролю забруднення повітря…….. 286
5.2. Програмний пакет системи контролю забруднення повітря…… 297
5.3 Деякі особливості бездротового зв’язку вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря…… 302
5.4. Особливості використання БПЛА в системах контролю в енергетиці та екології…….. 310
5.5. Порівняльний аналіз технічних характеристик БПЛА для контролю забруднення повітря……..... 316
5.6. Висновки до розділу……. 321
РОЗДІЛ 6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ……..... 324
6.1. Аналіз стану забруднення атмосферного повітря в м. Києві…..... 324
6.2. Експериментальні дослідження вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря……. 332
6.3. Верифікація методу локалізації джерела забруднення атмосферного повітря……. 339
6.4. Дослідження інформативних статистичних характеристик сенсорів мілкодисперсного пилу…….. 347

6.5. Побудова градуювальних характеристик сенсорів мілкодисперсного пилу за допомогою ВАМ-пристрою……..... 356
6.6. Перспективи розвитку систем контролю забруднення повітря об’єктами енергетики……..... 362
6.7. Висновки до розділу……. 365
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……. 368
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…… 373
ДОДАТОК А. СТАТИСТИЧНА ТА НОРМАТИВНА ІНФОРМАЦІЯ ЩОДО ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ…….. 452
ДОДАТОК Б. ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАСОБІВ ТА СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ…….. 473
ДОДАТОК В. СТАТИСТИЧНІ ДАНІ ЩОДО ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ $PM_{2,5}$ ТА ПОШИРЕННЯ ЗАХВОРЮВАНЬ У КРАЇНАХ СВІТУ……... 478
ДОДАТОК Г. РЕЗУЛЬТАТИ КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ МІЖ СКЛАДОВИМИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ ТА РІВНЕМ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН……. 486
ДОДАТОК Д. ХАРАКТЕРИСТИКИ РІЗНОПРОМЕНЕВИХ РОЗ ВІТРІВ……. 492
ДОДАТОК Е. ПРИНЦИПОВІ СХЕМИ ЕЛЕМЕНТІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО МОДУЛЮ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ…… 494
ДОДАТОК Ж. СПЕЦИФІКАЦІЯ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ РОЗРОБЛЕНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО МОДУЛЮ…… 499
ДОДАТОК И. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБІЖНОСТІ ДАНИХ СЕНСОРІВ МІЛКОДИСПЕРСНОГО ПИЛУ…… 500
ДОДАТОК К. РЕЗУЛЬТАТИ РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ……... 502

ДОДАТОК Л. КОПІЇ АКТІВ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ……... 517
ДОДАТОК М. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА……. 531

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$\xi(\omega)$ – випадкова функція;

r_α – граничне значення коефіцієнта кореляції;

$\Delta(\cdot)$ - довірчий інтервал;

$\psi(\omega) \in [0, 2\pi)$ – дробова частина випадкового кута $\Psi(\omega)$;

$u_{1-\alpha/2}$ – квантиль розподілу Гаусса;

$t_{1-\alpha/2}$ – квантиль розподілу Стьюдента;

ω – концентрація забруднюючої речовини із деякого поля Ξ;

$\mathbf{D}\{...\}$ – оператор дисперсії випадкових функцій;

$\mathbf{M}\{...\}$ – оператор математичного сподівання випадкових функцій;

$\hat{r}$ – статистична оцінка коефіцієнта кореляції;

$\left[\Psi(\omega)/2\pi\right]^+$ – ціла частина кумулятивного (повного) випадкового кута $\Psi(\omega) \in R$;

U – шуканий розв’язок моделі;

$\hat{r}'$ – скоригована оцінка коефіцієнта кореляції;

$[O_2]_{\text{пр}}$ – прогнозована концентрація кисню в повітрі;

C_v – коефіцієнт варіації;

C_x – номінальне значення масової концентрації газового компонента в досліджуваній суміші;

$H(x)$ – гессіан функції;

n – об’єм вибірки;

P – рівень достовірності;

r – коефіцієнт кореляції;

R – розмах;

R^2 – коефіцієнт детермінації;

S^2 – середньоквадратичне відхилення;

t – час;

T – часовий інтервал спостереження;

x, y, z – координати декартової системи координат;

α – рівень значимості;

v – ступінь вільності;

σ – дисперсія.

Хімічні речовини

BC – «чорний» вуглець;

$C_6H_5NH_2$ – анілін;

CO – монооксид вуглецю;

CO_2 – діоксид вуглецю;

CS_2 – сірковуглець;

H_2SO_4 – сірчана кислота;

HCl – хлористий водень;

HCN – ціаністий водень;

HF – фтористий водень;

HNO_3 – азотна кислота;

NH_3 – аміак;

NO – монооксид азоту;

NO_2 – діоксид азоту;

NO_x – оксиди азоту;

PM – мілкодисперсний пил;

PM_1 – мілкодисперсний пил розміром до 1 мкм;

PM_{10} – мілкодисперсний пил розміром до 10 мкм;

$PM_{2,5}$ – мілкодисперсний пил розміром до 2,5 мкм;

SO_2 – діоксид сірки;

SO_x – оксиди сірки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ

AQI – air quality index;

BAM – beta attenuation monitoring;

EM – expectation-maximization (algorithm);

FPV – first person view;

IoT – Internet of Things;

RGB – red, blue, green;

АПС – автоматизований пункт спостереження;

АСКЗА – автоматична станція контролю забруднення атмосфери;

БПЛА – безпілотний літальний апарат;

ВВП – внутрішній валовий продукт;

ВООЗ – Всесвітня організація охорони здоров’я;

ВСЗ – відношення сигнал/завада;

ВСУ – великі спалювальні установки;

ГДК – гранично допустима концентрація;

$ГДК_{МР}$ – максимальна разова гранично допустима концентрація;

$ГДК_{СД}$ – середньодобова гранично допустима концентрація;

ДАЗВ – Державне агентство України з управління зоною відчуження;

ДСНС – Державна служба з надзвичайних ситуацій;

ЕІ – енергетична інформатика;

ЕС – електрохімічні сенсори;

ЄС – Європейський Союз;

ЖКГ – житлово-комунальне госпордарство;

ЗВТ – засіб вимірюваної техніки;

ЗЗЧ – загальна кількість завислих частинок;

ІВС – інформаційно-вимірювальна система;

ІВТ – інформаційно-вимірювальна технологія;

ІД – інформація досліджень;

ІЗА – індекс забруднення повітря;

ІКТ – інформаційно-комунікаційні технології;

КІЗА – комплексний індекс забруднення повітря;

КНП – коефіцієнт надлишку повітря;

ЛОР – леткі органічні речовини;

МВС – Міністерство внутрішніх справ;

МЗДПР – Міністерство захисту довкілля та природніх ресурсів;

МОЗ – Міністерство охорони здоров’я;

МОС – металоксидні напівпровідникові сенсори;

НКРЕКП – національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг;

НМЛОС – неметанові летку органічні сполуки;

НПСВ – Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок;

ОД – об’єкт досліджень;

ОЕС – об’єднана енергетична система;

ОЗ – обернена задача;

ПАВ – поліциклічні ароматичні вуглеводні;

ПЗ – пряма задача;

ПС – пост спостереження;

СКВ – середнє квадратичне відхилення (стандартне відхилення);

СТО – складний технічний об’єкт;

т.н.е. – тонна нафтового еквіваленту;

ТЕС – теплоелектростанція;

ТЕЦ – теплоелектроцентраль;

УЯКЕ – універсальний якісний критерій ефективності;

ЦГО – Центральна геофізична обсерваторія;

ЧЯКЕ – частковий якісний критерій ефективності.

ВСТУП

Актуальність роботи. 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 напряму 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. Яцищин 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*.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямам розвитку науки і техніки, державної екологічної політики України та наукових досліджень Національної академії наук України. Робота за темою дисертації виконувалась згідно плану наукових досліджень в Інституті технічної

теплофізики НАН України, Національному авіаційному університеті та Інституті загальної енергетики НАН України в межах наступних НДР: «Розроблення програмного середовища регресійного аналізу ретроспективної інформації та інтеграція його в інформаційно-аналітичні системи моніторингу та аналізу режимів функціонування об’єктів теплоенергетики» (№ ДР 0217U007043, 2017 р.); «Розроблення методики моніторингу теплового стану магістральних тепломереж на базі квадрокоптерів» (№ ДР 0117U003694, 2017-2018 рр.); «Розвиток науково-практичних засад моніторингу довкілля та технічного стану об’єктів теплоенергетики на базі безпілотних авіаційних комплексів» (№ ДР 0117U000760, 2017-2021 рр.); «Розроблення макету системи діагностування та аналізу стану котельного устаткування на базі сучасних GRID-технологій для обробки ретроспективної інформації з об'єктів моніторингу» (№ ДР 0219U005077, 2018 р.); «Підвищення експлуатаційних характеристик палив для газотурбінних двигунів, безпеки авіаційного транспорту та його екологічності (№ ДР 0118U003369, 2018 р.); «Інтерактивна діагностика фітоценосистем із застосуванням БПЛА для оцінки впливу на довкілля (№ ДР 0117U004331, 2018 р.); «Розвиток наукових засад термогазодинаміки енергетичних установок та моніторингу викидів забруднюючих речовин» (№ ДР 0118U002283, 2018-2019 рр.); «Розроблення системи моніторингу мікрокліматичних показників та стану забруднення атмосферного повітря екосистем Північного Причорномор’я» (№ ДР 0119U100550, 2019-2021 рр.); «Розроблення системи моніторингу рівня шкідливих викидів ТЕС та діагностування обладнання електростанцій, що використовують відновлювані джерела енергії, на базі Smart Grid, з урахування їх спільної роботи» (№ ДР 0119U101859, 2019-2021 рр.); «Розроблення методів і засобів підвищення екологічної ефективності та довговічності димових труб теплоенергетичних установок. Етап 1. Дослідження ефективності застосування комплексних методів захисту димових труб котлоагрегатів на основі уточнених даних щодо зовнішньої аеродинаміки і теплообміну цих труб та розроблення адаптивних методів

моніторингу концентрації забруднюючих речовин на базі бездротових сенсорних мереж» (№ДР 0120U101123, 2020 р.); «Розроблення апаратно-програмного комплексу моніторингу атмосферного повітря урбанізованих територій в рамках концепції Smart City» (№ ДР 0121U111148, 2020-2021 рр.); «Розроблення методів і засобів підвищення екологічної ефективності та довговічності димових труб теплоенергетичних установок. Етап 2. Аналіз режимів роботи димових труб промислових печей при застосуванні комплексу методів і заходів підвищення їх теплової та екологічної ефективності на основі моделювання зовнішньої аеродинаміки і теплообміну труб з урахуванням наземної інфраструктури теплоенергетичних установок та створення і випробовування дослідного зразка інформаційно-вимірювальної системи моніторингу концентрації забруднюючих речовин. Розроблення та впровадження рекомендацій за результатами досліджень» (№ ДР 0121U109243, 2021 р.); «Дослідження технічного стану промислових конструкцій та основних методів їх діагностування з використанням ієрархічних систем» (№ ДР 0121U110307, 2021 р.); «Удосконалення ієрархічної системи математичних та програмно-інформаційних засобів для дослідження напрямів розвитку об'єднаних енергосистем в умовах переходу до низьковуглецевої економіки» (№ ДР 0122U000236, 2022 р.); «Розвиток математичних моделей та засобів інформатики визначення перспективної структури та обсягів розвитку традиційної і відновлюваної електроенергетики за умов її декарбонізації та впровадження принципів кліматичної нейтральності в Україні» (№ ДР 0120U100136, 2022 р.), в яких автор брав участь як керівник, відповідальний виконавець та виконавець.

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 пилу 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 сформувати 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.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених наукових завдань комплексно були використані методи: теорії інформаційно-вимірювальних систем, теорії електротехнічного приладобудування, теорії керування, теорії вимірювань, теорії випадкових процесів, фізичного та математичного моделювання, теорії ймовірностей, теорії алгоритмів, математичної статистики, планування багатофакторного наукового експерименту, обробки та верифікації його результатів тощо.

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, $PM_{2,5}$, 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 степеневої відстані), що дає змогу кількісно оцінити параметри функціонування системи контролю та сформувати профілі ретроспективних даних для вибраних об'єктів.

5. Вперше запропоновано використання набору лінійних математичних моделей для градуювання 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 сформувати 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 використані low-cost сенсорів метеорологічних параметрів (температури, відносної вологості, абсолютного тиску) та забруднюючих речовин (мілкодисперсний пил (PM_1, $PM_{2,5}$, PM_{10}), CO, CO_2, NO_2, SO_2, CH_2O, NH_3 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].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на:

- The International Symposium on Sustainable Aviation (ISSA-2017) (м. Київ, 2017 р.).
- Науково-технічних конференціях молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (м. Київ, 2018-2022 рр.).
- Міжнародній науково-практичній конференції «Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: виклики для університетів наук про життя» (м. Київ, 23-25 травня 2018 р.).

- 2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) (м. Львів, 2018 р.).
- Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019) (м. Запоріжжя, 2019 р.).
- 15th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer (м. Херсон, 2019 р.).
- 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL) (м. Созополь, Болгарія, 2019 р.).
- III Міжнародній науково-практична конференції «Мехатронні системи: інновації та інжиніринг» (м. Київ, 2019 р.).
- 9-й Національній науково-технічній конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2019» (м. Київ, 2019 р.).
- Workshops on Quantum Information Technologies and Edge Computing (QuaInT+doors 2021) (м. Житомир, 2021 р.).
- IX Міжнародна науково-практична Інтернет-конференція “Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні 2021” (м. Київ, 2021 р.).
- International Conferences on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF) (м. Кривий Ріг, 2021-2022 рр.).
- Всеукраїнській науково-практичній Internet-конференції «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку» (м. Черкаси, 2021 р.).
- 2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD) (м. Київ, 2021 р.).
- XII Міжнародній онлайн-конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (м. Київ, 2021 р.).

- 1st International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2021 (м. Тернопіль, 2021 р.).

Публікації. Зміст дисертаційної роботи відображено в 50 наукових працях, зокрема, 20 публікаціях, що розкривають основний зміст дисертації, з яких 9 у періодичних виданнях, що індексуються наукометричними базами Scopus та Web of Science, 7 у фахових іноземних виданнях та виданнях України, 2 монографії (у видавництві Springer), 2 патенти на винахід України, серед них 4 наукові публікації у виданнях, віднесених до Q2, та 1 публікація у виданні, віднесеному до Q3, що відповідно до п. 2 наказу МОН від 23.09.2019 № 1220 «Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», кількісно у сукупності із зазначеними вище публікаціями прирівнюються до 29 наукових публікацій, які розкривають основні наукові результати дисертації. Крім того, наявні 23 публікації у збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій та 7 публікацій є такими, що додатково відображають зміст дисертаційної роботи.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел з 574 найменувань, 11 додатків та містить 141 рисунків та 50 таблиць. Загальний обсяг роботи складає 539 сторінок.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СТАНУ І ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ

1.1. Огляд енергетичного балансу України та світу

Необхідність забезпечення населення країни та її економіки різними видами енергії є одним із пріоритетних завдань як центральної, так і місцевої влад, та однією із головних складових забезпечення гідної якості життя та соціально-економічної стабільності суспільства [1-5]. Однак на теперішній час в Україні сфери теплової енергетики та споживання теплової енергії перебувають в незадовільному стані, що негативно позначається на багатьох галузях промисловості та ЖКГ. І цей стан продовжує погіршуватися, оскільки більша частина котельного обладнання вже відпрацювала свій ресурс та потребує негайної заміни чи модернізації [6-9].

Одними з головних причин, що сприяли створенню такого стану, стали недосконале законодавство, монополізація галузі, непрозорість утворення тарифів за комунальні послуги та їх нераціональне використання компаніями-постачальниками теплової енергії та компаніями-розподільниками (утримувачами теплових мереж). Також відсутність інвестиційних капіталовкладень не дає змогу реалізувати сучасні високоефективні впровадження при модернізації об’єктів теплоенергетики, в результаті чого якість забезпечення користувачів тепловою енергією є дуже низькою [7, 10-12].

Загалом низька ефективність функціонування теплоенергетичних об’єктів є фактором, що негативно впливає на рівень енергетичної і національної безпеки [8, 12-16].

Як відомо, Україна належить до країн, що тільки частково забезпечені власними енергоресурсами [17]. При цьому, загальний економічний спад в період з 1990-2018 рр. скоротив використання енергоносіїв країною на 68,2%. Попри значні скорочення обсягів використання енергетичних ресурсів

(рис. 1.1), Україна продовжує їх імпортувати [18, 19]. За даними Державної служби статистики України (ukrstat.gov.ua), імпорт природних енергоносіїв в Україну в період 1990-2018 рр. складав від 30,5% до 55,6% від загальних обсягів спожитої первинної енергії (рис. 1.2). На 2018 р. імпорт енергоносіїв складав 36% від загального спожитого обсягу.

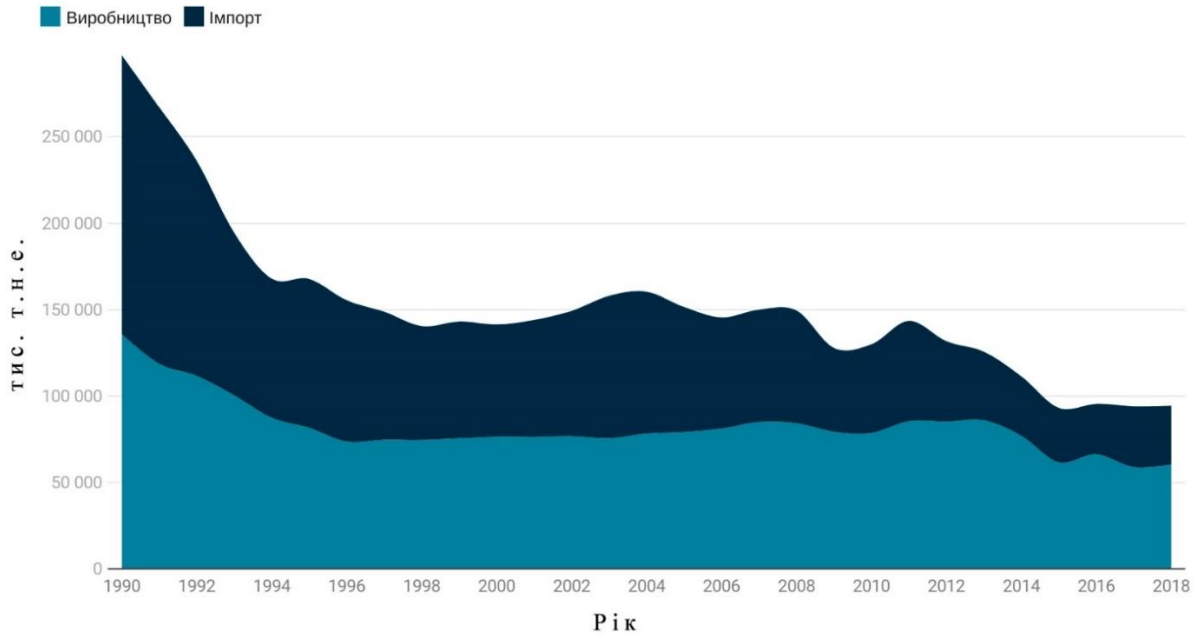


Рис. 1.1. Загальна кількість вироблених та імпортованих енергоресурсів в Україні протягом 1990-2018 рр.



Рис. 1.2. Співвідношення виробництва та імпорту енергетичних ресурсів в Україні протягом 1990-2018 рр.

Хоч рівень енергозалежності України має тенденцію до зниження, він характеризується диверсифікацією джерел постачання енергетичних носіїв, зокрема нафти та природного газу [20, 21]. На рис. 1.3 та 1.4 наведено графіки зміни виробництва та імпорту енергетичних ресурсів відповідно за типами енергій у 2007-2018 рр. На рис. 1.5 та 1.6 приведені значення відносного складу вироблених чи імпортованих енергетичних ресурсів за типами палив у 2007-2018 рр.

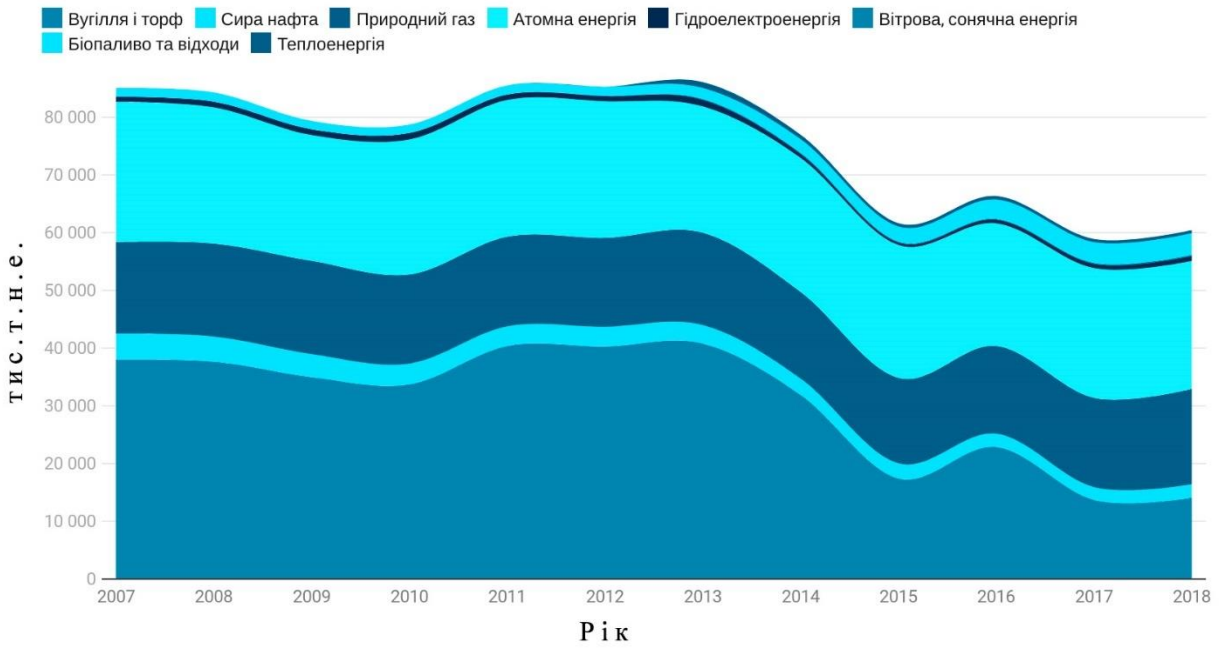


Рис. 1.3. Виробництво енергетичних ресурсів в Україні за типами енергій за період 2007-2018 рр.

Як видно з рис. 1.3 та 1.5, основу виробництва енергетичних ресурсів у 2018 р. в Україні складають вугілля і торф (23,32%), природній газ (27,29%) та атомна енергія (36,66%). При цьому необхідно відзначити спадаючий тренд виробництва вугілля і торфу (у 2007 р. – 44,74% у загальному балансі), та зростаючі тренди виробництва (у 2007 р. – 18,66% у загальному балансів) [22, 23], що позитивно впливає на загальну екологічність енергетики, та пов’язано з анексією територій Донбасу, де розташовані найбільшу поклади вугілля і торфу в Україні [24]. Проте в абсолютних значеннях об’єми використання вироблених енергетичних ресурсів майже не змінилися (крім, вугілля і торфу).

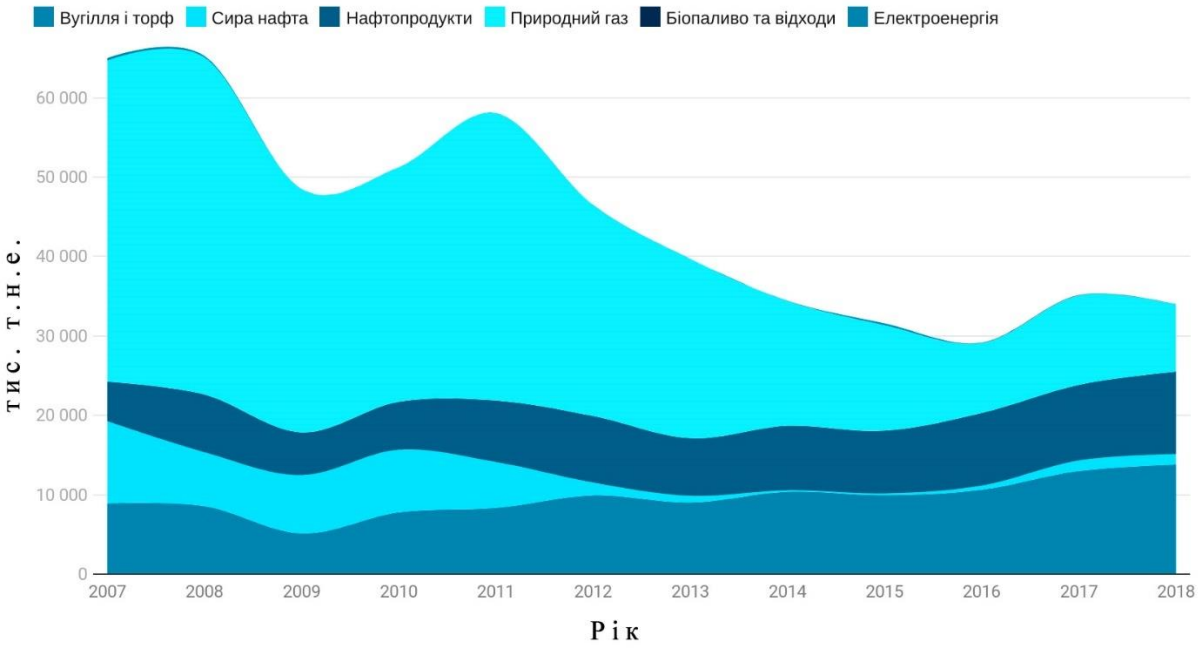


Рис. 1.4. Імпорт енергетичних ресурсів в Україні за типами енергій за період 2007-2018 рр.

	Вугілля і торф	Сира нафта	Природний газ	Атомна енергія	Гідро-електро-енергія	Вітрова, сонячна енергія	Біопаливо та відходи	Теплоенергія
2018	23,32	3,88	27,29	36,66	1,48	0,33	6,17	0,88
2017	23,27	3,75	26,28	38,14	1,31	0,25	6,07	0,93
2016	34,48	3,47	22,88	32,03	1	0,19	5,05	0,9
2015	28,28	4,25	24,04	37,3	0,75	0,22	4,23	0,93
2014	41,46	3,66	19,53	30,15	0,95	0,17	3,12	0,97
2013	47,41	3,68	18,62	25,39	1,38	0,12	2,24	1,16
2012	47,22	4	18,07	27,75	1,06	0,06	1,84	0
2011	47,2	3,99	18,17	27,69	1,1	0,01	1,85	0
2010	42,83	4,56	19,6	29,71	1,44	0,01	1,85	0
2009	44,06	5,02	20,36	27,43	1,29	0,01	1,83	0
2008	44,67	5,16	19,13	27,97	1,17	0	1,89	0
2007	44,73	5,27	18,66	28,56	1,03	0	1,75	0

Рис. 1.5. Співвідношення кількості вироблених енергетичних ресурсів за типами енергій в Україні за період 2007-2018 рр. (%)

Також до позитивних змін в енергетичному балансі України можна віднести зростаючу динаміку виробництва біопалива, що в період в 2007 по 2018 рр. збільшилася майже в 3,5 рази [25-27].



Рис. 1.6. Співвідношення кількості імпортованих енергетичних ресурсів за типами енергій в Україні за період 2007-2018 рр. (%)

Більші зміни відбулися в імпорті енергоносіїв, особливо природного газу [28, 29]. Так, в 2007 р. Україна імпортувала 40449 тис. т.н.е. природного газу, а в 2018 р. – всього 8459 тис. т.н.е. Загалом, імпорт природного газу за вказаний період зменшився більше ніж у 4,5 рази, що пов'язано з відмовою від імпорту природного газу з Російської Федерації та зміною структури його споживання. При цьому збільшився об'єм імпортованого вугілля і торфу – з 8899 тис. т.н.е у 2007 р. до 13806 тис. т.н.е. у 2018 р. [30, 31]. Загалом Україна у 2018 р. найбільше імпортувала вугілля і торф – 40,6%, нафтопродукти – 30,48% та природній газ – 24,88% у загальному співвідношенні.

В секторі перетворення енергетичних ресурсів, найбільшими споживачами енергоносіїв є електростанції (71,35% в 2018 р. від загальної кількості енергоносіїв у секторі), коксові підприємства (8,81%), виробництво брикетів (7,21%), ТЕЦ (5,34%), нафтопереробні заводи (4,72%), теплоцентралі (≈1%) та інші (рис. 1.7). При цьому варто відмітити, що об'єм енергоносіїв, задіяних в секторі перетворення енергії, скоротився майже на 60% (з 81785 тис. т.н.е у 1990 р. до 33309 тис. т.н.е. у 2018 р.).

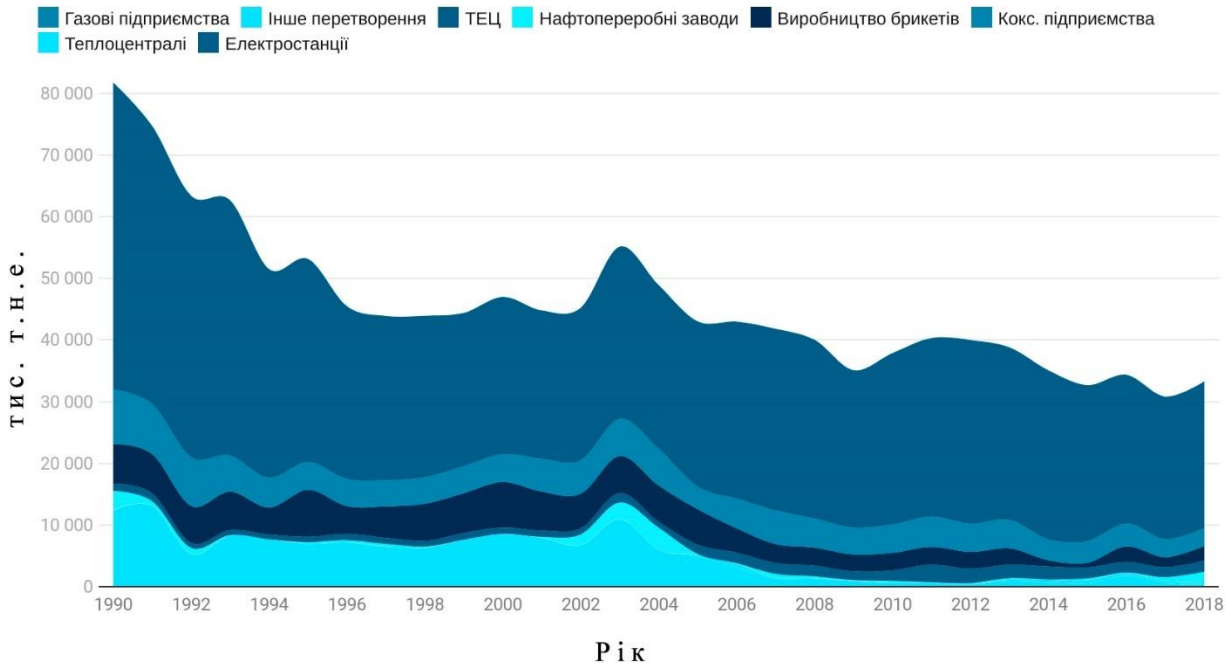


Рис. 1.7. Об'єм енергоносіїв, використаних в секторі перетворення енергії в Україні протягом 1990-2018 рр.

Найбільшими кінцевими споживачами енергоносіїв в Україні є підприємства наступних галузей [32]: чорна металургія (52,16% від загального обсягу споживання енергоносіїв у 2018 р.), харчова та тютюнова промисловість (8,99%), гірничодобувна промисловість (8,87%), виробництва неметалічних мінеральних продуктів (7,94%), хімічна і нафтохімічна промисловість (6,06%), кольорова металургія (4,19%), машинобудування (3,76%), целюлозно-паперова і поліграфічна промисловість (1,6%), будівництво (1,19%), деревообробна та виробництво деревини (1,13%), виробництво транспортного устаткування (<1%), текстильна і шкіряна промисловості (<1%) та інші (рис. 1.8).

При цьому також важливо відмітити значне загальне скорочення споживання енергоресурсів підприємствами різних галузей [33] – з 79275 тис. т.н.е. у 1990 р. до 16502 тис. т.н.е. у 2018 р. (майже на 80%).

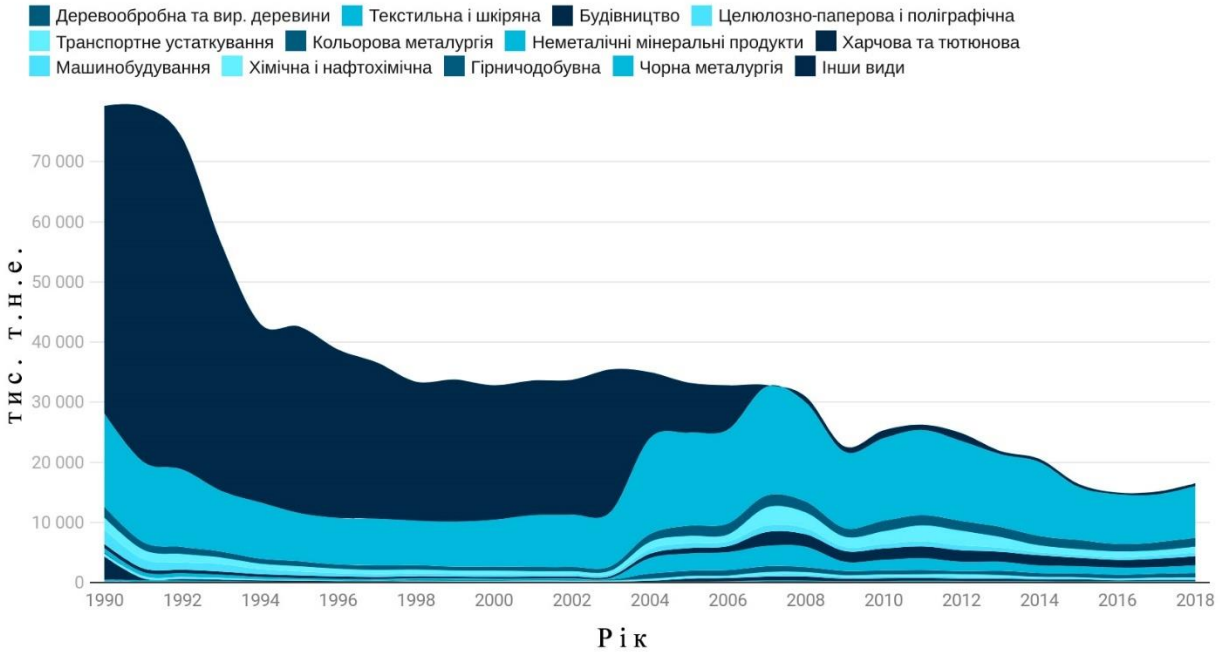
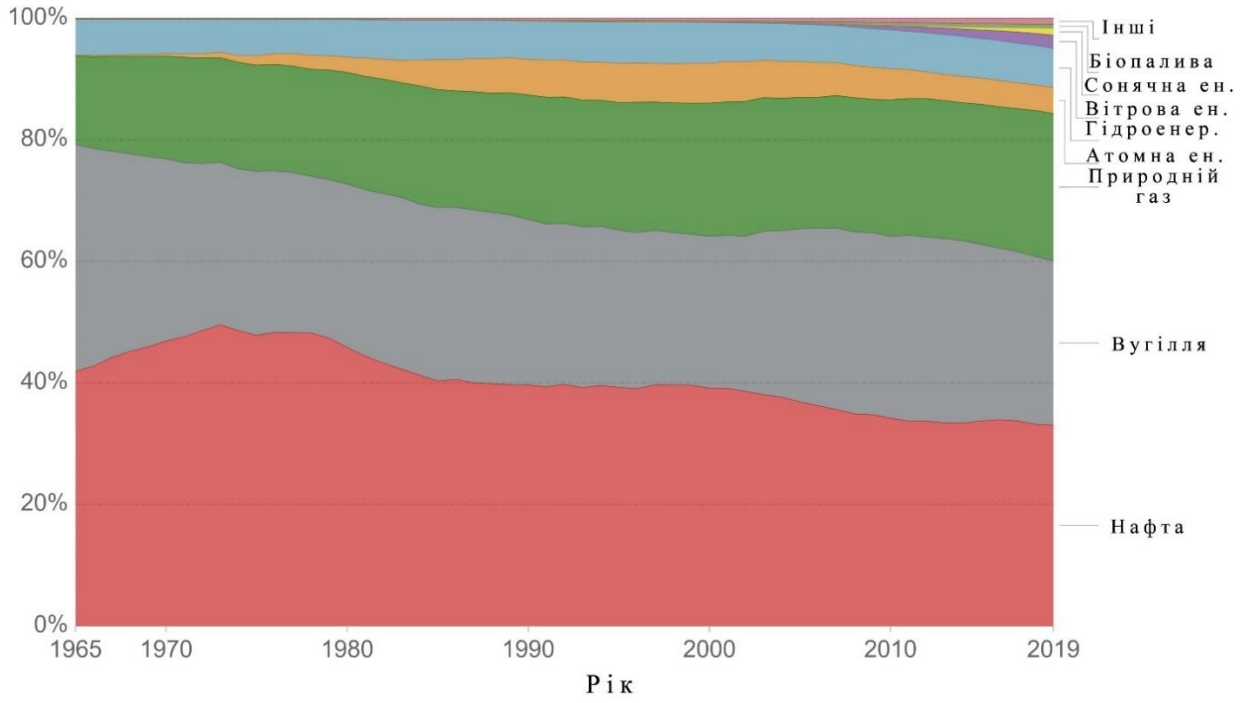


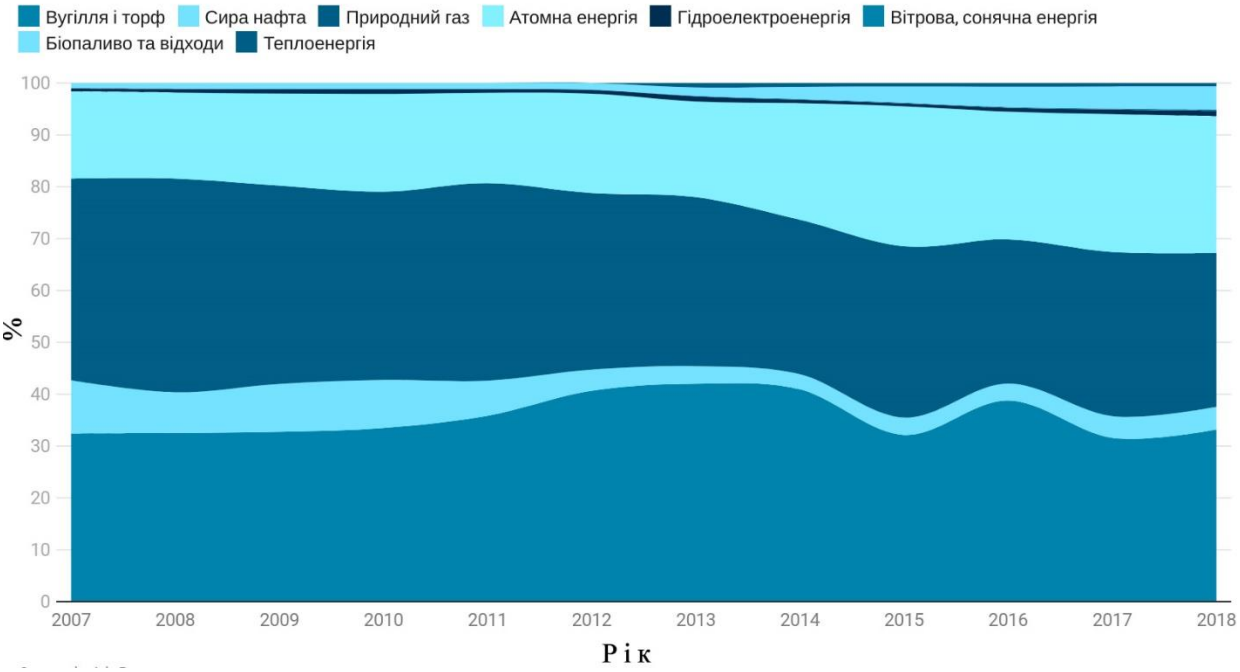
Рис. 1.8. Галузі-кінцеві споживачі енергетичних ресурсів в Україні протягом 1990-2018 рр.

Для візуалізації динаміки споживання енергетичних ресурсів за типами енергоносіїв, на рис. 1.9 приведені графіки енергетичних балансів України та світу. У таблиці 1.1 наведено дані щодо відносного споживання різних типів енергетичних ресурсів в Україні та світі в період з 2007-2018 рр. [34]. Як видно з представлених даних, Україна і світ ще значною мірою споживають викопні види палива [35], що сприяють значним обсягам викидів забруднюючих речовин у навколишнє середовище [36, 37].

Одним із головних споживачів природніх ресурсів є електростанції, ТЕЦ, котельні, та інші джерела генерування та перетворення енергії, що зокрема виробляють електричну та теплову енергії [38, 39]. Згідно даних International Energy Agency [40], частка викопних видів палива, що використовуються при генеруванні електричної енергії, в період з 1990-2014 рр. складала більше 60%, тобто до теперішнього часу об’єкти генерування електричної та теплової енергії використовують енергоносії, в результаті згорання яких утворюється значна кількість забруднюючих речовин [41, 42]. Переважна більшість з них потрапляє до атмосферного повітря (рис. 1.10) [43-45].



а)



б)

Рис. 1.9. Динаміка відносного використання енергоносіїв в: *а*) світі протягом 1965-2019 рр.; *б*) Україні протягом 2007-2018 рр.

Таблиця 1.1 – Співвідношення споживання різних типів енергоносіїв в Україна та світі, %

Рік	Вугілля		Нафта		Природній газ		Атомна енергія		Біопаливо		Гідро-енергетика		Сонячна та вітрова енергетики		Інші джерела	
	Україна	Світ	Україна	Світ	Україна	Світ	Україна	Світ	Україна	Світ	Україна	Світ	Україна	Світ	Україна	Світ
2007	32,42	29,88	10,25	35,62	38,92	21,78	16,77	5,42	1,03	0,29	0,6	6,08	0	0,36	0	0,58
2008	32,52	28,94	7,84	34,93	41,23	22,05	16,59	5,31	1,12	0,4	0,7	6,31	0	0,45	0	0,61
2009	32,74	29,94	9,25	34,79	38,22	21,93	17,77	5,28	1,18	0,46	0,84	6,36	0	0,59	0	0,66
2010	33,49	29,98	9,26	34,21	36,29	22,49	18,87	5,14	1,18	0,51	0,91	6,37	0	0,7	0	0,7
2011	35,85	30,57	6,77	33,72	38,08	22,48	17,43	4,77	1,16	0,52	0,69	6,3	0	0,91	0	0,72
2012	40,67	30,3	4,08	33,71	34,03	22,78	19,17	4,36	1,27	0,52	0,73	6,45	0,04	1,12	0	0,76
2013	42,03	30,28	3,39	33,44	32,58	22,73	18,44	4,3	1,62	0,55	1	6,57	0,09	1,34	0,85	0,8
2014	40,94	30,01	2,92	33,39	29,78	22,69	22,46	4,32	2,35	0,58	0,71	6,62	0,13	1,54	0,72	0,85
2015	32,15	29,06	3,36	33,73	33,02	23,05	27,01	4,32	3,1	0,6	0,55	6,51	0,16	1,82	0,67	0,9
2016	38,8	28,24	3,28	33,95	27,79	23,27	24,61	4,3	3,92	0,62	0,76	6,6	0,14	2,12	0,69	0,9
2017	31,59	27,85	4,19	33,77	31,64	23,5	26,57	4,24	4,27	0,62	0,91	6,53	0,18	2,55	0,65	0,94
2018	33,19	27,56	4,37	33,23	29,68	24,06	26,35	4,19	4,48	0,65	1,07	6,48	0,23	2,78	0,64	0,96

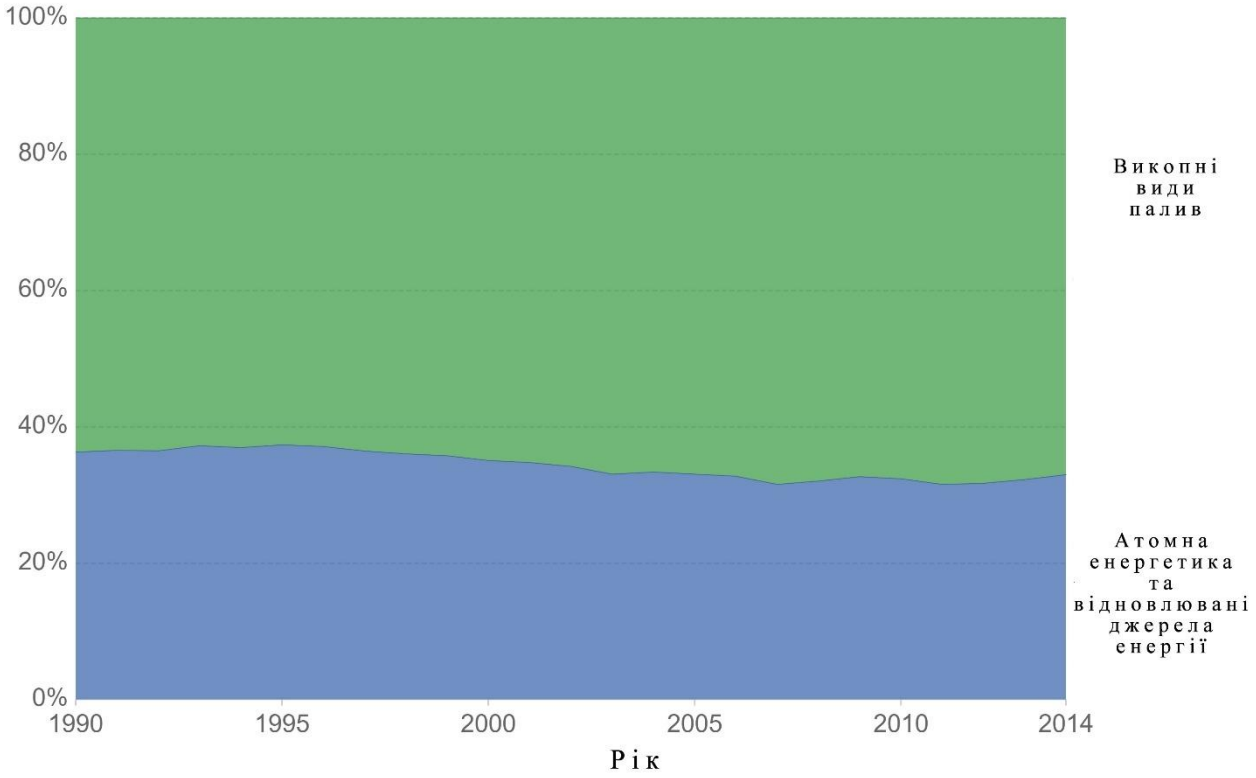


Рис. 1.10. Співвідношення світового виробництва електроенергії, що генерується викопними видами палив (вугілля, торф, нафта, газ) та низьковуглецевими джерелами (гідроенергетика, біоенергетика, атомна, вітряна, сонячна, геотермальна та морська енергетики)

Таким чином, Україна як і світ в загальному, мають достатньо диверсифікований енергетичний баланс [46]. При цьому частка викопних видів палив у цьому балансі до цього часу є значною і на 2018 р. складає 67,24%, що в цілому є середньосвітовим показником. Також з рис. 1.10 можна побачити, що частка викопних видів палив, що використовуються при генеруванні електричної енергії збільшується – від 63,72% у 1990 р. до 67,03% у 2014 р. Ці дані дозволяють стверджувати про зростаючий тренд частки викопних палив при генеруванні електричної енергії, що є одним із найбільш енергоємним сектором в частині енергетичного балансу країни. Тому енергетика, в тому числі і теплоенергетика, як один з найбільших споживачів енергетичних ресурсів, залишається одним з найбільших забруднювачів навколишнього середовища, зокрема і атмосферного повітря.

1.2. Сучасний стан енергетичної галузі та шляхи її модернізації

Проведені дослідження поточного стану енергетичних об’єктів (ТЕЦ, теплоцентралі, котельні та ін.) показали, що вони потребують негайної заміни чи модернізації. Основними проблемами комунальної та промислової теплоенергетики є [7, 8, 10, 47, 48]:

- технічний стан, забезпечення та рівень зношеності основних активів (морально застаріле обладнання не замінюється, більша частина устаткування вже відпрацювала свій ресурс);
- неефективна структура енергетичного балансу, що в основному зорієнтований на використання природного газу;
- незадовільне фінансове становище підприємств;
- неефективне використання теплової енергії, особливо при її транспортуванні трубопроводами;
- недосконале законодавство в сфері регулювання ціноутворення на енергоносії та тарифи для побутових споживачів/підприємств;
- низький рівень інвестицій в галузь (зокрема, через низькоефективний облік енергетичних потоків, та обмежений доступ до звітності);
- негативний вплив на навколишнє середовище (зокрема, на рівень забруднення атмосферного повітря через використання викопних палив).

Шляхами виходу комунальної теплоенергетики України з кризового стану є [48]:

- демонтаж застарілого обладнання та введення в експлуатацію нового, переважно імпортного, теплоенергетичного устаткування;
- реінжиніринг бізнес-процесів на об’єктах галузі;
- комплексна модернізація існуючого обладнання.

Перший варіант є малоймовірним, оскільки потребує значних одноразових фінансових інвестицій. Другий варіант також на теперішній час не може буде застосований через високу частку об’єктів галузі на балансі держави (тобто, через державне управління). Оптимальним рішенням розв’язання даної проблеми є комплексна модернізація існуючих

котлоагрегатів на базі маловитратних та швидкоокупних засобів (до 2 років). Ряд технологій дозволяє досягти значного результату при досить малих капіталовкладеннях за допомогою автоматизації управління процесу спалювання [49].

Так, державний регулятор в особі НКРЕКП пропонує застосовувати енергоефективні та швидкоокупні заходи [50], представлені в табл. 1.2.

Табл. 1.2 – Заходи щодо модернізації об'єктів теплоенергетичної галузі

№	Назва заходу	Термін окупності
1	Заміна застарілих насосів на енергозберігаючі	10 місяців
2	**Заміна газових пальникових пристроїв**	**1,5 роки**
3	Модернізація котлоагрегатів із встановленими утилізаторами теплоти	1,7 роки
4	Заміна конвективної частини котлів НІІСТУ, КВГМ, ПТВМ та ін.	2,3 роки
5	**Впровадження частотного регулювання на приводах існуючих насосів, вентиляторів, димососів**	**4 роки**
6	Заміна застарілих котлоагрегатів з низьким КПД на нові високо енергоефективні	6,2 роки
7	Модернізація теплових мереж із застосуванням попередньо ізольованих труб	7,4 роки

Таким чином, актуальною на теперішній час задачею є розроблення системи керування та контролю процесу спалювання палива, що дозволить забезпечити високоефективне спалювання палива разом зі зменшення кількості шкідливих речовин у відхідних газах.

Автор дисертаційної роботи приділяє значну увагу високоефективним методами та засобам використання енергоносіїв [51-53]. Зокрема, розроблено системи керування процесом спалювання палива в котлоагрегатах малої та середньої потужності, що базується на регулюванні частоти обертання вентилятора та димососа за допомогою сенсору кисню (α-зонду) [54]. Основним призначенням системи керування є регулювання швидкості приводу електродвигуна вентилятора, так щоб в топці котла підтримувати оптимальний режим спалювання палива. При цьому значно зменшується кількість шкідливих речовин, що утворюються при спалюванні, та потрапляють до навколишнього повітря (рис. 1.11).

На рис. 1.12 приведені графіки зміни ККД котлоагрегату протягом опалювального сезону на базі розробленої системи автоматичного керування процесом спалювання палива та режимної карти для м. Києва [54].

Ця система при функціонуванні як інформативний параметр використовує КНП, що прямо залежить від концентрації кисню в повітрі. Як показано в роботах [55, 56], ця величина є змінною та залежить від метеорологічних факторів. Дослідження щодо вимірювання концентрації кисню в повітрі та прогнозування цього значення приведені в розділі 3.

Таким чином, застосування розробленої системи контролю та керування процесу спалювання палива в котлоагрегатах малої та середньої потужності дозволяє вирішити завдання маловитратної та швидкоокупної модернізації котельних агрегатів, що функціонують з порівняно низьким ККД.

1.3. Аналіз національного плану скорочення викидів від великих спалювальних установок

Україна є членом світової спільноти щодо запобігання кліматичним змінам. Це зумовило її прийняти ряд важливих концепцій та законів, серед яких Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок (НПСВ) [57].

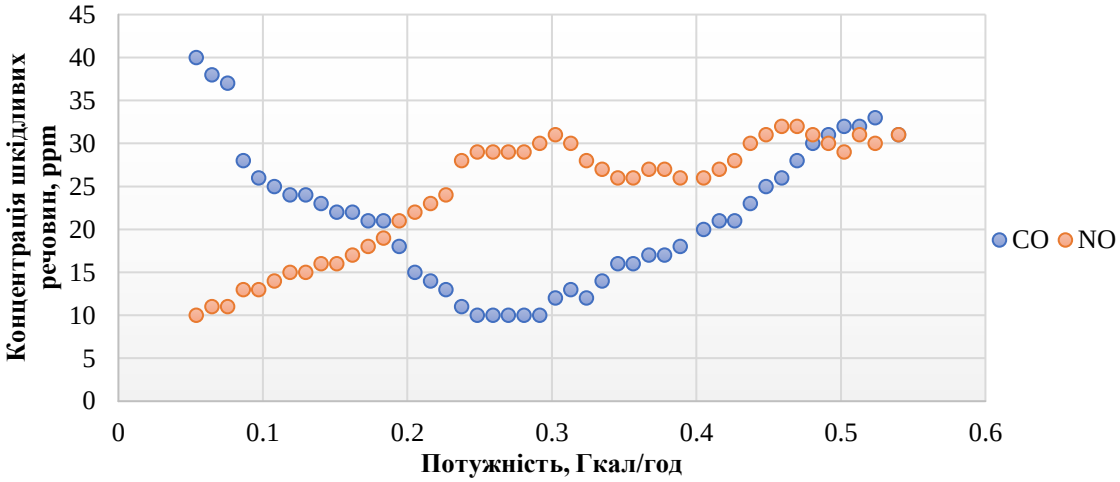


Рис. 1.11. Залежність концентрацій CO та NO в продуктах спалювання в залежності від потужності роботи котла

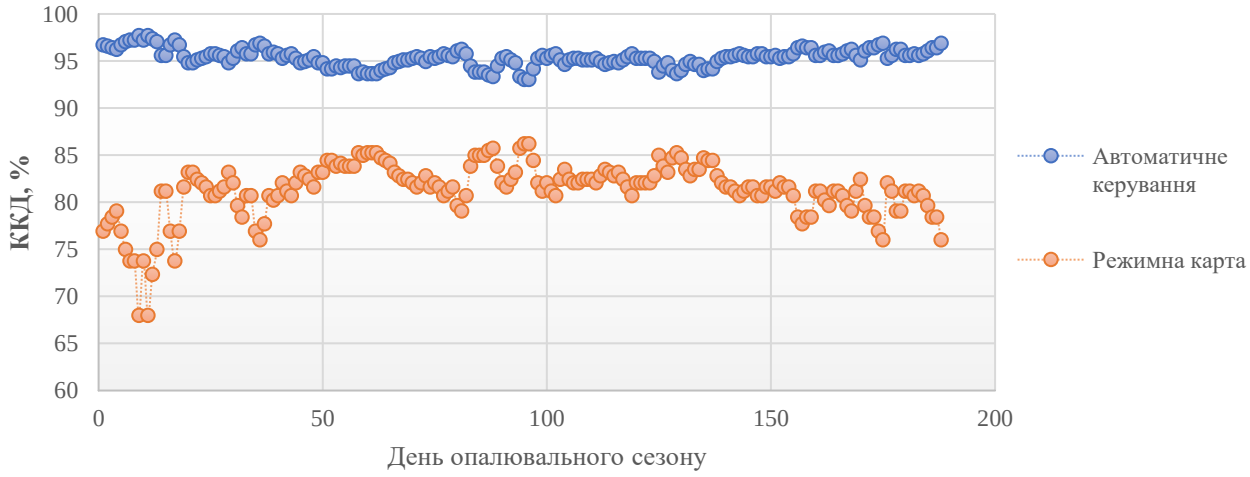


Рис. 1.12. Порівняння ККД котлоагрегатів на базі розробленої системи автоматичного керування та режимної карти протягом опалювального сезону 2014-2015 рр. у м. Києві

Метою НПСВ є поступове зменшення викидів NO_x, SO_2 та пилу від функціонуючих ВСУ, що включені до НПСВ, з номінальною потужністю 50 МВт і більше, і дотримання граничних концентрацій викидів, що відповідають Директиві 2010/75/EU (табл. 1.3) [58]. Термін дії НПСВ – з 1 січня 2018 р. по 31 грудня 2033 р.

Порівняння питомих викидів забруднювачів на ТЕС України і Європи дозволяє виявити значне відставання України від нормативів ЄС, навіть в порівнянні з такими країнами як Румунія і Болгарія [34, 40]. Аналіз показує, що Україна в порівнянні із середньоєвропейським значенням перевищує показники по викидам SO_2 у майже 14,5 раз, по NO_x – у більше 4,5 раз, по пилу – у 44 рази (рис. 1.13). З цих даних видно, що рівень викидів забруднювачів від ТЕС України вимагає термінових заходів щодо їх зменшення. Звичайно, що для зменшення цих показників Україна має значно змінити парк теплоенергетичного обладнання.

Значний рівень викидів забруднювачів в атмосферне повітря від ТЕС України пов'язаний з тим, що існуюче газоочисне обладнання на енергетичних підприємствах представлене тільки пиловловлювачами. Вони були введені в експлуатацію разом з основним обладнанням ТЕС, тому вже давно не відповідають своїм проектним показникам, які, до того ж, значно не відповідали сучасним вимогам. Обладнання для очищення вихідних газів від SO_2 та NO_x в Україні на момент введення ТЕС в експлуатацію не проектувалися. На теперішній час існує ряд вітчизняних розробок, що можуть бути впроваджені на відповідних підприємствах [59-62].

Таблиця 1.3 – Порівняння поточних концентрацій забруднюючих речовин в повітря від ТЕС України та вимоги Директиви 2010/75/EU

Забруднювач	Поточний стан, мг/нм^3	Директива 2010/75/EU, мг/нм^3
SO_2	2500-7200	200
NO_x	600-1800	200
Пил (летка зола)	300-1300	20

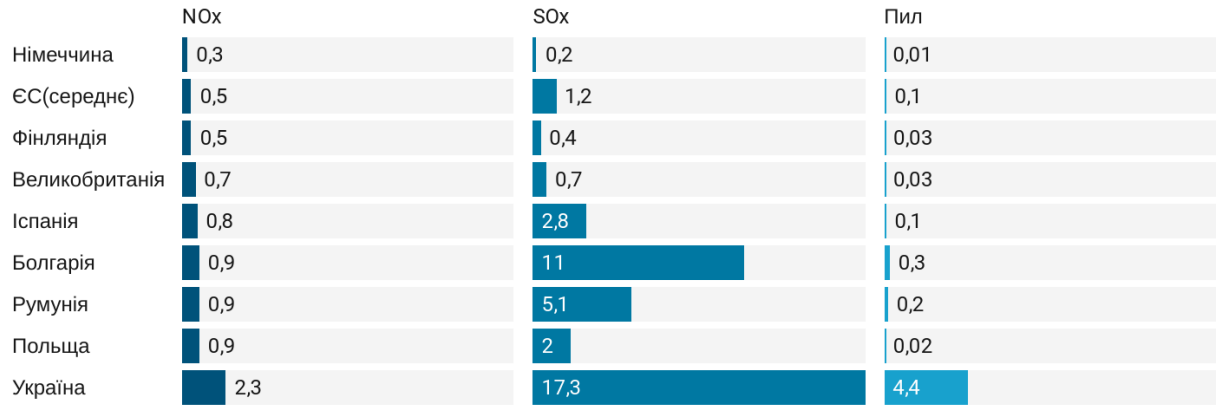


Рис. 1.13. Питомі викиди забруднювачів від ТЕС в різних країнах в порівнянні з нормами ЄС

На теперішній час в Україні працює 223 ВСУ загальною потужністю 115,894 ГВт, з яких 90 ВСУ загальною потужністю 64,814 ГВт включено до НПСВ. Серед операторів цих ВСУ є наступні: ПАТ Київенерго (33), КП «ХАРКІВСЬКІ ТЕПЛОВІ МЕРЕЖІ» (10), ДТЕК Дніпроенерго (7), ДТЕК Східенерго (5), ДТЕК Західенерго (5), Центренерго (5), Донбасенерго (5) та інші. Згідно НПСВ, на цих ВСУ планується досягнення гранично допустимих викидів для SO_2 до 1 січня 2029 р., для NO_x до 1 січня 2034 р.

Для досягнення цілей НПСВ передбачені наступні заходи:

- модернізація існуючих ВСУ для підвищення ефективності використання палива;

- формування паливної суміші з додавання біомаси до твердого палива;

- заміна застарілих пиловловлючаів на електрофільтри чи тканинні фільтри;

- створення систем очищення вихідних газів від NO_x.

У Додатку А1 приведено загальні граничні обсяги викидів забруднюючих речовин від ВСУ, які включено до НПСВ, в період 2018-2033 рр.

У додатку А2 наведено дані щодо динаміки зменшення викидів SO_2 від ВСУ в період з 2018 по 2028 роки. Згідно НПСВ, зменшення викидів SO_2 передбачається на 36 ВСУ. Для різних ВСУ кратність зменшення викидів

значно відрізняється: від 2 раз на Старобешівський ТЕС (4 енергоблок) до 107 раз на Криворізький ТЕС (10 енергоблок). Також, згідно НПСВ, на 53 ВСУ не передбачається жодних скорочень викидів SO_2 за вказаний період, а на Харківській ТЕЦ-5 викиди SO_2 зростуть приблизно на 30%.

Представлені в НПСВ заходи для зменшення негативного впливу теплоенергетики на довкілля, зокрема і шляхом впровадження технологій очищення вихідних галів, дозволять значно скоротити забруднення атмосферного повітря. Проте існує ряд причин, з яких реалізація НПСВ значно ускладнюється. На момент написання роботи, НПСВ не виконується. Однією із головних причин наразі є брак фінансових коштів. Згідно [58], для заміни теплоенергетичного устаткування на 22 тис. МВт потужності ТЕС необхідні десятки мільярдів гривень. Серед інших причин варто відзначити відсутність досвіду будівництва та експлуатації нових енергоблоків та установок для очищення вихідних газів. Також, згідно НПСВ, щороку можуть виводитися із експлуатації не більше 5-7 енергоблоків для забезпечення безперебійної роботи ОЕС України.

Таким чином, на теперішній час в Україні функціонує значна частина енергоємних підприємств, в тому числі ТЕЦ, ТЕС, котельні та інші, що генерують значну частину забруднюючих речовин, що викидаються в повітря. Цей факт підтверджує необхідність функціонування сучасної системи контролю забруднення повітря, що здатна не тільки вимірювати концентрації забруднюючих речовин в повітрі, а й виявляти інші джерела забруднення, адже екологічний стан в Україні залишається незадовільним.

1.4. Загальна характеристика хімічного забруднення атмосферного повітря в Україні

Забруднення атмосферного повітря залежить від обсягів викидів в атмосферу, їх специфіки та погодних умов.

Рівень забруднення атмосферного повітря визначається порівнянням з ГДК, зокрема їх разовими і середньодобовими значенням. Разові та

середньодобові значення ГДК деяких забруднюючих речовин, концентрації яких вимірюються на стаціонарних постах [63-66], наведені в Таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – ГДК деяких забруднюючих речовин в повітрі

№	Назва речовини	Хім. формула	Макс. разова ГДК, мг/м^3	Середньодобова ГДК, мг/м^3	Клас небезпеки
1	Пил	–	0,5	0,15	3
2	Діоксид сірки	SO_2	0,5	0,05	3
3	Оксид вуглецю	CO	5	3	4
4	Оксид азоту	NO	0,4	0,06	3
5	Діоксид азоту	NO_2	0,085	0,04	2
6	Аміак	NH_3	0,2	0,04	4
7	Формальдегід	CH_2O	0,035	0,003	2
8	Хлористий водень	HCl	0,2	0,2	2
9	Фтористий водень	HF	0,02	0,005	3
10	Бенз(а)пірен	$C_{20}H_{12}$	–	10^{-6}	1

Приведені в Таблиці 1.4 дані свідчать про те, що найбільшу небезпеку становить бенз(а)пірен, що відноситься до речовин 1 класу небезпеки. Інші наведені речовини належать до 2-4 класів небезпеки.

Для кількісної оцінки забруднення повітря в окремих населених пунктах використовується ІЗА, який визначається як сума відношень фактичних концентрацій п’яти найважливіших домішок до їх середньодобових ГДК [65]:

$$ІЗА = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{q_i}{ГДК_{iMP}} \right)^{\alpha_s}, \qquad (1.1)$$

де n – кількість домішок, врахованих при розрахунку; q_i – концентрація i-ої речовини; $ГДК_{iMP}$ – максимальна разова ГДК i-ої речовини, α_s – коефіцієнт співвідношення шкідливості i-ої речовини з шкідливістю речовини 3 класу небезпеки (α_1=1,5; α_2=1,3; α_3=1; α_4=0,85).

За значенням *ІЗА* розділяють рівень забруднення атмосферного повітря [65]: 1) чисте повітря (ІЗА<2,5); 2) слабо забруднене повітря (2,5≤ІЗА<7,5); 3) забруднене повітря (7,5≤ІЗА<12,5); 4) сильно забруднене повітря (12,5≤ІЗА<22,5); 5) високо забруднене повітря (22,5≤ІЗА<52,5); 6) екстремально забруднене повітря (ІЗА≥52,5).

Оцінка стану забруднення атмосферного повітря в Києві, Київській області та інших містах України проводиться Центральною обсерваторією імені Б. Срезневського. Всього контроль за станом забруднення повітря проводився в 39 містах на 129 стаціонарних постах мережі моніторингу гідрометеорологічних станцій [67, 68].

В атмосферному повітрі визначалися 22 забруднюючі речовини, включаючи 8 важких металів. Середня за рік концентрація формальдегіду в містах, де присутні пости спостереження, склала близько 2,3 $ГДК_{СД}$, діоксиду азоту – 1,5 $ГДК_{СД}$, фенолу – 1,3 $ГДК_{СД.}$

Згідно [69], за ІЗА в 2018 р. дуже високий рівень забруднення повітря спостерігався в Маріуполі та Дніпрі; високий – в Одесі, Кам'янському, Києві, Кривому Розі, Луцьку, Миколаєві, Слов'янську, Краматорську, Рубіжному, Львові, Запоріжжі, Лисичанську, Херсоні, Кременчуці. Високий рівень забруднення повітря в наведених містах зумовлений значними концентраціями фенолу, діоксиду азоту, формальдегіду, фтористого водню, оксиду вуглецю та завислих речовин (пилу) (рис. 1.14).

Більша кількість міст із забрудненим і дуже забрудненим повітрям знаходиться у Донецькій області – 3 міста, у Дніпропетровській області – 3 міста, у Луганській області – 2 міста, у Полтавській області – 1 місто [70].

У 2018 р. також було зафіксовані 3 випадки високого забруднення атмосферного повітря м. Обухів оксидом СО з максимальною концентрацією 8,8 $ГДК_{МР}$. Випадків екстремально високого забруднення повітря в 2018 р. на території України не спостерігалося [71].

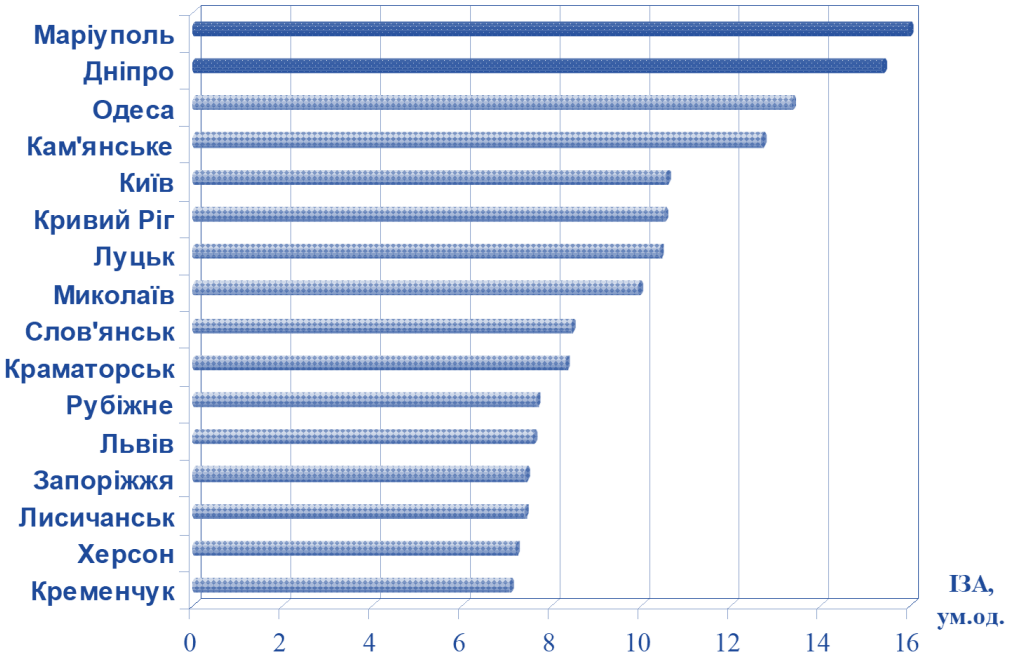


Рис. 1.14. Значення ІЗА в найбільш забруднених містах України в 2018 р.

Високі середні концентрації формальдегіду зафіксовані в Маріуполі – 6 $ГДК_{СД}$; Дніпрі – 5 $ГДК_{СД}$; Миколаєві, Одесі та Кривому Розі – 4,7-3,7 $ГДК_{СД}$; в 9 інших містах – на рівні 3 $ГДК_{СД}$. Перевищення середньорічних концентрацій NO_2 були зафіксовані в Києві, Дніпрі, Херсоні – на рівні 3,3-2,8 $ГДК_{СД}$, в 4 містах – на рівні 2,3 $ГДК_{СД}$. Перевищення концентрацій завислих речовин на рівні 3,0-2,3 $ГДК_{СД}$ були зафіксовані в Кривому Розі, Дніпрі, Кам'янському; фенолу (C_6H_5OH) на рівні 2,3 $ГДК_{СД}$ у Краматорську, Кам'янському, Слов'янську; СО на рівні 1,8-1,3 $ГДК_{СД}$ у Рубіжному, Лисичанську, Одесі; фтористого водню на рівні 1,6-1,4 $ГДК_{СД}$ в Одесі, Рівному [67, 71].

Протягом останніх десятиріч в Україні спостерігається слабке зниження ІЗА в деяких містах України, що пов'язане зі зменшенням концентрацій бенз(а)пірену, формальдегіду, аміаку та діоксиду азоту.

Загальний рівень забруднення атмосферного повітря в Україні за ІЗА становив у 2018 р. 7,6 пунктів та оцінювався як високий. Даний показник дещо

підвищився в порівнянні з минулим роком (7,2 пункти за ІЗА) за рахунок зростання середньорічного вмісту фенолу.

Далі коротко охарактеризовано джерела викидів забруднюючих речовин та міста їх найбільшої концентрації [65, 68].

Джерела викидів забруднюючих речовин.

Бенз(а)пірен потрапляє до атмосфери з викидами підприємств кольорової та чорної металургії, теплоенергетики, а також при роботі автотранспорту. Найбільшу його концентрацію спостерігали в 1992-1994 рр., коли вона досягла рівня 10 ГДК і більше, перед усім в центрах металургійної промисловості. На теперішній час концентрація бенз(а)пірену знизилася, що пов’язано зі зменшенням викидів до атмосфери промислових підприємств, а також покращенням якості палив. Ще достатньо значні концентрації бенз(а)пірену спостерігаються в Запоріжжі, Слов’янську (2,7 ГДК), Дніпрі та Тернополі (2,3 ГДК).

Діоксид сірки є характерною домішкою, що міститься у викидах підприємств хімічної, металургійної та паперової промисловості, та значно забруднює атмосферне повітря. Викиди діоксиду сірки спричиняють утворення кислотних дощів. Найвищі концентрації цієї речовини спостерігаються в Одесі та Києві.

Пил утворюється при спалюванні палива, у виробничих процесах, а також при ерозії грунту. Найбільші його концентрації спостерігаються в східних та південних областях.

Оксид вуглецю є характерною домішкою, що утворюється при неповному спалюванні органічного палива. Як правило, підвищені концентрації оксиду вуглецю спостерігаються біля ТЕС, котелень, металургійних підприємств. Оксид вуглецю є з’єднанням, що активно вступає в реакції зі складовими речовинами атмосфери і сприяє створенню парникового ефекту. Високі концентрації СО характерні для Рубіжного, Запоріжжя, Одеси, Києва.

Діоксид азоту надходить до атмосфери при спалюванні органічного палива, а також при виробництві азотних добрив, фарб, синтетичних тканин. Найвищі концентрації діоксиду азоту характерні для Слов'янська (~ 3 ГДК), Києва (2,5 ГДК), Одеси, Дніпра, Білої Церкви.

Оксиди азоту. В залежності від ступеня окиснення є наступні оксиди азоту: NO, N_2O, N_2O_3, NO_2, N_2O_5. Оксиди N_2O_3 та N_2O_5 – це тверді речовини, інші – гази. Природними джерелами оксидів азоту є такі природні явища як виверження вулканів та розряди блискавки. Антропогенними джерелами надходження оксидів азоту в атмосферу є підприємства хімічної промисловості, виробництво вибухових речовин, мінеральних добрив, нітратної кислоти, бактеріальний розклад силосу та ін. Найбільша кількість оксидів азоту в атмосферу надходить від автомобільного транспорту. Динаміка зміни концентрації оксидів азоту у повітрі протягом доби пов'язана з інтенсивністю руху транспортних засобів та сонячного випромінювання. Так, протягом світлового дня концентрація оксидів азоту в повітрі значно зростає через процеси фотохімічного окиснення азоту. Оксиди азоту – це небезпечний забруднювач через його високу токсичність та вплив на атмосферні явища (кислотні дощі, смог). Під час хімічних процесів в атмосфері оксиди азоту приводять до руйнувань озонового шару.

Сірководень і **сірковуглець** поступаються в атмосферу як окремо, так і разом з іншими з'єднаннями сірки. Основними джерелами викиду є підприємства з виготовлення цукру, штучного волокна, коксохімічної та нафтопереробної галузей. В атмосфері при взаємодії з іншими забруднювачами окислюються до діоксиду сірки. Найвищі рівні забруднення сірководнем зафіксовані в Торецьку, Маріуполі, Запоріжжі.

Фтористий водень потрапляє в атмосферне повітря разом з викидами підприємств кольорової металургії, заводів з виробництва міндобрив, підприємств будівельної галузі. Перевищення ГДК спостерігаються у Слов'янську (2,8 ГДК), Запоріжжі та Одесі (1.8 ГДК).

З’єднання фтору. Джерелами забруднення є промислові підприємства з виробництва алюмінію, скла, сталі, емалей, кераміки, фосфорних добрив. Речовини, що містять фтор, надходять до атмосфери як газоподібні з’єднання – фтороводород або пил фториду кальцію і натрію. Дані з’єднання володіють токсичним ефектом.

З’єднання хлору. Ці речовини надходять в атмосферу від хімічних підприємств, що виробляють пестициди, соляну кислоту, соду, хлорне вапно, органічні фарбники, гідролізний спирт. Токсичність хлору залежить як від виду з’єднання, так і від його концентрації.

Аміак міститься у викидах підприємств хімічної промисловості, зокрема тих, що спеціалізуються на виробництві мінеральних добрив. Підвищення рівня концентрації цього забруднювача характерно для Черкас (3 ГДК), Кам’янського (1,8 ГДК), Маріуполя (1,5 ГДК).

Фенол надходить до атмосфери з викидами підприємств чорної металургії. Підвищення рівня концентрації є характерним для Одеси (2 ГДК), Кам’янського, Торецька, Запоріжжя (1,7 ГДК) та Слов’янська (1,3 ГДК).

Далі наведена інформація щодо характеру забруднення в деяких містах України, в тому числі з використання даних [65, 72-90].

Київ. Згідно даних Державної служби статистики України, на 1 грудня 2019 р., у м. Києві проживає 2,966 млн. осіб. Площа міста складає близько 890 км^2.

Загальний обсяг викидів в атмосферу міста, згідно даних Головного управління статистики у м. Києві, в останні роки різко зменшився: в 2014 р. – 214,2 тис. т; 2015 р. – 171,0 тис.т; 2016 р. – 34,3 тис. т; 2017 р. – 45,5 тис. т; 2018 р. – 29,2 тис. т.

Основним джерелом забруднення атмосферного повітря в м. Києві є автомобільний транспорт. На його частку припадає близько 83% викидів. Менший рівень забруднення припадає на ТЕЦ, підприємства машинобудівної, хімічної, хіміко-фармацептичної, легкої, харчової промисловості та будівельної галузі. Серед основних підприємств-джерел викидів можна

виділити наступні: ЗАТ «Укр-Кан-Пауер» (ТЕЦ-4), ТЕЦ-5, ТЕЦ-6, завод «Енергія», ВАТ «Укрпластик», ВАТ «Корчеватський комбінат будматеріалів і конструкцій», Дарницький вагоноремонтний завод (ДВРЗ).

Речовиною, що найбільше забруднює повітря в Києві є діоксид азоту. Середньорічний показник концентрації цієї речовини в останні роки складає близько 2,5 ГДК. Значними також є концентрації формальдегіду (3-1,3 ГДК), бенз(а)пірену (1-1,2 ГДК), фенолу (1-1,3 ГДК).

Значні відмінності у розміщенні та специфіці промислових підприємств, а також розміщенні автомагістралей призводить до того, що сумарний рівень забруднення атмосферного повітря та його специфіка в окремих районах значно різняться.

Так, значно забрудненим є атмосферне повітря біля пунктів спостереження, що розташовані на перетину проспекту Перемоги та вул. Академіка Туполєва. Близькість розташування поста спостереження до автомагістралі дозволяє визначити те, що атмосферне повітря на цій ділянці дуже забруднене бенз(а)піреном, діоксидом азоту та оксидом вуглецю. Також близьким до такого рівня забруднення є район в межах Бессарабського ринку. Серед забруднюючих речовин тут переважає оксид вуглецю. Основна причина забруднення цієї ділянки – велика кількість автомобілів, значні затори перед світлофорами.

В цілому, найбільше повітря забруднене в центральній частині міста, найчистіше повітря в межах лісопаркових зон, особливо в західній частині міста.

Протягом останніх років рівень забруднення атмосферного повітря в місті залишається стабільним. В порівняння з початком 90-х років він значно знизився, що пов’язано зі скороченням кількості промислових підприємств, зменшенням викидів підприємствами, поліпшенням якості паливних матеріалів, будівництвом нових транспортних розв’язок.

Дніпро. Населення становить близько 1 млн осіб. Основними галузями промисловості, що впливають на рівень забруднення повітря в місті є

машинобудування, чорна металургія, електроенергетика. До підприємств, що найбільше впливають на якість повітря належать: Дніпровський металургійний завод, ПАТ «Дніпровський трубний завод», Придніпровська ТЕС, ВАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ», ВАТ «Дніпрококс», ВАТ «Дніпрошина», ПАТ «Дніпроважмаш», ВАТ «Дніпровський лакофарбовий завод», ПрАТ «Дніпровський маслоекстракційний завод». Речовинами, що найбільше забруднюють повітря в місті, є діоксид азоту, формальдегід, бенз(а)пірен. Середньорічна концентрація формальдегіду складає близько 3 ГДК, бенз(а)пірену – 2 ГДК.

Одеса. В місті проживає близько 1 млн осіб. До галузей, що мають найбільший вплив на якість атмосферного повітря є хімічна, нафтопереробна, машинобудування, електроенергетика, будівельні матеріали. Загальна кількість підприємств, що у процесі діяльності впливають на стан атмосферного повітря в Одеській області складає близько 3 тис. суб'єктів господарювання. Протягом 2018 року у повітряний басейн області надійшло 18,3 тис. т. шкідливих речовин від стаціонарних джерел, що на 50% більше, ніж в 2017 році. До підприємств, що викидають найбільшу кількість забруднюючих речовин, належать ЗАТ «Одесцемент», ТЕЦ-1, ДП «Одеський морський торговельний порт», Одеський НПЗ. Найбільш забрудненою частиною міста є північна, де сконцентровані найбільш потужні промислові підприємства. Повітря в місті найбільш забруднене формальдегідом (5 ГДК), діоксидом азоту (2 ГДК), фенолом (2 ГДК), фтористим воднем (2 ГДК).

Харків. Населення становить близько 1,5 млн осіб. Машинобудування є найбільш впливовою на забруднення атмосферного повітря галуззю. Основним джерелом забруднення повітря в місті є автомобільний транспорт. Серед стаціонарних джерел забруднення повітря виділяються підприємтсва енергетики (ТЕЦ-3, ТЕЦ-5), машинобудування («ХТЗ», «Завод імені В. О. Малишева»), будівельної галузі. За даними Головного управління статистики в Харківській області викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел у 2018 р. становили 44,7 тис. т (у 2017 р. – 45

тис. т, у 2016 р. – 100,2 тис. т). Зменшення обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря пов'язнао зі зменшення обсягів виробництва підприємств енергетичної галузі, зокрема Зміївської ТЕС ПАТ ДЕК «Центренерго» (у 2018 р. 10,5 тис. т, у 2017 р. – 34,1 тис. т).

Згідно даних Державної служби статистики України, в 2018 р. обсяг викидів забруднюючих речовин склав 3866,7 тис. т (для порівняння, в 2017 р. – 3974,1 тис т. в 2016 р. – 4498,1 тис. т), при цьому викиди від стаціонарних джерел в 2018 р. становили 2508,3 тис. т (для порівняння, в 2017 р. – 2584,9 тис. т, в 2016 р. – 3078,1 тис. т). Обсяг викидів діоксиду вуглецю, що має найбільший вплив на парниковий ефект, в 2018 р. склав 126,4 млн. т., що на 2% більше, ніж в минулому році. При цьому з 2008 р. в Україні спостерігається чітка тенденція до зменшення викидів забруднюючих речовин та діоксиду вуглецю в атмосферне повітря (Додаток А3, рис. 1.15, 1.16).

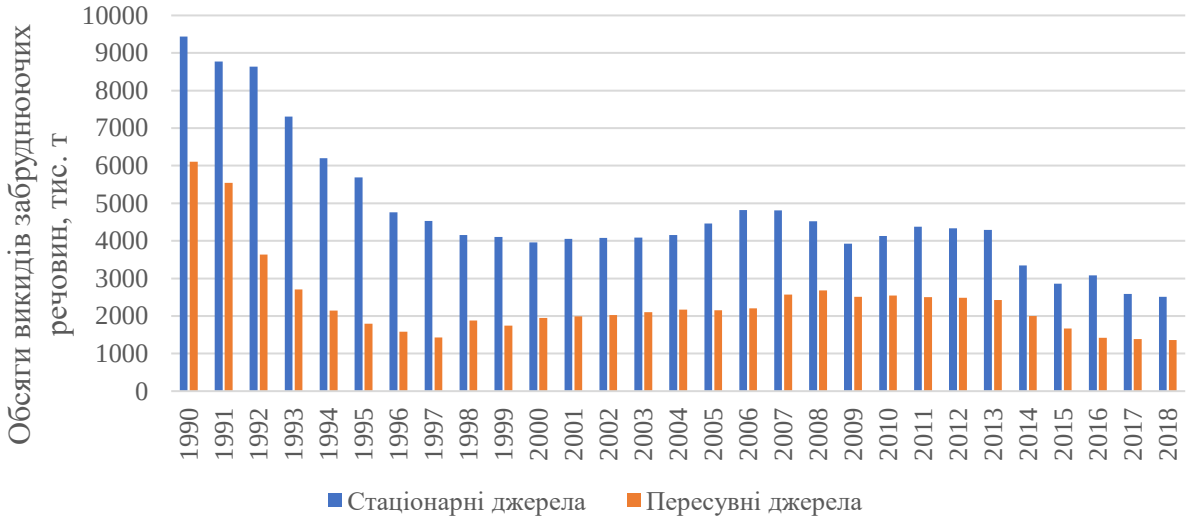


Рис. 1.15. Обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря в період 1990-2018 рр.

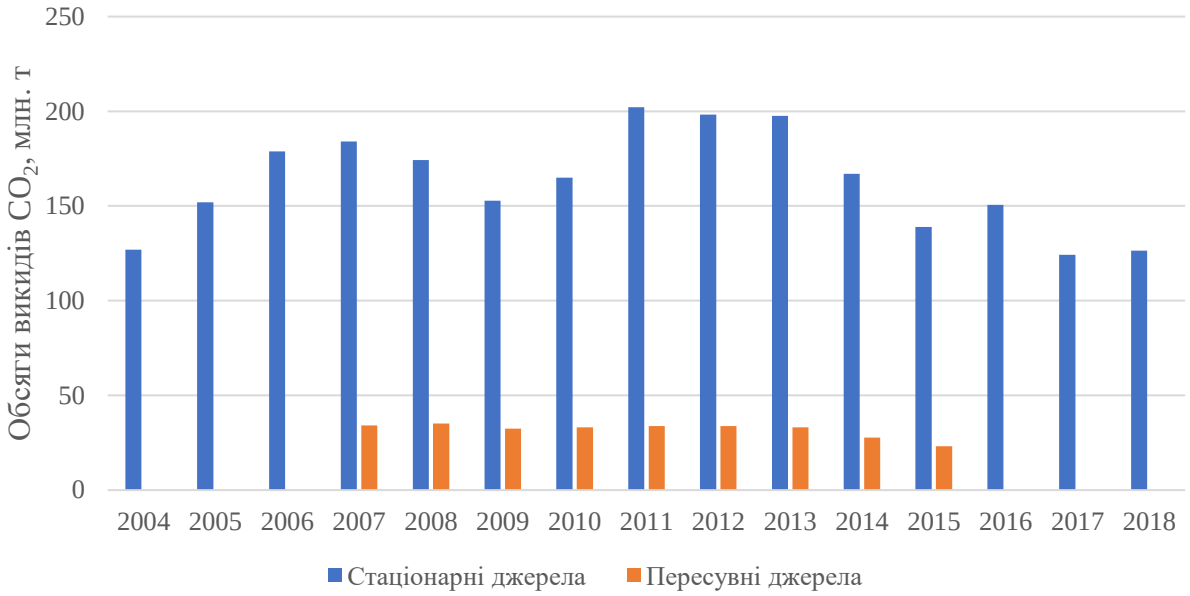


Рис. 1.16. Обсяги викидів діоксиду вуглецю в атмосферне повітря в період 2004-2018 рр.

На рис. 1.17-1.20 також приведені дані щодо викиди різних забруднюючих речовин в повітря протягом 1990-2018 рр. (Додатки А4, А5).

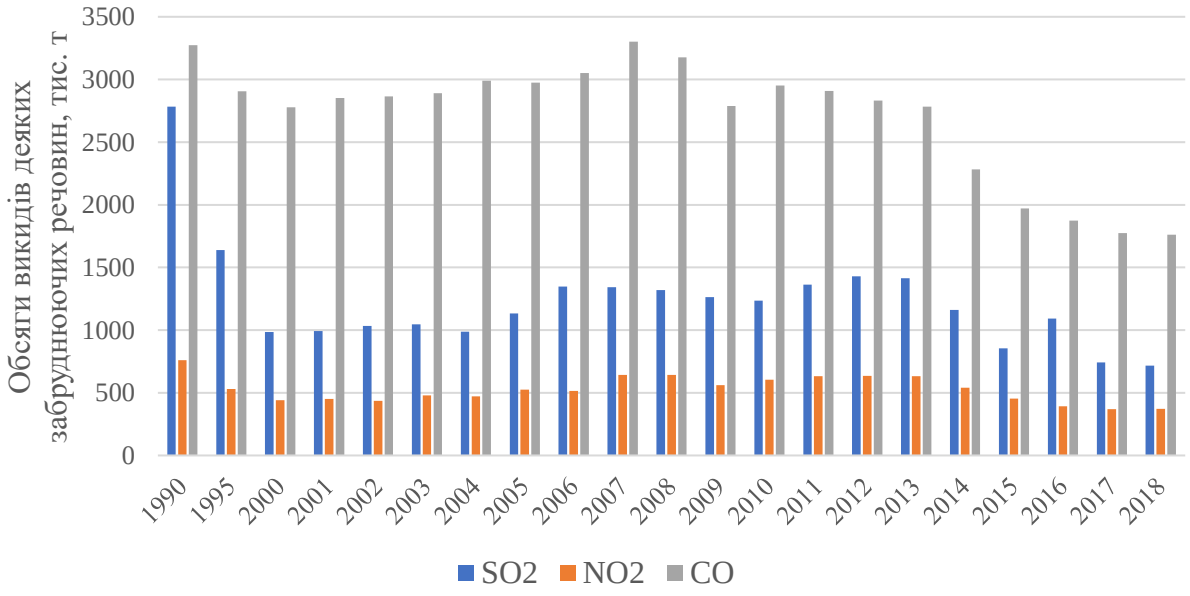


Рис. 1.17. Викиди SO_2, NO_2, CO в Україні протягом 1990-2018 рр.

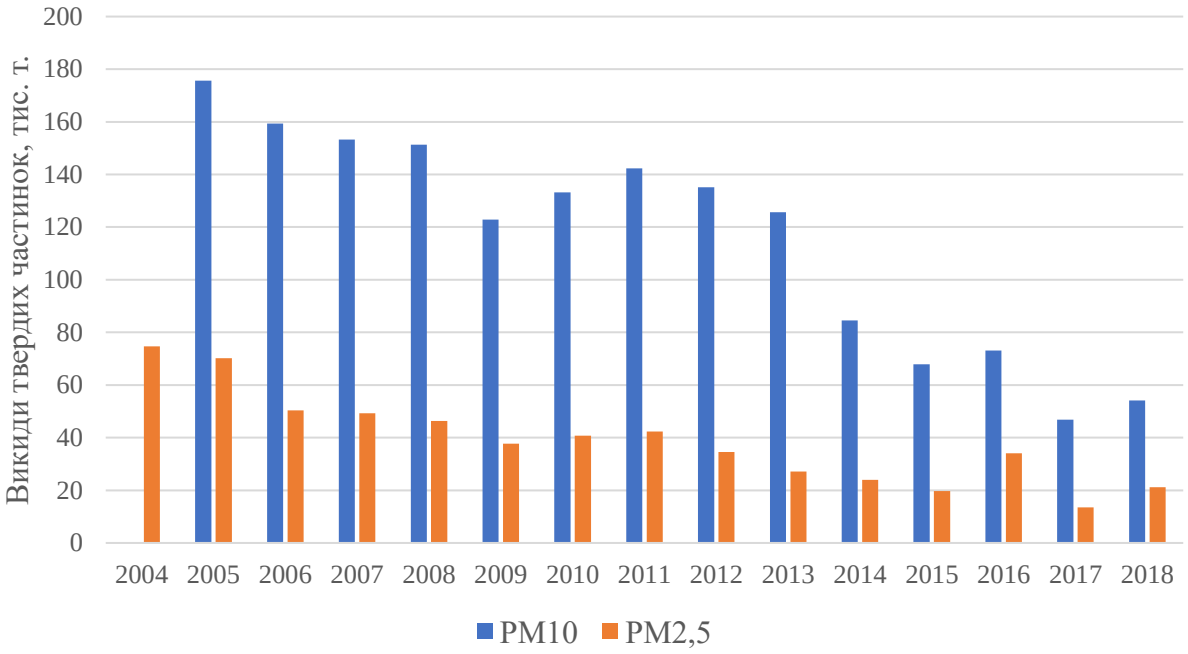


Рис. 1.18. Викиди твердих частинок PM10 та PM2,5 протягом 2004-2018рр.

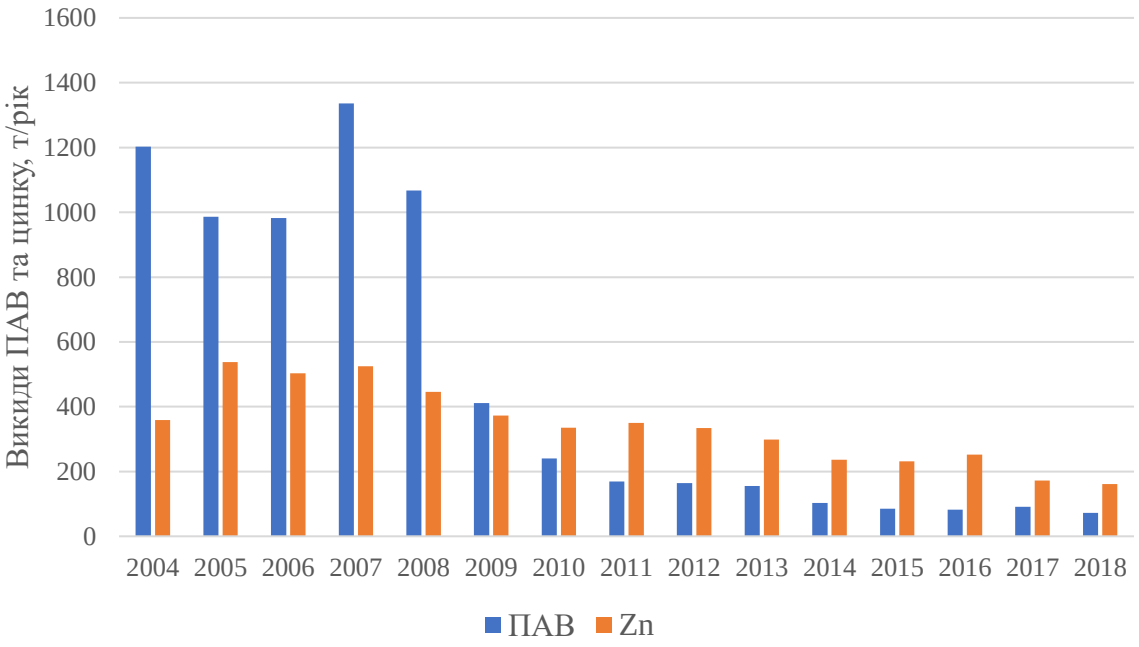


Рис. 1.19. Викиди ПАВ та цинку, т/рік

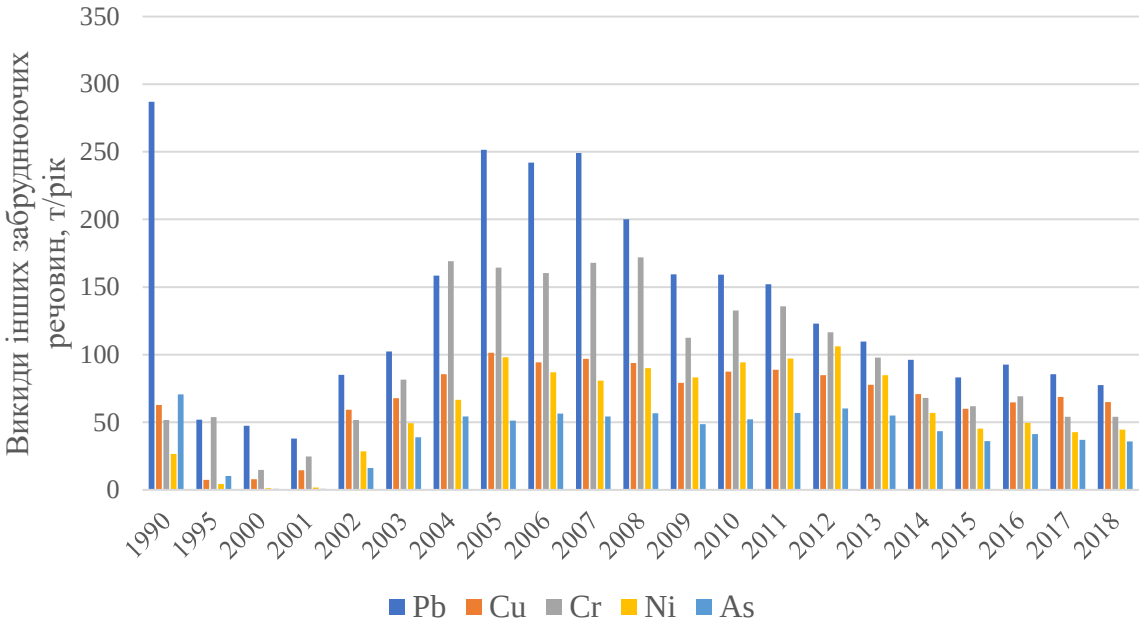


Рис. 1.20. Викиди інших забруднюючих речовин, т/рік

Згідно Додатку А6, лідерами серед областей за обсягами викидів забруднюючих речовин в навколишнє повітря від стаціонарних джерел забруднення є Дніпропетровська та Донецька області (рис. 1.21). Зокрема, у 2017 р. із 2584,9 тис. т викидів, 657,3 та 784,8 тис. т було викинуто вищенаведеними областями.

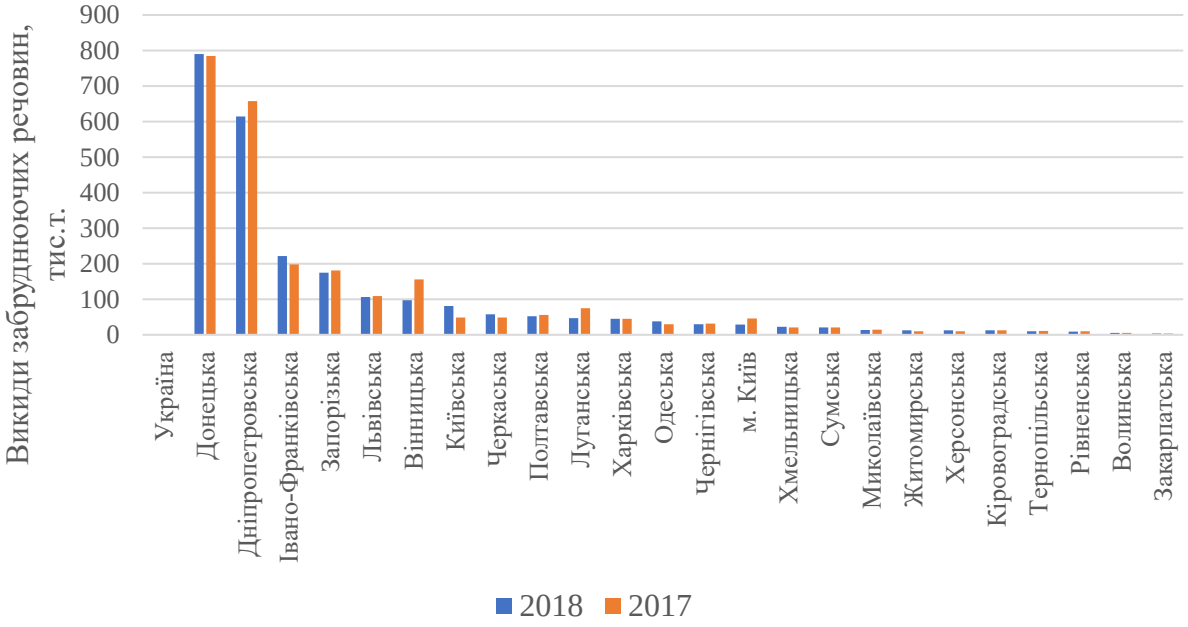


Рис. 1.21. Обсяг викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел по регіонам у 2017-2018 рр.

В порівнянні з попереднім роком збільшення викидів в атмосферу зафіксовано в 10 областях: Київській (на 68,6%), Херсонській (на 29,1%), Одеській (на 26,4%), Житомирській (на 25,5%), Закарпатській (на 24%), Черкаській (на 19,8%), Івано-Франківській (на 11,6%), Хмельницькій (на 4,8%), Сумській (на 2,1%), Донецькій (на 0,7%).

В таблиці 1.5 наведені 10 областей, що чинили найбільший вплив на забруднення повітря в 2018 р.

Таблиця 1.5 – Області, що найбільше забруднювали повітря в 2018 р.

Область	К-сть викидів, тис. т	% до загальної к-сті викидів по країні
Донецька	790,2	31,5
Дніпропетровська	614,3	24,5
Івано-Франківська	221,4	8,8
Запорізька	174,7	7,0
Львівська	106,7	4,3
Вінницька	97,3	3,9
Київська	81,3	3,2
Черкаська	57,9	2,3
Полтавська	52,1	2,1
Луганська	46,7	1,9

Загалом, на кожного жителя України в 2018 р. припадало 59,3 кг викидів забруднюючих речовин в атмосферу. У територіальному розрізі на кожен квадратний кілометр території країни припадало 4,35 т забруднюючих речовин. Серед населених пунктів найбільшого антропогенного навантаження (понад 100 тис. т забруднюючих речовин) зазнали 5 міст України, що наведені у Додатку А7 та Таблиці 1.6. Загальний обсяг викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря цих міст складає 40,2%.

Протягом 2018 р. викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря здійснювали близько 11 тис. промислових підприємств. Від них в атмосферну надійшло 2508,3 тис. т забруднюючих речовин, що на 3% менше, ніж в 2017 р.

Таблиця 1.6 – Динаміка викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря в містах України, тис. т

Населений пункт	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	% від загалу в 2018р.
Маріуполь	364,3	382,4	330,4	333,8	289,4	249,6	257,3	288,2	316,6	12,60
Кривий Ріг	395,0	358,6	354,6	351,8	327,4	327,0	342,9	323,9	267,4	10,7
Бурштин	146,8	198,7	174,7	182,7	199,8	198,0	168,5	160,1	182,9	7,3
Курахове	123,9	166,2	148,4	166,0	125,0	112,7	126,4	154,7	139,2	5,5
Кам'янське	108,5	124,7	116,4	115,5	105,0	101,0	90,5	57,8	103,3	4,1

Основними забруднювачами атмосферного повітря в Україні залишаються підприємства переробної і добувної промисловості, постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря, сумарні викиди яких складають більше 92% від загального обсягу викидів від стаціонарного джерел.

Серед видів економічної діяльності найбільша частка викидів забруднюючих речовин (без урахування викидів діоксиду вуглецю) припадає на постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря – 39,4%.

Другим за кількість викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря є переробна промисловість. На неї припадає 35,2%. При цьому частка металургійного виробництва складає 29%.

На добувну промисловість і розроблення кар'єрів припадає 17,7% від загальної кількості викидів в атмосферу. Повний перелік викидів забруднюючих речовин в атмосферу від стаціонарних джерел забруднення по Україні за видами економічної діяльності у 2018 р міститься у Додатку А8.

1.5. Аналіз засобів та систем контролю забруднення повітря

Контроль атмосферного повітря є складової державної системи моніторингу навколишнього природного середовища, що проводиться з метою отримання, збирання, обробки, збереження та аналізу інформації про стан атмосферного повітря та розроблення науково обґрунтованих

рекомендацій для прийняття рішень у галузі охорони атмосферного повітря [91-97].

Суб'єктами контролю атмосферного повітря є Міністерство енергетики України, Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України (МЗДПР), МОЗ, ДСНС, ДАЗВ, орган виконавчої влади Автономної Республіки Крим з питань охорони навколишнього природного середовища, обласні держадміністрації, Київська міська держадміністрація, виконавчі органи міських рад [98-101].

Згідно [100], право на встановлення пунктів спостережень та ведення спостереження за рівнями забруднювальних речовин мають всі вищенаведені органи, окрім МЗДПР. На практиці, наведені вище суб'єкти контролю користуються даними Українського гідрометеорологічного центру і даними звітності, яку надають промислові підприємства.

Суб'єкти контролю атмосферного повітря розміщують пости спостережень, проводять спостереження за концентраціями забруднюючих речовин, наведених в Додатку А9, список А.

Підприємства, установи та організації, діяльність яких призводить або може призвести до погіршення стану атмосферного повітря, можуть встановлювати пости спостережень та вести контроль за концентраціями забруднюючих речовин [102], наведених в Додатку А9, список Б.

Кількість постів спостереження та їх розміщення для проведення оцінювання визначаються у програмі державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря для кожної зони та агломерації (Додаток А10), відповідно до порядку, що встановлюється МВС за погодженням з Мінприроди. Проте оптимізація мережі моніторингу забруднення повітря є актуальною задачею [103-109].

Для забезпечення точності вимірювальних пристроїв усі суб'єкти контролю атмосферного повітря, що ведуть спостереження за концентрацією забруднювальних речовин, здійснюють оцінювання якості атмосферного повітря, забезпечують проведення калібрування та технічного обслуговування

ЗВТ, що використовуються для контролю забруднення атмосферного повітря (Додаток А11, А12).

Поділ України на окремі райони здійснений з орієнтуванням на певні умови навколишнього середовища з обґрунтованою межею розміщення ПС атмосферного повітря як у великих містах, так і в промислових агломераціях. Це дозволяє проводити оцінювання стану екологічного забруднення в регіонах. Існуюча мережа ПС за забрудненням атмосферного повітря була створена відповідного до вимог РД 52.04.186-89 [99].

Процес контролю забруднення атмосферного повітря містить наступні складові: оцінка здоров'я населення; оцінка негативного впливу на довкілля; оцінка відповідності стандартам якості повітря; моделювання як короткочасних, так і довготривалих тенденцій; планування; затвердження моделей дисперсії, які використовують математичні підходи моделювання; ефективність заходів управління.

Результатами проведеного контролю забруднення повітря є: первинні дані контролю та спостереження за станом забруднення атмосферного повітря; узагальнені за певний проміжок часу дані щодо забруднення на вказаній території; узагальнені дані щодо складу та обсягу викидів полютантів та їх оцінка; рівень та ступінь небезпечності забруднення повітря щодо життєдіяльності населення та стан довкілля.

Для визначення концентрацій забруднювачів в повітрі використовується відбір проб на стаціонарних ПС. Кількість ПС залежить від розмірів міста та особливостей промислових потужностей, і загалом варіюється в діапазоні від 1 ПС для міст з населенням до 50 тис. мешканців, до 20 ПС для міст з населенням більше 1 млн. мешканців (згідно РД 52.04.186-89) [110-112]. Нижче наведені таблиці порівняння кількості ПС, необхідних згідно РД 52.04.186-89 та Директиви 2008/50/ЄС, прийнятої в Україні (Таблиця 1.7, 1.8).

Згідно [113, 114], в Україні налічувалося 129 постів у 39 містах, серед них: 16 – у Києві; 10 – у Харкові; 8 – в Одесі; 6 – у Дніпрі, 5 – в Запоріжжі,

Маріуполі, Кривому Розі. В інших обласних центрах кількість ПС не перевищувала 4.

Таблиця 1.7 – Принципи розташування ПС згідно кількості мешканців в містах України

Населення	К-сть ПС згідно РД 52.04.186-89	К-сть ПС згідно Директиви 2008/50 / EU
<50 тис.	1	1
50-100 тис.	2	1
100-200 тис.	2-3	1
200-500 тис.	3-5	2 (250-499 тис.)
500 тис. – 1 млн.	5-10	2 (500-749 тис.)
> 1 млн.	10-20	2 (750-999 тис.) 3 (1-1,9 млн.) 4 (2-3,749 млн.) 6 (3,750-5,999 млн.) 7 (>6 млн.)

Таблиця 1.8 – Кількість ПС, необхідних для розгортання системи контролю забруднення повітря

Населення	К-сть міст з відповідним населенням	Загальна к-сть постів згідно РД 52.04.186-89	Загальна к-сть постів згідно Директиви 2008/50 / EU
<50 тис.	373	373	373
50-100 тис.	44	88	44
100-200 тис.	13	26-39	13
200-500 тис.	24	72-120	48
500 тис. – 1 млн.	5	25-50	10
> 1млн.	3	30-60	7
Загальна к-сть ПС		**614-730**	**495**

Програма обов’язкового контролю забруднення повітря [99] включає сім речовин: суспендовані пилові частинки, діоксид сульфуру, оксиди нітрогену, моно оксид вуглецю, формальдегід, бенз(а)пірен та свинець. На деяких ПС може проводитися контроль за іншими забруднюючими речовинами. Це

залежить від місцевих чи регіональних викидів, а також промислового потенціалу району.

В цілому, якість атмосферного повітря визначається за 33 показниками, відповідно до затвердженого переліку для кожного з 53 міст України (Додаток А13). Інші речовини можуть бути внесені до програми спостереження згідно рішення органів місцевого самоврядування [99].

На 81 стаціонарному ПС здійснюється спостереження за такими важкими металами: залізо, кадмій, мідь, цинк, свинець, нікель, марганець, хром [99].

Відбір проб проводиться на визначених часових проміжках згідно однієї з 4 програм спостереження: повної, неповної, скороченої чи добової. Повна програма передбачає 4 вимірювання протягом доби: 01:00, 07:00, 13:00, 19:00; неповна передбачає 3 вимірювання: 07:00, 13:00, 19:00; скорочена програма передбачає 2 вимірювання: 07:00, 13:00; добова програма передбачає неперервні спостереження [113, 114]. Як ЗВТ на мережі спостереження використовуються такі види стаціонарних ПС вітчизняного виробництва, як «ПОСТ-1», «ПОСТ-2», «ПОСТ-2а» [99, 115].

Також участь у проведенні спостереження за забрудненням атмосферного повітря та впливом на нього промислових підприємств бере Державна екологічна інспекція України. Вона здійснює вибірковий контроль на джерелах викидів промислових об’єктів, що чинять забруднення атмосферного повітря, через відбір проб та експериментальні дослідження, що проводяться в умовах вимірювальних лабораторій. При цьому визначаються 65 параметрів [99].

Звіти щодо даних контролю якості атмосферного повітря в Україні формуються щомісяця, щокварталу та щороку. Інформація про стан забруднення атмосферного повітря та відповідні інформаційно-аналітичні огляди мають бути наведені на сайтах профільних міністерств, служб, агенцій. На практиці знайти актуальну інформацію щодо даних контролю досить складно, у вільному доступі є тільки щорічні звіти щодо стану забруднення атмосферного повітря, що публікуються із затримкою від півроку до року.

Розвиток системи екологічного контролю в Україні протягом останніх років обумовив розвиток у великих промислових регіонах мереж ПС за станом атмосферного повітря з використанням АПС. Вони доповнюють існуючу мережу контролю. Такі АПС вже функціонують в багатьох містах України, в тому числі з використання бездротових сенсорних мереж [116-122], та за кордоном [123-127].

Так як контроль за забрудненням атмосферного повітря та викидами промислових підприємств є одним з головних елементів системи контролю навколишнього природного середовища, створення та розвиток локальних мереж з використанням АПС має бути головним напрямом розвитку системи контролю якості атмосферного повітря.

Ефективна система контролю за забрудненням атмосферного повітря є важливим елементом реалізації державної політики в сфері охорони навколишнього середовища, спрямованої на забезпечення права громадян на безпечне середовище існування. Основною метою реалізації контролю за забрудненням атмосферного повітря є збирання, збереження, обробка, аналіз та представлення оперативної та достовірної інформації для попередження чи зменшення впливу негативних наслідків забруднення повітря на навколишнє середовище [113, 114].

Враховуючи тенденцію зовнішньої політики України щодо стратегічного курсу держави на набуття повноправного членства України в ЄС та в Організації Північноатлантичного договору [128], головний напрямок розвитку мережі контролю за забрудненням атмосферного повітря має полягати в поступовій гармонізації елементів мережі згідно вимог ЄС [113, 114].

На теперішній час до складу системи контролю забруднення атмосферного повітря України входять пости ручного та автоматизованого відбору проб повітря, що в свою чергу можуть бути стаціонарними або мобільними. Їх класифікація наведена на рис. 1.22.



Рис. 1.22. Класифікація постів спостереження

Одним із головних виробників приладів та системи для екологічного контролю атмосферного повітря в Україні є ЗАО «Украналіт». Як елементи вітчизняної системи контролю використовуються декілька типів вимірювальних комплексів та систем їх виробництва:

1. Газоаналізатор 604EX20-C (рис. 1.23) – це стаціонарний автоматичний багатокомпонентний газоаналізатор, що призначений для визначення масових концентрація газових забруднювачів в атмосферному повітрі урбанізованих територій [119]. Даний комплекс може входити до лабораторій стаціонарних та мобільних постів спостереження за якістю атмосферного повітря. Одночасно може проводити вимірювання концентрацій від 2 до 5 газових компонентів електрохімічним методом (CO, NO, NO_2, SO_2, NH_3, H_2S, O_3, Cl_2). Газоаналізатор забезпечує корекцію нульових показів, безперервний відбір проби та коригування результатів вимірювання з урахуванням температури експлуатації та чутливості сенсорів для кожного газового компонента.

Технічні характеристики багатокомпонентного газоаналізатора 604EX20-C наведені таблиці Б1 (Додаток Б).



Рис. 1.23. Багатокомпонентний стаціонарний газоаналізатор 604EX20-C

2. Газоаналізатор 604EX20-П (рис. 1.24) – це портативний автоматичний багатокомпонентний газоаналізуючий пристрій, що призначений для визначення масових концентрація газових забруднювачів в атмосферному повітрі урбанізованих територій. Одночасно може проводити вимірювання концентрацій від 2 до 5 газових компонентів електрохімічним методом (NO, NO_2, SO_2, CO, NH_3, Cl_2, H_2S, O_3). Газоаналізатор забезпечує корекцію нульових показів, безперервний відбір проби та коригування результатів вимірювання з урахуванням температури експлуатації та чутливості сенсорів для кожного газового компонента. Керування пристроєм та оброблення інформації забезпечується мікроконтролером.

Технічні характеристики багатокомпонентного газоаналізатора 604EX20-П наведені в таблиці Б2 (Додаток Б).

3. Автоматична система екологічного моніторингу атмосферного повітря (АСЕМА) (рис. 1.25) – це вимірювально-інформаційна система, призначена для безперервного автоматичного моніторингу концентрацій забруднювачів (NO, NO_2, SO_2, CO, O_3, C_xH_y) в атмосферному повітрі.

Система забезпечує збір, архівування, обробку та передачу контрольно-вимірювальної інформації на базі комп’ютера, яким комплектується. Система призначена для наукових досліджень та спостереженням за станом приземної атмосфери урбанізованих територій та промислових підприємств.



Рис. 1.24. Багатокомпонентний портативний газоаналізатор 604EX20-П



Рис. 1.25. Автоматична система екологічного моніторингу атмосферного повітря (АСЕМА)

Технічні характеристики багатокомпонентного системи АСЕМА наведені в таблиці Б3 (Додаток Б).

4. Газоаналітичний автоматичний комплекс контролю за забрудненням атмосферного повітря «ГАК – Атмосфера» (рис. 1.26) – вимірювально-

інформаційна система, що призначена для безперервного автоматичного моніторингу концентрацій забруднювачів (NO, NO_2, SO_2, CO) в атмосферному повітрі.



Рис. 1.26. Газоаналітичний автоматичний комплекс контролю за забрудненням атмосферного повітря «ГАК – Атмосфера»

Комплекс забезпечує збір, архівування, обробку та передачу контрольно-вимірювальної інформації до комп'ютера за запитом оператора за допомогою бездротового каналу зв'язку. Комплекс «ГАК – Атмосфера» забезпечує зберігання даних протягом 5 років. Комплекс призначено для контролю за забрудненням приземного шару атмосферного повітря в складі постів спостереження на базі урбанізованих територій та промислових підприємств.

До складу комплексу входять автоматичні газоаналізатори, що розміщуються у спеціальній шафі, захищеній від стороннього доступу. До складу шафи також входять комп'ютер з монітором, засіб для бездротового зв'язку (GSM-модем), контролер, джерело безперебійного електроживлення, система контролю та стабілізації внутрішньої температури.

Технічні характеристики газоаналітичного автоматичного комплексу контролю за забрудненням атмосферного повітря «ГАК – Атмосфера» наведені в таблиці Б4 (Додаток Б).

Також комплекс «ГАК-Атмосфера» передбачає 3 рівня захисту контрольно-вимірювальної інформації:

1) зберігання інформації в пам'яті кожного газоаналізатора протягом не менше 30 діб (1 рівень захисту);

2) зберігання інформації в пам'яті комп'ютера протягом не менше 5 років (2 рівень захисту);

3) зберігання інформації в пам'яті центрального комп'ютера протягом не менше 10 років (3 рівень захисту).

5. Автоматичний стаціонарний пост спостереження за станом атмосферного повітря «АТМОСФЕРА-10» (рис. 1.27) – це вимірювально-інформаційна система безперервного спостереження та контролю за станом приземного шару атмосферного повітря урбанізованих територій та промислових підприємств [129].

Пост забезпечує збір та архівування контрольно-вимірювальної інформації у внутрішній енергонезалежній пам'яті та її зберігання і обробку протягом 5 років.

«АТМОСФЕРА-10» у автоматичному режимі збирає інформацію від газоаналізаторів та вимірювача метеопараметрів та здійснює передачу даних через бездротовий GSM-канал зв'язку з використанням GPRS-технологій до центрального комп'ютера.

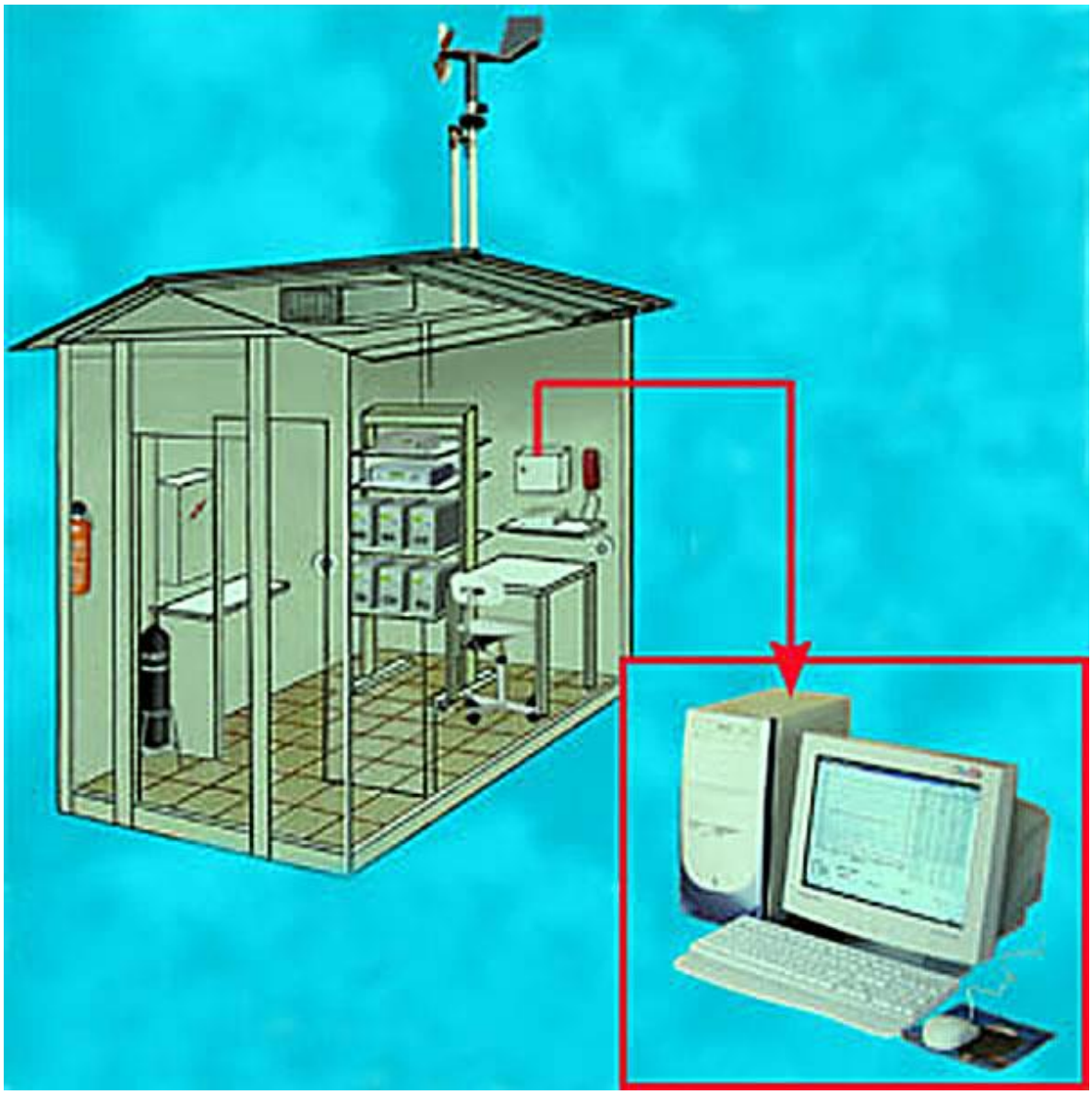


Рис. 1.27. Автоматизований стаціонарний пост спостереження за станом атмосферного повітря «АТМОСФЕРА-10»

Пост має резервні канали, що дозволяють збільшити кількість вимірювальних параметрів (концентрацій забруднювачів повітря).

Програмне забезпечення посту дозволяє щохвилини знімати дані з газових та метео- сенсорів, усереднювати отримані значення концентрацій забруднювачів повітря за 20 хв, формувати звітні файли (дата, час, значення концентрацій забруднювачів, значення метеопараметрів).

В ручному режимі пост забезпечує визначення масових концентрацій формальдегіду, свинцю, бенз(а)пірену та пилу згідно стандартизованих

методик. Як і попередній комплекс, пост «АТМОСФЕРА-10» має 3 рівня захисту контрольно-вимірювальної інформації. Технічні характеристики поста «АТМОСФЕРА-10» наведені в таблиці Б5 (Додаток Б).

6. Пересувна екологічна лабораторія контролю забруднення атмосфери «ПЕЛКЗА» (рис. 1.28) призначена для моніторингу забруднення атмосферного повітря на урбанізованих територіях, санітарно-захисних та робочих зонах промислових підприємств [129].



Рис. 1.28. Пересувна екологічна лабораторія контролю забруднення атмосфери «ПЕЛКЗА»

Дана лабораторія розміщується на базі мікроавтобусу «Газель» чи іншій подібній марці. Лабораторія оснащена комплексом сучасних стаціонарних автоматичних газоаналізаторів , пробовідбірними пристроями «Проба-2001» та іншими пристроями для контролю робочої зони. «ПЕЛКЗА» за бажанням замовника може бути укомплектована пристроями для контролю радіоактивності та забрудненості ґрунту, води.

Лабораторія оснащена комп’ютером, GSM-модемом та принтером, і може передавати дані до центрального комп’ютера чи друкувати на папері. Технічні характеристики лабораторії «ПЕЛКЗА» наведені в таблиці Б6 (Додаток Б).

На території України також поширені стаціонарні лабораторії ПОСТ-1 та ПОСТ-2, оснащені автоматичними станціями контролю забруднення атмосфери (АСКЗА). Ці станції проводять безперервний моніторинг стану атмосферного повітря на урбанізованих територіях та санітарно-захисних зонах промислових об'єктів [4]. АСКЗА обладнана засобами збору та оброблення вимірювальної інформації, яку через бездротовий канал зв'язку передає по центрального комп'ютера. До складу АСКЗА також входить блок для вимірювання метеопараметрів, що дозволяє не тільки визначати концентрації забруднюючих речовин в повітрі, а й локалізувати джерела їх викидів. Вимірювані параметри станції ПОСТ-2 та їх діапазон наведені в таблиці Б7 (Додаток Б).

Порівняльна таблиця розглянутих вимірювальних комплексів та систем наведена в таблиці 1.9.

В таблиці 1.10 наведено порівняння газоаналізуючих пристроїв, призначених для вимірювання концентрацій забруднюючих речовин в повітрі.

Звичайно, перелік газоаналізуючих пристроїв та систем вітчизняного виробництва не обмежується розглянутими зразками, проте вони є сертифікованими в Україні та широко застосовуються в системі державного контролю забруднення атмосферного повітря.

Велику увагу щодо контролю забруднення повітря приділяють закордоном. На теперішній час широкого розповсюдження набувають системи контролю забруднення повітря, що базуються на використанні бездротових сенсорних мереж.

Такі системи зазвичай встановлюють локально на базі підприємств, що здійснюють значний обсяг викидів в атмосферну. Системи контролю забруднення повітря складаються із великого числа вимірювальних модулів, що побудовані на базі low-cost сенсорів. Перелік деяких таких вимірювальних модулів наведено в табл. 1.11 [130-168].

Таблиця 1.9 – Порівняння вимірювальних комплексів та систем для контролю забруднення атмосферного повітря вітчизняного виробництва

Назва	Вимірювані забруднювачі	Метео-параметри	Бездротовий зв'язок	Мобільність	Інтервал вимірювання	Ціна, тис. $	Фото
604EX20-C	CO, NO, NO_2, SO_2, NH_3, H_2S, O_3, Cl_2	–	+	–	20 хв	~10	
604EX20-П	CO, NO, NO_2, SO_2, NH_3, H_2S, O_3, Cl_2	–	–	+	20 хв	~7	
АСЕМА	CO, C_xH_y, NO, NO_2, SO_2, O_3	–	+	–	20 хв	договірна	
ГАК – Атмосфера	CO, NO, NO_2, SO_2	–	+	–	20 хв	договірна	
АТМОСФЕРА-10	CO, NO, NO_2, SO_2	+	+	–	20 хв	договірна	
ПЕЛКЗА	CO, C_xH_y, NO, NO_2, SO_2, O_3	–	+	+	20 хв	договірна	
ПОСТ-2	NO, NO_2, C_xH_y, CO, O_3, NH_3, H_2S, пил	+	+	–	1 хв	договірна	

Як видно з таблиці 1.11 до складу вимірювальних модулів входять low-cost сенсори PM, BC, CO, NO_x, SO_x, O_3. Найбільш наближеним за кількістю

інформаційних параметрів до розроблюваного вимірювального модулю є модулі AQMesh, що можуть оснащуватися великою кількістю сенсорів.

Таблиця 1.10 – Порівняння пристроїв для вимірювання масових концентрацій забруднювачів в атмосферному повітрі

Назва	Вимірювані забруднювачі	Діапазон вимірювання, мг/м^3	Метод вимірювання	Інтервал вимірювання, хв	Маса, кг	Ціна, тис. $
603ХЛ 20	O_3, NO, NO_2	0…1	хемі-люмінесцентний	2…30	10	~3
621ЕХ 07	CO	0,7…50	електрохімічний	2…30	7	~1,5
621ЕХ 15	CO	0…50	електрохімічний	2…30	8	~1,5
621ЕХ 20	CO	0…50	електрохімічний	2…30	7	~1,5
623ПІ 08	C_xH_y	0…50	полум'яно-іонізаційний	2…20	12	~1,5
645ХЛ 20	NO	0…50	полум'яно-іонізаційний	2…20	12	~1,5
652ХЛ 05	O_3	0…1	хемі-люмінесцентний	2…30	10	~1,5
667ФФ 20	SO_2	0…1	УФ-флуоресценція	2…30	10	~1,5

В наступному підрозділі буде наведено огляд low-cost сенсорів, що можуть бути використані для побудови систем контролю забруднення повітря.

Таблиця 1.11 – Порівняння засобів вимірювання концентрацій забруднювачів в атмосферному повітрі

Виробник (Модель)	Метод вимірювання	Забрубнюючі речовини	Ціна, $	Інтервал вимірювання	Кореляція з FRM / FEM методами
Dylos (DC1100)	Оптичний	PM(0.5-2.5)	~300	1 хв	R^2 ~ 0,65-0,85
Shinyei (PM Evaluation Kit)	Оптичний	PM2.5	~1000	1 хв	R^2 ~ 0,80-0,90
RTI (MicroPEM)	Оптичний	PM2.5	~2000	10 с	R^2 ~ 0,65-0,90
HabitatMap (AirBeam)	Оптичний	PM2.5	~200	1 хв	R^2 ~ 0,65-0,70
Met One (Neighbourhood Monitor)	Оптичний	PM2.5	~1900	15 хв	R^2 ~ 0,53-0,67
Speck	Оптичний	PM2.5	~200	1 хв	R^2 ~ 0
Naneos (Partector)	Електричний	PM (LDSA: Lung-Deposited Surface Area)	~7000	1 хв	PM1: R^2 ~ 0,1; PM2.5: R^2 ~ 0,2
AethLabs (microAeth)	Оптичний	BC (Black Carbon)	~6500	1-300 с	R^2 ~ 0,79-0,94
Air Quality Egg (Version 1)	Оптичний, окиснення металу	PM, CO, NO_2, O_3	~200	1 хв	PM: R^2 ~ 0; CO: R^2 ~ 0; NO_2: R^2 ~ 0,4; O_3: R^2 ~ 0,85
Perkin Elmer (ELM)	Оптичний, окиснення металу	PM, NO, NO_2, O_3	~5200	1 хв	PM: R^2 ~ 0; NO: n/a; NO_2: R^2 ~ 0; O_3: R^2 ~ 0,85-0,96
2B Technologies (PO3M)	УФ-спектроскопія	O_3	~4500	10 с	R^2 ~ 1,0
Aeroqual (S-500)	Окиснення металу	O_3	~500	1 хв	R^2 ~ 0,85
Smart Citizen Kit	Окиснення металу	CO, NO_2	~200	1 хв	CO: R^2 ~ 0,50-0,85; NO_2: R^2 ~ 0
AQMesh (v. 3.0)	Електрохімічний	CO, NO, NO_2, SO_2, O_3	~10000	1-15 хв	CO: R^2 ~ 0,75-0,90; NO: R^2 ~ 0,75-0,90; NO_2: R^2 ~ 0; SO_2: R^2 ~ 0; O_3: R^2 ~ 0,25-0,55
AQMesh (v. 4.0)	Електрохімічний	CO, NO, NO_2, O_3	~10000	1-15 хв	CO: R^2 ~ 0,42-0,80; NO: R^2 ~ 0-0,44; NO_2: R^2 ~ 0-0,46; O_3: R^2 ~ 0,46-0,83
UNI- TEC (SENS- IT)	Окиснення металу	CO, NO_2, O_3	~2200	1 хв	CO: R^2 ~ 0,33-0,43; NO_2: R^2 ~ 0,60-0,65; O_3: R^2 ~ 0,72-0,83

1.6. Аналіз low-cost сенсорів забруднюючих речовин ($PM_{2,5}$, PM_{10}, NO_2, CO, O_3)

Розвиток технологій бездротового зв'язку призвів до появи нової парадигми для контролю забруднення атмосферного повітря [169-172]. Мета цієї парадигми – збір просторово-часових даних про забруднення атмосферного повітря з високою роздільною здатністю за допомогою розгалуженої мережі недорогих сенсорів для контролю концентрацій різних забруднювачів повітря в реальному часі. Після обробки та аналізу, ці дані можуть бути використані для: 1) доповнення до традиційного моніторингу забруднення повітря; 2) дослідження впливу забруднюючих речовин на стан здоров'я людей; 3) керування реагуванням на надзвичайні ситуації; виявлення джерел забруднення атмосферного повітря; контроль діяльності енергоємних підприємств; 4) підвищення рівня інформативності щодо забруднення повітря в громадах.

На даний момент не існує точного терміну визначення low-cost (недорогий) сенсор [172-174]. В даній роботі прийнято твердження, що сенсор може вважатися недорогим, якщо його вартість менша за вартість сукупних елементів (мікросхема, дисплей, засоби бездротового зв'язку, конектори, тощо), що утворюють функціонуючий вимірювальний модуль. При цьому, вартість такого сенсора має бути максимально низькою для того, щоб створення розгалуженої сенсорної мережі було фінансово можливим/вигідним. В загальному, недорогим сенсором можна вважати сенсор, вартість якого складає декілька десятків доларів. Зазвичай, чим вища вартість сенсору, тим більше він оснащений додатковими компонентами: мікропроцесором, дисплеєм, флеш-накопичувачем, акумулятором та ін.

В таблиці 1.12 наведені деякі моделі сенсорів $PM_{2.5}$, PM_{10}, NO_2, SO_2, CO, O_3, CO_2, ЛОР, що можуть бути використані в системах контролю забруднення атмосферного повітря.

На теперішній час існує значна кількість публікацій, що описують переваги та недоліки різних недорогих сенсорів як мілкодисперсного пилу,

так і газових речовин [169, 175-208]. У фокусі цих публікацій – існуючі проблеми, переваги та майбутні напрямки розвитку сенсорної парадигми контролю для застосування у різних галузях. В деяких публікаціях описані нові сенсорні технології для контролю газоподібних та/або твердих забруднювачів повітря [209-237].

Далі будуть розглянуті особливості функціонування сенсорів мілкодисперсного пилу (PM) та газоподібних речовин в повітрі (NO_2, CO, O_3).

Сенсори мілкодисперсного пилу (PM). Функціонування переважної частини недорогих сенсорів мілкодисперсного пилу (PM) базується на методі світлового розсіювання. Даний метод базується на тому, що світло від джерела, падаючи на дрібні частинки пилу, розсіюється, а потім потрапляє на фотодетектор. Для частинок з діаметром >0,3 мкм кількість розсіяного світла є пропорційною до їх концентрації. При цьому частинки з діаметром <0,3 мкм недостатньо розсіюють світло і не можуть бути виявлені цим методом [238-242]. Виявлені частинки можна розділити на певні діапазони розмірів за допомогою алгоритму [243-245], або шляхом використання спеціальних фільтрів [246-251].

Такі сенсори є дешевими у виробництві, мають високу енергоефективність та відносно невеликий час відгуку.

В таблиці 1.13 приведено перелік сенсорів мілкодисперсного пилу, що можуть бути використані в системах контролю забруднення атмосферного повітря, та деякі, заявлені виробником, технічні характеристики. Такі сенсори в загальному мають розміри декількох десятків міліметрів, вагу – декілька десятків грамів, функціонують від 5 В джерела живлення, та коштують декілька десятків доларів США. Типовий діапазон вимірювання таких сенсорів складає 0-1000 мкг/м^3 [171, 176, 180, 186, 197, 252-261].

Таблиця 1.12 – Деякі моделі пристроїв та сенсорів, що використовуються для контролю забруднення атмосферного повітря, та їх характеристики

№	Забруднювач	Модель	Метод вимірювання	Роздільна здатність	Похибка вимірювання	Вимірювальний діапазон
1	$PM_{2.5}$	Met One Instrument BAM-1020	Бета-загасання	1 мкг/м^3	±1 мкг/м^3	0-1000 мкг/м^3
2		Met One Instrument Aerocet 831	Розсіювання світла	0,1 мкг/м^3	±10%	0-1000 мкг/м^3
3		Alphasense OPC-N2	Розсіювання світла	—	—	—
4		Sharp Microelectronics DN7C3CA006	Світлове затемнення (нефелометрія)	—	—	25-500 мкг/м^3
5	PM_{10}	Teledyne Model 602 BetaPLUS	Бета-загасання	0,1 мкг/м^3	±1 мкг/м^3	0-1500 мкг/м^3
6		Met One Instrument Aerocet 831	Розсіювання світла	0,1 мкг/м^3	±10%	0-1000 мкг/м^3
7		Alphasense OPC-N2	Розсіювання світла	—	—	0,1-1500000 мкг/м^3
8		Sharp GP2Y1010AU	Світлове затемнення (нефелометрія)	—	—	0-600 мкг/м^3
9	NO_2	Teledyne Model T500U	Резонаторна ослаблена спектроскопія фазового зсуву	0.1 ppb	±0,5%	0-5ppb 0-1 ppm
10		Aeroqual Series 500	Електрохімічний	1 ppb	±0,02 ppm при 0-0,2 ppm чи ±10% при 0.2-1 ppm	0-1 ppm
11		Alphasense B4 Series	Електрохімічний	12 ppb	—	0-20 ppm
12		SGXSensorTech MiCS-2714	Твердотільний сенсор	—	—	0,05-10 ppm

13	SO_2	Teledyne Model 6400T/6400E	УФ-флуоресценція	0,1 ppb	±0,5%	0-50 ppb or 0-20 ppm
14		Aeroqual Series 500	Електрохімічний	10 ppb	±0,05 ppm при 0-0,5 ppm чи ±10% при 0,5-10 ppm	0-10 ppm
15		Alphasense B4 Series	Електрохімічний	5 ppb	—	0-100 ppm
16		Hanwei MQ-136	Твердотільний сенсор	—	—	0-200 ppm
17	CO	Teledyne Model T300U	Інфрачервоний	0,1 ppb	±0,05%	0-100 ppb чи 0-100 ppm
18		Aeroqual Series 500	Електрохімічний	10 ppb	±0,5 ppm при 0-5 ppm чи ±10% при 5-25 ppm	0-25 ppm
19		Alphasense B4 Series	Електрохімічний	4 ppb	—	0-1000 ppm
20		Hanwei MQ-7	Твердотільний сенсор	—	—	20-2000 ppm
21		e2V MiCS-5525	Твердотільний сенсор	—	—	0-1000 ppm
22		Hanwei MQ-9	Твердотільний сенсор	—	—	0-1000 ppm
23	O_3	Teledyne Model 265E	Хемілюмінесцентний	0,1 ppb	±0,5%	0-100 ppb чи 0-2 ppm
24		Aeroqual Series 500	Твердотільний сенсор	1 ppb	±5 ppb	0-150 ppb
25		Alphasense B4 Series	Електрохімічний	4 ppb	—	0-5 ppm
26		Hanwei MQ-131	Твердотільний сенсор	—	—	10-1000 ppm
27	CO_2	Winson MG811	Твердотільний сенсор	—	—	350-10000 ppm
28		GE/ 6004/6113	Інфрачервоний	—	± 40 ppm	0-2000 ppm
29		ELT H550	Інфрачервоний	—	± 5%	0-10000 ppm
30		FIGARO CDM4160	Твердотільний сенсор	—	±20%	400-45000 ppm
31		GSS C20/C100	Інфрачервоний	—	± 10 ppm	0-5000 ppm
32	ЛОР	Alphasense AH2	Фотоіонізаційний	—	± 3%	0–40 ppm
33		Alphasense A12	Фотоіонізаційний	—	± 5%	0-4000 ppm

Таблиця 1.13 – Деякі моделі сенсорів мілкодисперсного пилу (PM) та їх характеристики

№	Модель	Розміри, [мм]	Вага, [г]	Блок живлення	Макс. струм споживання [мА]	Вартість, $	Розмір частинок	Вимірювальний діапазон
1	Alphasense OPC-N2	75×64×60	105	5 В DC	175	~500	0,38-17 мкм в 16 діапазонах	0,1-1500000 мкг/м^3
2	Dylos DC 1100 Pro	178×114×76	544	110 В AC	—	~300	0,5-2,5 мкм; 0,5-10 мкм	0-106 ч/см^3
3	Dylos DC 1700	178×114×76	544	110 В AC	—	~400	0,5-2,5 мкм; 0,5-10 мкм	0-106 ч/см^3
4	Novafitness SDL301	204×100×36	580	5 В DC	—	~250	0,3-2,5 мкм; 0,3-10 мкм	0-1000 мкг/м^3
5	Novafitness SDL607	73×73×20	120	5 В DC	—	~120	0,3-2,5 мкм; 0,3-10 мкм	0-1000 мкг/м^3
6	Novafitness SDS011	71×70×23	—	5 В DC	80	~35	0,3-2,5 мкм; 0,3-10 мкм	0-1000 мкг/м^3
7	Novafitness SDS018	59×45×20	—	5 В DC	70	~40	0,3-2,5 мкм 0,3-10 мкм	0-1000 мкг/м^3
8	Novafitness SDS021	42×32×24	—	5 В DC	70	~35	0,3-2,5 мкм 0,3-10 мкм	0-1000 мкг/м^3
9	Novafitness SDS198	71×70×23	—	5 В DC	80	~80	1-100 мкм	0-20000 мкг/м^3

10	Plantower PMS 1003	65×42×23	—	5 В DC	120	~20	0,3-1 мкм; 1-2,5 мкм; 2,5-10 мкм	0-500 мкг/м^3
11	Plantower PMS 3003	65×42×23	—	5 В DC	120	~20	0,3-1 мкм; 1-2,5 мкм; 2,5-10 мкм	0-1000 мкг/м^3
12	Plantower PMS 5003	50×38×21	42	5 В DC	200	~25	0,3-1 мкм; 1-2,5 мкм; 2,5-10 мкм	0-1000 мкг/м^3
13	Plantower PMS 7003	48×37×12	27	5 В DC	200	~30	0,3-1 мкм; 1-2,5 мкм; 2,5-10 мкм	0-1000 мкг/м^3
14	Samyoung DSM501A	59×45×20	25	5 В DC	90	~15	>1 мкм	0-1400 мкг/м^3
15	Sharp DN7C3CA006	50×44×20	52	5 В DC	180	~20	0,5-2,5 мкм	25-500 мкг/м^3
16	Sharp GP2Y1010AU0F	46×30×18	15	5 В DC	20	~10	>0,5 мкм	0-600 мкг/м^3
17	Shinyei PPD42NS	59×45×22	24	5 В DC	90	~15	>1 мкм	0-28 ч/см^3
18	Shinyei PPD60PV	88×60×20	36	5 В DC	—	~250	>0,5 мкм	0-70 ч/см^3

Деякі моделі сенсорів не розрізняють розміри частинок (наприклад, Novafitness SDS198, Samyoung DSM501A, Sharp GP2Y1010AU0F, Shinyei PPD42NS, Shinyei PPD60PV), а лише вказують на їх розмір більше заданого (наприклад, >1 мкм). Сенсори виробництва Dylos та Novafitness розрізняють діапазони розмірів частинок (0,5-2,5 мкм та 0,5-10 мкм) шляхом застосування спеціальних методів обробки сигналів на виході фотодетектора, однак, як зазначається в [246], такий підхід характеризується значною похибкою. З таблиці 1.13 також видно, що Sharp DN7C3CA006 є єдиним сенсором, що розрізняє частинки розміром тільки 0,5-2,5 мкм. Він оснащений спеціальним віртуальним механізмом, що дозволяє потрапляти в зону вимірювання лише частинкам з діаметром до 2,5 мкм. Методи розрізнення розмірів частинок у сенсорах виробництва Plantower на даний момент не відкриваються виробником [262-264].

На рис. 1.29 наведена узагальнена функціональна схема сенсорів мілкодисперсного пилу, вимірювання яких базується на методі світлового розсіювання.

Хоча вищенаведені сенсори широко використовуються в системах контролю забруднення повітря для вирішення різних завдань [265-275], проте на теперішній час у науковій літературі представлені суперечливі дослідження, пов’язані із калібруванням та точністю даних, що ускладнює загальну оцінку стану забруднення повітря [244, 255, 256, 260, 276-324]. На практиці для оцінки даних вимірювань цих сенсорів використовуються різні підходи, включаючи як лабораторні методи, так і польові дослідження із використанням квазіеталонних пристроїв.

На рис. 1.30 наведено діапазони значень коефіцієнта детермінації (R^2) лінійної функції між значеннями вимірювань недорогих сенсорів мілкодисперсного пилу та еталонних пристроїв (BAM-пристрої), отриманими від різних досліджень як в лабораторних, так і польових умовах [225, 243, 246, 253, 268, 295, 325-336]. Як видно із цих досліджень, зазвичай використання лінійної функції є достатнім для калібрування сенсору на основі даних

еталонних вимірювань. Проте деякі джерела [325, 329, 334, 335, 337] наводять дані про те, що при концентраціях мілкодисперсного пилу вище 50-100 мкг/м^3 сенсор починає насичуватись, і тоді для калібрування такого сенсору необхідно застосовувати поліноміальну або експоненційну функцію. Таким чином, для конкретного сенсора може бути обрана відповідна функція калібрування, що встановлюється експериментальним шляхом.

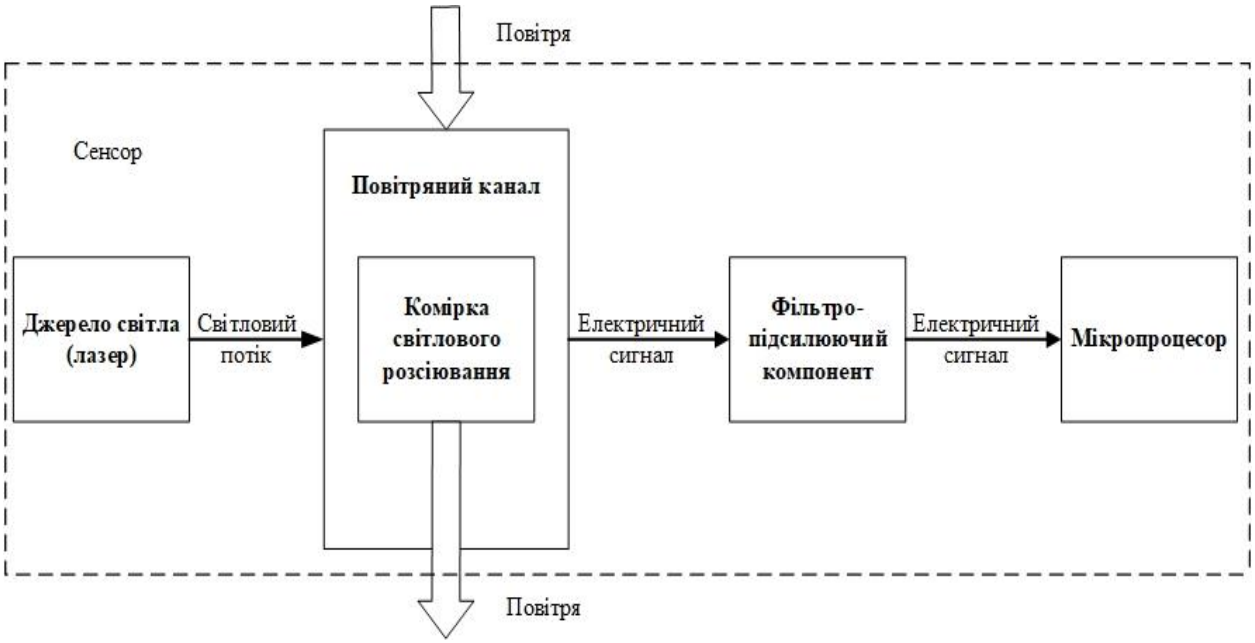
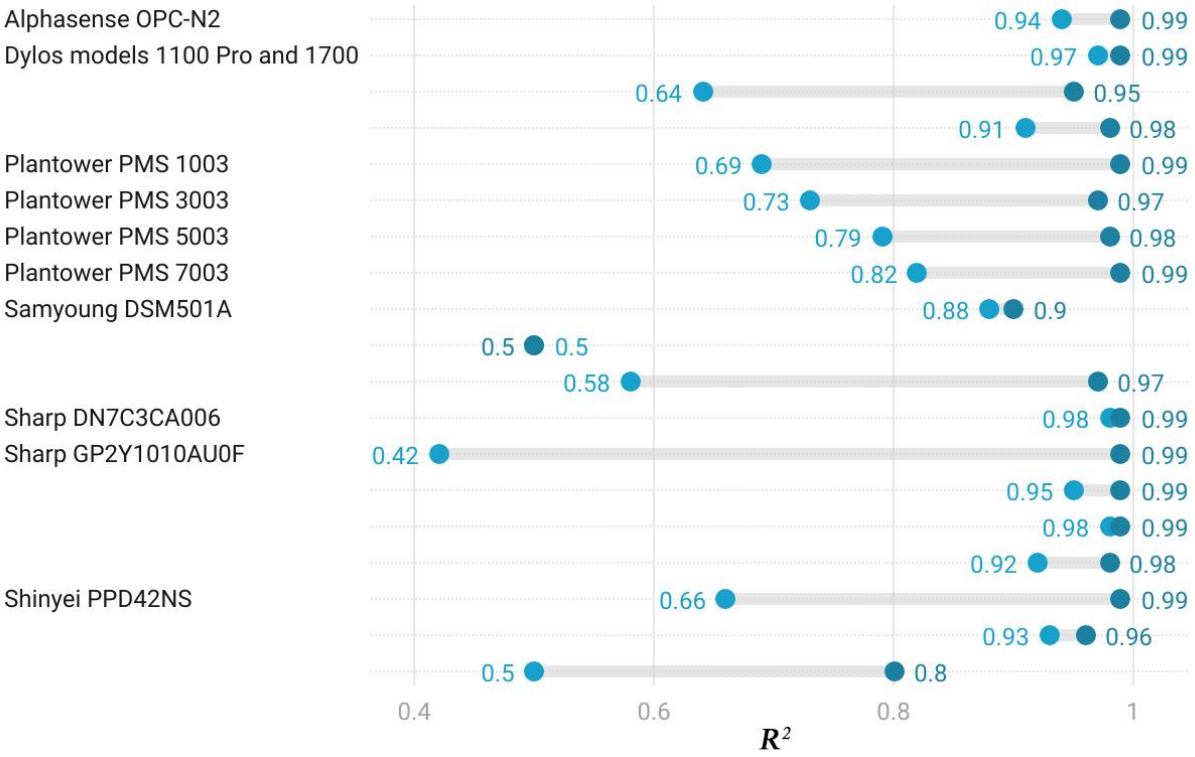
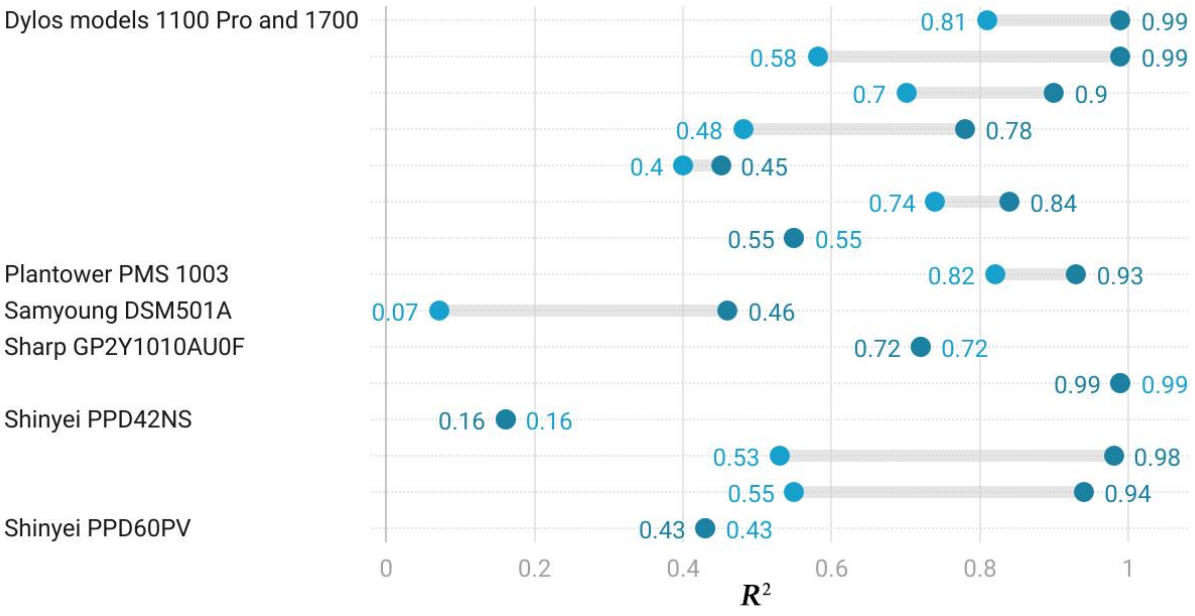


Рис. 1.29. Узагальнена функціональна схема сенсору мілкодисперсного пилу, що функціонує на базі методу світлового розсіювання

З рис. 1.30 видно, що сенсори зазвичай функціонували з більш високими значеннями R^2 у лабораторних умовах, ніж в польових. Це пов’язано зі зміною складу мілкодисперсного пилу (розмірів частинок), метеорологічних параметрів та інших факторів зовнішнього середовища. З цього можна зробити висновок, що використання лабораторних високоточних пристроїв не є доцільним в реальних (польових) умовах.



а)



б)

Рис. 1.30. Порівняння даних вимірювань недорогих сенсорів пилу (PM) з даними еталонних приладів в лабораторних (*а*) і польових (*б*) умовах на основі коефіцієнта детермінації R^2

Сенсори мілкодисперсного пилу можуть характеризуватися такими характеристиками як повторюваність і відтворюваність результатів вимірювання, що визначаються як рівень близькості між послідовними вимірюваннями однієї і тієї ж вимірюваної величини, проведеними відповідно до ідентичних та неідентичних умов. Повторюваність характеризується дисперсією між послідовними вимірюваннями, отриманими з одного сенсора, а відтворюваність – дисперсією між вимірюваннями, отриманими за допомогою різних сенсорів однієї моделі.

Повторюваність є характеристикою, яку дуже складно виміряти для сенсорів мілкодисперсного пилу. Це звичайно потребує спеціальних лабораторних умов. Деяким вченим вдалося провести такі дослідження. Згідно їх даних [329], повторюваність, яку вони характеризували коефіцієнтом варіації C_v, для 3-х різних сенсорів була в межах від 2 до 28%. При концентраціях ~50 мкг/м^3 C_v стабілізувався в межах 23-26%, і понижувався зі зменшенням концентрації мілкодисперсного пилу.

Щодо відворюваності, то різні вчені пропонують різні підходи та величини до її визначення. Так, у працях [246, 331] відтворюваність для сенсорів мілкодисперсного пилу визначалася через коефіцієнт варіації C_v, і становила 0,9-16%. В роботі [325], для оцінювання відтворюваності використовувалось нормалізоване СКВ, що становило 2,6-22,3% та 46,1-118,2% для різних тестових зразків пилу. З цього дослідження також встановлено, що відтворюваність зменшується з часом через поступове забруднення сенсору мілкодисперсним пилом.

Також однією із характеристик сенсорів мілкодисперсного пилу може бути стабільність, що відображає здатність сенсора зберігати свої характеристики протягом значного періоду часу. Це є важливим параметром, оскільки характеризує можливість реалізації довгострокової системи контролю. Однак дослідження цієї величини в науковій літературі майже не приведено. Так, в роботі [225] як характеристику стабільності використано скоригований коефіцієнт детермінації R^2, що знаходився в межах 0,45…0,56.

Межа чутливості також є метрологічною характеристикою сенсора, і визначає найнижчу концентрацію речовини, що здатний встановити сенсор. Для переважної більшості сенсорів це значення знаходиться в межах від 1 до 27 мкг/м^3. Важливо відмітити, що даний показник є меншими за встановлені норми ЄС як для $PM_{2.5}$, так і для PM_{10}, що дозволяє використовувати такі сенсори для створення розгалуженої сенсорної мережі.

Важливим питанням в дослідженні метрологічних характеристик сенсорів мілкодисперсного пилу залишається вплив складу пилу на дані вимірювання. Різні дослідження показують, що дані вимірювання під дією пилу різного складу можуть змінюватися у діапазоні від 2-х до 30-и разів для різних сенсорів [243, 246, 329, 331]. Відмінність у складі пилу впливає на розсіювання світла на цих частинах, і в результаті – на дані вимірювання. Так, наприклад, згідно досліджень [243, 246, 329, 331], пил з органічних матеріалів поглинає набагато більше світла, ніж пил з неорганічних. Тому такі сенсори відображатимуть порівняно більше значення результату вимірювання в середовищі пилу з органічних матеріалів в порівнянні з середовищем пилу з неорганічних матеріалів. Також ряд досліджень показують [329], що зі збільшенням розмірів частинок пилу в повітряно-пиловій суміші, результати вимірювання також збільшуватимуться. Це пов’язано з тим, що при однаковій масовій концентрації більші частинки розсіюють більше світла. Усі вищенаведені сенсори характеризуються такою залежністю, окрім Alphasense OPC-N2, де реалізований механізм розподілу вимірюваних частинок мілкодисперсного пилу в 16 розмірних діапазонах.

Також деякими вченими проводились дослідження із впливу метеорологічних параметрів (температури та відносної вологості) на дані вимірювання сенсорів мілкодисперсного пилу [338-358]. Так, в роботі [329] була використана спеціальна кліматична камера для дослідження впливу метеорологічних параметрів на дані вимірювання 3-х сенсорів мілкодисперсного пилу в залежності від різних значень температури та відносної вологості. Було встановлено, що вплив відносної вологості на дані

вимірювання набагато перевищує вплив температури. Так, зі зміною відносної вологості повітря в межах 20…90%, вихідні значення сенсору змінювалися в межах 1,5…8 разів, а зі зміною температури в межах 5…32 ^{o}C, вихідні значення сенсору змінювалися в межах 1,2…1,6 разів. Значний вплив відносної вологості на дані вимірювання можна пояснити наступним: 1) поглинання краплями води світла, що зменшує кількість розсіяного світла, що потрапляє на фотодетектор; 2) метеорологічні умови використання еталонного пристрою не відповідали його рекомендованим діапазонам. Також зазначається, що оскільки розсіяння світла не залежить від температури, то цей показник мало впливає на дані вимірювання.

Загалом в науковій літературі [243, 246, 329, 331, 338-358] відображені достатньо суперечливі дані стосовно впливу метеорологічних факторів на дані вимірювання: одній автори їх підтверджують, інші – ні. Вплив метеорологічних параметрів (температури, відносної вологості) на дані вимірювання потребує додаткового дослідження. Дослідження впливу абсолютного тиску на дані вимірювання у науковій літературі на даний час не представлені.

Проаналізувавши таким чином широкий спектр сенсорів мілкодисперсного пилу, доступних на сьогоднішній день на ринку, можна стверджувати, що їх застосування є можливим для реалізації розгалудженої сенсорної мережі контролю забруднення атмосферного повітря в околі об’єктів енергетики. Деякі автори [246-251] рекомендують додатково застосувати спеціальні фільтри, або використовувати сенсори зі спеціальним відсікаючим механізмом, що дозволяє спрямовувати до вимірювальної камери сенсору частинки пилу із заданими розмірами.

При виборі сенсорів важливо звернути увагу на їх комплектацію. Так, деякі сенсори (наприклад, Sharp GP2Y1010AU0F чи Shinyei PPD42NS) потребують інтеграції в систему збору та зберігання даних, інші (наприклад, Novafitness SDL301 чи сенсори Dylos) – не потребують. Цей вибір залежить від технічної складності системи контролю, що реалізується.

Відсутність єдиного стандартизованого методу оцінювання недорогих сенсорів мілкодисперсного пилу ускладнює взаємне порівняння їх характеристик, що різняться у різних дослідженнях. Таким чином, актуальними залишаються вітчизняні дослідження таких сенсорів для створення національних підходів до оцінювання якості отриманих даних. Тим не менше, зведені технічні параметри розглянутих сенсорів (Таблиця 1.13) є близькими: коефіцієнт кореляції з еталонними приладами в лабораторних умовах складає в більшості випадків R^2>0,5, в польових – R^2>0,4; повторюваність та відтворюваність C_v – в межах 1…28%; межа чутливості знаходиться в межах 1…27 мкг/м^3, що відповідає нижньому діапазону концентрацій мілкодисперсного пилу в країнах ЄС.

Одними із перспективних сенсорів для використання в системі контролю забруднення повітря об'єктів енергетики є сенсори виробництва Plantower (рис. 1.31) та Novafitness, модель SDS011 (рис. 1.32). Вони наразі доступні на вітчизняному ринку роздрібно, мають невеликі габарити та ціну навіть по відношенню до розглянутих у таблиці 1.13 інших сенсорів. Вони показують високий коефіцієнт детермінації R^2 у порівнянні з еталонними пристроями в лабораторних умовах (Met One Instrument BAM-1020), проте їх характеристики не дуже широко досліджені у польових умовах. Згідно даних технічної документації, для сенсорів Plantower робочий діапазон температур знаходиться в межах -10…+60 ºС при відносній вологості 0…99%; а для сенсорів Novafitness (SDS011) – -20…+60 ºС при відносній вологості 0…90%;

Значною перевагою сенсорів виробництва Plantower є конструкція їх корпусу, яка запобігає накопиченню пилу на передній стороні друкованої плати, де встановлені лазер та фотодіод. На рис. 1.33 приведені фото внутрішнього стану корпусів сенсорів мілкодисперсного пилу після 50 днів використання.

Таким чином потрібно чітко розуміти кінцеву мету контролю забруднення повітря мілкодисперсним пилом та мати на увазі обмеження, його застосовуються до недорогих сенсорів. Так як контроль забруднення

повітря в околі об’єктів енергетики передбачає довгострокову реалізацію, рекомендується проводити часте калібрування таких сенсорів.



а) *б*)

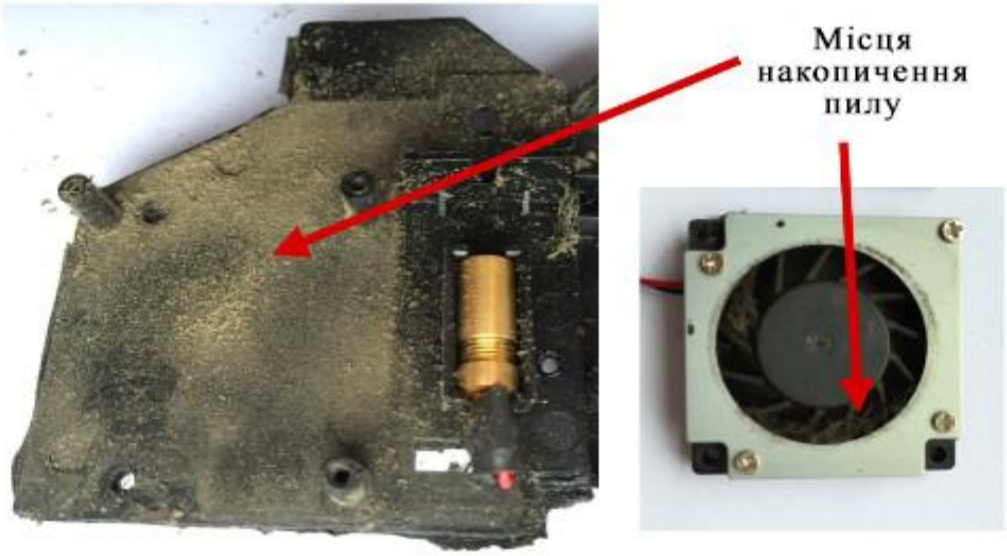
Рис. 1.31. Сенсори виробництва Plantower: *а*) PMS5003; *б*) PMS7003



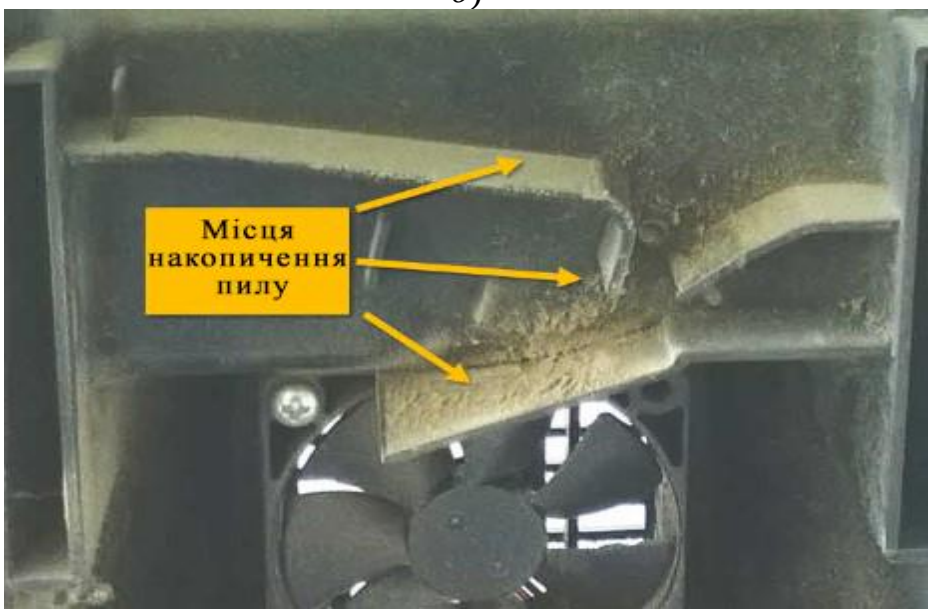
Рис. 1.32. Сенсор виробництва Novafitness (модель SDS011)



а)



б)



в)

Рис. 1.33. Накопичення пилу в сенсорах PM після 50 днів функціонування:

а) PMS 5003; *б*) SDS011; *в*) DC 1700

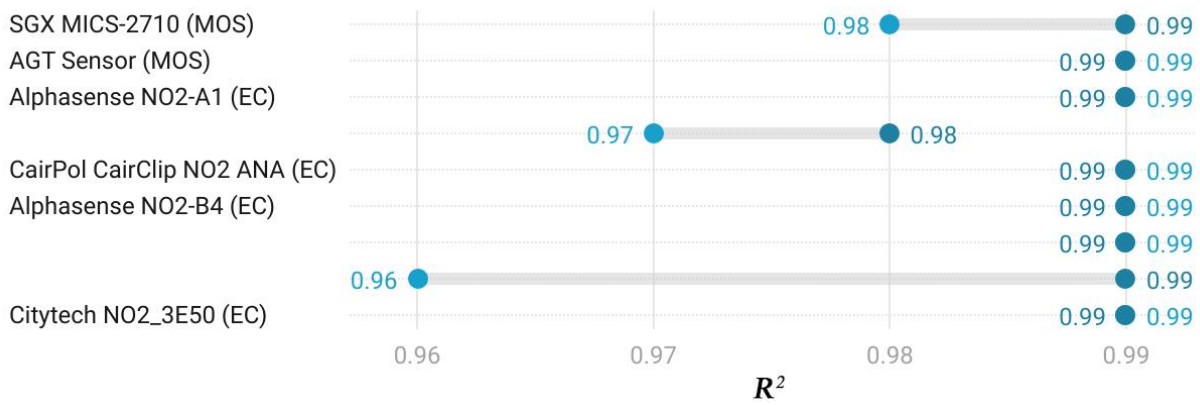
Сенсори газів. На даний момент на ринку доступні 2 типи сенсорів газових речовин, що можуть бути використані при реалізації розгалудженої бездротової сенсорної мережі: 1) металоксидні напівпровідникові сенсори (МОС); 2) електрохімічні сенсори (ЕС).

МОС-сенсори базуються на використанні оксидів металів, що змінюють свої фізичні властивості (зазвичай, електричний опір) під впливом досліджуваного газу. Зазвичай ця залежність фізичних властивостей під впливом газу має нелінійний характер і на неї впливають умови навколишнього середовища. Однак ці сенсори є недорогими, компактними, мають низький час відгуку, та низьку межу чутливості [213, 229, 359-384].

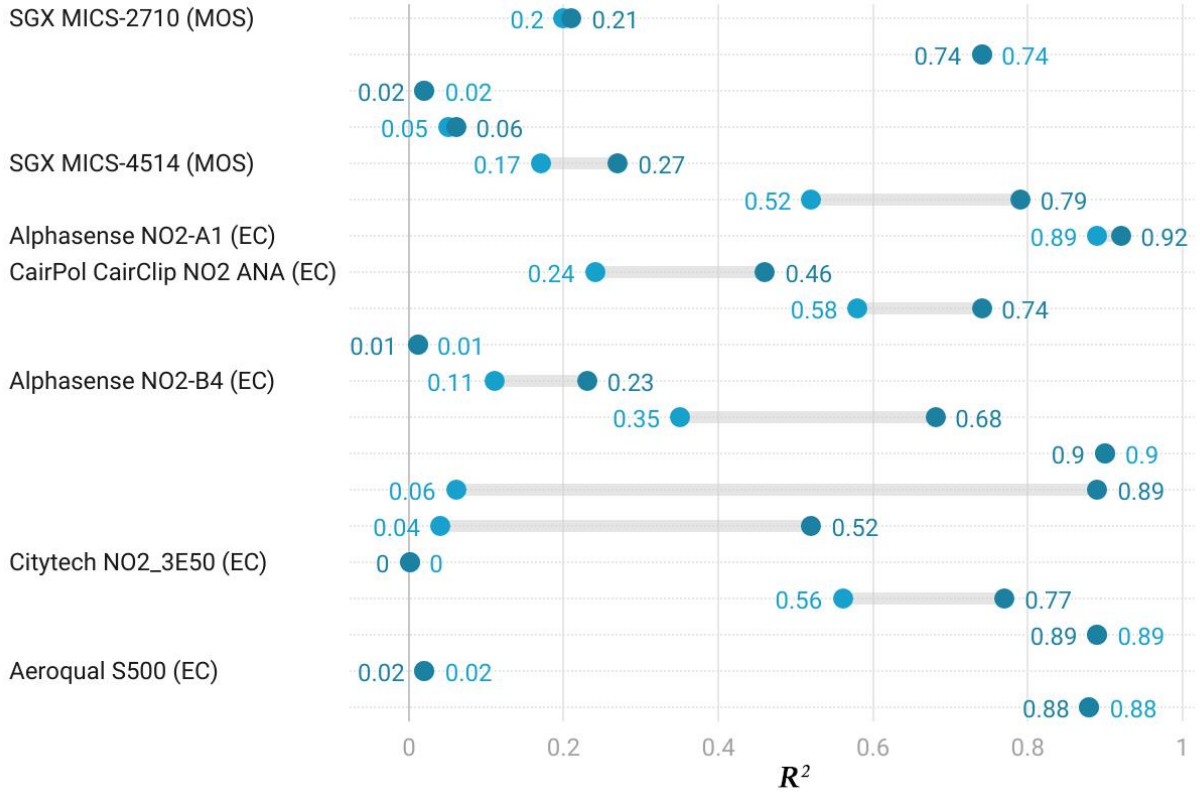
ЕС-сенсори базуються на так званому амперометричному ефекті, що характеризується появою струму в колі сенсору під впливом досліджуваного газу на електроліт всередині сенсору. Такі сенсори зазвичай мають 3 електроди – робочий, лічильний та опорний. Цільовий газ піддається електролізу на робочому електроді, що генерує електричний струм, який врівноважується реакцією на лічильному електроді. Параметри цього електричного струму і відповідають виміряному значенню концентрації газу. Такі сенсори мають низький поріг чутливості, низьку енергоємність (~100 мкВт, та підвищену стійкість до змін умов зовнішнього середовища, проте вони мають більш високу вартість (~100 $) та більші розміри, в порівнянні із МОС-сенсорами [195, 213, 227, 237, 385-409].

МОС та ЕС сенсори широко виробляються різними компаніями та мають широкий асортимент моделей. Вони вже використовуються для різних задач [229, 236, 287, 388, 410-428], однак їх характеристики мало досліджені. Нижче буде наведена деяка інформація відносно характеристик сенсорів NO_2, CO та O_3, що вдалося знайти у різних наукових джерелах.

Сенсори NO_2. На рис. 1.34 наведені значення коефіцієнта детермінації R^2 при порівнянні різних сенсорів NO_2 з еталонними пристроями в лабораторних та польових умовах. Дані на графіку отримані з наукових публікацій [179, 225, 229, 267, 287, 388, 410, 429-432].



а)



б)

Рис.1.34. Порівняння даних вимірювань недорогих сенсорів NO_2 з даними еталонних приладів в лабораторних (*а*) і польових (*б*) умовах на основі коефіцієнта детермінації R^2

З рис. 1.34 можна стверджувати, що недорогі сенсори NO_2 показують високі значення коефіцієнтів детермінації R^2 в лабораторних умовах, проте мають достатньо низький цей показник при випробуваннях в польових умовах. Варто звернути увагу на те, що у різних польових дослідженнях одних і тих

сенсорів коефіцієнт детермінації R^2 значно відрізняється (наприклад, для сенсорів SGX MICS-2710, Alphasense NO2-B4, Aeroqual S500). В більшій мірі це пов'язано з нерівномірністю впливів зовнішнього середовища у цих дослідженнях.

З огляду на схожість розробленої системи контролю, цікавим видається робота [179], де наведені дані стосовно дослідження характеристик ЕС-сенсорів NO_2, що входять до складу AQMesh [225, 323, 433-435]. Згідно цієї роботи коефіцієнт детермінації R^2 сенсорів NO_2 та еталонних пристроїв був у межах 0,04…0,52. При цьому вартість одного вимірювального модулю AQMesh може сягати 10000$.

Приведені на рис. 1.34 дані чітко вказують на те, що навіть ідентичні сенсори характеризуються значним розкидом метрологічних характеристик. Ці дані мають звернути увагу виробників сенсорів та вимірювальних модулів на їх базі на ретельний контроль якості їхньої продукції.

В роботі [287] наводять інформацію, що такий показник як коефіцієнт детермінації R^2 з еталонними пристроями для сенсорів МОС та ЕС можна покращити до рівня R^2=0,52…0,79 та R^2=0,35…0,77 для МОС та ЕС сенсорів відповідно, використовуючи модель лінійної регресії з додатковими предикаторами (наприклад, відносна вологість, температура, наявність додаткових забруднюючих речовин), однак з часом застосування таких моделей зводило коефіцієнт детермінації R^2 до значення 0,2. Проте даний факт пояснюється тривалим терміном експлуатації сенсора, що з часом втрачає свої характеристики.

З вище наведеної інформації можна зробити висновок про необхідність калібрування та градуювання сенсорів на місці розгортання системи контролю, що дозволить врахувати поточні умови навколишнього середовища.

Така характеристика як повторюваність сенсорів МОС та ЕС NO_2 була досліджена лише в декількох публікаціях [179, 429, 432]. Згідно них, СКВ даних вимірювань сенсорів NO_2 МОС типу складало від 1,2 ppb до 7,5 ppb, а

для сенсорів ЕС типу – від 0,8 ppb до 4,6-23,3 ppb. Однак ці дослідження не наводять діапазони концентрацій газів, що вимірювались.

Стабільність сенсорів NO_2 досліджувалася в роботі [287]. Повідомляється, що дані вимірювань для різних типів сенсорів змінювались в діапазоні -0,497…-0,065 ppb/доба. Це призведе до значних змін в результатах вимірювань з часом (через 1 рік – на 24-181 ppb). Очевидно, що цей ефект необхідно враховувати при впровадженні системи контролю забруднення повітря, особливо в околі об'єктів енергетики.

Межа чутливості для різних типів сенсорів NO_2 відрізняється: для МОС типу в межах від 6,3 ppb до 26,6 ppb; для ЕС типу в межах від 0,5 ppb до 29,4 ppb [436]. Такі сенсори не можна використовувати в місцях з низькою концентрацією NO_2 (10-20 ppb). Також необхідно врахувати, що оскільки значення меж чутливості для сенсорів МОС та ЕС типу отримані різними методами, то фактичні значення меж чутливості для цих сенсорів можуть бути ще вищі.

Час відгуку сенсорів досліджувався в роботах [429, 431]. Для сенсорів МОС типу він складає від 6 до 34 хв, а для сенсорів ЕС типу – від 1,3 до 19 хв. Аномальною характеристикою відзначився тільки сенсор CairPol CairClip NO2 ANA (EC), для якого час відгуку склав 38,42 хв. Проте прямо співвідносити ці результати не варто через обмеженість інформації про проведені дослідження.

На теперішній час є значне число публікацій стосовно досліджень впливу метеорологічних параметрів (температури, відносної вологості) на дані сенсорів NO_2 ЕС типу в польових умовах [409, 410, 431, 437-445]. Для сенсорів NO_2 МОС такі дослідження не проводилися. Загалом результати цих досліджень суперечать один одному, так як одні дослідники заявляють про знайдену кореляцію між метеорологічними параметрами та даними сенсорів NO_2, інші відкидають такий взаємозв'язок.

Щодо перехресної чутливості, то тут є публікації [287, 436, 441, 446, 447], що повідомляють про вплив на результати вимірювань сенсорів NO_2 як МОС,

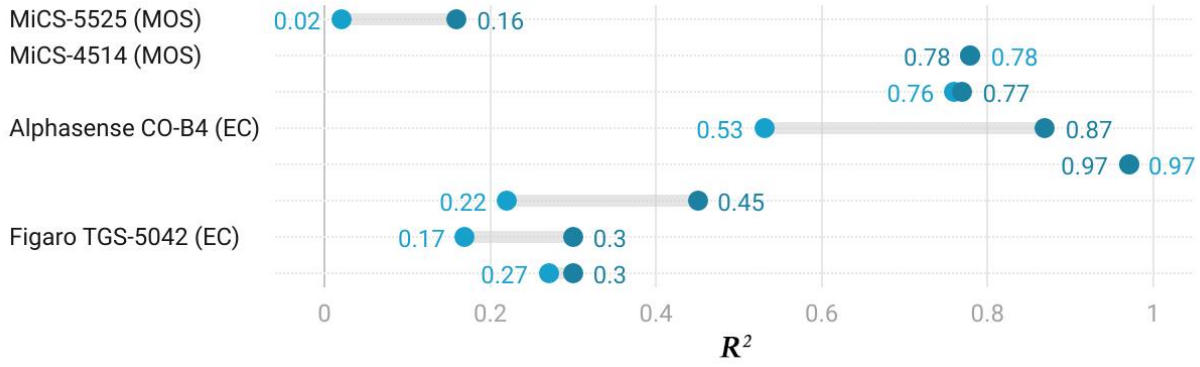
так і ЕС типу, озону O_3 (якщо тільки сенсори NO_2 не обладнані фільтрами O_3). Такий вплив характеризується підвищенням значень NO_2 на 1-1,5 ppb при наявності O_3 з концентрацією 1 ppb. Деякі публікації [448-450] повідомляють про вплив SO_2 на результати вимірювань NO_2, при цьому такий вплив характеризується значними концентраціями SO_2, що можуть бути присутні у викидах об'єків енергетики. Цю особливість також потрібно врахувати при створенні розгалужених мереж контролю забруднення атмосферного повітря в околі об'єктів енергетики, оскільки вугілля можуть бути значним джерелом забруднення повітря SO_2. Також в роботі [431] зазначено, що дані вимірювань сенсорів NO_2 ЕС типу можуть змінюватися в межах від -3,3 ppb до 1,3 ppb через вплив таких газоподібних речовин як CO, CO_2, SO_2, NO, NH_3.

Сенсори CO. На даний момент в науковій літературі описані дослідження двох метал-оксидних сенсорів CO – MICS-5525 та MICS-4514 [225, 229, 287-289, 364, 415, 451-464]. Так, в дослідженні [229] повідомляють про низькі результати співвідношення еталонних вимірювань та даних, отриманих за допомогою сенсора MICS-5525. Також вчені наводять інформацію, що із підвищенням температури в досліджуваній камері від 19 °C до 40 °C покази сенсора зменшувалися лінійно. Відтворюваність сенсора MICS-5525 визначалася за допомогою коефіцієнта детермінації R^2, і була в межах 0,38…0,60. Сенсор MICS-4514 був досліджений вченими [289] у польових умовах. Він також характеризується низьким значенням відтворюваності R^2 – <0,1 (після 4,5 місяців експерименту). Тому фактор старіння є важливим для недорогих металоксидних сенсорів газів (зокрема і CO), і має враховуватися при розбудові розгалуженої сенсорної мережі. На рис. 1.35 наведено порівняння даних вимірювань недорогих сенсорів CO з еталонними приладами.

В загальному в науковій літературі наведено результати експериментальних досліджень 3-х ЕС сенсорів CO – Alphasense CO-B4, Alphasense CO-AF та Figaro TGS-5042 [179, 192, 288, 388, 395, 410, 411, 430, 437, 465-482].



а)



б)

Рис. 1.35. Порівняння даних вимірювань недорогих сенсорів CO з даними еталонних приладів в лабораторних (*а*) і польових (*б*) умовах на основі коефіцієнта детермінації R^2

В лабораторних умовах ці сенсори показують дуже високий показник детермінації з еталонним пристроями (R^2>0,99) [179, 388, 410]. Проте в польових умовах цей показник значно погіршується (рис. 1.35). Три польові дослідження [179, 410, 430] показали низький, помірний та дуже гарний результат коефіцієнта детермінації сенсора Alphasense CO-B4 з еталонними пристроями (R^2=0,22…0,45, R^2=0,53…0,87 та R^2=0,97 відповідно). Результати польових досліджень [179, 288] коефіцієнта детермінації для сенсора Figaro TGS-5042 показали низький результат (R^2=0,17…0,3 та R^2=0,27…0,3 відповідно). Відмінності у отриманих результатах можуть бути пов’язані з різними зовнішніми умовами проведення експериментів. При цьому для ЕС сенсорів CO також має місце зміна калібрувальної кривої з часом [179, 288].

Час відгуку для ЕС сенсорів складає 4…21 ppb, що знаходиться значно нижче типових діапазонів концентрацій CO в країнах ЄС, що робить придатним використання цих сенсорів для контролю забруднення атмосферного повітря. Згідно дослідження [388], сенсори Alphasense CO-AF мають високий ступінь відтворюваності (R^2=0,86…0,95).

У роботі [410] приводяться дані стосовно відсутності впливу температури та відносної вологості на дані вимірювання. У роботі [192] наводяться дані стосовно залежності даних вимірювань та відносної вологості повітря (0,532 ppb/^{o}C). Однак цей показник є достатньо малим і не відіграє суттєвої ролі при контролю забруднення повітря. В дослідженні [430] повідомляють про незначний вплив температури на дані вимірювання сенсора CO при лабораторних дослідженнях. Таким чином, загалом метеорологічні фактори можуть спричиняти незначний вплив на дані вимірювання ЕС сенсорів CO.

Щодо перехресної чутливості, експериментальні дослідження проводилося в роботі [192]. Вказано, що вплив газоподібних речовин O_3, SO_2, NO, NO_2 та CO_2 змінює покази результатів вимірювання для сенсора Alphasense CO-B4 в діапазоні -1,7…1,8 ppb. Таким чином, ЕС сенсори CO володіють слабкою залежністю від впливу сторонніх газоподібних речовин.

У зв’язку з відсутністю сенсорів Alphasense CO-B4, Alphasense CO-AF та Figaro TGS-5042 у вільному доступі на ринку України, для розроблення системи контролю забруднення атмосферного повітря в околі об’єктів енергетики був обраний сенсор MICS-6814 (рис. 1.36). Його перевагами є можливість одночасного вимірювання декількох забруднюючих речовин у повітрі – CO (1-1000 ppm), NO_2 (0,05-10 ppm), NH_3 (1-500 ppm); порівняно невисока вартість (~1000 грн); компактність (5×7×1,55 мм). На рис. 1.37 наведені залежність вихідного сигналу сенсору від концентрації забруднюючих речовин.

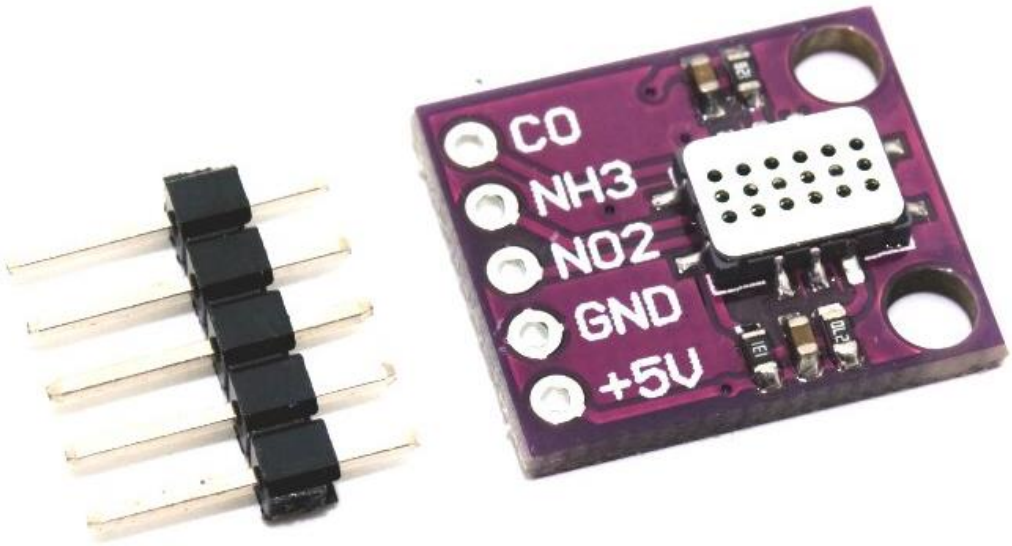
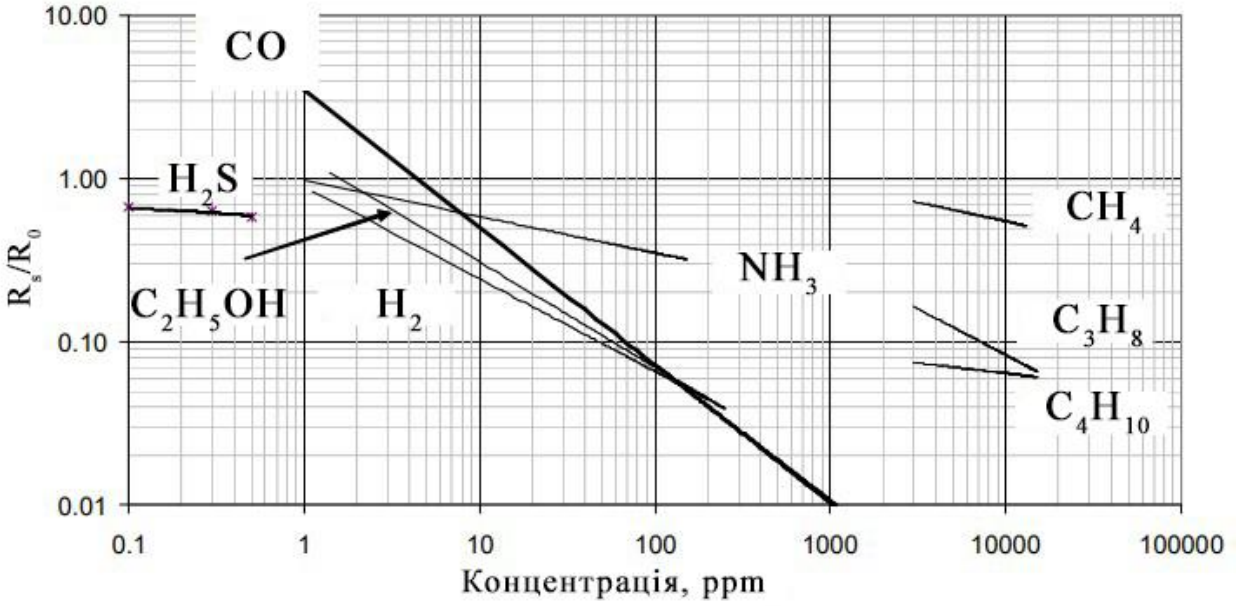


Рис. 1.36. Зовнішній вигляд сенсору MICS-6814

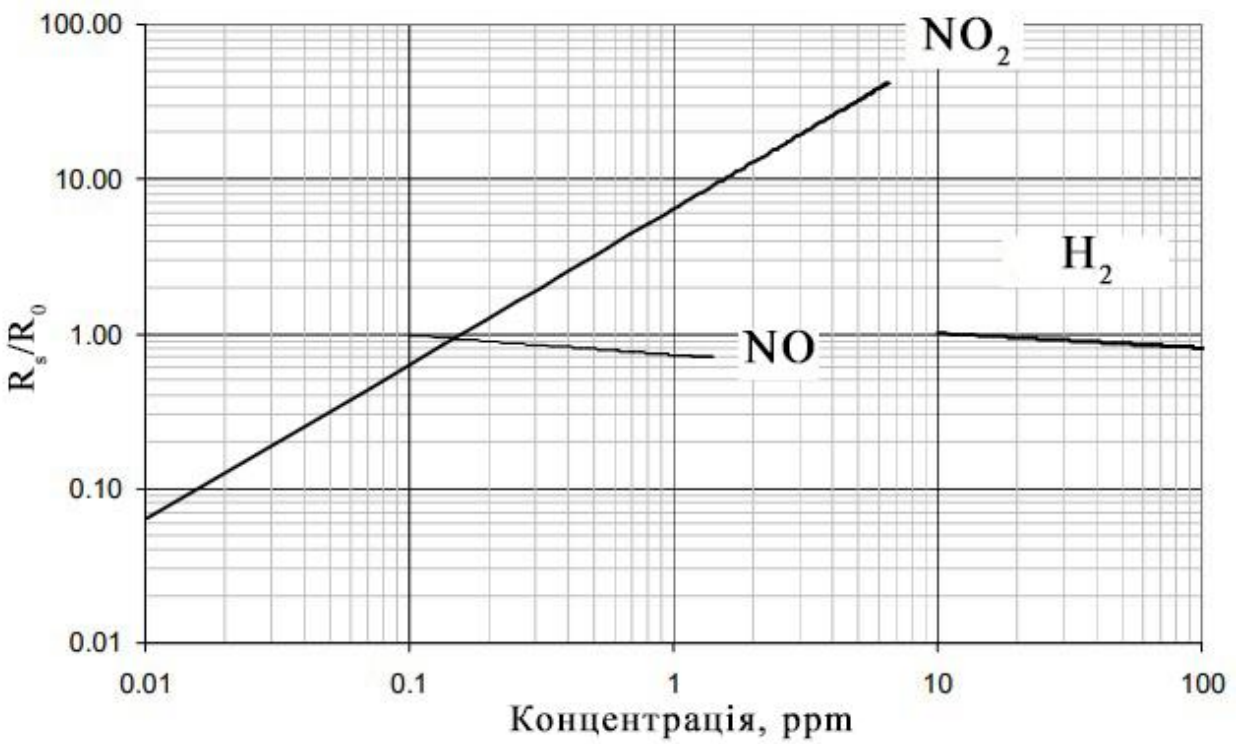
Сенсори O_3. Загалом комплексні лабораторні та польові дослідження сенсорів O_3 проводилися із декількома моделями, що разом із відповідними коефіцієнтами детермінації наведені на рис. 1.38. Отримані результати коефіцієнтів детермінації для сенсорів O_3 наведені в роботах [179, 225, 229, 287, 430-432, 483-486]. Інші дослідження відносно недорогих сенсорів O_3 наведені в роботах [209, 267, 302, 308, 363, 407, 442, 487-496].

З рис. 1.38 видно, що сенсори O_3 як МОС, так і ЕС типу показують високі значення коефіцієнту детермінації R^2 (0,88…0,99), однак в польових умовах ці показники значно знижуються (0,01…0,94). Очевидно, як у випадку сенсорів NO_2 та CO, це зниження характеристик пов’язано із впливом зовнішніх умов (зокрема, метеорологічних факторів), тривалим часом роботи сенсорів та перехресним впливом інших газоподібних речовин.

Так, в роботі [416] були проведені лабораторні дослідження МОС сенсорів O_3. Загалом отримані результати характеризуються високим показником детермінації R^2 (0,88…0,95), однак при впливі високої температури (>50°C) та відносної вологості (>85%), реакція сенсора SGX MICS-2611 була нестабільною.

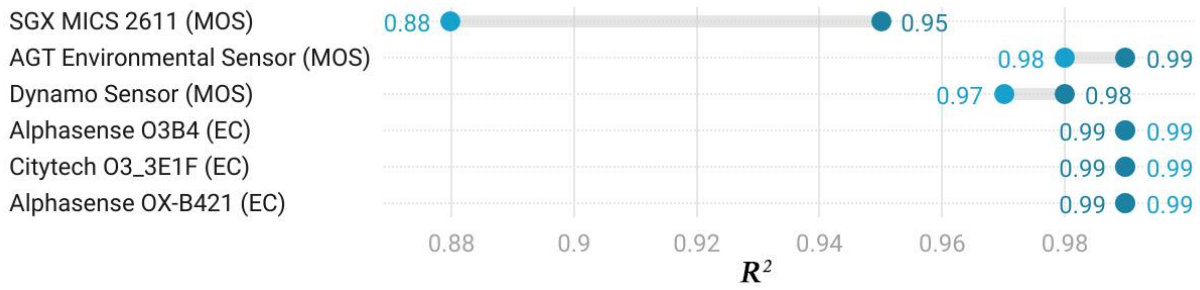


а)

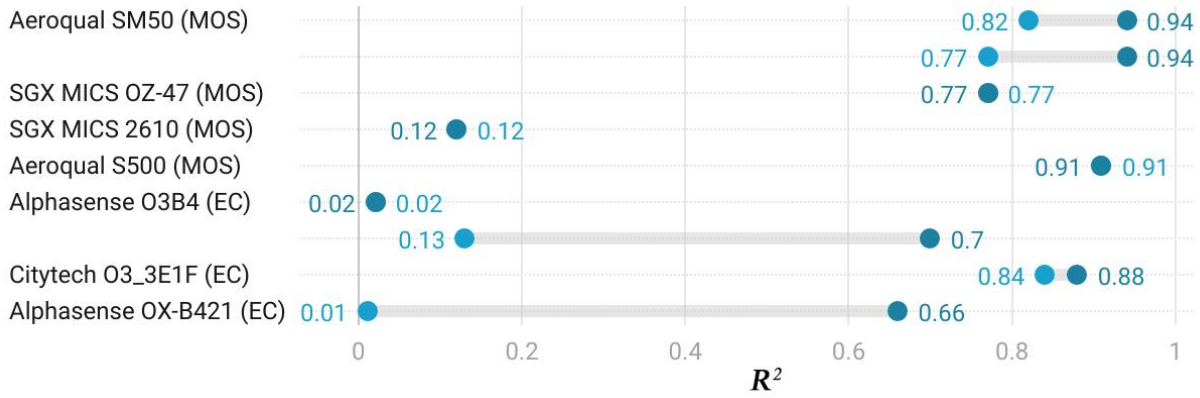


б)

Рис. 1.37. Залежність вихідного сигналу сенсора MICS-6814 від концентрації забруднюючих речовин: *а*) монооксид вуглецю, сірководень, етанол, водень, аміак, метан, пропан, ізобутан; *б*) діоксид нітрогену, монооксид нітрогену, водень (згідно даних виробника)



а)



б)

Рис. 1.38. Порівняння даних вимірювань недорогих сенсорів O_3 з даними еталонних приладів в лабораторних (*а*) і польових (*б*) умовах на основі коефіцієнта детермінації R^2

В роботах [225, 430, 436, 486] наведені результати польових досліджень МОС сенсорів O_3. Загалом, ці дослідження характеризується помірними значеннями коефіцієнта детермінації R^2 (0,77…0,94), окрім дослідження [430], де зафіксовано аномально низьке значення коефіцієнта детермінації R^2=0,12. Дослідники це пов'язують з несправністю досліджуваного сенсора SGX MICS 2610.

Загалом, як лабораторні, так і польові дослідження МОС сенсорів O_3 характеризуються високими показними коефіцієнта детермінації R^2.

Щодо ЕС сенсорів O_3, то вони демонструють дуже високі значення коефіцієнта детермінації R^2. В лабораторних дослідженнях, наведених в роботах [179, 431], коефіцієнти детермінації R^2 для сенсорів Alphasense O3B4,

Citytech O3_3E1F та AlphasenseOX-B421 складають 0,99. Однак в польових умовах ці сенсори характерихуються значним зменшенням та розкидом характерик. Так, коефіцієнти детермінації R^2 для сенсора Alphasense O3B4 складають (0,02 та 0,13…0,7), Citytech O3_3E1F – 0,84…0,88, AlphasenseOX-B421 – 0,01…0,66. Значні розкиди результатів пов'язані із тривалим часом експериментів, що проходив для сенсорів Alphasense O3B4 та AlphasenseOX-B421, і, як наслідок, старіння сенсорів.

Параметр повторюваності як для МОС, так і для ЕС сенсорів, був досліджений в лабораторних умовах та наведений у публікаціях [179, 431, 436, 483, 486]. Так, в роботі [486] була досліджена повторюваність МОС сенсорів O_3, виражена через СКВ, що становила σ = 0,2…3,3 ppb при концентрації O_3 100 ppb. В роботі [483] наводяться дані про збільшене значення СКВ для МОС сенсорів O_3 (σ = 2,6…46,2 ppb). Такий результат пояснюється різними значеннями температури, вологості, O_3 та моделей сенсорів. Для ЕС сенсорів O_3 значення СКВ знаходиться в межах 0,4…1,9 ppb O_3 [179, 431]. Таким чином, МОС та ЕС сенсори O_3 мають схожі значення повторюваності.

Відтворюваність МОС сенсорів O_3 була досліджена декількома групами вчених [229, 485]. Так в роботі [229] наводяться дані, що характеризують широкий діапазон відтворюваності МОС сенсорів O_3 (R^2 = 0,21…0,98), тоді як в роботі [485] ці сенсори характеризують високим рівнем відтворюваності (R^2 = 0,85…0,98).

Стабільність МОС та ЕС сенсорів O_3 досліджувалася вченими в роботах [431, 486]. Згідно цих даних стабільність МОС сенсорів O_3 знаходиться в межах -0,009…0,081 ppb/доба, а ЕС сенсорів O_3 – 0,016…0,142 ppb/доба. За період в 1 рік ця зміна показань буде становити від -3,29 до 29,57 ppb та від 5,84 до 51,83 ppb для сенсорів МОС та ЕС відповідно. Таким чином, сенсори МОС O_3 характеризуються кращою стабільністю результатів вимірювань.

Межа чутливості сенсорів O_3 досліджувалася в роботах [436, 486]. Використовуючи однакові підходи до обробки результатів експериментальних досліджень, було встановлено, що межа чутливості для МОС сенсорів O_3

знаходиться в межах 0,5…2,3 ppb, а для сенсорів ЕС – 1,8…6,8 ppb. Ці значення є набагато меншими, ніж типові значення концентрації O_3 в навколишньому середовищі, що дозволяє їх використовувати в системах контролю забруднення атмосферного повітря.

В роботах [431, 486] наведені деякі дослідження стосовно часу відгуку МОС та ЕС сенсорів O_3. Так, час відгуку для МОС сенсорів становив від 4,4 до 89 хв, а для ЕС сенсорів – від 1,4 до 1,8 хв. Однак в роботі [436] наводиться скоригований час відгуку для МОС сенсорів O_3, що знаходився в межах від 1 до 8 хв.

Встановлено, що такі метеорологічні фактори, як температура та відносна вологість, значно впливають на результати вимірювань сенсорів O_3 [287, 431, 432, 484, 486]. Так, при лабораторних дослідженнях [486] зміна результатів вимірювань для 4-х МОС сенсорів O_3 становила від 0,7 до 3,86 ppb при зміні температури середовища на 1°С в межах від 12 до 32 °С. Також показано, що при збільшенні відносної вологості на 1% вимірювані значення O_3 змінювались в межах -0,65…0,84 ppb. Однак польові дослідження показали незначні відхилення результатів вимірювань при зміні факторів навколишнього середовища. Відмінності між лабораторними та польовими дослідженнями вчені пояснюють неможливістю стабілізувати параметри навколишнього середовища.

Стосовно перехресної чутливості сенсорів O_3, то її досліджували в декількох роботах [179, 431, 432, 484, 486]. Ці дослідження стосувалися впливу CO, CO_2, NO, NO_2, SO_2 та NH_3 на дані вимірювань МОС та ЕС сенсорів O_3. Згідно цих досліджень результати вимірювань O_3 збільшуються на 0,76…1 ppb при концентрації 1 ppb NO_2. Щодо інших речовин, то вони мають значно менший вплив на дані сенсорів O_3, проте який достатньо не досліджений. Так, згідно цих досліджень, в міських умовах сенсори O_3 не зазнають перехресного впливу інших газоподібних речовин.

При розроблені мережі контролю забруднення атмосферного повітря можливим є використання ЕС сенсору O_3 – ZE25-O3 (рис. 1.39). Серед його

переваг: висока чутливість і роздільна здатність, низьке енергоспоживання, тривалий термін роботи, хороша стабільність, температурна компенсація.



Рис. 1.39. ЕС сенсор O_3 ZE25-O3 (виробництва Winson)

На основі проведеного аналізу, можна виділити деякі переваги MOS чи ЕС сенсорів щодо їх характеристик. Так, в таблиці 1.14 наведені рекомендації щодо вибору МОС та ЕС сенсорів різних газоподібних речовин (NO_2, CO, O_3) відповідно до певних характеристик сенсорів.

1.7. Вплив хімічного забруднення повітря на здоров’я людини

Забруднення атмосферного повітря на теперішній час є однією з головних причин захворюваності та смертності у всьому світі, і зокрема в Україні [497-503]. Його вплив на самопочуття та здоров’я варіюється. В певних місцевостях та регіонах світу вплив забруднення повітря від функціонування енергетичних об’єктів може проявлятися по різному: від підвищення ризику передчасної смерті до збільшення рівня госпіталізації та переміщення до відділення інтенсивної терапії [504-509].

Таблиця 1.14 – Рекомендований вибір МОС чи ЕС сенсора різних газоподібних речовин (NO_2, CO, O_3) відповідно до різних характеристик

Характеристика	Сенсори газоподібних речовин		
	NO_2	CO	O_3
R^2 (з еталонними пристроєм)	=	=	МОС
Межа чутливості	—	—	=
Час відгуку	—	—	ЕС
Повторюваність	=	—	=
Відтворюваність	—	—	—
Стабільність	—	—	=
Вплив температури	—	—	=
Вплив відносної вологості	—	—	=
Перехресна чутливість	—	—	МОС
Енергоефективність	ЕС	ЕС	ЕС
Вартість	МОС	МОС	МОС

* — - відсутні перевірені дані; = - характеристика однакова як для МОС, так і ЕС сенсорів

За даними звіту ВООЗ «Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease» [510], у всьому світі більше 4 млн випадків передчасної смерті пов’язані із забрудненням атмосферного повітря, що призводить до інсульту, хвороб серця, хронічної обструктивної хвороби легень, рака легень та гострих респіраторних інфекцій у дітей.

У додатку В відображено статистичні дані щодо рівня забруднення повітря мілкодисперсними частинками $PM_{2,5}$ та хвороб, що викликає забруднене повітря у світі. За даними, наведеними у джерелах [113, 114, 510], в Україні найвища смертність у світі від забрудненого повітря.

Багато робіт присвячено дослідженню впливу забруднення повітря на розповсюдження хвороб, зокрема і на COVID-19 [511-515].

За даними ВООЗ [510], у світі забруднене повітря спричиняє:

- 43% всіх хвороб та смертей від хронічної обструктивної хвороби легенів;
- 29% всіх хвороб та смертей від раку легенів;
- 25% всіх хвороб та смертей від ішемічної хвороби серця;
- 24% всіх смертей від інсульта;
- 17% всіх хвороб та смертей від гострої інфекції нижніх дихальних шляхів.

Серед забруднювачів, негативний вплив на здоров'я яких підтверджено клінічними дослідженням, є наступні: PM, SO_2, NO_2, O_3 та інші.

Інформація щодо впливу різних забруднювачів на здоров'я людини наведена рис. 1.40.

На даний час особливу увагу приділяють дослідженням впливу на самопочуття та здоров'я людини мілкодисперсних частинок PM з розміром 1-10 мкм [516-521]. Такі частинки можуть глибоко проникати у дихальні шляхи, а звідти потрапляють до судин і розповсюджують по всій кровоносній системі, особливо впливаючи на серце, дихальну систему та головний мозок. Концентрація $PM_{2,5}$ та PM_{10} є одними з найбільш вживаними показниками для оцінки впливу забрудненого повітря на самопочуття та здоров'я людини.

1.7. Формулювання науково-прикладної проблеми та постановка завдань дослідження

Проведений аналіз наукових та інших інформаційних джерел показав, що існуючі теоретичні засади та методологічний апарати і засоби контролю забруднення повітря не відповідають сучасним вимогам щодо швидкої та можливості локалізації джерел забруднення, що не дозволяє попередити виникнення позаштатних ситуацій на об'єктах енергетики.

Проблематиці контролю забруднення повітря об'єктами енергетики присвячено багато досліджень. Вагомий внесок у розвиток цього напряму 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. Яцищин та ін.

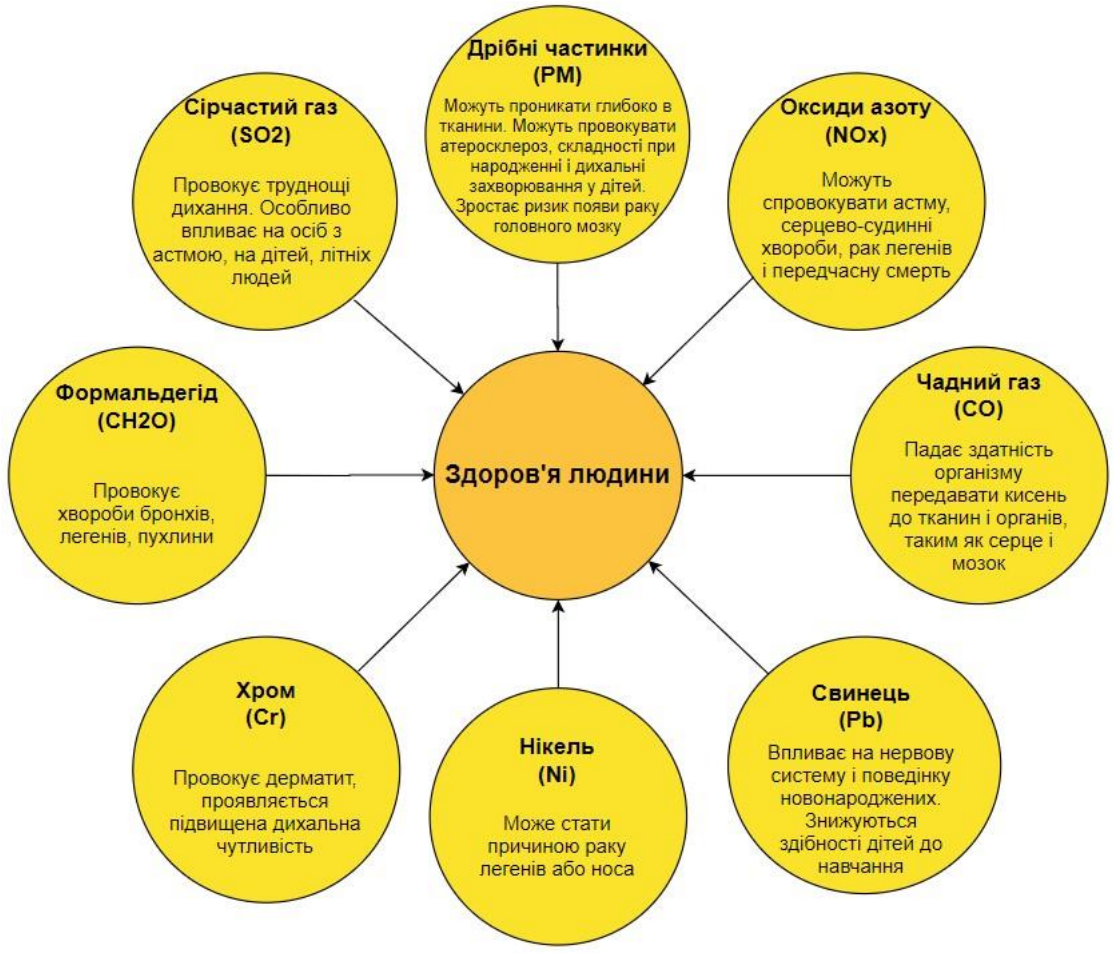


Рис. 1.40. Вплив забруднювачів в повітрі на стан здоров’я та самопочуття людини

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 та виявити джерела надлишкового забруднення повітря.

На теперішній час в Україні діє морально застаріла система контролю забруднення повітря, ЗВТ для якої були розроблені у минулому тисячолітті. До того ж, методологічний апарат контролю базується на так званій методиці ОНД-86, що розроблена у 80-х роках, та вже тривалий час не відповідає сучасним вимогам щодо даних та поточним задачам контролю.

Це свідчить, що до теперішнього часу недостатньо розвинуті теоретичні засади та методологічний апарат, методи оцінювання даних та засоби контролю забруднення повітря. Важливим при цьому є реалізація просторово-розгалужених систем контролю, що базуються на low-cost сенсорах, для забезпечення даними відносно великих територій про поточний стан забруднення повітря з можливістю локалізації джерел забруднення.

Вищевикладене дозволяє сформувати науково-технічну проблему, пов'язану з необхідністю забезпечення комплексного контролю забруднення повітря об'єктами енергетики та локалізацією джерел забруднення (рис. 1.41).

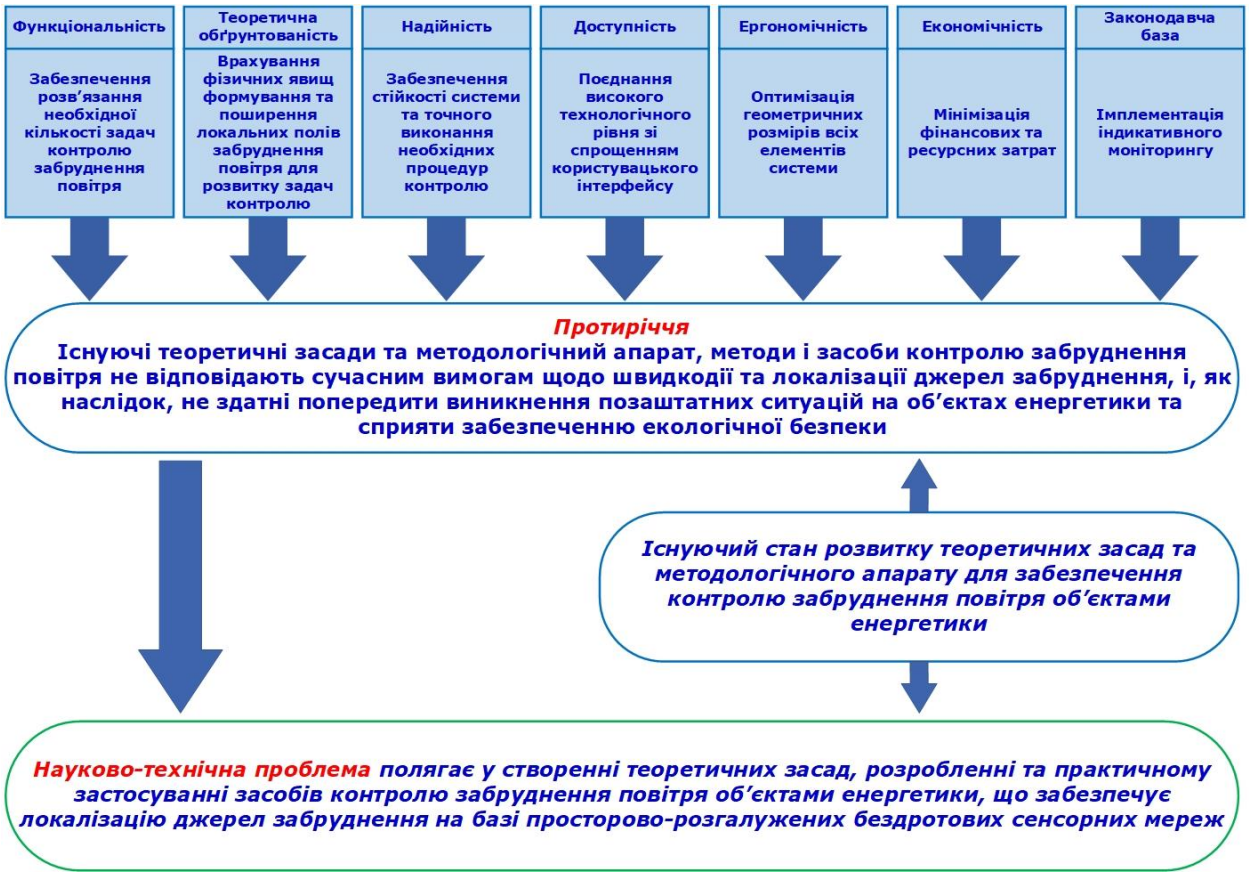


Рис. 1.41. Формулювання науково-технічної проблеми

Для вирішення поставленої науково-технічної проблеми в роботі сформульовані 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 пилу 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 сформувати перспективні напрями розвитку методологічного та апаратно-програмного забезпечення контролю забруднення повітря об’єктами енергетики.

1.8. Висновки до розділу

1. Проаналізовано сучасний стан енергетичного балансу України та світу. Досліджено динаміку виробництва та імпорту енергоресурсів за типами енергій, сектором перетворення та галузями-споживачами. Показано, що Україна, як і світ загалом, має достатньо диверсифікований енергетичний баланс, проте частка викопних палив у цьому балансі складає більше 60% і цей тренд характеризується подальшим зростанням. При цьому одними із головних споживачів енергетичних ресурсів є ТЕС, ТЕЦ, котельні, що виробляючи електричну та теплову енергії, спалюють паливо та генерують великі об'єми забруднюючих речовин, що потрапляють в повітря та негативно впливають на стан навколишнього середовища та населення урбанізованих територій.

2. Аналіз поточного технічного стану енергетичних об'єктів, зокрема об'єктів теплоенергетики, показав, що наразі основними проблемами галузі є: морально застарілий технічний стан обладнання, неефективна структура енергетичного балансу, незадовільний фінансовий стан підприємств, недосконале законодавство, низький рівень інвестицій, негативний вплив на навколишнє середовище. Показано, що комплексна модернізація існуючого обладнання є найперспективнішим варіантом виходу теплоенергетики з кризового стану. Серед заходів щодо модернізації обладнання можна виділити наступні: заміна застарілих насосів на енергозберігаючі; заміна газових пальникових пристроїв; модернізація котлоагрегатів із встановленими утилізаторами теплоти; заміна конвективної частини котлів НІІСТУ, КВГМ, ПТВМ та ін.; впровадження частотного регулювання на приводах існуючих насосів, вентиляторів, димососів; заміна застарілих котлоагрегатів на високо енергоефективні; модернізація теплових мереж із застосуванням попередньо ізольованих труб та ін.

3. 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 і сучасним екологічним вимогам. Так, Україна в порівнянні із середньоєвропейським значенням, перевищує показники по викидам SO_2 у майже 14,5 раз, по NO_x – у більше 4,5 раз, по пилу – у 44 рази. Це зумовило прийняття ряду нормативних та законодавчих документів, зокрема і НПСВ, серед цілей якого: модернізація існуючих ВСУ, заміна застарілих пиловловлювачів на електрофільтри чи тканинні фільтри, створення систем очищення вихідних газів від NO_x. Також, враховуючи поточний стан енергетичного обладнання, актуальним є забезпечення контролю забруднення повітря від цих об'єктів.

4. 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. При цьому навіть з використанням ІЗА, в Україні фіксуються значні перевищення концентрацій різних забруднюючих речовин в повітрі, зокрема SO_x, NO_x, C_6H_6O, CH_2O, HF, CO та пилу. Показано, що одними з найбільш забруднених міст є Маріуполь, Дніпро, Одеса, Кам'янське, Київ, Кривий Ріг, Луцьк, Лисичанськ, Миколаїв, Слов'янськ, Краматорськ, Рубіжне, Львів, Запоріжжя, Лисичанськ, Херсон, Кременчук. Розглянуті типові джерела викидів різних забруднюючи речовин ($C_{20}H_{12}$, SO_2, пил, CO, NO_2, NO_x, HF, H_2S, CS_2, NH_3, C_6H_6O та ін.) та їх поширення в окремих містах. Показано, що серед областей, що найбільше забруднюють повітря належать: Донецька, Дніпропетровська, Івано-Франківська, Запорізька, Львівська, Вінницька, Київська, Черкаська, Полтавська. Ці регіони потребують першочергового впровадження сучасних систем контролю забруднення повітря. Проаналізовано та візуалізовано наявну статистичну інформацію щодо викидів забруднюючих речовин (CO_2, SO_2, NO_2, CO, PM_{10}, $PM_{2,5}$, ПАВ, Zn, Pb, Cu, Cr, Ni, As) в повітря від стаціонарних джерел забруднення за період 1990-2018 рр.

5. Аналіз існуючої системи контролю забруднення повітря показав, що в Україні налічується 129 ПС у 39 містах, серед них: 16 – у Києві; 10 – у Харкові; 8 – в Одесі; 6 – у Дніпрі, 5 – в Запоріжжі, Маріуполі, Кривому Розі. В інших обласних центрах кількість ПС не перевищувала 4. Якість атмосферного повітря визначається за 33 показниками, відповідно до затвердженого переліку для кожного з 53 міст України. Відсутність стаціонарних ПС в деяких містах компенсується використанням мобільних лабораторій чи газоаналізаторів. Показано, що як ЗВТ в системі вітчизняного контролю повітря використовуються морально застарілі пристрої та системи. Закордоном велику увагу приділяють системам контролю забруднення повітря, що базуються на використанні бездротових сенсорних мережах. До складу таких систем входить значна кількість вимірювальних модулів, що побудовані на базі low-cost сенсорів.

6. Проведено аналіз low-cost сенсорів забруднюючих речовин, що можуть бути використанні при створенні систем контролю забруднення повітря. Показано, що наразі існує велике число low-cost сенсорів для вимірювання концентрацій $PM_{2,5}$, PM_{10}, NO_2, SO_2, CO, O_3, CO_2, ЛОР та інших речовин. Розглянуті технічні і метрологічні характеристики цих сенсорів. На практиці для оцінки даних вимірювань цих сенсорів використовуються різні підходи, включаючи як лабораторні методи, так і польові дослідження із використанням квазіеталонних пристроїв. Проаналізовано та візуалізовано діапазони значень коефіцієнтів детермінації R^2 лінійної функції між значеннями вимірювань low-cost сенсорів PM, NO_2, CO, O_3, та квазіеталонних пристроїв, отриманими в різних дослідженнях як в лабораторних, так і польових умовах. Показано, що ці дані характеризуються достатьо великим розкидом результатів, що може бути спричинено впливом метеорологічних факторів, зокрема температури та відносної вологості. Розглянуті переваги та недоліки МОС та ЕС сенсорів різних газоподібних речовин (NO_2, CO, O_3) та сформовані відповідні рекомендації щодо їх використання в системах контролю забруднення повітря.

7. Проаналізовано вплив забруднення повітря на стан здоров’я населення, зокрема урбанізованих територій. Розглянуто особливості впливу CH_2O, SO_2, PM, NO_x, CO, Pb, Ni, Cr на стан здоров’я та самопочуття людини. Показано, що Україна належить до лідерів серед країн світу щодо смертності населення від забрудненого повітря.

8. На основі проведеного аналізу методологічного та апаратного забезпечення систем контролю забруднення повітря визначеного ключові напрями їх розвитку та сформульована науково-прикладна проблема, 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.

РОЗДІЛ 2
МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ

2.1. Контроль забруднення повітря як елемент концепції Smart Energy

Smart City («Розумне місто») – це концепція, що передбачає єдину стійку систему зв'язків ІКТ з IoT (інтернет речей), функціонування якої направлено на спрощення керування різними процесами місцевого рівня, підвищення рівня інформативності населення цієї місцевості та доступу його до різних сервісів та додатків, що в цілому направлені на підвищення рівня безпеки та комфорту життєдіяльності.

Концепція Smart City базується на наступних твердженнях [522]:

- Smart City використовує ІКТ для покращення умов життя населення, підвищення працездатності та стійкого розвитку міста;
- Smart City, як єдина мережа, об'єднує та контролює функціонування та стан об'єктів критичної інфраструктури – підприємств, метро, аеропортів, морських портів, залізниці, доріг, мостів, тунелів, комунікацій, постачання електроенергії, теплоенергії та води, каналізації тощо. Такий підхід дозволяє краще контролювати наявні ресурси, планувати профілактичне обслуговування та забезпечити безпеку населенню міста;
- Smart City на певній території може керувати наявними ресурсами та відходами без шкоди навколишньому середовищу.

Таким чином, можна стверджувати, що використання ІКТ та соціальна спрямованість відіграють головну роль в концепції Smart City.

Smart City також може вважатися системою, що складається із компонентів. Різні науковці мають різні підходи щодо інтерпретації цих компонент [523-525]. Узагальнюючи різні підходи, можна сформувати компоненти Smart City, наведені на рис. 2.1.

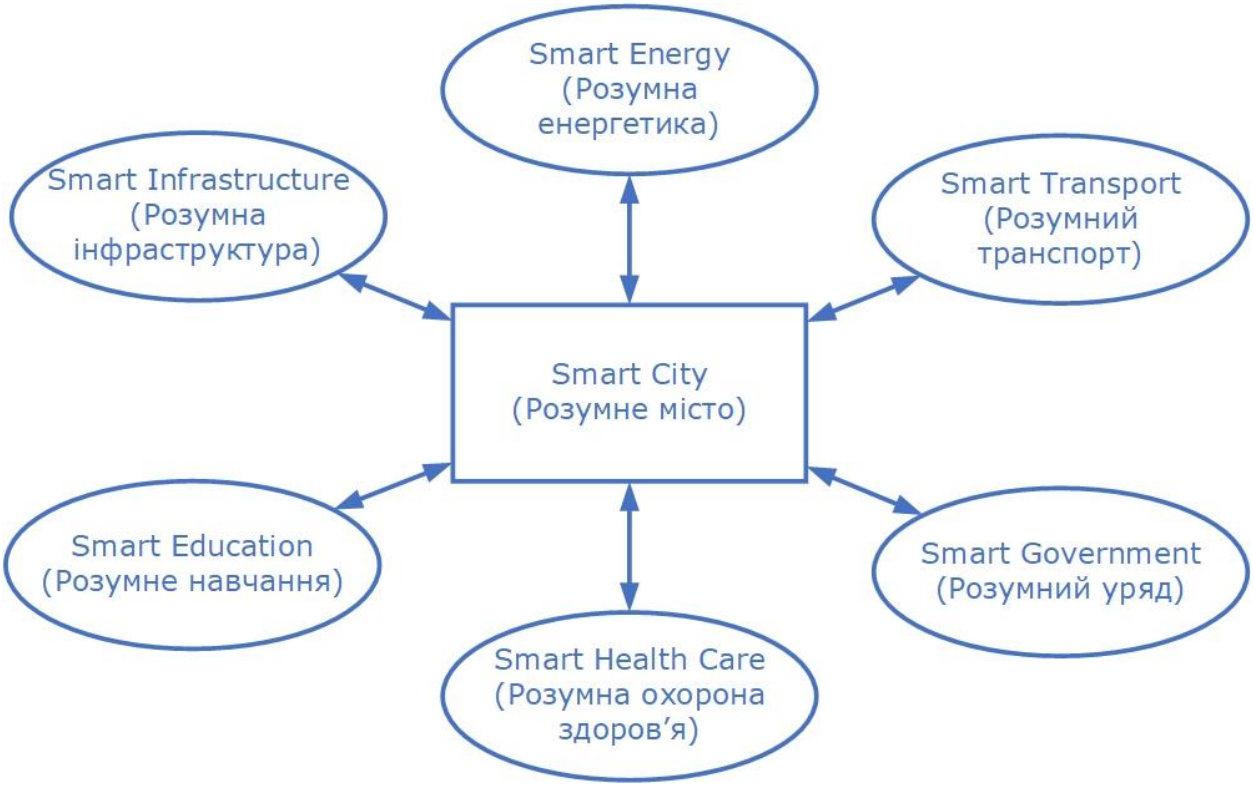


Рис. 2.1. Компоненти Smart City

Велика кількість компонент Smart City не дозволяє розробити єдиного підходу щодо реалізації цієї концепції. Окреме місто чи локація самостійно формує набір компонентів, що реалізує концепцію, та її елементів, виходячи із поточних потреб, наявних ресурсів (людських, фінансових, технічних) та заданих цілей.

Smart Energy є одним із базових елементів Smart City, що забезпечує населення електро- та теплоенергією. 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. Методологічним апаратом, що забезпечує можливість реалізації Smart Energy є енергетична інформатика (Energy Informatics), інструментарій якої наведено в підрозділі 2.4.

Новітні інформаційні системи в енергетиці охоплюють великі масиви даних, Інтернет, безпровідні мережі передачі даних, «хмарні» комп’ютерні технології тощо. Зокрема, в останні роки суттєво збільшилось використання безпровідних сенсорів та іншого апаратного обладнання для теплоелектричних станцій. Вони вимірюють та передають на диспетчерський пульт велику кількість інформації: дані про температуру, тиск в трубопровідній системі, вібраційні характеристики та інші. Маючи таку інформацію від безпровідних сенсорів, яку в багатьох випадках не можна отримати в інший спосіб, системи моніторингу, контролю та діагностики протягом певного періоду здатні забезпечити більш ефективне оцінювання необхідності профілактичних робіт на енергетичному устаткуванні за рахунок накопичення статистичної інформації, яка відображає функціональні залежності зміни діагностичних параметрів в часі і просторі.

Поява і розвиток концепції Smart Energy є природним етапом еволюції енергетичної системи, обумовленим з одного боку очевидними потребами і проблемами поточного енергоринку, а з іншого боку технологічним прогресом, в першу чергу в області комп'ютерних та інформаційних технологій.

Діючу енергетичну систему без Smart Energy можна охарактеризувати як пасивну і централізовану, особливо в частині останньої ланки – від розподільних мереж до споживачів. Саме в цій частині ланцюга постачання енергії технологія Smart Energy найбільш істотно змінює принципи функціонування, пропонуючи нові підходи активної і децентралізованої взаємодії складових системи.

Технологія Smart Energy характеризується кількома інноваційними властивостями, що відповідають новим потребам ринку, серед яких [522]:

1. Активна двонапрямлена схема взаємодії в реальному часі та інформаційного обміну між всіма елементами (учасниками мережі) – від виробників енергії до кінцевих споживачів.

2. Охоплення всього технологічного ланцюга енергетичної системи: виробники енергії, розподільчі мережі і кінцеві споживачі.

3. Для забезпечення інформаційного обміну даними в межах Smart Energy передбачено використання цифрових комунікаційних мереж та інтерфейсів обміну даними. Однією з найважливіших цілей Smart Energy є забезпечення практично безперервного керованого балансу між попитом і пропозицією енергії. Для цього елементи мережі повинні постійно обмінюватися між собою інформацією про параметри енергії, режими споживання і генерації, кількість спожитої енергії і планове споживання, комерційною інформацією.

4. Smart Energy «вміє» ефективно захищатися і самовідновлюватися після збоїв, природних катаклізмів, зовнішніх загроз.

5. Smart Energy сприяє оптимальній експлуатації інфраструктури енергетичної системи та розподілу теплової енергії між споживачами з урахуванням їх пріоритету.

6. З точки зору загальної економіки Smart Energy сприяє появі нових ринків енергії, гравців і послуг.

Загальна функція керування в концепції Smart Energy, що включає об’єкти генерування, транспортування та споживання теплової енергії, може бути представлена системою рівнянь [526]:

$$\begin{cases} J(t) = A(t) + M(N_{tr}, t) \to \min; \\ A(t) = \dfrac{(C_e + C_{ia} + C_s) \cdot \Delta t}{n_c \cdot T} + R(t) + \Delta S; \\ M(N_{tr}, t) = C_r^i(t, G_c^i) \cdot \dfrac{N_{tr} \cdot \Delta t}{R_i \cdot \eta_i}, \end{cases} \qquad (2.1)$$

де $A(t)$ – адитивні витрати, що залежать тільки від часу, $M(N_{tr},t)$ – мультиплікативні витрати, що залежать від потужності та часу, N_{tr} – сумарна потужність споживачів, C_e – вартість обладнання, C_{ia} – вартість монтажу та налаштування обладнання, C_s – вартість обслуговування системи за період T, n_c – кількість споживачів, $R(t)$ – надійність системи, ΔS – вартість додаткових ресурсів для забезпечення технологічних процесів та компенсації витрат,

$C_r^i(t, G_c^i)$ – поточна вартість *i*-го енергоресурсу за звітний період, R_i – питома енергоємність *i*-го енергоресурсу, η – ККД процесу отримання теплової енергії.

Величина ΔS може акумулювати різні затрати, серед яких: вартість холодної води для компенсації фізичних втрат в тепловій мережі; вартість енергоресурсів, що йдуть на нагрівання холодної води до нормативної температури; вартість електроенергії, що витрачається на роботу насосів та ін.

Виходячи з вищевикладеного, концепція Smart Energy суттєво змінює вимоги до надійності обладнання енергетичних мереж, а відповідно і вимоги до засобів її забезпечення (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Порівняння можливостей обслуговування енергетичного обладнання і забезпечення його надійності за традиційним і новим підходами

В рамках традиційного підходу	В рамках концепції Smart Energy
• функціональне діагностування (постійно або періодично) лише для особливо відповідальних об'єктів • система планово-попереджувальних ремонтів • тестове діагностування (під час планових зупинок) • локальні системи діагностування, захисту та автоматики для особливо відповідальних об'єктів	○ діагностування та віддалений моніторинг стану для широкого класу обладнання ○ обслуговування та ремонт за фактичним станом ○ адаптивні розподілені системи забезпечення надійності (контроль, діагностування, моніторинг стану, самовідновлення де це можливо)

Зокрема, в рамках традиційного підходу обслуговування обладнання здійснюється, в основному, на основі планово-попереджувальних ремонтів, а засоби технічного діагностування використовуються для пошуку дефектів уже після виведення об'єкта з роботи. Особливо відповідальне обладнання оснащене власними системами контролю та моніторингу, які забезпечують

аварійну сигналізацію у випадку виникнення нештатних ситуацій, але мають недостатньо засобів для виявлення, класифікації та локалізації дефектів.

В рамках концепції Smart Energy передбачається, що обслуговування та ремонт техніки здійснюватиметься за фактичним станом. Для цього значно більша частина обладнання буде охоплена системами забезпечення надійності, які будуть здійснювати постійний чи періодичний контроль його фактичного технічного стану. Крім того, самі ці системи будуть мати більше можливостей: двосторонній обмін інформацією на всіх рівнях, віддалений контроль стану, прогнозування відмов, планування необхідності у запасних частинах, оцінювання залишкового ресурсу, забезпечення можливості самовідновлення обладнання (за умови відповідного резервування).

Потреба в оснащенні широкого кола різноманітного енергетичного обладнання системами діагностування, моніторингу та контролю стану зумовлює те, що ці системи повинні бути адаптивними. Важливу роль у забезпеченні широких можливостей систем нового покоління буде відігравати розподіл обчислювальних ресурсів між різними системами діагностування, моніторингу та контролю на різних рівнях ієрархії енергетичної системи.

На території великих міст та агломерацій основним джерелом забезпечення населення енергією (електричною та тепловою) є АЕС, ТЕЦ, ТЕС, котельні, що в загальному характеризуються як складні технічні об’єкти (СТО). Технічний стан кожного об’єкта характеризують різні фізичні величини – механічні, гідромеханічні, аеромеханічні, термодинамічні, електричні, електромагнітні, оптичні, акустичні та ін., аналіз яких дає змогу обґрунтувати множину інформативних параметрів контролю. Основними критеріями відбору тих чи інших фізичних величин як інформативних параметрів є використання тих фізичних полів і явищ, які максимально чутливі до зміни стану матеріалу, умов навантаження, експлуатації та ін., а також можливість визначення фізичних параметрів без руйнування зразків [527].

До основних параметрів теплотехнічного обладнання, яке контролюється, слід віднести [526]:

•загальні параметри – коефіцієнти економічності, пов'язані з факторами технологічного процесу;

•характеристики властивостей металоконструкцій – твердість, повзучість, тріщиностійкість, наявність дефектів типу раковин, непроварів, окалин поверхонь нагріву;

•геометричні параметри конструкцій – діаметр і товщина стінки труб, відносні зміщення окремих вузлів;

•параметри теплофізичних процесів – температура зон перегрівів поверхонь нагріву і паропроводів;

•параметри шумових процесів – поява сигналів акустичної емісії, акустичних сигналів витоку, шумів закипаючої рідини, шумів в трубопроводах та ін.;

•параметри вібрації – вібрації котла, трубопроводів, вентиляторів, димососів;

•параметри хімічних процесів та речовин – характеристики води охолоджуючих середовищ, стан забруднення повітря в околі об’єктів енергетики.

Для вирішення завдань контролю СТО доцільно використовувати методологію системного підходу. Одним з його основних положень є виділення в межах СТО декількох рівнів ієрархії. На рис. 2.2 приведена ієрархічна структура теплоенергетичної системи великого промислового підприємства [526, 528]. Елементи V рівня самі по собі є складними установками (наприклад, парова турбіна) і можуть піддаватися подальшій деталізації на більш низьких рівнях.

До завдань ієрархічних рівнів II-IV відносяться такі, наприклад, як розподіл різних видів палива між окремими споживачами; вибір складу і профілю основного енергетичного обладнання; оптимізація параметрів і виду теплової схеми теплоенергетичної системи промислового підприємства та ін. До завдань рівня V і нижчих ієрархічних рівнів відносяться вибір оптимальних

термодинамічних і конструктивних параметрів конкретного теплоенергетичного обладнання з визначеними на рівнях II-IV параметрами.

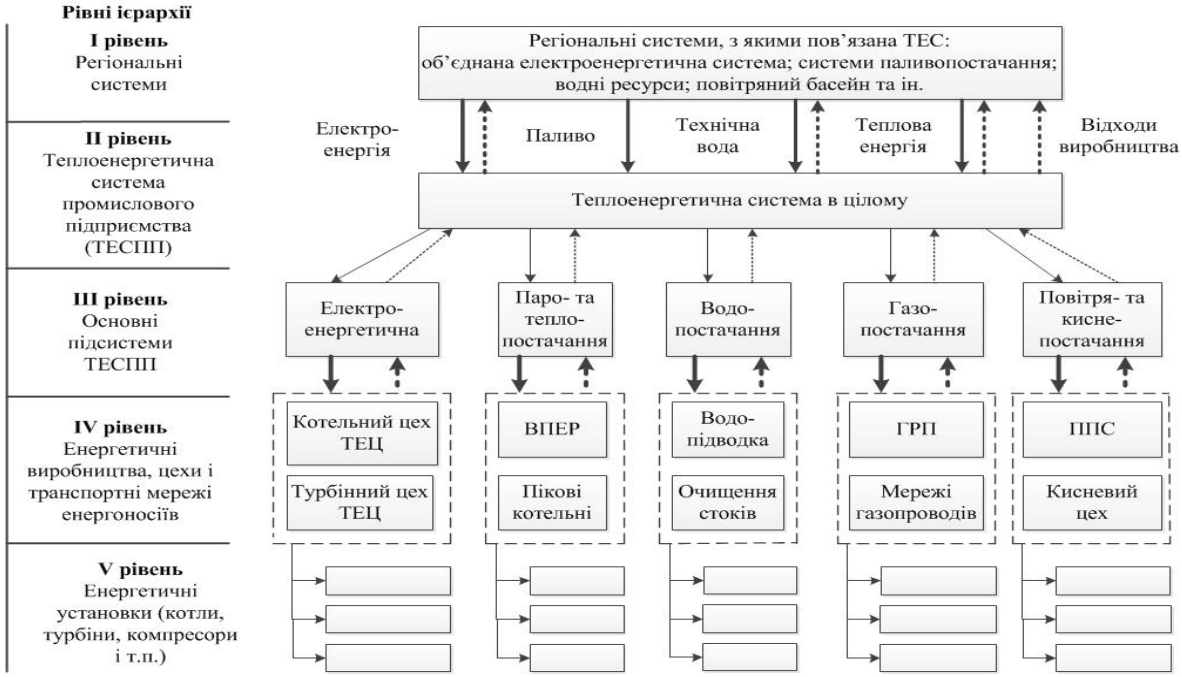


Рис. 2.2. Ієрархічна структура енергетичної системи великого промислового підприємства

Такий підхід до розгляду теплоенергетичної системи дозволяє використовувати технологію Smart Energy для контролю функціонування окремих рівнів.

Виходячи з ієрархії обладнання СТО та концепції Smart Energy, важливою задачею є створення систем контролю, що вимірює інформативні сигнали, які несуть інформацію про фактичний стан вузлів устаткування. Таким чином, до складу такої системи можуть бути включені сенсори тих фізичних величин, які використовуються для контролю конкретно заданої системи. Залежно від об'єкта контролю, до складу системи контролю можуть входити:

- термопари або терморезистори – для вимірювання температури;
- акселерометри – для вимірювання параметрів вібрацій;
- вимірювальні мікрофони – для визначення рівня акустичних шумів;
- сенсори електричних величин – для вимірювання параметрів функціонування електричного обладнання;

- сенсори тиску – для контролю за розрідженням в топці;
- лічильники теплової енергії – для визначення поточного режиму роботи теплотехнічного обладнання;
- сенсори газів/пилу – для визначення концентрації забруднюючих речовин в димовому тракті та в околі об’єктів енергетики.

Сучасні системи контролю практично завжди будуються на основі деякого цифрового засобу обчислення (мікроконтролера, персонального комп'ютера, промислової робочої станції тощо). Для системи контролю, яка відповідає основним принципам концепції Smart Energy, ця вимога є обов'язковою, оскільки в рамках «розумних мереж» обмін інформацією здійснюється в цифровій формі. Таким чином, виміряні сигнали повинні перетворюватися в цифрову форму з метою подальшого опрацювання в обчислювальному ядрі системи. Кінцевий етап оброблення інформації в системі контролю – це відображення отриманих результатів для користувачів різних рівнів. Для цього в структуру системи включаються відповідні засоби, які, зокрема повинні забезпечувати авторизацію користувачів системи, розподіл прав доступу, захист інформації.

Слід зазначити, що в системах контролю складних об'єктів може вимірюватися значна кількість інформативних сигналів, що призводить до необхідності обміну між компонентами системи інформацією у значних обсягах. Для зменшення навантаження на канали зв'язку застосовується одним з основних принципів концепції Smart Energy – принцип децентралізації обчислювальних ресурсів.

Виходячи із вищенаведеного, можна акцентувати важливість створення системи контролю забруднення повітря об’єктами енергетики, що забезпечує контроль функціонування СТО на найвищому ієрархічному рівні. Така система є важливим елементом як концепції Smart Energy, так і Smart Health Care, адже викиди об’єктів енергетики в повітря містять велику частину не тільки забруднюючих, але й шкідливих речовин.

На рис. 2.3 приведена розроблена ієрархічна структура системи контролю забруднення повітря об’єктами енергетики, що відповідає вимогам концепції Smart Energy.

В межах розробленої структури передбачений контроль забруднення повітря не тільки в межах об’єктів критичної інфраструктури (в т.ч. об’єктів енергетики) та енергоємних підприємств-забруднювачів, але й громадських місцях (медичних, освітніх, культурних закладах, зупинках транспорту тощо) та окремими користувачами на побутовому рівні.

Розробленою структурою передбачено використання різних засобів контролю: стаціонарні та мобільні лабораторії контролю, автоматизовані пости контролю, громадські пости контролю та метеорологічні стації.

Ієрархічна структура системи контролю містить 3 рівні інформаційно-аналітичних центрів контролю (локальний, регіональний та центральний відповідно), що складаються з таких компонентів: сервер обміну даних; сервер зберігання, обробки (первинної, вторинної та фінальної відповідно) та аналізу даних; сервер формування звітів; сервер геоінформаційної системи. Особливістю структури є формування відповідних даних на різних ієрархічних рівнях (інформаційно-аналітичних центрах контролю) 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.

Найвищий рівень структури – це центри прийняття рішень. До них відносяться: Офіс Президента України, Кабінет міністрів України, Верховна рада України, інші відомчі міністерства. При цьому структура має зворотний зв’язок від центрів прийняття рішень до об’єктів контролю, що регулює кількість забруднюючих речовин, що потрапляють в повітря, зокрема від об’єктів енергетики.

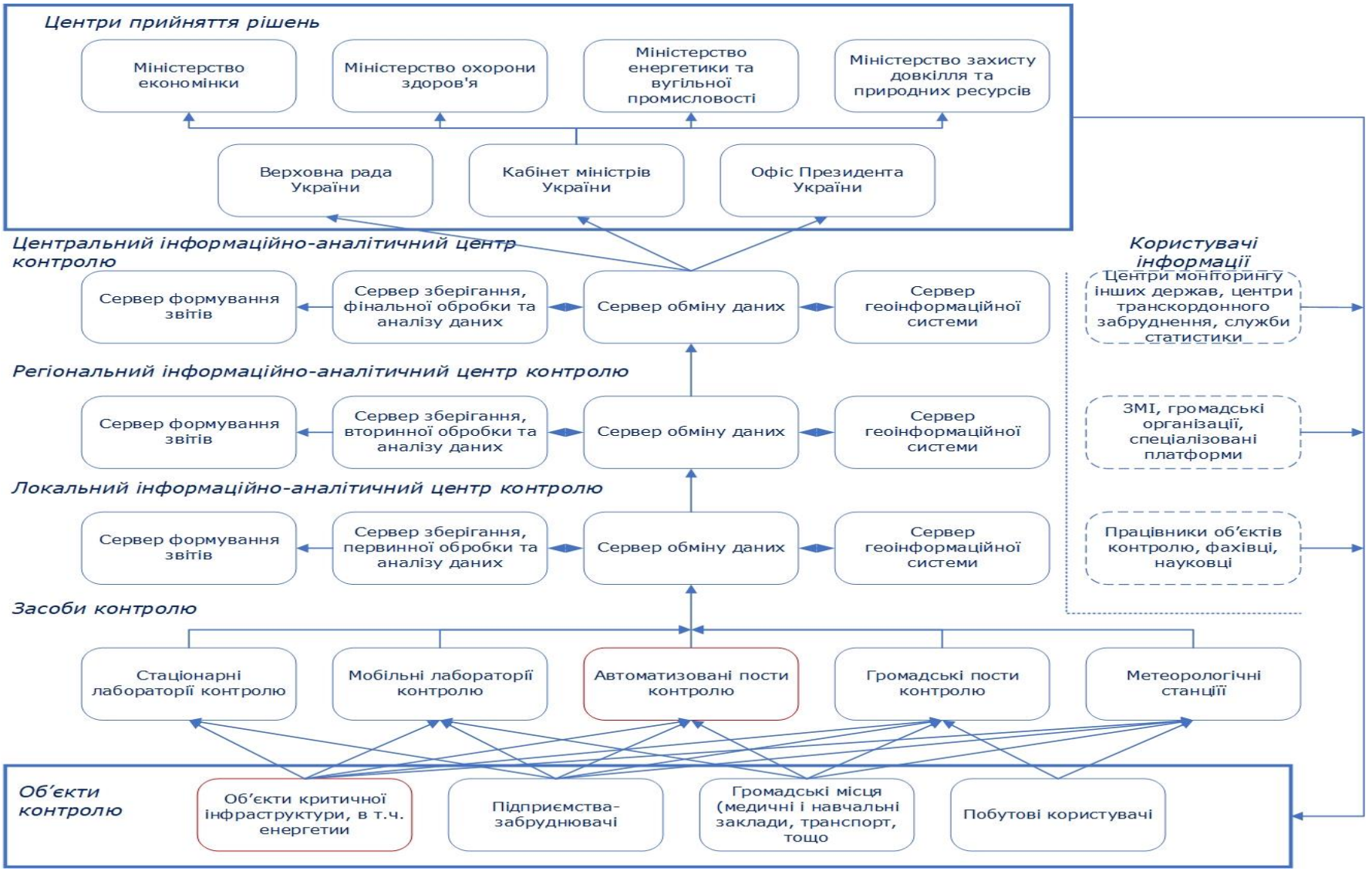


Рис. 2.3. Ієрархічна структура системи контролю забруднення повітря в рамках Smart Energy

Запропонована структура системи контролю забруднення повітря об’єктами енергетики на базі технології Smart Energy забезпечує надійність та безпеку функціонування об’єктів енергетики, сприяє зменшенню екологічного навантаження на повітря в межах міст чи агломерацій (через контроль рівня викидів забруднюючих речовин) та покращенню самопочуття населення.

2.2. Планування та функціонування системи контролю забруднення повітря на базі бездротових сенсорних мереж

2.2.1. Роль контролю в управління якістю повітря

Моніторинг навколишнього середовища проводиться для контролю за його станом, забезпечення державних органів, юридичних та фізичних осіб достовірною та оперативною інформацією, необхідною для своєчасного реагування на зміни навколишнього середовища, та раціонального користування природними ресурсами.

Контролем забруднення атмосферного повітря є система комплексних довгострокових спостережень, що виконуються за чітко встановленою програмою, на протязі тривалого часу за станом повітря, його забрудненням, природними явищами, що в ньому виникають, а також оцінювання та прогноз параметрів, що характеризують його стан. При цьому контроль забруднення атмосферного повітря є складовою частиною державної системи моніторингу навколишнього середовища.

На рис. 2.4 наведено класифікацію параметрів, що характеризують стан атмосферного повітря.

Головна задача контролю атмосферного повітря полягає не у накопиченні даних, отриманих зі станцій ПС, а у отриманні інформації, необхідної для прийняття рішень в сфері управління якістю атмосферного повітря та покращення його санітарного стану. Контроль в цьому процесі відіграє роль наукової бази для розробки стратегій та прийняття рішень, постановці завдань, оцінюванні досягнень заданих цілей, плануванні заходів по реалізації законодавчих актів та контролю за їх виконанням (рис. 2.5).

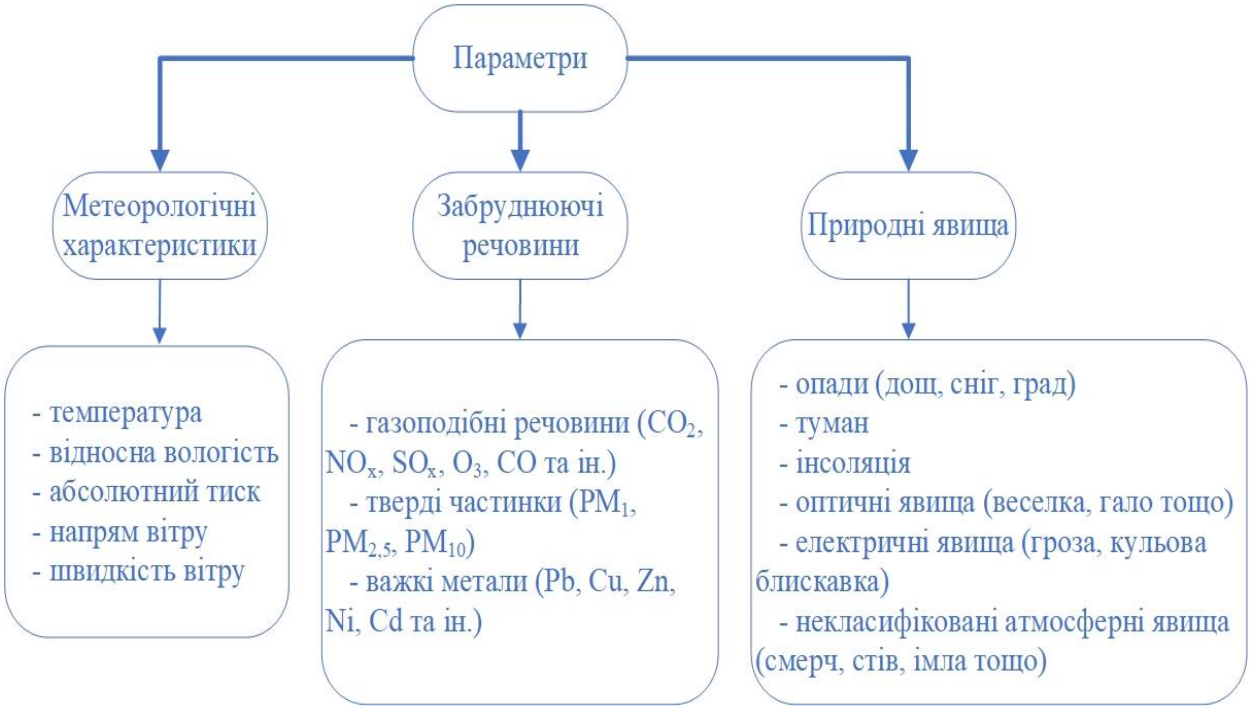


Рис. 2.4. Класифікація параметрів стану атмосферного повітря

Однак, звичайно, контроль не може бути єдиним засобом для комплексного управління якістю атмосферного повітря. В багатьох великих та малих містах, на території промислових об'єктів та інших зонах часто є недостатнім і недоцільним використання тільки прямих вимірювань параметрів стану атмосферного повітря. Тому разом з контролем потрібно використовувати різні методи оцінки стану атмосферного повітря, включаючи моделювання розповсюдження полютантів, метеорологічних характеристик та атмосферних явищ, картування, інтерполяцію та ін.

Потрібно зважати на те, що жодна система контролю, якою б за матеріально-технічною базою вона не була, не може отримати всі необхідні просторово-часові характеристики параметрів стану атмосферного повітря. При цьому те саме твердження відноситься і до окремого використання тільки систем моделювання (наприклад, Copernicus), адже моделі мають бути верифіковані на основі даних прямих вимірювань в процесі контролю. Таким чином, такий дуалістичний підхід дозволить максимально ефективно

використати наявні технічні ресурси та максимізувати ефект від впровадження комплексної системи контролю забруднення атмосферного повітря.



Рис. 2.5. Контроль в управлінні якістю атмосферного повітря

Варто відмітити, що контроль забруднення атмосферного повітря – це систематичний, ресурсоємний і тривалий процес, який має здійснюватися державними органами. Проте на даний час велика кількість аналітиків та експертів відзначають, що в Україні відсутня будь-яка державна програма з фінансування сучасної мережі контролю.

В Директиві 2008/50/ЄС відзначено, що вона визнає доцільність використання в державах, що її імплементували, різних методів моніторингу, моделювання та об’єктивного аналізу при оцінюванні стану забруднення атмосферного повітря. Вибір будь-якого методу залежить від існуючої матеріально-технічної бази та поточного стану атмосферного повітря на території, де проводиться контроль.

Незважаючи на те, що Україна ратифікувала цю директиву, тільки Постановою Кабінету міністрів України від 14 серпня 2019 р. №827 про «Деякі

питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря» було створено нормативно-правову базу, що узгоджувала існуюче законодавство з ратифікованою Директивою. Зокрема важливо відмітити наступні нововведення для вітчизняного моніторингу:

1. встановлені верхні та нижні межі оцінки, цільові та граничні значення для основних полютантів;

2. введення контролю забруднення мілкодисперсним пилом (твердими частинками) $PM_{2,5}$, PM_{10} та озоном O_3;

3. методом підтвердження прийнято ряд європейських стандартів для вимірювання концентрації різних полютантів в повітрі;

4. встановлено можливість проведення індикативних вимірювань для великої кількості полютантів, зокрема $PM_{2,5}$, PM_{10}, SO_2, NO_2, NO, CO, O_3, важких металів (Ar, Cd, Ni, тощо), та ін.;

5. введено цілі щодо якості даних для оцінки якості атмосферного повітря для великої кількості полютантів.

При цьому у вітчизняній мережі контролю забруднення атмосферного повітря залишається ряд невирішених проблем:

1. відсутність систематичного фінансування;

2. відсутністю комунікаційної стратегії;

3. відсутність стратегії розвитку мережі контролю.

2.2.2. Цілі, задачі та вимоги до даних контролю забруднення повітря

Першим кроком при плануванні системи контролю забруднення атмосферного повітря має бути визначення чітких цілей та задач контролю. Занадто амбітні, недостатньо чіткі або занадто строгі цілі контролю можуть призвести до створення неефективних програм контролю та мережі контролю в цілому, неефективного використання матеріально-технічних ресурсів, формування некоректних баз даних результатів вимірювання. При плануванні мережі та програм контролю забруднення повітря, а також формуванні документації, потрібен чіткий баланс між отриманими результатами

вимірювання та сформованою інформацією, та чітке розуміння того, хто буде користувачем кінцевої інформації (рис. 2.6). Тому при плануванні потрібно залучити кінцевих користувачів інформації для того, щоб сформовані бази даних системи контролю відповідали їх запитам, а ресурси, виділені на створення системи, були використані раціонально.

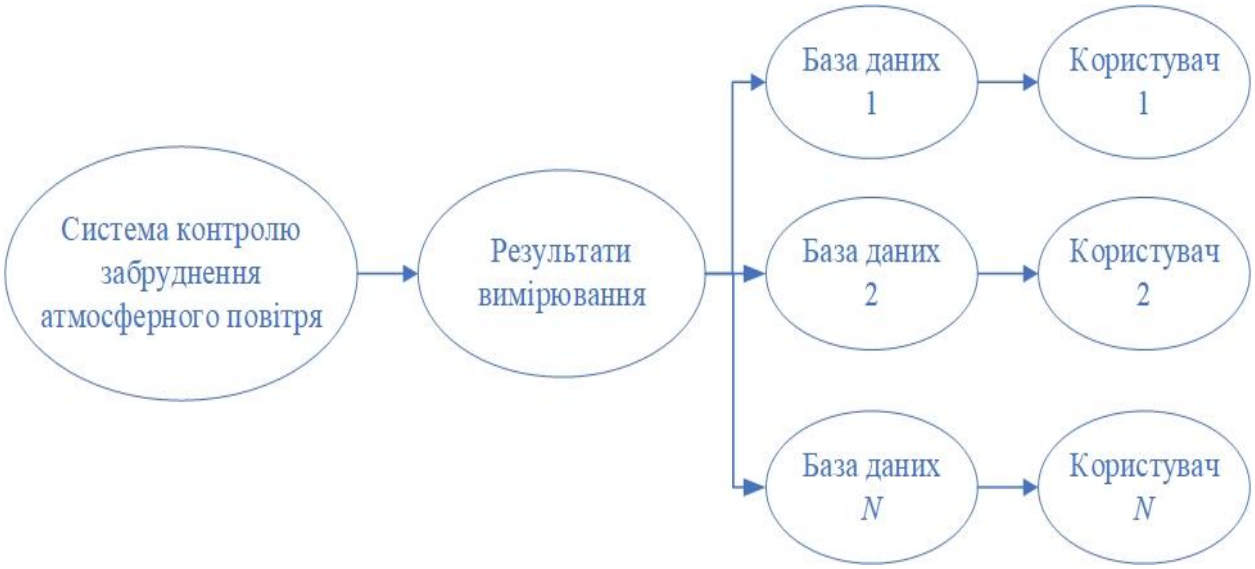


Рис. 2.6. Поширення інформації в системі контролю забруднення повітря

Головна мета контролю забруднення повітря в першу чергу пов’язана з виконанням державних нормативних актів, та передбачає формування оперативної та достовірної інформації про стан атмосферного повітря та передачу її до відповідних органів та осіб.

Задачі контролю атмосферного повітря є унікальними для різних мереж. Вони можуть формуватися з врахуванням великої кількості факторів: масштабу застосування (національний, регіональний, місцевий рівні), особливостей вихідної інформації контролю, територій, на яких проводиться контроль тощо. Можливі задачі контролю наведені на рис. 2.7.

Крім цілей та задач контролю, важливо сформувати ряд вимог до якості даних, отриманих під час контролю. Результуючі дані мають відповідати рівню сформованої мережі контролю, що дозволить запобігти завищеним чи заниженим очікування до їх кінцевої якості. Для досягнення поставленої цілі

та задач контролю, дані вимірювання мають відповідати вимогам, наведеним на рис. 2.8.



Рис. 2.7. Типові задачі контролю забруднення атмосферного повітря

Згідно [100], в Україні визначено цілі щодо якості даних оцінювання стану атмосферного повітря та відповідні методи оцінювання рівнів забруднюючих речовин.

В залежності від концентрації забруднювача в повітрі встановлюються відповідні режими оцінювання для кожного забруднювача. Режим оцінювання встановлює відповідний державний чи регіональний орган управління якістю атмосферного повітря відповідно до наступних критеріїв.

Так, фіксовані вимірювання використовуються, якщо рівень концентрації забруднювача перевищує верхній поріг оцінювання. Фіксовані вимірювання здійснюються на ПС за якістю атмосферного повітря постійно або шляхом випадкової вибірки. Ці вимірювання проводяться на основі методів, що регламентуються.



Рис. 2.8. Вимоги до кінцевих даних контролю атмосферного повітря

Комбіновані оцінювання використовуються у випадку, якщо концентрація забруднюючої речовини в повітрі є нижчою за верхній поріг оцінювання. Комбіновані оцінювання здійснюються шляхом поєднання фіксованих вимірювань, методів моделювання або індикативних вимірювань.

Якщо концентрація забруднюючої речовини нижча за нижній поріг оцінювання, тоді може застосовуватися комбінація методів моделювання та об’єктивного оцінювання.

Загальна схема методів оцінювання якості атмосферного повітря в залежності від концентрації забруднюючої речовини наведена на рис. 2.9.

В таблиці 2.2 приведені значення граничної величини, верхнього та нижнього порогів оцінювання концентрації деяких забруднюючих речовин в повітрі, що регламентуються Постановою КМУ [100].

В таблиці 2.3 наведено цілі щодо якості даних для оцінювання стану забруднення атмосферного повітря для газоподібних речовин, що визначаються Постановою КМУ [100].

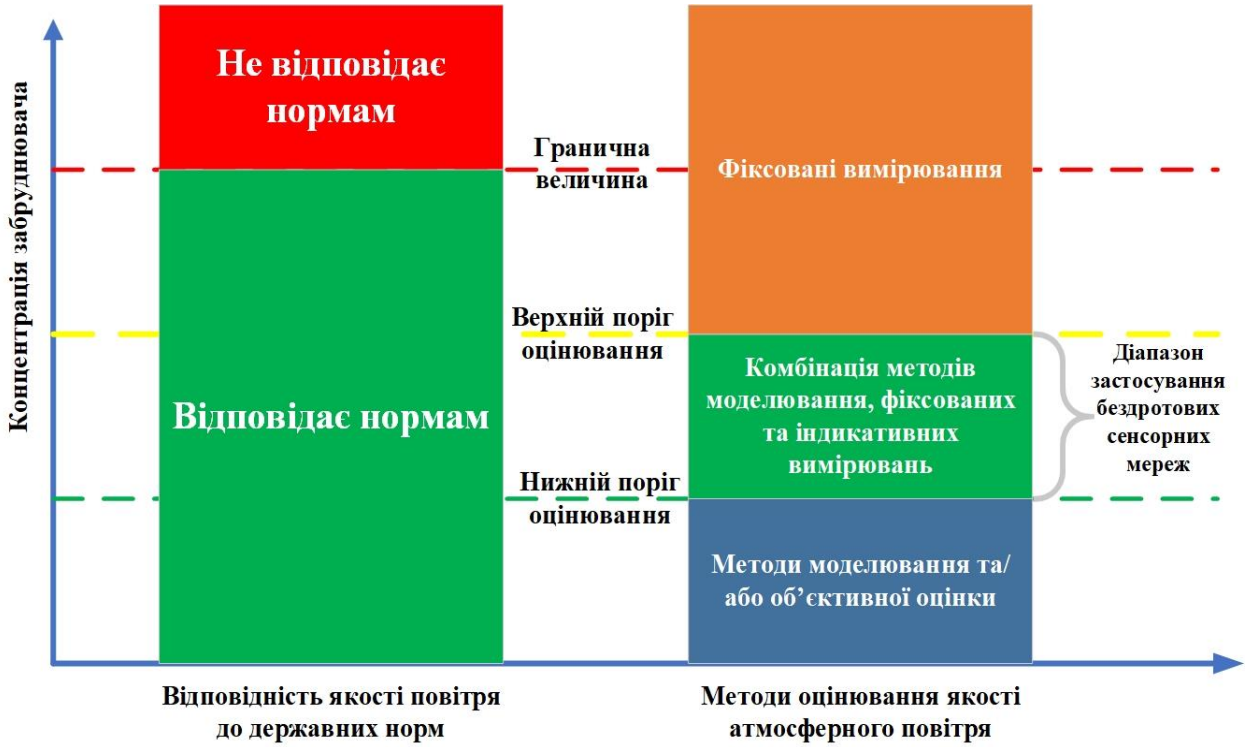


Рис. 2.9. Співвідношення рівнів концентрації забруднюючa в повітрі та методів їх оцінювання

Таким чином, для створення високоефективної системи контролю забруднення повітря необхідно коректно сформувати ціль та задачі системи, а також вимоги до якості кінцевих даних контролю. Це дозволить чітко визначити перелік забруднюючих речовин, концентрації яких будуть визначатися методами та засобами контролю, сформувати вимоги до рівня інформативності системи та формування баз даних, необхідних заданим користувачам та ін.

Варто відмітити, що при плануванні систем контролю атмосферного повітря доцільно використовувати наявний міжнародний досвід та розроблені рекомендації задля забезпечення єдності вимірювання та формування уніфікованих баз даних.

Таблиця 2.2 – Значення граничної величини, верхнього та нижнього порогів оцінювання деяких забруднюючих речовин атмосферного повітря

Параметр / Забруднювач		Гранична величина; К; (W)	Верхній поріг оцінювання; К	Нижній поріг оцінювання; К
SO_2, [мкг/м^3]	T_1	350; 24; (43)	–	–
	T_3	125; (–)	75; 3	50; 3
NO_x, [мкг/м^3]	T_1	200; 18; (0)	140; 18	100; 18
	T_4	40, (0)	32	26
PM_{10}, [мкг/м^3]	T_3	50; 35 (50)	35 (35)	25 (35)
	T_4	40; (20)	28	20
$PM_{2,5}$, [мкг/м^3]	T_4	25; (20)	17	12
CO, [мг/м^3]	T_2	max 10	7	5
C_6H_6, [мкг/м^3]	T_4	5; (0)	3,5	2

* T – період усереднення (T_1 – 1 год, T_2 – 8 год, T_3 – 24 год, T_4 – 1 рік); К – максимальна кількість перевищень на рік; (W) – допустимий % перевищення концентрації)

Таблиця 2.3 – Цілі щодо якості даних для оцінювання стану забруднення атмосферного повітря для газоподібних речовин

Речовина / Похибка	SO_2, NO_x, CO	$PM_{2,5}$, PM_{10}	O_3
	Фіксовані вимірювання		
ε_f, [%]	15	25	15
	Індикативні вимірювання		
ε_i, [%]	25	50	30
	Моделювання		
ε_{i1}, [%]	50	–	50
ε_{i2}, [%]	50	–	50
ε_{i3}, [%]	50	–	–
ε_{i4}, [%]	30	50	–
	Об’єктивне оцінювання		
ε_o, [%]	75	100	75

2.2.3. Забезпечення стандартів якості при контролі забруднення повітря

Забезпечення стандартів якості в системах контролю забруднення повітря є одним із її головних елементів. Заходи щодо забезпечення та контролю якості є складовими загальної програми, що забезпечує відповідність вимірювань загальноприйнятим стандартам (міжнародним, державним, регіональним, локальним, тощо) якості та заданому рівню достовірності. Головна мета забезпечення якості при контролі забруднення повітря в тому, щоб забезпечити максимально можливий рівень даних при обмежених ресурсах, що виділяються для створення системи. Такий підхід дозволяє використовувати отримані дані на практиці.

Загальні цілі забезпечення та контролю якості при контролі забруднення повітря полягають в наступному:

- дані результатів вимірювань мають бути репрезентативними, точними та надійними;
- вимірювання мають проводитися регулярно у часі;
- вимірювання мають проводитися рівномірно у просторі;
- результати вимірювань мають відповідати єдності вимірювань;
- дані результатів вимірювання мають відповідати визначеному розподілу, а щільність даних має бути високою;
- ресурси, виділені на систему контролю, мають бути використані оптимально (на основі заданих критеріїв оптимальності).

На рис 2.10 наведені компоненти забезпечення та контролю якості при контролі забруднення атмосферного повітря.

Заходи щодо забезпечення якості мають бути направлені на формування процесу вимірювання концентрацій забруднюючих речовин в повітрі, та стосуються визначення цілей контролю та вимог до якості даних, вибору засобів вимірювання та їх технічних характеристик, локальному розміщенню та технічному оснащенню ПС. Заходи щодо забезпечення контролю якості направлені на підтримку процесу вимірювання, та стосуються аналізу даних вимірювання, контролю за функціонування ПС, підтримкою і оновленням їх

апаратно-програмного забезпечення, калібрування засобів вимірювання, коригування процесів обробки даних.



Рис. 2.10. Компоненти забезпечення стандартів якості при контролі забруднення повітря

Всі компоненти по забезпеченню та контролю якості мають бути реалізовані в межах розробленої програми для повного та успішного функціонування системи контролю забруднення повітря.

Приведені вимоги щодо забезпечення та контролю якості є загальноприйнятними для переважної більшості мереж контролю забруднення повітря, проте реалізація наведених процесів може мати певні особливості, що визначаються при визначенні цілей контролю. Так в умовах обмежених фінансових ресурсів при формуванні систем контролю, що базуються на використанні бездротових сенсорних мереж, важливо сформувати вимоги щодо метрологічних характеристик сенсорів та їх вартості, адже ці показники є прямо пропорційними.

Помилки, що виявляються під час експлуатації системи, буде важко усунути, якщо вони були здійснені на перших етапах формування системи контролю. Проте їх вплив на загальну роботу системи має бути мінімізовано шляхом періодичних коригувань системи на її різних ієрархічних рівнях.

Для розроблення та реалізації програм щодо забезпечення стандартів якості в системах контролю забруднення атмосферного повітря може бути використаний алгоритм, наведений на рис. 2.11.

Необхідно зазначити, що розроблення програми забезпечення та контролю якості при контролі атмосферного повітря не вирішує в загальному проблему забезпечення якості. З часом через зміну стандартів, пов'язаних з атмосферним повітрям та його забруднювачами, мети контролю та ін., ці програми мають коригуватися до нових вимог, тому адаптивність системи контролю атмосферного повітря до постійних змін як у забезпеченні якості, так і її контролі, є однією із сучасних вимог. Ця властивість при плануванні мережі контролю може бути забезпечена бездротовими сенсорними мережами.

2.3. Моделі та міри в теорії і практиці контролю забруднення повітря

В теорії і практиці широкого кола вимірювань моделі і міри відіграють фундаментальну роль. На їх основі розробляється і удосконалюється вимірювальний інструментарій, необхідний для отримання нових знань і підтримання процесу технологічного розвитку. Детерміновані і ймовірнісні моделі вимірюваних величин, процесів і полів, а також фізичні та ймовірнісні міри дають змогу формувати результат вимірювання, надати йому властивості об'єктивності і достовірності. Тому питання удосконалення та розвитку моделей і мір в методології вимірювань відіграють все більш значущу роль для досягнення вищої точності вимірювань і розширення областей їх застосування. Природньо, що все більш значущу роль моделі і міри відіграють в теорії і практиці контролю забруднення повітря [529-532].

Сучасний етап розвитку науки і техніки, а в цілому і суспільства, вимагає проведення більш широкого кола науково-технічних досліджень в галузі вимірювань і відповідного впровадження їх результатів.



Рис. 2.11. Алгоритм розроблення та реалізації програм щодо забезпечення стандартів якості в системах контролю забруднення атмосферного повітря

Створення моделей і мір для розв'язання актуальних науково-технічних проблем вимірювань в галузі контролю забруднення повітря базується на висунутих гіпотезах і припущеннях, попередньому досвіді, поглибленому аналізі різних факторів, що супроводжують проведення вимірювального експерименту і впливають на результат вимірювання. Інтегрально проблематика вимірювання фізичних величин з виділеними моделями і мірами ілюструється схемою, наведеною на рис. 2.12 [532].

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 [532].

Ці твердження дозволили запропонувати математичні моделі поля забруднення повітря у виді векторного випадкового поля, неоднорідного за просторовими аргументами, нестаціонарного в часі, та такого, що залежить від впливу різних факторів.



Рис. 2.12. Схематичне зображення формування результату контролю фізичних величин

Запропоновані математичні моделі інтенсивності інформаційних параметрів забруднення повітря (ІІПЗП) в просторі і часі сформульовані наступним чином:

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

$$\Xi_n\left(\boldsymbol{\omega},\mathbf{r},t\right)=\left\{\xi_i\left(\boldsymbol{\omega}_\mathbf{i},\mathbf{r},t\right),\, i=\overline{1,n}\right\}\in_{n\ll N}\left\{\xi_j\left(\boldsymbol{\omega}_\mathbf{j},\mathbf{r},t\right),\, j=\overline{1,N}\right\}; \tag{2.2}$$

2. *n*-вимірний випадковий процес

$$\Xi_{n,r_0}\left(\boldsymbol{\omega},t\right)=\left\{\xi_i\left(\omega_i,t\right),\, i=\overline{1,n}\right\}, \tag{2.3}$$

$$\Xi_n\left(\boldsymbol{\omega},\mathbf{r},t\right)\Big|_{r=r_0}=\begin{Bmatrix}[1] & \xi_1\left(\omega_1,t\right)\\ [2] & \xi_2\left(\omega_2,t\right)\\ \vdots & \vdots\\ [n] & \xi_n\left(\omega_n,t\right)\end{Bmatrix}; \tag{2.4}$$

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

$$\begin{Bmatrix}u_1\left(t_1\right) & \dots & u_1\left(t_k\right)\\ u_2\left(t_1\right) & \dots & u_2\left(t_k\right)\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ u_n\left(t_i\right) & \dots & u_n\left(t_k\right)\end{Bmatrix}=\left\{u_i\left(t_j\right),\, i=\overline{1,n},\ j=\overline{1,k}\right\}, \tag{2.5}$$

на виході *n*-канального модуля ІІПЗП, 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 [532].

На практиці у більшості випадків контролю забруднення повітря оцінювання просторово-часових характеристик досліджуваних як детермінованих, так і випадкових сигналів та сигнальних полів можуть використовуються моделі, загальний вид яких в залежності від сукупності аргументів наведено в табл. 2.4 [532].

З метою використання вказаних моделей в завданнях контролю за умов обмежених областей простору G і скінченних інтервалів часу T, застосовується наступна багатовимірна індикаторна функція

$$I(\boldsymbol{r},t)=\begin{cases}1, \boldsymbol{r}\in G \text{ і } t\in T;\\ 0, \boldsymbol{r}\notin G \text{ або } t\notin T.\end{cases} \qquad (2.6)$$

Слід відмітити, що в залежності від обраної системи координат, аргументи моделі з виразу (2.6) можуть змінюватись, а частинні випадки їх варіантів мають меншу кількість аргументів [532].

Таблиця 2.4 – Моделі сигналів та сигнальних полів у вимірюваннях

Аргументи / Види функцій	$\omega\in\Omega$ $t\in T$	$\omega\in\Omega$ $x\in R$ $t\in T$	$\omega\in\Omega$ $(x,y)=\boldsymbol{\rho}\in R^2$ $t\in T$	$\omega\in\Omega,$ $(x,y,z)=\boldsymbol{r}\in R^3$ $t\in T$
Детерміновані	число $\alpha\in R$, одновимірна функція $u(t)\in R$	двовимірна функція $u(x,t)\in R$	тривимірна функція $u(\boldsymbol{\rho}, t)\in R$	чотиривимірна функція $u(\boldsymbol{r}, t)\in R$
Випадкові	величина $\xi(\omega)\in R$, процес $\xi(\omega,t)\in R$, як двовимірна випадкова функція	тривимірне просторово-часове поле $\xi(\omega,x,t)\in R$	чотиривимірне просторово-часове поле $\xi(\omega;\boldsymbol{\rho};t)\in R$	п’ятивимірне просторово-часове поле $\xi(\omega;\boldsymbol{r};t)\in R$

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 $\xi(\omega,\boldsymbol{r},t)$ оцінюються [532].:

- математичне сподівання поля

$$a(\boldsymbol{r},t)=\mathbf{M}\{\xi(\omega,\boldsymbol{r},t)\}; \tag{2.7}$$

- дисперсія поля

$$\sigma^2(\boldsymbol{r},t)=\mathbf{D}\{\xi(\omega,\boldsymbol{r},t)\}=\mathbf{M}\left\{\left[\xi(\omega,\boldsymbol{r},t)-a(\boldsymbol{r},t)\right]^2\right\}; \tag{2.8}$$

- автокореляційна функція поля

$$R(\boldsymbol{r}_1,\boldsymbol{r}_2,t_1,t_2)=\mathbf{M}\{[\xi(\omega,\boldsymbol{r}_1,t_1)-a(\boldsymbol{r}_1,t_1)]\times[\xi(\omega,\boldsymbol{r}_2,t_2)-a(\boldsymbol{r}_2,t_2)]\}; \tag{2.9}$$

- структурна функція поля

$$B(\boldsymbol{r}_1,\boldsymbol{r}_2,t_\cdot,t_1)=\mathbf{M}[(\xi(\omega,\boldsymbol{r}_1,t_1)-\xi(\omega,\boldsymbol{r}_2,t_2))^2]. \tag{2.10}$$

Характеристики просторово-часових полів для різних варіантів моделей (табл. 2.4), що отримують за результатами контролю, зведені в табл. 2.5.

Використання сучасних інформаційних технологій вимірювання дає змогу отримати результати контролю не тільки одновимірних, але й багатовимірних сигналів і полів на основі створення і обґрунтування моделей таких сигналів (табл. 2.6) [532].

Кожний конкретний випадок отримання результатів контролю значень і характеристик багатовимірних сигналів і полів потребує самостійного науково-технічного дослідження.

*Міри у задачах контролю***.** В процесі створення інструментарію для контролю параметрів навколишнього середовища міра є його фундаментальною компонентою, на основі якої певна якість об’єкта оцінюється кількісно. Використання міри сприяє формуванню принципово нової кількісної інформації, зменшенню невизначеності характеристик досліджуваних об’єктів, явищ і процесів. Це дає можливість скоригувати відому тріаду методології наукових досліджень «модель – алгоритм – програма» на більш аргументовану і конструктивну – «модель – міра – алгоритм – програма» [532].

Таблиця 2.5 – Характеристики сигналів, що отримуються за результатами їх контролю

Моделі і числові характеристики / Види випадкових полів	Модель	Математичне сподівання	Дисперсія	Автокореляційна функція	Структурна функція
Неоднорідне за просторовими аргументами нестаціонарне в часі	$\xi(\omega; x; t)$ $\xi(\omega; \boldsymbol{\rho}; t)$ $\xi(\omega; \boldsymbol{r}; t)$	$a(x; t)$ $a(\boldsymbol{\rho}; t)$ $a(\boldsymbol{r}; t)$	$\sigma^2(x; t)$ $\sigma^2(\boldsymbol{\rho}; t)$ $\sigma^2(\boldsymbol{r}; t)$	$R(x_1, x_2; t_1, t_2)$ $R(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2; t_1, t_2)$ $R(\boldsymbol{r}_1, \boldsymbol{r}_2; t_1, t_2)$	$B(x_1, x_2; t_1, t_2)$ $B(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_2; t_1, t_2)$ $B(\boldsymbol{r}_1, \boldsymbol{r}_2; t_1, t_2)$
Неоднорідне стаціонарне	$\xi(\boldsymbol{r}; t)$	$a(\boldsymbol{r})$	$\sigma^2(\boldsymbol{r})$	$R(\boldsymbol{r}_1, \boldsymbol{r}_2; t_2 - t_1)$	$B(\boldsymbol{r}_1, \boldsymbol{r}_2; t_2 - t_1)$
Однорідне нестаціонарне	$\xi(\boldsymbol{r}; t)$	$a(\boldsymbol{r})$	$\sigma^2(\boldsymbol{r})$	$R(\boldsymbol{r}_1 - \boldsymbol{r}_2; t_2, t_1)$	$B(\boldsymbol{r}_1 - \boldsymbol{r}_2; t_2, t_1)$
Однорідне і ізотропне, нестаціонарне	$\xi(\boldsymbol{r}; t)$	$a(t)$	$\sigma^2(t)$	$R(\lvert\boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1\rvert; t_1, t_2)$	$B(\lvert\boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1\rvert; t_1, t_2)$
Однорідне стаціонарне	$\xi(\boldsymbol{r}; t)$	a	σ^2	$R(\boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1; t_2 - t_1)$	$B(\boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1; t_2 - t_1)$
Однорідне і ізотропне, стаціонарне	$\xi(\boldsymbol{r}; t)$	a	σ^2	$R(\lvert\boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1\rvert; t_2 - t_1)$	$B(\lvert\boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1\rvert; t_2 - t_1)$

Таблиця 2.6 – Інформаційно-вимірювальні технології для досліджень сигналів

Види технологій	Види моделей вимірюваних сигналів
Інформаційна технологія вимірювань 1D (ТВ–1D)	$\alpha, u(x,t), \xi(\omega), \xi(\omega,t); \xi(\omega; x; t)$
Інформаційна технологія вимірювань 2D (ІТВ–2D)	$u(\boldsymbol{\rho},t), \xi(\omega;\boldsymbol{\rho};t)$
Інформаційна технологія вимірювань 3D (ІТВ–3D)	$u(\boldsymbol{r};t), \xi(\omega;\boldsymbol{r};t)$

Ефективність практичної реалізації і використання мір оцінюється невизначеністю відтворення одиниць фізичних величин. Чим менше невизначеність – тим вищий клас еталону чи засобу вимірювання. Загальновідомо, що кожна країна має національні еталони одиниць фізичних величин. Вагомість номенклатури еталонів і характеристик їх точності оцінюються на рівні валового продукту і вважаються національною скарбницею кожної країни. Найбільш розвинені країни світу мають і найбільшу номенклатуру національних еталонів одиниць фізичних величин [532].

Теорія міри є одним із важливих для практичного застосування розділів математики, в рамках якого обґрунтовуються і визначаються методи створення різних видів мір. Міра знайшла практичне застосування як математична модель мір різних фізичних величин.

У загальному випадку міра є зліченно-адитивною функцією множин, яка набуває тільки невід'ємних значень, включаючи нескінченність. В математиці досліджується ціла низка мір – міри Жордана; Лебега; Лебега-Стільтьєса; стохастична міра та ін. Означення міри Жордана близьке до означення площі, об'єму у просторі. Міра Лебега-Стільтьєса використовується у теорії ймовірностей. Стохастична міра є випадковою зліченно-адитивною функцією множин. Для доведення умови зліченно-адитивності стохастичної міри використовуються різні види збіжності – збіжність за імовірністю; у середньоквадратичному; з імовірністю одиниця. Найбільш широке використання для теорії і практики вимірювань мають числові міри, тобто міри, які набувають числових значень [532].

Ймовірнісна міра на прямій. Математична модель фізичної величини з областю визначення на прямій – випадкова величина $\xi(\omega), \omega \in \Omega$, широко використовується в теорії вимірювання [530, 532].

Випадкова функція $\xi(\omega)$ повністю задається функцією розподілу

$$F(x) = P\{\omega \in \Omega : \xi(\omega) < x\}, x \in R. \qquad (2.11)$$

Ймовірнісна міра для $\xi(\omega)$ як функція множин не може бути безпосередньо записана у загальному вигляді, для неї породжуючою функцією є $F(x)$.

Ймовірнісна міра $P_\mu(x_1, x_2)$ визначає ймовірність того, що випадкова неперервна функція $\xi(\omega)$ набуває значень із неперервного числового інтервалу $[x_1, x_2]$, $x_1, x_2 \in R$, $x_1 < x_2$, тобто

$$P_\mu(x_1, x_2) = P\{\omega \in \Omega : x_1 \le \xi(\omega) \le x_2\} = F(x_2) - F(x_1). \qquad (2.12)$$

Таким чином, одновимірна ймовірнісна міра $P_\mu[x_1, x_2] \ge 0$ є невід'ємною, нормованою і безрозмірною з областю значень [0, 1].

Для більш складних випадкових функцій, наприклад, двовимірного випадкового вектора $\Xi_2(\omega) = (\xi_1(\omega), \xi_2(\omega))$, де $\{\xi_i(\omega_i), i = 1,2\}$ – одновимірні випадкові величини, ймовірнісна міра вектора визначається також більш складно з використанням двовимірної функції розподілу вектора $F(x,y)$. До прикладу, ймовірнісна міра $P_\mu[x \pm h_x, y \pm h_y]$ знаходження значень випадкового вектора у межах двовимірного числового простору на площині (x,y)

$$((x - h_x) < \xi_1(\omega) < (x + h_x), \quad (y - h_y) \le \xi_2(\omega) < (y + h_y)), \qquad (2.13)$$

визначається виразом

$$P_\mu[x \pm h_x, y \pm h_y] =$$
$$= F(x + h_x, y + h_y) - F(x - h_x, y + h_y) - F(x + h_x, y - h_y) + \qquad (2.14)$$
$$+ F(x - h_x, y - h_y), \quad x, y \in R, \; h_x, h_y > 0.$$

Наведена вище міра стосуються величин, які задані на числовій прямій. В той же час значна частина завдань контролю пов'язана з дослідженням випадкових кутів. Останні, як математичні об'єкти, мають певну специфіку [532].

Ймовірнісна міра на колі. Така міра вводиться для випадкових кутів і відіграє важливу роль в багатьох предметних областях, особливо в задачах контролю забруднення повітря для локалізації джерел забруднення [532].

В загальному випадку випадковий кут з інтервалу, що перевищує $[0, 2\pi)$, який ще називають кумулятивним або повним кутом, тобто $\Psi(\omega) \in R$, $\omega \in \Omega$ визначається наступним чином:

$$\Psi(\omega) = \left[\Psi(\omega)/2\pi\right]^{+} \cdot 2\pi + \psi(\omega), \quad \omega \in \Omega, \tag{2.15}$$

З (2.15) витікає, що, по-перше, між кумулятивним кутом $\Psi(\omega)$ та його дробовою частиною $\psi(\omega) \in [0, 2\pi)$ існує нелінійний функціональний зв'язок виду

$$\psi(\omega) = \Psi(\omega) \bmod 2\pi, \tag{2.16}$$

по-друге, в загальному випадку вимірювані кути можуть виходити за межі інтервалу $[0, 2\pi)$, тобто областю значень випадкового кута $\Psi(\omega)$ (далі цю область позначатимемо літерою Φ) є множина дійсних чисел *R*, а в більшості практичних випадків – скінченний інтервал. Зручну графічну інтерпретацію кутів Φ дає гвинтова лінія (рис. 2.13). Областю значень Φ є множина точок осі ОФ. Область значень $\varphi \equiv \Phi \bmod 2\pi$ є напрямки на площині *x*0*y*, що визначаються точками кола одиничного радіуса, які є проекціями точок гвинтової лінії на площину *x*0*y*. До прикладу, напрямку вектора ρ в площині *xOy* на рис. 2.13 відповідає дуга *AB* довжиною *l*. Цій дузі через гвинтову лінію ставиться у відповідність одне з чисел осі ОФ виду $\varphi + 2\pi k$, $k \in Z$. Числове значення *k*, в разі необхідності вимірювання кумулятивних кутів, задається початковими умовами або в інший спосіб, який визначається особливостями фізичної реалізації експерименту з випадковими кутами [532].

Для коректного завдання ймовірнісної міри на колі необхідно враховувати зазначені вище особливості випадкових кутів, які суттєво

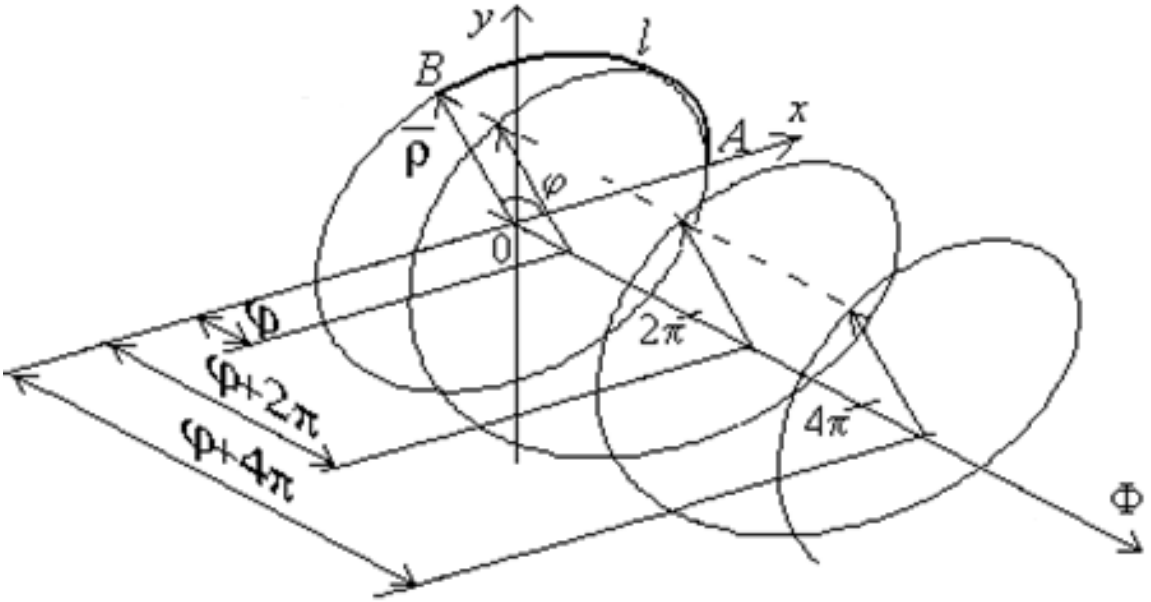
відрізняють їх від випадкових величин. Ці особливості, перш за все, впливають на представлення області значень функції розподілу випадкових кутів [532].

Розглянемо спочатку породжуючу функцію розподілів ймовірностей випадкового кута $\Psi(\omega)$ на розбитті $R_{2\pi}$. Вона має наступний вид

$$F(x) = G(x') + [x/2\pi]^{+} + C, \quad x \in R_{2\pi}, \quad x' \in [0, 2\pi), \tag{2.17}$$

де розбиття дійсної числової осі представляється як

$$R_{2\pi} = \bigcup_{k=-\infty}^{\infty} [x_0, x_0 + 2\pi k), \quad x_0 \in [0, 2\pi). \tag{2.18}$$



$$x = \cos\Phi, \quad y = \sin\Phi, \quad \Phi = 2\pi k + \varphi, \quad k \in Z.$$

Рис. 2.13. Графічне зображення кумулятивних кутів з інтервалу більшому за $[0, 2\pi)$ за допомогою гвинтової лінії

У формулі (2.17) C – постійна складова, зазвичай визначається фізичними умовами проведення експериментів з кумулятивними випадковими кутами.

Породжуюча функція має такі властивості: 1) $F(x)$ монотонно неспадна; 2) $F(x)$ неперервна справа на $x \in R$; 3) $F(-\infty) \to -\infty$; 4) $F(\infty) \to \infty$; 5) $F(x') = F(x') - F(0_{-}), \; x' \in [0, 2\pi)$; 6) $\mathrm{F}(x) - x/2\pi$ є періодичною функцією з

періодом 2π; 7) $F(x+2\pi)-F(x)\equiv 1,\ x\in R$, тобто умова нормування для ймовірнісної міри на колі виконується для довільного інтервалу $[x,\, x+2\pi)$ [532].

Характерний варіант породжуючої функції $F(x)$ для неперервного випадку наведено на рис. 2.14.

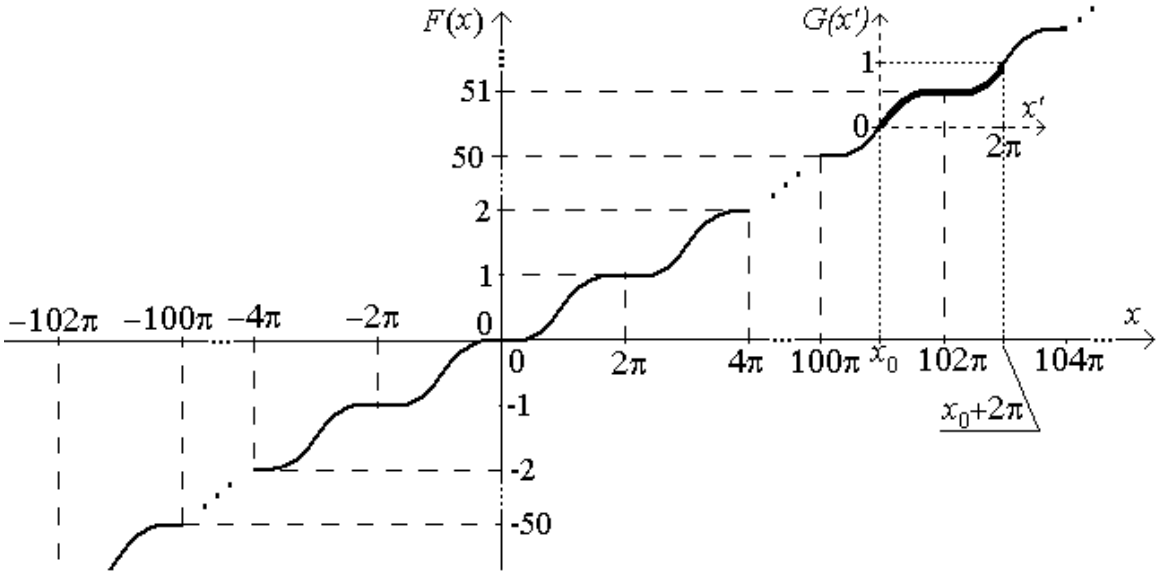


Рис. 2.14. Приклад графіку породжуючої функції $F(x)$

Особливість функції $F(x)$ (2.17) полягає в тому, що вона не задає безпосередньо ймовірнісну міру, а розглядається лише як породжуюча ймовірнісну міру на колі (в інтервалі $[0,\, 2\pi)$) функція за умови довільного визначення початку відліку кутів. Саме така задача – оцінювання статистичних характеристик випадкових кутів в інтервалі значень $[0,\, 2\pi)$ найчастіше зустрічається в практиці кутових вимірювань в задачах контролю забруднення повітря [532].

Функція розподілу ймовірностей випадкового кута $\psi(\omega)$ *на* $[0,\, 2\pi)$. На рис. 2.14 умовно початок відліку кутів позначений точкою x_0, а інтегральну функцію розподілу ймовірностей випадкового кута $G(x')$ на інтервалі $[0,\, 2\pi)$

отримують з (2.17) за умови вибору $C = F(x_0)$ (на рис. 2.14 відповідна ділянка виділена жирною кривою) [532].

Властивості функції розподілу $G(x')$, $x' \in [0, 2\pi)$ повністю співпадають з відомими властивостями функції розподілу ймовірностей випадкової величини, за виключенням того факту, що $G(x')$ задана на скінченному інтервалі $x' \in [0, 2\pi)$, але на різних ділянках *R* [532].

У практиці дослідження випадкових кутів часто обґрунтованою є наступна статистична гіпотеза: для всіх значень *k* функція $G(x')$ є незмінною, тобто $G_k(x') \equiv G(x')$, $\forall k \in Z$, де $G_k(x')$ – функція розподілу $\psi_k(\omega)$ на $[0, 2\pi)$ для довільного значення $k \in Z$ [532].

Ймовірнісна міра $P_\psi(x_1, x_2)$ на колі задає ймовірність того, що випадковий кут $\Psi(\omega)$ набуває значень із певного неперервного числового інтервалу $[x_1, x_2]$, $x_1, x_2 \in R$, $x_1 < x_2$. Вона може бути визначена через породжуючу функцію $F(x)$ (або через функцію $G(x')$)

$$P_\psi(x_1, x_2) = P\{\omega \in \Omega : x_1 < \Psi(\omega) \le x_2\} = \begin{cases} 0, & x_2 \le x_1, \\ F(x_2) - F(x_1) \left(x_1 < x_2 \le x_1 + 2\pi \right), \\ 1, & x_2 > x_1 + 2\pi. \end{cases} \quad (2.19)$$

Із наведених властивостей функції $F(x)$, $x \in R$ витікає, що монотонно неспадна функція $F(x)$ має однакові прирости – $F(x + 2\pi(k+1)) - F(x + 2\pi k) = 1$, $\forall k \in Z$, що не суперечить властивості нормованості ймовірнісної міри для випадкового кута $\psi(\omega)$ на інтервалі $[0, 2\pi)$ [532].

Щільність розподілу ймовірностей $p(x)$ *випадкового кута* $\psi(\omega)$ *на* $[0, 2\pi)$. Функція $p(x)$ для абсолютно неперервних законів розподілу на колі

не тільки має деякі властивості, які співпадають з властивостями функції $p(x)$ на прямій, але й має ряд відмінних від них [532].

Для неперервних функцій $G(x')$ і $F(x)$ випадкових кутів маємо

$$G(x_2)-G(x_1)=F(x_2+2\pi k)-F(x_1+2\pi k)= \\ =\int_{x_1}^{x_2} p(y)dy, x_1, x_2 \in [0,2\pi),\ k \in Z. \tag{2.20}$$

Функція $p(x)$ називається щільністю розподілу ймовірностей випадкового кута $\psi(\omega)$ на $[0, 2\pi)$ і має наступні властивості: 1) $p(x+2\pi)=p(x)$, тобто $p(x)$ є періодичною функцією з періодом 2π; 2) $p(x)\geq 0,\ x\in[0, 2\pi)$; 3) $\int_0^{2\pi} p(x)dx = \int_{2\pi k}^{2\pi(k+1)} p(x)dx = 1,\ k \in Z$.

Існування на колі операції додавання за модулем 2π обумовлює властивість періодичності законів щільності розподілу ймовірності випадкового кута, чим вони суттєво відрізняються від розподілів ймовірності випадкових величин. Врахування цієї особливості є обов'язковою умовою коректного статистичного опрацювання кутових даних. На рис. 2.15 зображено загальний вигляд щільності розподілу ймовірності $p(\theta),\ \theta\in(-\infty,\ \infty)$ випадкового кута $\psi(\omega)$ [532].

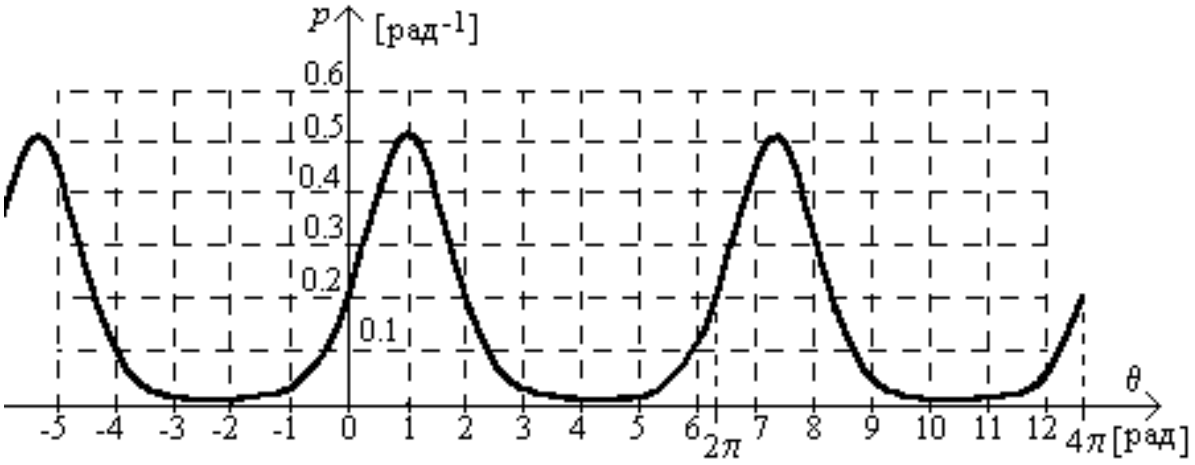


Рис. 2.15. Загальний вигляд щільності розподілу ймовірності кумулятивного випадкового кута

Графік на рис. 2.15 побудовано за умов апріорної невизначеності розташування інтервалу вимірювання $\left[\theta_{\text{п}},\ \theta_{\text{п}}+2\pi\right)$ з початком в точці $\theta_{\text{п}}$, і для якого виконується умова нормування [532]:

$$\int_{\theta_{\text{п}}}^{\theta_{\text{п}}+2\pi} p(\theta)d\theta = 1. \tag{2.21}$$

Щільність розподілу ймовірності $p(\theta)$ (рис. 2.15) періодична з періодом 2π. В теорії статистичного аналізу кутових даних такі розподіли називають одночастотними. Багаточастотні розподіли мають період менший за 2π в певне ціле число разів [532].

Ймовірнісну міру можна задати і через функцію $p(x)$. Періодичний характер цієї функції обумовлює особливість визначення ймовірностей для розподілених на колі випадкових кутових величин. Ймовірність P_q події ω_q з простору Ω, яка полягає в тому, що випадковий кут $\psi(\omega)$ набуде значення з інтервалу $\left[x_q(\mathrm{mod}\,2\pi), x_{q+1}(\mathrm{mod}\,2\pi)\right)$, $x_q, x_{q+1} \in R$ визначається наступним чином [532]:

$$P_q = \begin{cases} P\left\{x_q(\mathrm{mod}\,2\pi) \le \psi(\omega) < x_{q+1}(\mathrm{mod}\,2\pi)\right\},\ \left[x_q/2\pi\right]^+ = \left[x_{q+1}/2\pi\right]^+; \\ P\left\{0 \le \psi(\omega) < x_{q+1}(\mathrm{mod}\,2\pi)\right\} + \\ +P\left\{x_q(\mathrm{mod}\,2\pi) \le \psi(\omega) < 2\pi\right\},\ \left[x_q/2\pi\right]^+ = \left[x_{q+1}/2\pi\right]^+ + 1. \end{cases} \tag{2.22}$$

*Фізичні міри***.** Сучасна трактовка поняття міри фізичної величини для прикладних технічних застосувань формувалась починаючи з 17 ст., коли процедури вимірювання стали методологічно значущими і вкрай важливими для розвитку матеріального виробництва, а номенклатура вимірюваних фізичних величин стрімко збільшувалась [532].

Під мірою фізичної величини розуміється деяка числова функція $\mu(\cdot)$, що ставить у відповідність кожній підмножині A з множини значень фізичної величини X деяке невід'ємне (в загальному випадку іменоване) число

$N = \mu(A)$. Для міри фізичної величини має місце аксіоматика міри множин. Певна відмінність пов'язана з необхідністю вимірювання іменованих та від'ємних за значенням фізичних величин. Остання особливість визначається вибором нуля шкали вимірювання і формально може бути врахована штучним введенням, за певною логічною умовою, знака «–», або врахуванням певної константи *C:* $\mu(A) = \mu(A) - C$ [532].

Характерною властивістю фізичних величин є можливість їх вимірювання, тобто порівняння розміру фізичної величини з інтервалу $\left[x_j,\ x_{j+1}\right)$ з величиною того ж роду і визначеного розміру, який за домовленістю прийнятий за одиницю вимірювання. Методологічно використання мір множин для вимірювань обґрунтовується наступним чином. Розмір фізичної величини, внаслідок дії сукупності різних обтяжуючих факторів, не може бути визначений з як завгодно високою точністю. Тому весь динамічний діапазон вимірювання скалярної фізичної величини *X* доцільно розбити на напівінтервали $\left[x_j,\ x_{j+1}\right),\ j = 1,2,3,\ldots,$ що не перетинаються. Кожний з останніх уявляє певну множину розмірів фізичної величини. На сукупності таких множин будується числова функція з властивостями міри [532].

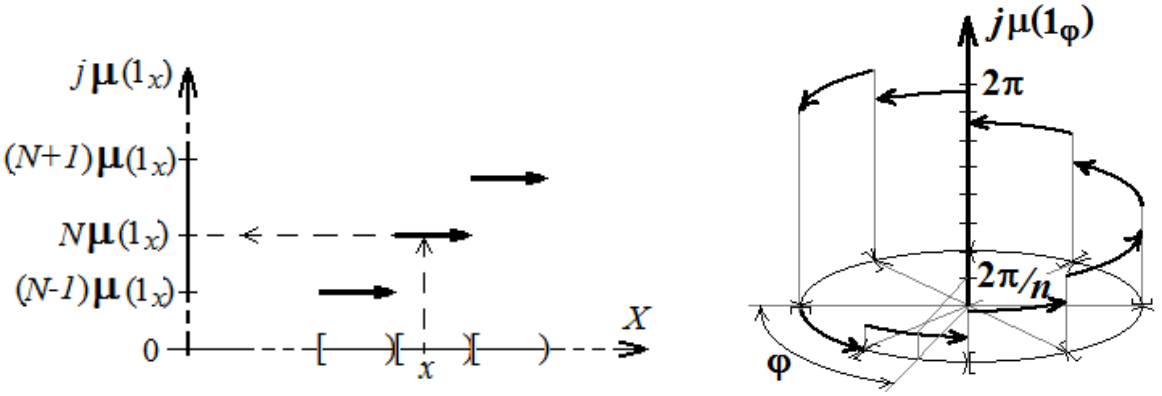
В результаті вимірювання отримують неіменоване число *N*, що виражає відношення розміру *x* вимірюваної величини *X* до міри $\mu(1_x)$, визначеної для заданої одиничної множини 1_x значень *X*. Вибір 1_x і $\mu(1_x)$ встановлюються за домовленістю і обґрунтовується в межах прийнятої системи одиниць фізичних величин. Головна мета вимірювання – встановлення значення *x* фізичної величини X як кількісної оцінки її розміру

$$Y = N \cdot \mu(1_x), \tag{2.23}$$

реалізується на основі відтворення матеріальною мірою розміру фізичної величини. В рівнянні (2.23) не враховано похибки вимірювання і відтворення розміру фізичної величини. Ілюстрація процесу вимірювання скалярної

величини X у випадку, якщо $\mu(\cdot)$ задана ступінчастою функцією, наведено на рис. 2.16*а*. Для прикладу, це можуть бути діапазони значень концентрації забруднюючих речовин, а за потраплянням значення вимірюваної концентрації забруднювача в певний діапазон можна фіксувати результати контролю [532].

З рис. 2.16*а* видно, що будь-який розмір фізичної величини з множини її значень в межах кожного з напівінтервалів відображається одним іменованим числом. Однозначні міри фізичних величин відтворюють один її розмір, багатозначні – декілька розмірів. В цілому міри фізичних величин є зовнішніми по відношенню до предмету вимірювання (контролю) [532].



а) *б*)

Рис. 2.16. Графічна ілюстрація процесу вимірювання фізичних величин розподілених на прямій (*а*) та на колі (*б*)

Тепер розглянемо особливості мір кутових величин, які мають певну специфіку.

Відомо, що для кола з скінченним значенням радіуса величина центрального кута визначається як відношення довжини дуги, на яку спирається цей кут, до довжини радіусу цього кола. Величина повного центрального кута дорівнює 2π. Природно, що в основу визначення міри кута покладено число 2π. Міра кута – число 2π чи його доля, може відтворюватись або фізично за допомогою кругових шкал чи лімбів (що має місце, до прикладу в квадрантах, транспортирах, секстантах тощо), або

математично на основі спеціальних розрахунків засобами обчислювальної техніки з практично необмеженою точністю незалежно від місця і часу проведення вимірювань. Останнє робить кутові (та фазові) вимірювання особливо привабливими з огляду на забезпечення єдності вимірювань та досягнення високих показників точності [532].

Ілюстрація процесу вимірювання плоского кута у випадку, якщо його міра $\mu(1_\varphi)$ задана ступінчастою функцією, наведено на рис. 2.16*б*. В цілому формування значення вимірюваного кута відбувається аналогічно (2.23) з тією відмінністю, що ступінчаста функція задається в циліндричній системі координат. Суттєва особливість формування міри для кутових вимірювань полягає в тому, що область значень кута визначається через коло – замкнену криву. Кутам 0 і 2π відповідає одна точка кола, в якій міра кута має стрибок на 2π [532].

*Концепція узгодження фізичних та ймовірнісних мір у вимірюваннях***.** В основі всіх методів вимірювання покладено ідею відображення множини значень вимірюваних величин, якості об’єктів у число – іменоване чи неіменоване. Це дає змогу формалізувати результати контролю і застосувати математичні методи їх опрацювання [532].

У випадку, коли досліджується дія фізичних законів за відомих умов, виконується теоретичний аналіз математичних формул, рівнянь контролю у макросвіті, відображення множин значень якостей об’єктів чи процесів та множин чисел вважають ізоморфним. Доведення або обґрунтування ізоморфізму для контролю відіграє фундаментальну роль. Це пов’язано з наступним. У загальному випадку задача вимірювання є оберненою задачею теорії сигналів і систем. У разі доведення ізоморфізму розв'язок такої задачі існує [532].

У вимірювальному експерименті множина M значень властивостей об’єкта дослідження гомоморфна множині M' параметрів та характеристик отримуваних інформаційних сигналів. Властива гомоморфізму

невзаємооднозначність відображення в загальному випадку дає змогу розв’язувати ПЗ теорії вимірювань (моделювання) і ускладнює розв’язання ОЗ (отримання результатів контролю). Завданням ПЗ є відшукання наслідків відомих або заданих причин (інформаційних сигналів як функції певних властивостей об’єкту контролю (ОК)), тобто "вздовж" причинно-наслідкових зв'язків (рис. 2.17) [532].

ОЗ полягають у визначенні причин (властивостей об’єктів за відомими сигналами), тобто в напрямку "проти" причинно-наслідкових зв'язків. ПЗ виникають на етапі проектування, аналізу засобу контролю, а обернені – під час контролю [532].

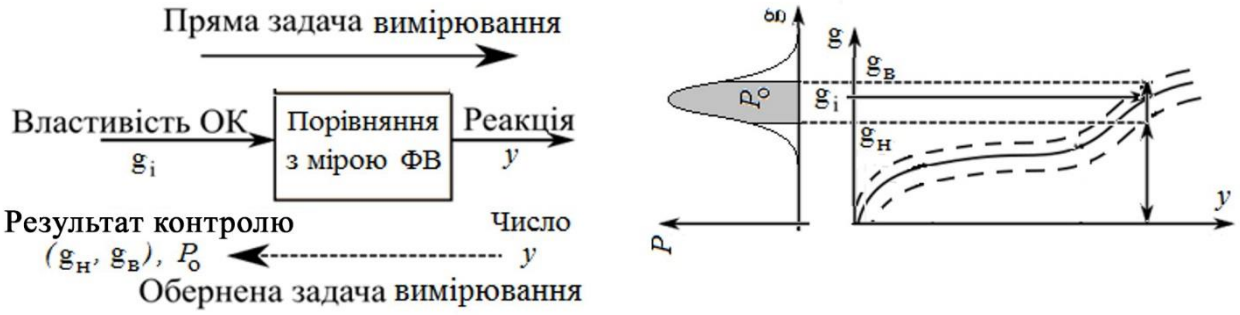


Рис. 2.17. Схематична ілюстрація формування результату контролю ($g_в$, $g_н$ – верхня і нижня межі невизначеності)

Спільне використання фізичної і ймовірнісної мір для формування результату контролю дає змогу певною мірою подолати проблему гомоморфізму контролю (рис. 2.18).

Фізична міра дає тільки одне число (чи вектор у випадку багатомірних вимірювань). Результат контролю, як вектор, утворений певним набором приписаних вимірюваній величині значень разом з іншою суттєвою інформацією, формується за допомогою ймовірнісної міри. До структури на рис. 2.17 слід навести наступні коментарі [532].

1. Сенсор може виконувати перетворення фізичної величини g в іншу – K(g), для якої значно легше створити міру М1, що відтворює одиницю її розміру – K_0(g).

2. Застосування міри М1 до розміру K(g), в загальному випадку вимірювання поля в точці простору з декартовими координатами (x, y, z) в момент часу t дає іменоване число

$$y(g,x,y,z,t)=\left[K(g,x,y,z,t)/K_0(g)\right]^{+}K_0(g). \qquad (2.24)$$

3. Внаслідок дії вектора $\bar{p}$ неврахованих випадкових факторів обернене перетворення $y \to g$ дає не одне значення, а множину значень з певного околу.

4. Результат контролю отримуємо не тільки як наслідок застосування технічних засобів порівняння розміру контролюючої фізичної величини зі значенням, прийнятим за одиницю її контролю, але й як результат застосування ймовірнісної міри, певного математичного апарату та математичної статистики [532].

Отже, отримання змістовного результату контролю ґрунтується на використанні узгодженої, нерозривно поєднаної сукупності фізичних та ймовірнісних мір [532].

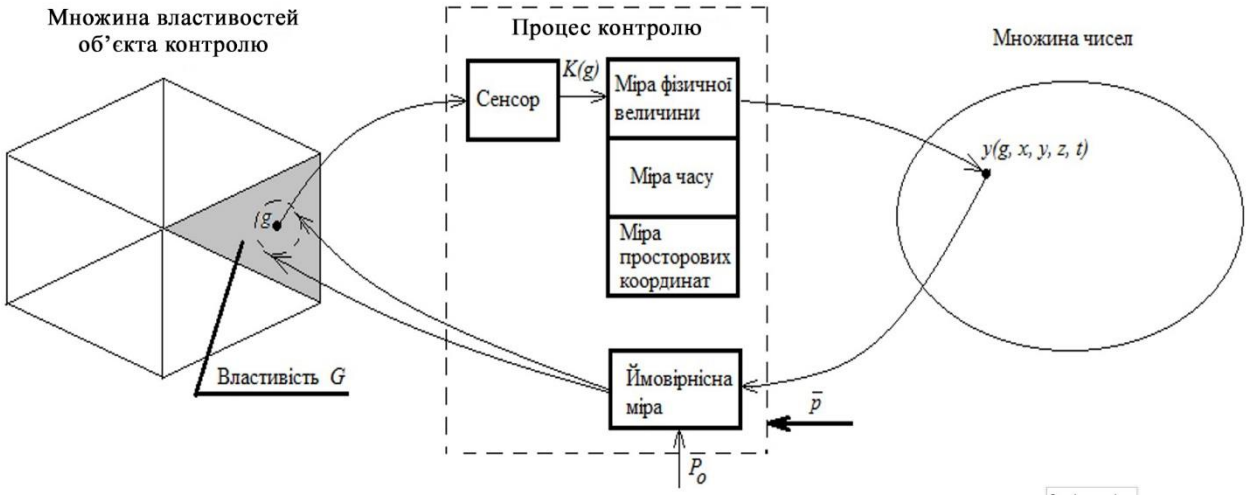


Рис. 2.18. Спільне використання фізичної і ймовірнісної мір в задачах контролю

Використання мір в системі контролю забруднення повітря. Вирішення завдання забезпечення однорідності і стаціонарності міри в теорії інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) в кожному конкретному випадку вимірювання має свою специфіку і характерні особливості. В той же час можна виділити загальні види міри для використання в системах контролю [532]:

- М1 – міра одиниці фізичної величини;
- М2 – міра одиниці просторових координат місця проведення вимірювань;
- М3 – міра одиниці часу проведення контролю;
- М4 – ймовірнісна нормована міра точності контролю;
- М5 – міра захисту інформації конкретного процесу контролю.

На рис. 2.19 наведено схематичне зображення використання вказаних мір в процесі перетворення вимірювальної інформації функціональними модулями системи контролю.

Частинний випадок захисту інформації – підвищення завадостійкості контролю, застосовується практично для всіх процесів контролю. У структурі ІВС, зазвичай, є модуль фільтрації сигналів, що забезпечує підвищення відношення сигнал/завада на виході системи контролю [532].

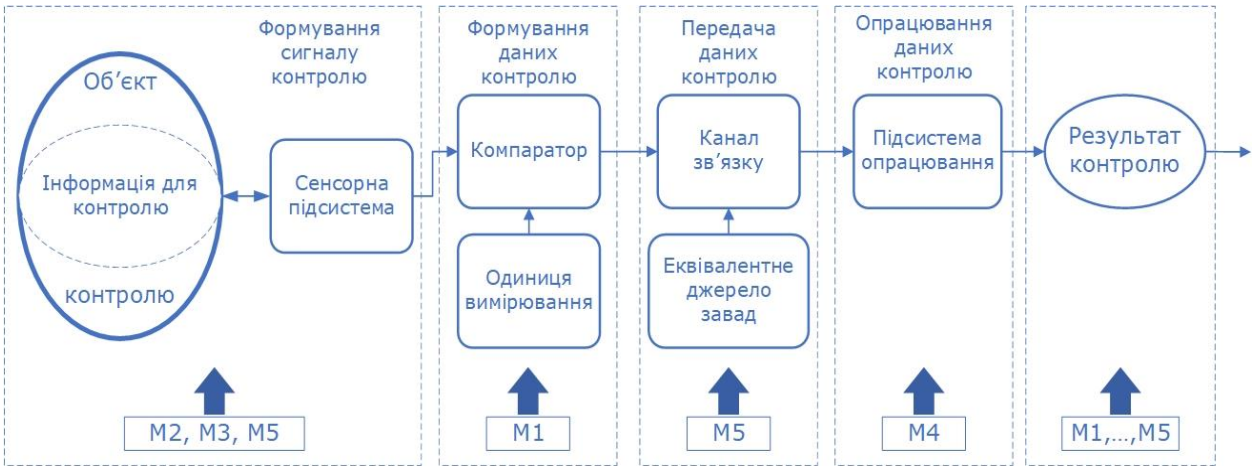


Рис. 2.19. Схематичне зображення використання різних мір в структурі процесу перетворення вимірювальної інформації в системі контролю

У випадку вимірювань $n>1$ фізичних величин є n мір типу М1 одиниць досліджуваних величин. Перші три міри М1-М3 є фізичними мірами (у загальному випадку маємо набір $n+2$ мір). Однорідність і стаціонарність таких мір визначаються характеристиками технічних засобів їх формування [532].

Ймовірнісна нормована міра є нефізичною мірою, а мірою сукупності дії різних випадкових факторів на значення і характеристики даних і результату контролю під час їх проведення. Використання ймовірнісної міри у статистичному опрацюванні даних контролю дає можливість підвищити точність результату контролю у порівнянні з точністю даних вимірювань [532].

Міра захисту інформації при контролі є комплексною. Міра формується значною кількістю факторів, дія більшості з яких має випадковий характер. Це дає можливість визначати таку міру як ймовірнісну, яка може бути застосована як для окремих операцій, наприклад передачі даних вимірювань по каналах зв'язку, реєстрації результату вимірювань, так і для всього процесу контролю у цілому [532].

Значення і точність вказаних п'яти мір трансформується відповідно у значення і точність даних та результатів контролю ІВС.

2.4. Інформаційно-вимірювальні технології контролю забруднення повітря для вирішення задач енергетичної інформатики

В останні роки в роботах вчених країн ЄС, США, Китаю та інших розвинутих країн розглядаються проблеми енергетичної інформатики (ЕІ), включаючи використання інформаційних технологій для зменшення споживання енергії, використання інформаційно-комунікаційних технологій для підвищення енергоефективності, зменшення викидів забруднюючих речовин, для інтеграції децентралізованих поновлювальних джерел енергії в єдину енергосистему та інші. ЕІ – це нова дисципліна, сучасний напрям інформатики. Вирішення проблем ЕІ потребує застосування інформаційних технологій інших напрямів. Зокрема відомо, що методи і засоби вимірювань

завжди були, є і будуть основним інструментарієм пізнання світу. Ресурси сучасних ІВТ є вагомою складовою інформаційних технологій різних напрямів інформатики, включаючи ЕІ. Саме методи і засоби ІВТ дають можливість отримувати первинну інформацію при дослідженнях об'єктів ЕІ, до яких можна віднести процес забруднення повітря об'єктами енергетики [533].

Спочатку наведемо в якості ілюстрації висвітлення основних об'єктів дослідження (ОД) даної роботи спрощену схему використання енергії та інформаційних технологій, яка зображена на рис. 2.20.

Система тверджень. Для обґрунтування завдань використання ІВТ при вирішенні проблем ЕІ застосуємо відомий підхід. Цей підхід базується на формуванні первинних систем аксіом та законів. У подальшому це дає змогу використати їх для різного роду інтерпретацій, формувань та визначень. Прикладом цього є:

- ✓ закони класичної механіки (Ньютон);
- ✓ аксіоми теорії ймовірностей (Колмогоров);
- ✓ закони передачі інформації (Шеннон);
- ✓ рівняння електродинаміки (Максвел);
- ✓ закони термодинаміки та інші.

На основі такого підходу і результатів аналізу значної кількості науково-технічних і прикладних публікацій по кібернетиці, інформатиці, вимірюваннях та інших напрямів досліджень [534-536], можна сформувати наступну систему тверджень [533].

Твердження 1. ОД ЕІ є джерела природнього і антропогенного походження різних видів енергії і режими їх функціонування в часі і просторі та мережі передачі енергії до споживачів.

Твердження 2. Отримання первинної інформації ОД ЕІ базується на використанні методів і засобів ІВТ.

Твердження 3. Ефективність і достовірність результатів вирішення проблем ЕІ визначається програмним забезпеченням опрацювання апріорних

та апостеріорних даних досліджень на основі методів математичної фізики, обчислювальної математики, теорії міри, теорії ймовірності і математичної статистики, теорії вимірювань.

Твердження 4. Якість результатів досліджень ЕІ оцінюється на основі концепції невизначеності результатів вимірювань, нормативно-правове забезпечення якої використовується міжнародною спільнотою фахівців з вимірювань.

Твердження 5. Різноплановість і різноманітність первинної інформації ОД ЕІ визначається дією різних джерел енергії, формуючи різні поширені варіанти сигнально-завадних комбінацій, при цьому зменшення значень відношення сигнал / завада (< 3) суттєво зменшує ефективність, достовірність і якість отриманих результатів досліджень.

У ряді випадків використовують наступну умовну укрупнену класифікацію проблем та задач досліджень:

– дослідження у широкому сенсі;
– дослідження у вузькому сенсі.

Дослідження ОД ЕІ можна також класифікувати базуючись на застосуванні запропонованої системи тверджень, а саме:

– у широкому сенсі застосовуються твердження 1–4;
– у вузькому сенсі застосовуються твердження 1–5.

Наведена вище система тверджень дає можливість інтегрувати різні напрями інформатики в рамки ЕІ і сформувати її концепцію. Прикладом можуть бути апаратно-програмні комплекси для отримання, передачі та опрацювання даних погодних спостережень з метою моніторингу і прогнозу погоди. Прикладом також може бути апаратно-програмний комплекс екологічних досліджень (зокрема, контроль забруднення атмосферного повітря), глобальна структура якого створюється і розвивається на сьогодні.

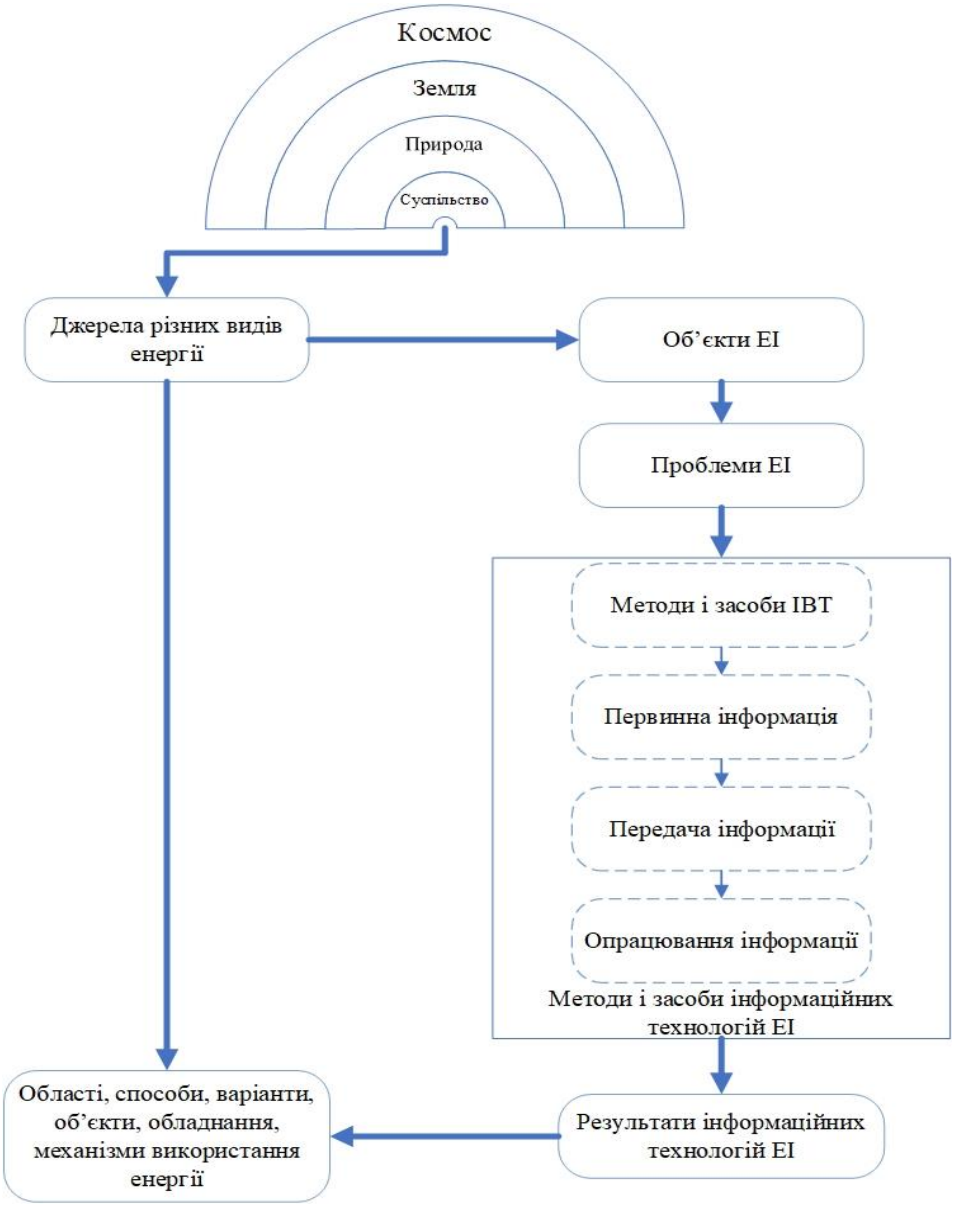


Рис. 2.20. Спрощена схема використання інформації ОД ЕІ

Розглянемо потенційні можливості використання ресурсів ІВТ для вирішення проблем ЕІ.

Методи досліджень. Можливості і ресурси ІВТ дозволяють реалізувати наступні методи досліджень:

– дослідження з використанням теоретичного базису фізичних і математичних моделей ОД, проведення із застосуванням апаратно-програмних засобів обчислювальної техніки математичного (комп'ютерного) моделювання;

– фізичне моделювання на основі використання фізичних моделей складних гомогенних та гетерогенних ОД, яке включає обґрунтований вибір методів і засобів ІВТ досліджень і проведення моделюючого експерименту;

– експериментальне дослідження реального ОД на основі використання методів і засобів ІВТ досліджень і проведення натурного експерименту.

Наведені методи досліджень ОД методами і засобами ІВТ є потенційно можливими для використання, але в кожному конкретному випадку кожен метод може застосовуватися самостійно. Відмітимо, що методи теоретичних досліджень (математичне моделювання) і фізичного моделювання базуються на використанні апріорних даних. На основі методу експериментальних досліджень формуються апостеріорні дані натурного експерименту, проводиться їх опрацювання і формуються результати досліджень, які корегують і узгоджують результати математичного і фізичного моделювання.

Клас моделей ОД. При проведенні аналізу ОД використовуються фізичні і математичні моделі. Кожна з моделей, фізична і математична, доповнюють одна одну, і незважаючи на той факт, що вони є копіями і не в повній мірі відповідають реальним ОД, при дослідженнях моделі відіграють фундаментальний характер. В основному використовується більш формалізована математична модель.

Математична модель ОД є сукупністю знань, гіпотез, початкових і граничних умов, сформованих за апріорними даними досліджень, записана з використанням математичних об’єктів, термінів і символів у вигляді логічно витриманої, несуперечливої структури, яка відображає в часі і просторі основні властивості, характеристики ОД.

Математичними моделями є системи багатовимірних гільбертових детермінованих і випадкових функцій та систем диференціальних та інтегральних рівнянь. Основні характеристики таких моделей визначаються в рамках енергетичної (для випадкових – кореляційної) теорії.

Поєднання фізичних і ймовірнісних мір. Поєднання фізичних і ймовірнісних мір обумовлене як необхідністю опрацювання власне первинних даних, так і їх якістю під час отримання, передачі і опрацювання методами і апаратно-програмними засобами ІВТ в часі і просторі. Приклади такого поєднання мір детально розглянуті в [532].

Варіанти отримання первинної інформації досліджень (ІД). Для виконання завдань використання ресурсів ІВТ при вирішенні проблем ЕІ використовуються три варіанти формування первинної інформації при взаємодії і взаємозв'язку ОД з сенсорними засобами ІВТ:

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 власну, відмінну від вхідної, реакцію (відгук), а вхідний сигнал впливу вважають стимулом чи подразником.

Схематичне зображення такої взаємодії показано на рис. 2.21.

Методи і апаратно-програмні засоби ІВТ. Для проведення теоретичних, моделюючих і експериментальних досліджень ОД використовуються методи і апаратно-програмні засоби ІВТ, можливості і ресурси яких базуються на сучасних досягненнях розвитку науки, техніки і виробництва. Типовий інструментарій ІВТ включає:

– теоретичний базис досліджень з використанням методів математичної фізики, математичного аналізу, обчислювальної і дискретної математики, теорії систем і сигналів, теорії вимірювань та інші;

– апаратно-програмні засоби ІВТ.

Оцінка якості результатів дослідження. Кожне дослідження методів і засобів ЕІ завершується оцінюванням якості отриманих результатів.

Процедури оцінювання дуже різноманітні, мають широкий діапазон складності і визначаються завданням дослідження.

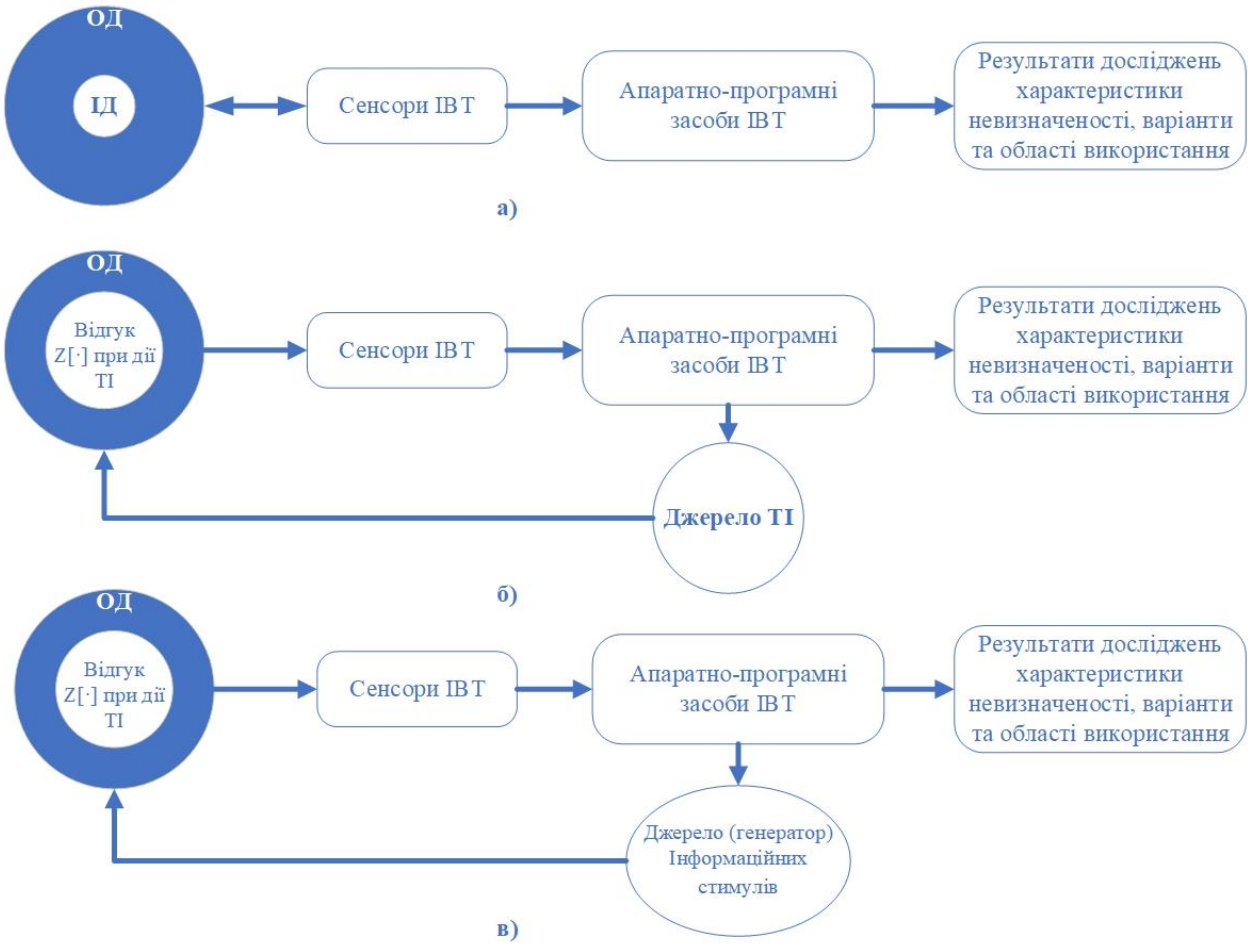


Рис. 2.21. Схематичне зображення трьох варіантів (*а*, *б*, *в*) формування первинної інформації досліджень методами і апаратно-програмними засобами ІВТ (ІД – інформація досліджень, ТІ – тестова інформація)

В одному випадку, результат – це відповідь на поставлене питання «так чи ні» (наприклад, завдання контролю), в іншому – результат використовується для обґрунтувань завдань нового дослідження (наприклад, визначити залежність ймовірності виявлення сигналу при дії завад від відношення «сигнал/завада» (ВСЗ)). Складність врахування залежності характеристик виявлення сигналів при дії завад від відношення «сигнал/завада» обумовлено тим, що ВСЗ має більш загальне визначення:

$$ВСЗ \sim \frac{\text{інтенсивність енергії інформаційного сигналу ОД}}{\text{інтенсивність енергії сумарного сигналу завад}}. \qquad (2.25)$$

На практиці знайти значення такого відношення складно тому, що:

✓ ВСЗ є відношенням двох сигнальних полів як багатовимірних функцій часу $t \in T$ і простору $(x, y, z) \in R^3$, а в загальному випадку і випадкової змінної $\omega \in \Omega$;

✓ сигнальні поля ОД і завад не діють окремо, а проявляються адитивною або мультиплікативною їх комбінацією;

✓ енергії сигнального поля ОД і завад змінюються по різному в апаратно-програмних модулях систем проведення досліджень.

Проблематика виявлення сигналів при дії завад є важливою для широкого кола галузей, і трансформується в низку самостійних задач, розв'язок кожної з яких базується на конкретній сигнально-завадній ситуації.

Принцип інтеграції різних систем знань в інформатику дає можливість в рамках ЕІ використати для якості оцінювання результатів досліджень відомий метод концепції невизначеності вимірювань. Дана концепція широко використовується з 1993 р. міжнародною спільнотою, має нормативно-правове забезпечення, яке використовується кожною країною.

Природньо, що розвиток ЕІ потребує відповідної інтеграції у використанні інформаційних технологій, включаючи ІВТ. ІВТ є невід'ємною складовою практично всіх інформаційних технологій. Тому актуальним є завдання більш детально розглянути використання ресурсів ІВТ при вирішенні проблем ЕІ. В дисертації об'єктами досліджень є об'єкти ЕІ, а для їх дослідження використовуються методи і апаратно-програмні засоби ІВТ. Спочатку була наведена система тверджень, яка адаптує використання ресурсів ІВТ для вирішення проблем ЕІ. Це відомий підхід формування відповідних дисциплін і напрямів на основі застосування системи аксіом і законів. Проблематика ЕІ умовно розділена на 2 варіанти: в широкому і вузькому сенсах. Перший варіант включає всю проблематику ЕІ, яка в своїх дослідженнях не використовує відношення «сигнал-завад». Другий варіант

враховує відношення «сигнал-завада», який суттєво впливає на результати дослідження, і відповідно, на їх достовірність і ефективність.

Кореляційна функція шумових сигналів. Для встановлення параметрів технічного стану засобів ІВТ і режимів функціонування об'єктів і систем енергетики, розроблений спосіб визначення взаємної кореляційної функції шумових сигналів. В основі винаходу поставлена задача вдосконалення способу визначення взаємної кореляційної функції шумових сигналів для встановлення технічного стану чи режиму роботи досліджуваної системи шляхом статистичного опрацювання даних вимірювань реалізацій стаціонарних та нестаціонарних шумових сигналів, що дозволяє інтегрально визначати штатний режим роботи системи, адаптивно враховувати специфіку і характерні особливості роботи конкретної досліджуваної системи, підвищити завадостійкість [537].

Поставлена задача вирішується тим, що у способі визначення взаємної кореляційної функції шумових сигналів шляхом вимірювання інформаційних сигналів, що надходять від об'єкта контролю, визначення значень взаємної кореляційної функції шумових сигналів здійснюється за допомогою цифрової підсистеми обробки інформаційних сигналів за формулою

$$R_{xy}(\Delta tk) = \frac{1}{n-k}\sum_{j=1}^{n-k}[x(t_j) - a_x]\cdot[y(t_j + \Delta tk) - a_y], \quad k = \overline{0,m}, \; m < 0{,}1n, \tag{2.26}$$

де $\{x(t_j),\ j = \overline{i,n}\}$ – реалізація стаціонарної компоненти шумового сигналу, що сформована на основі застосування способу емпіричної модової декомпозиції до первинних даних вимірювань $\{X(t_j),\ j = \overline{i,n}\}$ досліджуваного шумового сигналу, $\{y(t_j),\ j = \overline{i,n}\}$ – реалізація стаціонарного білого шуму з емпіричним законом розподілу ймовірності $p_x(y)$ часового ряду $\{x(t_j)\}$, a_x і a_y – статистичні оцінки математичного сподівання відповідних часових рядів $\{x(t_j)\}$ і $\{y(t_j)\}$, Δtk – зсув по часу [537].

Обчислення значень взаємної кореляційної функції $R_{xy}(\Delta tk)$ дозволяє отримати статистичну оцінку імпульсної перехідної функції стохастично еквівалентного формуючого лінійного фільтра. При цьому реалізація білого шуму $y(t_j)$ використовується в якості зразкової міри тестування систем і дає можливість статистично оцінити імпульсну перехідну функцію реального діючого лінійного формуючого фільтра. Така діагностична ознака досліджуваної системи є інтегральною і враховує дії всіх факторів, адаптованих до закону розподілу досліджуваного реального шумового сигналу [537].

Застосування цифрової підсистеми обробки інформаційних сигналів дозволяє проводити визначення значень $R_{xy}(k)$ на основі статистичного опрацювання даних вимірювань $\{x(t_j)\}$, формування реалізацій білого шума $\{y(t_j)\}$ з урахуванням емпіричного закону розподілу $\{x(t_j)\}$, як відповідних значень діагностичної ознаки роботи досліджуваної системи [537].

Спосіб визначення взаємної кореляційної функції шумових сигналів реалізується наступним чином.

На першому етапі проводиться вимірювання первинного шумового сигналу у виді часового ряду $\{X(t_j),\ j=\overline{i,n}\}$ на заданому інтервалі часу $t\in[0,T]$, як реалізація нестаціонарного шумового сигналу на дискретній часовій гратці з рівномірним кроком $\Delta t = t_{j+1} - t_j$. Далі інформаційний сигнал через інтерфейсний канал передачі даних надходить до цифрової підсистеми обробки інформаційних сигналів, де формується стаціонарна компонента досліджуваного шумового сигналу $\{x(t_j),\ j=\overline{i,n}\}$ шляхом використання відомого способу емпіричної модованої декомпозиції, з метою вилучення з первинного часового ряду $\{X(t_j),\ j=\overline{i,n}\}$ періодичних і трендових компонент, які обумовлюють нестаціонарність первинного шумового сигналу. Підтвердження стаціонарності сформованого часового ряду $\{x(t_j),\ j=\overline{i,n}\}$ на

основі класичного методу перевірки статистичних гіпотез і використання статистичних критеріїв Стьюдента і Фішера обґрунтовує процес подальшого статистичного опрацювання даних контролю. Для часткового випадку, коли первинні дані вимірювання $\{X(t_j),\ j=\overline{i,n}\}$ є реалізацією стаціонарного процесу, має місце $X(t_j)\equiv \mathrm{x(t_j)}\ j=\overline{i,n}$. Далі на базі статистики шумового сигналу $\{x(t_j),\ j=\overline{i,n}\}$ визначається його емпірична щільність розподілу ймовірності $p_x(y)$ у виді гістограми. На кінцевому етапі проводиться статистичне оцінювання взаємної кореляційної функції $R_{xy}(\Delta tk)$ [537].

Запропонований спосіб принципово відрізняється від відомих способів вимірювань кореляційної функції шумових сигналів за рахунок проведення емпіричної модової декомпозиції перед знаходженням взаємної кореляційної функції. Також за рахунок сформованої реалізації білого шуму в якості зразкової міри запропонований спосіб враховує емпіричний закон розподілу ймовірності досліджуваного шумового сигналу [537].

На основі результатів виконаних теоретичних досліджень і проведених комп'ютерних вимірювальних експериментів показано, що застосування запропонованого способу визначення взаємної кореляційної функції $R_{xy}(\Delta tk)$ дає можливість отримати завадостійку діагностичну ознаку стану і режиму функціонування досліджуваної системи, яка може використовуватися самостійно, а також у сукупності з відомими діагностичними ознаками, що в цілому дає змогу значно підвищити вірогідність процесу діагностики системи [537].

2.5. Висновки до розділу

1. Запропоновано ієрархічну структуру енергетичної системи як СТО, що дозволило застосувати концепцію Smart Energy для комплексного контролю теплотехнічного обладнання. Використання такої структури дозволяє виявити, локалізувати та усунути несправності до того, як об'єкт контролю

стане повністю несправним. Запропоновано набір сенсорів та пристроїв, що можуть входити до складу системи контролю СТО, реалізованої за принципами концепції Smart Energy: термопари/терморезистори, акселерометри, вимірювальні мікрофони, сенсори електричних величин, сенсори тиску, лічильники електричної та теплової енергії, сенсори газів. Як елемент комплексної системи контролю СТО, запропоновано ієрархічну структуру системи контролю забруднення повітря. Особливістю такої структури є формування відповідних даних на різних ієрархічних рівнях та доступу до них відповідних груп користувачів. Запропонована структура системи контролю забруднення повітря об'єктами енергетики на базі технології Smart Energy забезпечує надійність та безпеку функціонування об'єктів енергетики, сприяє зменшенню екологічного навантаження на повітря в межах міст чи агломерацій та покращенню самопочуття населення.

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

3. Запропоновані математичні моделі поля забруднення повітря у виді векторного випадкового поля, неоднорідного за просторовими аргументами,

нестаціонарного 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 у просторі і часі та інше.

4. Запропонована система тверджень визначення завдань використання ресурсів ІВТ для вирішення проблем енергетичної інформатики, основою якої є первинні дані, зокрема і дані систем контролю забруднення повітря. Розглянуті потенціальні можливості використання ресурсів ІВТ: методи математичного та комп'ютерного моделювання, методи фізичного моделювання, методи проведення натурного експерименту з використання апріорних і апостеріорних даних; моделі об'єктів при різних режимах їх функціонування на основі систем багатовимірних детермінованих і випадкових функцій часу і простору; поєднання фізичних та ймовірнісних мір для оцінювання якості даних при отриманні, передачі та опрацюванні інформації; варіанти формування первинної інформації на основі апаратної взаємодії і взаємозв'язку ОД сенсорними засобами ІВТ; методи і апаратно-програмні засоби ІВТ, які базують на використанні сучасних досягнень науки, техніки і виробництва; оцінювання якості результатів дослідження ІВТ проводиться на основі концепції невизначеності результатів вимірювань.

РОЗДІЛ 3
МЕТОДИ ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ ОБ'ЄКТАМИ ЕНЕРГЕТИКИ

3.1. Особливості кореляційного аналізу для пошуку взаємозв'язку між складовими енергетичного балансу та рівнем викидів забруднюючих речовин

Для дослідження взаємозв'язку між складовими енергетичного балансу (типами спожитих енергоносіїв, галузями, що їх споживають, і сектором перетворення) та викидами забруднюючих речовин в повітрі (CO_2, SO_2, NO_2, CO, $PM_{2,5}$, PM_{10}) застосований кореляційний аналіз [538, 539]. В таблиці 3.1 приведені сукупності, що досліджувалися на взаємозв'язок між величинами *X* та *Y*.

Коефіцієнт кореляції характеризує щільність стохастичного лінійного зв'язку між двома випадковими величинами *X* та *Y* із нормальним законом розподілу:

$$r = \frac{\operatorname{cov}(X,Y)}{\sigma(X)\cdot\sigma(Y)} = \frac{\mathbf{M}\left\{\left(X-\mathbf{M}\{X\}\right)\cdot\left(Y-\mathbf{M}\{Y\}\right)\right\}}{\sqrt{\mathbf{D}(X)\cdot\mathbf{D}(Y)}}, \qquad (3.1)$$

де **cov**(*X*,*Y*) – оператор коваріації випадкових величин *X* та *Y*; $\sigma(X)$ та $\sigma(Y)$ – дисперсії величин *X* та *Y* відповідно.

При цьому, якщо $r = 0$, то величини *X* та *Y* є незалежними; якщо $0 < |r| < 1$, то величини *X* та *Y* характеризуються стохастичним зв'язком; якщо $|r| = 1$, то величини *X* та *Y* характеризуються функціональним зв'язком.

Так як запропоновані значення в табл. 3.1 допустимо мають лінійну залежність, можна розрахувати статистичну оцінку коефіцієнта кореляції:

$$\hat{r} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(y_i-\bar{y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2\cdot\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\bar{y}\right)^2}} \qquad (3.2)$$

де $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$; $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n}$.

Таблиця 3.1 – Набори величин *X* та *Y*, що досліджувалися на щільність стохастичного взаємозв'язку

X \ *Y*	CO_2	SO_2	NO_2	CO	PM_{10}	$PM_{2,5}$
Типи енергетичних ресурсів:						
вугілля і торф	$A_{1,1}$	$A_{1,2}$	$A_{1,3}$	$A_{1,4}$	$A_{1,5}$	$A_{1,6}$
сира нафта	$A_{2,1}$	$A_{2,2}$	$A_{2,3}$	$A_{2,4}$	$A_{2,5}$	$A_{2,6}$
природній газ	$A_{3,1}$	$A_{3,2}$	$A_{3,3}$	$A_{3,4}$	$A_{3,5}$	$A_{3,6}$
атомна енергія	$A_{4,1}$	–	–	–	$A_{4,5}$	$A_{4,6}$
гідроелектроенергія	–	–	–	–	–	–
вітрова, сонячна енергії	–	–	–	–	–	–
біопаливо, відходи	$A_{5,1}$	$A_{5,2}$	$A_{5,3}$	$A_{5,4}$	$A_{5,5}$	$A_{5,6}$
теплоенергія	–	–	–	–	–	–
Сектор перетворення:						
газові підприємства	$A_{6,1}$	$A_{6,2}$	$A_{6,3}$	$A_{6,4}$	$A_{6,5}$	$A_{6,6}$
ТЕЦ	$A_{7,1}$	$A_{7,2}$	$A_{7,3}$	$A_{7,4}$	$A_{7,5}$	$A_{7,6}$
нафтопереробні заводи	$A_{8,1}$	$A_{8,2}$	$A_{8,3}$	$A_{8,4}$	$A_{8,5}$	$A_{8,6}$
виробництво брикетів	$A_{9,1}$	$A_{9,2}$	$A_{9,3}$	$A_{9,4}$	$A_{9,5}$	$A_{9,6}$
коксові підприємства	$A_{10,1}$	$A_{10,2}$	$A_{10,3}$	$A_{10,4}$	$A_{10,5}$	$A_{10,6}$
теплоцентралі	$A_{11,1}$	$A_{11,2}$	$A_{11,3}$	$A_{11,4}$	$A_{11,5}$	$A_{11,6}$
електростанції	$A_{12,1}$	$A_{12,2}$	$A_{12,3}$	$A_{12,4}$	$A_{12,5}$	$A_{12,6}$
інші перетворення	$A_{13,1}$	$A_{13,2}$	$A_{13,3}$	$A_{13,4}$	$A_{13,5}$	$A_{13,6}$
Галузі-споживачі енергоресурсів:						
деревообробна та вир. деревини	$A_{14,1}$	$A_{14,2}$	$A_{14,3}$	$A_{14,4}$	$A_{14,5}$	$A_{14,6}$
текстильна і шкіряна	$A_{15,1}$	$A_{15,2}$	$A_{15,3}$	$A_{15,4}$	$A_{15,5}$	$A_{15,6}$
будівництво	$A_{16,1}$	$A_{16,2}$	$A_{16,3}$	$A_{16,4}$	$A_{16,5}$	$A_{16,6}$
целюлозно-паперова і поліграфічна	$A_{17,1}$	$A_{17,2}$	$A_{17,3}$	$A_{17,4}$	$A_{17,5}$	$A_{17,6}$
транспортне устаткування	$A_{18,1}$	$A_{18,2}$	$A_{18,3}$	$A_{18,4}$	$A_{18,5}$	$A_{18,6}$
кольорова металургія	$A_{19,1}$	$A_{19,2}$	$A_{19,3}$	$A_{19,4}$	$A_{19,5}$	$A_{19,6}$
неметалічні мінеральні продукти	$A_{20,1}$	$A_{20,2}$	$A_{20,3}$	$A_{20,4}$	$A_{20,5}$	$A_{20,6}$
харчова і тютюнова	$A_{21,1}$	$A_{21,2}$	$A_{21,3}$	$A_{21,4}$	$A_{21,5}$	$A_{21,6}$
машинобудування	$A_{22,1}$	$A_{22,2}$	$A_{22,3}$	$A_{22,4}$	$A_{22,5}$	$A_{22,6}$
хімічна і нафтохімічна	$A_{23,1}$	$A_{23,2}$	$A_{23,3}$	$A_{23,4}$	$A_{23,5}$	$A_{23,6}$
гірничодобувна	$A_{24,1}$	$A_{24,2}$	$A_{24,3}$	$A_{24,4}$	$A_{24,5}$	$A_{24,6}$
чорна металургія	$A_{25,1}$	$A_{25,2}$	$A_{25,3}$	$A_{25,4}$	$A_{25,5}$	$A_{25,6}$
інші	$A_{26,1}$	$A_{26,2}$	$A_{26,3}$	$A_{26,4}$	$A_{26,5}$	$A_{26,6}$

Так як об’єми розглянутих вибірок n відносно малі, то оцінка $\hat{r}$ буде зміщеною відносно основного параметра r. Тому для усунення цього недоліку використовується скоригований коефіцієнт кореляції, що визначається за формулою:

$$\hat{r}' = \hat{r}\left[1 + \frac{1-\hat{r}^2}{2(n-3)}\right]. \tag{3.3}$$

Значення статистичної оцінки коефіцієнта кореляції не може дорівнювати 0. Тому виникає необхідність перевірки значущості цього коефіцієнта. Гіпотеза H_0 про випадковість відхилень від 0 вибіркового коефіцієнта кореляції при генеральній сукупності з параметром $r = 0$, перевіряється за t-розподілом Стьюдента зі ступенями вільності $(n\text{-}2)$ та заданим рівнем значущості α:

$$\hat{t} = \frac{\hat{r}\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\hat{r}^2}}. \tag{3.4}$$

При цьому, якщо $\left|\hat{t}\right| \geq t_{v,\alpha}$, то гіпотеза H_0 $(r = 0)$ не приймається і коефіцієнт кореляції є значущим.

Розподіл $\hat{r}$ відрізняється від гауссового розподілу тим сильніше, чим більше його абсолютне значення та чим менший об’єм вибірки. Розподіл статистичної оцінки $\hat{r}$ може бути наближено зведений до нормального за допомогою Z-перетворення Фішера:

$$\overset{*}{Z} = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{1+\hat{r}}{1-\hat{r}}\right) = 1{,}1513\lg\left(\frac{1+\hat{r}}{1-\hat{r}}\right),\ \hat{r} \neq 1. \tag{3.5}$$

Математичне сподівання для оцінки $\overset{*}{Z}$ визначається за формулою

$$\mathbf{M}\left[\overset{*}{Z}\right] = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{1+r}{1-r}\right),\ \hat{r} \neq 1, \tag{3.6}$$

а дисперсія оцінки $\overset{*}{Z}$

$$\sigma^2\left[\overset{*}{Z}\right] \approx \frac{1}{n-3},\ n > 3. \tag{3.7}$$

Інтервал визначення $-1 \le r \le 1$ для цього перетворення переходить в інтервал $-\infty < \overset{*}{Z} < \infty$. Обернене перетворення виражається через $\hat{r} = tgh\overset{*}{Z}$.

Значущість коефіцієнта кореляції визначається за формулою

$$\hat{U} = \frac{\overset{*}{Z}}{\sqrt{\sigma^2\left[\overset{*}{Z}\right]}} = \overset{*}{Z}\sqrt{n-3}. \qquad (3.8)$$

Це значення порівнюється з граничним значенням u_p – значенням квантиля нормального нормованого розподілу, що відповідає заданому рівню довірчої ймовірності. Якщо $\left|\hat{U}\right| \ge u_p$, то коефіцієнт кореляції визначається значущим.

При малих об'ємах досліджуваних вибірок n значення $\hat{r}$ значно розсіюється в околі значення r, що знижує точність оцінки коефіцієнта кореляції. В такому випадку, необхідно використовувати не статистику з нормальним розподілом $\hat{U}$, а t-статистику $t = \frac{\overset{*}{Z}}{s}$, що має розподіл Стьюдента з кількістю ступенів вільності $v = n - 2$ (s – оцінка СКВ величини $\overset{*}{Z}$).

Статистичний коефіцієнт кореляції $\hat{r}$ є обґрунтованою точковою оцінкою коефіцієнта кореляції r. Для того, щоб оцінити його статистичну надійність, необхідно обчислити довірчий інтервал, всередині якого із ймовірністю P визначають шуканий коефіцієнт кореляції генеральної сукупності:

$$tgh\overset{*}{Z}_1 \le r \le tgh\overset{*}{Z}_2, \qquad (3.9)$$

де $\overset{*}{Z}_{1,2} = \overset{*}{Z} \mp \frac{u_{(1+P)/2}}{\sqrt{n-3}}$, $u_{(1+P)/2}$ – квантиль нормального розподілу.

Для n<25 границі надійного інтервалу обчислюють за наступною формулою:

$$r_н^в = \hat{r} \pm \frac{\left(1-\hat{r}^2\right)}{2n} \pm u_{(1+P)/2}\frac{1-\hat{r}^2}{\sqrt{n-1}}, n > 2. \qquad (3.10)$$

Гіпотеза про значущість коефіцієнта кореляції між випадковими величинами може бути перевірена шляхом порівняння статистичної оцінки коефіцієнта кореляції $\hat{r}$ та його граничного значення r_α, що є $\frac{1-\alpha}{2}$-квантилем r-розподілу при $r = 0$. Кореляція між випадковими величинами є значущою, якщо $|\hat{r}| \geq r_\alpha$. Граничні значення r_α може бути визначене за наступними формулами:

- для n>100

$$r_\alpha = \frac{1}{\sqrt{n-1}} u_{1-\alpha/2}, \tag{3.11}$$

- для n>20

$$r_\alpha = \sqrt{\frac{t_{1-\alpha/2}^2}{n-2+t_{1-\alpha/2}^2}}, \tag{3.12}$$

- для n>5

$$r_\alpha = \frac{e^{\frac{2}{\sqrt{n-3}}u_{1-\alpha/2}} - 1}{e^{\frac{2}{\sqrt{n-3}}u_{1-\alpha/2}} + 1} \tag{3.13}$$

де $u_{1-\alpha/2}$ та $t_{1-\alpha/2}$ – $(1-\alpha/2)$-квантилі нормального розподілу та розподілу Стьюдента з n-2 степенями вільності.

Для прикладу розрахуємо коефіцієнт кореляції та його границі для набору величин $A_{1,1}$. Цей набір величин характеризує взаємозв'язок між спожитим вугіллям і торфом (тис. т.н.е.) та викидами CO_2 в атмосферне повітря за період 2007-2018 рр.

На першому етапі за формулою (3.2) розрахуємо статистичну оцінку коефіцієнта кореляції $\hat{r}$:

$$\sum_{i=1}^{12} x_i = 432925; \quad \sum_{i=1}^{12} y_i = 1981; \quad \sum_{i=1}^{12} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = 1804412;$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{12} (x_i - \bar{x})^2} = 21238{,}53; \quad \sqrt{\sum_{i=1}^{12} (y_i - \bar{y})^2} = 90{,}50; \quad r = \frac{1804412}{21238{,}53 \cdot 90{,}50} \approx 0{,}939.$$

Так як об'єми вибірок достатньо малі (n=12), розрахуємо значення скоригованого коефіцієнта кореляції за формулою (3.3):

$$\hat{r}' = 0,939 \cdot \left[1 + \frac{1-(0,939)^2}{2 \cdot (12-3)} \right] \approx 0,945.$$

Перевіримо значущість отриманої оцінки за формулою (1.5):

$$\hat{t} = \frac{0,945 \cdot \sqrt{12-2}}{\sqrt{1-(0,945)^2}} \approx 9,135.$$

Для n=12 та α=0,05 – $t_{v,\alpha}$=1,812, таким чином $|\hat{t}| = 9,135 \geq t_{10,0,05} = 1,812$ і гіпотеза H_0: r = 0 не приймається, тому оцінений коефіцієнт кореляції визнається значущим.

Наступним етапом необхідно перевірити значущість отриманої оцінки за формулою (3.13).

Значення $(1-\alpha/2)$ квантиля нормального розподілу для рівня значущості $\alpha = 0,05$ становить $u_{1-\alpha/2} = 1,96$. Отже, граничне значення коефіцієнта кореляції становить:

$$r_\alpha = \frac{\exp\left(1,96 \cdot \frac{2}{\sqrt{12-3}}\right) - 1}{\exp\left(1,96 \cdot \frac{2}{\sqrt{12-3}}\right) + 1} = 0,574.$$

Оскільки $|\hat{r}'| = 0,945 \geq r_\alpha = 0,574$, то гіпотеза H_0: r = 0 не приймається і обчислений коефіцієнт кореляції визнається значущим.

Останнім етапом розрахуємо довірчі границі коефіцієнта кореляції для P = 0,95 за формулами (1.6) – (1.10):

$$\overset{*}{Z} = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{1+0,945}{1-0,945}\right) \approx 1,783; \quad \overset{*}{Z}_1 = 1,783 - \frac{1,96}{\sqrt{9}} = 1,129; \quad \overset{*}{Z}_2 = 1,783 + \frac{1,96}{\sqrt{9}} = 2,436;$$

$$tgh\,\overset{*}{Z}_1 \approx 0,811; \quad tgh\,\overset{*}{Z}_2 \approx 0,985.$$

Таким чином для сукупності $A_{1,1}$ скоригований коефіцієнт кореляції та його довірчі границі становлять: $0,811 \leq \hat{r}' = 0,945 \leq 0,985$.

Результати кореляційного аналізу згідно всіх розглянутих наборів величин A_1-A_{26} наведена в Додатку Г.

Необхідно відмітити, що при кореляційному аналізі наборів величин A_1-A_5 бралися до уваги дані в період з 2007 по 2018 рр., оскільки дані щодо використаних типів енергетичних ресурсів доступні тільки за цей період.

При аналізі інших наборів величин враховано, що дані щодо викидів забруднюючих речовин доступні лише за наступні періоди: CO_2 – 2007-2018 рр., SO_2, NO_2, CO – 2000-2018 рр., PM_{10}, $PM_{2,5}$ – 2004-2018 рр. При аналізі також враховано дані щодо викидів забруднюючих речовин тільки від стаціонарних джерел.

Нижче на рисунках 3.1-3.4 наведені розраховані значення скоригованого коефіцієнта кореляції та його верхня і нижня границі для кожної із розглянутих сукупностей A_1-A_{26}.

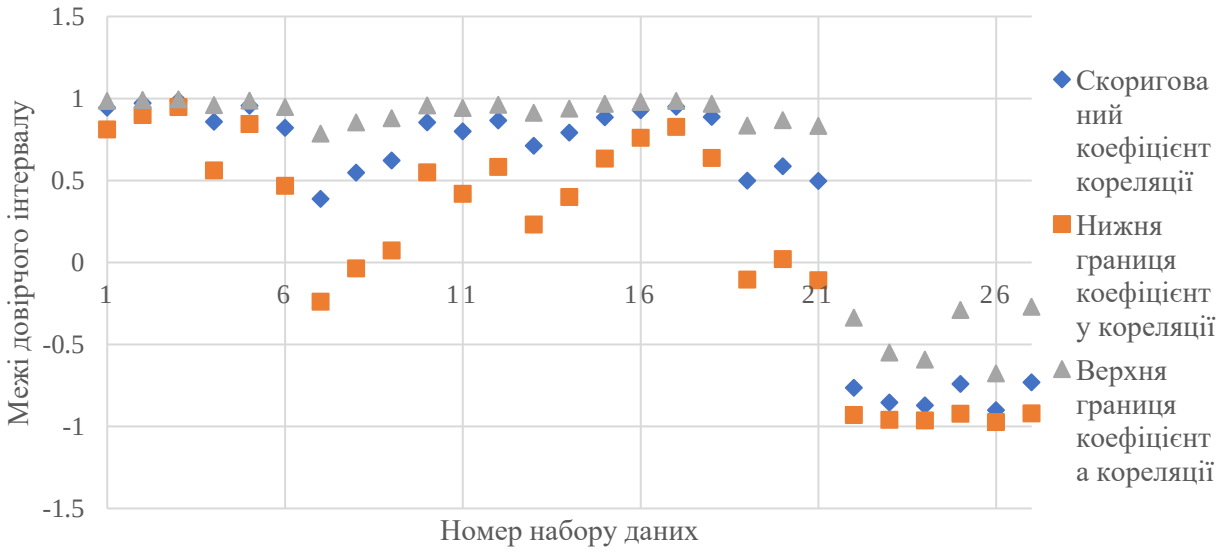


Рис. 3.1. Значення $\hat{r}'$, $tgh\overset{*}{Z}_1$ та $tgh\overset{*}{Z}_2$ для наборів величин A_1-A_5 (величина X – типи енергоресурсів)

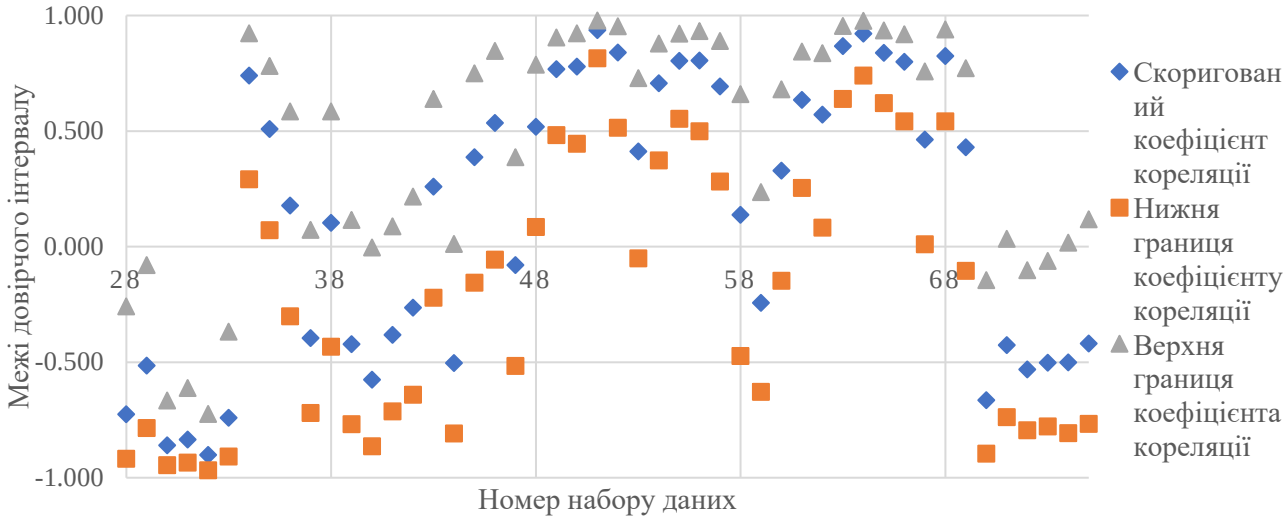


Рис. 3.2. Значення $\hat{r}'$, $tgh\overset{*}{Z}_1$ та $tgh\overset{*}{Z}_2$ для наборів величин A_6-A_{15}

(величина X – сектор перетворення)

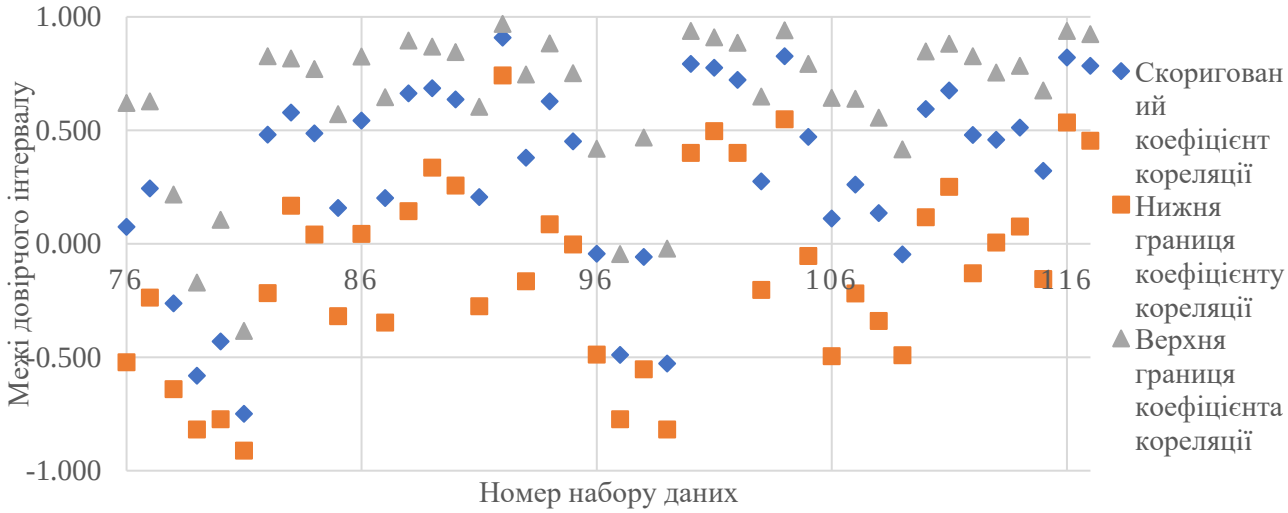


Рис. 3.3. Значення $\hat{r}'$, $tgh\overset{*}{Z}_1$ та $tgh\overset{*}{Z}_2$ для наборів величин A_{14}-A_{20}

(величина X – галузі-споживачі енергоресурсів)

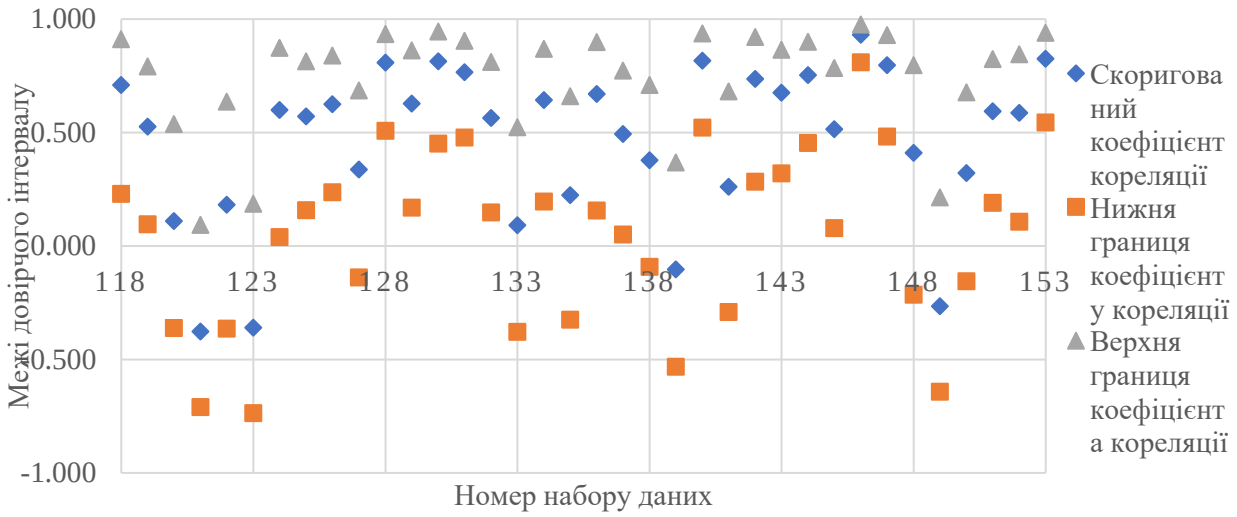


Рис. 3.4. Значення $\hat{r}'$, $tgh\overset{*}{Z}_1$ та $tgh\overset{*}{Z}_2$ для наборів величин A_{21}-A_{26} (величина X – галузі-споживачі енергоресурсів)

У додатку А14 наведено дані щодо проведеного кореляційного аналізу зі спаданням величини коефіцієнта кореляції.

Аналіз показав, що сильною функціональною залежністю між розглянутими величинами X та Y володіють набори $A_{1,3}$, $A_{1,2}$, та $A_{1,5}$, що характеризують залежність споживання вугілля та торфу з викидами NO_2, SO_2 та PM_{10} відповідно ($\hat{r}'$>0,95).

В таблиці 3.2 наведено кількість наборів величин, що мають заданий діапазон значень коефіцієнта кореляції. Діапазон $\hat{r}'$>0,95 характеризує функціональний зв'язок; 0,95≥$\hat{r}'$>0,5 – додатний кореляційний зв'язок; 0,5≥$\hat{r}'$>0,05 – незначний додатній кореляційний зв'язок; 0,05≥$\hat{r}'$>-0,05 – відсутність кореляційного зв'язку; -0,05≥$\hat{r}'$>-0,5 – незначний від'ємний кореляційний зв'язок; -0,5≥$\hat{r}'$>-1 – від'ємний кореляційний зв'язок.

Таблиця 3.2 – Кількість наборів даних із заданим діапазоном коефіцієнта кореляції

Діапазон коефіцієнта кореляції	Кількість наборів величин	Набори величин
$\hat{r}' > 0{,}95$	3	$A_{1,3}$, $A_{1,2}$, $A_{1,5}$
$0{,}95 \geq \hat{r}' > 0{,}5$	72	$A_{3,5}$, $A_{1,1}$, $A_{9,6}$, $A_{25,5}$, $A_{3,4}$, $A_{12,1}$, $A_{16,5}$, $A_{3,6}$, $A_{3,3}$, $A_{11,6}$, $A_{2,6}$, $A_{1,4}$, $A_{2,4}$, $A_{10,1}$, $A_{12,2}$, $A_{18,5}$, $A_{26,6}$, $A_{12,5}$, $A_{1,6}$, $A_{20,5}$, $A_{24,5}$, $A_{23,1}$, $A_{22,5}$, $A_{10,5}$, $A_{10,4}$, $A_{2,5}$, $A_{12,3}$, $A_{25,6}$, $A_{18,1}$, $A_{3,2}$, $A_{20,6}$, $A_{9,5}$, $A_{18,2}$, $A_{9,4}$, $A_{23,2}$, $A_{25,3}$, $A_{7,1}$, $A_{25,1}$, $A_{18,3}$, $A_{3,1}$, $A_{21,1}$, $A_{10,3}$, $A_{10,6}$, $A_{16,2}$, $A_{19,6}$, $A_{25,2}$, $A_{24,1}$, $A_{16,1}$, $A_{23,5}$, $A_{16,3}$, $A_{11,4}$, $A_{17,1}$, $A_{22,6}$, $A_{22,3}$, $A_{2,3}$, $A_{22,1}$, $A_{19,5}$, $A_{26,4}$, $A_{4,5}$, $A_{26,5}$, $A_{15,2}$, $A_{22,2}$, $A_{11,5}$, $A_{23,3}$, $A_{2,2}$, $A_{15,5}$, $A_{9,1}$, $A_{21,2}$, $A_{9,3}$, $A_{25,4}$, $A_{20,3}$, $A_{7,2}$
$0{,}5 \geq \hat{r}' > 0{,}1$	37	$A_{4,1}$, $A_{4,6}$, $A_{24,2}$, $A_{15,3}$, $A_{15,1}$, $A_{20,1}$, $A_{18,6}$, $A_{12,4}$, $A_{20,2}$, $A_{17,2}$, $A_{12,6}$, $A_{10,2}$, $A_{26,1}$, $A_{2,1}$, $A_{8,6}$, $A_{16,6}$, $A_{24,3}$, $A_{22,4}$, $A_{11,3}$, $A_{20,4}$, $A_{26,3}$, $A_{18,4}$, $A_{19,2}$, $A_{24,6}$, $A_{8,4}$, $A_{14,2}$, $A_{23,6}$, $A_{16,4}$, $A_{15,6}$, $A_{21,5}$, $A_{7,3}$, $A_{15,4}$, $A_{11,1}$, $A_{19,3}$, $A_{19,1}$, $A_{21,3}$, $A_{7,5}$
$0{,}1 \geq \hat{r}' > -0{,}1$	6	$A_{23,4}$, $A_{14,1}$, $A_{17,3}$, $A_{19,4}$, $A_{17,5}$, $A_{9,2}$
$-0{,}1 \geq \hat{r}' > -0{,}5$	14	$A_{24,4}$, $A_{11,2}$, $A_{14,3}$, $A_{8,3}$, $A_{26,2}$, $A_{21,6}$, $A_{21,4}$, $A_{8,2}$, $A_{7,4}$, $A_{13,6}$, $A_{7,6}$, $A_{13,2}$, $A_{14,5}$, $A_{17,4}$
$-0{,}5 \geq \hat{r}' > -1$	21	$A_{13,5}$, $A_{13,4}$, $A_{8,5}$, $A_{6,2}$, $A_{17,6}$, $A_{13,3}$, $A_{8,1}$, $A_{14,4}$, $A_{13,1}$, $A_{6,1}$, $A_{5,6}$, $A_{5,4}$, $A_{6,6}$, $A_{14,6}$, $A_{5,1}$, $A_{5,1}$, $A_{6,4}$, $A_{5,2}$, $A_{6,3}$, $A_{5,3}$, $A_{5,5}$, $A_{6,5}$

На рис. 3.5-3.7 відображені набори величин та прямі апроксимації, що відповідають найвищому, близькому до 0, та найнижчому розрахованому коефіцієнту кореляції із усіх розглянутих сукупностей.

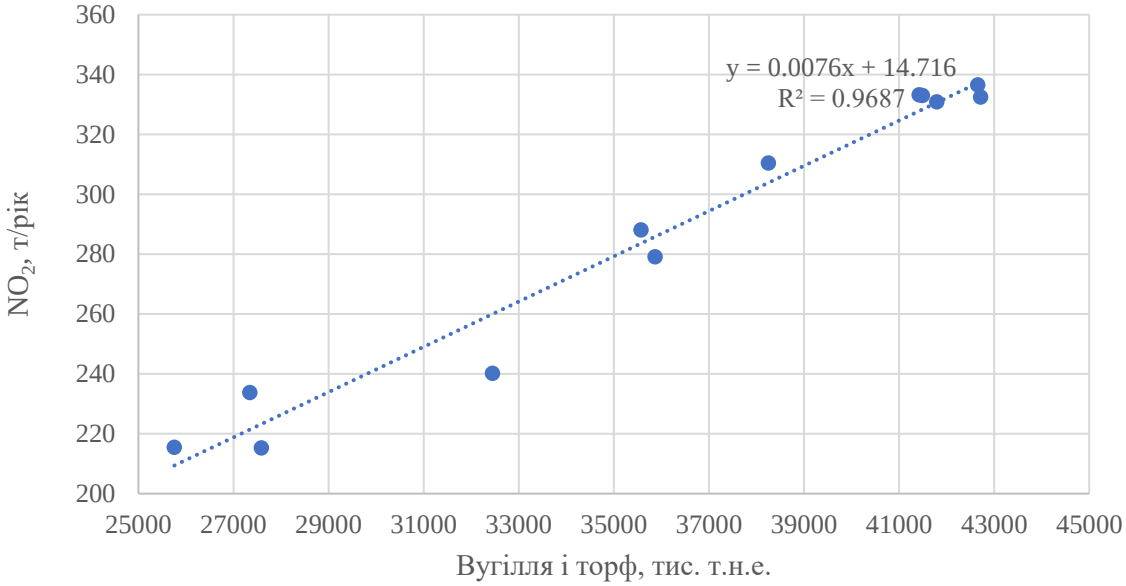


Рис. 3.5. Найвище значення скоригованої оцінки коефіцієнта кореляції (0,986) серед розглянутих сукупностей (набір даних $A_{1,3}$)

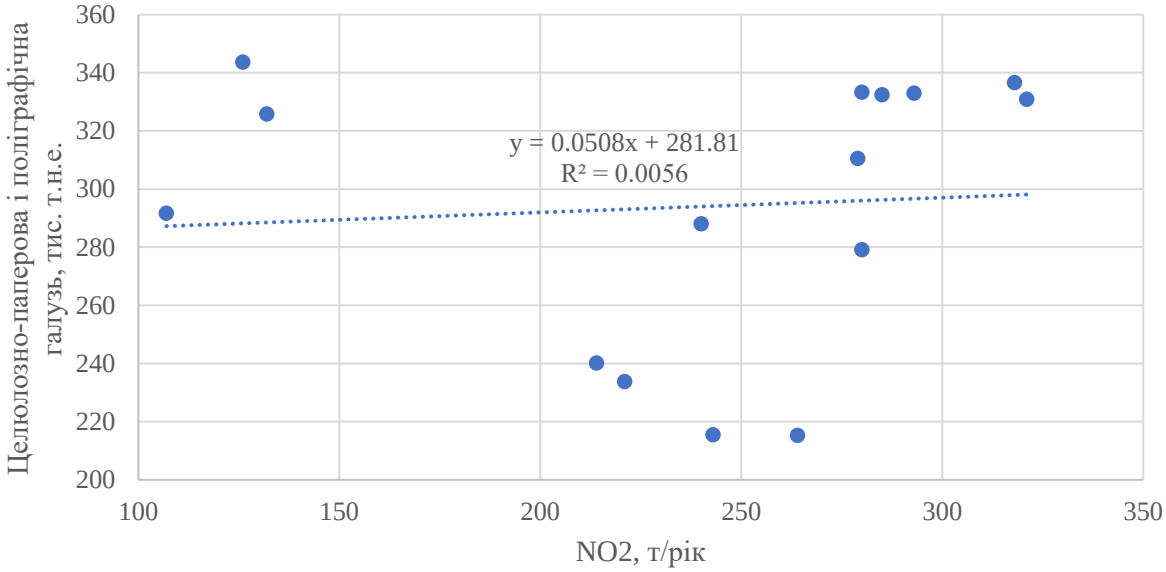


Рис. 3.6. Значення скоригованої оцінки коефіцієнта кореляції, що найбільш наближене до 0 (-0,043) серед розглянутих сукупностей (набір даних $A_{17,3}$)

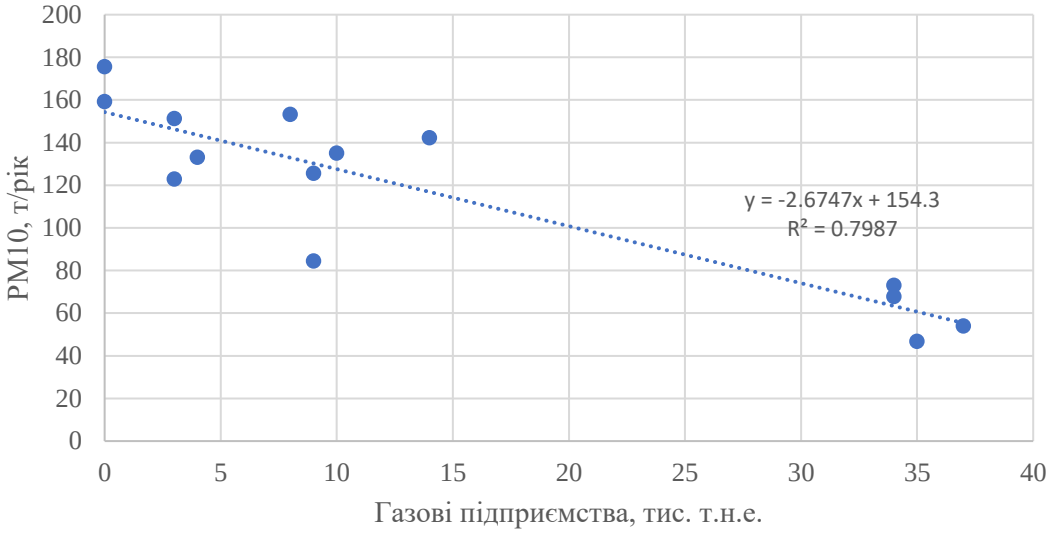


Рис. 3.7. Найнижче значення скоригованої оцінки коефіцієнта кореляції (-0,901) серед розглянутих сукупностей (набір даних $A_{6,5}$)

Таким чином, більше 73% розглянутих сукупностей мають додатній кореляційний зв'язок. Це свідчіть про необхідність постійного контролю повітря довкола стаціонарних джерел забруднення, зокрема тих, що споживають викопні енергетичні ресурсі. Діюча система моніторингу не здатна забезпечити постійний контроль стану забруднення атмосферного повітря, зокрема і через норми, що регулюють цей моніторинг.

3.2. Алгоритм опрацювання даних контролю забруднення повітря в задачах регресійного аналізу

При дослідженні вибірок $x=\{x_i, i=\overline{1,n}\}$ та $y=\{y_i, i=\overline{1,n}\}$ загальний алгоритм регресійного аналізу складається з 4-х етапів:

1) вибір моделі регресії та оцінювання її параметрів;

2) оцінювання статистичної значущості отриманих характеристик;

3) оцінювання адекватності вибраної моделі;

4) визначення довірчих інтервалів регресійної функції.

Модель лінійної регресії, що визначає залежність двох величин *X* та *Y*, в загальному випадку має вигляд

$$Y(X) = kX + b,\ k,b \in R, \tag{3.14}$$

де k та b – відповідні коефіцієнти регресії.

Один з найбільш практичних та простих методів оцінювання коефіцієнтів регресії є метод найменших квадратів. При цьому значення k і b знаходяться за умови мінімуму суми квадратів відхилень початкових значень y_i та значень, отриманих на основі отриманої функції $Y(X)$ ($y_{регр.}$):

$$J \to \min\left(\sum_{i=1}^{n} \left(y_{\text{регр.}} - y_i \right)^2 \right). \tag{3.15}$$

Тоді величини k та b знаходяться за наступними формулами:

$$k = \frac{n\sum_{i=1}^{n}(x_i y_i) - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} y_i}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i \right)^2};\ b = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^2 \sum_{i=1}^{n} y_i - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} (x_i y_i)}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i \right)^2}. \tag{3.16}$$

Для оцінювання коефіцієнтів регресії існують також і інші методи. Наприклад, метод Бартлетта-Кенуя полягає в тому, що пари даних (x_i, y_i) впорядковуються за зростанням величини X, на розбиваються на 3 групи обсягом W, причому 1-ша та 3-тя групи мають містити однакову кількість пар даних. Далі, для кожної групи розраховують суми величин – $x1^{\Sigma}, x2^{\Sigma}, x3^{\Sigma}$ та $y1^{\Sigma}, y2^{\Sigma}, y3^{\Sigma}$. Далі коефіцієнти регресії знаходять за відповідними формулами:

$$k = \frac{y3^{\Sigma} - y1^{\Sigma}}{x3^{\Sigma} - x1^{\Sigma}};\quad b = \frac{y2^{\Sigma}}{W} - k\frac{x2^{\Sigma}}{W}. \tag{3.17}$$

СКВ коефіцієнта k розраховується за наступним виразом:

$$S_k = \frac{64\sqrt{n}\sum_{i=1}^{n-1} \frac{|y_i - y_{i+1}|}{n}}{90\left(x3^{\Sigma} - x1^{\Sigma} \right)}. \tag{3.18}$$

Можливий випадок, коли весь набір даних (x_i, y_i) розбивають на 4 групи відповідно за пропорціями вибірок – 1 – 1/6; 2 – 1/3; 3 – 1/3; 4 – 1/6. Тоді коефіцієнт k знаходиться за формулою

$$k = \frac{3y1^{\Sigma} + y2^{\Sigma} - y3^{\Sigma} - 3y4^{\Sigma}}{3x1^{\Sigma} + x2^{\Sigma} - x3^{\Sigma} - x4^{\Sigma}}, \tag{3.19}$$

а СКВ S_k:

$$S_k = \frac{1{,}9s\sqrt{n}}{3x1^{\Sigma} + x2^{\Sigma} - x3^{\Sigma} - x4^{\Sigma}}. \qquad (3.20)$$

У випадку, якщо b=0 (y=kx), може бути застосований метод Керріча. Він полягає у тому, що для досліджуваної вибірки $\{x_i, y_i, i = \overline{1,n}\}$, визначається різниця l_i, її середнє значення вибірки та СКВ:

$$\begin{gathered} l_i = \lg y_i - \lg x_i; \\ \bar{l} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} l_i; \\ S_{\bar{l}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(l_i - \bar{l})^2}. \end{gathered} \qquad (3.21)$$

Якщо $s_{\bar{l}} / \bar{l} << 1$, то $k = 10^{\bar{l}}$.

Застосування стійких методи оцінювання коефіцієнтів регресії для побудови залежностей між даними еталонних вимірювань та даними сенсорів концентрації мілкодисперсного пилу (чи газових забруднювачів) є обмеженим, адже для цього необхідно мати точно відомі значення вхідних величин (X) та розподіл похибок вимірювань вихідних величин (Y), що відмінні від гаусівських.

Для перевірки значущості коефіцієнтів k і b використовується критерій Стьюдента та його відповідність двом гіпотезам: 1) оцінка коефіцієнта статистично незначуща, коефіцієнт дорівнює 0 (H_0); 2) оцінка коефіцієнта статистично значуща, коефіцієнт не дорівнює 0 (H_1).

На першому етапі потрібно розрахувати наступні статистичні коефіцієнти:

$$t_k = \frac{|k|}{S_k};\ t_b = \frac{|b|}{S_b}, \qquad (3.22)$$

де S_k та S_b – оцінки СКВ коефіцієнтів k та b відповідно, що розраховуються за формулами

$$S_k = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - y_{\text{регр}\cdot i}\right)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}};\ S_b = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - y_{\text{регр}\cdot i}\right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i^2}}{\sqrt{n\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}}. \qquad (3.23)$$

Далі, якщо задовольняється умова $t_k < t_\alpha(v)$ або $t_b < t_\alpha(v)$, то приймається гіпотеза H_0 про незначущість коефіцієнта k або b відповідно.

Якщо задовольняється умова $t_k \geq t_\alpha(v)$ або $t_b \geq t_\alpha(v)$, то приймається гіпотеза H_1 про значущість коефіцієнта k або b відповідно.

Адекватність розрахованої моделі регресії перевіряють із застосуванням критерію Фішера на відповідність до двох гіпотез: 1) модель не адекватна; 2) модель адекватна.

Статистика Фішера розраховується за формулою:

$$F = \frac{S_y^2}{S_{\text{гр.}}^2} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - y_{\text{регр}\cdot i}\right)^2}}{\frac{1}{n(m-1)}\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}\left(y_{i,k} - \bar{y}_i\right)^2}, \tag{3.24}$$

де S_y – СКВ розсіювання значень y_i в околі регресії; $S_{\text{гр}}$ – СКВ розсіювання значень у групі спостережень в околі.

Тоді якщо справедлива нерівність $F < F_\alpha(v_1, v_2)$, то модель адекватна, у іншому випадка ($F \geq F_\alpha(v_1, v_2)$) модель вважається неадекватною.

Значення $F_\alpha(v_1, v_2)$ знаходяться відповідно до таблиці розподілу Фішера для степенів вільності $v_1 = n-2, v_2 = m-1$ та рівня значущості $\alpha = 1 - P$.

Важливим також при побудові лінійних регресій, що відображають залежності між даними еталонних вимірювань та даними сенсорів, є врахування надмірних похибок вимірювань, що є частими при використанні low-cost сенсорів. Вимірювання з надмірними похибками можуть у подальшому привести до значних похибок величини y, що отримана за залежністю.

Одним із засобів для перевірки отриманої множини даних може бути критерій Ектона, що використовуються для множин даних $N \geq 30$, при цьому можливо виділити тільки одне спостереження з надмірною похибкою. Статистикою критерію Ектона є величина

$$V = \frac{|q_w - \bar{q}|}{S_w}, \tag{3.25}$$

де q_w – залишок від значення y_l, яке за припущенням містить надмірну похибку; $\bar{q}$ – середнє значення всіх інших залишків ($\bar{q} = \frac{1}{n-1}\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq w}}^{n} q_i$), S_w – СКВ залишків після усунення спостереження (y_w), що може мати надмірну похибку, та розраховується за формулами

$$S_w^2 = \frac{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq w}}^{n}\sum_{j=1}^{m_i}\left(y_{ij} - \bar{y}_i\right)^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq w}}^{n} m_i\left(\bar{y}_i - y_{\text{регр}.i}\right)^2}{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq w}}^{n} m_i - 2} \text{ для } 1 < m_i < m;$$

$$S_w^2 = \frac{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq w}}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left(y_{ij} - \bar{y}_i\right)^2 + m\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq w}}^{n}\left(\bar{y}_i - y_{\text{регр}.i}\right)^2}{nm - 2}, \text{ якщо } m_i = m; \tag{3.26}$$

$$s_w^2 = \frac{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq w}}^{n}\left(\bar{y}_i - y_{\text{регр}.i}\right)^2}{n-2}, \text{ якщо } m_i = 1.$$

Якщо $V > V_p$, де V_p – граничне значення, що визначається за відповідною таблицею, то залишок q_w із заданою ймовірністю P є таким, що має надмірну похибку.

Альтернативним варіантом може бути застосування критерія Тітьєна-Мура-Бекмана, що базується на статистиці

$$R = \max\left|\frac{q_i}{S_i}\right|, \tag{3.27}$$

де $S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n} q_j^2}{n-2}\left[1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum_{j=1}^{n}(x_j - \bar{x})^2}\right]$.

Якщо $R>R(P,n)$, де $R(P,n)$ – граничне значення, що визначається за відповідною таблицею, то відповідне значення y_i визнається таким, що має надмірну похибку з ймовірністю P.

Одним із важливих завдань в ході регресійного аналізу є визначення довірчих інтервалів (розширеної невизначеності) значень y, що розраховувалися за регресією. Для цього необхідно оцінити СКВ випадкової складової похибки (стандартної невизначеності) індивідуальних значень y_i, що визначається за формулою

$$S_y(x) = u_y(x) = S_y \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{\left(x - \overline{x}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x}\right)^2}}\,, \tag{3.28}$$

де $S_y = \sqrt{\frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - y_{\text{регр}\cdot i}\right)^2}$.

Довірчий інтервал $\Delta(\cdot)$ випадкової похибки індивідуального значення y_i розраховується за формулою

$$\begin{gathered}\Delta_y(x) = U_y(x) = t_{\alpha/2}(v)S_y(x) = \\ = t_{\alpha/2}(v)\sqrt{\frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - y_{\text{регр}\cdot i}\right)^2}\sqrt{\frac{n+1}{n} + \frac{\left(x - \overline{x}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x}\right)^2}} = \,, \\ = t_{\alpha/2}(v)\sqrt{\left(\frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - y_{\text{регр}\cdot i}\right)^2\right)\left(\frac{n+1}{n} + \frac{\left(x - \overline{x}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x}\right)^2}\right)}\end{gathered} \tag{3.29}$$

де $t_{\alpha/2}(v)$ – квантиль розподілу Стьюдента, для довірчої імовірності $P = 1 - \alpha$ та $v = n - 2$ степеней вільності.

3.3. Алгоритм опрацювання даних контролю забруднення повітря в задачах дисперсійного аналізу

Процес дослідження вибірок даних контролю забруднення повітря складається із 4 етапів: формування дисперсійного масиву; розрахунок

дисперсії; оцінювання ступеня впливу розглянутого та нерозглянутого факторів; перевірка статистичної значущості результатів за допомогою характеристик розподілу Фішера [540].

Розглянемо вплив одного фактору A_i при його k різних значеннях на дані контролю. Нехай на при одному значенні фактору A проведено n вимірювань, таким чином отримаємо набір даних $(x_1, x_2, ...x_n)$. У випадку із k-значень фактору A_i, можна сформувати матрицю M, що комплексно характеризує експериментальне дослідження:

$$M = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{i1} & \dots & x_{k1} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{i2} & \dots & x_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{in} & \dots & x_{kn} \end{pmatrix}. \qquad (3.30)$$

Через X_k позначимо суму елементів, що знаходяться у одному стовпчику, та відповідають результатам вимірювання при k-значенні A фактору:

$$X_k = \sum_1^n x_{kn}.$$

Із твердження про рівність дисперсій, що характеризують зміну даних на кожному із рівнів A_i, слідує що

$$S_1^2 = S_2^2 = \ldots = S_k^2, \qquad (3.31)$$

де

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}\left(x_{ij} - \overline{x}_i\right)^2 = \frac{1}{n-1}\left[\sum_{j=1}^{n} x_{ij}^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\right)^2\right]. \qquad (3.32)$$

Для порівняння значень дисперсій необхідно перевірити нульову гіпотезу H_0: $S_1^2 = S_{i+1}^2$ проти альтернативи H_0: $S_1^2 \neq S_{i+1}^2$ (для $i = 1,2,...,k-1$). Це можна зробити за допомогою наступних критеріїв:

1) критерій Бартлета

$$M = n\ln\left\{\sum_{i=1}^{k}(i-1)S_i^2 \Big/ n\right\} - \sum_{i=1}^{k}(n_i - 1)\ln S_i^2, \qquad (3.33)$$

де $n=\sum_{i=1}^{k}(n_i-1)$. У випадку підтвердження гіпотези H_0 та при n_i>3 $(i=1,2,\ldots,k)$, величина

$$B=M\Bigg/\left(1+\sum_{i=1}^{k}\left(\frac{n-n_i+1}{n(n_i-1)}\right)\Bigg/3(k-1)\right) \tag{3.34}$$

має розподіл χ^2 з $f=k-1$ степенями свободи;

2) критерій Кохрана

$$g=\max_{1\le i\le k}S_i^2\Bigg/\sum_{i=1}^{k}S_i^2. \tag{3.35}$$

Якщо $g<g_\alpha(k,n)$, де

$$g_\alpha(k,n)=\frac{F_{k+1-\alpha/k}\left[n-1;(n-1)(k-1)\right]}{k-1+F_{k-1+\alpha/k}\left[n-1;(n-1)(k-1)\right]}, \tag{3.36}$$

то гіпотеза H_0 підтверджується;

3) критерій Неймана-Пірсона

$$H=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}S_i^2\Bigg/\left(\prod_{i=1}^{k}S_i^2\right)^{1/k}. \tag{3.37}$$

Якщо $H<H_\alpha$, то гіпотеза H_0 підтверджується (H_α є табличним значенням);

4) критерій Бліса-Кохрана-Тьюкі

$$c=\max_{1\le i\le k}\omega_i\Bigg/\sum_{i=1}^{k}\omega_i, \tag{3.38}$$

де $\omega_i=\max_{1\le j\le n}x_{ji}-\min_{1\le j\le n}x_{ji}$ – розмах i-ї вибірки. Якщо $c<c_\alpha(n,k)$, то гіпотеза H_0 підтверджується ($c_\alpha(n,k)$ є табличним значенням);

5) критерій Хартлі

$$h=\max_{1\le i\le k}S_i^2\Big/\min_{1\le i\le k}S_i^2, \tag{3.39}$$

Якщо $h<h_\alpha(n,k)$, то гіпотеза H_0 підтверджується ($h_\alpha(n,k)$ є табличним значенням);

6) критерій Кедуела-Леслі-Брауна

$$K = \max_{1\le i\le k} \omega_i \Big/ \min_{1\le i\le k} \omega_i, \tag{3.40}$$

Якщо $K < K_\alpha(n,k)$, то гіпотеза H_0 підтверджується ($K_\alpha(n,k)$ є табличним значенням).

Після підтвердження гіпотези H_0 ($S_i^2 = const$ при $i = 1,2,\ldots,k$) необхідно знайти оцінку дисперсії S_0^2, що характеризує значення x_{ij} поза впливом фактору A:

$$\begin{aligned} S_0^2 &= \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} S_i^2 \frac{1}{k(n-1)} \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n}\left(x_{ij} - \bar{x}_i\right)^2 = \\ &= \frac{1}{k(n-1)}\left[\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}^2 - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{k}\left(\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\right)^2\right]. \end{aligned} \tag{3.41}$$

Загальна вибіркова дисперсія результатів вимірювань знаходиться за формулою

$$S^2 = \frac{1}{kn-1}\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n}\left(x_{ij} - \bar{\bar{x}}\right)^2, \tag{3.42}$$

де $\bar{\bar{x}} = \sum_{i=1}^{k} \bar{x}_i \Big/ k$, $\bar{x}_i = \sum_{j=1}^{n} x_{ij} \Big/ n$.

Звідси слідує, що

$$S^2 = \frac{1}{kn-1}\left(\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}^2 - \frac{1}{kn}\left(\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\right)^2\right). \tag{3.43}$$

На наступному етапі доцільно ввести оцінку дисперсії S_A^2, що характеризує зміну середніх $\bar{x}_i$ під впливом фактору A:

$$S_A^2 = \frac{n}{k-1}\sum_{i=1}^{k}\left(\bar{x}_i - \bar{\bar{x}}\right)^2. \tag{3.44}$$

При оцінюванні дисперсії S_A^2 необхідно використовувати $(k-1)$ ступенів вільності. Таким чином, перевірка про ступінь впливу фактору A на зміну середніх значень досліджуваної величини може здійснюватися шляхом порівняння дисперсій S_0^2 та S_A^2. Вплив фактору A на досліджувану величину є

значим з деякою ймовірністю α, якщо відношення S_A^2/S_0^2 задовольняє наступну умову:

$$S_A^2/S_0^2 > F_\alpha\left[k-1;k\left(n-1\right)\right], \tag{3.45}$$

де $F_\alpha\left(f_1, f_2\right)$ – α-квантиль *F*-розподілу з f_1 та f_2 ступенями вільності.

Якщо вплив фактору *A* є незначним (при $S_A^2/S_0^2 \le F_\alpha\left[k-1;k\left(n-1\right)\right]$), то для оцінювання дисперсії S_0^2 може використовуватися більш точна оцінка S^2, що має $\left(kn-1\right)$ ступенів вільності (замість $k\left(n-1\right)$ для оцінки S_0^2).

3.4. Матричний метод визначення подібності даних контролю забруднення повітря

Розглянемо можливість формування наборів даних для їх подальшого аналізу, обробки та порівняння, що генеруються системами контролю.

Нехай за певний проміжок часу система контролю провела вимірювання та накопичила деяке поле даних *K*. Із даного поля *K* можна виділити певний об'єм даних, що характеризується прямокутною матрицею *A* розмірністю $m \times n$:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}. \tag{3.46}$$

Нехай a_i – *i*-ий рядок матриці *A*, а a_j – *j*-ий стовпчик матриці *A*:

$$\begin{aligned} a_i &= \left[a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}\right], i = 1, \dots, m; \\ a_j &= \left[a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj}\right], \ j = 1, \dots, n. \end{aligned} \tag{3.47}$$

Також нехай *m* величин $y_1, y_2, \dots, y_m$ виражаються лінійно та однорідно через *n* інших величин $x_1, x_2, \dots, x_n$:

$$\begin{cases} y_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n, \\ y_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \ldots + a_{2n}x_n, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ y_m = a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \ldots + a_{mn}x_n, \end{cases} \tag{3.48}$$

Система рівнянь (3.48) може бути скорочена до наступного виразу:

$$y_i = \sum_{k=1}^{n} a_{ik}x_k, \; i = 1,2,\ldots,m. \tag{3.49}$$

Елементи лінійного перетворення величин x_1, x_2,…, x_n до величин y_1, y_2,…,y_m однозначно визначають матрицю (3.46) та навпаки. Таким чином, елементи матриці (3.46) можуть формувати однозначну властивість (параметр) заданого об’єкта (наприклад, окремої вимірювальної станції чи системи контролю в цілому). Це дає змогу аналізувати об’єкти однакової розмірності та порівнювати їх властивості між собою [541].

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:

- Евклідова відстань

$$\rho(x, x') = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - x_i')^2}, \tag{3.50}$$

- квадрат Евклідової відстані

$$\rho(x, x') = \sum_{i=1}^{n} (x_i - x_i')^2, \tag{3.51}$$

- Мангеттенська відстань

$$\rho(x, x') = |x_i - x_i'|, \tag{3.52}$$

- відстань Чебишова

$$\rho(x, x') = \max(|x_i - x_i'|), \tag{3.53}$$

- степенева відстань

$$\rho(x, x') = \sqrt[r]{\sum_{i=1}^{n} \left(x_i - x'_i\right)^p}. \tag{3.54}$$

В задачах порівняння наборів даних інформаційно-вимірювальних систем, 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 *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*:

$$\begin{cases} X = 1, X_i \in B, \\ X = 0, X_i \notin B. \end{cases} \tag{3.55}$$

З таким підходом можна констатувати відбулось вимірювання параметру чи не відбулось. Але часто інформаційно-вимірювальні системи характеризуються вимірювання великої кількості параметрів з великою частотою їх оновлення. При цьому, сенсори, що визначають різні параметри, в певний момент часу можуть не спрацювати через різні технічні причини та зовнішні впливи. Це призводить до того, що при великій кількості вимірюваних параметрів загальний рівень інформативності такої системи залишається майже незмінним, проте такі випадки некоректно інтерпретувати рівнем «0», так як система провела вимірювання інших параметрів. Оцінка рівня інформативності такої системи має характеризуватися групою даних X', що характеризується розширеним набором властивостей B':

$$\begin{cases} X'_1 = 0,\ X'_1 \in B'_1,\ B'_1 \notin B, \\ X'_2 = 1,\ X'_2 \in B'_2, B'_2 \in B, \\ \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ X'_{i-1} = N - 1, X'_{i-1} \in B'_{i-1}, B'_{i-1} \in B, \\ X'_i = N, X'_i \in B'_i, B' \in B. \end{cases} \tag{3.56}$$

Таким чином, набір даних X' такої системи можна характеризувати не 2-ма станами (0 чи 1), а значно більшим числом, що залежить від рівня деталізації властивостей B'.

Також кількість цих властивостей може бути задана не тільки числовим значенням. Для візуальної інтерпретації таких наборів даних зручно використовувати кольорову модель RGB, що в загальному має більше 16 мільйонів відтінків. При необхідності отримане кольорове зображення матриці набору даних x' можна звести до зображенням в сірих відтінках одним із способів:

- класичним (за стандартом CCIR-601):

$$F[y,x] = 0.299Re + 0.587Gr + 0.114Bl, \tag{3.57}$$

- розрахунком середньоарифметичного значення складових 3 каналів:

$$F[y,x] = \left(Re + Gr + Bl\right)/3, \tag{3.58}$$

де *Re* – червоний, *Gr* – зелений, *Bl* – синій.

В дисертаційній роботі досліджено функціонування системи моніторингу забруднення повітря ЦГО ім. Срезневського (м. Київ, Україна). Вимірювання проведено із використанням 16 стаціонарних постів, що розташовані у різних районах міста (рис. 3.8). Періодичність відбору проб становила 6 днів на тиждень та 4 рази на добу. Хімічний аналіз відібраних проб здійснювався в лабораторії ЦГО відповідно до РД 52.04.186-89.

Порівняння наборів даних проводилось між постами №7 і №20 та №3 і №5, оскільки вони доступні на сайті ЦГО (http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua), мають схожий набір параметрів вимірювання та були активовані в один і той період часу (Таблиця 3.3).

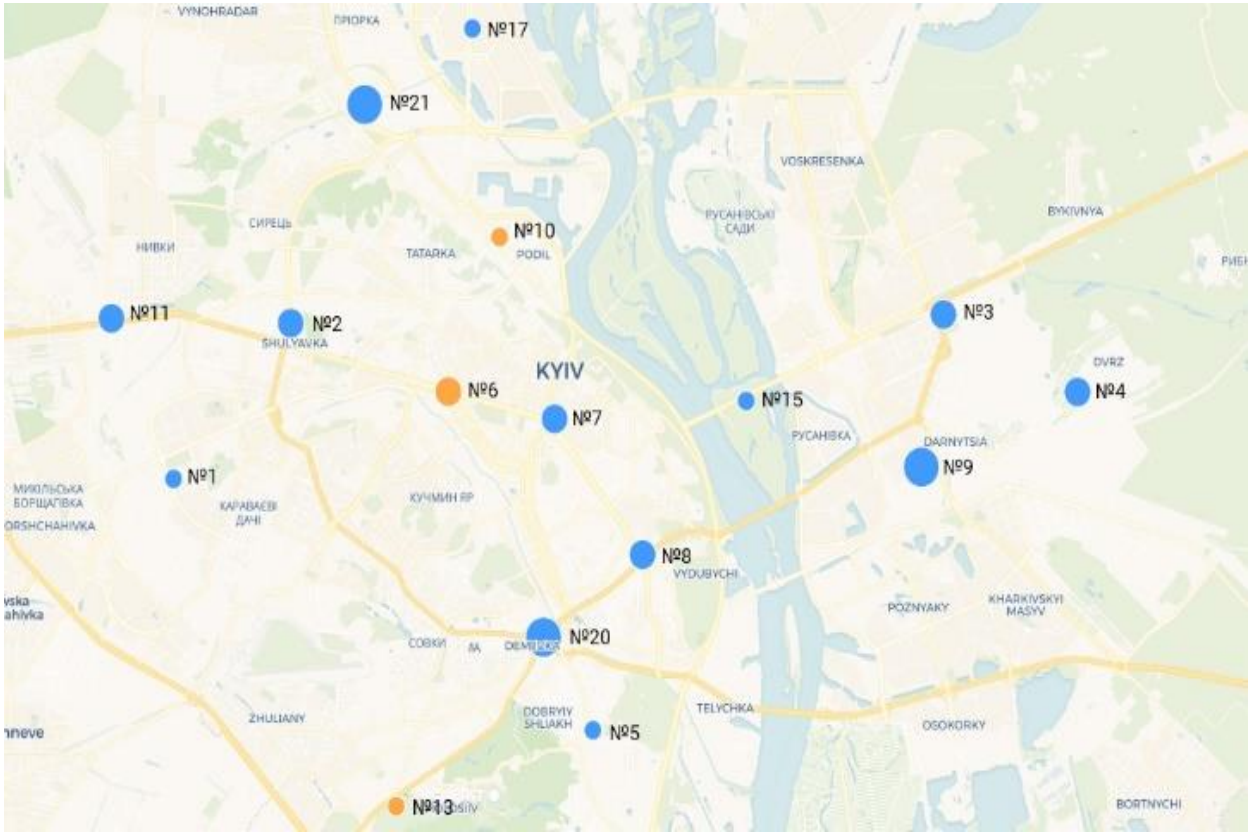


Рис. 3.8. Розташування постів спостереження системи моніторингу забруднення повітря ЦГО (м. Київ, Україна)

Таблиця 3.3 – Характеристики постів спостереження № 3, 5, 7, 20

№	Параметри	Час активації
3	PM, SO_2, CO, NO_2, CH_2O	Серпень 2018
5	PM, SO_2, CO, NO_2, CH_2O	Серпень 2018
7	PM, SO_2, CO, NO_2, HF, HCl, CH_2O	Жовтень 2017
20	PM, SO_2, CO, NO_2, NO, HF, NH_3, CH_2O	Жовтень 2017

Для аналізу були відібрані дані, отримані постами №3 та №5 в період з вересня 2018 р. по вересень 2020 р., та постами №7 і №20 в період з листопада 2017 р. по січень 2020 р. (https://bit.ly/3QFOXK4).

Для створення матриць, що відображають рівень інформативності постів мережи контролю, та системи в цілому, запропоновано використати матриці наступної розмірності: для постів №3 та №5 – 25×31, для постів №7 та №20 –

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

Для спрощення візуального порівняння матриць запропоновані параметри груп даних B', що мають як числові, так і кольорові значення (Таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 – Параметри розглянутих груп даних

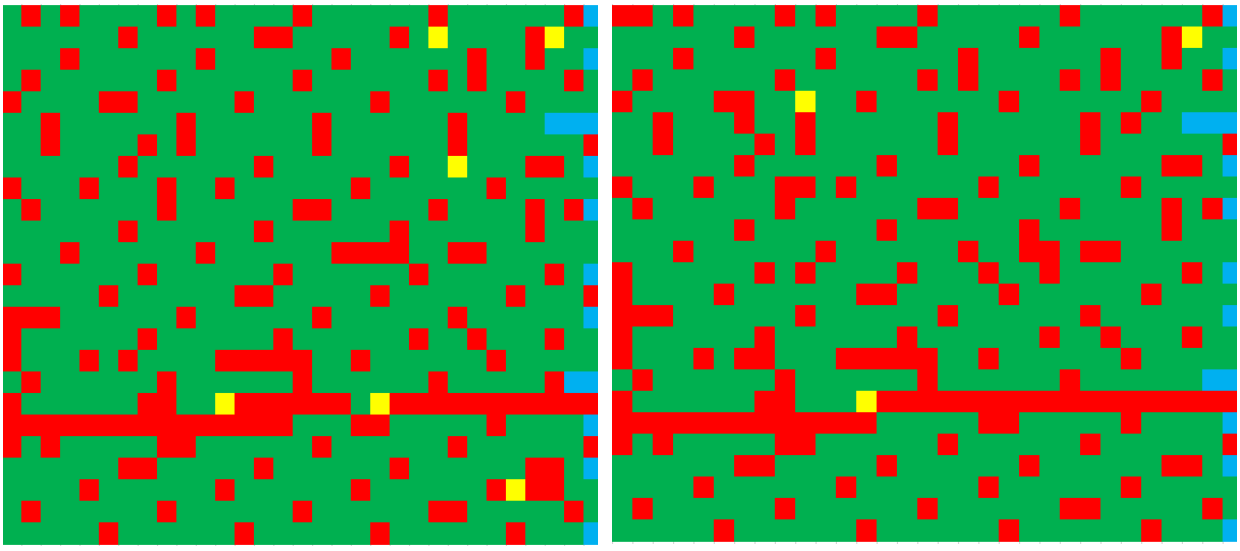
№	Параметр	Значення параметру	Колір
1	3	Отримано 100% запланованих даних	
2	2	Отримано даних в межах $0<x<100$ (%)	
3	1	Дані не отримано	
4	0	Дати контролю не існує	

При цьому, числове значення «3» відповідає такому стану вимірювального посту, що протягом дня були проведені всі 4 відбори проб (відповідно до програми моніторингу), «2» – проведено від 3 до 1 відбору повітря протягом дня, «1» – протягом дня не проведено жодного відбору повітря, «0» – дня контролю не існує.

Таким чином загальна кількість елементів для наборів даних, зображених на рис. 3.9 становить 775, а для наборів даних, зображених на рис. 3.10 – 1085.

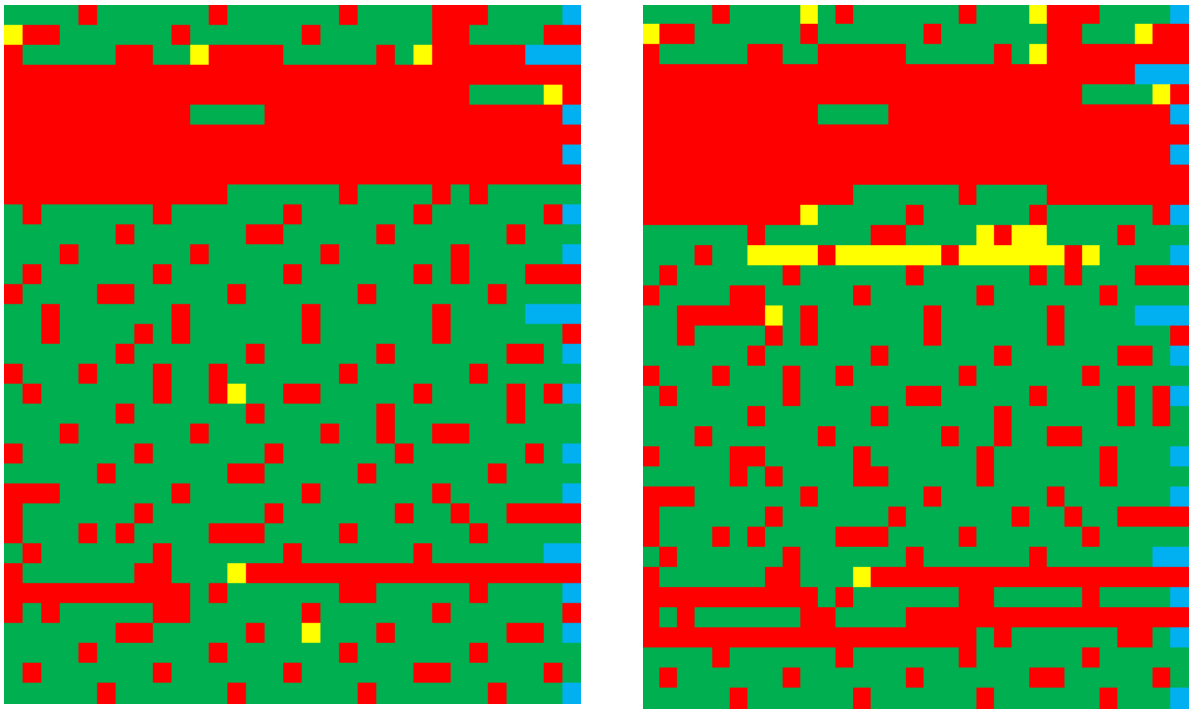
Представлені на рис. 3.9 та 3.10 матриці можуть бути зручним інструментом для візуалізації режимів роботи як окремих вимірювальних постів, так і системи контролю загалом. Також представлений набір даних в числовій та кольоровій формі може застосовуватися для подальшого кластерного аналізу даних та знаходження залежностей, наприклад між режимом роботи системи контролю та днем тижня. Також представлені кольорові та числові набори даних можуть бути розширені шляхом введення додаткових характеристик режимів роботи системи чи певних особливостей

проведення контролю, наприклад уточнення кількості проб, що відбрилася протягом дня, тощо.



а) *б*)

Рис. 3.9. Порівняння результатів матричного аналізу даних постів №3 (*а*) та №5 (*б*)



а) *б*)

Рис. 3.10. Порівняння результатів матричного аналізу даних постів №7 (*а*) та №20 (*б*)

В таблиці 3.5 наведена загальна характеристика отриманих наборів даних для постів №3, 5, 7 та 20.

Таблиця 3.5 – Характеристика груп даних, отриманих з вимірювальних постів №3, 5, 7 та 20

Номер посту	Кількість груп		*S*	(3/*S*) × 100%
3	0	14	761	76.3%
	1	174		
	2	6		
	3	581		
5	0	14	761	76.3%
	1	177		
	2	3		
	3	581		
7	0	20	1065	63.4%
	1	383		
	2	7		
	3	675		
20	0	20	1065	56.6%
	1	429		
	2	33		
	3	603		

В таблиці 3.5 параметр *S* дорівнює сумі наборів груп 1, 2, та 3, тобто *S=1+2+3*, а параметр (3/*S*) × 100% відповідає кількості днів, коли система проводила щоденно 4 вимірювання, у відсотковому відношенню до загальної кількості днів.

Таким чином, можна стверджувати, що рівень коректного функціонування ПС системи контролю забруднення повітря за розглянуті періоди часу складає від 56,6% до 76,3%.

Проте, як можна спостерігати з рис. 3.9 та 3.10, значення наборів груп для розглянутих пар вимірювальних постів також відрізняється. Зокрема на

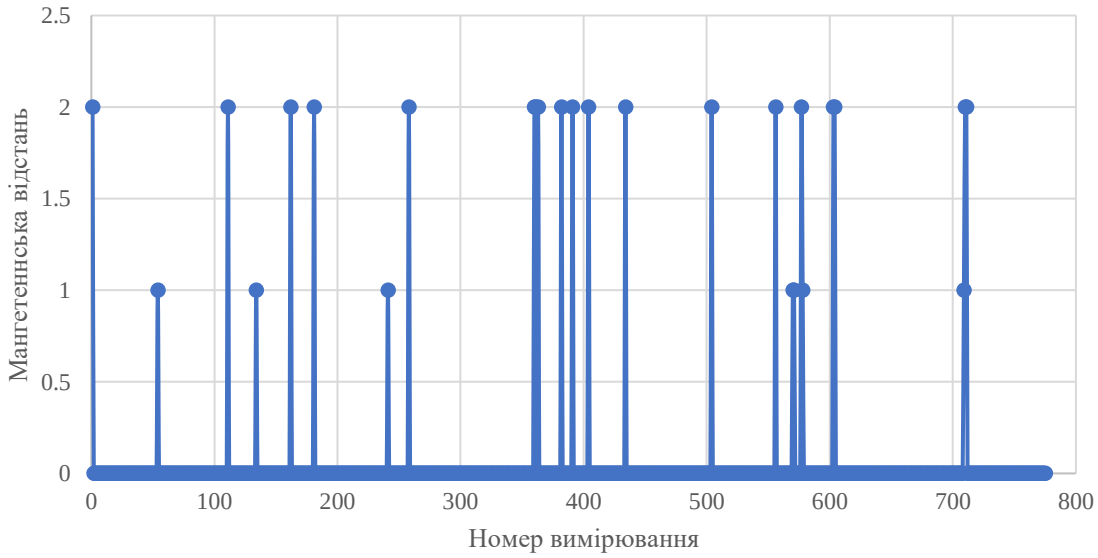
рис. 3.9 видно, що при однаковому рівні коректного функціонування на рівні 76,3%, значення наборів груп в різні дні відрізняються.

Для того, щоб порівняти значення наборів груп для обраних пар постів (3-5 та 7-20), можна використати Мангетеннську відстань (3.52) як міру порівняння. Таким чином, порівнюється кожний елемент a_{ij} матриці (набір груп) для обраних пар постів.

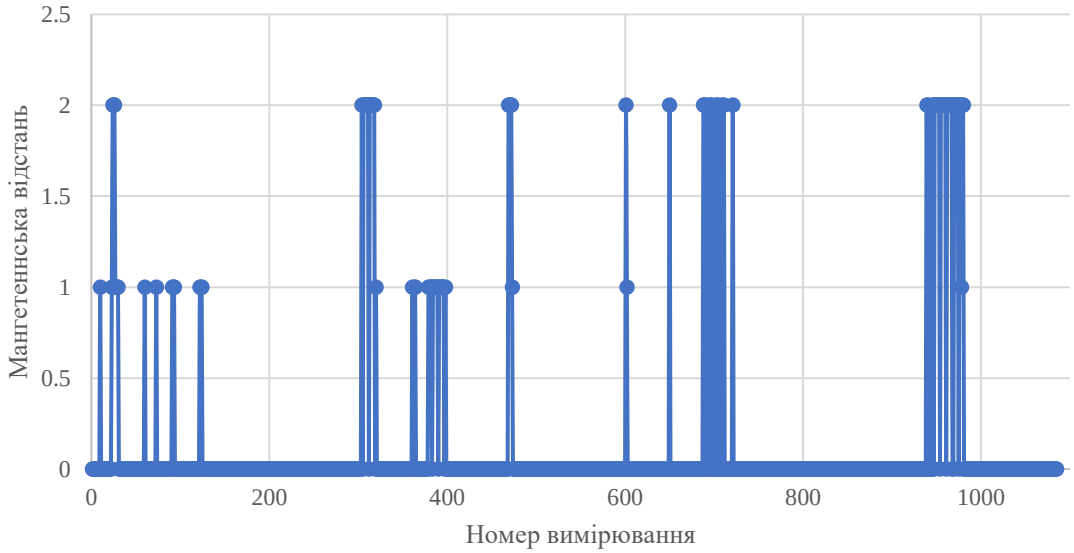
На рис. 3.11 наведено рівні відповідності значень наборів груп для обраних пар постів спостереження. Встановлено, що розглянуті набори груп для ПС 3-5 збігаються у 96,6% випадків (749 із 775), тоді як для наборів груп ПС 7-20 – у 91% випадків (985 із 1085).

На рис. 3.12 наведено приклад реалізації запропонованого методу на базі сайту aqicn.org. Відповідним кольором відмічені усереднені значення індексу якості повітря.

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

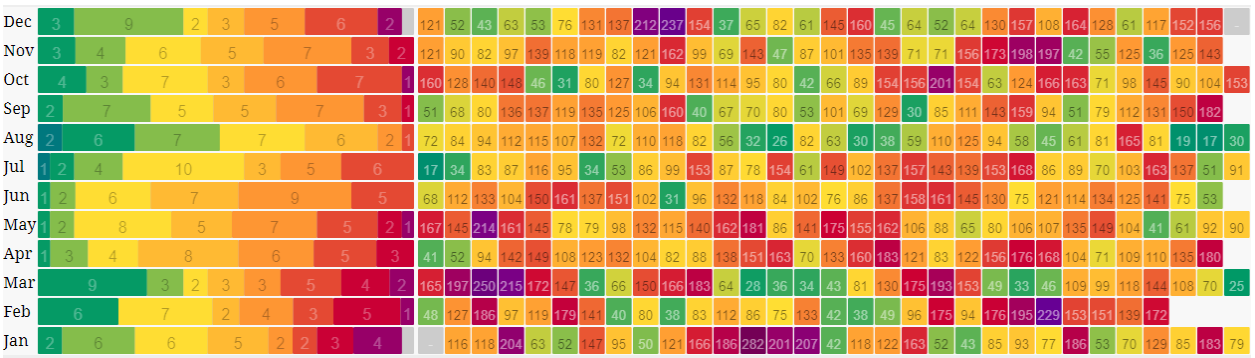


а)



б)

Рис. 3.11. Порівняння значень наборів груп для обраних пар вимірювальних постів: *а*) 3-5; *б*) 7-20



а)



б)

Рис. 3.12. Приклад реалізації матричного методу оцінювання подібності даних для Пекіну: *а*) 2019, *б*) 2018

3.5. Прогнозування об’ємної концентрації кисню в повітрі на базі дискретного перетворення Фур’є

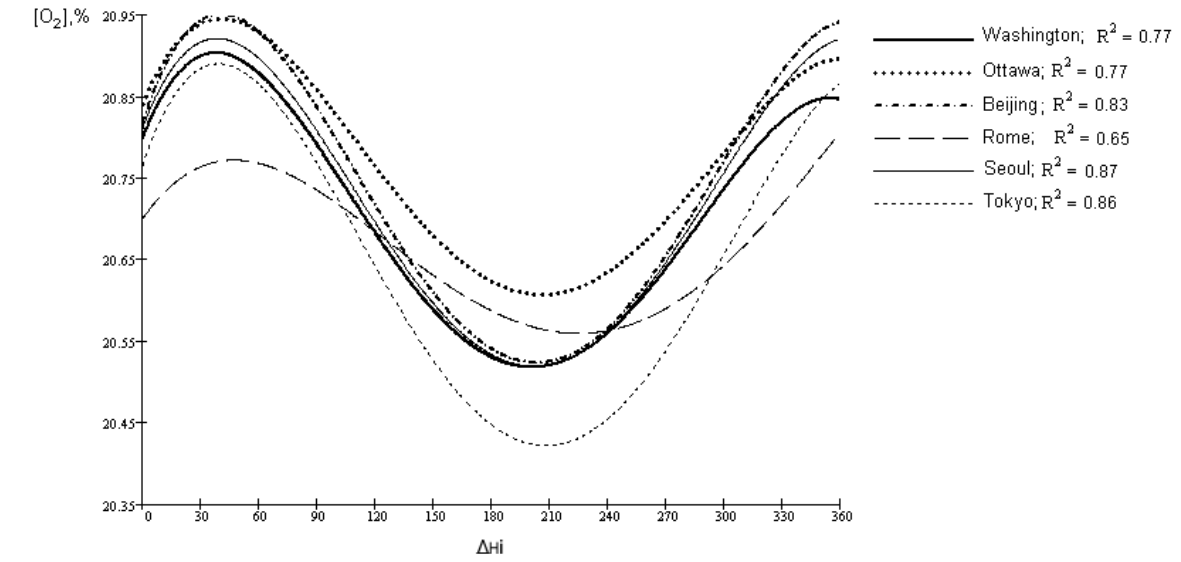
Під час дослідження було проаналізовано зміну основних метеорологічних параметрів повітря (температури, абсолютного тиску, відносної вологості) протягом 2014 року в 12 містах на різних континентах: Берлін (Німеччина), Вашингтон (США), Канберра (Австралія), Лондон (Великобританія), Мадрид (Іспанія), Нью-Делі (Індія), Оттава (Канада), Париж (Франція), Пекін (Китай), Рим (Італія), Сеул (Південна Корея), Токіо (Японія). Як джерело даних про метеорологічні параметри, використовувався сайт wunderground.com. Географічними точками вимірювання слугували місцеві аеропорти. Дані про точне місцезнаходження місць вимірювань відображені в таблиці 3.6 [542].

На рис. 3.13 відображені розраховані апроксимуючі функції залежності оціненої об’ємної концентрації кисню від часу у основних містах світу та наведені коефіцієнти детермінації.

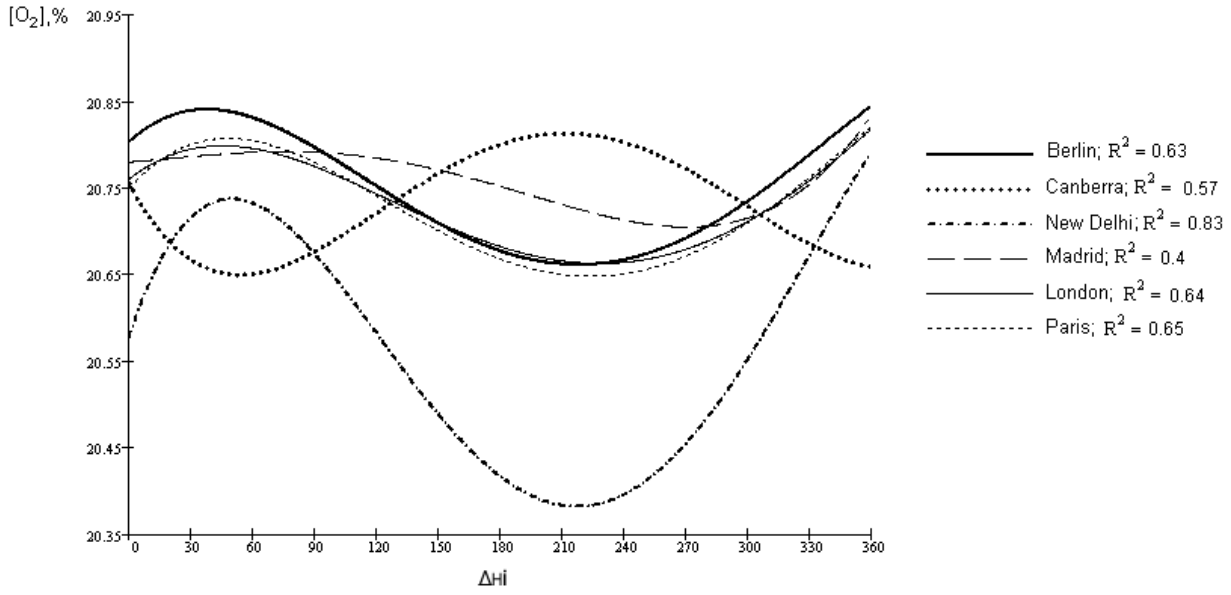
На основі даних щоденної зміни метеопараметрів у місті Києві протягом чотирьох років (з 01 січня 2014 року по 31 грудня 2017 року) можна зробити висновок щодо періодичної зміни не лише температури, але й розрахованої об’ємної концентрації кисню (рис. 3.14). Визначення результатів з надмірною похибкою сукупності даних вимірювань метеопараметрів неможливе, оскільки наявні лише однократні вимірювання не стабільних фізичних величин [542].

Таблиця 3.6 – Дані про місцезнаходження точок вимірювань метеорологічних параметрів

Країна	Місто	Класифікатор аеропорту (ICAO)	Географічні координати
Німеччина	Берлін	EDDB	N52°21.73' / E13°30.04'
США	Вашингтон	KDCA	N38°51.09' / W77°2.26'
Австралія	Канберра	YSCB	S35°18.42' / E149°11.70'
Великобританія	Лондон	EGLL	N51°28.65' / W0°27.68'
Іспанія	Мадрид	LEMD	N40°28.33' / W3°33.65'
Індія	Нью-Делі	VIDP	N28°34.12' / E77°6.73'
Канада	Оттава	CYDH	N45°7.83' / W75°56.90'
Франція	Париж	LFPG	N49°0.59' / E2°32.87'
Китай	Пекін	ZBAA	N40°4.40' / E116°35.90'
Італія	Рим	LIRU	N41°57.12' / E12°30.05'
Південна Корея	Сеул	RKSM	N37°26.75' / E127°6.85'
Японія	Токіо	RJTY	N35°44.92' / E139°20.92'



а)

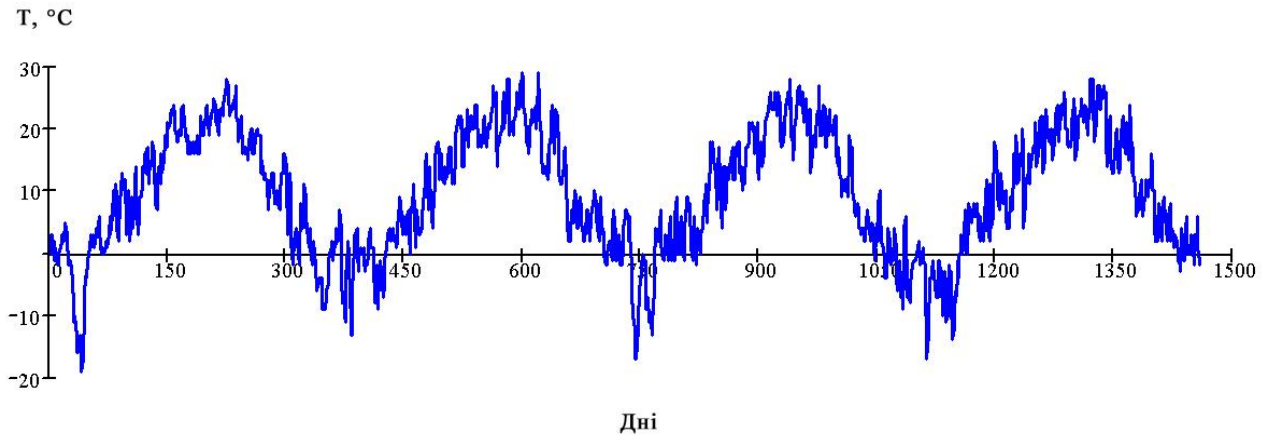


б)

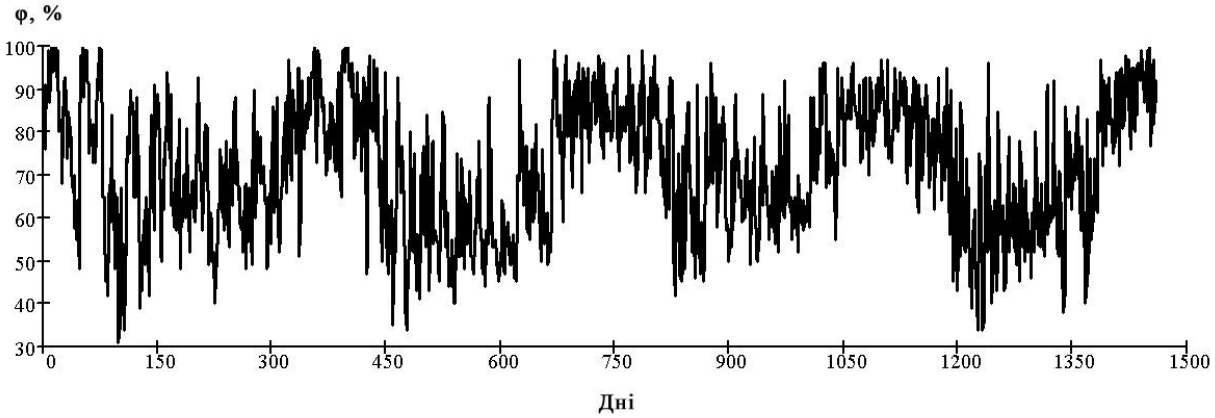
Рис. 3.13. Графіки зміни розрахованого значення об’ємної концентрації кисню протягом 2014 року в основних містах світу:

а) Вашингтон, Оттава, Пекін, Рим, Сеул, Токіо;

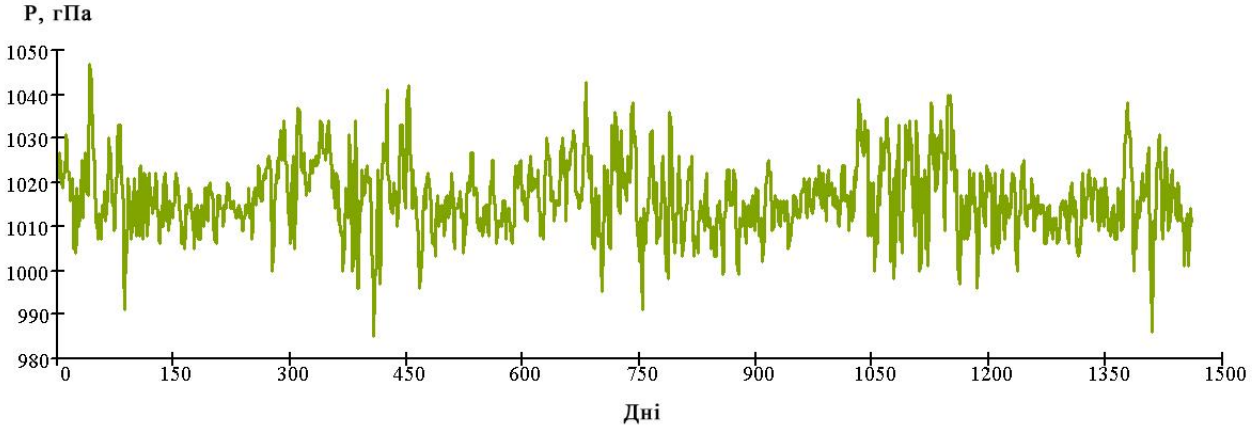
б) Берлін, Канберра, Нью-Делі, Мадрид, Лондон, Париж


T, °C
30
20
10
-10
-20
0
150
300
450
600
750
900
1050
1200
1350
1500
Дні

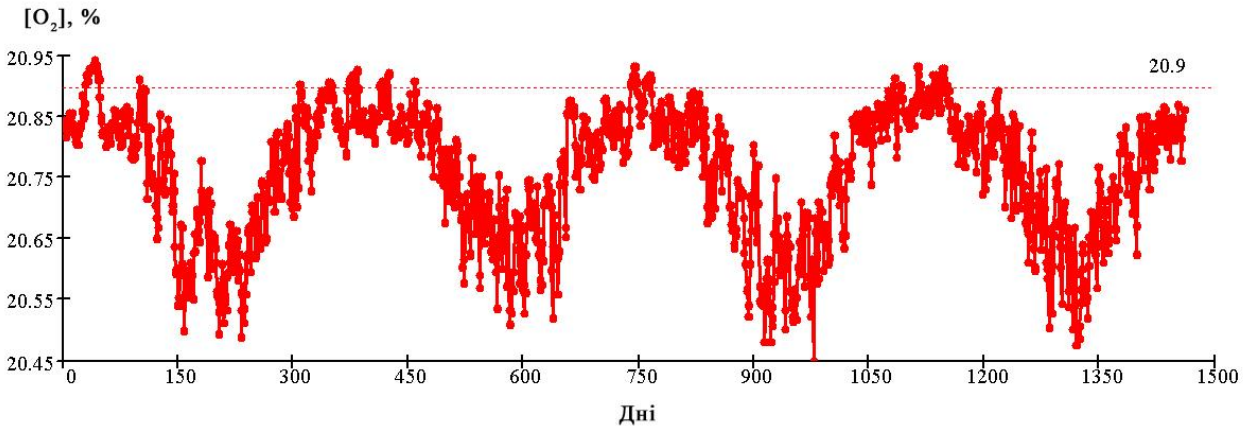
а)


φ, %
100
90
80
70
60
50
40
30
0
150
300
450
600
750
900
1050
1200
1350
1500
Дні

б)


P, гПа
1050
1040
1030
1020
1010
1000
990
980
0
150
300
450
600
750
900
1050
1200
1350
1500
Дні

в)



г)

Рис. 3.14. Виміряні значення метеопараметрів:

а) температура; *б*) вологість; *в*) тиск, та розрахована за ними об'ємна концентрація кисню у повітрі (*г*) з 01 січня 2014 року по 31 грудня 2017 року

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 [542]:

а) залежність, яка візуально найближче описує характер зміни даних на всьому діапазоні значень (рис. 3.15*а*);

б) залежність, визначена вбудованими функціями програмного пакету MathCAD (рис. 3.15*б*);

в) залежність, визначена із застосуванням рядів Фур'є (рис. 3.15*в*).

Коефіцієнт детермінації функціональної залежності наведеної на рис. 3.15*а* становить 0,450, а її аналітичне представлення має вигляд [542]:

$$\left[O_2\right]_{\text{пр}}(t) = 20,728 + 0,182 \cdot \sin\left(\frac{t}{59,279} - 4,85\right). \qquad (3.59)$$

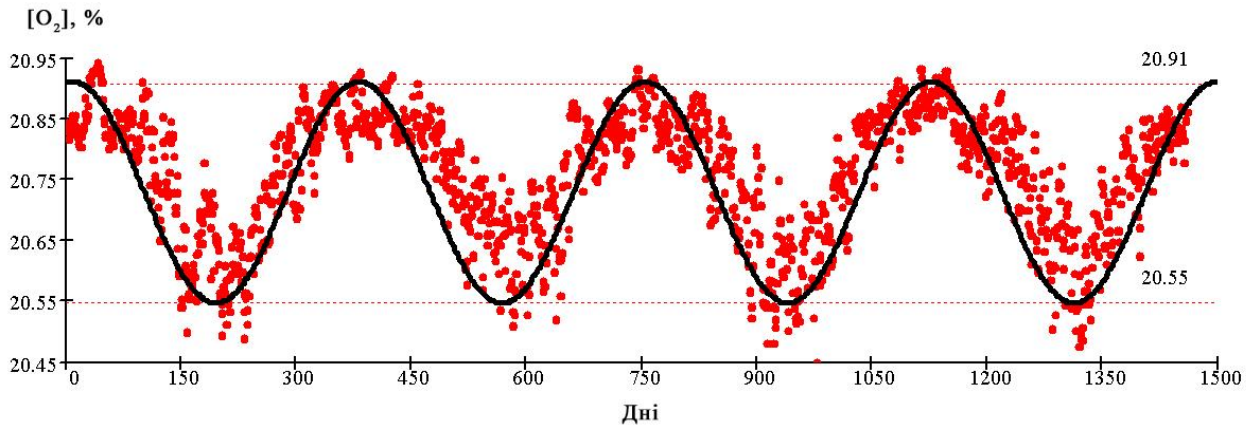
Коефіцієнт детермінації функціональної залежності наведеної на рис.3.15*б* становить 0,709, а її аналітичне представлення має вигляд [542]:

$$[O_2]_{\text{пр}}(t) = 20,761 + 0,126 \cdot \sin\left(\frac{t}{58,885} - 5,015\right). \qquad (3.60)$$

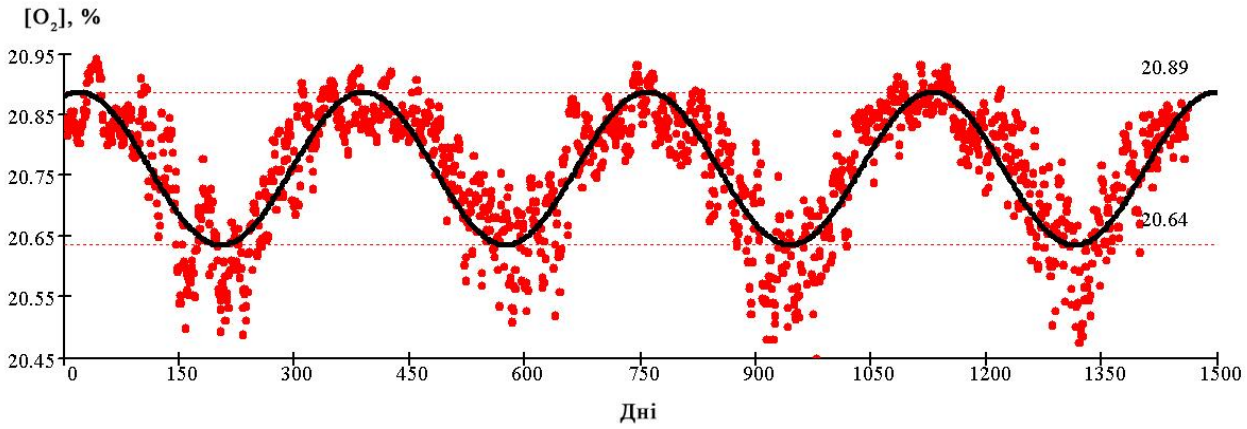
Вибір дискретного перетворення Фур'є для апроксимації даних зумовлений їх квазіперіодичним характером та можливістю пошуку функціональної залежності з коефіцієнтом детермінації близьким до 1. Модель апроксимації має вигляд виразу оберненого перетворення Фур'є: [542]:

$$[O_2]_{\text{пр}}(t) = C_0 + 2 \cdot \sum_{j=1}^{m} C_{kj} \cos\left(\omega_0 \cdot k_j \cdot t - \theta_{kj}\right), \qquad (3.61)$$

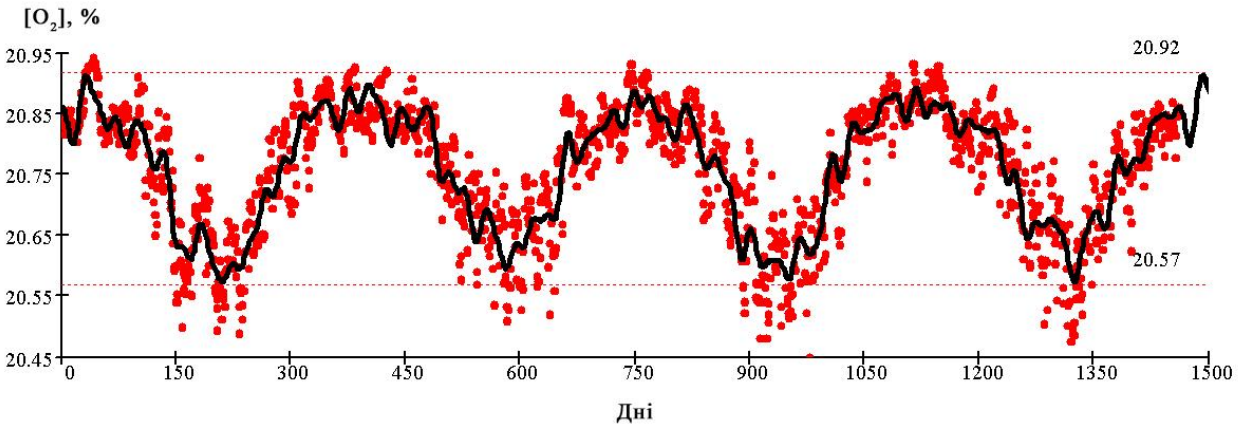
де m – кількість коефіцієнтів ряду Фур'є; $C_k = \sqrt{a_k{}^2 + b_k{}^2}$ – дійсний коефіцієнт Фур'є, $k = \overline{0, m}$; $\theta_k = arctg\dfrac{b_k}{a_k}$ – початкова фаза; $\omega_0 = \dfrac{2\pi}{T}$ – кругова частота; T – період дискретної послідовності рівний кількості спостережень; $a_k = \text{Re}[X_k]$; $b_k = \text{Im}[X_k]$; $X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i \cdot k \cdot n}$ – 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. 3.15. 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 вбудованими функціями програмного пакету MathCAD; *в*) функція апроксимації, визначена із застосуванням рядів Фур'є відповідно до формули (3.61)

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. 3.15*в*), становить 0,803, при $m = 50$ – $R^2 = 0{,}870$, при $m = 100$ – $R^2 = 0{,}917$, при $m = 150$ – $R^2 = 0{,}944$, при $m = 200$ – $R^2 = 0{,}961$ [542]. Значення порядкових номерів, амплітуд та початкових фаз гармоніки наведені у табл. 3.7.

Як видно з рис. 3.15 область значень знайдених функцій прогнозованої об'ємної концентрації кисню вужче, ніж область апостеріорних значень. У якості прогнозованого значення об'ємної концентрації кисню пропонується використовувати [542]:

- значення функції ряду Фур'є згідно формули (3.62). Значення параметрів функції ті самі, що і для функції (3.61). Аргументом функції є сума порядкового номеру дня у році та періоду ряду Фур'є. Поправка на високосний рік не враховується;

$$\left[O_2\right]_{\text{пр.1}}(t) = C_0 + 2 \cdot \sum_{j=1}^{m} C_{k\,j} \cos\left(\omega_0 \cdot k_j \cdot (t + q \cdot T) - \theta_{k\,j}\right), \qquad (3.62)$$

де $q = 0, 1, 2, \ldots n$;

- середнє прогнозованих значень об'ємної концентрації кисню у повітрі розрахованих за формулою (3.62) для відповідного аргументу з періодом 365 днів;

$$\left[O_2\right]_{\text{пр.2}}(t) = C_0 + \frac{2 \cdot \sum_{l=0}^{y-1} \sum_{j=1}^{m} C_{k\,j} \cos\left(\omega_0 \cdot k_j \cdot (t + l \cdot 365) - \theta_{k\,j}\right)}{y}, \qquad (3.63)$$

де y – ціле значення кількості років, яке відповідає експериментальним даним за якими визначалась функція апроксимації за формулою (3.61), $y = \lfloor T/365 \rfloor$.

Таблиця 3.7 – Значення параметрів ряду Фур'є зображеного на рис. 3.15*в*

j	k	C_k	Θ_k	j	k	C_k	Θ_k	j	k	C_k	Θ_k
0	0	20,760	0	5	21	0,006	2,104	10	67	0,005	-1,420
1	4	0,063	-0,479	6	39	0,006	0,936	11	20	0,005	2,600
2	8	0,013	2,050	7	30	0,005	2,107	12	42	0,005	0,773
3	2	0,008	2,221	8	16	0,005	-1,432	13	28	0,004	2,114
4	6	0,006	-1,432	9	47	0,005	-1,028	14	55	0,004	0,258
								15	34	0,004	-1,171

Оцінкою достовірності прогнозування було обрано відносну похибку:

$$\delta = \frac{\left|\left[O_2\right]^V - \left[O_2\right]_{\text{пр}}\right|}{\left[O_2\right]^V} \cdot 100\%. \qquad (3.64)$$

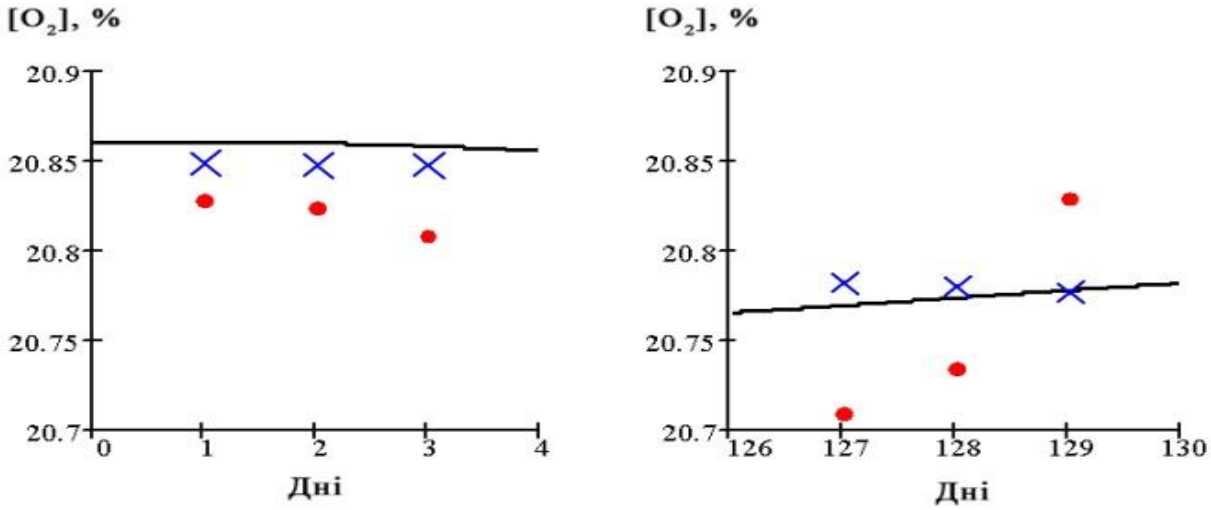
З метою оцінювання достовірності використання моделі функції апроксимації для завдання прогнозування були порівняні прогнозовані та апостеріорні значення для одного дня 2014-2018 років, при q=0 для $\left[O_2\right]_{\text{пр.1}}(t)$ та для $\left[O_2\right]_{\text{пр.2}}(t)$ – $y = \left[0, 1, 2, 3\right]$ у відповідності до року. Для всіх досліджуваних функцій $R^2 \approx 0{,}8$. Результати відповідних розрахунків наведені у таблиці 3.8 [542].

У таблиці 3.9 наведені прогнозовані значення об'ємної концентрації кисню у повітрі, отримані за формулами (3.62) та (3.63), з відносними похибками і розраховані значення, отримані за формулою

$$[\mathrm{O}_2]^V = \frac{8{,}314 \cdot D \cdot T}{P \cdot M_{O_2}}, \qquad (3.65)$$

де D – парціальна густина кисню; T – температура повітря; P – атмосферний тиск; M_{O_2} – молярна маса кисню [543]. Ці значення були отримані для декількох днів у січні та травні 2018 року (рис. 3.16).

З огляду на значення розрахованих відносних похибок наведених у таблиці 3.7 та графічного відображення розрахованих прогнозованих значень об’ємної концентрації кисню у повітрі на рис. 3.16, можна віддати перевагу розрахунку прогнозованого значення за формулою (3.63) [542].



а) *б*)

Рис. 3.16. Графічне відображення прогнозованих та розрахованих значень об’ємної концентрації кисню у повітрі у січні та травні 2018 року (точками відображені розраховані значення $[O_2]^V$, суцільною лінією – функція апроксимації $[O_2]_{\text{пр.1}}(t)$, хрестиками – прогнозовані значення $[O_2]_{\text{пр.2}}$) :

а) три дні у січні; *б*) три дні у травні 2018 року

Таблиця 3.8 – Прогнозовані та розраховані значення об’ємної концентрації кисню у повітрі (по рокам)

03.01 (t=3)	2014	2015	2016	2017
$[O_2]^V$, %	**20,83**	**20,79**	**20,785**	**20,849**
$[O_2]_{\text{пр.1}}(t)$, %	20,858	20,847	20,826	20,858
δ_1, %	0,13	0,28	0,20	0,04
$[O_2]_{\text{пр.2}}(t)$, %	20,836	20,835	20,854	20,847
δ_2, %	0,03	0,22	*0,33*	0,01

Таблиця 3.9 – Прогнозовані та розраховані значення об'ємної концентрації кисню у повітрі (по дням)

Дата	01.01.18	02.01.18	03.01.18	08.05.18	09.05.18	10.05.18
t, день	1	2	3	127	128	129
$[O_2]^V$, %	**20,827**	**20,823**	**20,808**	**20,709**	**20,734**	**20,829**
$[O_2]_{\text{пр.1}}(t)$, %	20,860	20,860	20,858	20,769	20,774	20,778
δ_1, %	0,16	0,18	0,24	0,29	0,19	0,25
$[O_2]_{\text{пр.2}}(t)$, %	20,848	20,848	20,847	20,782	20,779	20,777
δ_2, %	0,10	0,12	0,19	0,35	0,22	0,25

Таким чином, проведені дослідження показали, що концентрація кисню в навколишньому повітрі не є постійною величиною. Як було відображено, її значення на відкритій місцевості можна встановити за допомогою значень вологості, температури та тиску атмосферного повітря, однак це потребує додаткових вимірювальних пристроїв.

В якості практичного аспекту в даній роботі було запропоновано застосування розробленого методу в енергетичному секторі.

На теперішній час проблема економії паливних ресурсів є актуальною для всього світу, тому контроль процесу спалювання палива має бути максимально точним. Розроблені методи підвищення точності визначення КНП у котлоагрегатах з використанням газоаналізуючих пристроїв, мають велику перспективу, оскільки виключають похибку, що містять електронні системи цих пристроїв. Для того, щоб визначити КНП в котлоагрегаті, необхідно визначити поточні концентрації кисню у димових газах і навколишньому середовищі, та порівняти їх між собою. Таким чином, застосування запропонованого методу може підвищити точність визначення КНП до 10% [542].

Однак, розглянуті в роботі практичні аспекти застосування методу прогнозування концентрації кисню в повітрі не є обмеженими. В загальному, прогнозування концентрації кисню в повітрі може бути застосоване в медицині – для створення мікрокліматичних зон із заданим газовим складом

навколишнього середовища; в аграрному секторі – для контролю за зростанням сільськогосподарських культур; в екології – при створенні кліматичних карт, а також інших сферах.

3.6. Висновки до розділу

1. Запропоновано алгоритм кореляційного аналізу між складовими енергетичного балансу (типами енергетичних ресурсів, сектором перетворення та галузями-споживачами енергоресурсів) та викидами забруднюючих речовин (CO_2, SO_2, NO_2, CO, PM_{10}, $PM_{2,5}$) на прикладі України. Загалом сформовано та розглянуто 153 набори даних, 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 $\hat{r}'$. Довірчі границі коефіцієнта кореляції з ймовірністю P=0,95 розраховані за допомогою Z-перетворення Фішера. Показано, що 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).

2. 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, 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.

3. Запропоновано матричний метод 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. Як міри схожості між об’єктами контролю, можу бути такі елементи кластерного аналізу, як Евклідова відстань, квадрат Евклідової відстані, Мангеттенська відстань, відстань Чебишова та степенева відстань. На основі експериментальної верифікації запропонованого методу показано, що рівень коректного функціонування вибраних ПС державної 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).

4. Запропоновано метод прогнозування об’ємної концентрації кисню в повітрі, що базується на використанні визначеної функціональної залежності. Ця залежність є функцією апроксимації, параметри якої обчислюються за розрахованими значеннями об’ємної концентрації кисню у повітрі. У свою чергу, вихідними даними для розрахунку об’ємної концентрації кисню у повітрі є виміряні метеорологічні параметри (температура, відносна вологість та атмосферний тиск) за попередні роки. Підвищення достовірності прогнозування досягається збільшенням періоду дискретної послідовності та кількості гармонік ряду Фур’є при визначенні функціональної залежності значення об’ємної концентрації кисню від часу. Даний метод може бути використаний в енергетиці – для налаштування оптимальних параметрів функціонування котлоагрегатів, в медицині – для створення мікрокліматичних зон із заданим газовим складом; в аграрному секторі – для контролю за зростанням сільськогосподарських культур; в екології – при створенні кліматичних карт, а також інших сферах.

РОЗДІЛ 4
МЕТОДИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЖЕРЕЛ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ НА БАЗІ РОЗПОДІЛЕНОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

4.1. Основні забруднюючі речовини у продуктах спалювання палива та їх поширення у атмосфері

Розглянемо інтегральні оцінки складу і виду основних забруднюючих речовин (полютантів) атмосферного повітря, статистичні дані яких накопичені на значному інтервалі спостереження у виді ретроспективної інформації.

Підвищення концентрації в атмосферному повітрі різних забруднюючих речовин негативно впливає на весь комплекс живої природи. Тривала дія забруднюючих домішок в атмосфері приводить до погіршення здоров'я людей та тварин, зниження урожайності сільськогосподарських культур. Забруднення атмосфери здатне суттєво прискорити корозійні процеси в будівельних конструкціях, елементах інфраструктури, що контактують з повітрям.

В атмосферу потрапляють не тільки шкідливі викиди з теплоелектростанцій (ТЕС), але і інших промислових та енергетичних підприємств, транспорту, комунальних служб. В таблиці 4.1 наведено розподіл викидів забруднюючих речовин в атмосферу від об'єктів різних галузей промисловості [543].

Реальний стан технічного обладнання об'єктів енергетики в Україні, які в основному відпрацювали свій технічний ресурс, вимагає створення нових систем дистанційного контролю довкілля. Це потребує використання сучасних досягнень науки і техніки, новітніх інформаційно-вимірювальних технологій, а їх ефективність залежить від розроблення і практичного використання апаратно-програмних вимірювальних комплексів та систем [543].

Таблиця 4.1 – Співвідношення викидів шкідливих речовин в атмосферу між галузями промисловості

Об’єкти та сфери промисловості	Частка викидів забруднюючих речовин в атмосферу, %
ТЕС та котельні	27
Чорна металургія	17
Нафтовидобуток та нафтохімія	16
Автомобільний транспорт	12
Кольорова металургія	10
Будівельна промисловість	5
Вугільна промисловість	2,5
Хімічна промисловість	1,5
Інші галузі	9
Всього:	**100**

Вид палива впливає на склад забруднюючих речовин, що формуються після його спалювання. На електростанціях використовується тверде, рідке та газоподібне паливо. Основними забруднюючими речовинами, що знаходяться в складі відхідних газів є: SO_x, NO_x, CO, сполуки ванадію (в основному пентаксид ванадію V_2O_5). До забруднюючих речовин відноситься також зола [543].

До твердого палива, що використовується в енергетиці, належать вугілля (буре, кам’яне, антрацит), горючі сланці і торф. Схематичний склад твердого палива зображено на рис. 4.1. Як видно з рис. 4.1, органічна частина палива складається в вуглецю C, водню H, кисню O, органічної сірки S. Мінеральна частина палива складається з вологи H_2O та золи. Основна частина мінеральної складової палива переходить в процесі спалювання в летючу золу [543].

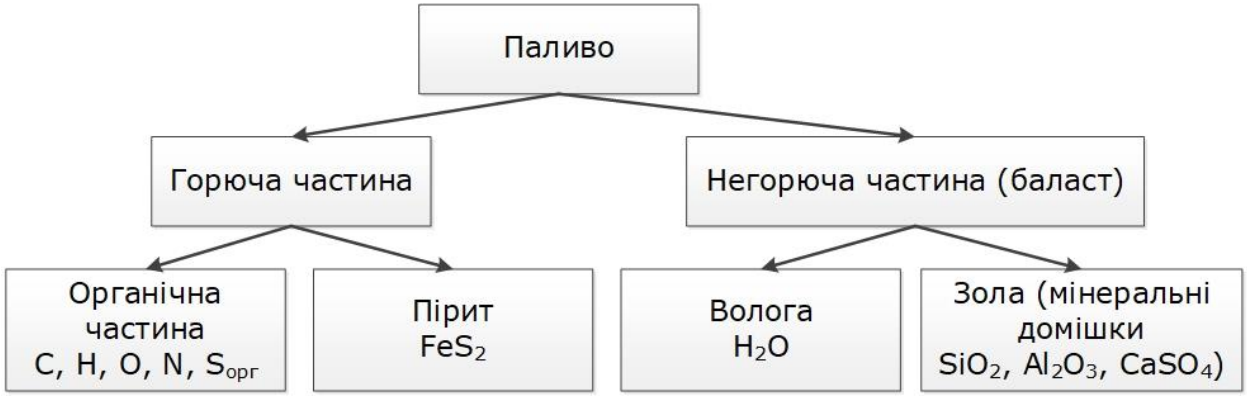


Рис. 4.1. Структура складу твердого палива

До рідких палив, що використовуються в енергетиці, належать мазут, сланцеве масло, дизельне та котельно-пічне палива. В рідкому паливі відсутня піритна сірка. До складу золи мазуту входять V_2O_5, Ni_2O_3, Al_2O_3, Fe_2O_3, SiO_2, MgO та інші оксиди. Зольність мазуту не перевищує 0,3%. При повному його спалюванні вміст твердих частинок у відхідних газах складає близько 0,1 г/м^3 [543].

Сірка у мазуті знаходиться переважно у вигляді органічних сполук, «чистої» сірки та сірководню. ЇЇ вміст залежить від сірчистості нафти, з якої його виготовлено.

Дизельне паливо за вмістом сірки прийнято розділяти на 2 групи: 1 – до 0,2% та 2 – до 0,5%. В малосірнистому котельно-пічному паливі вміст сірки не перевищує 0,5%, в сірнистому – до 1,1; в сланцевому маслі – не більше 1%.

Газоподібне паливо є найбільш «чистим» органічним паливом, і в процесі його спалювання можуть формуватися тільки NO_x та CO (при неповному спалюванні). Детальніша інформація про механізми утворення продуктів хімічного недопалу при спалюванні природного газу наведено в роботах [54, 544].

Як видно із наведених даних, в забрудненні атмосферного повітря основну роль відіграють об’єкти теплоенергетичної, металургійної та нафтопереробної промисловості. Їх сумарний вклад в забруднення

навколишнього середовища складає близько 2/3 сумарних викидів промисловості.

ГДК забруднюючих речовин, що продукуються об’єктами енергетичної галузі, представлені в табл. 4.2 [543].

Таблиця 4.2 – Значення ГДК (мг/м^3) для деяких речовин на рівні дихання людини

Речовина	Хімічна формула	$ГДК_{м.р.}$	$ГДК_{с.д.}$
Діоксид азоту	NO_2	0,085	0,04
Оксид азоту	NO	0,6	0,06
Діоксид сірки	SO_2	0,5	0,05
Бензапірен	$C_{20}H_{16}$	—	10^{-6}
Пентаксид ванадія	V_2O_5	—	0,002
Оксид вуглецю	CO	5	3
Аміак	NH_3	0,2	0,04
Сірководень	H_2S	0,008	—
Сажа	—	0,15	0,05
Неорганічний пил, що містить діоксин кремнія,%			
>70	—	0,15	0,05
20–70	—	0,3	0,1
<20	—	0,5	0,15
Вугільна зола ТЕС	—	0,05	0,02

Наведені матеріали відображають лише характерні особливості основних забруднюючих речовин, які формують екологічні характеристики атмосферних полів забруднення.

Тепер стисло розглянемо питання поширення забруднювачів в атмосферному повітрі. Турбулентність атмосферного повітря є складним фізичним явищем, динаміка якого швидко змінюється у часі і просторі. Це явище необхідно враховувати у дослідженнях характеристик локальних атмосферних полів забруднення. На основі ретроспективної інформації досліджень виділяють основні компоненти турбулентності атмосферного повітря. Остання впливає на розсіювання домішок в атмосфері через дію молекулярної та турбулентної дифузії. Характерним для цього процесу є те, що вплив молекулярної дифузії в порівнянні з турбулентною дифузією є порівняно малим.

Турбулентна дифузія має 2 складові – динамічну та термічну. Термічна дифузія пов’язана з вертикальним температурним градієнтом повітря та забезпечу конвективну турбулентність.

Динамічна дифузія, що забезпечує механічну турбулентність, виникає в результаті переміщення повітряних мас під дією вітру. Вона збільшується в нижніх шарах тропосфери під впливом макронерівностей рельєфу та не пов’язана з температурним градієнтом.

Основний вплив на атмосферну турбулентність здійснюють 2 процеси:

– конвективна турбулентність, що пов’язана з природніми конвективними потоками, що виникають в результаті нагрівання атмосфери;

– механічна турбулентність, що виникає через тертя рухомих повітряних потоків та нерівної земної поверхні, та є результатом вітрового зсуву.

На процес розсіювання в атмосфері викидів, що надходять з труб викидів та вентиляційних пристроїв, істотний вплив мають наступні фактори [543]:

– стан атмосфери;

– фізичні і хімічні властивості речовин, що входять до складу викидів (щільність, температура газу, дисперсний склад пилу та ін.);

– висота і діаметр джерела викиду;

– розташування джерел викиду;

– рельєф місцевості.

В якості прикладу наведено схематичний розподіл концентрації забруднюючих речовин в атмосфері під високим точковим джерелом забруднення, який зображено на рис. 4.2.

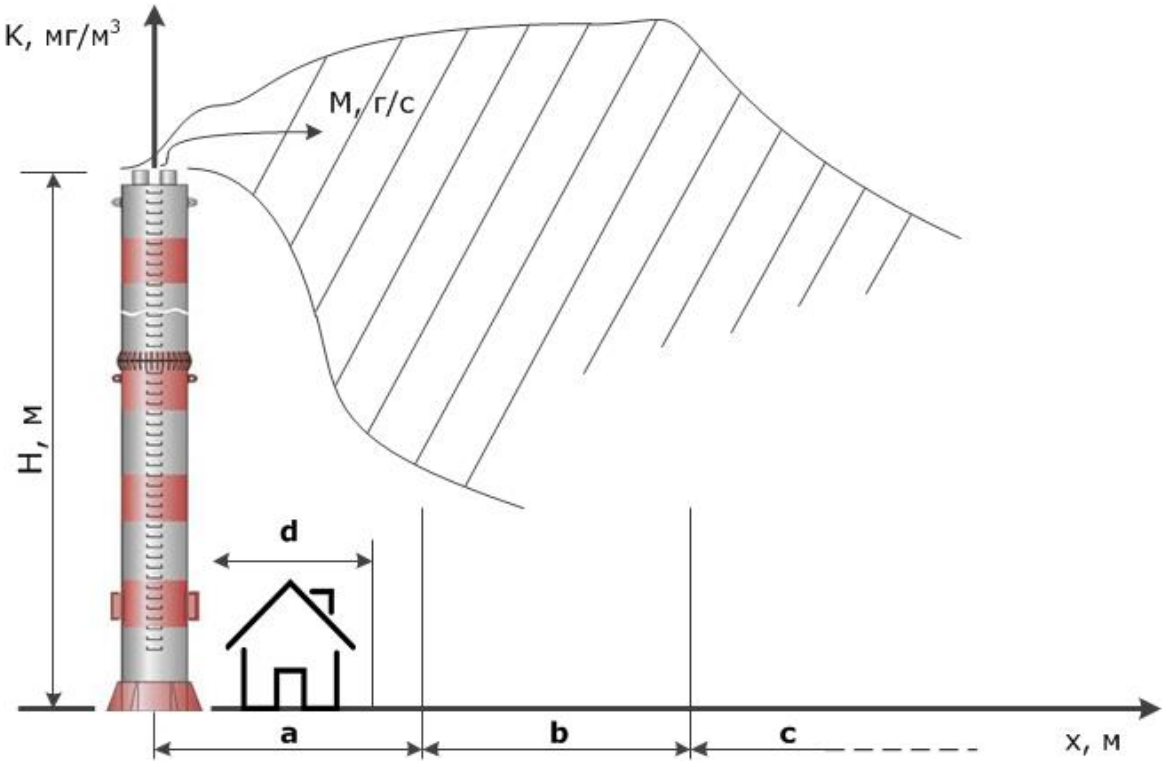


Рис. 4.2. Ілюстрація зміни розподілу забруднюючих речовин в атмосфері під факелом точкового джерела: a – зона перекидання факела; b – зона задимленості; c – зона зниження рівня забруднення; d – зона забруднення неорганізованими викидами

Високі концентрації забруднюючих речовин всередині зони перекидання факела спричинені неорганізованими викидами.

Зона задимленості є найбільш небезпечною та неприпустима в зоні житлової забудови. Її розміри варіюються в залежності від метеоумов та знаходяться в діапазоні 10-50 висот труби викиду. Максимальна концентрація полютантів в приземному шарі атмосфери прямо пропорційна масовому викиду забруднюючої речовини M та обернено пропорційна квадрату висоти джерела викиду H^2 [530].

Підвищення температури та швидкості руху струменя викиду призводить до збільшення висоти факела викиду та зниження приземної концентрації полютантів (рис. 4.3).

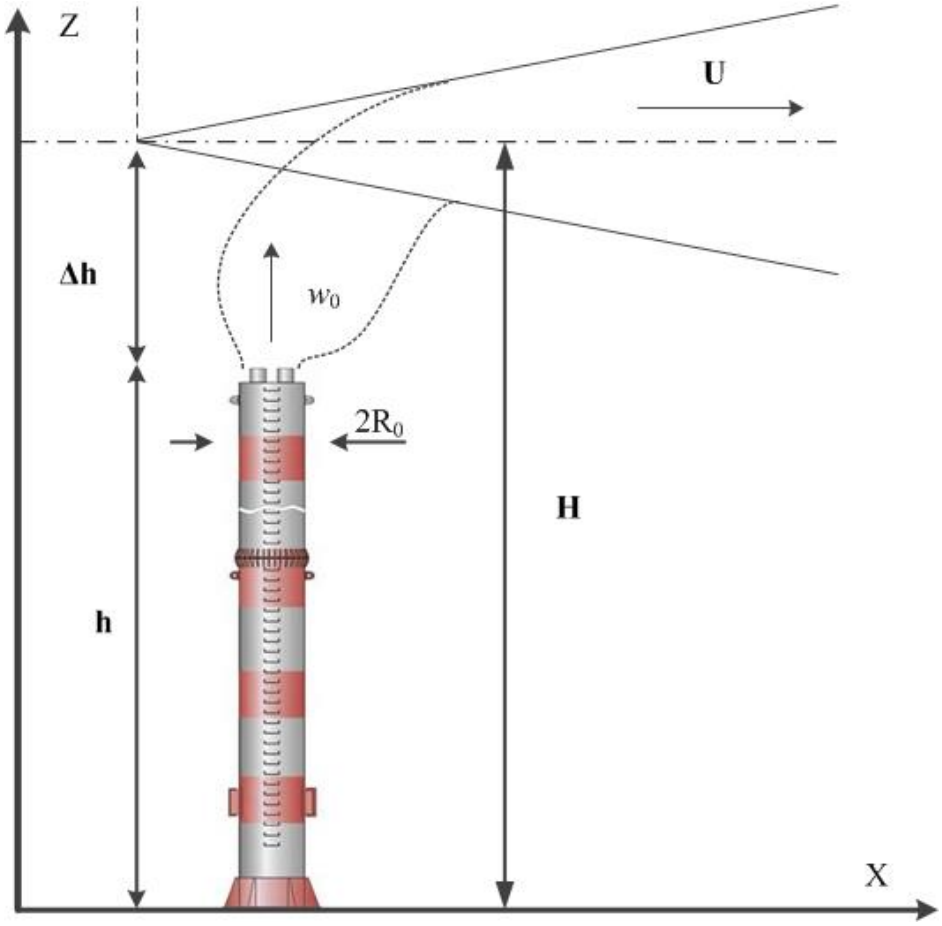


Рис. 4.3. Ілюстрація джерела викидів полютантів з ефективною висотою *H*

При невеликій швидкості вітру (до 2 м/с) дим з труби спочатку розповсюджується вертикально вгору і тільки на деякому рівні починає переміщуватися в горизонтальній площині. Як зазначалося вище, це пов’язано зі збільшеною в порівнянні з атмосферним повітрям температурою вихідних газів та початковою швидкістю руху струменя з джерела викиду.

Це спричиняє ефект підняття джерела викиду над трубою на деяку величину Δh. Тому при розрахунках замість реальної висоти джерела викиду користуються характерною ефективною висотою:

$$H = h + \Delta h.$$

Значення Δh визначають за наближеною формулою, отриманою з експериментальних даних:

$$\Delta h = 3,75 \cdot w_0 \cdot R_0 / u + 1,6 \cdot g \cdot V_1 \cdot \Delta T \Big/ \left(T_a \cdot u^3 \right),$$

де w_0 – швидкість газів на виході із джерела, м/с; R_0 – радіус струменя викиду, м; u – швидкість вітру, м/с; V_1 – об'ємна витрата вихідних газів, м^3/с; ΔT – різниця температур струменя викиду та повітря навколишнього середовища, К; T_a – температура повітря навколишнього середовища, К.

Розсіювання в атмосфері газоподібних домішок та дрібнодисперсних твердих частинок (діаметром до 10 мкм), що мають порівняно невелику швидкість осадження, підпорядковуються одним і тим же законам. На частинки діаметром більше ніж 10 мкм ці закони не розповсюджуються, адже їх швидкість осадження під дією сили тяжіння зростає [530].

Метеоумови істотно впливають на перенос і розсіювання домішок в атмосфері. Найбільший вплив чинять такі фактори: температура, напрям і сила вітру, рівень сонячного випромінювання, опади, тумани.

Основними факторами, що забезпечують перемішування повітря в атмосфері є різниця температур струменя викиду і повітря навколишнього середовища та механічна турбулентність.

Вітер може чинити різний вплив на процес поширення полютантів, рівень якого залежить від типу джерела викиду та характеристик викиду. У випадку, якщо температура газів значно перевищує температуру навколишнього середовища, то це стає причиною утворення поля вертикальних швидкостей, що сприяють підйому факела та переміщення полютантів вгору. За наявності слабкого вітру цей ефект спричиняє зменшення концентрацій домішок у приземному шарі. Концентрація домішок біля землі зменшується також і у випадку сильних вітрів, проте це призводить до швидкого переміщення полютантів в горизонтальній площині. Найбільші концентрації забруднюючих речовин в приземному шарі формуються за деякої швидкості вітру, що називається «небезпечною». Найбільші концентрації забруднюючих речовин

в атмосферному повітрі спостерігаються на деякій висоті H', де вертикальна швидкість переміщення газів *w* наближається до 0.

Підвищена концентрація забруднюючих речовин в приземному шарі спостерігається при низьких або холодних джерелах викидів та у випадку низької швидкості вітру (0-1 м/с). Таким чином, при аналізі забруднення повітря в містах враховують як повторюваність малих швидкостей вітру, так і повторюваність надмірно великих швидкостей вітру.

Значний вплив на забруднення повітря в міських агломераціях має напрям вітру. Рівні концентрації полютантів значно підвищуються у випадку, коли повітряні маси рухаються зі сторони промислових об'єктів. Дане питання потребує додаткових досліджень та буде розглянуте нижче.

Інверсійною стратифікацією (інверсією температури) називають явище підвищення температури повітря з висотою. Якщо інверсія починається безпосередньо біля поверхні землі, то її називають приземною, а якщо з деякою висотою – піднятою. Інверсії значно ускладнюють переміщення вертикальних повітряних мас та розсіювання полютантів в атмосфері. Інверсії температури в нижній тропосфері виникають в результаті [530]:

– охолодження земної поверхні через випромінювання;

– охолодження приземного шару за рахунок витрат тепла на випаровування води чи танення снігу;

– стоку холодного повітря в місця зі зниженим рельєфом;

– дії морського бризу на узбережжі морів в теплу пору року.

Локальна маса газу при переміщені в атмосфері вертикально вгору розширюється, вниз – стискається у відповідності з розподілом тиску в атмосфері. Якщо градієнт температури по вертикалі дорівнює $dT = 1\,^oC$ на кожні $dz = 100\,м$, то зміни об'єму протікають адіабатно:

$$\Delta\Gamma = \left(dT/dz\right)_{ад} = -0{,}01\,^{\circ}\text{C/м}.$$

При різних метеоумовах градієнт температури може бути як більшим, так і меншим за адіабатне значення.

Можливість теплового перемішування можна визначити, порівнявши реальний температурний градієнт в навколишньому середовищі з адіабатним вертикальним градієнтом температури. Порівняння визначеної таким чином величини $\Delta\Gamma$ з реальним температурним вертикальним градієнтом в (°С), що використовується для визначення стійкості атмосфери, дає змогу розрізнити 4 найбільш важливі категорії стійкості атмосфери (рис. 4.4) [530].

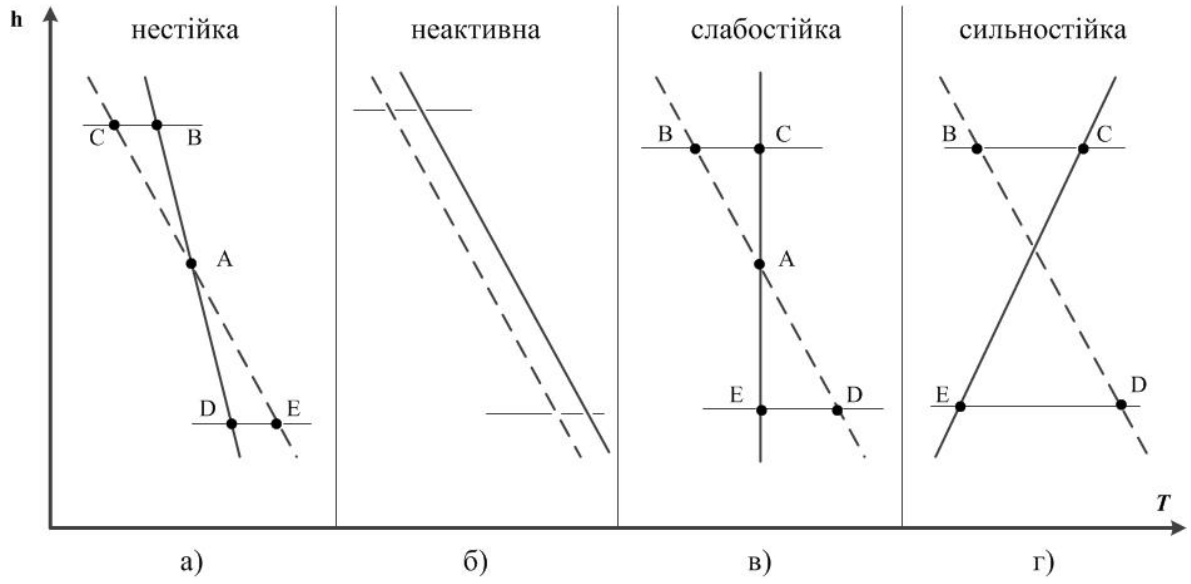


Рис. 4.4. Графіки вертикального градієнту температури та стійкість атмосфери: суцільна лінія – градієнт температури навколишнього середовища, $(dT/dz)_{нс}$; пунктирна лінія – сухоадіабатний вертикальний градієнт температури, $\Delta\Gamma$

У випадку, приведеному на рис. 4.4*а*, реальний вертикальний градієнт температури навколишнього середовища $(dT/dz)_{нс}$ менший за величину $\Delta\Gamma$. У цьому випадку атмосфера знаходиться у нададіабатному стані, тобто її стан є нестійким.

Для пояснення цього процесу розглянемо невеликий об’єм повітря в точці А. У випадку його переміщення під дією турбулентної дифузії в атмосфері вгору з досить великою швидкістю, кінцеве положення цього об’єму повітря зобразимо точкою В на прямій сухоадіабатного градієнта. Цьому положенню

відповідає температура, значення якої вище реальної температури навколишнього середовища (точка С), а густина є меншою в порівнянні з густиною повітря навколишнього середовища.

При переміщенні об'єму повітря із точки А вниз відбувається адіабатичне стиснення елементарного об'єму повітря, внаслідок чого густина повітря в точці D буде перевищувати значення густини повітря при температурі повітря навколишнього середовища в точці Е, тому розглянутий об'єм повітря буде продовжувати рухатися вниз. Таким чином, будь-яке переміщення об'єму повітря у цьому випадку у вертикальній площині супроводжуватиметься тенденцією до посилення ефекту зміщення, тому атмосфера у цьому випадку знаходиться у нестійкому стані.

У випадку, що приведено на рис. 4.4*б* ($\Delta\Gamma = \left(dT/dz\right)_{ос}$), стан атмосфери характеризується як неактивний, так як при переміщенні заданого об'єму повітря у вертикальній площині його фізичні параметри не будуть відрізнятися від параметрів повітря навколишнього середовища. Таким чином, рушійна сила вертикальних зміщень буде відсутньою.

Якщо значення вертикального градієнта температури повітря навколишнього середовища більше, ніж сухо адіабатного (рис. 4.4*в*, $\Delta\Gamma < \left(dT/dz\right)_{НС}$), то атмосфера знаходиться в адіабатному стані. Атмосфера у цьому випадку є слабостійкою, тому будь-який об'єм повітря, випадковим чином переміщений в вертикальному напрямі, буде повертатися до свого початкового положення.

У випадку, якщо температура повітря буде збільшуватися зі зростанням висоти ($\Delta\Gamma << \left(dT/dz\right)_{НС}$), то атмосферні умови є інверсивними (рис. 4.4*г*). Стан атмосфери при цьому є сильностійким. Інверсивні характеристики атмосфери в значній мірі зменшують вертикальне переміщення полютантів і таким чином сприяють збільшенню їх концентрації у приземному шарі повітря.

Таким чином, ступінь стійкості атмосфери визначає здатність атмосфери розсіювати забруднювачі. Стійкість атмосфери визначається відсутністю значних вертикальних переміщень та перемішування.

Можливі варіанти розповсюдження струменя диму з одиничного джерела при різних градієнтах температури повітря навколишнього середовища показані на рис. 4.5 та табл. 4.3 [530].

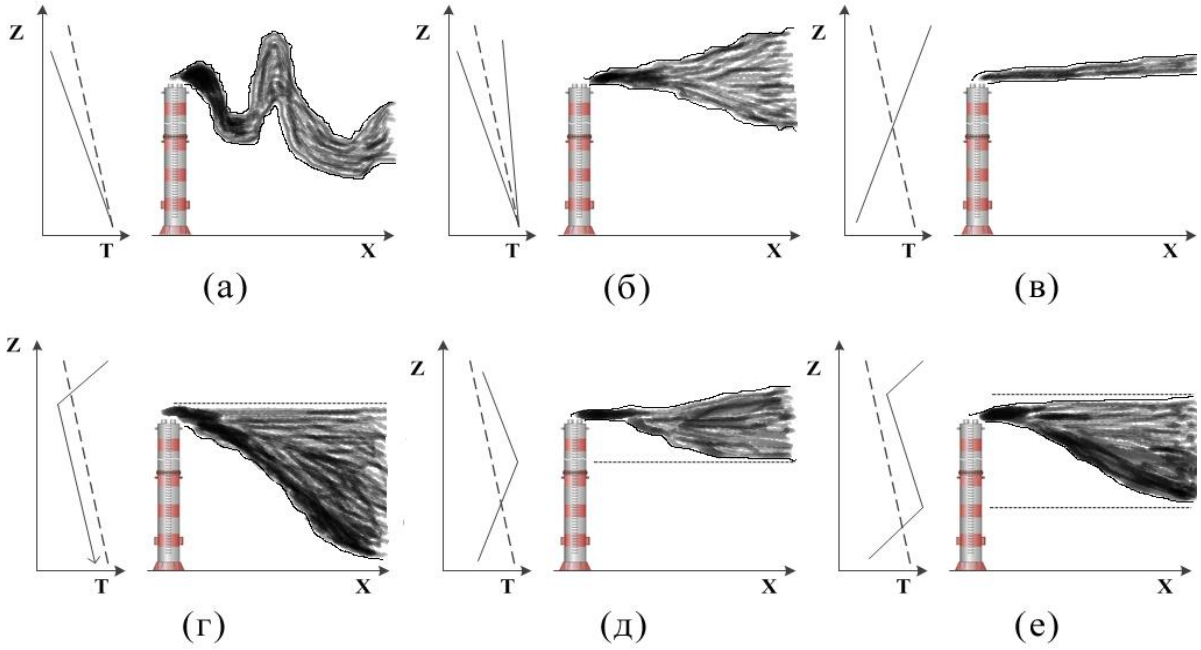


Рис. 4.5. Ілюстрація температурного профілю та форми струменя вихідного газу в площині *XZ*: пунктирна лінія - адіабатичний вертикальний градієнт температури; суцільна лінія - градієнт температури навколишнього повітря

Таблиця 4.3 – Характеристика температурного профілю та форми струменя за рис. 4.5

№	Характеристика	Опис
1*a*	Хвилеподібний струмінь, сильна нестійкість	Виникають клуби диму, забруднення інтенсивно розсіюється у значних об’ємах. На окремих ділянках приземного шару можуть утворюватися високі концентрації забруднюючих речовин. Такий стан атмосфери характерний для ясних днів при нагріванні земної поверхні, при слабких вітрах.

2*б*	Конусоподібний струмінь, стійкість неактивна	Малосприятливі умови для розсіювання забруднюючих речовин. Значна частина полютантів переноситься на великі відстані за напрямом вітру, перш ніж досягне земної поверхні. Такі умови характерні для хмарної погоди, помірних вітрах. Хмарність перешкоджає притоку/відтоку сонячної випромінювання.
3*в*	Віялоподібний струмінь, поверхнева інверсія, сильна стійкість	Струмінь вихідного газу поширюється горизонтально. Переріз струменя наближається до еліптичної форми, забруднення поширюються на значні відстані. Концентрація полютантів біля приземного шару низька. Такий стан характерний для безвітряних ясних ночей, при охолодженні земної поверхні
4*г*	Задимлений стумінь, інверсія вище горловини труби	Викиди поширюються на земну поверхню. Концентрація забруднень в приземному шарі може значно перевищувати розрахункову (в десятки разів). Такий стан характерний для ранку після ночі зі стійкою інверсією.
5*д*	Піднесений струмінь, інверсія нижче горловини труби	Інверсійний шар відіграє роль бар'єру, що запобігає опусканню струменя на землю. Полютанти розсіюються в напрямку вітру і значних приземних концентрацій не утворюється. Такий стан характерний в післяобідній час – ранній вечір при ясній погоді.
6*е*	Обмежений струмінь, інверсія нижче і	Розсіювання забруднюючих речовин при цьому відбувається між двома стійкими шарами атмосфери. У випадку штилю така інверсія може відігравати роль «стелі», що перешкоджає підйому

	вище горловини труби	викидів. Концентрація домішок біля приземного шару значно зростає.

Вплив інших метеорологічних явищ

•Тумани на вміст забруднюючих речовин в атмосферному повітрі можуть впливати наступним чином. Краплі туману мають абсорбційні властивості, і здатні поглинати забруднюючі домішки, при чому не тільки в приземному шарі, але і у верхніх шарах атмосфери. Це призводить до того, що концентрація полютантів значно зростає в шарі туману і зменшується за його межами. Розчинення сірчистого газу (SO_2) в краплях туману призводить до утворення сірчаної кислоти (H_2SO_4).

•Опади очищують повітря від забруднюючих речовин. Після тривалих інтенсивних опадів високі концентрації полютантів у повітрі не спостерігаються.

•Вплив сонячного випромінювання ініціює фотохімічні реакції в атмосфері, що спричиняють утворення вторинних продуктів. Ці продукти часто мають більш токсичні властивості, ніж речовини, що надходять від джерел викиду. Як приклад можна навести процес утворення сульфатних аерозолів після окислення сірчистого ангідриду.

4.2. Методичні особливості вирішення прямої задачі забруднення атмосферного повітря від об’єктів енергетики

Розвиток методів прогнозування базується на результатах теоретичного та експериментального моніторингу (дослідження закономірностей) поширення полютантів, що викидаються джерелами забруднення.

Дослідження поширення полютанів в теорії атмосферної дифузії здійснюють на основі його математичного описання рівнянням турбулентної дифузії. Воно дозволяє досліджувати поширення домішок від джерел різного типу за різних характеристик середовища. У загальному вигляді задача

прогнозування розповсюдження забруднення в повітрі математично визначається як розв'язання, за певних початкових і граничних умов, диференціального рівняння:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\sum_{i=1}^{3}U_i\frac{\partial C}{\partial X_i}=\sum_{i=1}^{3}\frac{\partial}{\partial X_i}K_i\frac{\partial C}{\partial X_i}-aC, \qquad (4.1)$$

де t – час; X_i – координати; U_i – складові середньої швидкості переміщення полютанта; K_i – складові коефіцієнта обміну; i=1,2,3 – напрямки осей координат; a – коефіцієнт, що визначає зміну концентрації за рахунок перетворення полютанта; C – концентрація полютанта [110, 543].

Застосовуючи декартову систему координат, визначимо вісі X_1, X_2 та X_3 через X, Y та Z, відповідно швидкості $U_1=u$; $U_2=v$; $U_3=w$; коефіцієнти обміну $K_1=k_x$; $K_2=k_y$; $K_3=k_z$.

Рівняння (4.1) набуває наступний вид

$$\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial x}+v\frac{\partial C}{\partial y}+w\frac{\partial C}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}k_x\frac{\partial C}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}k_y\frac{\partial C}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}k_z\frac{\partial C}{\partial z}-aC. \qquad (4.2)$$

При вирішення практичних задач вид рівняння (4.2) спрощується. Якщо вісь x зорієнтована за напрямком середньої швидкості вітру, то v=0.

Вертикальні переміщення в атмосфері над однорідною горизонтальною поверхнею є малими та можна враховувати w=0, якщо полютант є порівняно легким та не має власної швидкості переміщення.

Якщо розглядається важкий полютант, що поступово осідає в атмосфері під дією гравітаційних сил, то w є швидкістю осадження, що входить в рівняння (4.2) зі знаком (-).

За наявності вітру можна знехтувати членом k_x, враховуючи дифузію по осі x, так як в цьому напрямку дифузійний потік полютанта значно менше конвективного.

Зміна концентрацій в атмосфері з часом набуває зазвичай квазістаціонарного характеру і тому можна прийняти $\partial C/\partial t=0$.

Таким чином, рівняння (4.2) можна звести до виду

$$u\frac{\partial C}{\partial x} - w\frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y}k_y\frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}k_z\frac{\partial C}{\partial z} - aC. \quad (4.3)$$

У випадку легкого полютанту

$$u\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y}k_y\frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}k_z\frac{\partial C}{\partial z} - aC. \quad (4.4)$$

У випадках, коли концентрація полютанту зберігається

$$u\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y}k_y\frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}k_z\frac{\partial C}{\partial z}. \quad (4.5)$$

При прогнозуванні забруднення повітря основний інтерес представляє визначення очікуваних концентрацій в приземному шарі h=1,2-2 м.

В приземному шарі повітря до рівня $z=h$, коефіцієнт обміну зростає пропорційно висоті; швидкість є логарифмічною функцією висоти.

Якщо $z=0$ (на рівні поверхні землі) можна наближено прийняти за граничне значення $k_z=k_0$ – коефіцієнт молекулярної дифузії для повітря.

Аналітичне рішення рівняння дифузії можна записати для випадку, коли u та k_z задані степеневими функціями від z ($u=u_1 \cdot z^n$; $k_z=k_1 \cdot z$) для легкого полютанта, що зберігає концентрацію ($w=a=0$).

Наземна концентрація забруднюючої речовини для z=0 визначається як:

$$C(x,y) = \frac{M}{2(1-n)k_1\sqrt{\pi k_0 x^3}} e^{\frac{u_1 H^{1+n}}{(1+n)^2 k_1 x} - \frac{y^2}{4k_0 x}}, \quad (4.6)$$

де M – викид полютанта від джерела за одиницю часу; H – висота джерела викиду [545, 546].

Характерною особливістю розподілу наземної концентрації C по осі X є наявність її максимуму C_m на відстані X_m від джерела.

Візуалізація розподілу концентрації полютанта від одиничного точкового джерела наведена на рис. 4.6 [110, 543].

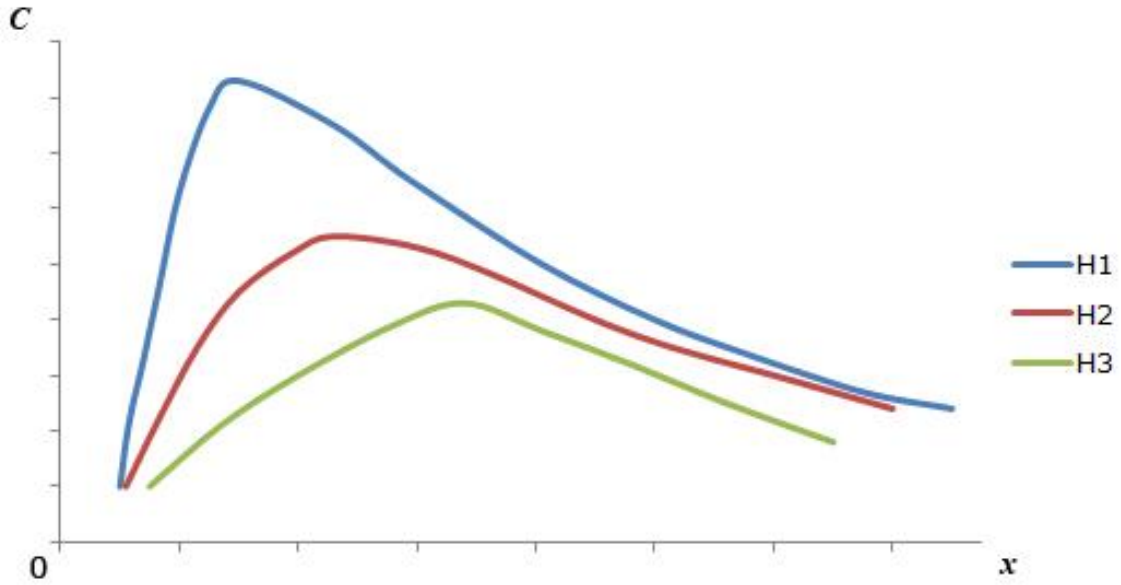


Рис. 4.6. Графік теоретичного розподілу концентрації домішок в повітрі *C* на відстані *x* від точкового джерела різної висоти *H*: *H1<H2<H3*

Розрахунки показують, що при однакових параметрах викидів максимальна приземна концентрація полютанта від більш високого джерела менша і спостерігається на більшій відстані від джерела.

Розглянемо приклади розрахунків концентрацій забруднюючих речовин в повітрі від об'єктів енергетики України.

Основним документом, що регламентує оцінювання розсіювання та визначення приземних концентрацій полютантів від джерел викидів в Україні є «Методика розрахунку концентрацій в атмосферному повітрі забруднюючих речовин, що містяться у викидах підприємств ОНД-86» (далі – ОНД-86). Дана методика для розрахунку локального забруднення атмосфери викидами від промислових підприємств застосовується не тільки в Україні, але в більшій частині країн СНД. Дана методика містить ряд аналітичних виразів, отриманих в результаті апроксимації рівняння турбулентної дифузії. ОНД-86 дозволяє розрахувати максимально можливий розподіл концентрацій викидів в умовах слабкостійкого стану атмосфери та усередненні значення по 20-30 хвилинному інтервалу, проте не враховує такі фактори, як клас стійкості атмосфери та тип земної поверхні. Дана методика застосована для розрахунку

концентрацій забруднюючих речовин на відстані до 100 км від джерела викиду [530].

Методика дозволяє проводити розрахунки розсіювання полютантів, що викидаються в атмосферу одиночними точковими, лінійними джерелами і групою джерел, з урахуванням впливу рельєфу місцевості, визначити граничні концентрації забруднюючих речовин в двометровому шарі над поверхнею землі, а також вертикальний розподіл концентрацій.

Одним із головних недоліків даної методики є метод розв'язання оберненої задачі для визначення характеристик джерела забруднення. Він безпосередньо передбачає наявність такого джерела (тобто відоме місце розташування об'єкту енергетики), що здійснює викиди, та зводиться до розрахунку потужності викиду M та висоти труби H за значенням максимальної приземної концентрації C_m.

Для речовин, що володіють сумацією шкідливої дії, безрозмірна сумарна концентрація q (в долях ГДК) та сумарна концентрація C, приведена до речовини C_1, розраховуються з використанням для кожного джерела значень потужності M_q та M відповідно [530]:

$$
\begin{gathered}
q = C_1 / ГДК_1 + C_2 / ГДК_2 + ... + C_n / ГДК_n; \\
M_q = M_1 / ГДК_1 + M_2 / ГДК_2 + ... + M_n / ГДК_n; \\
C = C_1 + C_2 \frac{ГДК_1}{ГДК_2} + ... + C_n \frac{ГДК_1}{ГДК_n}; \\
M = M_1 + M_2 \frac{ГДК_1}{ГДК_2} + ... + M_n \frac{ГДК_1}{ГДК_n},
\end{gathered}
\tag{4.7}
$$

де C_1, $ГДК_1$ – концентрація та ГДК речовини, до якого відбувається приведення; C_2, …, C_n та $ГДК_2$, …, $ГДК_n$ – концентрації та ГДК інших речовин, що входять в групу, що розглядається.

Один із головних атрибутів енергетичного об'єкту є наявність труб викидів на його території, що і безпосередньо здійснюють викиди. Подальший розрахунок концентрацій забруднюючих речовин від об'єктів енергетики

доцільно розглядати як від точкових джерел з круглим чи прямокутним отвором.

Розглянемо розрахунок забруднення атмосфери викидами одного джерела з круглим отвором [530]. Максимальне значення приземної концентрації забруднюючої речовини C_m при викиді газоповітряної суміші із одного точкового джерела з круглим отвором досягається при несприятливих метеорологічних умовах на відстані X_m та визначається за формулою:

$$C_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1} \cdot \Delta T}, \tag{4.8}$$

$$C_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot n \cdot \eta}{H^{4/3}} \times \frac{D}{8V_1}, \tag{4.9}$$

де A – коефіцієнт, що залежить від температурної стратифікації атмосфери (в межах 140…250); M – маса забруднюючої речовини, що викидається в атмосферу за одиницю часу; F – коефіцієнт, що враховує швидкість осаду забруднюючих речовин; m,n – коефіцієнти, що враховують умови виходу газоповітряної суміші із отвору джерела викиду; H – висота джерела викиду над рівнем землі (для наземних джерел приймається H=2 м); η – коефіцієнт, що враховує вплив рельєфу місцевості (у випадку рівної або слабо пересіченої місцевості з перепадом висот не більше 50 м/км приймається η=1); V_1 – об’ємні витрати газоповітряної суміші; ΔT – різниця між температурою газоповітряної суміші, що викидається, та температурою навколишнього повітря.

Формула (4.9) призначена для холодних викидів, тобто при $\Delta T \approx 0$.

Максимальна концентрація забруднюючої речовини в приземному шарі атмосфери прямо пропорційна масовим витратам забруднюючої речовини M та обернено пропорційна квадрату висоти джерела – H^2.

Коефіцієнт A при несприятливих метеорологічних умовах, що забезпечують максимальні значення концентрацій забруднюючих речовин в приземному шарі атмосфери, згідно ОНД-86, має наступні значення на території України:

- для джерел, що знаходяться північніше за 52° п.ш. A=160;

- для джерел, що знаходяться в межах 50°…52° п.ш. A=180;

- для джерел, що знаходяться південніше 50° п.ш. A=200.

При визначенні ΔT температуру навколишнього атмосферного повітря приймають рівною середній температурі зовнішнього повітря найбільш жаркого місяця в 13:00 за місцевим часом.

Значення коефіцієнта F:

- для газоподібних забруднюючих речовин та дрібнодисперсних аерозолів, швидкість осаду яких близька до нуля, F=1;

- для інших дрібнозернистих аерозолів при степені очистки газів в пиловловлювачі $\eta \geq 0{,}9$ – F=2; при $0{,}75 \leq \eta < 0{,}9$ – F=2,5; при $\eta < 0{,}75$ – F=3;

- при наявності даних про дисперсний склад пилу в залежності від співвідношення V_g/U_m: F=1 при $V_g/U_m \leq 0{,}015$; F=1,5 при $0{,}015 < V_g/U_m \leq 0{,}03$ (V_g – швидкість витання частинок такого діаметра d_g, що маса всіх частинок діаметра більше d_g складає 5% від загальної маси частинок; U_m – небезпечна швидкість вітру).

Для отримання значень коефіцієнтів m та n визначаються наступні проміжні коефіцієнти:

$$f = \frac{1000 \cdot w_0^2 \cdot D}{H^2 \cdot \Delta T}; \tag{4.10}$$

$$V_m = 0{,}65 \times \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T / H}; \tag{4.11}$$

$$V_m^* = 1{,}3 \cdot w_0 \cdot D / H; \tag{4.12}$$

$$f_e = 800\left(V_m^*\right)^3, \tag{4.13}$$

де D – діаметр отвору труби викиду; w_0 – швидкість виходу газоповітряної суміші із труби викиду.

Коефіцієнт m визначається за формулою

$$\begin{aligned} m &= 1 \Big/ \left(0{,}67 + 0{,}1\sqrt{f} + 0{,}34\sqrt[3]{f}\right) \quad \text{при } f < 100; \\ m &= 1{,}47 \Big/ \sqrt[3]{f} \qquad\qquad\qquad\qquad\quad \text{при } f \geq 100. \end{aligned} \tag{4.14}$$

У випадку виконання умови $f_e<f<100$ при розрахунку m приймають $f=f_e$.

Якщо $f\leq 100$ значення n визначається в залежності від V_m:

$$\begin{aligned} n &= 1 && при\ V_m \geq 2, \\ n &= 0,532V_m^2 - 2,13V_m + 3,13 && при\ 0,5 \leq V_m < 2, \\ n &= 4,4V_m && при\ V_m < 0,5. \end{aligned} \qquad (4.15)$$

Для визначення коефіцієнтів m та n можна використовувати графіки, наведені на рис. 4.7.

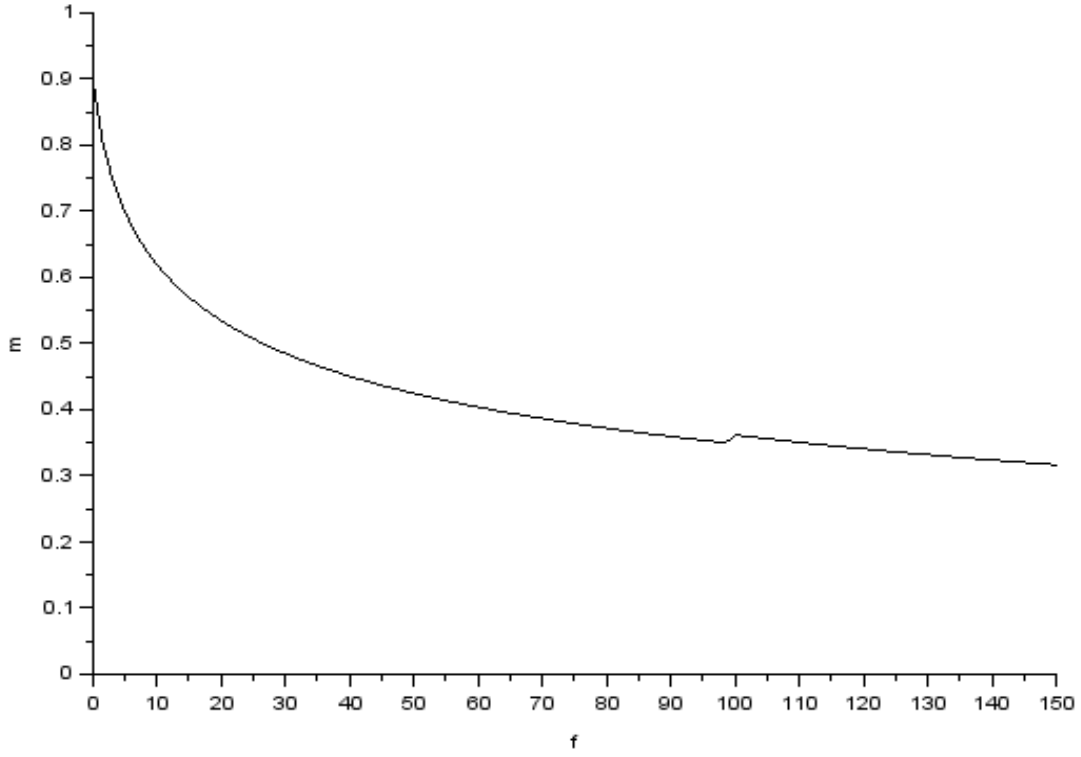


Рис. 4.7. Графік залежності коефіцієнта m від f

Якщо $f\geq 100$ чи $\Delta T\approx 0$ та $V^1_m\geq 0,5$ (холодні викиди) при розрахунку C_m замість формули (4.8) застосується формула (4.9).

Аналогічно для $f<100$ та $V_m<0,5$ чи $f<100$ та V^1_m (випадки гранично малих небезпечних швидкостей вітру) розрахунок C_m замість формули (4.8) проводиться за формулою

$$C_m = A \cdot M \cdot F \cdot m^1 \cdot \eta / H^{7/3}, \qquad (4.16)$$

де $m^1=2,86 \cdot m$ при $f<100$, $V_m<0,5$; $m^1=0,9$ при $f\geq 100$, $V^1_m<0,5$.

Відстань x_m, на якій приземна концентрація C при несприятливих метеорологічних умовах досягає максимального значення C_m, визначається за формулою:

$$x_m = (5 - H)dH/4, \tag{4.17}$$

де d – безрозмірний коефіцієнт, що розраховується за формулами (4.18), (4.19).

При f<100

$$\begin{aligned} d &= 2,48\left(1 + 0,28\sqrt[3]{f_e}\right) && при\ V_m \le 0,5; \\ d &= 4,95V_m\left(1 + 0,28\sqrt[3]{f_e}\right) && при\ 0,5 < V_m \le 2; \\ d &= 7\sqrt{V_m}\left(1 + 0,28\sqrt[3]{f_e}\right) && при\ V_m \ge 2. \end{aligned} \tag{4.18}$$

При f>100 чи ΔT≈0 значення d знаходять за формулами:

$$\begin{aligned} d &= 5,7 && при\ V_m^1 \le 0,5; \\ d &= 11,4V_m^1 && при\ 0,5 < V_m^1 \le 2; \\ d &= 16\sqrt{V_m^1} && при\ V_{mm}^1 \ge 2. \end{aligned} \tag{4.19}$$

Значення небезпечної швидкості вітру U_m, за якої досягається найбільше значення приземної концентрації забруднюючих речовин C_m, розраховується за формулами (4.20) та (4.21).

При f<100

$$\begin{aligned} U_m &= 0,5V_m && при\ V_m \le 0,5; \\ U_m &= V_m && при\ 0,5 < V_m \le 2; \\ U_m &= V_m\left(1 + 0,12\sqrt{f}\right) && при\ V_m \ge 2. \end{aligned} \tag{4.20}$$

При f≥100 чи ΔT≈0

$$\begin{aligned} U_m &= 0,5 && при\ V_m^1 \le 0,5; \\ U_m &= V_m^1 && при\ 0,5 < V_m^1 \le 2; \\ U_m &= 2,2V_m^1 && при\ V_{mm}^1 \ge 2. \end{aligned} \tag{4.21}$$

При небезпечній швидкості вітру U_m приземна концентрація забруднюючих речовин C в атмосфері по осі струменя викиду на відстані X від джерела визначається за формулою:

$$C_x = S_1 \cdot C_m, \tag{4.22}$$

де S_1 – безрозмірний коефіцієнт, що визначається за формулою:

$$\begin{aligned} S_1 &= 3a^4 - 8a^3 + 6a^2 && при\ a \le 1; \\ S_1 &= 1{,}13 \Big/ \left(0{,}13a^2 + 1\right) && при\ 1 < a \le 8; \\ S_1 &= a \Big/ \left(3{,}58a^2 - 35{,}2a + 120\right) && при\ F \le 1{,}5, a > 8; \\ S_1 &= 1 \Big/ \left(0{,}1a^2 + 2{,}47a - 17{,}8\right) && приF > 1{,}5, a > 8, \end{aligned} \tag{4.23}$$

де $a=X/X_m$.Для низьких та наземних джерел при $2м \le H \le 10м$ та X/X_m величина S_1 змінюється на $S_{1H}=0{,}125(10-H)+0{,}125(H-2)S_1$.

Значення приземної концентрації забруднюючих речовин в атмосфері C_y на відстані y по перпендикуляру до осі струменя викиду визначають за формулою:

$$C_x = S_2 \cdot C_x, \tag{4.24}$$

де S_2 – безрозмірний коефіцієнт (залежить від швидкості вітру U та відношення y/x), що визначають за значенням аргументу t_y за формулою:

$$\begin{aligned} S_2 &= 1 \Big/ \left(1 + 5t_y + 12{,}8t_y^2 + 17t_y^3 + 45{,}1t_y^4\right)^2; \\ t_y &= U \cdot y^2 / x^2 && при\ U \le 5; \\ t_y &= 5y^2 / x^2 && при\ U > 5. \end{aligned} \tag{4.25}$$

Перейдемо до розрахунку забруднення атмосфери викидами джерела з прямокутним отвором [530]. Розрахунки забруднення атмосфери при викидах газоповітряної суміші із джерела з прямокутним отвором проводяться за наведеними вище формулами при середній швидкості ω_0 та значеннях $D=D_e$ та $V_1=V_{1e}$.

Середня швидкість виходу в атмосферу газоповітряної суміші ω_0 визначається за формулою

$$\omega_0 = V_1 \Big/ \left(L \cdot b\right), \tag{4.26}$$

де L – довжина отвору; b – ширина отвору.

Ефективний діаметр отвору D_e визначається за формулою:

$$D_e = 2 \cdot L \cdot b \Big/ \left(L + b\right). \tag{4.27}$$

Ефективні витрати газоповітряної суміші V_{1e}, що виходять в атмосферу, визначаються за формулою:

$$V_{1e} = \pi \cdot D_e^2 \cdot \omega_0 / 4. \quad (4.28)$$

Радіус зони впливу для кожного джерела розраховується як найбільша із двох відстаней X_1 та X_2, де $X_1=10X_m$, а величина X_2 визначається як відстань від джерела, починаючи з якого $C \leq 0{,}05ГДК$.

Значення X_2 можна знайти графічно. На осі OY знаходять точку $0{,}05ГДК/C_m$, через неї проводиться паралельно осі OX лінія до перетину з графіком функції $S_1=f(X/X_m)$ за максимумом. Із точки перетину опускається перпендикуляр на вісь OX. Отримане значення X/X_m помножують на X_m та отримають шукане значення X_2.

Рішення обернених задач передбачає визначення потужності викиду M [г/с] та висоти труби H, що відповідають заданому рівню максимальної приземної концентрації $C_м$ [мг/м^3] при інших фіксованих параметрах викиду.

Потужність викиду M, що відповідає максимальній концентрації $C_м$, визначається за формулою:

$$M = C_M H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T} \,/\, AFmn\eta. \quad (4.29)$$

При $f \geq 100$ чи $\Delta T \approx 0$

$$M = 8 C_m H^{4/3} V_1 / AFn\eta D. \quad (4.30)$$

Значення мінімальної висоти для випадку гарячих викидів ($\Delta T>0$) визначається із виразу (4.17).

Якщо знайдене значення $H \leq w_0 \sqrt{10D/\Delta T}$, то рішення є кінцевим. В іншому випадку попереднє значення мінімальної висоти визначається за формулою

$$H = \sqrt{AMF\eta / C_m \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}. \quad (4.32)$$

За знайденим значенням H визначаються коефіцієнти f, V_m, V^i_m, f_e за формулами (4.14-4.15) та отримують наближені значення коефіцієнтів $m=m_1$ и $n=n_1$. Якщо добуток $m_1 \cdot n_1 \neq 1$, то за величинами m_1 та n_1 визначають H у другому наближенні (H_2):

$$H_2 = H_1 \sqrt{m_1 n_1}. \tag{4.33}$$

В загальному випадку величина H на (i+1) кроку ітерації визначається за формулою

$$H_{i+1} = H_i \sqrt{m_1 n_1 / m_{i-1} n_{i-1}}, \tag{4.34}$$

де m_1 та n_1 відповідають H_i, а m_{i-1} та n_{i-1} – H_{i-1}.

Наведений ітераційний алгоритм уточнення значення H виконують до тих пір, поки знайдені значення H_i и H_{i-1} будуть відрізнятися один від одного не більше ніж на 1 м.

4.3. Ізотропна та анізотропна Гаусові моделі для формування функції щільності розподілу напряму вітру

В роботі [530] відзначено, що певні характеристики вітру є важливим як для оцінки вітрових ресурсів, а також при проектуванні та функціонуванні вітрових електростанцій. До таких характеристик можна віднести функцію розподілу швидкості вітру та ймовірність напряму. Використання функцій щільності ймовірності швидкості вітру є достатньо розповсюдженим [547].

При оцінюванні характеристик вітру на певній ділянці місцевості зі складним рельєфом чи з декількома переважаючими напрямками вітру, можна використовувати спільну двовимірну функцію розподілу щільності ймовірності, тобто використовувати неперервну модель рози вітрів, яка дозволить аналізувати зміну енергетичних характеристик з точки зору швидкості і напряму. Інформація про ці характеристики дозволить з більшої точністю локалізувати місце джерела забруднення атмосферного повітря

Нижче розглянуті ізотропна та анізотропна Гаусові моделі, що використовуються для побудови функції щільності розподілу напряму вітру.

Ізотропна Гаусова модель характеристик вітру. Дана модель 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 поздовжньої 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:

$$F_y\left(v_y\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{\frac{\left(v_y - u_y\right)^2}{-2\sigma_y^2}}, \tag{4.35}$$

$$F_x^1\left(v_x\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{\frac{\left(v_x\right)^2}{-2\sigma_y}}. \tag{4.36}$$

У відповідності з вищенаведеною гіпотезою (в), їх спільна двовимірна функція щільності розподілу визначається як добуток функцій (4.35) та (4.36).

Переходячи до полярної системи координат, що задається рівняннями (4.37), спільна двовимірна функція щільності розподілу (4.38) стає залежною від швидкості та кута:

$$v_x = v\sin\theta; \quad v_y = v\cos\theta; \tag{4.37}$$

$$F\left(v,\theta\right) = \frac{v}{2\pi\sigma_y^2} e^{\frac{u_y^2}{-2\sigma_y^2}} e^{\frac{v^2 - 2u_y v\cos\theta}{-2\sigma_y^2}}. \tag{4.38}$$

Після інтегрування по v рівняння (4.38), отримаємо функцію щільності розподілу кута θ:

$$F(\theta)=\frac{1}{2\pi}e^{\left(-\mu^2/2\right)}\left[1-\sqrt{\pi}\xi\phi(\xi)e^{\xi^2}\right];\quad 0<\theta'<2\pi, \tag{4.39}$$

де

$$\mu=u_y/\sigma_y;\ \xi=-\mu\cos\theta/\sqrt{2};\ \phi(\xi)=2\int_{\xi}^{\infty}e^{-t^2}dt\Big/\sqrt{\pi}. \tag{4.40}$$

Після інтегрування по θ рівняння (4.38), отримаємо функцію щільності розподілу швидкості *v*:

$$F(v)=I_0\left(v^2u_y/\sigma_y^4\right)e^{\left(-v^2-u_y^2\right)/2\sigma_y^2};\quad 0<v<\infty, \tag{4.41}$$

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

Анізотропна Гаусова модель характеристик вітру. Дана 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 (4.35) та (4.42):

$$F_x^2(v_x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x}e^{\frac{(v_x)^2}{-2\sigma_x}}. \tag{4.42}$$

У відповідності з вищенаведеною гіпотезою (в), їх спільна функція щільності розподілу визначається як добуток функцій (4.35) та (4.42). Переходячи до полярної системи координат, що задається рівняннями (4.37), спільна функція щільності розподілу стає залежною від швидкості та кута, що формує швидкість вітру з віссю переважаючого напряму вітру

$$F(v,\theta)=ve^{\left[-\frac{\left(v\cos\theta-u_y\right)}{2\sigma_y^2}-\frac{v^2\sin\theta}{2\sigma_x^2}\right]}\Big/2\pi\sigma_y\sigma_x, \tag{4.43}$$

Після інтегрування по *v* рівняння (4.43), отримаємо функцію щільності розподілу кута θ:

$$F'(\theta)=\frac{1}{2\pi}\exp\left(-\frac{\mu^2}{2}\right)\left[\frac{\gamma}{\gamma^2\sin^2\theta+\cos^2\theta}\right]\times\left[1-\sqrt{\pi}\eta\exp\left(\eta^2\right)\phi(\eta)\right]; \quad (4.44)$$

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

де

$$\gamma=\frac{\sigma_y}{\sigma_x};\ \eta=-\frac{\mu\cos\theta}{\sqrt{2\cos^2\theta+2\gamma\sin^2\theta}}. \quad (4.45)$$

Після інтегрування по θ рівняння (4.43), отримаємо функцію щільності розподілу швидкості *v*:

$$F'(v)=I_0\frac{v^2u_y}{\sigma_y^3\sigma_x}\exp\left(-\frac{\mu^2}{2}\right)\times\int_0^{2\pi}\exp\left[-\frac{v^2}{2\sigma_y^2}\left(\cos^2\theta+\gamma^2\sin^2\theta\right)\right]d\theta; \quad (4.46)$$

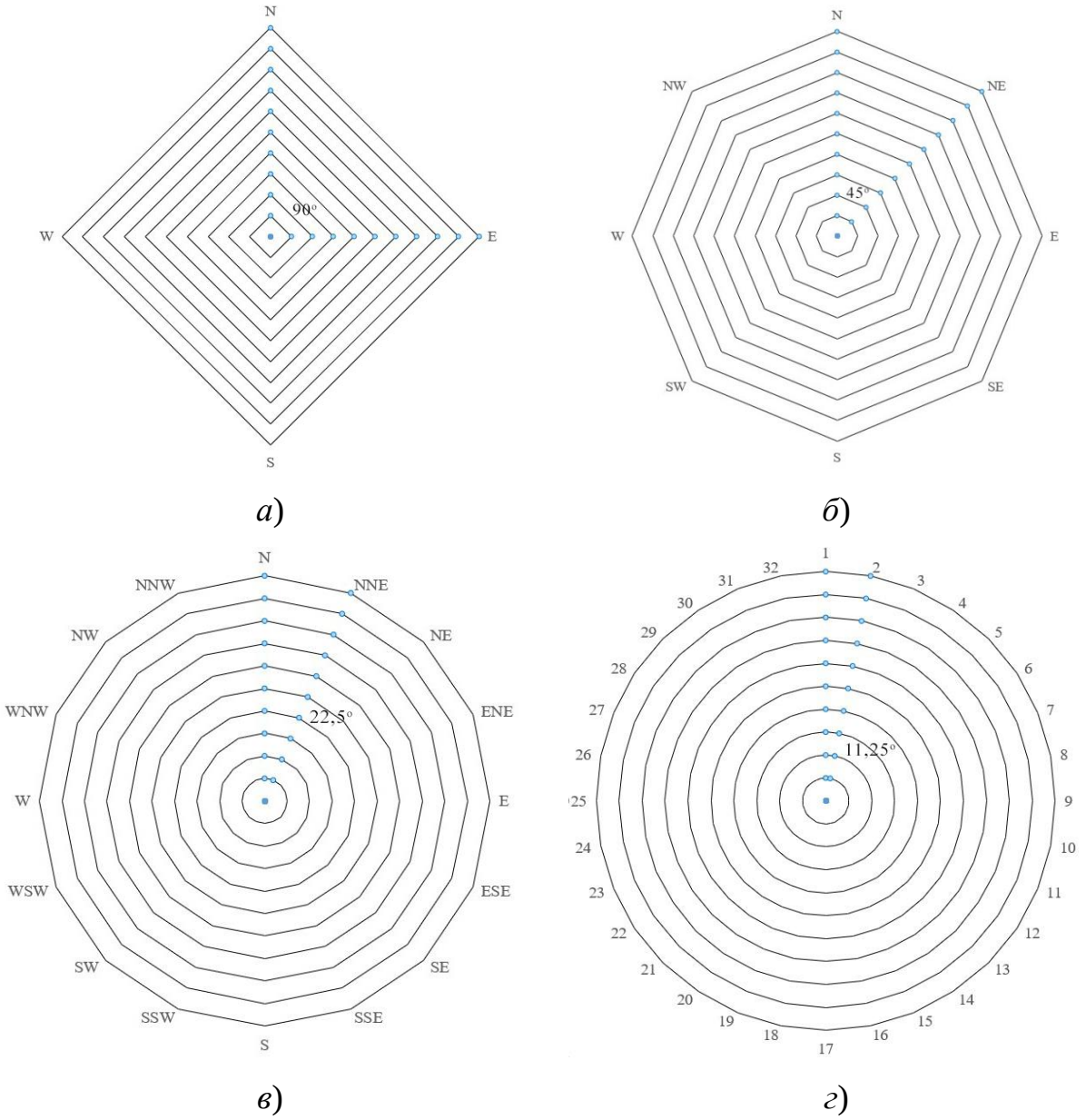
$$0<v<\infty.$$

Функції щільності розподілу швидкості та напряму вітру згідно ізотропної та анізотропної Гаусових моделей дозволяють визначити переважний напрям поширення забруднюючих полютантів. 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 статистичний ймовірнісній підхід опрацювання даних контролю.

На практиці для визначення напряму поширення вітру використовують розу вітрів, яка є статистичною оцінкою (гістограмою) усередненою на відповідному інтервалі часу (година, доба, тиждень) напрямів вітру у полярній системі координат. Відповідно до потреб така роза вітрів може бути 4-,8-,16-, 32-х променева (число секторів розбиття кола). На рис. 4.8 схематично наведено зображення відповідних пелюсткових діаграм [530].

Знаючи напрям поширення вітру за відповідною розою вітрів можна визначити площу сектора, де розміщене джерело забруднення, за формулою:

$$S=\pi R^2\Delta/360.$$



а) *б*)

в) *г*)

Рис. 4.8. 4- (*а*), 8- (*б*), 16- (*в*), 32-х (*г*) променеві рози вітрів

Як видно з рис. 4.8, чим більшу кількість напрямів розрізняє пристрій вимірювання напряму вітру, тим менша різниця кутів Δ між цими напрямами. Величина Δ дає змогу локалізувати джерело забруднення повітря при визначеному за допомогою флюгера напряму повітря. В Додатку Д наведено відповідні напрями, діапазон значень градусів, та різниці кутів між найближчими променями 4-,8- та 16-ти направленої рози вітрів.

Відповідний графік залежності площі сектора при використанні різних типів рози вітрів наведено на рис. 4.9. Як видно з рис. 4.9, використання 32-направленої рози вітрів в порівнянні з 4-х направленої збільшує точність визначення місця джерела забруднення у 8 разів.

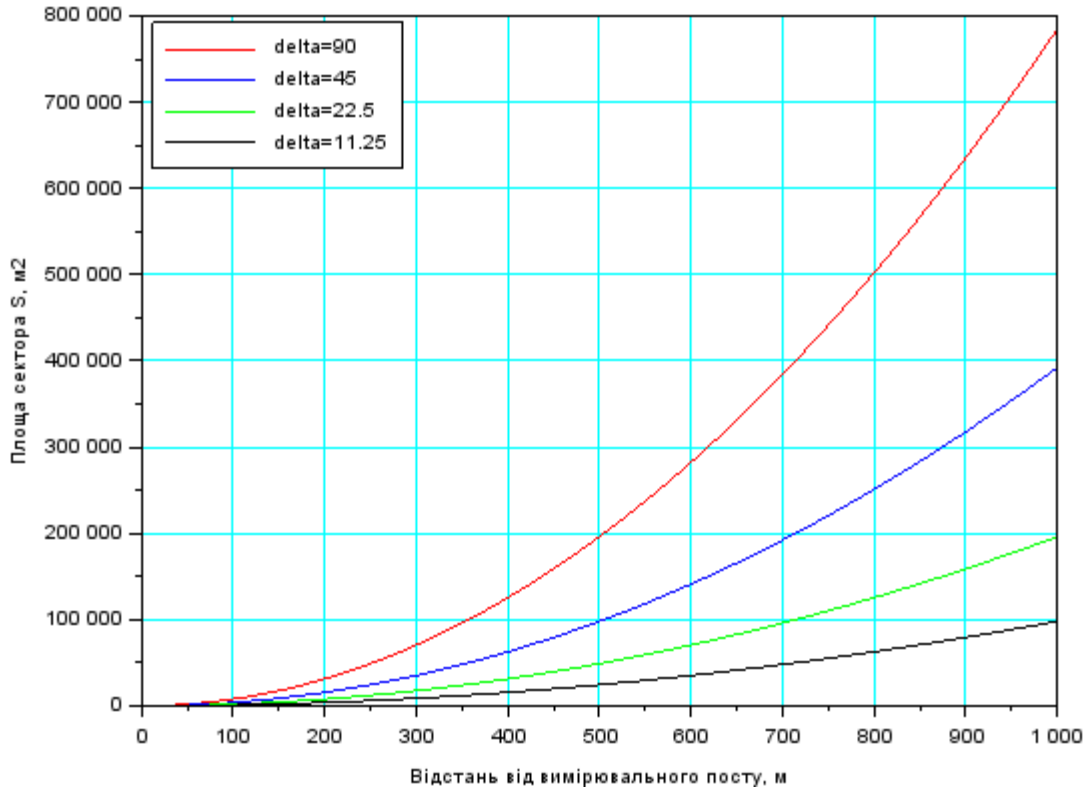


Рис. 4.9. Графік зміни площі сектору локалізації джерела забруднення при різних типах фіксації напряму вітру (4-,8-,16-,32-х променеві рози вітрів)

4.4. Математичні моделі обернених задач для знаходження основних характеристик джерел забруднення повітря

Для моделювання забруднення навколишнього середовища використано рівняння турбулентної дифузії (4.1).

У процесі розв'язування реальних практичних задач вид рівняння (4.1) може бути значно спрощений. Якщо вісь x зорієнтована за напрямом середньої швидкості вітру, то $v = 0$.

Постановка завдань. Моделювання двовимірного випадку. Пряма задача [548]**.** Рівняння розглядається в розрахунковій області $\Omega = [0;1]^2$:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial x}+w\frac{\partial C}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial C}{\partial z}\right), \tag{4.47}$$

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

Початкова умова для (4.47) має вигляд:

$$C(x,z,0)\big|_{(x,z)\in\Omega}=0. \tag{4.48}$$

Умова (4.48) гарантує те, що у початковий момент часу концентрація забруднювача повітря відсутня, тобто дорівнює нулю.

Умови на границі Γ розрахункової області Ω в (4.47) мають вигляд:

$$\left(\partial C(x,z,t)/\partial\vec{\mathbf{n}}\right)\Big|_{\Gamma}=0, \tag{4.49}$$

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

Внутрішня умова на джерелі забруднення для (4.47) має вигляд:

$$C(x_{Src},z_{Src},t)=1. \tag{4.50}$$

У рівнянні (4.50) $(x_{Src},z_{Src})=(0,67;0,32)$ – координати геометричного положення джерела забруднення. Для визначення контролю концентрації у фіксованому положенні, було обрано точку розрахункової області Ω, яка отримує дані протягом всього часу розрахунку, а саме, для $t=[0;0,5]$.

Дані, що отримуються сенсором можна записати так:

$$C_{DS}=C(x_S,z_S,t),t\in[0;0,5], \tag{4.51}$$

де $(x_S,z_S)=(0,32;0,83)$ – координати геометричного положення сенсора.

Поставлена задача (4.47)–(4.50) змодельована у прикладному програмному пакеті MATLAB 2019b. Результати моделювання показані на рисунку 4.10.

У результаті моделювання задачі (4.47)–(4.50) отримують дані для (4.51). Графічне представлення цих даних зображені на рис. 4.11.

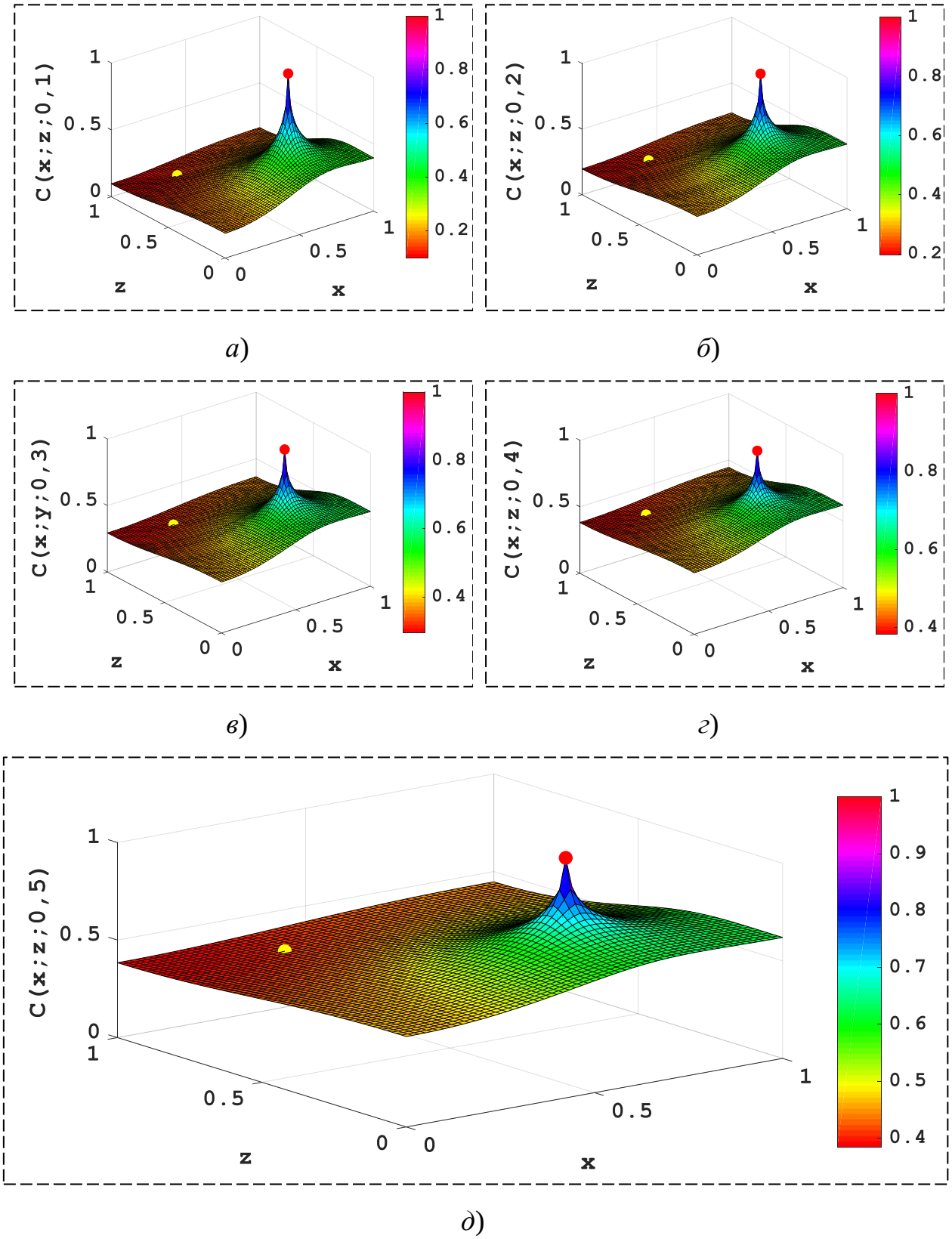


Рис. 4.10. Результати розв'язування задачі (4.47)–(4.50) з джерелом забруднення (червоним) та сенсором (жовтим), який визначає рівень забруднення: (*а–д*) – розподіли концентрації $C(x,z,t)$ у моменти часу $t=0{,}1;\ t=0{,}2;\ t=0{,}3;\ t=0{,}4;\ t=0{,}5$ відповідно

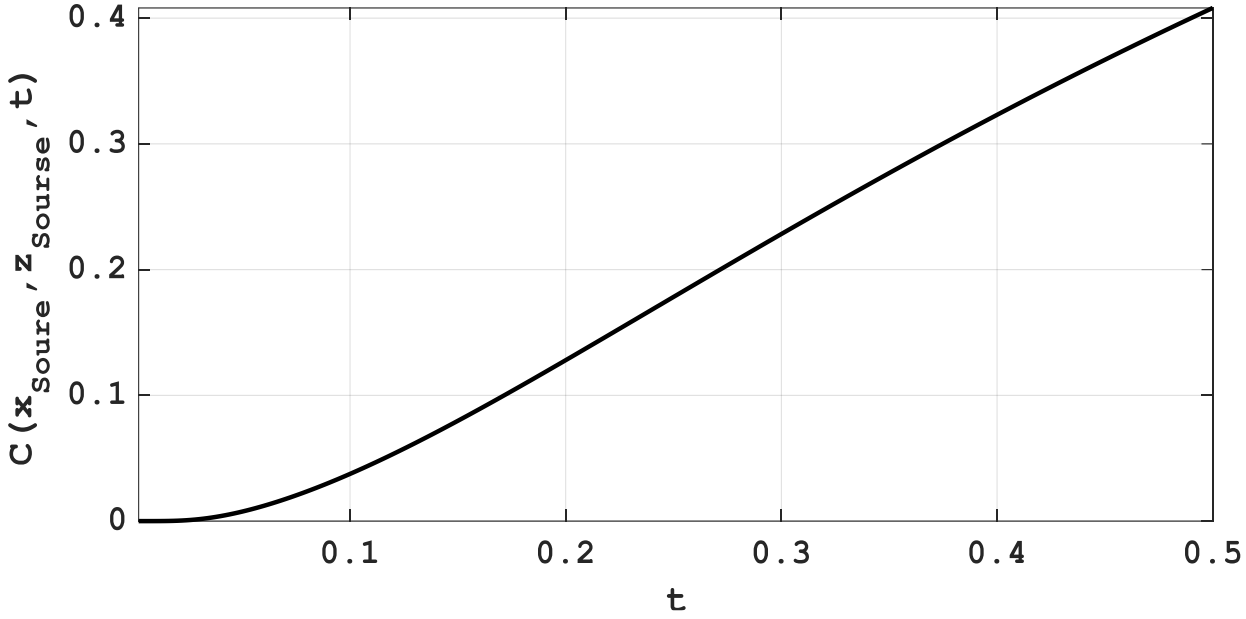


Рис. 4.11. Зняті показники сенсором, що є результатом розв’язування задачі (4.47)–(4.50)

Отже, сенсорні дані дають можливість розв’язати низку обернених задач, за допомогою яких можна встановити положення джерела забруднення.

Моделювання двовимірного випадку. Моделі обернених задач [548]**.** Розв’язування подібних задач в екології розв’язуються з використанням даних типу (4.51). За результатами вимірювань у таких задачах визначаються характеристики джерела забруднення. За сенсорними даними можна побудувати першу математичну модель оберненої задачі на базі рівняння турбулентної дифузії (4.47) – модель визначення висоти положення труби джерела забруднення та концентрації викидів на ньому.

Друга ж математична модель оберненої задачі на базі рівняння турбулентної дифузії (4.47) – модель визначення повного розташування труби джерела забруднення та концентрації викидів на ньому.

Перша математична модель оберненої задачі. Задача ставиться в оптимізаційній формі [549, 550]. Потрібно знайти глобальний мінімум функціонала виду:

$$J\left(z_{Src}, C_{Src}\right) = \int_{\tau_{beg}}^{\tau_{end}} \left(C_{DS}\left(C_{Src}\left(x_{Src}, z_{Src}\right), t\right) - C_{DS}\left(t\right)\right)^2 dt, \qquad (4.52)$$

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

Обмеженням на функціонал (4.52) є рівняння турбулентної дифузії виду (4.47) з початковою та граничними умовами (4.48), (4.49) відповідно. Значення $C_{DS}\left(t\right)$ є статистикою спостережень і задається у вигляді таблиці так:

$$C_{DS}\left(t_i\right) = TableData_i, i = \overline{1, N}, \qquad (4.53)$$

де N – загальна кількість спостережень. Дані в (4.53) задаються з рис. 4.11.

Наступна математична модель є модифікацією першої моделі та полягає у визначенні геометричного положення труби, викиди якої забруднюють навколишнє середовище, а також концентрації цих викидів.

Друга математична модель оберненої задачі. Задача ставиться в оптимізаційній формі [549, 550]. Потрібно знайти глобальний мінімум функціонала виду:

$$J\left(x_{Src}, z_{Src}, C_{Src}\right) = \int_{\tau_{beg}}^{\tau_{end}} \left(C_{DS}\left(C_{Src}\left(x_{Src}, z_{Src}\right), t\right) - C_{DS}\left(t\right)\right)^2 dt, \qquad (4.54)$$

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

Обмеженням на функціонал (4.54) є рівняння турбулентної дифузії виду (4.47) з початковою та граничними умовами (4.48), (4.49) відповідно. Значення $C_{DS}\left(t\right)$ є статистикою спостережень і задається так само:

$$C_{DS}\left(t_i\right) = TableData_i, i = \overline{1, N},$$

де N – загальна кількість спостережень. Дані в (4.53) задаються з рис. 4.11.

*Методи розв'язування моделей обернених задач***.** Процес розв'язування обернених задач можна розбити на кілька етапів. Розглядаючи такі задачі з точки зору основних аспектів отримання оптимальних оцінок, зміст процесу розв'язування можна розкрити у кілька етапів:

I етап: для вирішення задачі оптимізації проводиться вибір оптимальної математичної моделі з найзручнішою залежністю вхідних й вихідних параметрів;

II етап: вибір виду постановки обернених задач та шляхи її розв'язування;

III етап: вибір оптимального вектора вимірювань, включаючи згладжування та інші форми попередньої обробки експериментальної інформації;

IV етап: вибір можливого методу або алгоритму розв'язування, виходячи з виду математичної моделі оберненої задачі, ступеня некоректності її постановки, що є в розпорядженні дослідника обчислювальних засобів та математичного забезпечення до них;

V етап: вибір критерію оптимальності, цільового функціонала, його норми, методу пошуку параметрів регуляризації, порядку стабілізуючого функціонала, методу мінімізації цільового функціонала;

VI етап: складання оптимального алгоритму розв'язування оберненої задачі, який враховує обраний метод, критерій оптимальності, необхідну точність та найкоротший шлях отримання стійких розв'язків;

VII етап: вибір оптимальних обчислювальних процедур та реалізація відповідного алгоритму;

VIII етап: аналіз отриманих розв'язків, включаючи попередню обробку результатів (апроксимацію, згладжування тощо).

Процес отримання розв'язку оберненої задачі не обов'язково включає всі перераховані етапи або всі дії кожного етапу. Це залежить від використовуваного методу. Будь-який метод може бути використаний на різних етапах, а при розв'язанні однієї задачі, зазвичай, використовується кілька методів. Для того щоб обрати оптимальний метод дослідження, необхідно мати уявлення про все різноманіття існуючих методів, які повинні бути чітко систематизовані. Існують різні класифікації методів розв'язування основних класів обернених задач.

Мінімізація функціоналів виду (4.53) та (4.54) проводиться методом вирішення системи нелінійних рівнянь. Позначимо усі невідомі параметри функціоналів (4.52) та (4.54) у вигляді вектора $\vec{x} = (x_1, ..., x_i, ..., x_n)$. Система рівнянь має вигляд:

$$\left\{ \frac{\partial J}{\partial x_i} = 0 \right\}, i = \overline{1, N}, \tag{4.55}$$

де x_i – шукані значення параметрів функціоналів виду (4.52), (4.54); N – загальна кількість параметрів у відповідному функціоналі. Кількість невідомих параметрів у (4.52) дорівнює 2, а у функціоналу (4.54) – 3.

Система (4.55) вирішується методом Ньютона та його модифікаціями.

Тоді завдання оптимізації можна поставити в такий спосіб. Серед існуючих чисельних методів оптимізації типу Ньютона обрати найбільш ефективні для знаходження розв'язків моделей поставлених ОЗ та скоротити в них кількість викликів процедури розв'язування ПЗ.

Приклад. Нехай $f\left(\vec{x}\right) \to \min$, $x \in R^n$. Застосуємо спочатку до задачі безумовної оптимізації метод найшвидшого спуску. За напрям спуску можна обрати рух вздовж антиградієнта, наприклад, так:

$$\vec{x}^{(k+1)} = \vec{x}^{(k)} - h_k f'\left(\vec{x}^{(k)}\right),\ h_k > 0, k = 0,1,2,\ldots .$$

Задача полягає у тому, щоб знайти на кожному кроці таке значення h_k, що мінімізує функцію при певному векторі $\vec{x}^{(k)}$, яке взяте з попередньої ітерації під номером *k*. Пошук такого значення h_k може бути реалізований за допомогою будь-яких методів одновимірної безумовної оптимізації. Значення параметра $h_k \in R^1$ береться із умови мінімуму функції $f\left(\vec{x}^{(k)}\right)$ за напрямом руху антиградієнта:

$$f\left(\vec{x}^{(k)} - h_k \cdot \nabla f\left(\vec{x}^{(k)}\right)\right) = \min f\left(\vec{x}^{(k)} - h \cdot \nabla f\left(\vec{x}^{(k)}\right)\right),\ h > 0.$$

Отже, використовуючи наближення до початкової умови, його можна уточнити, використовуючи метод найшвидшого спуску.

Модифікації класичного методу Ньютона. Методи цього типу замінюють процедуру розв'язання нелінійної системи рівнянь виду $F_i\left(\vec{x}\right) = F_i\left(x_1, ..., x_n\right) = 0,\ \ i = \overline{1, N}$ процедурою пошуку розв'язку послідовності систем алгебраїчних рівнянь виду:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1}\left(\vec{x}^{(k)}\right) & \ldots & \frac{\partial F_1}{\partial x_n}\left(\vec{x}^{(k)}\right) \\ \ldots & \ldots & \ldots \\ \frac{\partial F_n}{\partial x_1}\left(\vec{x}^{(k)}\right) & \ldots & \frac{\partial F_n}{\partial x_n}\left(\vec{x}^{(k)}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^{(k+1)} - x_1^{(k)} \\ \ldots \\ x_n^{(k+1)} - x_n^{(k)} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} F_1\left(\vec{x}^{(k)}\right) \\ \ldots \\ F_n\left(\vec{x}^{(k)}\right) \end{pmatrix}. \qquad (4.56)$$

Нагадаємо, що потрібно знайти розв'язок системи виду (4.49), де невідомими параметрами є значення шуканих вхідних параметрів для функціоналів *J* виду (4.52) та (4.54). Отже, матрицею системи (4.56) буде гессіан вихідної системи, тобто матриця, яка складається з других похідних рівнянь системи:

$$H\left(\overset{\rightarrow(k)}{x}\right)=\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 J}{\partial x_1^2}\left(\overset{\rightarrow(k)}{x}\right) & \dots & \frac{\partial^2 J}{\partial x_1 \partial x_n}\left(\overset{\rightarrow(k)}{x}\right) \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 J}{\partial x_n \partial x_1}\left(\overset{\rightarrow(k)}{x}\right) & \dots & \frac{\partial^2 J}{\partial x_n^2}\left(\overset{\rightarrow(k)}{x}\right) \end{pmatrix}. \tag{4.57}$$

Оскільки для розрахунку гессіана в (4.57) 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.

Розглянемо простий випадок. Нехай потрібно розв'язати нелінійне рівняння виду $F\left(x\right)=0, x\in R^1$. Класичний метод Ньютона, яким розв'язується це рівняння, має такий вигляд:

$$x_{k+1}=x_k-\left(F'\left(x_k\right)\right)^{-1}F\left(x_k\right). \tag{4.58}$$

Підвищити швидкодію методу (4.58) можна за рахунок такого підходу. Нехай потрібно розв'язати диференціальне рівняння виду $y'=f(x)$. Інтегруючи обидві його частини, отримаємо вираз:

$$\begin{gathered}\left\{\int_{x_k}^{x_{k+1}} y'dx=\int_{x_k}^{x_{k+1}} f\left(x\right)dx\right\}=\left\{y_{k+1}-y_k=\int_{x_k}^{x_{k+1}} f\left(x\right)dx\right\}= \\ =\left\{y_{k+1}=y_k+\int_{x_k}^{x_{k+1}} y'\left(x\right)dx\right\}.\end{gathered} \tag{4.59}$$

Очевидно, що процедура знаходження інтеграла тісно пов'язана з точністю обрахунків. Використовуючи формулу правих прямокутників, рівняння (4.59) можна переписати в такому вигляді:

$$\begin{gathered}\left\{y_{k+1}=y_k+\int_{x_k}^{x_{k+1}} y'\left(x\right)dx\right\}=\left\{y_{k+1}=y_k+hy'\left(x_k\right)\right\}= \\ =\left\{y_{k+1}=y_k+\left(x_{k+1}-x_k\right)y'\left(x_k\right)\right\}.\end{gathered} \tag{4.60}$$

Дані перетворення зводяться до класичного методу Ньютона, якщо в (4.60) 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:

$$\left\{ y_{k+1}=y_k+\int\limits_{x_k}^{x_{k+1}} y'(x)\,dx \right\}=\left\{ y_{k+1}=y_k+0{,}5h\left(y'(x_k)+y'(x_{k+1})\right)\right\},$$
$$\left\{ y_{k+1}=y_k+0{,}5\left(x_{k+1}-x_k\right)\left(y'(x_k)+y'(x_{k+1})\right)\right\}. \qquad (4.61)$$

У виразі (4.61) значення $y'(x_{k+1})$ невідоме. Воно визначається за методом ламаних таким виразом

$$z=x_k-\beta\frac{y_k}{y'_k},\ x_{k+1}=x_k-\frac{2y_k}{y'(x_k)+y'(z)}. \qquad (4.62)$$

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 (4.62).

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

$$\vec{z}=\vec{x}^{(k)}-\beta H^{-1}\left(\vec{x}^{(k)}\right)J\left(\vec{x}^{(k)}\right),$$
$$\vec{x}^{(k+1)}=\vec{x}^{(k)}-2\left(H\left(\vec{x}^{(k)}\right)+J\left(\vec{z}\right)\right)^{-1}J\left(\vec{x}^{(k)}\right). \qquad (4.63)$$

Обчислювальні експерименти. Збіжність методу (4.63) для задачі мінімізації функціонала (4.52) з обмеженнями у вигляді (4.53), (4.47)–(4.49) показана у таблиці 4.4. Кількість ітерацій дорівнює 30. Задача була розв'язана методом кінцевих різниць на різних сітках, які мають розмірності: 40×40, 50×50, 60×60, 80×80 та 100×100 розрахункових вузлів.

У ході розв'язування поставленої задачі отримано наближений розв'язок: $\left(\tilde{z}_{Source},C_{Source}\right)=\left(0{,}3192348764;0{,}9946455187\right)$.

Збіжність методу (4.63) для задачі мінімізації функціонала (4.54) з обмеженнями у вигляді (4.53), (4.47)–(4.49) показана у таблиці 4.5. Кількість ітерацій дорівнює 38. Задача була розв'язана методом кінцевих різниць на різних сітках, які мають розмірності: 40×40, 50×50, 60×60, 80×80 та 100×100 розрахункових вузлів. Значення у таблицях 4.4 та 4.5 наведені для значення коефіцієнта $\beta = 1$.

Таблиця 4.4 – Результат збіжності методу (4.63) для оптимізаційної задачі з функціоналом виду (4.52) (початкова умова – нульовий вектор; розрахункова сітка 100x100)

Номер ітерації	Значення функціонала (4.52)	Номер ітерації	Значення функціонала (4.52)
1	$6{,}98748 \cdot 10^{-1}$	16	$1{,}19674 \cdot 10^{-11}$
2	$1{,}46151 \cdot 10^{-1}$	17	$2{,}23452 \cdot 10^{-12}$
3	$2{,}89458 \cdot 10^{-2}$	18	$1{,}45486 \cdot 10^{-12}$
4	$6{,}25600 \cdot 10^{-3}$	19	$7{,}83028 \cdot 10^{-13}$
5	$1{,}23779 \cdot 10^{-3}$	20	$5{,}04763 \cdot 10^{-13}$
6	$2{,}33252 \cdot 10^{-4}$	21	$2{,}09415 \cdot 10^{-13}$
7	$4{,}96087 \cdot 10^{-5}$	22	$1{,}07125 \cdot 10^{-13}$
8	$9{,}44009 \cdot 10^{-6}$	23	$5{,}31579 \cdot 10^{-14}$
9	$1{,}91068 \cdot 10^{-6}$	24	$3{,}02859 \cdot 10^{-14}$
10	$3{,}63544 \cdot 10^{-7}$	25	$1{,}32068 \cdot 10^{-14}$
11	$7{,}07624 \cdot 10^{-8}$	26	$6{,}19477 \cdot 10^{-15}$
12	$1{,}47211 \cdot 10^{-8}$	27	$3{,}11823 \cdot 10^{-15}$
13	$3{,}00475 \cdot 10^{-9}$	28	$1{,}93539 \cdot 10^{-15}$
14	$5{,}48991 \cdot 10^{-10}$	29	$1{,}24313 \cdot 10^{-15}$
15	$1{,}09199 \cdot 10^{-10}$	30	$6{,}09122 \cdot 10^{-16}$

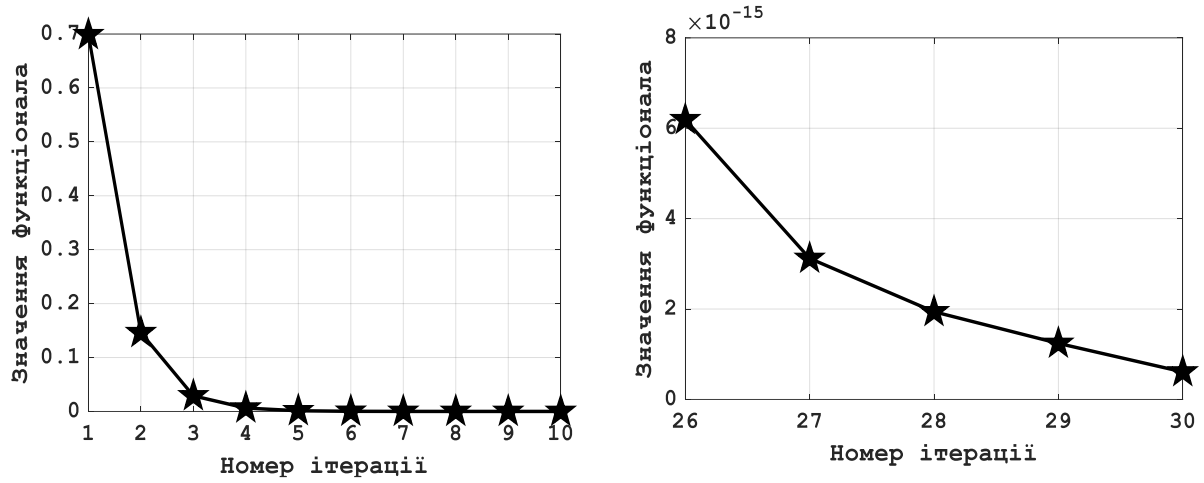
На рис. 4.12 та 4.13 графічно представлені результати збіжності методу (4.63) для оптимізаційних задач з функціоналами (4.52) та (4.54) відповідно.

Таблиця 4.6 містить порівняння результатів отриманого метода з класичним методом Ньютона, а також із урахуванням метода найшвидшого спуску для визначення оптимального значення параметра β.

Таблиця 4.5 – Результат збіжності методу (4.63) для оптимізаційної задачі з функціоналом виду (4.54) (початкова умова – нульовий вектор; розрахункова сітка 100x100)

Номер ітерації	Значення функціонала (4.54)	Номер ітерації	Значення функціонала (4.54)
1	$9{,}25455\cdot10^{-1}$	20	$1{,}65711\cdot10^{-10}$
2	$2{,}38026\cdot10^{-1}$	21	$4{,}39884\cdot10^{-11}$
3	$7{,}85797\cdot10^{-2}$	22	$2{,}49719\cdot10^{-11}$
4	$2{,}28861\cdot10^{-2}$	23	$1{,}40827\cdot10^{-11}$
5	$6{,}99729\cdot10^{-3}$	24	$8{,}24481\cdot10^{-12}$
6	$2{,}60540\cdot10^{-3}$	25	$5{,}04120\cdot10^{-12}$
7	$1{,}02890\cdot10^{-3}$	26	$2{,}69363\cdot10^{-12}$
8	$3{,}35036\cdot10^{-4}$	27	$1{,}51376\cdot10^{-12}$
9	$1{,}22709\cdot10^{-4}$	28	$6{,}64779\cdot10^{-13}$
10	$3{,}80843\cdot10^{-5}$	29	$2{,}77332\cdot10^{-13}$
11	$1{,}33915\cdot10^{-5}$	30	$1{,}40636\cdot10^{-13}$
12	$4{,}05652\cdot10^{-6}$	31	$6{,}63584\cdot10^{-14}$
13	$1{,}44117\cdot10^{-6}$	32	$3{,}69366\cdot10^{-14}$
14	$4{,}43006\cdot10^{-7}$	33	$2{,}37507\cdot10^{-14}$
15	$1{,}60355\cdot10^{-7}$	34	$1{,}41103\cdot10^{-14}$
16	$5{,}69662\cdot10^{-8}$	35	$6{,}37278\cdot10^{-15}$
17	$1{,}66918\cdot10^{-8}$	36	$2{,}71298\cdot10^{-15}$
18	$5{,}14263\cdot10^{-9}$	37	$1{,}16343\cdot10^{-15}$

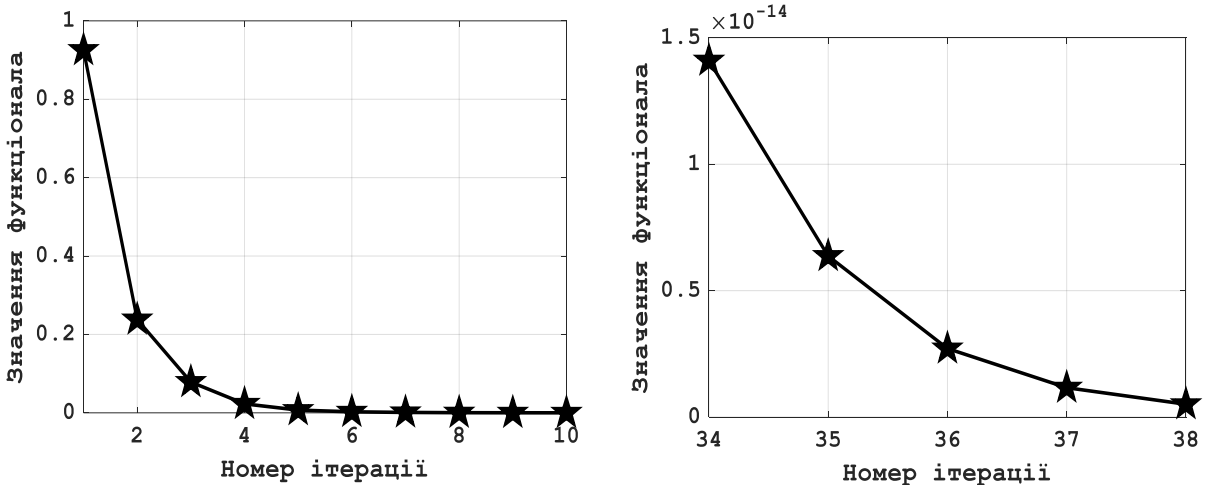
19	$1{,}51835 \cdot 10^{-9}$	38	$5{,}04624 \cdot 10^{-16}$



а) *б*)

Рис. 4.12. Значення функціоналу (4.52):

а) перші 10 ітерацій; *б*) останні 5 ітерацій



а) *б*)

Рис. 4.13. Значення функціоналу (4.54):

а) перші 10 ітерацій; *б*) останні 5 ітерацій

Таблиця 4.6 – Порівняльний аналіз кількості ітерацій (4.63) з різними значеннями β відносно класичного методу Ньютона

Метод / Функціонал	Метод (4.63) для постійного значення $\beta = 1$	Метод (4.63) для β, отриманого методом найшвидшого спуску	Класичний метод Ньютона
Функціонал (4.52)	65%	29%	100%
Функціонал (4.54)	73%	31%	100%

Точність обрахунків для усіх обчислювальних експериментів була встановлена рівною 10^{-15}.

У ході розв'язування поставленої задачі отримано наближений розв'язок: $\left(x_{Source}, \tilde{z}_{Source}, C_{Source}\right) = \left(0,6201465184894; 0,3124693487; 0,9954751464\right)$.

4.5. Висновки до розділу

1. 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.

2. Розглянуто особливості поширення забруднюючих речовин на основі математичного описання рівняння турбулентної дифузії. Проведені теоретичні розрахунки розподілу концентрації забруднюючих речовин в повітрі *C* на відстані *x* від точкового джерела різної висоти *H*. Розрахунки

показують, що при однакових параметрах викидів максимальна приземна концентрація полютанта від більш високого джерела менша і спостерігається на більшій відстані від джерела. 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.

3. Запропоновано використання ізотропної та анізотропної Гаусової моделей для побудови функцій щільності розподілу напряму вітру. Функції щільності розподілу швидкості та напряму вітру згідно ізотропної та анізотропної Гаусових моделях дозволяють визначити переважний напрям поширення забруднюючих речовин, що, в свою чергу, дозволить локалізувати зону розміщення джерела забруднення атмосфери, і тим самим отримати результат розв'язання оберненої задачі. Наведені результати можуть доповнити існуючу методику, використовуючи ймовірнісній підхід опрацювання даних контролю.

4. Запропоновані 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. 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.

РОЗДІЛ 5
АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ НА БАЗІ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

5.1. Вимірювальний модуль системи контролю забруднення повітря

На основі проведеного аналізу в Розділі 1 дисертаційної роботи, для розроблюваної системи контролю забруднення атмосферного повітря в околі об'єктів енергетики були обрані наступні сенсори: PMS 5003/7003 (мілкодисперсний пил), SDS 011 (мілкодисперсний пил), BME 280 (температура, відносна вологість, абсолютний тиск), MICS-6814 (NO_2, CO, NH_3), ZE25-O3 (O_3), ZE03-SO2 (SO_2), ZE08-CH2O (CH_2O), MH-Z19 (CO_2), RadKit (рівень радіації) [551]. Вибрані технічні характеристики цих сенсорів наведені в таблиці 5.1.

З таблиці 5.1 видно, що сенсор MICS-6814 – MOS типу, а сенсори ZE25-O3, ZE03-SO2, ZE08-CH2O, MH-Z19 – EC типу. При цьому використовувалися EC сенсори виробництва Winsen (Китай). Ці сенсори є доступними на вітчизняному ринку, мають порівняно невелику ціну та широко використовуються для систем контролю забруднення атмосферного повітря.

Розроблений вимірювальний модуль спроектований у вигляду окремого SoC-пристрою, що базується на мікроконтролері ESP8266EX (виробництва Espressif). При цьому важливими вимогами при проектуванні були енергоефективність, компактність, надійність. Вимірювальний модуль може функціонувати як самостійний пристрій, так і бути підпорядкованим головному мікроконтролеру через інтерфейси SPI/SDIO або I2C/UART. Як окремий пристрій, вимірювальний модуль може підключатися до зовнішніх сенсорів та інших пристроїв через GPIO [552, 553].

Таблиця 5.1 – 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	ºС	0,01	-40…85	±1 ºС (0-85 ºС); ±1,5 ºС (-40…0 ºС)	—	1 с	>5 років
		В. вологість	%	0,01	0…100	±3%			
		Абс. тиск	гПа	0,01	300…1100	± 1 гПа (0-65 ºС); ±1,7 гПа (-20-0 ºС)			
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_2O	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

Інтегрований Wi-Fi модуль містить антенні перемикачі, радіочастотний балун, підсилювач потужності, малошумний підсилювач прийому, фільтри та модулі керування живленням. Також він оснащений модулями:

- швидкого перемикання між режимами сну і пробудження для ефективного використання енергії;
- адаптивного підбору робочої частоти для роботи з малою потужністю;
- розширеної обробки сигналів;
- радіовзаємодії для загального зменшення впливу завад стільникового зв'язку, Bluetooth, DDR, LVDS, LCD.

На рис. 5.1 наведена загальна функціональна схема вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря.

В таблиці 5.2 наведені деякі технічні характеристики мікроконтролера ESP8266EX розробленого вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря . ESP8266EX базується на 32-бітній версії процесора Lx106 серії Diamond (виробництва Tensilica), та має вбудовану оперативну пам’ять типу SRAM. Даний мікроконтролер може з’єднуватися із сенсорами та іншими пристроями через інтерфейси вводу/виводу загального призначення (GPIO).

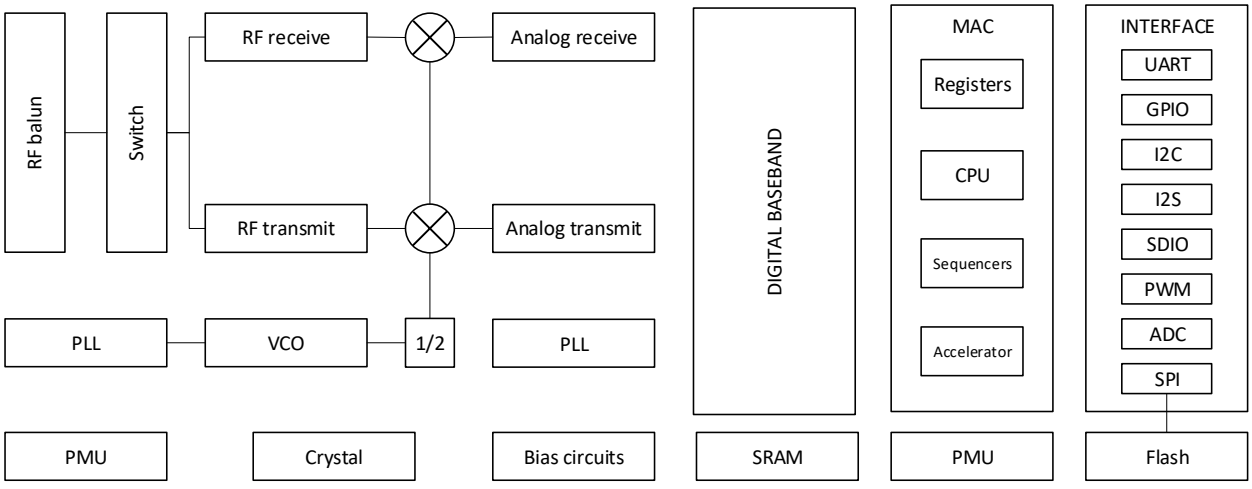


Рис. 5.1. Функціональна схема вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря

Високоінтегрована конструкція мікросхеми ESP8266EX зменшує кількість необхідних компонентів. Крім ESP8266EX, необхідно 8 резисторів і конденсаторів, один кристалічний генератор і одна флеш-пам’ять, щоб виготовити повний модуль з можливістю бездротового зв'язку.

Нижче наведено докладний опис електричної схеми вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря рис. Е1 (Додаток Е) [554].

Таблиця 5.2 – Деякі технічні характеристики мікроконтролера ESP8266EX вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря

Категорія	Тип	Параметри
Wi-Fi блок	Протокол	802.11 b/g/n/e/i
	Діапазон частот	2.4 G ~ 2.5 G (2400 M ~ 2483.5 M)
	T_x потужність	802.11 b: + 20 dBm
		802.11 g: + 17 dBm
		802.11 n: + 14 dBm
	R_x потужність	802.11 b: -91 dBm (11 Mbps)
		802.11 g: -75 dBm (54 Mbps)
		802.11 n: -72 dBm (MCS7)
	Антена	Вбудована, керамічний чіп, зовнішня, роз’єм IPEX
Блок контролю	Інтерфейси периферії	UART/SDIO/SPI/I2C/I2S/IR, віддалене керування
		GPIO/PWM
	Робоча напруга	2,5 ~ 3,6 В
	Робочий струм	80 мА
Програмне забезпечення	Wi-Fi режим	Station/SoftAP/SoftAP+Station
	Захист	WPA/WPA2
	Шифрування	WEP/TKIP/AES

	Оновлення прошивки	UART Download/OTA (via network)
	Мережеві протоколи	IPv4, TCP/UDP/HTTP/FTP

ESP8266EX має два цифрових піна для живлення – Pin11 та Pin17 (рис. Е2 (Додаток Е)). При реалізації цифрового живлення немає необхідності встановлювати додаткові фільтрувальні конденсатори. Діапазон робочої напруги живлення 1,8-3,3 В.

ESP8266EX має 5 аналогових пінів для живлення, включаючи Pin1, Pin3, Pin4, які є джерелом живлення для внутрішніх PA і LNA; а також Pin29, Pin30 для живлення внутрішнього PLL. Робоча напруга для аналогових пінів живлення становить 2,5-3,6 В. Проте, беручи до уваги, що канал живлення може бути пошкоджений через раптове збільшення струму, коли ESP8266EX передає аналогові сигнали, потрібен додатковий конденсатор ємністю 10 мкФ для відповідності конденсатору 0,1 мкФ (рис. Е3 (Додаток Е)).

ESP8266EX використовує систему живлення 3,3 В. Чіп повинен бути активований після стабілізації силових рейок. Це досягається затримкою активації CH_EN (Pin7) за часом *T* після того, як були підняті рейки на 3,3 В. Рекомендований час затримки (*T*) задається параметром схеми RC.

Pin32 EXT_RSTB є піном перезавантаження ESP8266EX. Цей контакт містить внутрішній спусковий резистор і є активно низьким. Щоб уникнути помилкових скидань, викликаних зовнішнім втручанням, провідник на друкованій платі EXT_RSTB зроблено якомога коротшим, і додано RC-коло на EXT_RSTB вихід.

Pin7 CHIP_EN є контактом включення ESP8266EX. У цьому випадку ESP8266EX відключається, коли цей вихід мікросхеми має низький рівень напруги. Pin7 CHIP_EN також служить контактом скидання ESP8266EX. При цьому ESP8266EX перезавантажується, коли вхідний рівень цього виходу нижче 0,6 В і триває не менше 200 мкс.

Флеш-пам’ять (рис. Е4 (Додаток Е)), що використовується на ESP8266EX має інтерфейс SPI та 2-MB ROM в корпусі SOP-8 (208 mil). Pin21 SD_CLK підключається до флеш-накопичувача CLK разом з резистором 0402 в послідовному підключенні, що знижує струм приводу і усуває зовнішні переривання. Початковий опір резистора становить 200 Ом.

ESP8266EX може підтримувати 40 МГц, 26 МГц і 24 МГц кристалічні генератори. У схемі конденсатори C1 і C2, які з'єднані з землею, додаються до вхідних і вихідних терміналів кристалічного генератора відповідно. Значення двох конденсаторів можуть бути гнучкими, починаючи від 6 пФ до 22 пФ. Однак конкретні ємнісні значення C1 і C2 залежать від подальшого тестування і коригування загальної продуктивності всієї схеми. Точність кристала становить ±10 ppm (рис. Е5 (Додаток Е)).

Імпеданс виходу ESP8266EX PA становить 39 + j6 Ом, тому відповідний імпеданс від антени до мікросхеми становить 39-j6 Ом (рис. Е6 (Додаток Е)).

Зовнішній резистор з'єднаний з ERS12K вихід (Pin31). Заземлений резистор вимагає високої точності при контролі струму зсуву. Рекомендована точність становить 12кОм ± 1% (рис. Е7 (Додаток Е)).

Для зменшення гармоніки 80 МГц потрібно підключити резистор 499 Ом до лінії U0TXD (рис. Е8 (Додаток Е)).

За замовчуванням UART0 виводитиме деяку інформацію, коли ESP8266EX працює. Для додатків, чутливих до цієї функції, можна обмінюватися пінами UART (UART SWAP) під час ініціалізації системи, тобто обмінюватися U0TXD, U0RXD з U0RTS (GPIO15), U0CTS (GPIO13). Після обміну, GPIO15 і GPIO13 будуть підключені відповідно до MCU_RXD і MCU_TXD як замінені U0TXD і U0RXD для серійного зв'язку (рис. Е9 (Додаток Е)).

GPIO15, контакт ESP8266EX, повинен бути на рівні низької напруги, коли чіп включений. Таким чином, при включенні системи, щоб переконатися, що GPIO15 не буде знаходитися зовні, що призведе до помилкового введення системи в режим завантаження, додається схема ізоляції. Як показано на

рисунку 1-10b, коли система включена, U3 відключається за замовчуванням і GPIO15 фактично відключається від MCU_RXD. Після того, як програма почне запускатися, U3 можна увімкнути за допомогою GPIO5, після чого GPIO15 підключається до MCU_RXD, що дозволяє увімкнути ізоляцію GPIO15.

ESP8266EX має логічний рівень 3,3 В. У випадку послідовного зв'язку з логічною системою 5 В, схема перемикання рівнів повинна бути доповнена (рис. Е10 (Додаток Е)).

На рис. 5.2 наведено топологія друкованої плати вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря [554]. В додатку Ж наведено специфікацію друкованої плати.

На рис. 5.3 приведено тривимірна модель друкованої плати вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря, до складу якого входить сенсор вимірювання метеорологічних параметрів та сенсор мілкодисперсного пилу. На рис. 5.4 наведено тривимірну модель вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря.

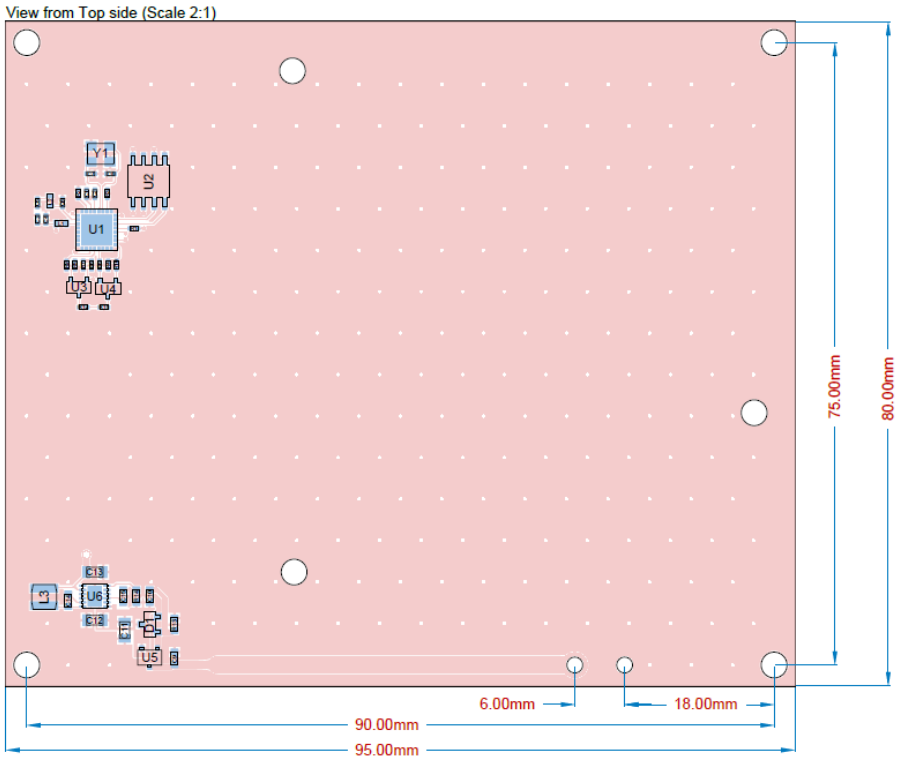
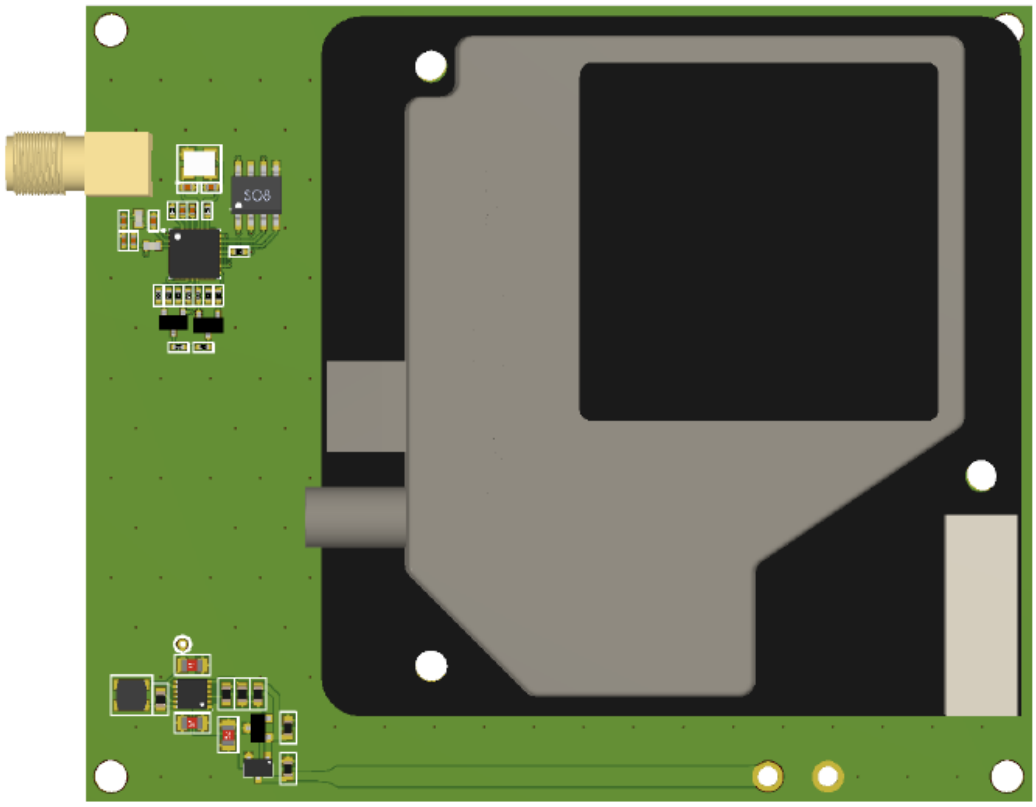


Рис. 5.2. Топологія друкованої плати вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря

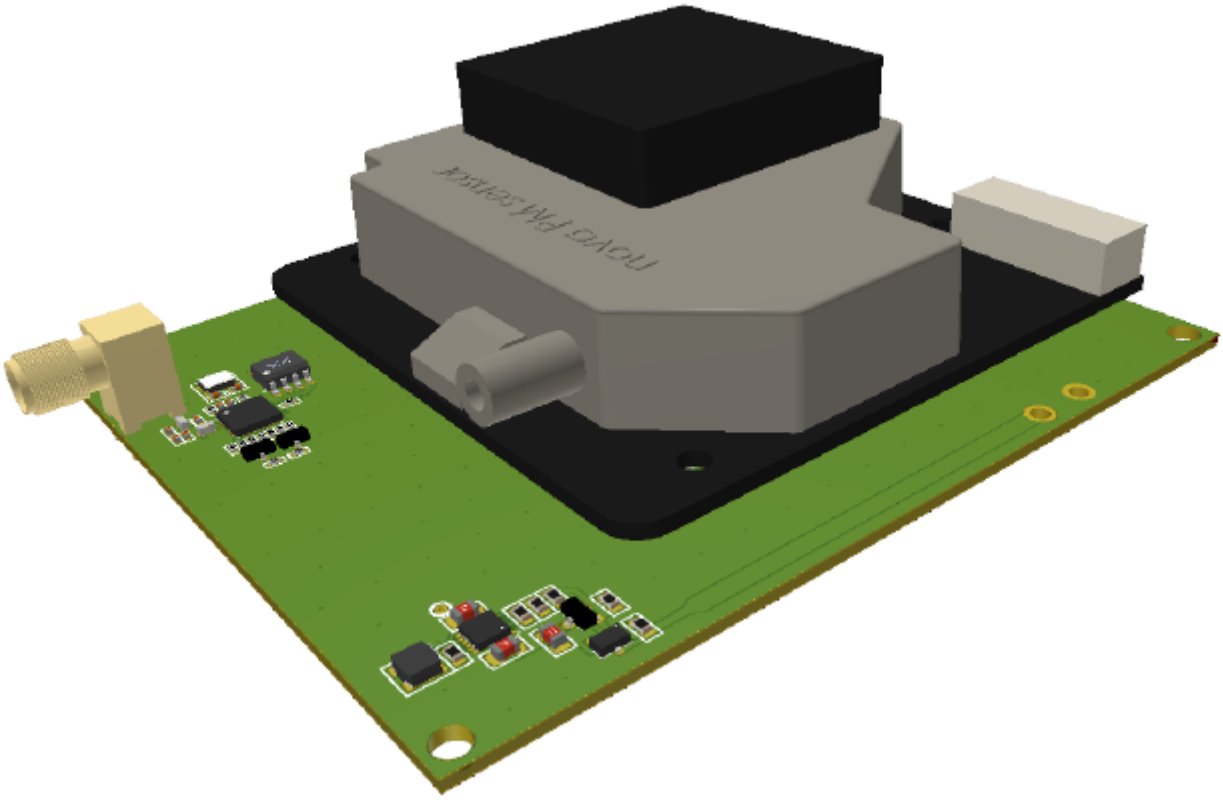
На рис. 5.5 наведено зовнішній вигляд розробленого вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря (патент України №149325) [555]. В таблиці 5.3 наведені технічні характеристики розробленого вимірювального модулю. Особливістю такого модулю є те, що сенсори можуть бути інстальовані через адаптивний роз'єм, що значно спрощує заміну сенсорів, а мікроконтролер може використовувати дані метеорологічних сенсорів для градуювання сенсорів концентрації забруднюючих речовин [556-558].

Таблиця 5.3 – 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	• формальдегід (CH_2O) • монооксид вуглецю (CO) • діоксид вуглецю (CO_2) • монооксиду азоту (NO) • діоксид азоту (NO_2) • діоксиду сірки (SO_2) • аміак (NH_3) • озон (O_3)
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	155x120x50 мм
Монтаж	ABS корпус з 4 монтажними отворами для завинчування коробки або закріплення за допомогою стяжок

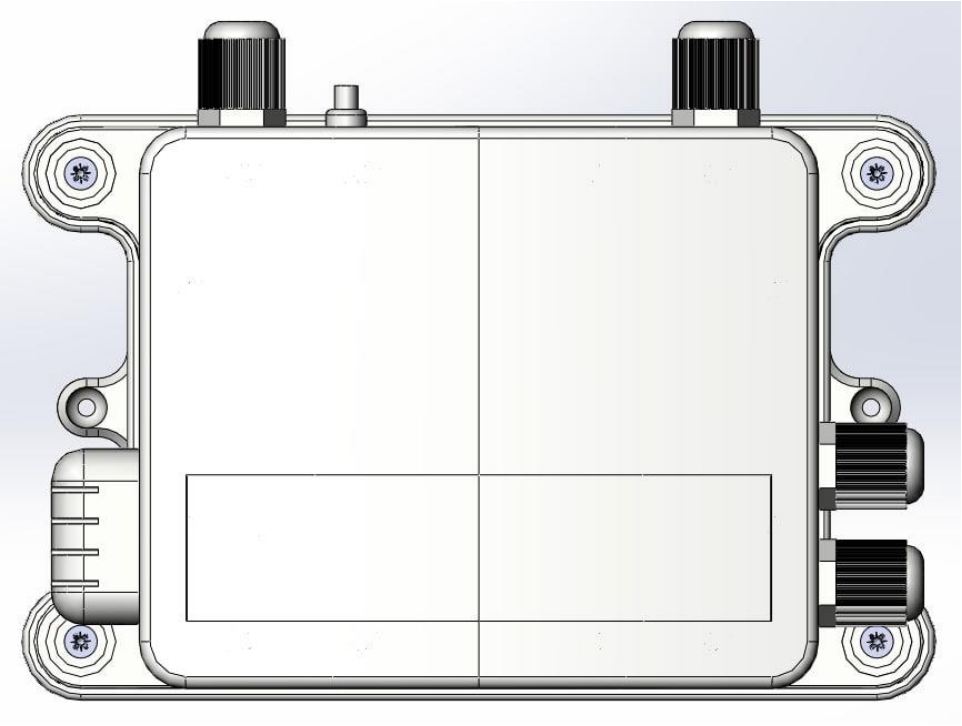


а)

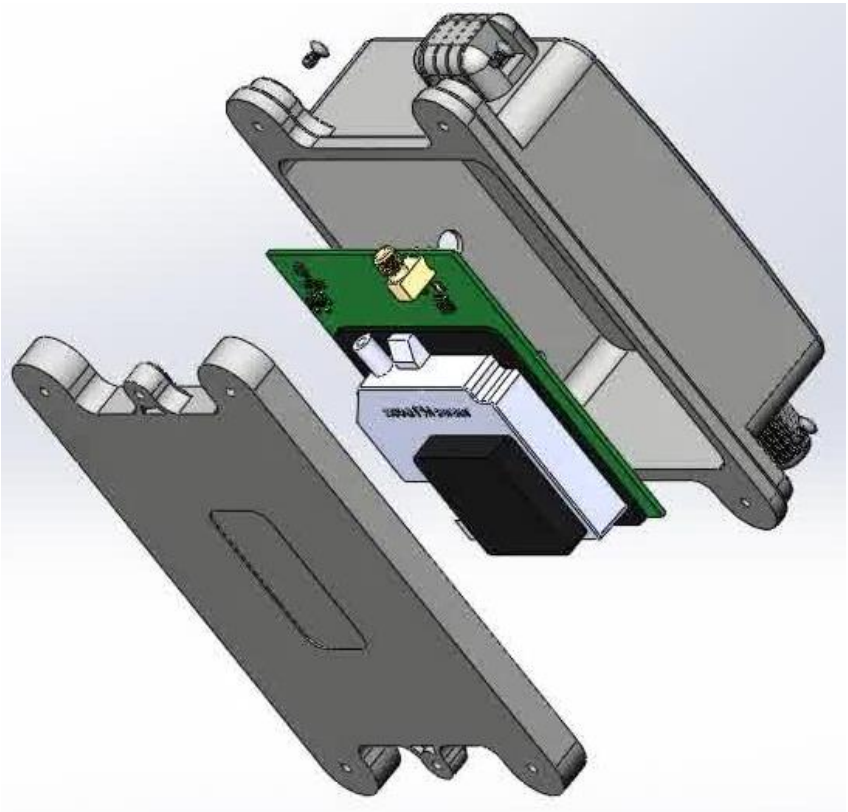


б)

Рис. 5.3. 3-D модель друкованої плати вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря: *а*) вид зверху; *б*) вид збоку



а)



б)

Рис. 5.4. 3-D модель вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря: *а*) виду зверху; *б*) в розібраному виді



а)



б)

Рис. 5.5. Зовнішній вигляд розроблених вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря: *а*) з індикацією результатів вимірювань; *б*) без індикації результатів вимірювань

5.2. Програмний пакет системи контролю забруднення повітря

Прикладне програмне забезпечення відіграє важливу роль при реалізації системи контролю. Його головні завдання – реалізація взаємодії апаратних модулів системи, керування інтерфейсами та інформаційними потоками, реалізація алгоритмів цифрової обробки інформаційних сигналів та статистичного опрацювання даних, створення інформаційних полів даних, збереження та передача даних тощо.

До складу розробленого програмного пакету входять 4 блоки: блок взаємодії з апаратним забезпеченням; блок керування; блок статистичного опрацювання даних та блок візуалізації інформації (рис. 5.6).

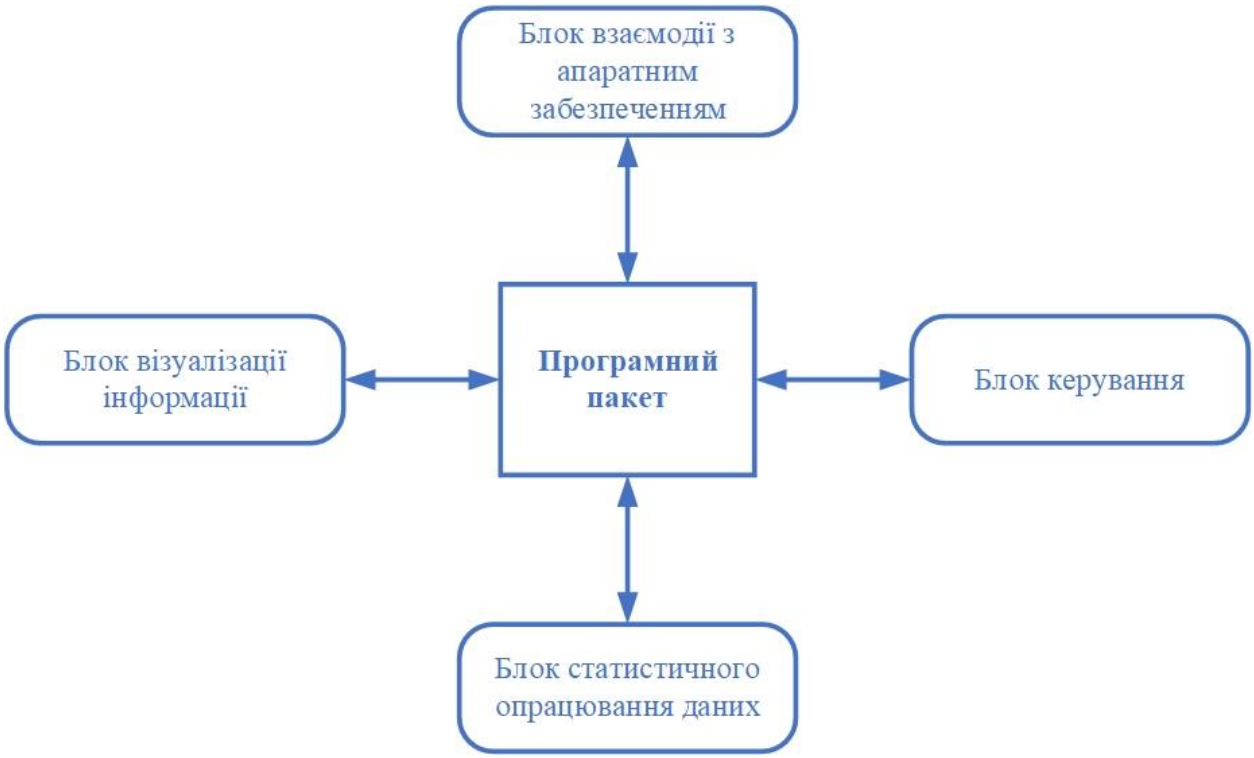


Рис. 5.6. Структура розробленого програмного пакету системи контролю забруднення повітря

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.

Синхронізація програмного забезпечення вимірювальних модулів та системи контролю здійснюється через прикладний програмний інтерфейс (API) – заданий набір протоколів, функцій та підпрограм.

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

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.

На рис. 5.7 наведено інтерфейс користувача, що відображає: інформативні параметри та їх значення (PM_1, $PM_{2,5}$, PM_{10}, AQI, температура, вологість, тиск) з можливістю перегляду результатів вимірювань протягом останніх 2 діб та розміщення вимірювальних модулів на карті місцевості.

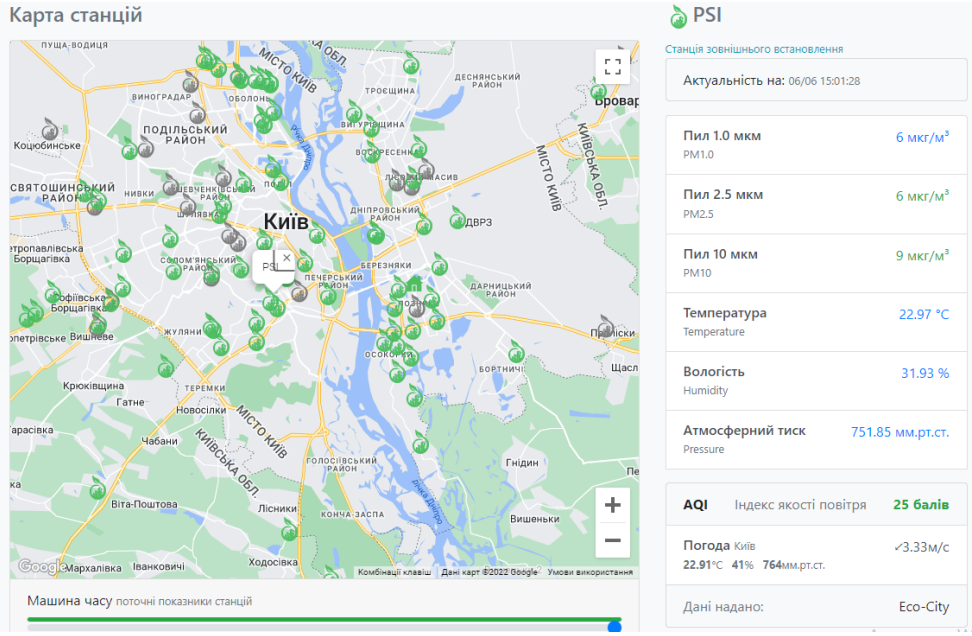


Рис. 5.7. Зовнішній вигляд інтерфейсу користувача

Одним із найважливіших елементів розробленого програмного забезпечення є блок 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. 5.8.

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.

Характерною особливістю цього блоку є реалізація алгоритму визначення статистичних характеристик, що характеризують технічний стан вимірювального модулю/сенсорів (рис. 5.9). Для цього контроль забруднення повітря проводять в заданій точці з використанням декількох вимірювальних модулів та оцінюють такі статистичні характеристики отриманих вибірок даних як коефіцієнт детермінації (R^2), розмах (R) та коефіцієнт варіації (C_v). Якщо отримані статистичні характеристики для кожної із вибірок менші ніж задані граничні значення (a, b, c відповідно), то вимірювальний модуль (сенсор) характеризується як несправний та потребує заміни чи очищення. Якщо отримані статистичні характеристики більші або дорівнюють заданим граничним значенням, то вимірювальний модуль (сенсор) характеризується як справний і формується результат контролю.

Процедура, що реалізується блоком кореляційного аналізу, докладно приведена в розділі 3.

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 вибірковим доступом до даних; зручний інтерфейс.

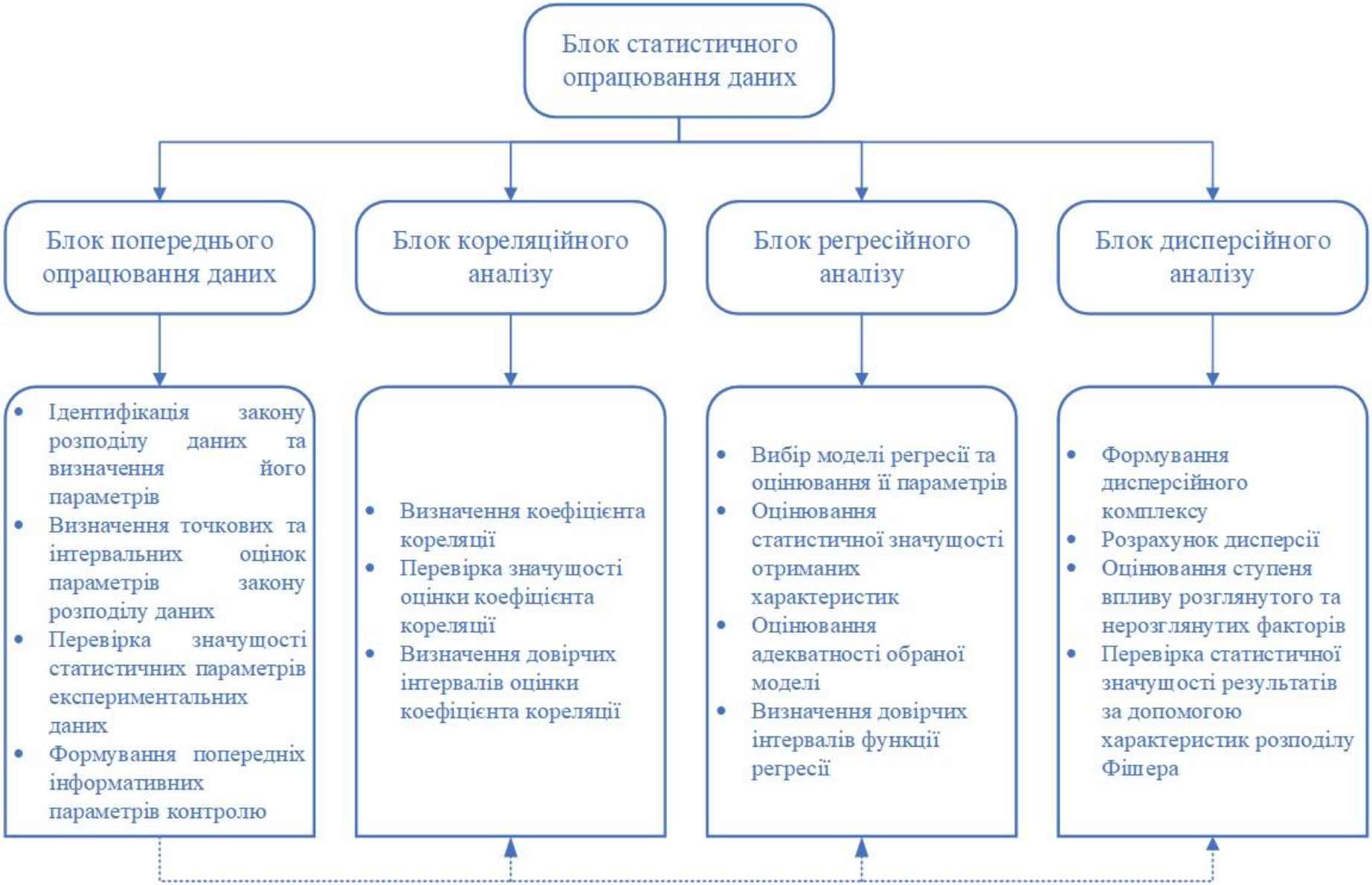


Рис. 5.8. Блок статистичного опрацювання даних системи контролю забруднення повітря

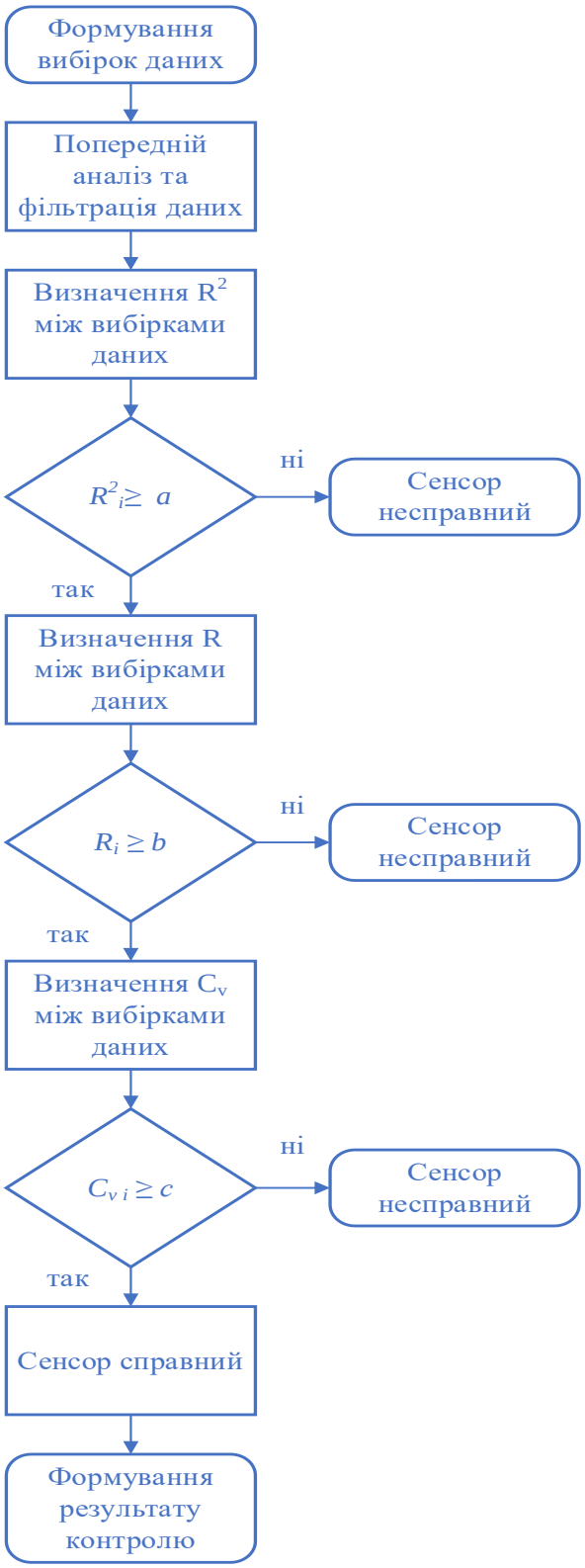


Рис. 5.9. Алгоритм визначення технічної справності сенсорів вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря за статистичними характеристиками вибірок даних (a, b, c – граничні значення R^2, R та C_v відповідно)

5.3. Деякі особливості бездротового зв’язку вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря

На даний час, завдяки порівняно низьким цінам на мікропроцесорну техніку, на ринку існує ряд технологічних рішень, що вже стали стандартами цифрового зв’язку і використовуються для обміну даних на значних відстанях між різними об’єктами. Технологія Wi-Fi, що базується на використанні стандарту IEEE 802.11, є найбільш популярною серед сучасних технологій бездротового зв’язку, що не перестає розвиватися. Крім того, у різних сферах розвиваються інші технології бездротового зв’язку: Bluetooth (IEEE 802.15.1/a), UWB (IEEE 802.15.3c), ZigBee (IEEE 802.15.4), WiMAX (IEEE 802.16) та інші. Всі наведені технології працюють в частотному діапазоні, що не потребує ліцензування, та використовуються майже у всьому світі. Порівняння характеристик бездротових технологій зв’язку приведено в таблиці 5.4.

На основі проведеного порівняльного аналізу можна зробити висновок, що однією із можливих технологій для побудови розгалуженої мережі вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря може бути ZigBee. Ця технологія характеризується порівняно значною дальністю стабільного зв’язку, максимальною кількістю робочих вузлів, а також здатністю до самоорганізації та самовідновлення мережі. Пристрої, що виготовляються на базі ZigBee, мають додатковий режим енергозбереження, що забезпечує порівняно більший час автономної роботи. Модуль ZigBee може вийти зі сплячого режиму через 30 мс після зовнішнього запиту.

Пристрої на основі ZigBee формують самостійні мережі, з’єднуючись між собою за кластерною ознакою у деревоподібну структуру (рис. 5.10). При втраті зв’язку із сусідніми елементом мережі, пристрої можуть самостійного створювати нові маршрути для передачі даних, таким чином підтримуючи стійкість системи контролю в цілому.

Таблиця 5.4 – Порівняння характеристик бездротових технологій зв'язку

Технологія / Параметр	GSM/GPRS	ZigBee	Bluetooth	Wi-Fi	UWB	WiMax
Робоча частота	850/900/ 1800/1900 МГц	868/915 МГц; 2,4 ГГц	2,4 ГГц	2,4/5 ГГц	3,1…10,6 ГГц	2,4 ГГц; 5,1…66 ГГц
Швидкість передачі даних (до)	168 кб/с	250 кб/с	720 кб/с	54 Мб/с	110 Мб/с	35-70 Мб/с
Робоча відстань (до)	2…35 км	10…1000 м	10 м	10…100 м	10…102 м	0,3…49 км
Номінальна T_x потужність	0…39 дБм	-25…0	0…10 дБм	15…20 дБм	-41.3 дБм	23 дБм
К-сть РЧ каналів	124	1/10; 16	79	14 (2,4 ГГц); 64 (5 ГГц)	(1…15)	4; 8: 10; 20
Пропускна здатність каналу	200 кГц	0,3/0,6/2 МГц	1 МГц	2,5…20 МГц	0,5…7,5 ГГц	10/20 МГц
Тип модуляції	GMSK, 8PSK	BPSK QPSK, O-QPSK	GFSK, CPFSK, 8-DPSK, π/4-DQPSK	BPSK, QPSK, OFDM, M-QAM	BPSK, PPM, PAM, OOK, PWM	QAM16/64, QPSK, BPSK, OFDM
Максимальна кількість вузлів	100	> 65000	8	2007	236	1600
Захист даних	GPRS-A5 Algorithm	16-біт CRC	16-біт CRC	32-біт CRC	32-біт CRC	AES based CMAC, MD5-based HMAC, 32-bit CRC
Переваги	Діапазон, вартість, зручність	Надійність, потужність, вартість	Ціна, зручність	Швидкість, гнучкість	Пропускна здатність, потужність, ціна	Пропускна здатність, швидкість, діапазон
Застосування	Інтернет, моніторинг, контроль	Моніторинг, контроль	Заміна кабелю	Мережі передачі даних, інтернет, моніторинг	Моніторинг, мережі передачі даних	Інтернет, моніторинг, мережевий сервіс

Проте дана технологія має порівняно низьку швидкість передачі даних, що не дозволяє її використовувати у випадку застосування її на багатоканальному вимірювальному модулі, якими часто є модулі системи контролю забруднення повітря.

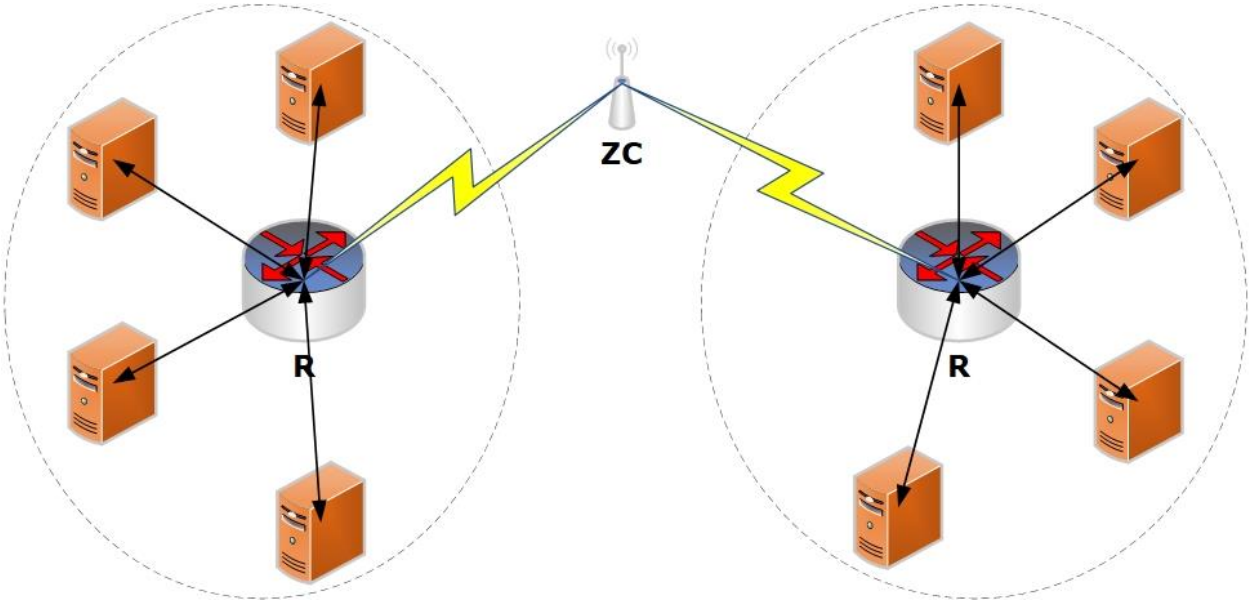


Рис. 5.10. Структура мережі ZigBee з топологією «кластерне дерево»

Схожим за технічними можливостями, проте таким, що має набагато більшу швидкість передачі даних, є mesh-зв’язок, що реалізується на базі технології Wi-Fi. Mesh-мережа дозволяє великій кількості пристроїв (вузлів), просторово розгалужених на великій території (в тому числі, як в приміщеннях, так і поза їх межами), підключатися до єдиної WLAN (бездротової локальної мережі). Mesh-зв’язок здатний до самоорганізації та самовідновлення, що дозволяє створювати та підтримувати мережу в автономному режимі [559-561].

Звичайна мережа Wi-Fi – це мережа, що містить від одного до декількох вузлів, де єдиний центральний вузол (AP (access point – точка доступу)), прямо підключений до інших вузлів (рис. 5.11). Точка доступу відповідає за передачу даних від станцій. Деякі точки доступу можуть обмінюватися даними з іншою IP-мережею через маршрутизатор. Звичайні мережі Wi-Fi мають суттєвий недолік, пов’язаний з тим, що кожна станція має бути в зоні прямого підключення до точки доступу. Крім того, звичайна мережа Wi-Fi схильна до перевантаження, оскільки максимальна кількість станцій, що можуть функціонувати в мережі, обмежена ємністю точки доступу.

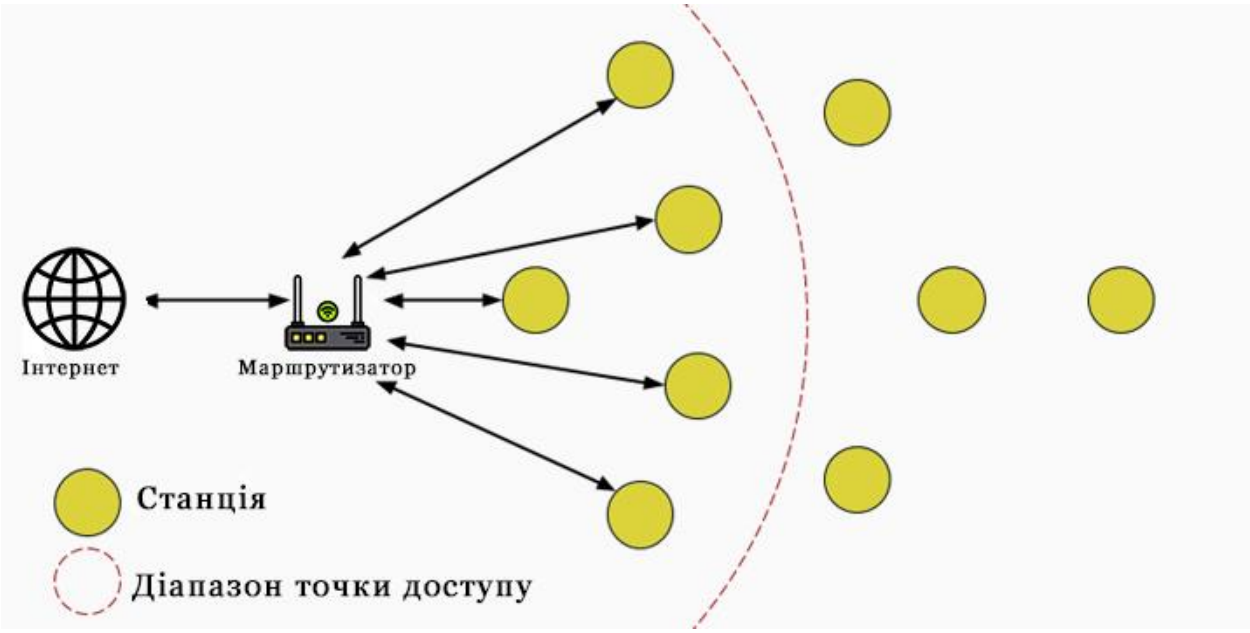


Рис. 5.11. Зв’язок вузлів та точки доступу у звичайній Wi-Fi мережі

Mesh-мережа відрізняється від традиційної Wi-Fi мережі тим, що вузлам не потрібно підключатися до центрального вузла (точки доступу), при цьому вузли можуть з’єднуватися із сусідніми вузлами (рис. 5.12). Вузли взаємно відповідають за передачу даних один одному. Це дозволяє mesh-мережі системі контролю забруднення повітря мати порівняно більшу зону покриття, оскільки для цього вузлам достатньо бути в зоні видимості один одного без необхідності підключення до центрального вузла. Також mesh-мережа менш схильна до перевантаження, оскільки кількість вузлів у мережі не обмежена кількістю вузлів, що можуть під’єднатися до центрального вузла.

Mesh-зв’язок, побудований на основі інфраструктурного протоколу Wi-Fi, може розглядатися як мережевий протокол, що об’єднує багато окремих Wi-Fi мереж в одну WLAN. На відміну від звичайної Wi-Fi мережі, де кожна окрема станція обмежена з’єднанням з точкою доступу, у mesh-мережі вузли можуть бути одночасно як станціями, так і точками доступу. Таким чином, mesh-мережа може формувати декілька низхідних з’єднань на базі інтерфейсу softAP, та мати одне мережеве підключення на базі будь-якої станції, таким чином формуючи деревоподібну топологію, що складається з кількох шарів (рис. 5.13).

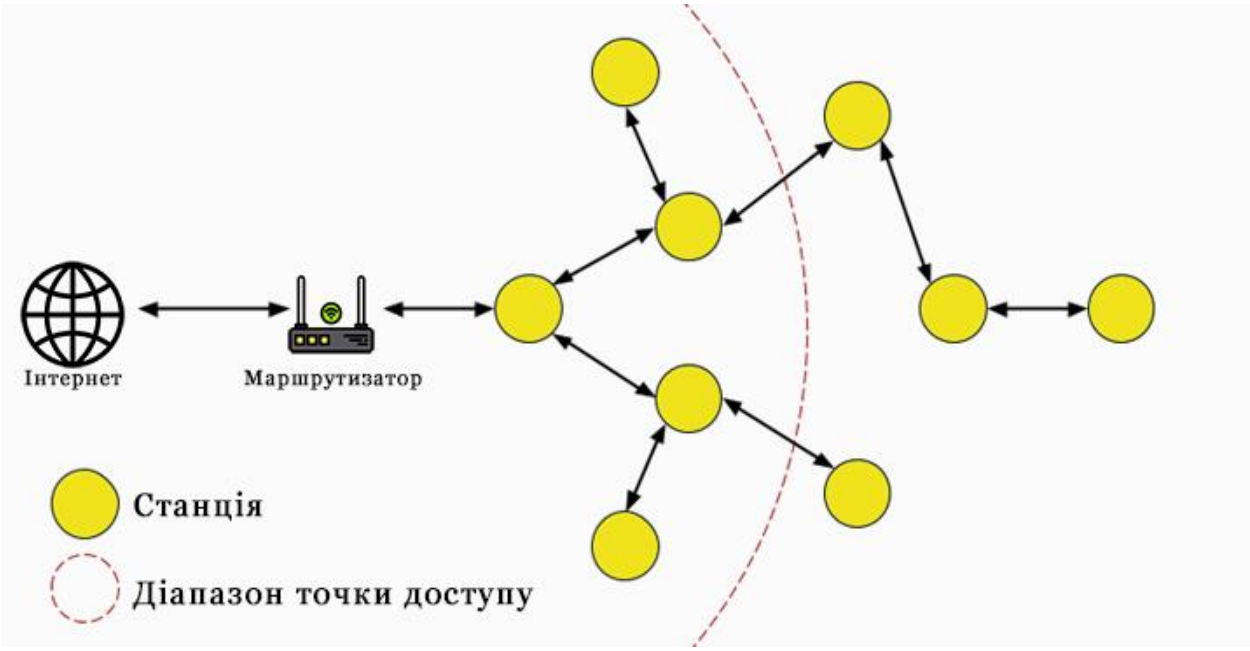


Рис. 5.12. Зв’язок вузлів та точки доступу у mesh-мережі

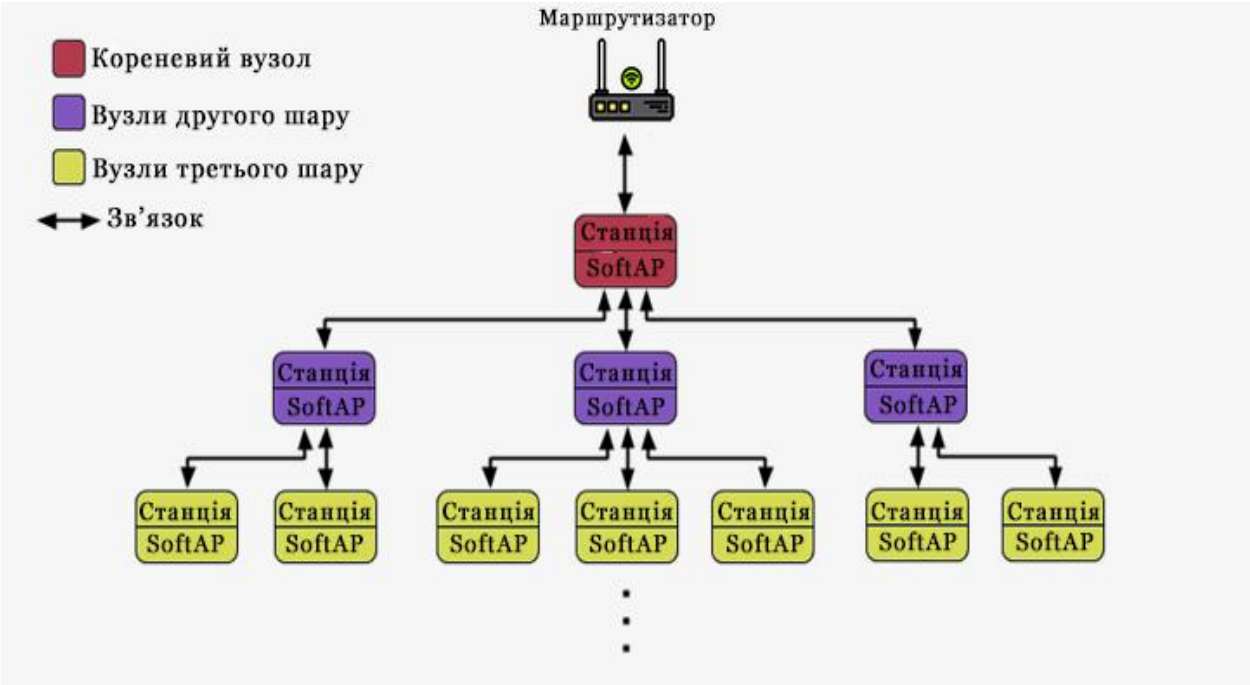


Рис. 5.13. Деревоподібна топологія mesh-мережі

Розмір (загальна кількість вузлів) у mesh-мережі залежить від максимальної кількості шарів, дозволених у мережі, та максимальної кількості низхідних з’єднань, що може мати кожний вузол. Обидва ці параметри можуть бути налаштовані для обмеження розміру мережі.

Mesh-мережа системи контролю забруднення повітря характеризується як мережа з декількома потоками даних, що означає, що вузли можуть передавати пакети даних іншим вузлам мережі за допомогою одного, або кількох бездротових переходів, та можуть виконувати роль реле для інших вузлів.

В загальному, в mesh-мережі розрізняють чотири типи вузлів: 1) кореневий вузол; 2) проміжний «батьківський» вузол; 3) кінцевий вузол; 4) неактивний вузол (рис. 5.14).

Кореневий вузол є найвищим вузлом в ієрархії mesh-мережі і слугує єдиним інтерфейсом між mesh-мережою та зовнішньою IP-мережею. Кореневий вузол (A на рис. 5.14) підключається до маршрутизатора Wi-Fi та передає пакети даних до/із зовнішньої IP-мережі. У mesh-мережі може бути лише один кореневий вузол, в вихідне з'єднання цього вузла може здійснюватися тільки з маршрутизатором.

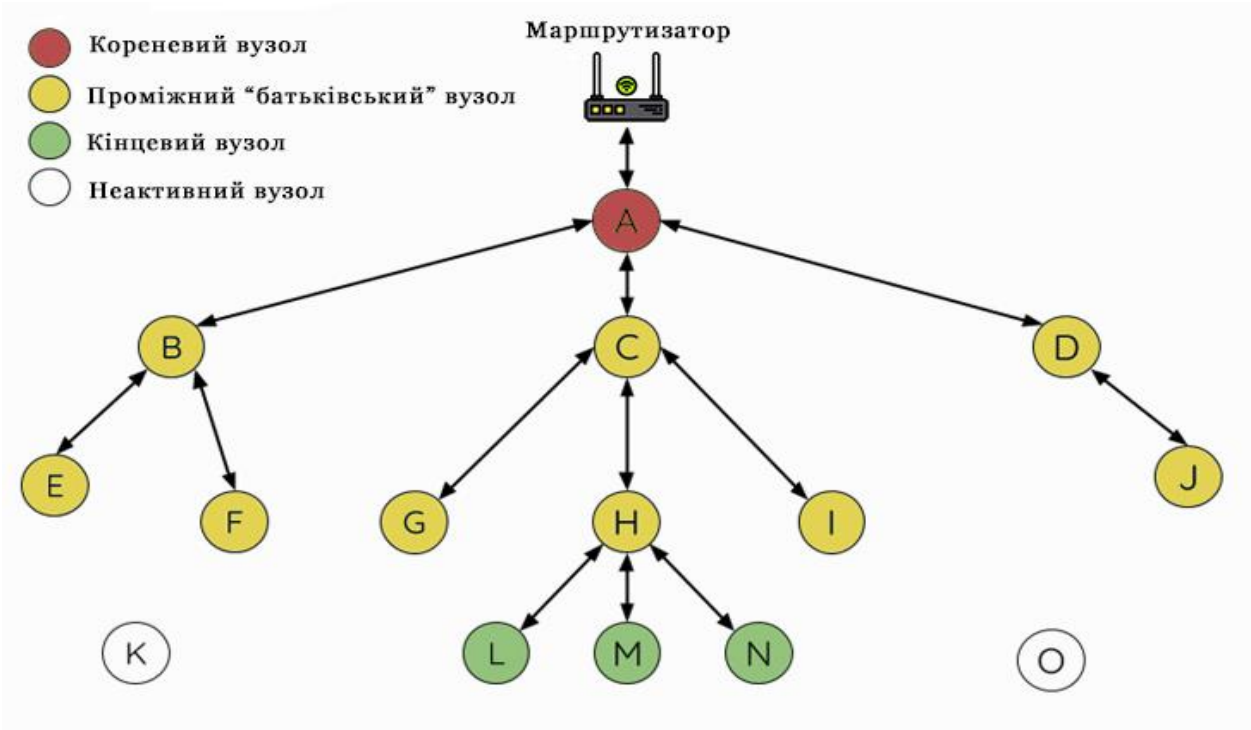


Рис. 5.14. Типи вузлів mesh-мережі

Проміжний «батьківський» вузол може з'єднуватися тільки з одним висхідним вузлом, проте може мати декілька низхідних з'єднань. Тому

проміжний вузол може передавати та отримувати пакети, надіслані з його висхідних і низхідних з’єднань. На рис. 5.14 проміжними вузлами є вузли (B-J). Проміжні вузли без низхідних з’єднань (E-J) не є еквівалентами кінцевих вузлів, оскільки вони все ще можуть формувати низхідні з’єднання.

Кінцевим вузлом є вузол, якому заборонено мати проміжні вузли. Тому кінцевий вузол може передавати або отримувати лише пакети даних, що призначені для нього, і не може пересилати пакети інших вузлів. Якщо вузол розташовується на максимально дозволеному шарі мережі, він буде призначений як кінцевий вузол. Це запобігає створення вузлом будь-яких низхідних з’єднань, гарантуючи, що мережа не створить додатковий шар. Вузли без інтерфейсу softAP також призначаються як кінцеві вузли. На рис. 5.14 кінцевими вузлами є вузли (L-N).

Неактивними вузлами є такі, що ще не приєдналися до мережі. Неактивні вузли намагаються утворити висхідне з’єднання з проміжним вузлом або стати кореневими вузлами. На рис. 5.14 неактивними вузлами є K і O.

Процес побудови mesh-мережі системи контролю забруднення повітря включає вибір кореневого вузла, а далі формування низхідних з’єднань, поки всі вузли не приєднаються до мережі. Точний вигляд мережі буде залежати від таких факторів, як вибір кореневого вузла чи проміжного вузла. Загальний процес побудови mesh-мережі наведено на рис. 5.15.

В цілому процес побудови mesh-мережі можна розділити на 4 етапи:

1) *Вибір кореневого вузла*. Кореневий вузол можна визначити попередньо при розробці локальної mesh-мережі, або він може бути динамічно встановлений, базуючись на потужності сигналу між кожним вузлом і маршрутизатором. Після встановлення кореневий вузол з’єднується з маршрутизатором і починає формувати низхідні з’єднання.

2) *Формування другого шару*. Після встановлення кореневого вузла та його приєднання до маршрутизатора, неактивні вузли в діапазоні досяжності кореневого вузла починають з ним з’єднуватись, утворюючи таким чином

другий шар мережі. Після з’єднання вузли другого рівня стають проміжними батьківськими вузлами.

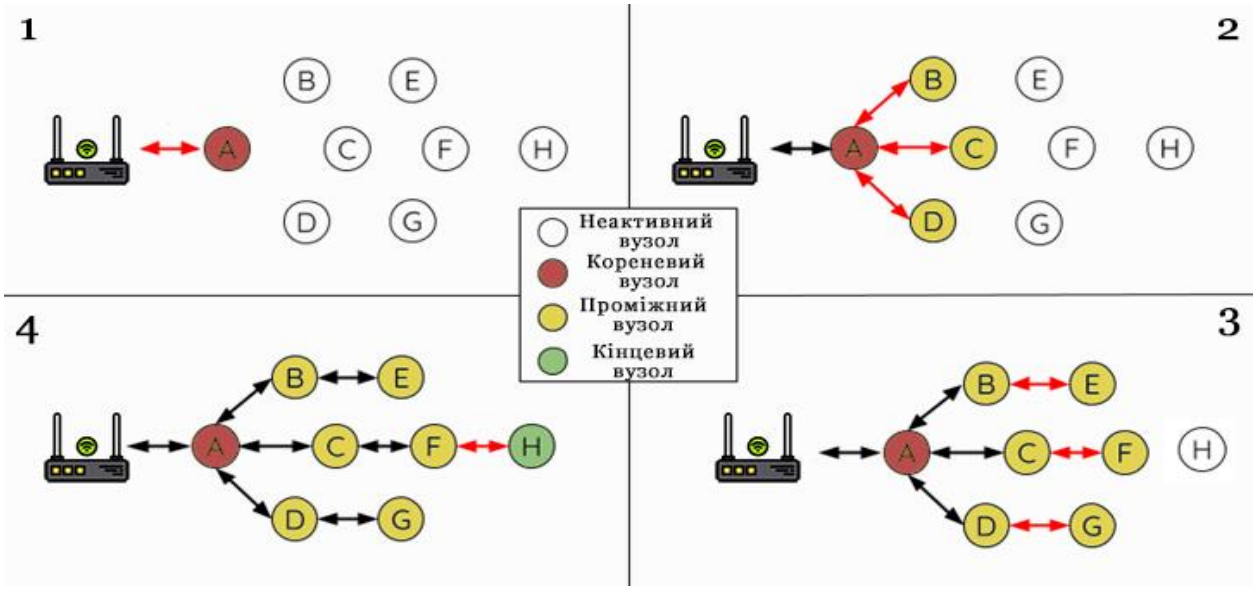


Рис. 5.15. Процес побудови mesh-мережі

3) *Формування наступних шарів*. Інші неактивні вузли з’єднуються з проміжними батьківськими вузлами в межах діапазону, таким чином утворюючи новий шар мережі. Після підключення вузли стають або проміжним батьківськими, або кінцевими, що залежить від максимальної кількості дозволених шарів. Цей етап буде повторюватися до того часу, доки в мережі не залишиться неактивних вузлів, або поки мережа не досягне максимального рівня шарів.

4) *Обмеження кількості шарів*. Для того, щоб мережа не перевищила максимальну кількість допустимих шарів, після підключення вузли на максимальному шарі автоматично стануть кінцевими вузлами. Це запобігає з’єднанню будь-якого іншого неактивного вузла з кінцевим вузлом, таким чином унеможливлюється формування нового шару. Якщо неактивний вузол не матиме альтернативи для підключення до іншого проміжного вузла, він залишатиметься неактивним протягом невизначеного часу.

Загалом, реалізація системи контролю забруднення повітря на базі mesh-мережі дозволить значно підвищити надійність та стійкість системи в цілому.

5.4. Особливості використання БПЛА в системах контролю в енергетиці та екології

Посилення негативного впливу людини на всі компоненти природного середовища вимагає застосування нових більш ефективних засобів і методів контролю. При цьому разові спостереження не дають уявлення ні про інтенсивність процесів, що відбуваються, ні про їх динаміку, а іноді і про сам факт негативного впливу. Саме тому останнім часом все більш актуальним стає розвиток систем контролю при оцінці стану природних і техногенних об'єктів. Під контролем, в даному випадку, розуміють комплексну систему спостережень за станом навколишнього середовища (атмосфери, гідросфери, ґрунтово-рослинного покриву та ін.) і техногенних об'єктів з метою їх контролю та охорони. Своєчасно отримана в результаті систематичного контролю інформація, дозволяє приймати обґрунтовані управлінські рішення в області експлуатації природних і техногенних об'єктів.

Сучасні системи контролю забруднення повітря переважно використовують стаціонарні пости спостереження як основу для генерування даних про екологічний стан повітря. Їх недоліком є неможливість оцінити розподіл полів забруднювачів по висоті. Ця проблема частково вирішується за допомогою мобільних лабораторій, що можуть мати зовнішні канали обмеженої довжини, які використовуються як пробовідбірники. Проте в загальному задача просторового контролю забруднення повітря на різних висотах за допомогою таких засобів не вирішується.

Висока оперативність і ефективність контролю може бути забезпечена за рахунок застосування дистанційних методів досліджень. Однією із реальних альтернатив просторового контролю забруднення повітря на різних висотах є застосування безпілотного літального апарату як платформи для вимірювальних модулів системи контролю, що містять набір спеціальних сенсорів. Це дозволить проводити контролю за забрудненням повітря в будь-якій точці 3-х вимірного простору, координати якого обмежуються тільки технічними характеристики БПЛА.

На БПЛА можуть бути встановлені різні вимірювальні засоби – як пробовідбірники для подальшого дослідження хімічного складу проби в лабораторії, так і сенсори, що можуть зберігати, обробляти, аналізувати та передавати їх в режимі реального часу на сервер системи контролю.

БПЛА не потребують складного технічного обслуговування. Їх модульна структура дозволяє швидко і порівняного недорого замінювати пошкоджені елементи. Наявність спеціального підвісу також дозволяє швидко змінювати контрольно-вимірювальну апаратуру, що адаптує БПЛА для дослідження різних забруднюючих речовин.

Одним із важливих питань при використанні БПЛА як платформи для системи контролю забруднення повітря є вибір типу БПЛА за аеродинамічною схемою – літаковий чи гелікоптерний. Воно пов’язане з тим, що переміщуючись у повітрі з високою швидкістю від однієї точки контролю до іншої, навколо БПЛА формуються різношвидкісні (турбулентні та/чи ламінарні) потоки повітря, що можуть призвести до змішування забруднювачів у повітрі, і як наслідок, вплинути на кінцевий результат контролю. До того, враховуючи технічні особливості low-cost сенсорів (особливо металоксидних та електрохімічних), важливим є фіксація в точці простору протягом деякого часу, адже період між вимірюванням у таких сенсорів на практиці складає від 30 с до 1 хв. Виходячи з цього, БПЛА гелікопетрного типу (в т.ч. квадрокоптери) мають значну перевагу перед БПЛА літакового типу, що не мають можливості фіксації у просторі протягом тривалого часу.

Серед багатьох типів БПЛА гелікоптерного типу найдоступнішими на ринку стали квадрокоптери. Вони характеризуються достатньою надійністю, стабільністю, безпекою використання та можуть бути використані у різних сферах відповідно до своїх технічних характеристик.

Сфери застосування таких квадрокоптерів досить різні. Дрони дозволяють ефективно підвищити рівень безпеки периметрів електростанції та окремих об'єктів інфраструктури. Регулярний контроль із застосуванням

БПЛА дозволяє спостерігати за проведенням робіт на території електростанцій, дистанційно здійснювати розвідку місцевості і прилеглих територій, виявляти перебування сторонніх осіб і транспортних засобів.

Квадрокоптер, оснащений блоком детектування гамма-випромінювання, дозволяє проводити розвідку радіаційної обстановки місцевості. Дані розвідки можуть передаватися з борта квадрокоптера на наземну станцію управління в режимі реального часу [530].

Моніторинг високовольтних ЛЕП з використанням дронів дозволяє швидко і ефективно оцінювати технічний стан об'єктів у важкодоступних і віддалених місцях, проводити оцінку стану опор та ізоляторів, рівня провисання проводів і висоти рослинності навколо ЛЕП, виявляти різні загрози на ранніх стадіях та акти діяльності сторонніх осіб в охоронних зонах [562-564].

Дані, отримані за допомогою квадрокоптера дозволяють фахівцям оцінювати ризики і прогнозувати вплив природних факторів, обстежувати нові маршрути прокладки ЛЕП і прилеглі до них території.

В наукових роботах [565, 566] проведено аналіз методів моніторингу технічного стану трубопроводів теплових мереж. Досліджено можливості теплової аерозйомки на базі БПЛА для виявлення різних типів дефектів. Даний метод визначено перспективним [567] та отримано патент на винахід [568]. Серед його переваг: оперативність, мобільність, одночасне обстеження великих площ, запис та аналіз отриманих даних, відносна низька вартість реалізації.

Також актуальним завданням є контроль забруднення повітря з використанням квадрокоптера, що дозволяє оцінити якість повітря на різній висоті, спрогнозувати переміщення полів концентрації забруднюючих речовин та інше [530].

Для визначення місця розташування вимірювальних модулів на самому БПЛА важливим є розуміння його аеродинамічних властивостей. Вчені з багатьох країн проводили моделювання аеродинамічних властивостей

квадрокоптерів [569-571]. В загальному їх результати показують, що зона під квадрокоптером характеризується відсутністю чи відносно слабкими повітряними потоками (рис. 5.16), що робить можливим розташування там вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря.

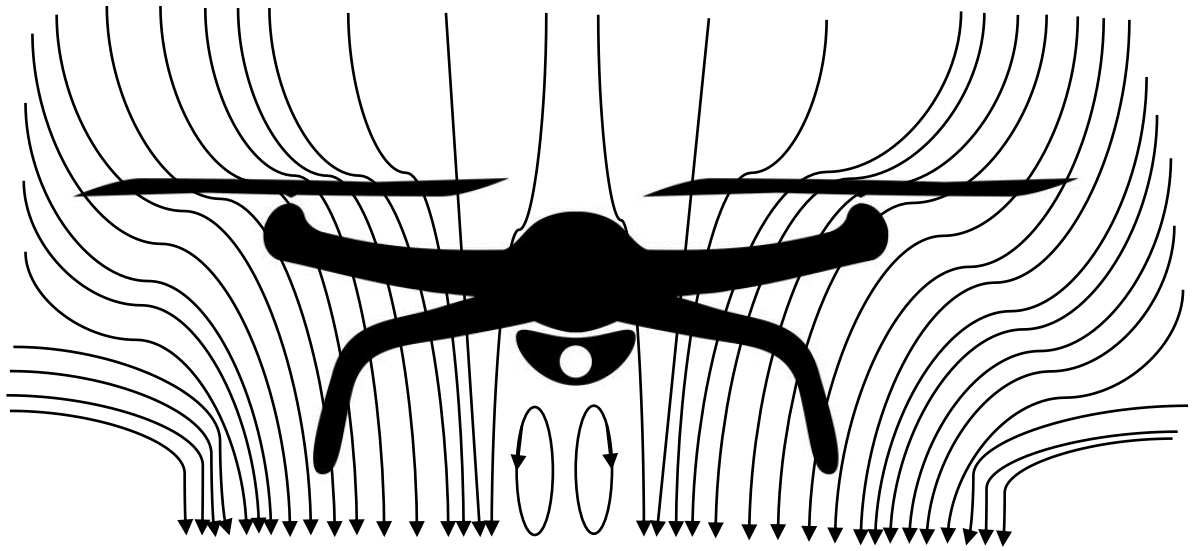


Рис. 5.16. Схематичне відображення розповсюдження повітряних потоків при функціонуванні БПЛА гелікоптерного типу

Використання БПЛА як платформи для мобільного контролю забруднення повітря дозволяє сформувати поля концентрації забруднюючих речовин на різних висотах. При цьому як інформативний параметр може бути використаний AQI, що характеризується спектром кольорів при різних діапазонах значень концентрацій забруднюючих речовин (таблиця 5.5).

На рис. 5.17 наведена блок схема процесу контролю забруднення повітря, що реалізуються за допомогою БПЛА гелікоптерного типу та встановленого на ньому вимірювального модулю.

Для реалізації запропонованої мобільної системи контролю до комплектації БПЛА має входити польотний контролер. Такі контролери мають бути оснащені GPS навігацією, що дозволяє програмувати загальний маршрут польоту та точки контролю, та бездротовими засобами зв’язку для передачі даних. Деякі технічні характеристики цих контролерів приведені в таблиці 5.6.

Загалом, запропоновані алгоритми та технічні рішення дозволяють реалізувати мобільну систему контролю забруднення повітря об’єктами енергетики, використовуючи квадрокоптери як платформу для розміщення вимірювальних модулів із заданим набором сенсорів.

Таблиця 5.5 – Значення AQI та діапазони концентрації забруднювачів, що йому відповідають

Забруднювач / AQI	PM_{10}	$PM_{2.5}$	NO_2	O_3	CO	SO_2	NH_3	Pb
Хороший (0-50)	0-50	0-30	0-40	0-50	0-1,0	0-40	0-200	0-0,5
Задовільний (51-100)	51-100	31-60	41-80	51-100	1,1-2,0	41-80	201-400	0,5-1,0
Помірно забруднений (101-200)	101-250	61-90	81-180	101-168	2,1-10	81-380	401-800	1,1-2,0
Високий (201-300)	251-350	91-120	181-280	169-208	10-17	381-800	801-1200	2,1-3,0
Дуже високий (301-400)	351-430	121-250	281-400	209-748	17-34	801-1600	1200-1800	3,1-3,5
Небезпечний (401-500)	430+	250+	400+	748+	34+	1600+	1800+	3,5+

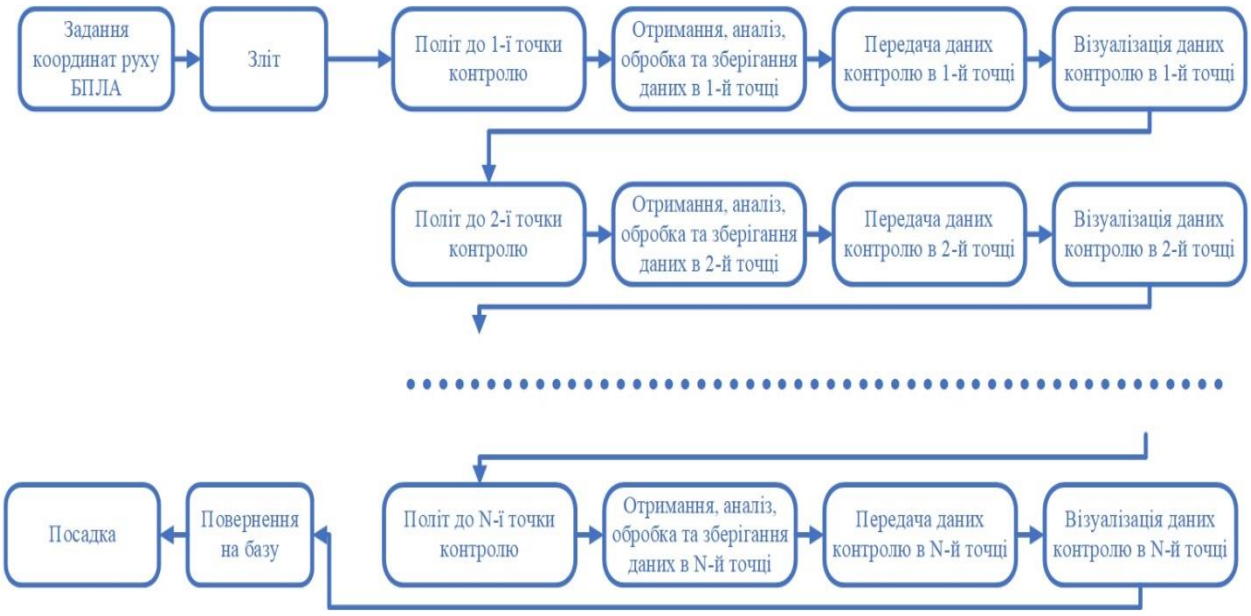
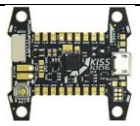
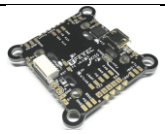


Рис. 5.17. Блок схема алгоритму проведення контролю забруднення повітря на базі БПЛА гелікоптерного типу

Таблиця 5.6 – Основні технічні характеристики польотних контролерів з типорозміром 30х30 мм

Назва	Маса, ~г	Теле-метрія	GPS	Барометр /гіроскоп	Ціна, ~$	Фото
Diatone Mamba F405	45	+	+	+/+	45	
FlightOne RevoltOSD	6	+	+	–/+	45	
Holybro Kakute	8	+	–	+/+	46	
BrainFPV RADIX	6	+	–	+/+	56	
KISS FC V2	5	+	–	–/+	70	
FETtec KISS	не відомо	–	–	–/+	85	
MATEKSYS F722-SE	10	+	–	+/+	80	
Diatone Mamba F722	9	+	–	+/–	40	
Aikon F4	7	+	–	–/–	25	
CL Racing F4S	не відомо	+	–	–/–	35	

5.5. Порівняльний аналіз технічних характеристик БПЛА для контролю забруднення повітря

Для даного аналізу обрано 8 квадрокоптерів, які представляють як бюджетний сегмент ринку – MJX X101, Syma X8HG, MJX BUGS, Cheerson CX-20 (до 300 $), так і «преміальні» моделі (Hubsan X4 Pro H109S, Xiro Explorer G, 3DR Solo, GoPro Karma), вартістю до 1000 $ [572, 573]. Звичайно, цей критерій поділу є умовним. В ході аналізу були виділені наступні параметри квадрокоптерів, які відображені в таблиці 5.7: назва моделі, час польоту (без корисного навантаження), дальність управління, утримання висоти, наявність камери в комплекті, FPV, ціна. У таблиці 5.8 сформовано ряд переваг і недоліків розглянутих квадрокоптерів.

Аналіз розглянутих квадрокоптерів проводився на базі універсального якісного критерію ефективності (УЯКЕ). Даний метод є найбільш простим і зручним при виборі оптимального квадрокоптера для контролю в сфері енергетики та екології. УЯКЕ вказує на досягнення мети, яка поставлена перед засобом контролю. У розглянутій задачі даний критерій має наступні граничні точки: «10» – повне досягнення мети; «0» – повне недосягнення мети. Таким чином, УЯКЕ являє собою середнє значення часткових якісних критеріїв ефективності (ЧЯКЕ), які характеризують досягнення окремих цілей, поставлених перед засобом контролю. Вони також можуть приймати значення в діапазоні від 0 до 10. Як ЧЯКЕ було обрано наступні параметри: ціна/якість, камера, функціональність, час польоту, льотні якості, компактність, комплектація, надійність. Значення ЧЯКЕ є середнім значенням, отриманим в результаті опитування користувачів інформаційного порталу Dronomania.

У таблиці 5.9 представлені отримані значення ЧЯКЕ для кожного дрона. «0» в стовпчику «Камера» для багатьох дронів передбачає відсутність камери в базовому комплекті дрона. На рис. 5.18 відображені значення ЧЯКЕ по кожному окремому параметру.

Таблиця 5.7 – Технічні характеристики квадрокоптерів

Квадрокоптер	**Час польоту, до хв**	**Дальність управління, до м**	**Підтримка висоти**	**Камера в комплекті**	**FPV**	**Ціна, від $**
MJX X101	10	100	-	-	-	74
Syma X8HG	7-12	70	+	8Мп	-	120
MJX BUGS 3	8-19	500	-	-	-	119
Cheerson CX-20	15	1000	+	-	-	250
Hubsan X4 Pro H109S	25	1000	+	FHD	5,8 ГГц	390
Xiro Explorer G	25	800	+	-	5,8 ГГц (Wi-Fi)	237
3DR Solo	20	1000	+	-	3DR Link secure Wi-Fi network	399
GoPro Karma	20	3000	+	-	5,8 ГГц	1060

Таблиця 5.8 – Переваги та недоліки квадрокоптерів

Квадрокоптер	Переваги	Недоліки
MJX X101	Ергономічність; польотні якості; вертикальна тяга; режим Headless; 3 режима активності; підвіс для вантажу; ціна	Колекторні мотори (малий ресурс); відсутня камера в базовому комплекті
Syma X8HG	Міцність корпусу; наявність камери; функція підтримання висоти; польотні характеристики; підвіс для вантажу; режим Headless; 6-ти вісний гіроскоп; LED підсвічування	Колекторні мотори (малий ресурс); потрібне додаткове балансування несучих гвинтів
MJX BUGS 3	Простота використання; потужність; функція зворотного зв’язку при низькому заряду та критичній віддаленості; підвіс для вантажу; сумісність з 3S-акумуляторами; LED підсвічування; ціна	Недостатня динамічність; заряджений акумулятор в базовій комплектації
Cheerson CX-20	GPS модуль; режими польоту; автоповернення з посадкою (при втраті зв’язку чи низькому заряді акумулятора); дальність польоту; управління; LED підсвічування; ціна	Необхідно точно налаштувати контролер; слабка вітростійкість; відсутня камера в комплекті

Hubsan X4 Pro H109S	GPS модуль; дальність польоту; FPV комплект/телеметрія; тривалий час польоту; 3 варіанти комплектації	Відсутня функція Follow me; відсутні автозліт та автопосадка
Xiro Explorer G	Модульна конструкція; польотні характеристики; 3-осьовий підвіс; акумулятор з індикацією заряду; автоматичні режими польоту	Чутливість до радіоперешкоди; крихкий підвіс камери; крихкі посадкові опори
3DR Solo	Модульна конструкція; польотні характеристики; гідростабілізований 3-осьовий підвіс; FPV; OS Linux (дрон /пульт); унікальні режими польоту	Не здатний облітати перешкоди; адаптований тільки під камери GoPro; відсутність камери в комплекті
GoPro Karma	Льотні характеристики; стабілізований 3-осьовий підвіс; FPV; режими польоту	Відсутність камери в комплекті; не здатний облітати перешкоди; час польоту; дальність польоту; вартість

Таблиця 5.9 – Значення УЯКЕ та ЧЯКЕ квадрокопетрів

Квадрокоптер	Ціна/якість	Камера	Функціональність	Час польоту	Льотні якості	Компактність	Комплектація	Надійність	УЯКЕ
MJX X101	10	0	5,5	5,5	6	4	10	8	6,13
Syma X8HG	9,5	5,5	5	5,8	5,8	4	10	8	6,70
MJX BUGS 3	10	0	6	7	8	6,5	9	7,5	6,75
Cheerson CX-20	10	0	8	6,8	8	5	5	7	6,23
Hubsan X4 PRO H109S	10	8	8,2	8,5	8,5	5	10	6,5	8,09
Xiro Xplorer G	10	8,5	9	7,5	9	5,5	10	6,5	8,25
3DR Solo	10	0	10	8,5	10	6	10	10	8,06
GoPro Karma	10	0	9,5	8,5	9,5	9,7	10	10	8,40

На рис. 5.19 відображені значення УЯКЕ для кожного квадрокоптера. Згідно з отриманими результатами, квадрокоптера можна розділити на 2 групи: з відносно низьким УЯКЕ (в межах від 6 до 7) і відносно високим УЯКЕ

(в межах від 8 до 9). Максимальне значення УЯКЕ не має жоден з розглянутих квадрокоптерів. До групи з відносно низьким УЯКЕ потрапили такі моделі як: MJX X101, Syma X8HG, MJX BUGS 3, Cheerson CX-20. Дані квадрокоптери характеризуються відносно дешевою вартістю – від 75 до 250 $. До групи з відносно високим УЯКЕ потрапили такі моделі як: Hubson X4 Pro H109S, Xiro Explorer G, 3DR Solo, GoPro Karma. Дані квадрокоптера характеризуються відносно високою вартістю - від 250 до 1000 $.

Безумовно, для різних завдань контрою один з розглянутих параметрів може бути критично важливий. В такому випадку, квадрокоптер із заданим параметром має бути використаний. Однак, на базі проведеного аналізу можна зробити висновок, що квадрокоптер MJX BUGS 3 має найвищу оцінку УЯКЕ серед розглянутих квадрокоптерів, що характеризуються порівняно низькою вартістю. Його застосування для задач контролю в сфері енергетики та екології за умов обмеженого бюджету є обґрунтованим

Квадрокоптер з найнижчим показником УЯКЕ - MJX X101 (6,13), квадрокоптер з найвищим показником УЯКЕ - GoPro Karma (8,40).

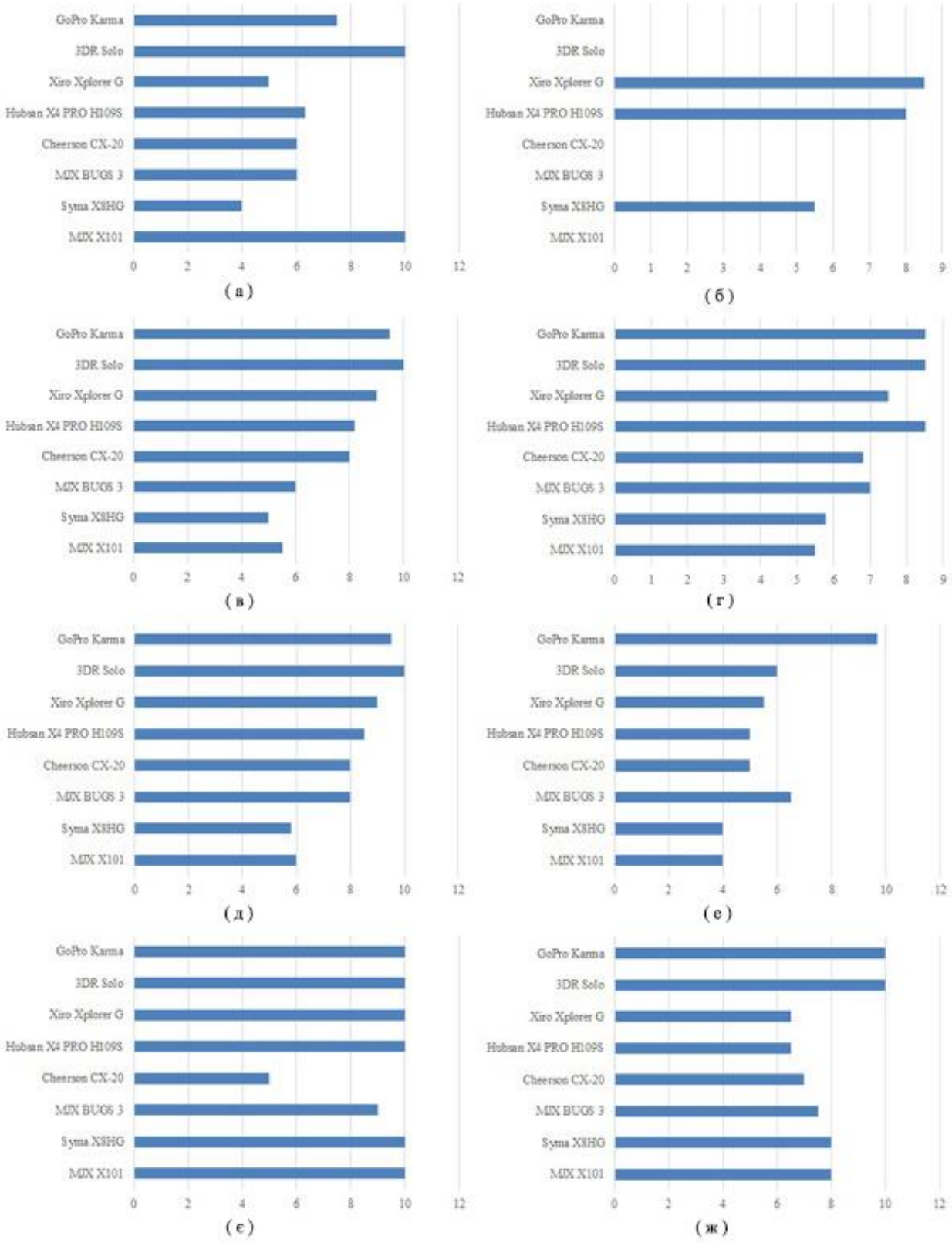


Рис. 5.18. Значення ЧЯКЕ: *а*) ціна / якість; *б*) камера; *в*) функціональність; *г*) час польоту; *д*) льотні якості; *е*) компактність; *є*) комплектація; *ж*) надійність

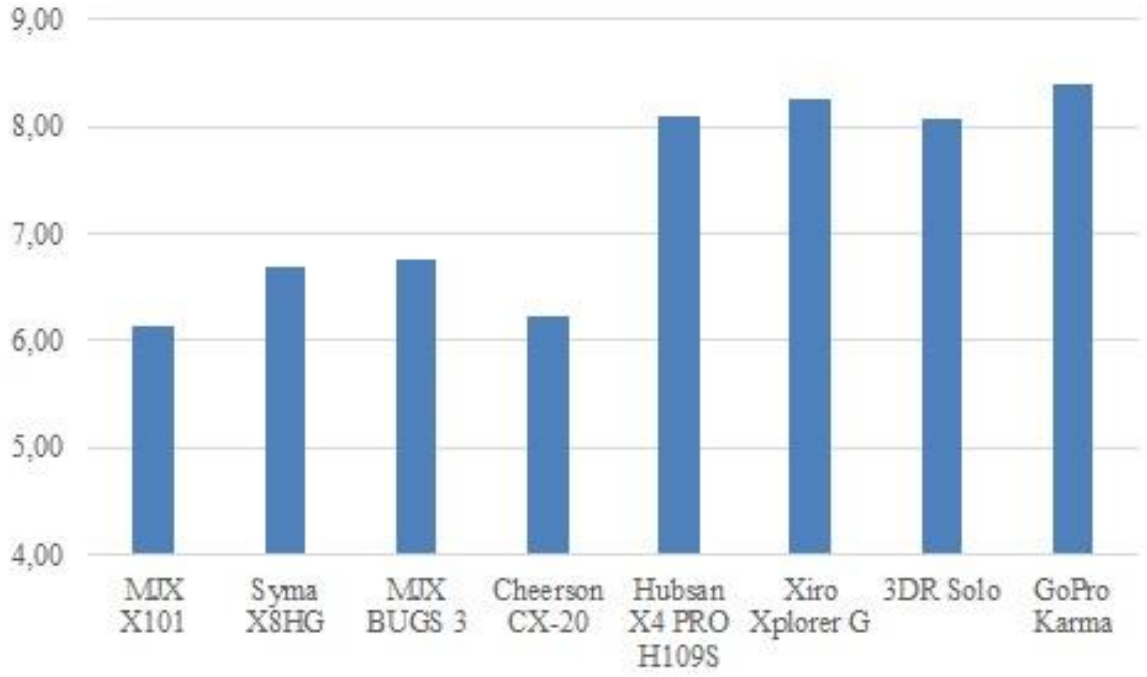


Рис. 5.19. УЯКЕ квадрокоптерів

5.7. Висновки до розділу

1. Розроблено структуру вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря, що базується на використанні low-cost сенсорів. Приведені відповідні принципові схеми елементів, функціональна схема, топологія друкованої плати, 3D-модель та фото вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря. Запропонована елементна база вимірювальних модулів, що може змінюватись в залежності від потреб системи контролю. Наведені технічні характеристики вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря.

2. Розроблена структура програмного пакету системи контроля забруднення повітря, що базується на використанні 4-х блоків: 1) блоку керування; 2) блоку статистичного опрацювання даних; 3) блоку візуалізації інформації; 4) блоку взаємодії з апаратним забезпеченням. Запропонована структура блоку статистичного опрацювання даних контролю, що складається із блоків попереднього опрацювання даних, кореляційного аналізу, регресійного аналізу та дисперсійного аналізу. Запропоновано алгоритм

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). Розроблений програмний пакет характеризується високою інформативністю і достовірністю контролю, селективністю даних та зручним інтерфейсом.

3. 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.

4. Запропоновано використання БПЛА як платформи 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 контрольно-вимірювальну апаратуру, що адаптує БПЛА для дослідження різних забруднюючих речовин. На основі даних аеродинамічних досліджень, визначено місце розташування вимірювальних модулів системи контролю, що характеризується відсутністю чи відносно слабкими повітряними потоками. Використання БПЛА як платформи для мобільного контролю забруднення повітря дозволяє сформувати поля концентрації забруднюючих речовин на різних висотах. При цьому пропонується використання AQI як інформативного параметру контролю. Запропонована блок-схема алгоритму контролю забруднення повітря на базі БПЛА гелікоптерного типу.

5. Проведено порівняльний аналіз технічних характеристик БПЛА гелікоптерного типу на базі УЯКЕ та ЧЯКЕ. Для аналізу обрано 8 квадрокоптерів, які представляють як бюджетні моделі (до 300 $), так і преміальні моделі (до 1000 $). Як ЧЯКЕ було обрано такі параметри:

ціна/якість, камера, функціональність, час польоту, льотні якості, компактність, комплектація, надійність. На основі аналізу встановлено, що найкращими моделями БПЛА за УЯКЕ серед бюджетних моделей є MJX BUGS 3, а серед преміальних – GoPro Karma, що можуть бути використані як мобільні платформи для вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря.

РОЗДІЛ 6
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ

6.1. Аналіз стану забруднення атмосферного повітря в м. Києві

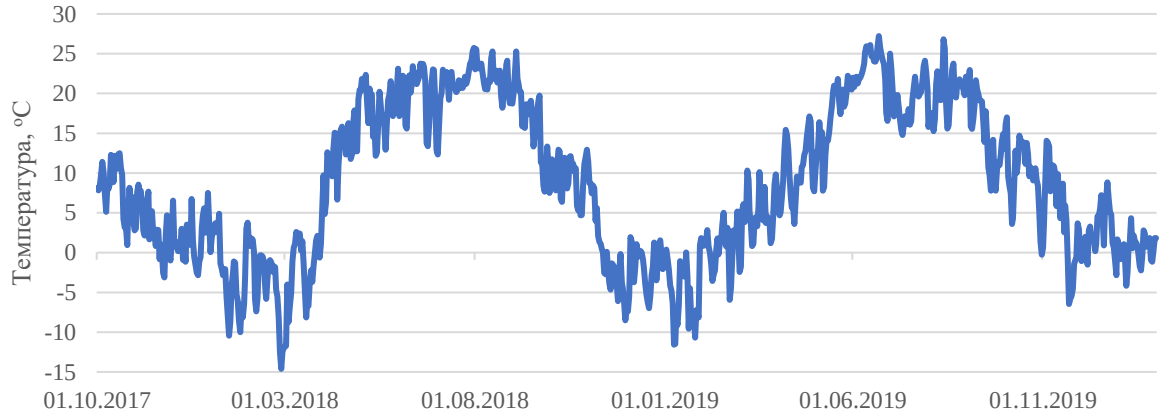
Експериментальні дослідження щодо хімічного забруднення атмосферного повітря проводилися в м. Київ з використанням даних розробленої системи контролю забруднення повітря та Центральної геофізичної обсерваторії ім. Б. Срезневського протягом жовтня 2017 р. – січня 2020 р. методами, описаними в розділі 4.

На території м. Києва переважає помірний континентальний клімат (за класифікацією Кеппена відповідає рівню Dfb). На основі статистичних даних 1993-2020 рр. встановлено, що середньорічна температура в м. Києві складає близько 9,1°С. Найтепліший місяць – липень, із середньорічною температурою 21,3°С, а найхолодніший – січень із середньорічною температурою -3,3°С.

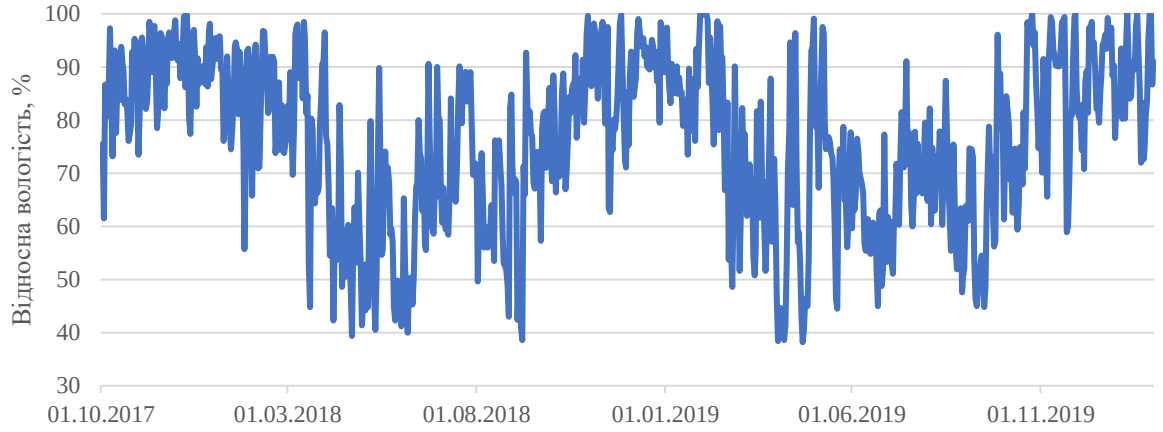
Дані, стосовно метеорологічних показників, а саме температури, відносної вологості та абсолютного тиску, в період проведення експериментальних досліджень наведено на рис. 6.1 (згідно даних wunderground.com).

На січень 2020 р. ЦГО ім. Б. Срезневського, дослідження проводилися на 16 стаціонарних постах, наведених на рис. 6.2. При цьому на деяких постах дослідження не проводились або проводились не в повному обсязі через відключення електроенергії або ремонт вимірювальної техніки.

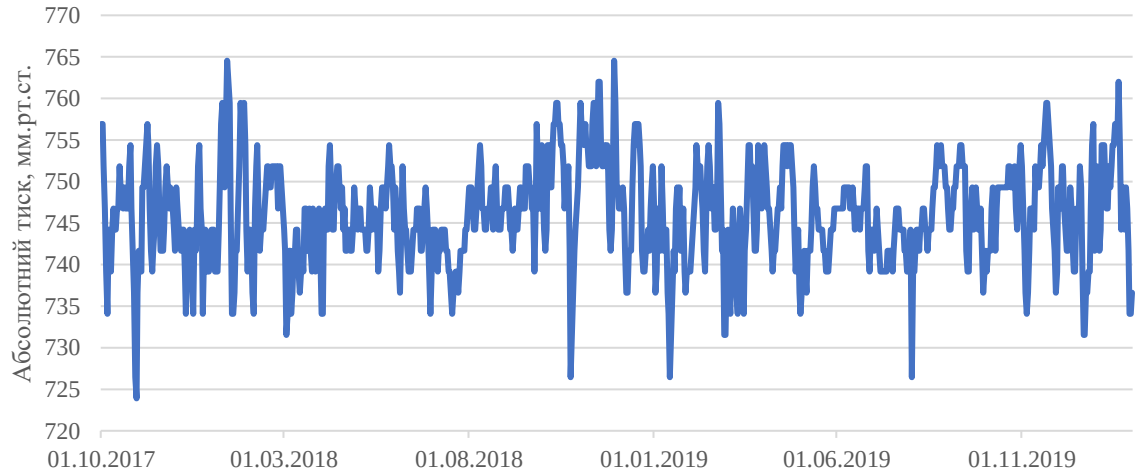
Для експериментальних досліджень протягом серпня 2018 р. – січня 2020 р. було обрано 4 стаціонарні пости: №3 (вул. Попудренка, 50, Дарницький район), №5 (просп. Науки, 37, Голосіївський район), №7 (Бессарабська площа, Шевченківський район); №20 (Деміївська площа, Голосіївський район). Їх вибір обумовлений наявністю даних про вимірювання на сайті Центральної геофізичної обсерваторії ім. Б. Срезневського (cgo-sreznevskyi.kyiv.ua).



а)



б)



в)

Рис. 6.1. Метеорологічні характеристики навколишнього повітря в м. Києві протягом жовтня 2017 р. – січня 2020 р.: *а*) температура; *б*) відносна вологість; *в*) абсолютний тиск

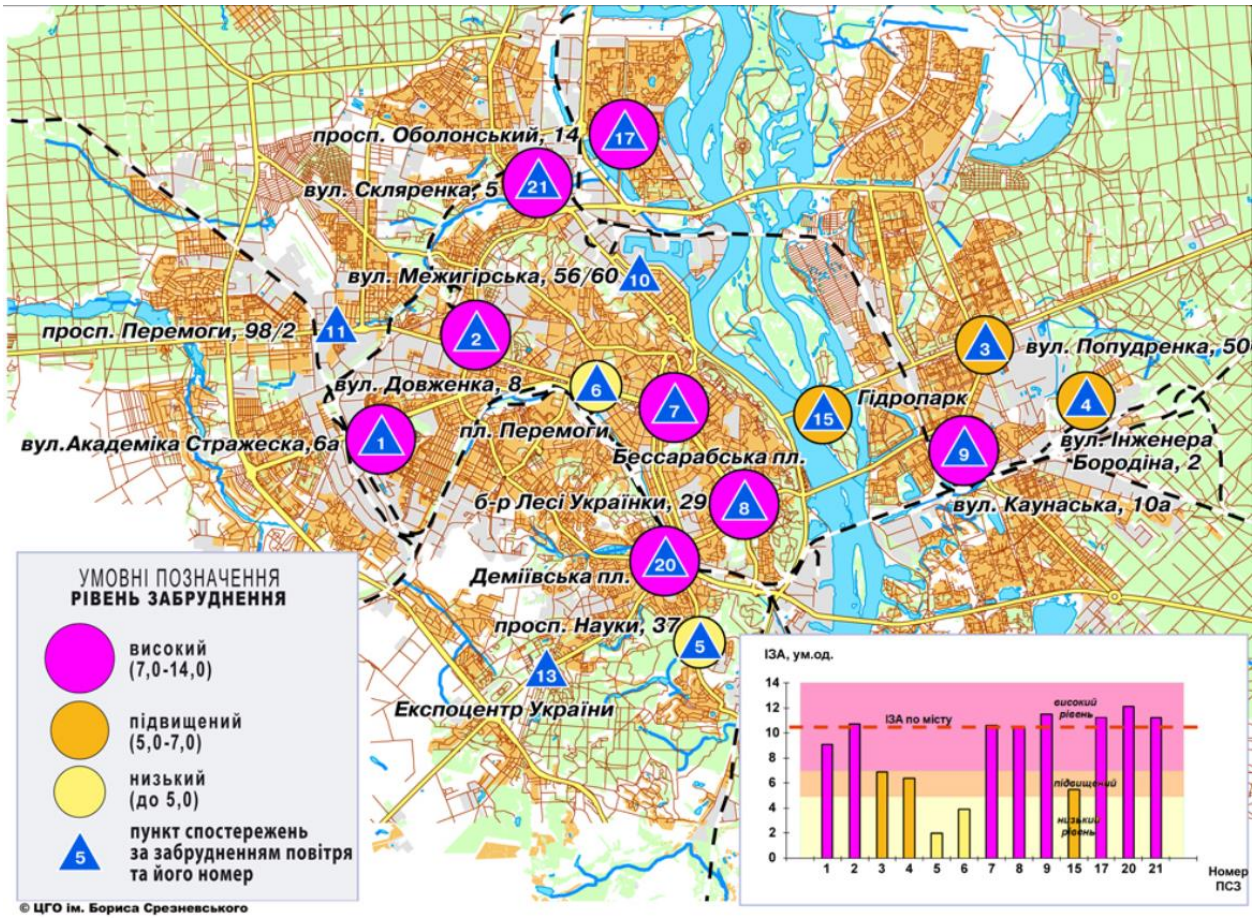


Рис. 6.2. Розташування постів та рівень забруднення за ІЗА в м. Київ станом на січень 2020 р. (cgo-sreznevskyi.kyiv.ua)

На цих постах визначалися концентрації різних забруднюючих речовин в повітрі, серед яких основні: завислі речовини, діоксид сірки (SO_2), оксид вуглецю (CO), діоксид азоту (NO_2) і оксид азоту (NO) та допоміжні: фтористий водень (HF), хлористий водень (HCl), аміак (NH_3), формальдегід (CH_2O). Визначення концентрації тієї чи іншої речовини здійснюється в залежності від наявності підприємств в зоні контролю ПС.

На рис. 6.3-6.6 наведені значення середньодобових концентрацій забруднюючих речовин, отримані на постах №7, №20, №3 та №5 відповідно. Кількість відібраних проб за час проведення експериментальних досліджень для постів склала: №3 – 2334, №5 – 2330, №7 – 2712, №20 – 2708. Час початку спостереження: для постів №7 та №20 – жовтень 2017; для постів №3 та №5 – серпень 2018.

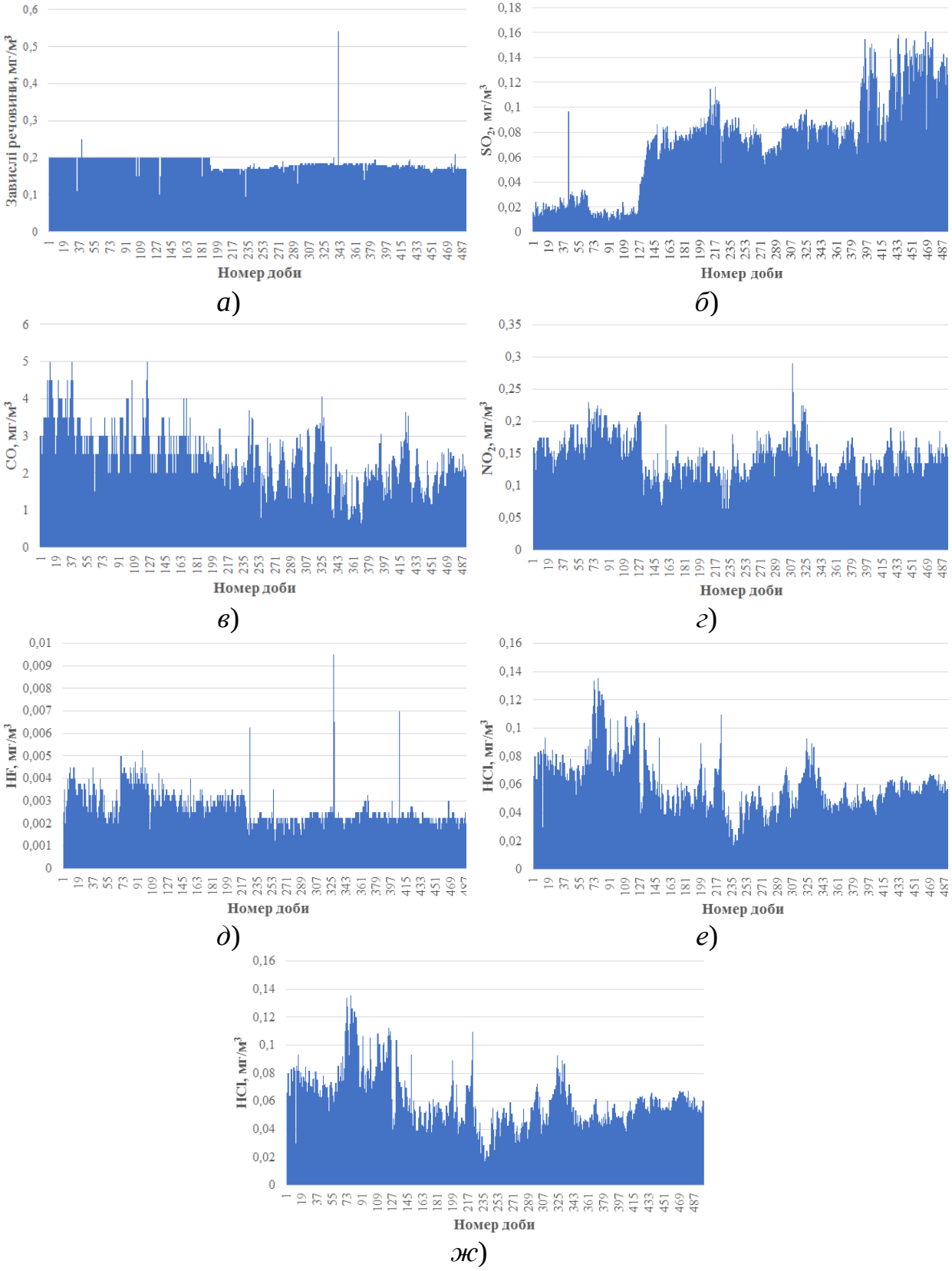


Рис. 6.3. Середньодобова концентрація забруднюючих речовин на ПС №7 (Бессарабська площа) впродовж періоду спостереження: *а*) завислі речовини; *б*) SO_2; *в*) CO; *г*) NO_2; *д*) HF; *е*) HCl; *ж*) CH_2O

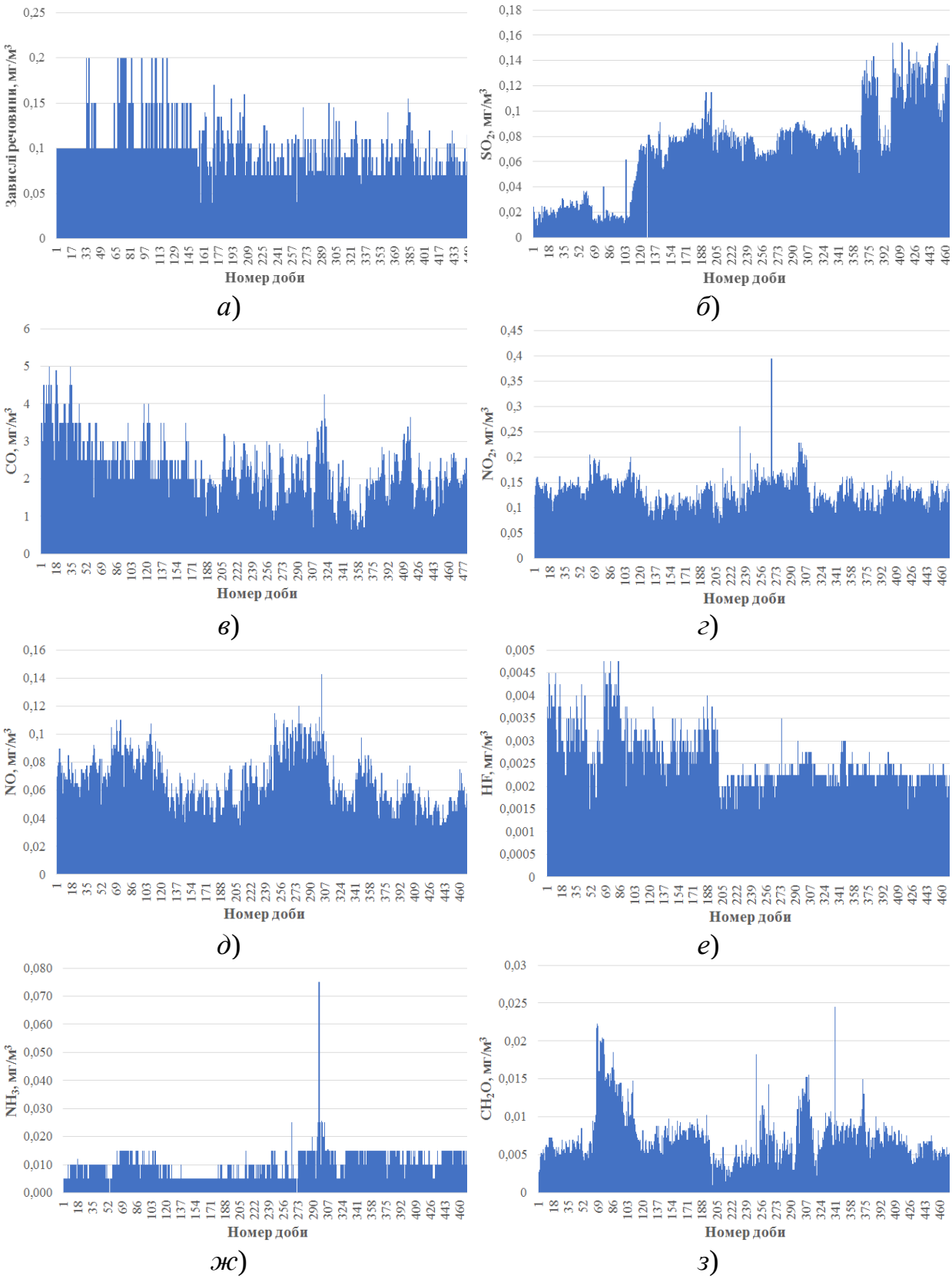


Рис. 6.4. Середньодобова концентрація забруднюючих речовин на ПС №20 (Деміївська площа) впродовж періоду спостереження: *а*) завислі речовини; *б*) SO_2; *в*) CO; *г*) NO_2; *д*) NO; *е*) HF; *ж*) NH_3; *з*) CH_2O

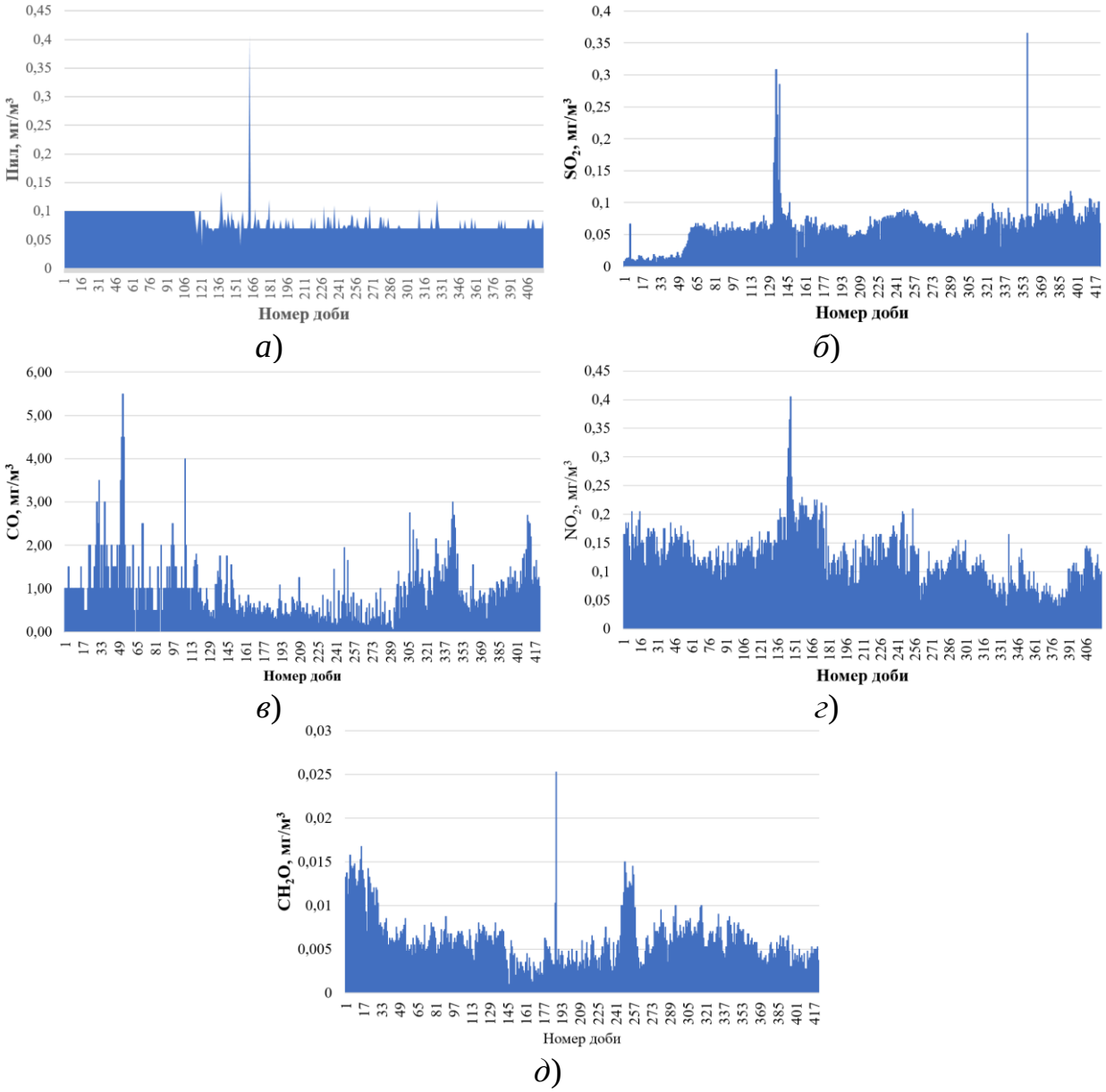


Рис. 6.5. Середньодобова концентрація забруднюючих речовин на ПС №3 (вул. Попудренка) впродовж періоду спостереження: *а*) пил; *б*) SO_2; *в*) CO; *г*) NO_2; *д*) CH_2O

Для оцінювання забруднення повітря кожною із контрольованих речовин були встановлені наступні рівні: безпечний ($К_{СД}$≤1), слабко небезпечний (1<$К_{СД}$≤2), помірно небезпечний (2<$К_{СД}$≤4,4), небезпечний (4,4<$К_{СД}$≤8), дуже небезпечний ($К_{СД}$>8), де $К_{СД}$ – середньодобова концентрація. Кількість зафіксованих відповідних рівнів забруднення для кожної із контрольованих речовин наведено в таблиці 6.1.

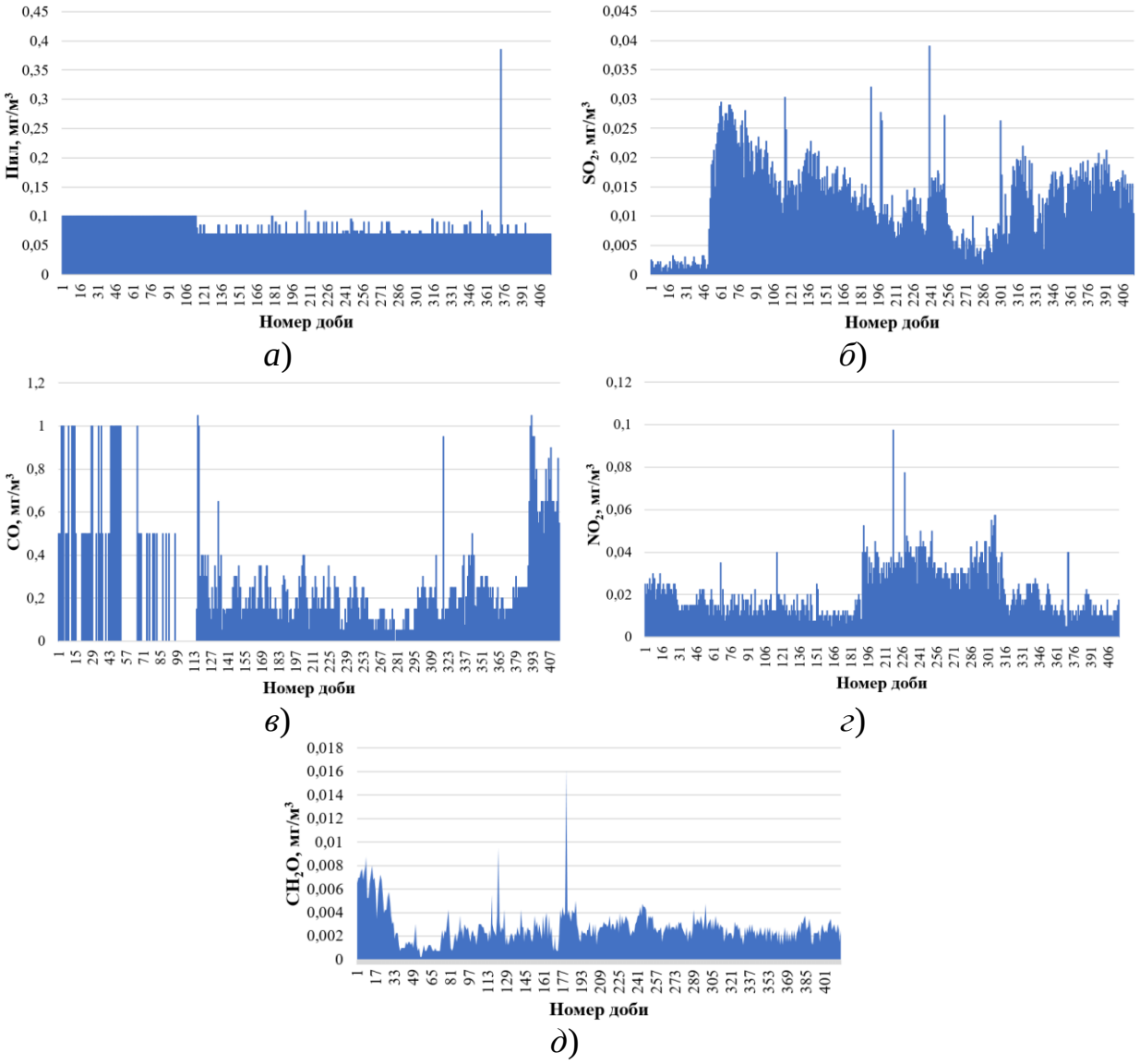


Рис. 6.6. Середньодобова концентрація забруднюючих речовин на ПС №5 (проспект Науки) впродовж періоду спостереження: *а*) пил; *б*) SO_2; *в*) CO; *г*) NO_2; *д*) CH_2O

З таблиці 6.1 можна зробити висновок про те, що забруднення повітря в м. Київ характеризується різними рівнями, зокрема помірно небезпечним на всіх ПС (ПС №7: SO_2 – 3,2%, NO_2 – 83,5%, CH_2O – 54,7%; ПС №20: NO_2 – 90,3%, CH_2O – 39,4%; ПС №3: SO_2 – 2,4%, NO_2 – 76,1%, CH_2O – 53,7%; ПС №5: CH_2O – 15,5%); небезпечним на ПС № 7, 20, 3 (ПС №7: NO_2 – 13,9%, CH_2O – 31,6%; ПС №20: NO_2 – 9,7%, CH_2O – 25,9%; ПС №3: SO_2 – 1,2%, NO_2 – 21,2%,

CH_2O – 12,6%); та дуже небезпечним на ПС № 7, 3 (ПС №7: CH_2O – 0,8%; ПС №3: NO_2 – 1,2%).

Таблиця 6.1 – Кількість зафіксованих рівнів забруднення для кожної речовини на ПС за період досліджень

Рівень / Речовина	Безпечний	Слабко небезпечний	Помірно небезпечний	Небезпечний	Дуже небезпечний
ПС №7					
Завислі речовини	24/4,8%	473/95,2%	0/0%	0/0%	0/0%
SO_2	262/52,7%	219/44,1%	16/3,2%	0/0%	0/0%
CO	374/75,4%	122/24,6%	0/0%	0/0%	0/0%
NO_2	0/0%	13/2,6%	415/83,5%	69/13,9%	0/0%
HF	495/99,6%	2/0,4%	0/0%	0/0%	0/0%
HCl	497/100%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%
CH_2O	0/0%	64/12,9%	272/54,7%	157/31,6%	4/0,8%
ПС №20					
Завислі речовини	417/91,6%	38/8,4%	0/0%	0/0%	0/0%
SO_2	454/96%	19/4%	0/0%	0/0%	0/0%
CO	371/84,7%	67/15,3%	0/0%	0/0%	0/0%
NO_2	0/0%	0/0%	429/90,3%	46/9,7%	0/0%
NO	18/3,8%	457/96,2%	0/0%	0/0%	0/0%
HF	475/100%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%
NH_3	474/99,8%	1/0,2%	0/0%	0/0%	0/0%
CH_2O	5/1,1%	160/33,7%	187/39,4%	123/25,9%	0/0%
ПС №3					
SO_2	137/32,5%	269/63,9%	10/2,4%	5/1,2%	0/0%
CO	408/96,9%	13/3,1%	0/0%	0/0%	0/0%
NO_2	0/0%	6/1,4%	319/76,1%	89/21,2%	5/1,2%
CH_2O	0/0%	142/33,7%	226/53,7%	53/12,6%	0/0%
ПС №5					
SO_2	415/100%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%
CO	415/100%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%
NO_2	414/100%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%
CH_2O	274/66,2%	76/18,4%	64/15,5%	0/0%	0/0%

Зважаючи на отримані результати, система контролю забруднення повітря, зокрема в м. Київ, має бути оснащена сенсорами мілкодисперсного пилу, SO_2, NO_2, CH_2O, при цьому, SO_2 та NO_2 є продуктами функціонування об’єктів енергетики, що розташовуються на території міста.

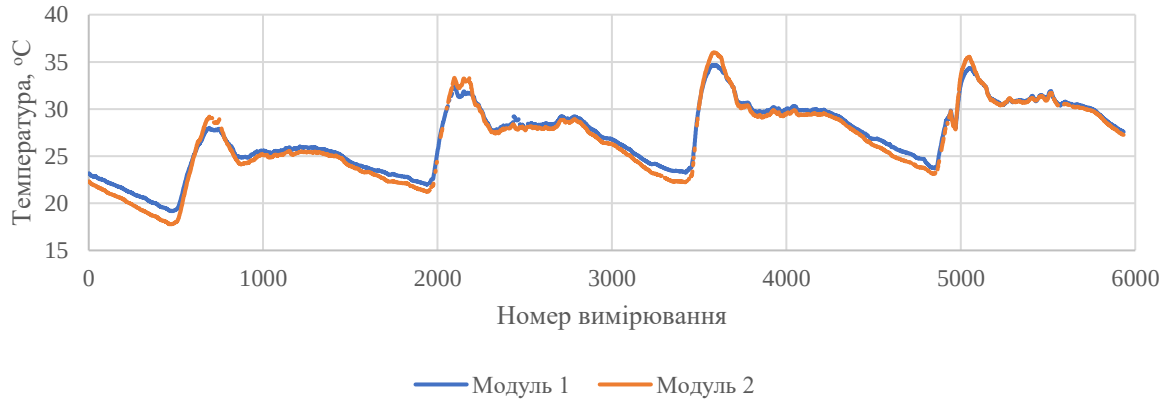
Проведені експериментальні дослідження показують, що існуюча система контролю забруднення повітря не відповідає сучасним вимогам щодо швидкої та інформативності. Використання морально застарілих інформативних параметрів (наприклад, ІЗА), що потребують усереднених даних на значних проміжках часу, на практиці не дозволяє визначити ступінь забруднення від певної речовини та оперативно впливати на функціонування відповідних джерел забруднення.

6.2. Експериментальні дослідження вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря

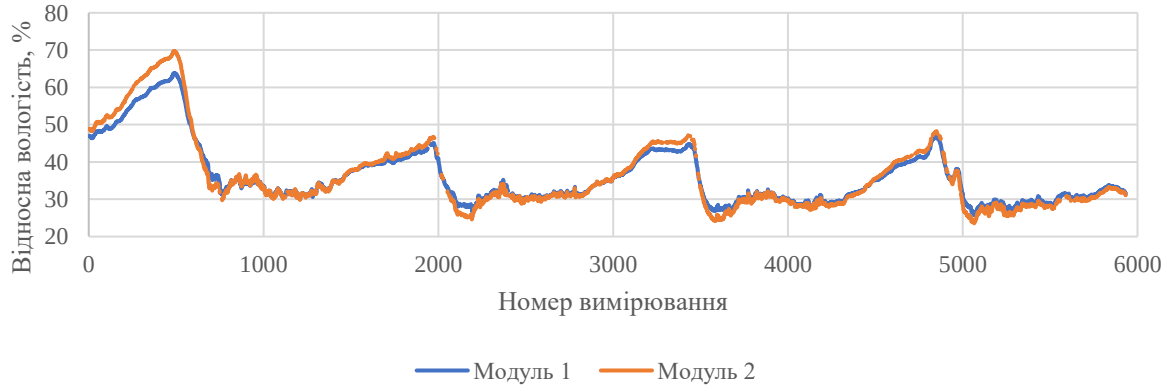
Також були проведені експериментальні дослідження розроблених вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря. Через високу частоту генерації даних дослідження проводились впродовж короткого часового періоду з 5 до 9 серпня 2021 р. За цей час було отримано 5933 наборів даних для кожного вимірювального модулю. Дослідження проводились на базі 2 вимірювальних модулів, оснащених сенсорами BME280, SDS011, MICS-6814, ZE25-O3, ZE08-CH2O, MH-Z19, RadKit. Отримані експериментальні дані, щодо вимірювання метеорологічних параметрів (температури, відносної вологості та абсолютного тиску), мікродисперсного пилу ($PM_{2,5}$, PM_{10}), NO_2, CO, NH_3, O_3, CH_2O, CO_2 та рівня радіації наведені відповідно на рис. 6.7-6.15. Також проводились вимірювання концентрації SO_2 в повітрі за допомогою сенсора ZE03-SO2, проте її не було зафіксовано, тому відповідні дані не наведені.

В таблиці 6.2 відображені дані щодо рівня інформативності системи контролю забруднення повітря, отриманого в ході проведення експериментальних досліджень. Як видно, навіть окремі модулі забезпечують достатньо високий рівень інформативності, що переважно складає 96% та 89% відповідно для 1-го та 2-го модулю для кожного інформативного параметра (забруднюючої речовини). Виняток становить сенсор мілкодисперсного пилу SDS011, його рівень інформативності при вимірюванні $PM_{2,5}$ та PM_{10} склав

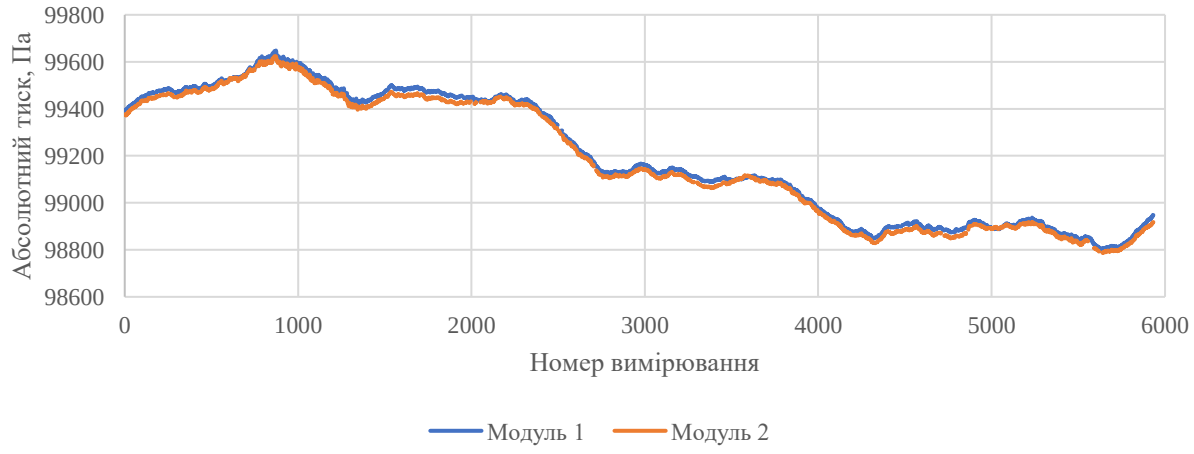
46,1% та 86,6% відповідно для 1-го та 2-го модулів, що пов’язно з технічною несправністю. В загальному, при одночасному використанні 2 модулів в 1-й точці вимірювання вдається досягти рівня інформативності 99,6%.



а)

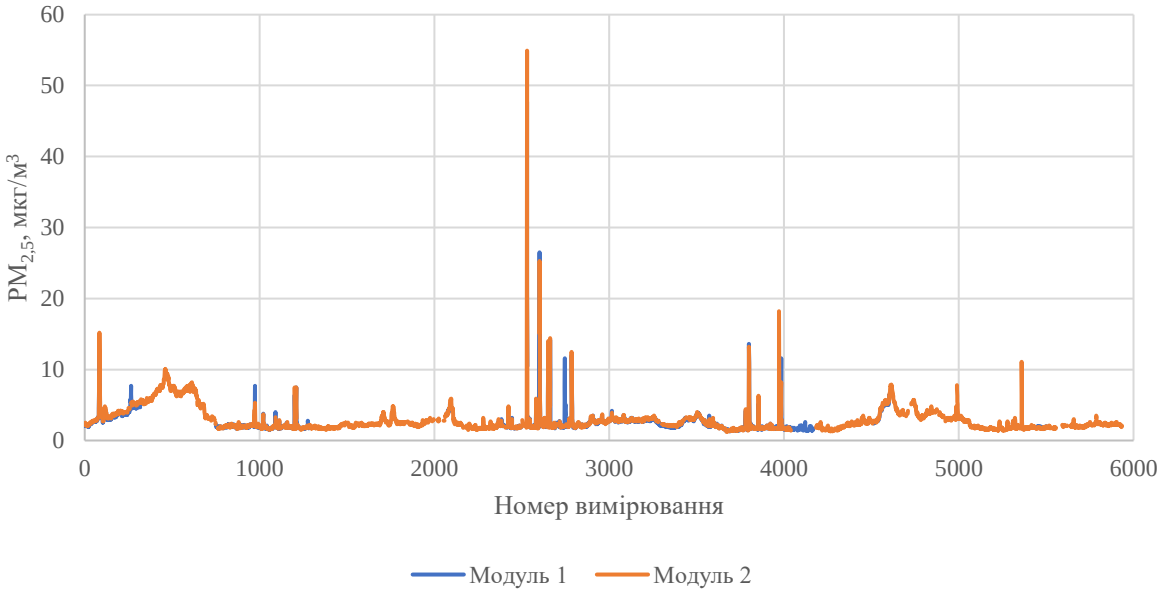


б)

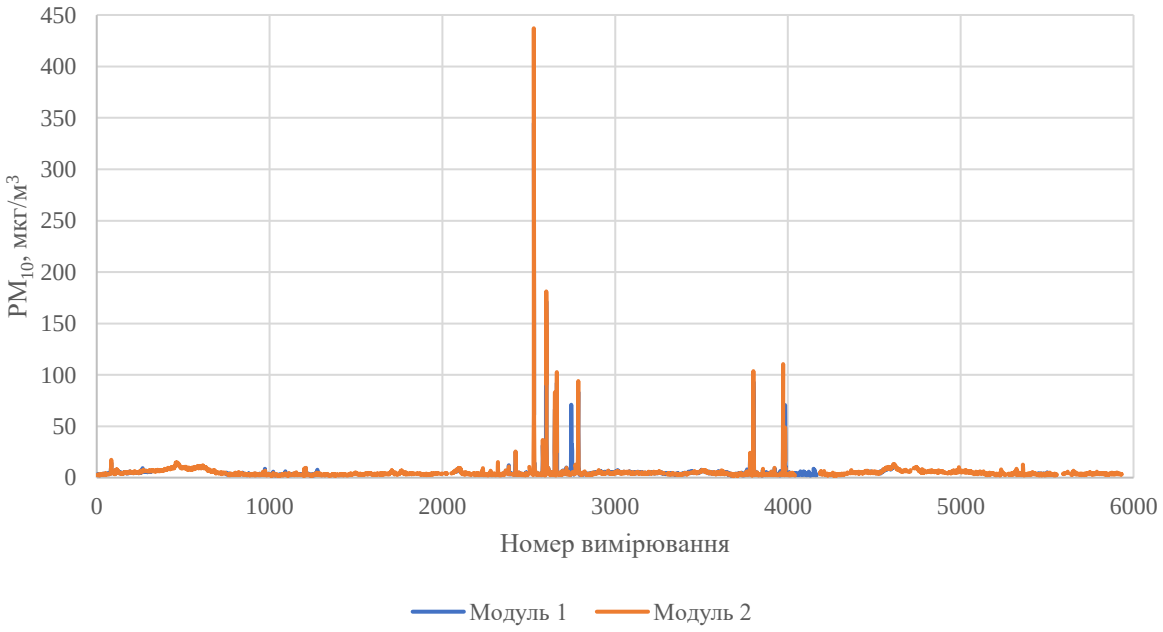


в)

Рис. 6.7. Експериментальні значення метеорологічних параметрів, отриманих на базі розроблених вимірювальних модулів: *а*) температури, *б*) відносної вологості; *в*) абсолютного тиску



а)



б)

Рис. 6.8. Експериментальні дані концентрації мілкодисперсного пилу, отримані за допомогою розроблених вимірювальних модулів: *а*) $PM_{2,5}$; *б*) PM_{10}

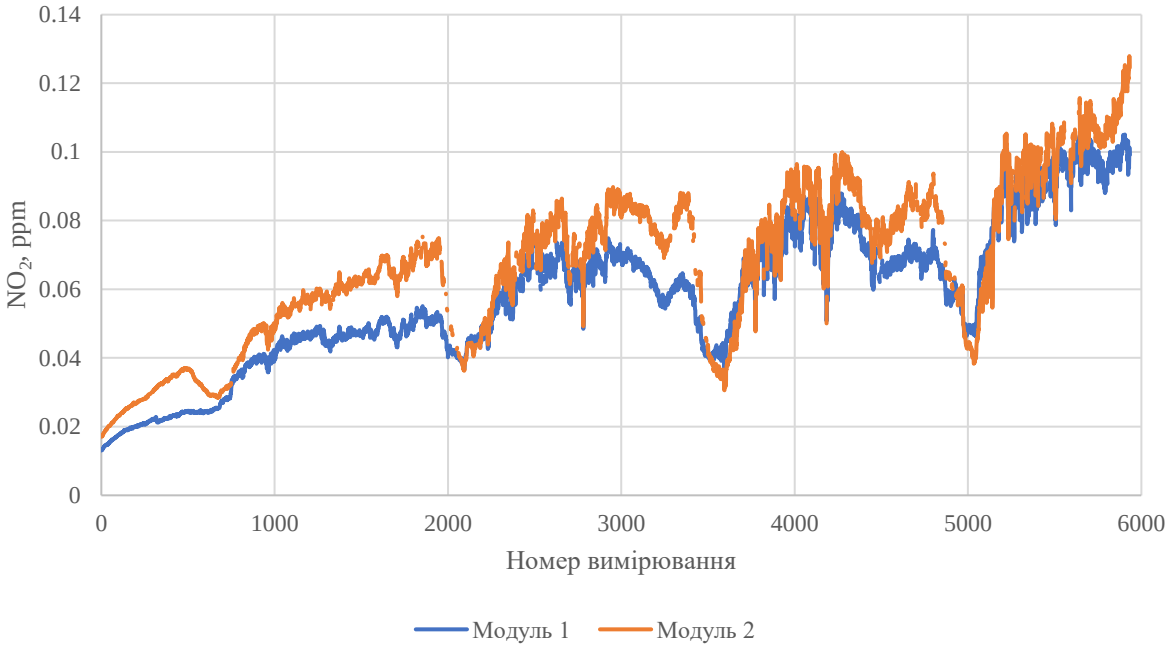


Рис. 6.9. Експериментальні дані концентрації NO_2, отримані за допомогою розроблених вимірювальних модулів

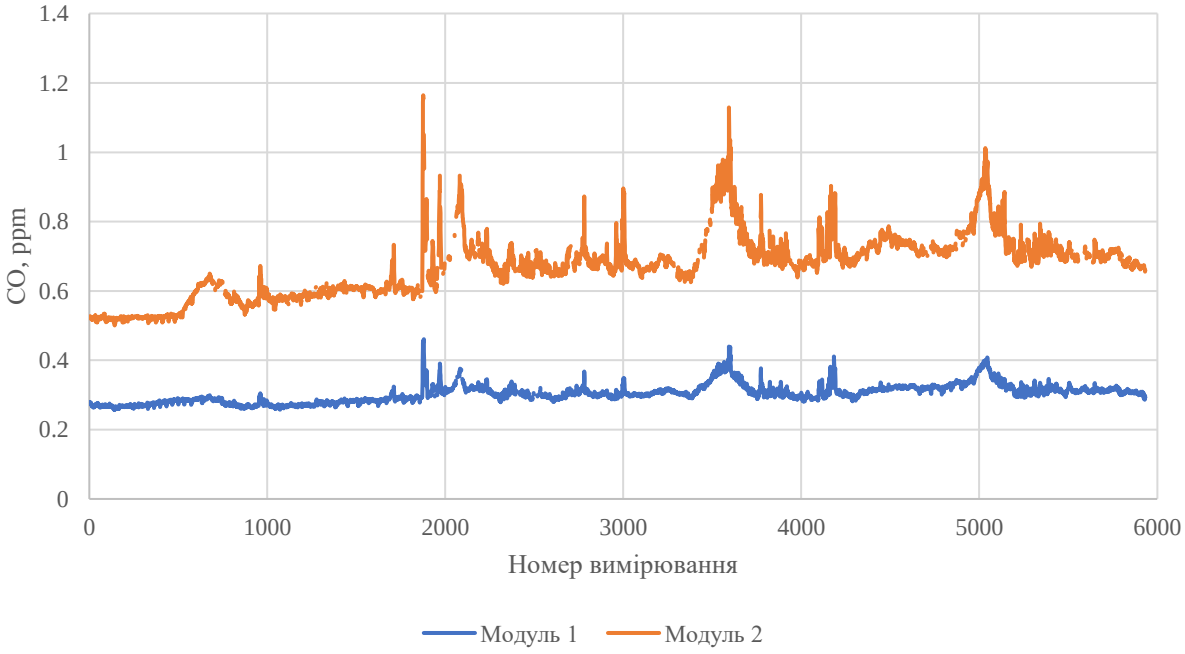


Рис. 6.10. Експериментальні дані концентрації CO, отримані за допомогою розроблених вимірювальних модулів

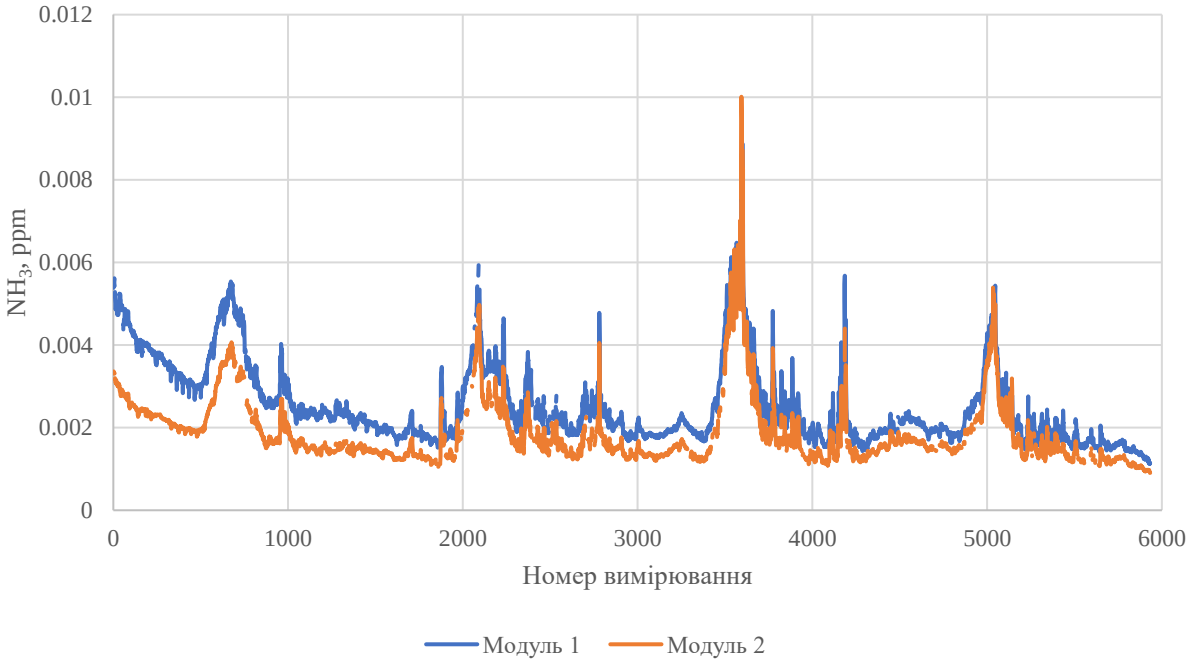


Рис. 6.11. Експериментальні дані концентрації NH_3, отримані за допомогою розроблених вимірювальних модулів

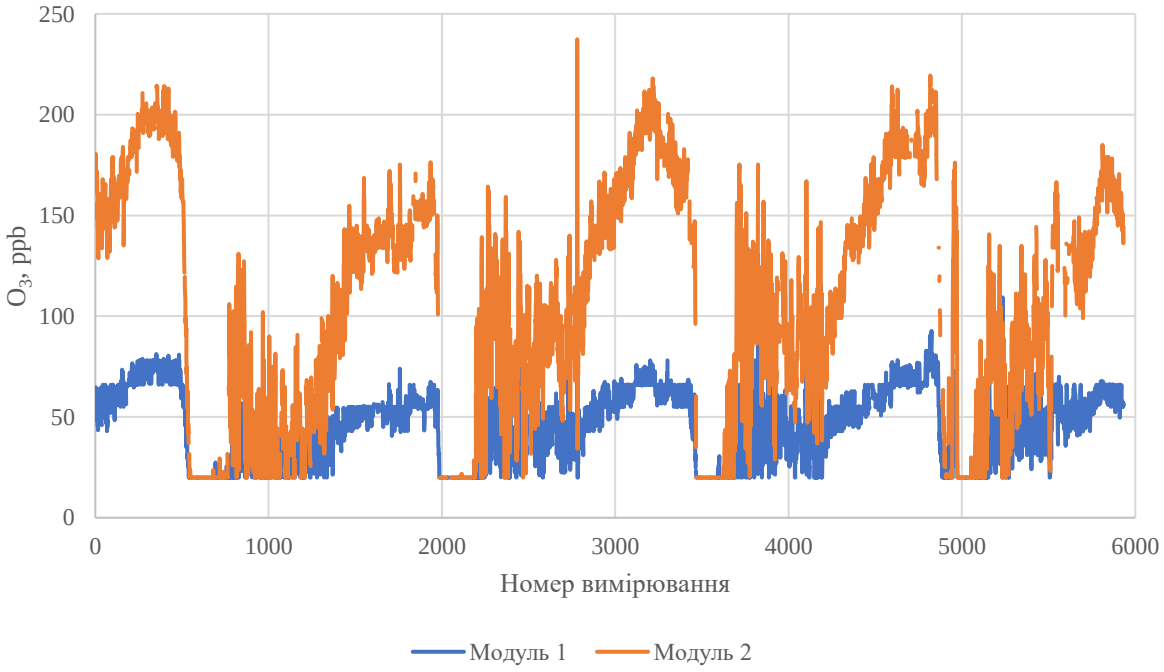


Рис. 6.12. Експериментальні дані концентрації O_3, отримані за допомогою розроблених вимірювальних модулів

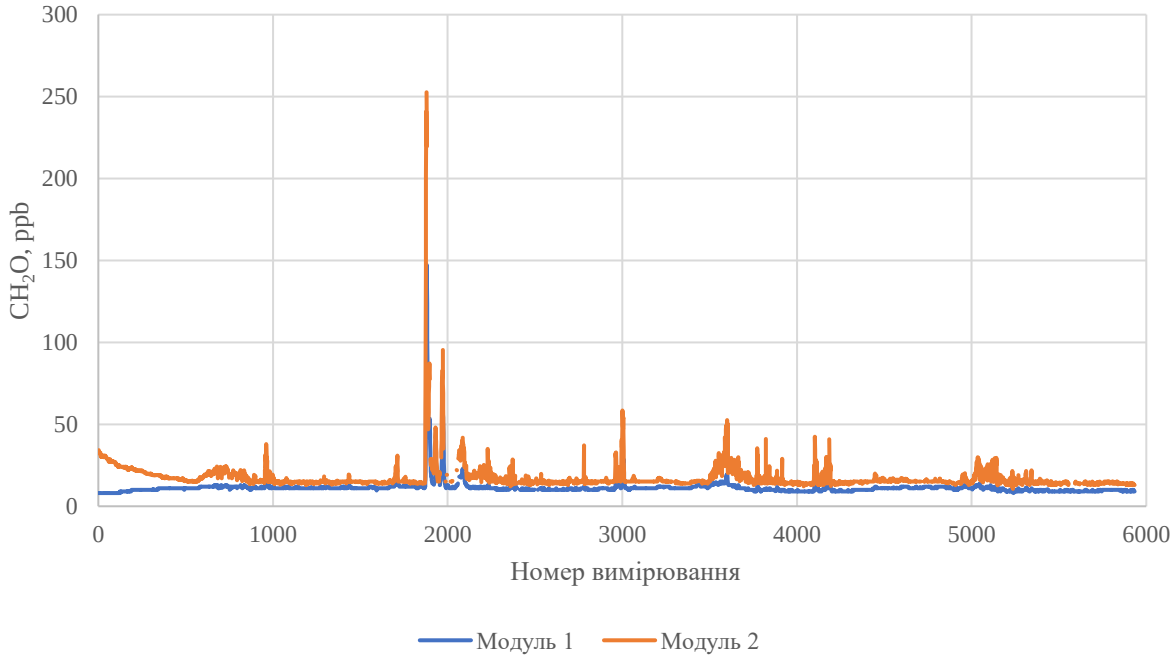


Рис. 6.13. Експериментальні дані концентрації CH_2O, отримані за допомогою розроблених вимірювальних модулів

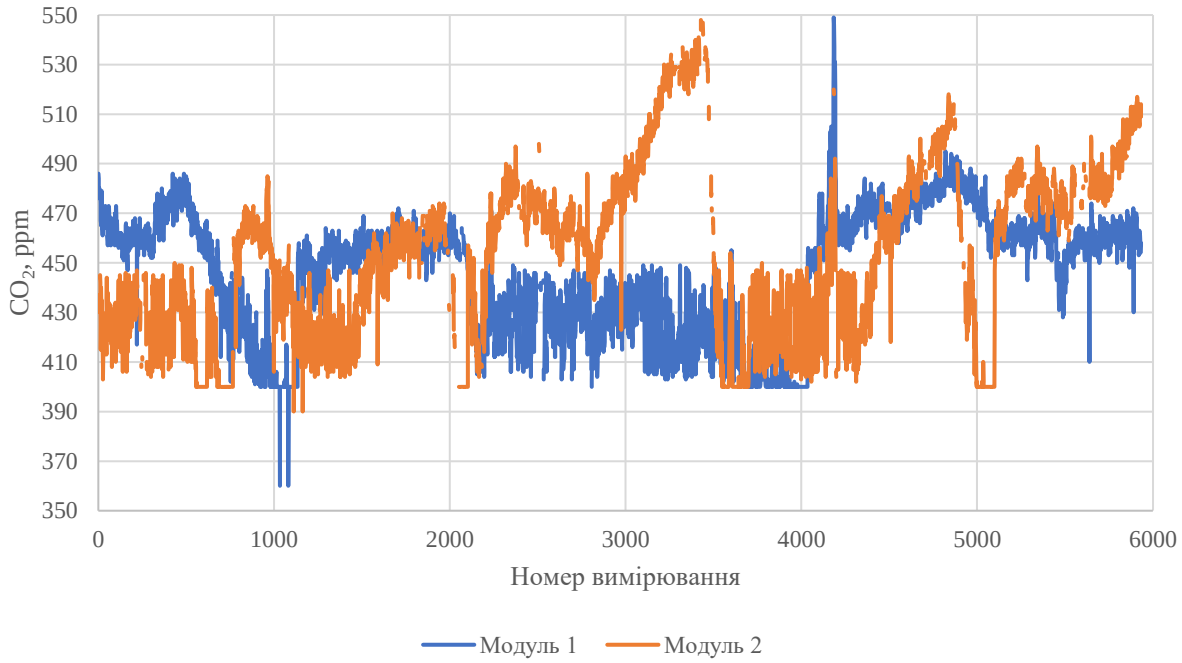


Рис. 6.14. Експериментальні дані концентрації CO_2, отримані за допомогою розроблених вимірювальних модулів

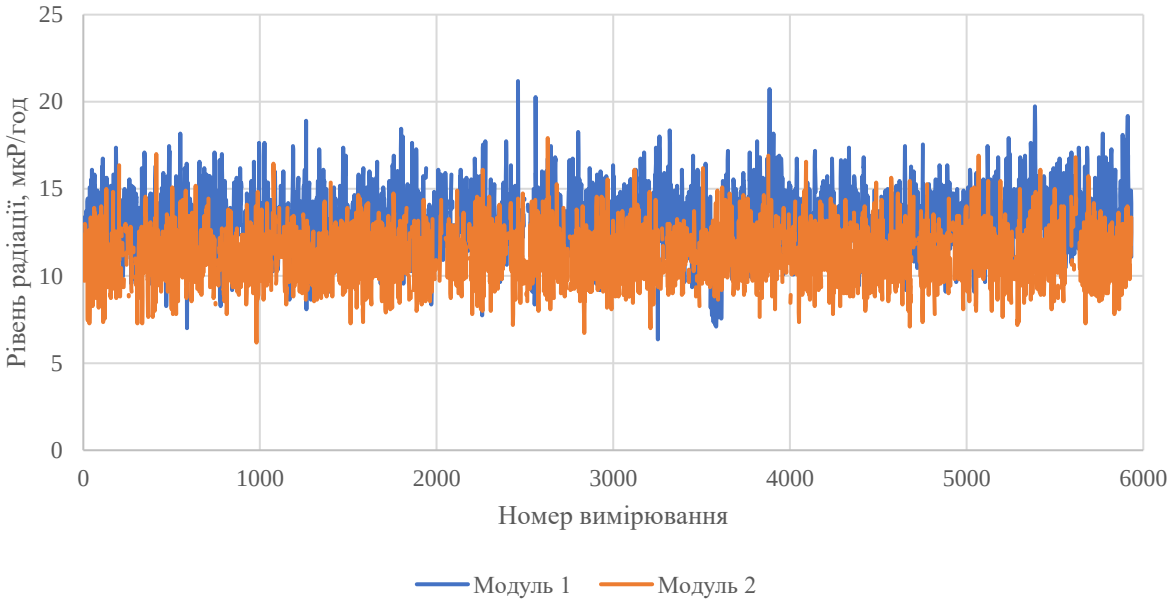


Рис. 6.15. Експериментальні дані щодо рівня радіації, отримані за допомогою розроблених вимірювальних модулів

Таблиця 6.2 – Рівень інформативності 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
$PM_{2,5}$	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

Загалом, отримані дані характеризуються достатньо високим значенням коефіцієнта кореляції r (≥0,93) та коефіцієнтом детермінації R^2 (≥0,87) за винятком CH_2O (r=0,82 та R^2=0,67), CO_2 (r=0 та R^2=0) та рівня радіації (r=0,02 та R^2=0).

В ході експерименту проводились також дослідження щодо сили кореляційного зв'язку між метеорологічними параметрами та концентраціями забруднюючих речовин. Відповідні результати наведені в таблиці 6.3.

Як видно з таблиці 6.3 найбільші значення коефіцієнта кореляції r та коефіцієнта детермінації R^2 характеризують зв'язок між такими забруднюючими речовинами, як NO_2 (r_1=0,57, R_1^2=0,32), CO (r_1=0,59, R_1^2=0,35; r_2=0,74, R_2^2=0,55), O_3 (r_1=-0,51, R_1^2=0,26; r_2=-0,55, R_2^2=0,30) та температурою; між $PM_{2,5}$ (r_2=0,60, R_2^2=0,36), NO_2 (r_1=-0,61, R_1^2=0,37) CO (r_2=-0,56, R_2^2=0,32), O_3 (r_1=0,50, R_1^2=0,25; r_2=0,53, R_2^2=0,38) та відносною вологістю; та між NO_2 (r_1=-0,82, R_1^2=0,67; r_2=-0,72, R_2^2=0,52), CO (r_1=-0,57, R_1^2=0,33; r_2=-0,64, R_2^2=0,41) та абсолютним тиском.

Таким чином, можна стверджувати про певний взаємозв'язок між значенням концентрацій NO_2, CO, O_3 та метеорологічними параметрами. Дослідження щодо впливу метеорологічних параметрів на результат вимірювання концентрацій різних забруднюючих речовин потребує проведення додаткових лабораторних та польових експериментів.

6.3. Верифікація методу локалізації джерела забруднення атмосферного повітря

Верифікація методу локалізація джерела забруднення проводилась на основі теорії, описаної в розділі 4 [530].

Таблиця 6.3 – 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_2O	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
Рівень радіації	1	0,03	0	-0,03	0	-0,09	0,01
	2	0,09	0,01	-0,06	0	-0,04	0

На рис. 6.16 наведено значення концентрації SO_2 в повітрі, отримані з ПС, що розташований в м. Києві поблизу станції метро Чернігівська. Вимірювання концентрації діоксиду азоту проводилося двічі на день: о 07:00 та 19:00 в період з вересня 2018 р. по квітень 2019 р. включно. При цьому деякі дані відсутні через ремонт вимірювальної техніки чи відключення електроенергії.

На рис. 6.17 наведено графік розподілу концентрацій діоксиду сірки згідно 16-ти променевої рози вітрів. Значення концентрації діоксиду сірки відповідно до кожного напряму рози вітрів є сумарним значенням концентрації, що спостерігалася впродовж календарного місяця.

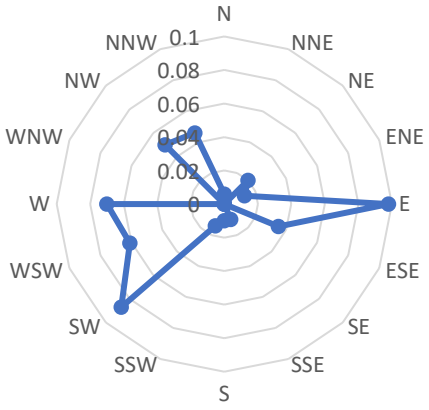
Дані про напрямок вітру взяті з бази wunderground.com відповідно до локації UKKK.



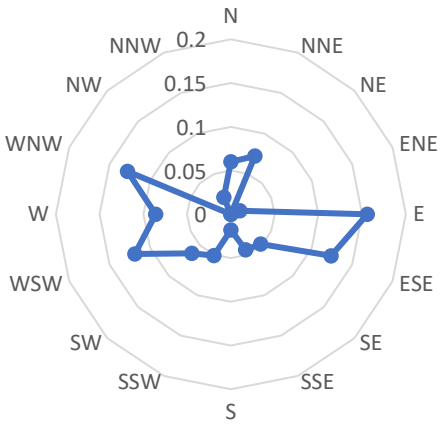
Рис. 6.16. Графіки значень концентрації SO_2 в м. Києві (м. Чернігівська) в період з вересня 2018 р. по квітень 2019 р. включно

На рис. 6.18 наведено значення концентрації діоксиду азоту в повітрі, отримані з вимірювального посту, що розташований в м. Києві (поблизу станції метро Чернігівська). Вимірювання концентрації діоксиду азоту проводилося двічі на день: о 07:00 та 19:00 в період з вересня 2018 р. по квітень 2019 р. включно.

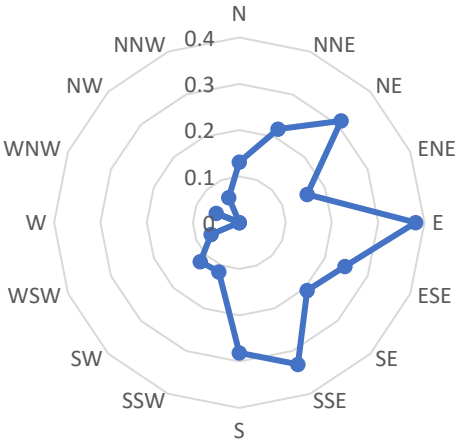
На рис. 6.19 наведено графік розподілу концентрацій діоксиду азоту згідно 16-ти променевої рози вітрів. Значення концентрації діоксиду азоту відповідно до кожного напряму рози вітрів є сумарним значенням концентрації, що спостерігалася впродовж календарного місяця.


N
NNE
NE
ENE
E
ESE
SE
SSE
S
SSW
SW
WSW
W
WNW
NW
NNW
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0

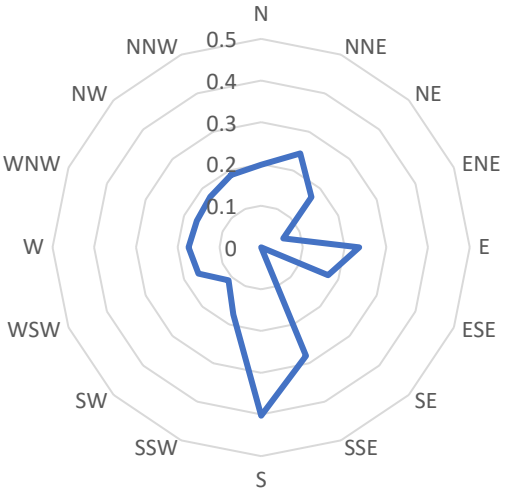
а)


N
NNE
NE
ENE
E
ESE
SE
SSE
S
SSW
SW
WSW
W
WNW
NW
NNW
0.2
0.15
0.1
0.05
0

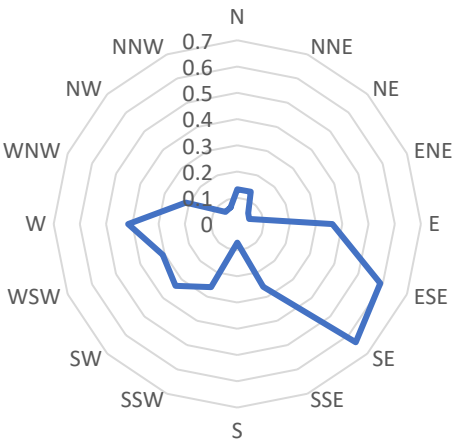
б)


N
NNE
NE
ENE
E
ESE
SE
SSE
S
SSW
SW
WSW
W
WNW
NW
NNW
0.4
0.3
0.2
0.1
0

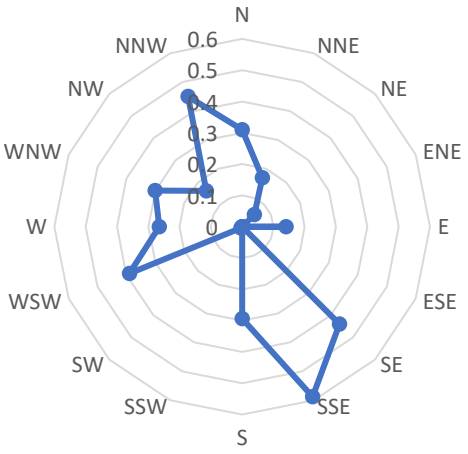
в)


N
NNE
NE
ENE
E
ESE
SE
SSE
S
SSW
SW
WSW
W
WNW
NW
NNW
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0

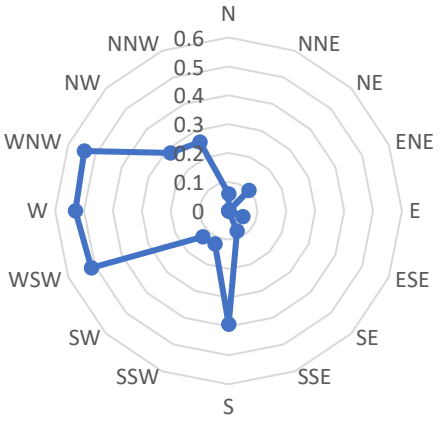
г)


N
NNE
NE
ENE
E
ESE
SE
SSE
S
SSW
SW
WSW
W
WNW
NW
NNW
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0

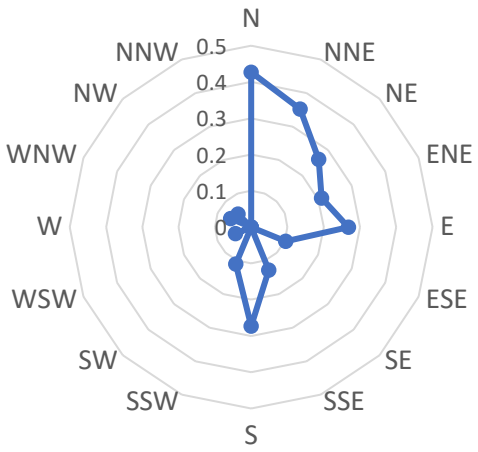
д)


N
NNE
NE
ENE
E
ESE
SE
SSE
S
SSW
SW
WSW
W
WNW
NW
NNW
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0

е)



ж)

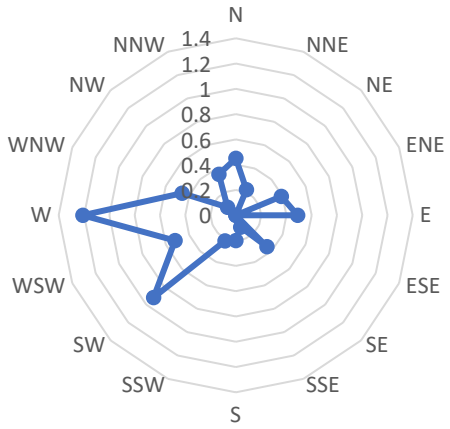


з)

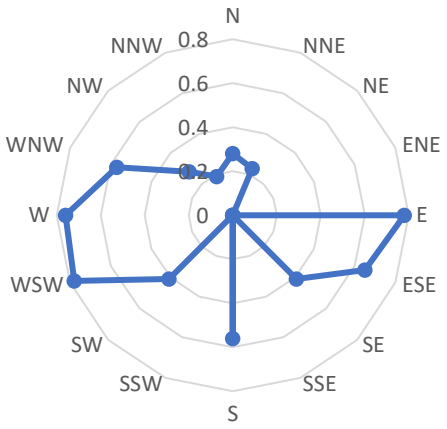
Рис. 6.17. Графіки розподілу концентрацій SO_2 згідно 16-променевої рози вітрів в м. Києві (м. Чернігівська) в період з вересня 2018 р. по квітень 2019 р.: а) вересень 2018 р.; б) жовтень – 2018 р.; в) листопад 2018 р., г) грудень 2018 р.; д) січень 2019 р.; е) лютий 2019 р.; ж) березень 2019 р.; з) квітень 2019 р.



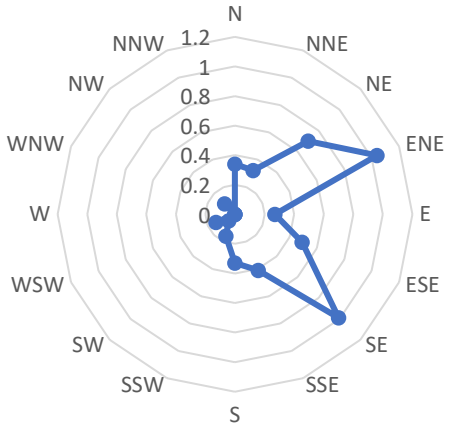
Рис. 6.18. Графік значень концентрації NO_2 в м. Києві (м. Чернігівська) в період з вересня 2018 р. по квітень 2019 р. включно


N
NNE
NE
ENE
E
ESE
SE
SSE
S
SSW
SW
WSW
W
WNW
NW
NNW
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0

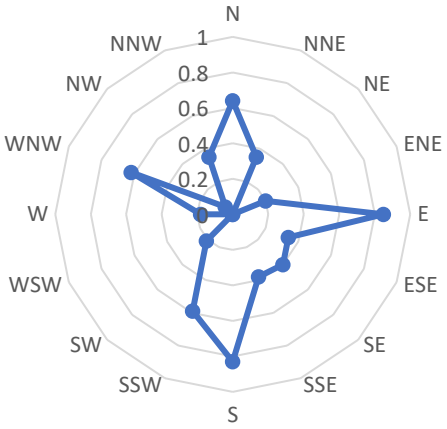
а)


N
NNE
NE
ENE
E
ESE
SE
SSE
S
SSW
SW
WSW
W
WNW
NW
NNW
0.8
0.6
0.4
0.2
0

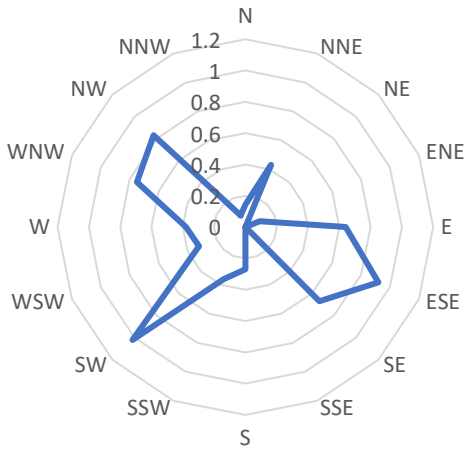
б)


N
NNE
NE
ENE
E
ESE
SE
SSE
S
SSW
SW
WSW
W
WNW
NW
NNW
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0

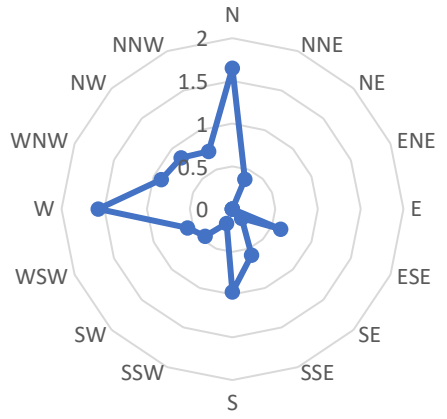
в)


N
NNE
NE
ENE
E
ESE
SE
SSE
S
SSW
SW
WSW
W
WNW
NW
NNW
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0

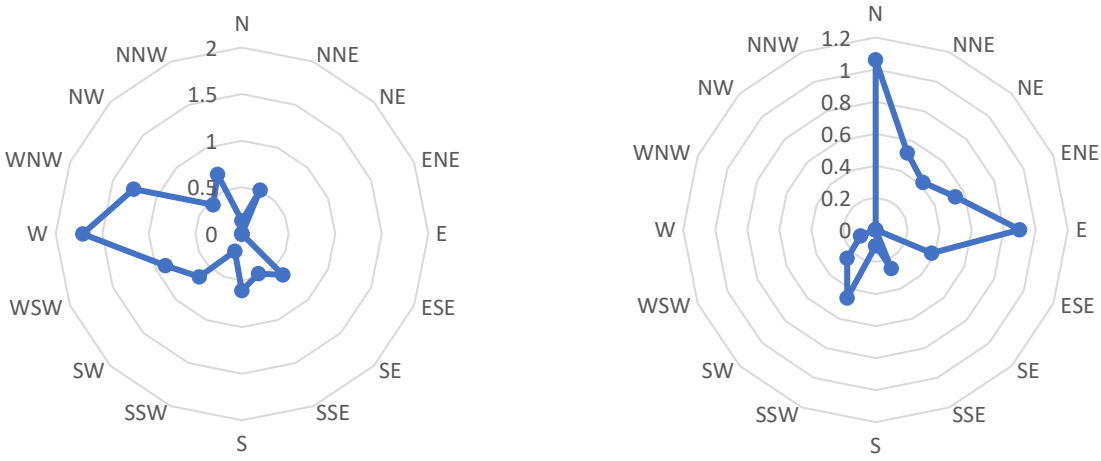
г)


N
NNE
NE
ENE
E
ESE
SE
SSE
S
SSW
SW
WSW
W
WNW
NW
NNW
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0

д)


N
NNE
NE
ENE
E
ESE
SE
SSE
S
SSW
SW
WSW
W
WNW
NW
NNW
2
1.5
1
0.5
0

е)



ж) *з*)

Рис. 6.19. Графік розподілу концентрацій NO_2 згідно 16-променевої рози вітрів в м. Києві (м. Чернігівська) в період з вересня 2018 р. по квітень 2019 р.: *а*) вересень 2018 р.; *б*) жовтень 2018 р.; *в*) листопад 2018 р., *г*) грудень 2018 р.; *д*) січень 2019 р.; *е*) лютий 2019 р.; *ж*) березень 2019 р.; *з*) квітень 2019 р.

Аналізуючи приведені вище графіки, можна стверджувати про вплив різних джерел на забруднення повітря у різні місяці розглянутого періоду часу. Потрібно відмітити про значне зростання концентрації діоксиду сірки в період з листопада 2018 р. по лютий 2019 р. згідно діапазону напрямів S-SE. Як видно з рис. 6.20 саме в цьому напрямі відносно ПС розташована Дарницька ТЕЦ, а відповідні викиди (SO_2 та NO_2) характеризуються функціонуванням об’єкту енергетики у зазначений період.

Також, як приклад локалізації джерела, на рис. 6.21 наведені дані що якісних значень AQI, отриманих з використанням даних про концентрацію мілкодисперсного пилу в повітрі на базі розробленої просторово-розгалуженої сенсорної мережі, за допомогою якої можна локалізувати джерело забруднення. На основі даних, наведених на рис. 6.21 з урахуванням даних сенсорної мережі та напряму вітру можна стверджувати про наявність джерела забруднення в північно-західному напрямі відносно м. Києва. На рис. 6.22 наведені місця розташування пожеж, що виникли на території Житомирської

та Київської областей, що вдалося локалізувати за допомогою космічних системи дистанційного зондування Землі.

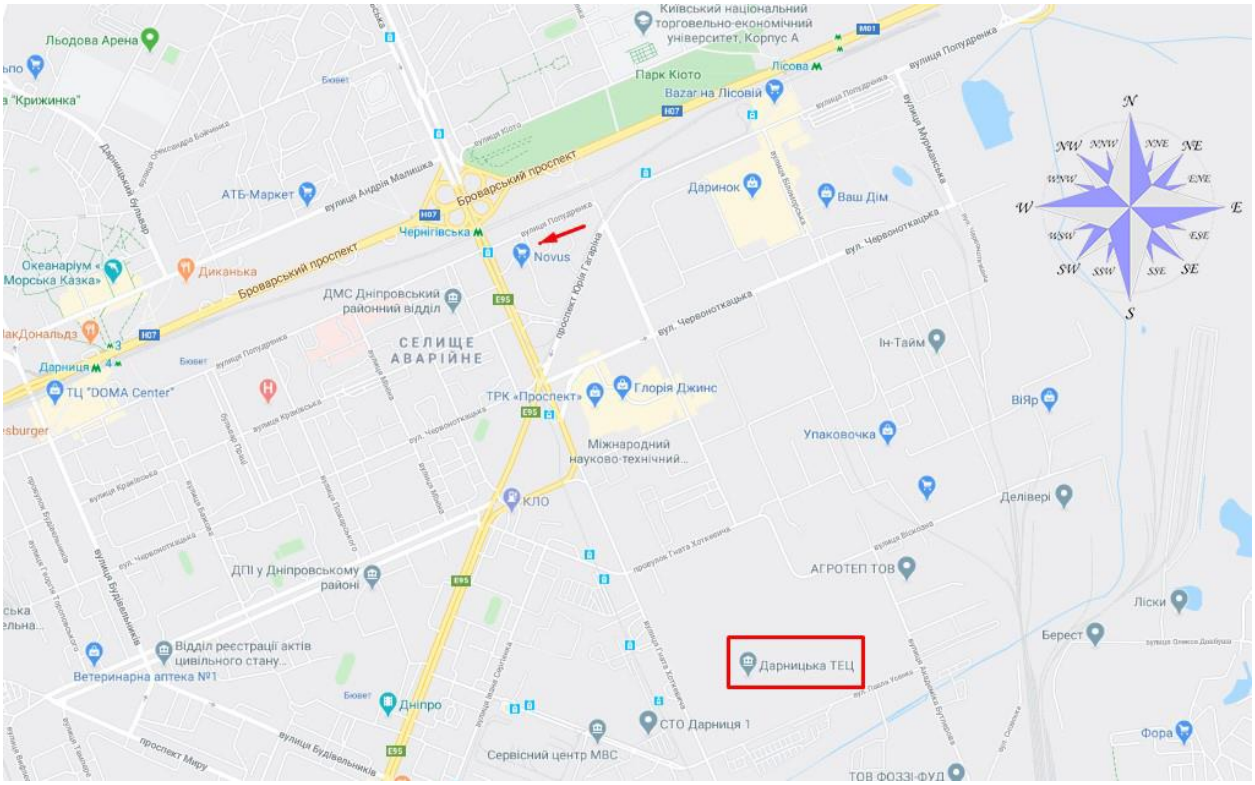


Рис. 6.20. Розташування об’єкту енергетики (Дарницька ТЕЦ) відносно ПС

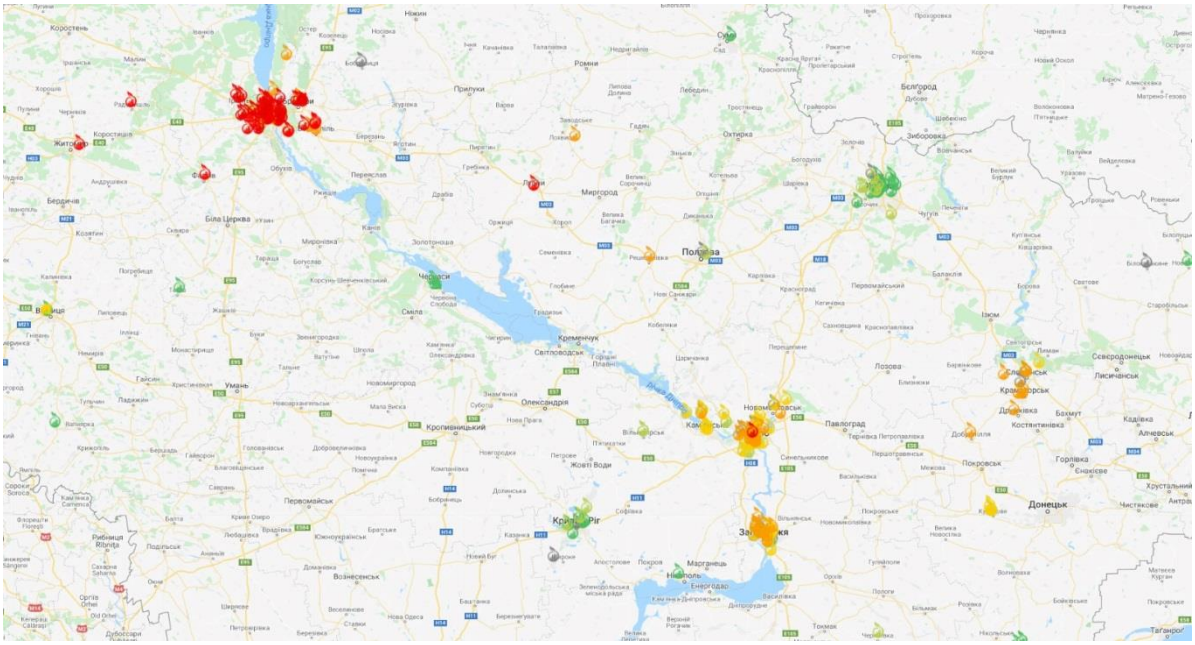


Рис. 6.21. Концентрація пилу в повітрі 17.04.2020 за даними мережі розроблених вимірювальних модулів

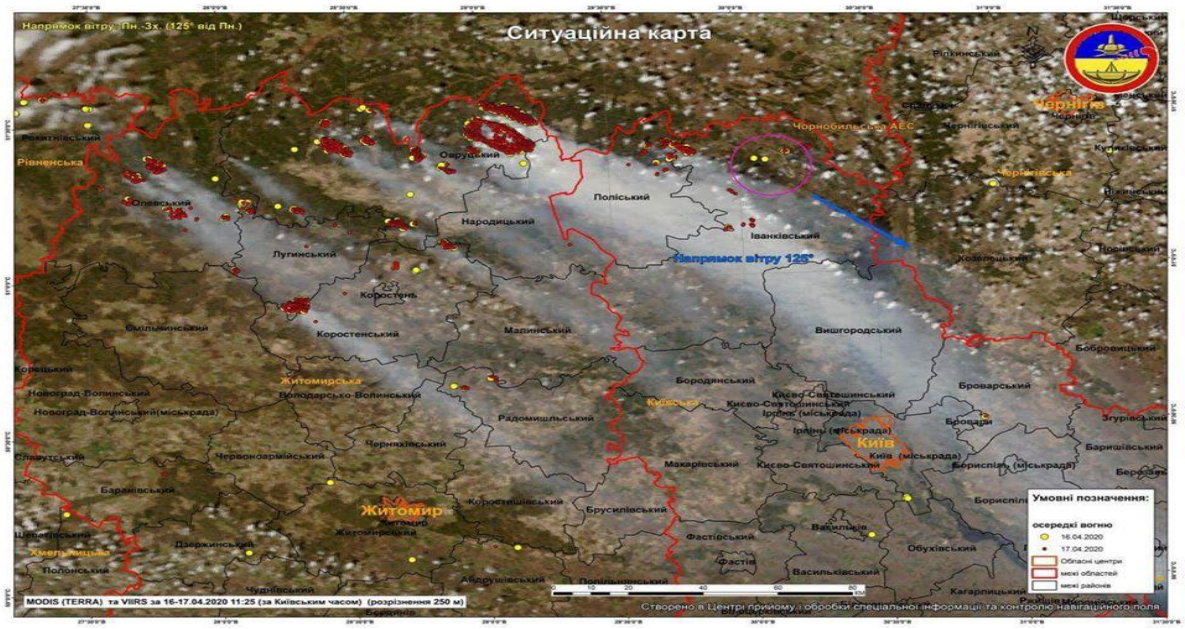


Рис. 6.22. Фото локалізації джерел забруднення, отримане за допомогою космічних систем дистанційного зондування Землі (фото Національного космічного агентства)

Проведені експериментальні дослідження показали можливість використання розробленої методології локалізації джерел забруднення повітря на основі розробленої просторово-розгалуженої сенсорної мережі.

6.4. Дослідження інформативних статистичних характеристик сенсорів мілкодисперсного пилу

Для дослідження статистичних характеристик сенсорів мілкодисперсного пилу був проведений порівняльний експеримент у польових умовах. Для експериментальних досліджень були відібрані 5 сенсорів PMS 5003 та 3 сенсори PMS 7003, що розміщувалися у вимірювальних модулях. Разом із сенсорами мілкодисперсного пилу був використаний ВАМ-пристрій, що є еталонним пристроєм для вимірювання концентрації $PM_{2,5}$ та PM_{10}.

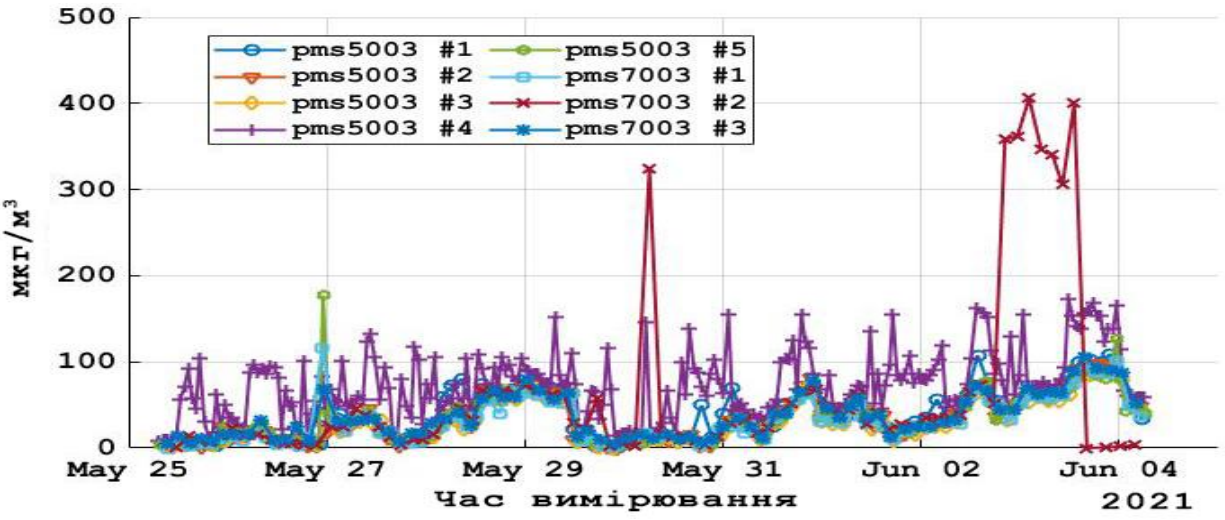
Експериментальні дослідження проводилися з 25 травня по 4 червня 2021 року. За цей період різними сенсорами згенеровано від близько 2800 до 7200 груп даних. Зведені результати щодо вимірювання концентрації мілкодисперсного пилу наведені на рис. 6.23.

Співставність результатів вимірювань перевірялась на базі оцінки коефіцієнта детермінації R^2 [574] для прямих, побудованих як апроксимуючі функції виду $y = kx + b$, що відображають враємозалежність результатів вимірювань однієї і тієї ж фракції мілкодисперсного пилу, отриманих різними сенсорами PMS 5003 та PMS 7003.

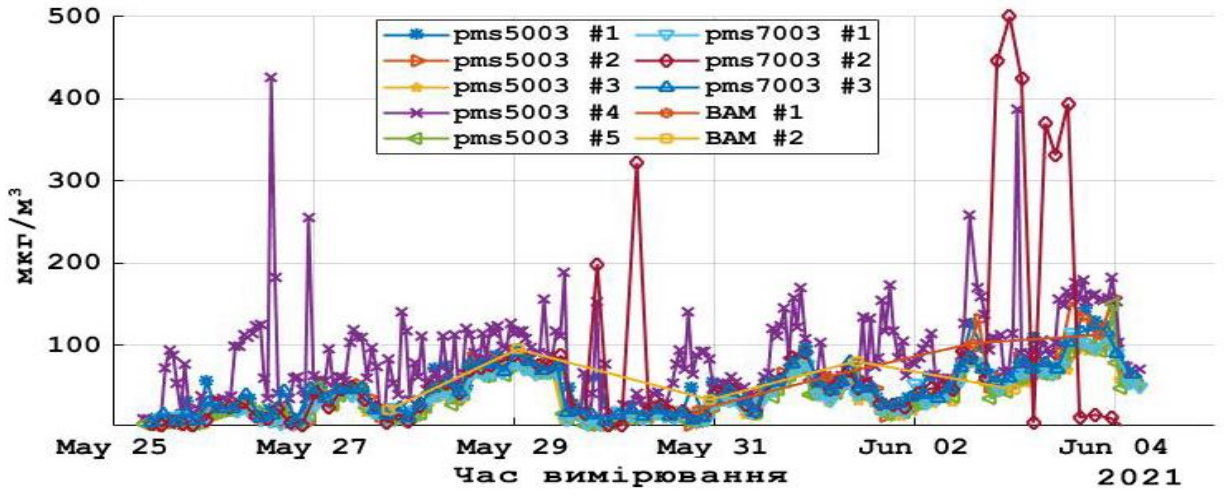
В таблиці 6.4 наведені відповідні значення R^2, розраховані для різних типів сенсорів (червоним виділено R^2<0,90).

Таблиця 6.4 – Взаємні значення коефіцієнтів детермінації сенсорів PMS 5003 та PMS 7003 при вимірюванні різних фракцій мілкодисперсного пилу

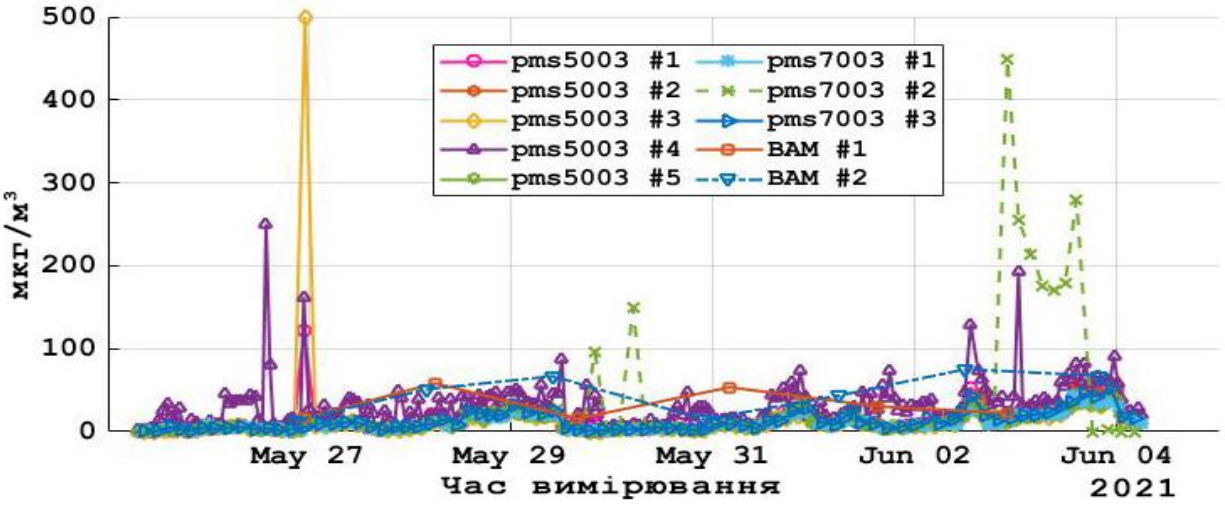
	5003 #1	5003 #2	5003 #3	5003 #4	5003 #5	7003 #1	7003 #2	7003 #3
PM_1								
5003 #1	1	0,95	0,92	0,94	0,96	0,89	0,87	0,93
5003 #2	0,95	1	0,94	0,94	0,95	0,90	0,96	0,91
5003 #3	0,92	0,94	1	0,94	0,95	0,87	0,95	0,88
5003 #4	0,94	0,94	0,94	1	0,93	0,87	0,89	0,97
5003 #5	0,96	0,95	0,95	0,93	1	0,89	0,94	0,91
7003 #1	0,89	0,90	0,87	0,87	0,89	1	0,98	0,99
7003 #2	0,87	0,96	0,95	0,89	0,94	0,98	1	0,93
7003 #3	0,93	0,91	0,88	0,97	0,91	0,99	0,93	1
$PM_{2,5}$								
5003 #1	1	0,93	0,92	0,89	0,94	0,92	0,89	0,92
5003 #2	0,93	1	0,93	0,87	0,94	0,95	0,95	0,96
5003 #3	0,92	0,93	1	0,88	0,95	0,97	0,95	0,88
5003 #4	0,89	0,87	0,88	1	0,87	0,89	0,88	0,90
5003 #5	0,94	0,94	0,95	0,87	1	0,90	0,90	0,93
7003 #1	0,92	0,95	0,97	0,89	0,90	1	0,98	0,99
7003 #2	0,89	0,95	0,95	0,88	0,90	0,98	1	0,90
7003 #3	0,92	0,96	0,88	0,90	0,93	0,99	0,90	1
PM_{10}								
5003 #1	1	0,98	0,97	0,89	0,95	0,93	0,94	0,94
5003 #2	0,98	1	0,90	0,92	0,95	0,93	0,93	0,92
5003 #3	0,97	0,90	1	0,93	0,95	0,97	0,95	0,91
5003 #4	0,89	0,92	0,93	1	0,90	0,89	0,88	0,90
5003 #5	0,95	0,95	0,95	0,90	1	0,91	0,88	0,94
7003 #1	0,93	0,93	0,97	0,89	0,91	1	0,99	0,99
7003 #2	0,94	0,93	0,95	0,88	0,88	0,99	1	0,91
7003 #3	0,94	0,92	0,91	0,90	0,94	0,99	0,91	1



а)



б)



в)

Рис. 6.23. Результати експериментальних досліджень вимірювання концентрації мілкодисперсного пилу в повітрі: *а*) PM_1; *б*) $PM_{2.5}$; *в*) PM_{10}

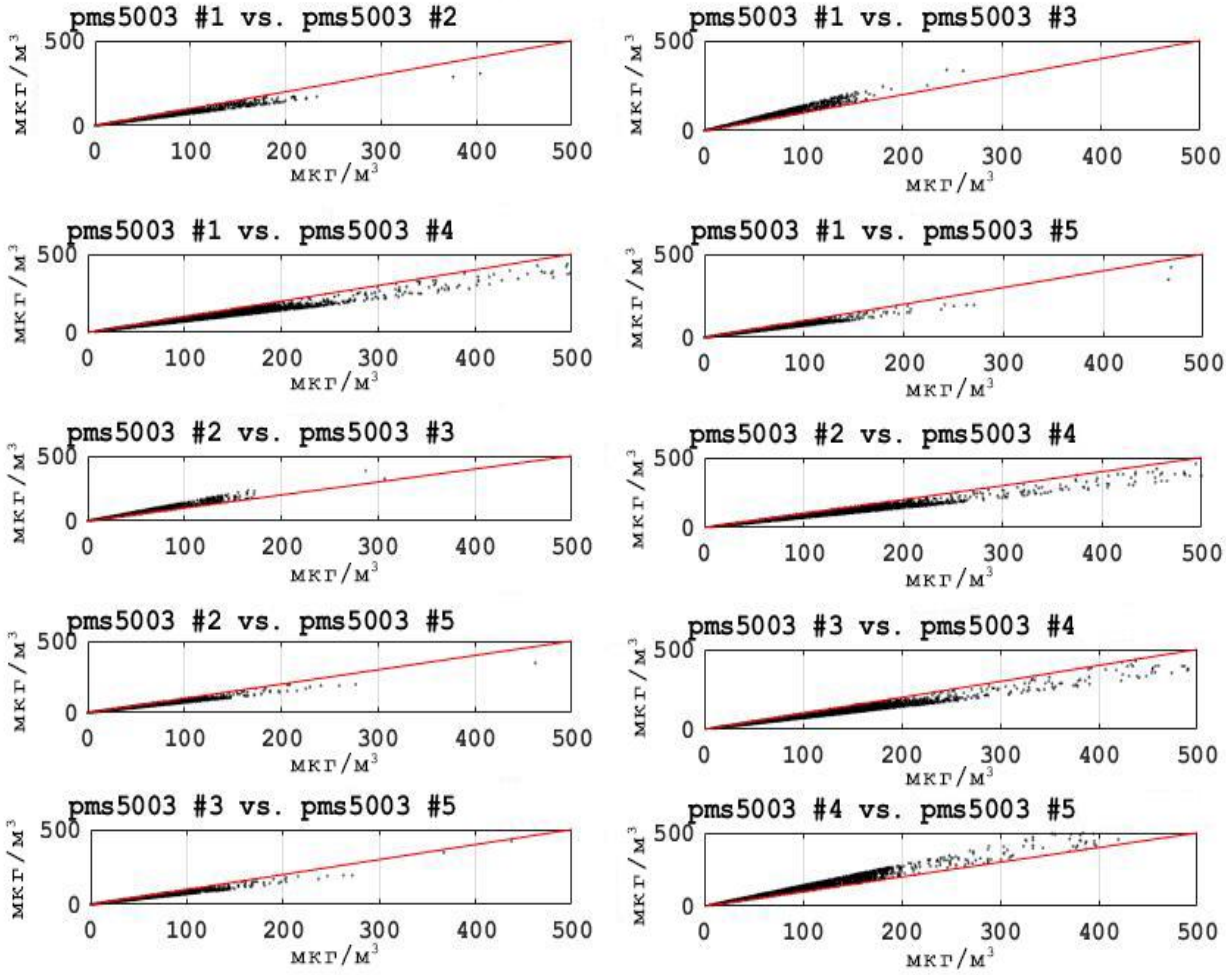
На рис. 6.24 наведені відповідні графіки, що відображають взаємозалежність результатів вимірювань різних сенсорів PMS 5003 при вимірюванні концентрації мілкодисперсного пилу $PM_{2,5}$. Інші взаємозалежнсоті результатів вимірювань відображені в Додатку И.

Таким чином, отримані наступні діапазони значень R^2: для фракції пилу до 1 мкм – від 0,92 до 0,96 для сенсорів PMS 5003 та від 0,93 до 0,99 для сенсорів PMS 7003; для фракції пилу до 2,5 мкм – від 0,87 до 0,95 для сенсорів PMS 5003, та від 0,9 до 0,99 – для сенсорів PMS 7003; для фракції пилу до 10 мкм – від 0,89 до 0,99 для сенсорів PMS 5003, та від 0,91 до 0,99 – для сенсорів PMS 7003, що характеризує ці сенсори значним рівнем збіжності даних. Як видно з таблиці 6.4 видно, кількість порівняно менших значень коефіцієнта детермінації (R^2<0,90) спостерігається для сенсора PMS 7003 #1 (4 – при вимірюванні PM_1) та для сенсора PMS 5003 #4 (6 – при вимірюванні $PM_{2,5}$ та 3 – при вимірюванні PM_{10}), що може свідчити про несправність цих сенсорів.

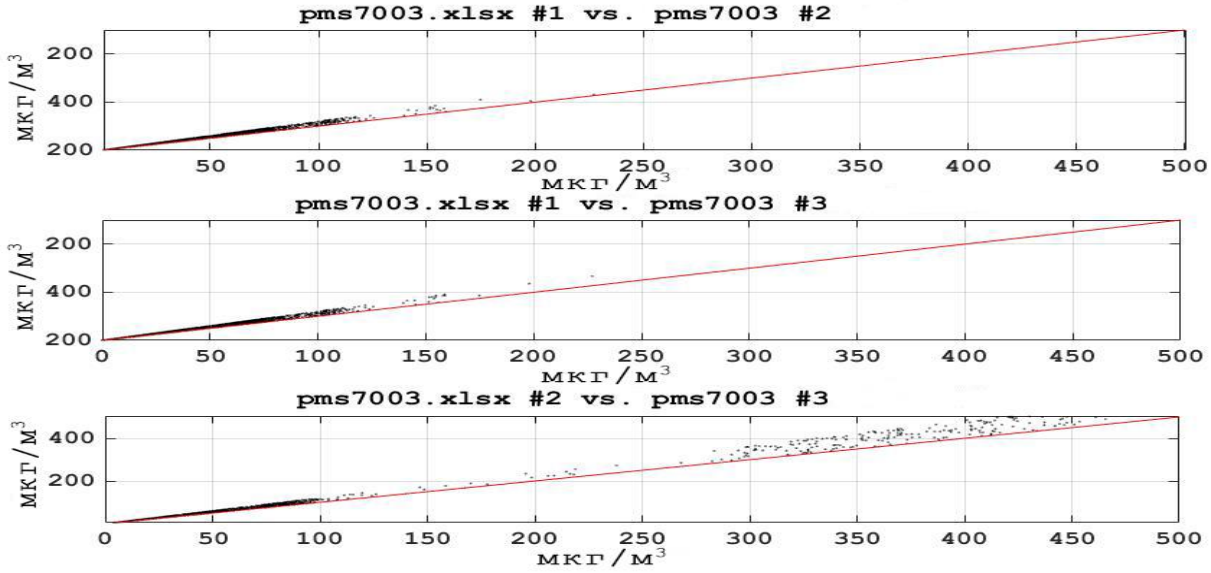
Таким чином, коефіцієнт детермінації R^2 може бути статистичною характеристикою для виявлення несправних чи сильно запилених сенсорів. Ще однієї із інформативних статистичних характеристик є розмах (R). Розмах характеризує різницю між найбільшим та найменшим значенням вибірки. Його очевидними перевагами є наочність, простота розрахунку та інтуїтивна зрозумілість. До недоліків можна віднести нестійкість до викидів та відсутність інформації про розподіл результатів.

На рис. 6.25 та 6.26 наведені значення R при вимірюванні $PM_{2.5}$ та PM_{10} для різних груп сенсорів. Як видно на рис. 6.25*б* та 6.26*б*, наявність сенсора PMS 5003#4 значно збільшує значення R, що додатково інформує про несправність цього сенсора.

Важливою інформативною статистичною характеристикою щодо оцінювання технічного стану сенсору може бути коефіцієнт варіації C_v, що визначається як відношення СКВ до відповідного середнього значення. На рис. 6.27 та 6.28 наведені значення коефіцієнта варіації C_v при вимірюваннях $PM_{2.5}$ та PM_{10}, що проводилася на базі сенсорів PMS 5003 та PMS 7003.

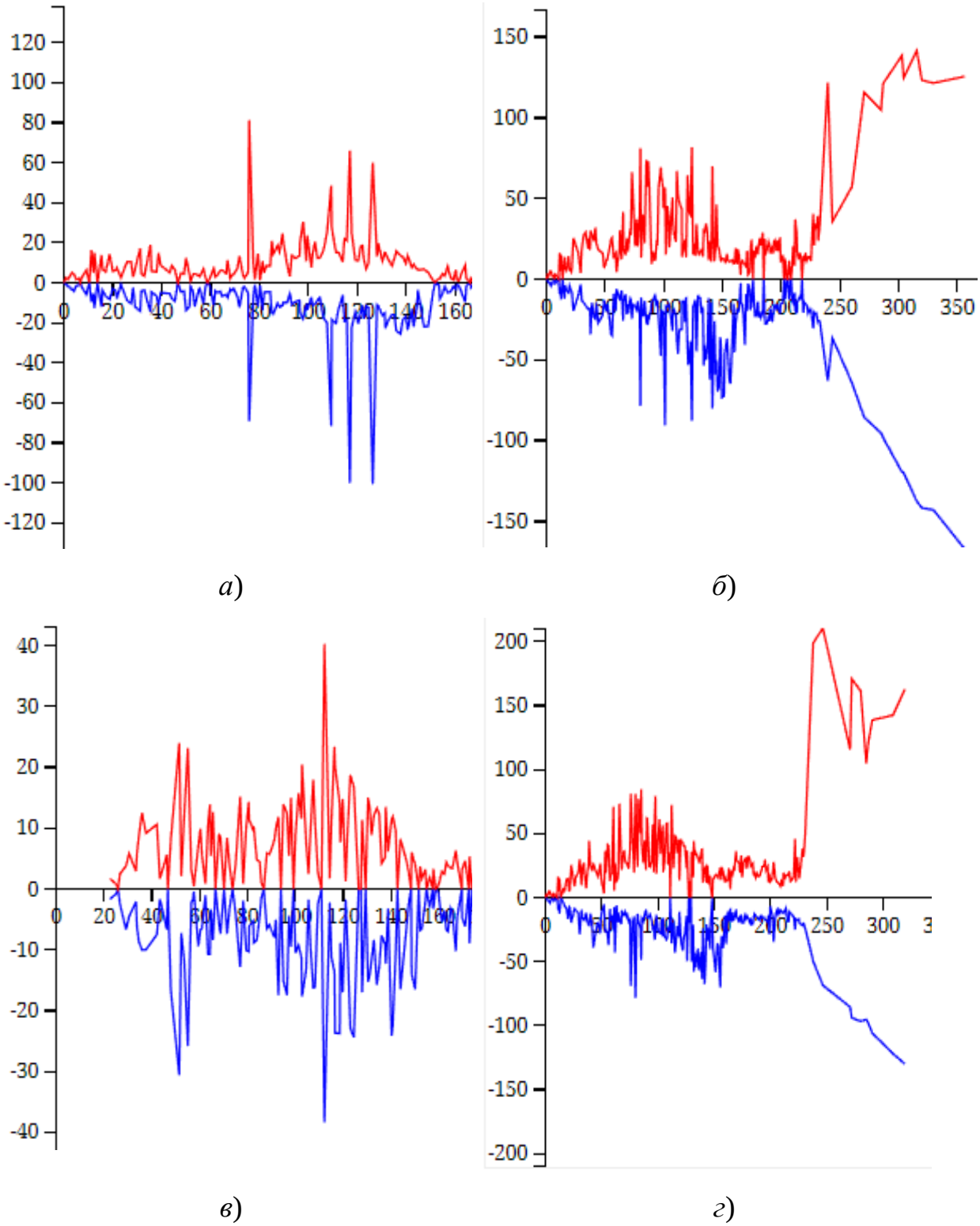


а)



б)

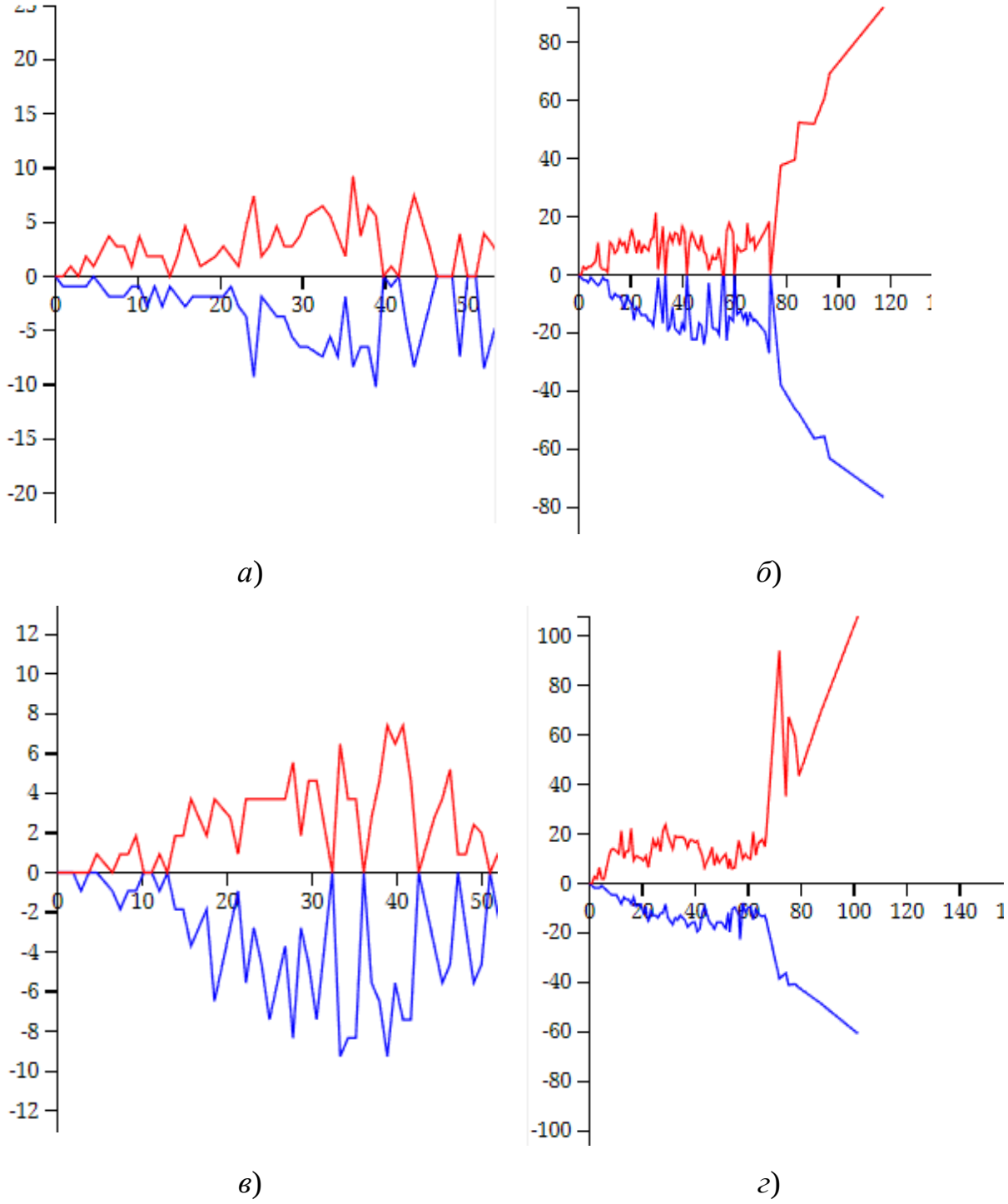
Рис. 6.24. Взаємозалежності результатів вимірювання концентрації $PM_{2,5}$ різними сенсорами типу: *а*) PMS 5003; *б*) PMS 7003



а) *б*)

в) *г*)

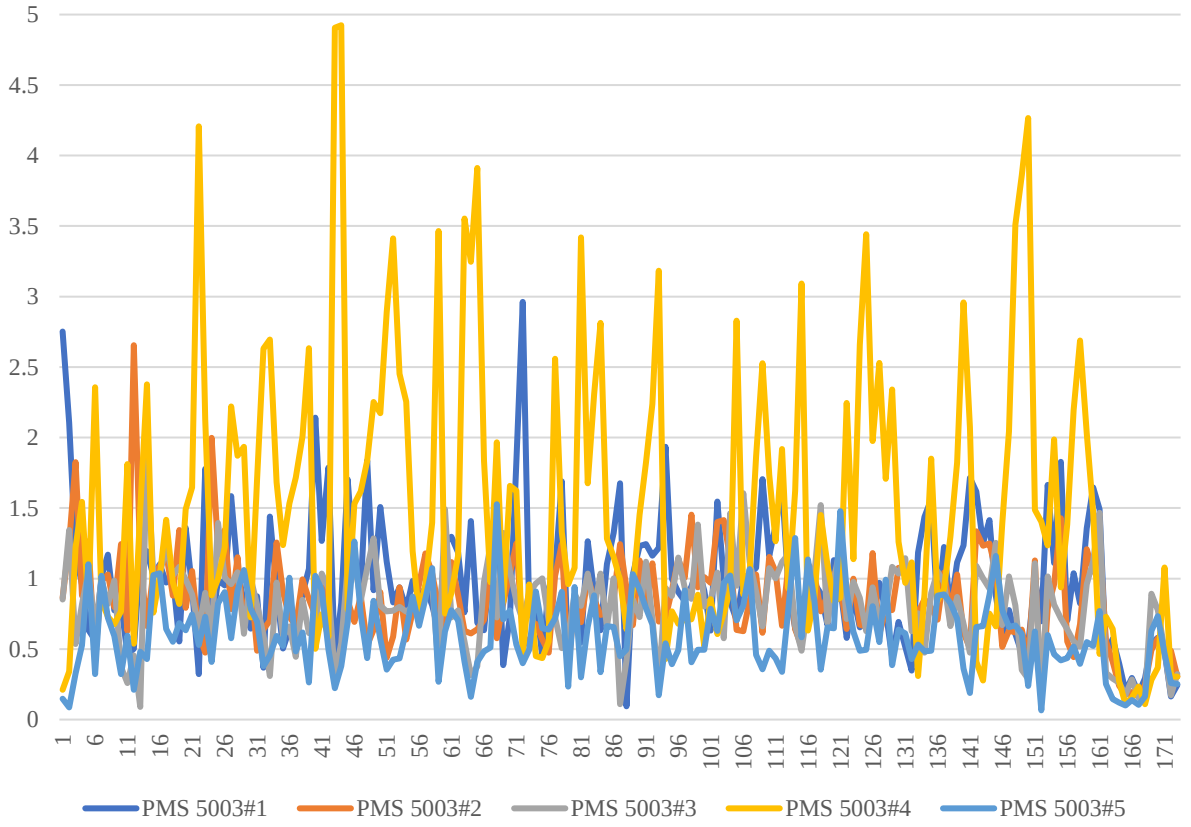
Рис. 6.25. Значення розмаху (*R*) при вимірюванні $PM_{2.5}$ для різних груп сенсорів: *а*) PMS 5003 (#1,2,3); *б*) PMS 5003 (#1,2,3,4), *в*) PMS 7003 (#1,2,3); *г*) PMS 5003 (#1,2,3,4) та PMS 7003 (#1,2,3)



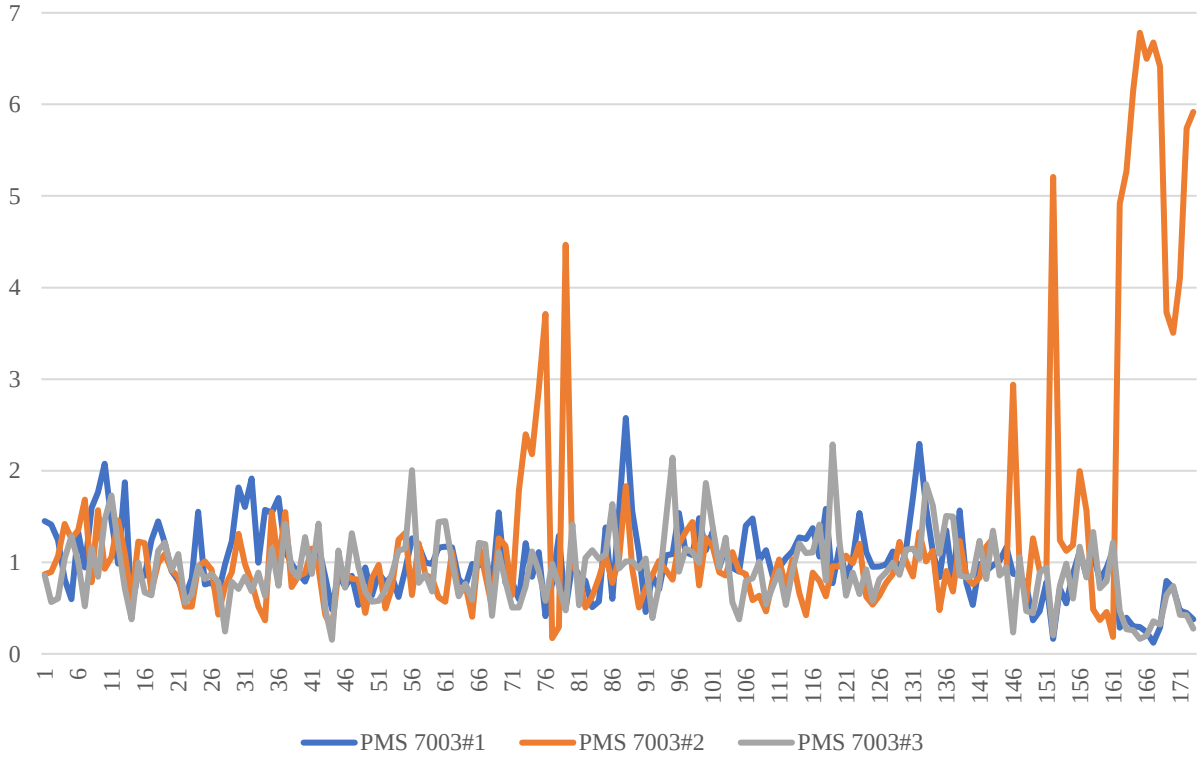
а) *б*)

в) *г*)

Рис. 6.26. Значення розмаху (*R*) при вимірюванні PM_{10} для різних груп сенсорів: *а*) PMS 5003 (#1,2,3); *б*) PMS 5003 (#1,2,3,4), *в*) PMS 7003 (#1,2,3); *г*) PMS 5003 (#1,2,3,4) та PMS 7003 (#1,2,3)

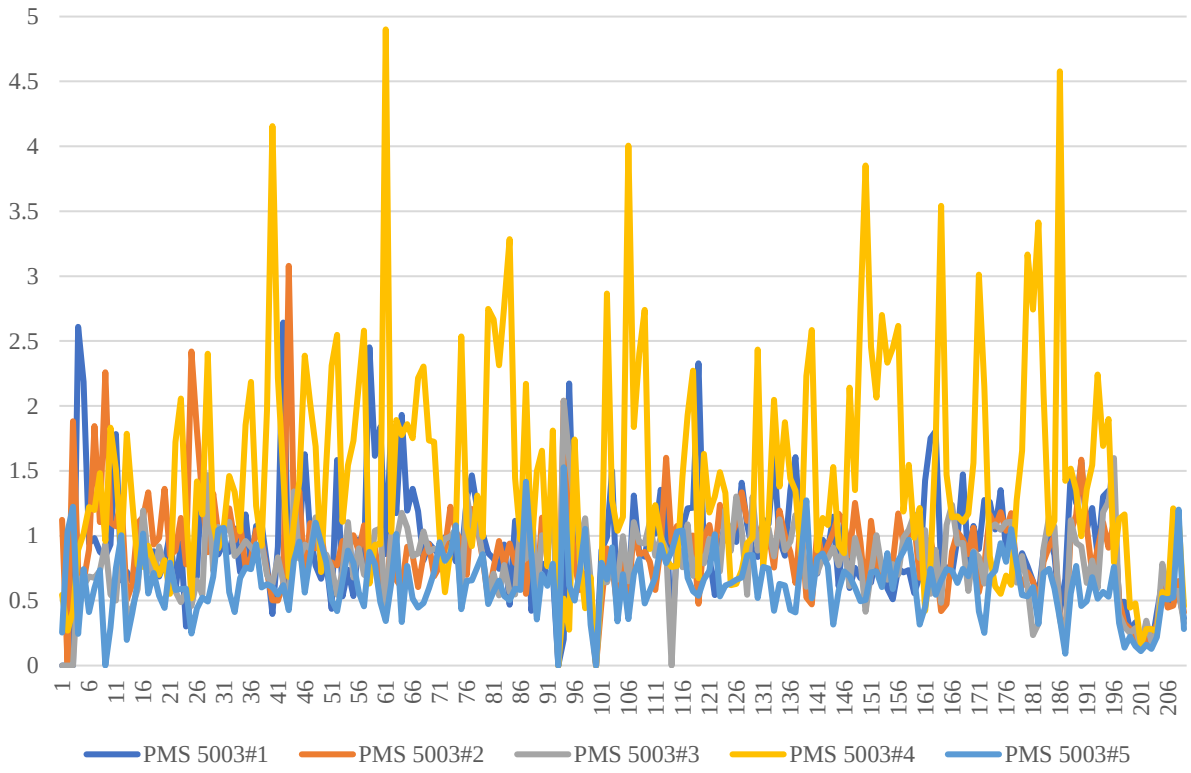


а)

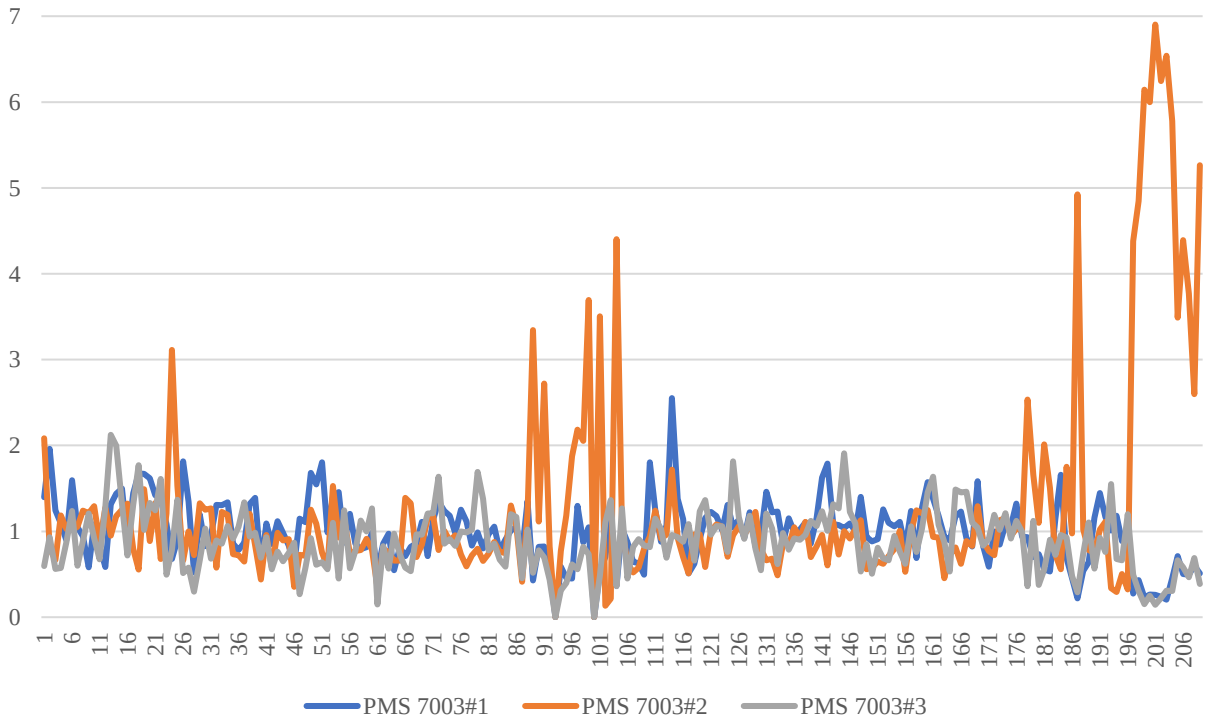


б)

Рис. 6.27. Значення коефіцієнта варіації (C_v) при вимірюванні $PM_{2.5}$ для різних груп сенсорів: *а*) сенсори PMS 5003; б) сенсори PMS 7003



а)



б)

Рис. 6.28. Значення коефіцієнта варіації (C_v) при вимірюванні PM_{10} для різних груп сенсорів: *а*) сенсори PMS 5003; *б*) сенсори PMS 7003

Як видно з рис. 6.27*а* та 6.28*а*, графіки значень коефіцієнта варіації C_v для сенсора PMS 5003#4 значно перевищують інші, при цьому на рис. 6.27*б* та 6.28*б* це саме спостерігається для сенсора PMS7003#2.

З експериментальних результатів можна зробити висновок, що значення коефіцієнта варіації C_v більше ніж 300% інформує про несправність сенсора. Такий сенсор потребує заміни чи очищення. Знаходження значення коефіцієнта варіації в межах від 200% до 300% потребує підвищеної уваги оператора системи контролю до цього сенсора.

Таким чином, згідно наведених 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.

6.5. Побудова градуювальних характеристик сенсорів мілкодисперсного пилу за допомогою ВАМ-пристрою

Як зазначалося вище, ВАМ-пристрій використовується як еталонний пристрій для вимірювання значень концентрацій $PM_{2,5}$ та PM_{10}, схематичне зображення якого наведено на рис. 6.29.

Його особливістю є те, що він визначає усереднені значення концентрації мілкодисперсного пилу (годинні, добові). Протягом періоду усереднення ВАМ-пристрій відбирає проби повітря, при цьому час відбору проб є змінним. Тому залишалось невідомим, які саме характеристики із вибірки даних, отриманих від low-cost сенсора, використовувати для градуювання, оскільки такий сенсор протягом години здатний провести до 60 вимірювань. Як видно з рис. 6.23*б*,*в*, в ході з експериментальних досліджень сенсорів PMS 5003 та PMS 7003 для вимірювання концентрації мілкодисперсного пилу $PM_{2,5}$ та PM_{10} використовувався також ВАМ-пристрій. За допомогою нього вдалось отримати 173 значень концентрацій $PM_{2,5}$ та 209 значень концентрація PM_{10}, усереднених погодинно.

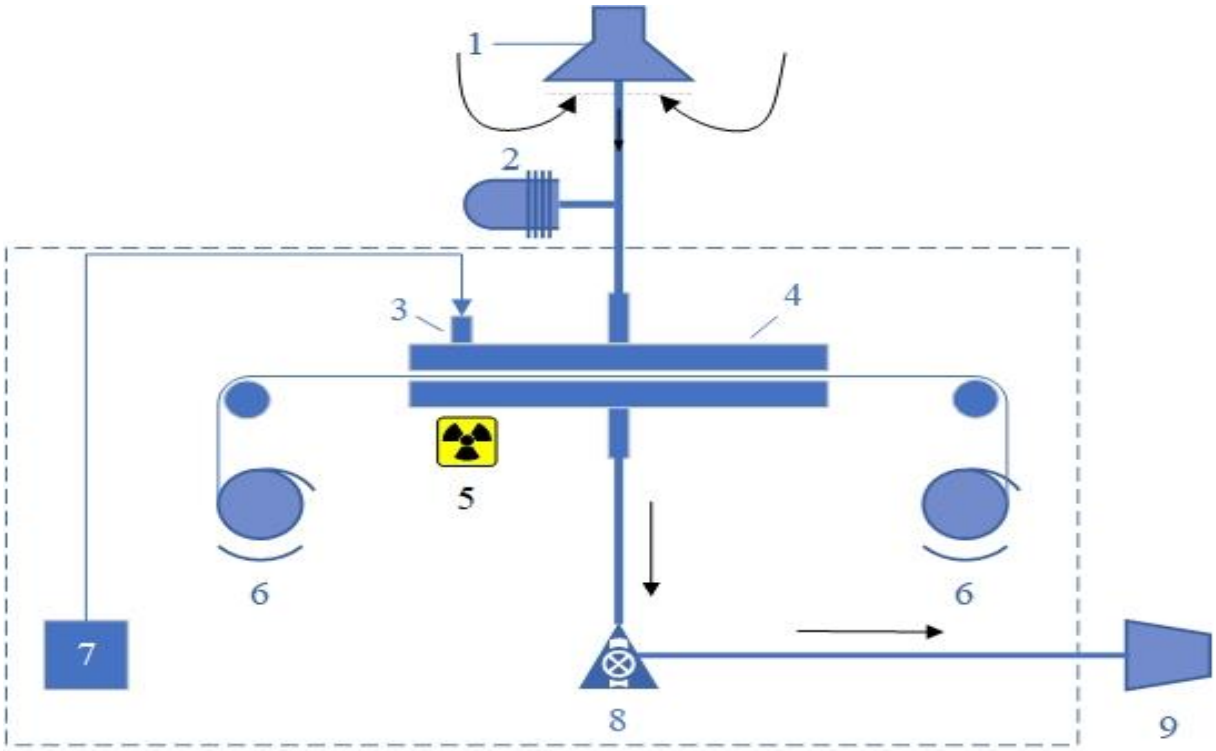


Рис. 6.29. Схематична конструкція ВАМ-пристрою: 1 – вхідний отвір; 2 – труба нагрівання; 3 – лічильник Гейгера-Мюллера; 4 – корпус фільтра; 5 – джерело β-випромінювання; 6 – фільтрувальна стрічка; 7 – мікропроцесор; 8 – регулятор потоку; 9 – вакуумний насос

Для встановлення інформативних параметрів, що будуть використовуватися для побудови градуювальних характеристик, отримані групи даних від low-cost сенсорів були оброблені, та встановлені максимальні, мінімальні та середні значення вибірок погодинно від кожного сенсора, а також відповідні СКВ.

Для вибору градуювальної характеристики виду $y = kx + b$ був проведений регресійний аналіз експериментальних даних та були сформовані відповідні лінійні залежності еталонних вимірювань (усереднені значення ВАМ-пристрою) від відповідних значень погодинних вибірок, отриманих за допомогою low-cost сенсорів (мінімального, мінімального, середнього та СКВ). На рис. 6.30 наведені відповідні залежності еталонних вимірювань $PM_{2,5}$ від деяких значень вибірок експериментальних даних для сенсору PMS

5003#1. В додатку К наведені відповідно ще 15 наборів графіків, що відображають залежності еталонних вимірювань $PM_{2,5}$ та PM_{10} від деяких експериментальних значень для сенсорів PMS 5003 та PMS 7003. Таким чином, було сформовано 64 лінійні регресії, коефіцієнти якої наведено в таблиці 6.5, що можуть бути використані для градуювання відповідних low-cost сенсорів.

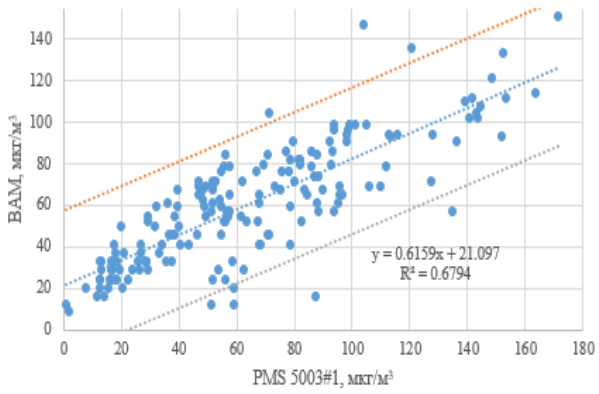
На рис. 6.30 та у додатку К також наведені значення залежності еталонних вимірювань від значень дисперсії відповідних вибірок, отриманих на базі сенсорів вимірювальних модулів, проте їх значення коефіцієнта детермінації R^2 порівняно низькі, що не дозволяє використовувати ці регресії для градуювання сенсорів.

Також було проведено оцінювання статистичних характеристик отриманих регресійних моделей, а саме коефіцієнтів детермінації R^2, коефіцієнтів кореляції r, та достовірності результатів контролю K (таблиця 6.6). Достовірність контролю, що здійснюється з використанням розроблених модулів, оцінювалась як відносний показник попадання результату контролю в довірчий інтервал значень, розрахованих за регресією. Довірчий інтервал характеризує розширену невизначеність, що розраховувалася за формулою (3.29).

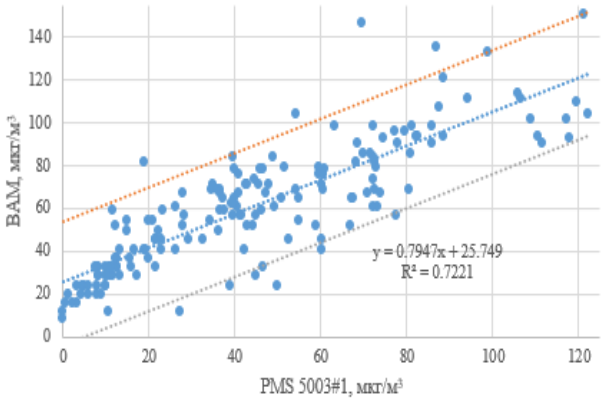
В табл. 6.6 зеленим кольором виділені максимальні значення відповідних коефіцієнтів кореляції r серед значень, що характеризують вибірки максимального, мінімального та середнього значень.

Для значень вибірок, що характеризують СКВ, таке порівняння не проводилось, оскільки вони відображають порівняно низькі результати статистичних показників.

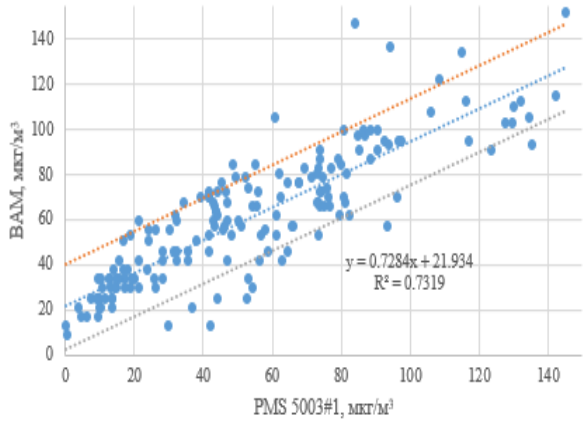
Як видно з табл. 6.6 найбільшу кількість максимальних значень коефіцієнта кореляції r отримано для вибірок, що характеризують мінімальне (11) та середнє значення (8). Таким чином, для градуювання low-cost сенсорів мілкодисперсного пилу можуть використовуватися мінімальні та середні значення погодинних вибірок.



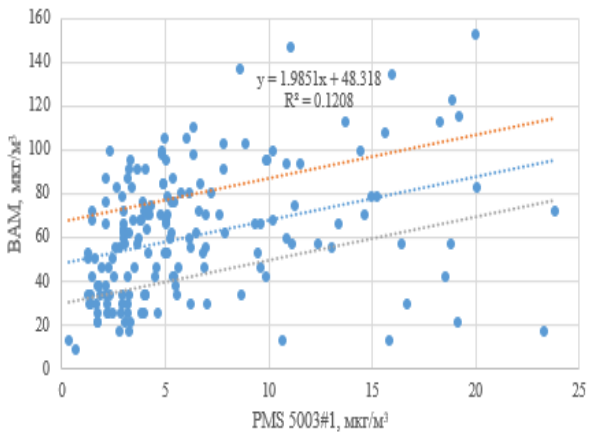
(а)



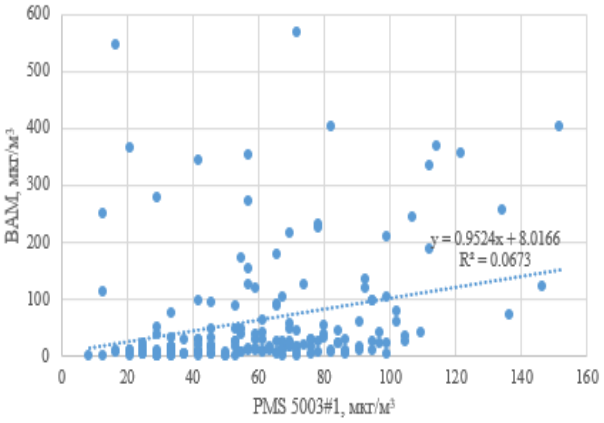
(б)



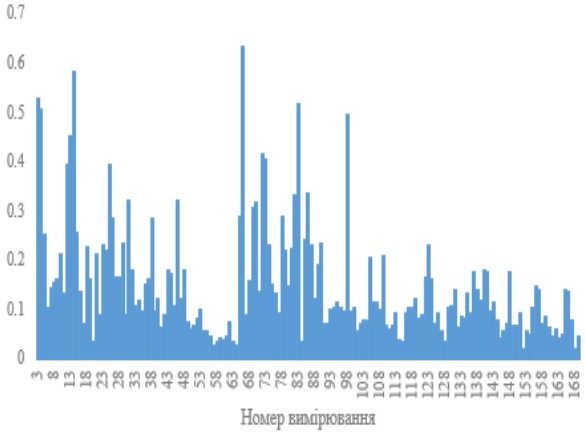
(в)



(г)



(д)



(е)

Рис. 6.30. Залежності еталонних вимірювань $PM_{2,5}$ від деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 5003#1 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – СКВ, д – дисперсії) та значення коефіцієнта варіації (е)

Таблиця 6.5 – Коефіцієнти отриманих лінійних регресій виду $y=kx+b$ для градуювання сенсорів з використанням ВАМ-пристрою

	$PM_{2.5}$								PM_{10}							
	Макс		Мін		Сер		СКВ		Макс		Мін		Сер		СКВ	
	k	*b*	*k*	*b*	*k*	*b*	*k*	*b*	*k*	*b*	*k*	*b*	*k*	*b*	*k*	*b*
PMS5003#1	1,09	21,42	1,61	23,30	1,32	22,24	4,41	31,99	1,09	21,42	1,61	23,30	1,32	22,24	4,41	31,99
PMS5003#2	0,68	22,18	0,79	27,62	0,74	24,43	4,06	42,18	1,18	22,54	1,55	24,73	1,38	23,24	7,24	29,76
PMS5003#3	0,85	21,75	0,98	27,29	0,93	24,02	3,75	46,24	1,62	22,19	2,20	23,77	1,91	22,72	8,49	31,30
PMS5003#4	0,10	46,98	0,63	21,60	0,49	17,00	-0,37	67,79	0,04	39,56	1,08	22,19	0,47	27,26	-0,33	45,30
PMS5003#5	0,89	18,54	0,96	25,14	0,95	21,00	2,51	52,77	1,76	20,79	2,22	22,76	2,00	21,54	9,55	32,62
PMS7003#1	0,85	17,79	0,97	26,71	0,88	23,14	3,04	46,28	1,53	20,67	2,05	24,08	1,67	22,90	7,86	29,27
PMS7003#2	0,69	28,00	1,03	22,16	0,73	32,18	1,09	55,76	0,02	40,88	0,11	39,36	0,07	39,80	-0,07	42,55
PMS7003#3	0,79	15,13	0,89	23,85	0,83	19,47	2,34	48,34	1,37	19,13	1,75	22,83	1,57	20,45	6,83	29,30

Таблиця 6.6 – Оцінювання статистичних характеристик регресійних моделей

	R^2_{max}	r_{max}	K_{max}, %	R^2_{min}	r_{min}	K_{min}, %	R^2_{av}	r_{av}	K_{av}, %	R^2_S	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

6.6. Перспективи розвитку систем контролю забруднення повітря об’єктами енергетики

Забезпечення повних та своєчасних даних про стан забруднення повітря є важливою задачею не тільки в масштабах окремих міст чи територій, але і для окремих країн чи міждержавних об’єднань. Саме на такому рівні вдається впроваджувати нові методи та технології контролю забруднення повітря, реалізація яких є занадто дорогою для окремих підприємств чи громад. Одним із перспективних методів контролю забруднення повітря є дистанційне зондування Землі, що проводиться за допомогою сенсорів, розміщених на різних платформах (літальних апаратах чи супутниках). Порівняння площ, що охоплюються різними платформами, наведено на рис. 6.31.

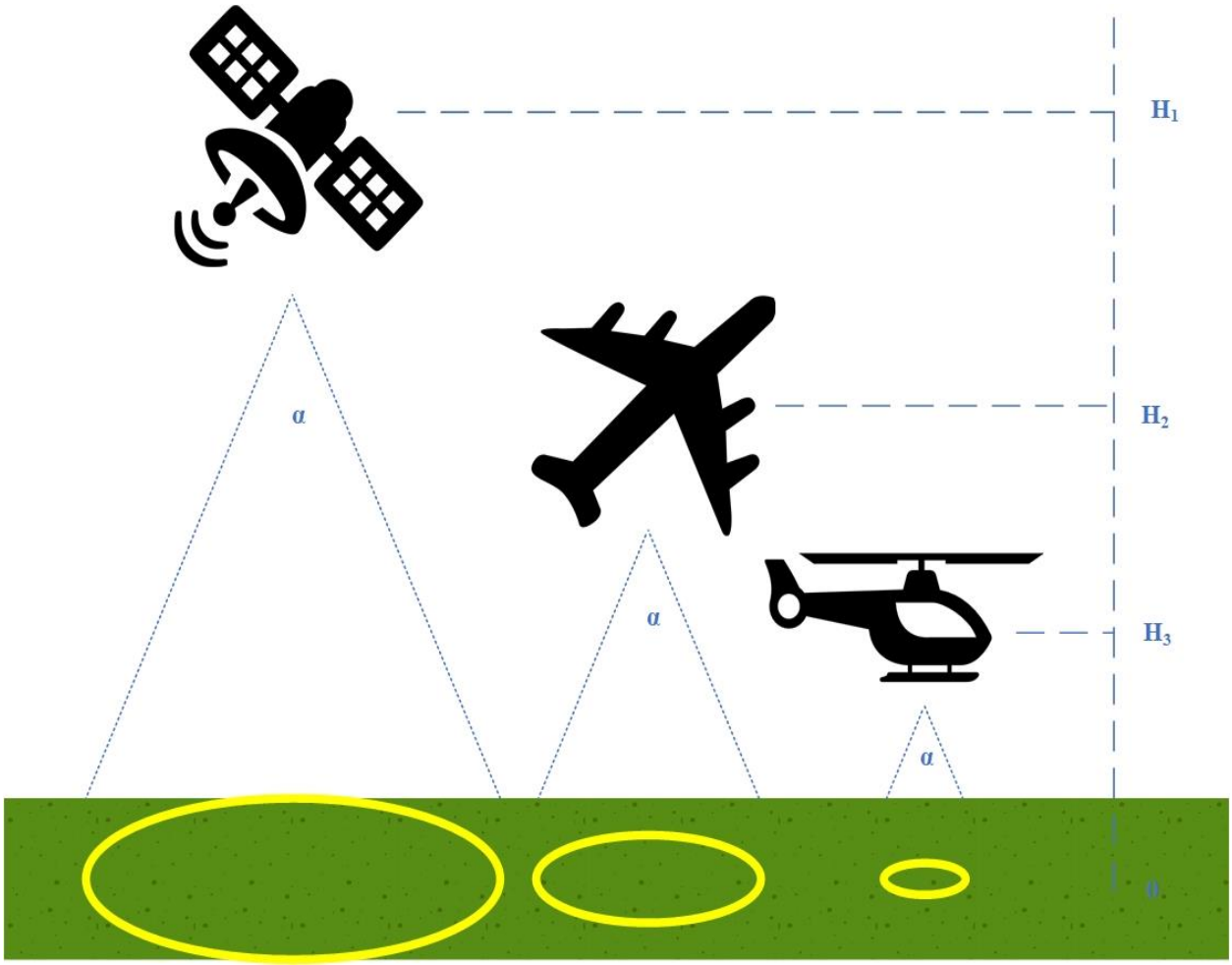


Рис. 6.31. Схематичне порівняння площ зондування, що охоплюються за допомогою платформ, розміщених на різних висотах ($H_1>H_2>H_3$) при α=const

Як видно з рис. 6.31, використання супутників на геостаціонарній орбіті як платформ для дистанційного зондування Землі є більш ефективним відносно площі поверхні, що контролюється.

Використання дистанційного зондування Землі дає можливість контролювати забруднення повітря в місцях, де відсутні стаціонарні пости спостереження. За допомогою даних дистанційного контролю можна з високою точністю передбачати поширення полів забруднюючих речовин на порівняно значних проміжках часу.

Дистанційний контроль забруднення повітря проводиться за допомогою оптичних сенсорів, що працюють в ультрафіолетовій та інфрачервоній областях спектру. На теперішній час різними технічними засобами (IASI, SEVIRI, GOME-2) проводиться контроль за такими речовинами як мілкодисперсний пил різних фракцій, O_3, CO, CO_2, NO_2, SO_2, CH_4. Як платформи для дистанційного контролю використовувалася і на теперішній час діє значна кількість супутників: серія Meteosat, серія Metop, серія Sentinel. Наразі в межах програми Copernicus в ЄС для контролю забруднення повітря використовуються дані, що надходять від супутника Sentinel-5P.

Дані, отримані за допомогою дистанційного зондування, дозволяють розширити розуміння розповсюдження полів різних забруднювачів, що неможливо на базі стаціонарних ПС, що охоплюють порівняно малі площі. Завдяки розширеному просторовому охопленню, дані дистанційного зондування можуть бути також використані для виявлення джерел забруднення повітря, тенденцій забруднення навколишнього середовища та впливу забруднення на здоров’я населення у міждержавному, міжрегіональному та міжконтинентальному вимірах.

Ще одним перспективним напрямом розвитку систем контролю забруднення повітря об’єктами енергетики є застосування методів спектрального аналізу для дослідження якісного складу викидів. Застосування цих методів обґрунтовано тим, що кожна речовина-забруднювач, що міститься

у викидах, має власну спектральну характеристику, що може бути зафіксована спеціалізованими пристроями – спектрометрами.

Методи спектрального аналізу характеризуються наступними параметрами:

- концентраційна чутливість (знаходиться в межах 0,01 ppb…0,1 ppm, що дозволяє виявляти навіть незначну кількість певних забруднювачів);
- точність (~3% при дослідженні одного забруднювача, та 10…20% при одночасному дослідженні декількох речовин);
- швидкодія (в залежності від методу та інструментарію може знаходитися в межах 0,1 с…30 хв);
- селективність (методи спектрального аналізу слабо чутливі до наявності великих концентрацій азоту, кисню та діоксиду вуглецю, тому це дозволяє виявляти різні забруднювачі в режимі реального часу без забезпечення лабораторних умов).

Методи спектрального аналізу дозволяють виявляти не тільки концентрації газоподібних речовин, але й твердих домішок. Загалом методи спектрального аналізу дозволяють визначити значний спектр речовин у повітрі, що продукуються енергоємними підприємствами, в т.ч. об'єктами енергетики: сполуки азоту (NO, NO_2, NH_3, HNO_3), сполуки сірки (SO_2, H_2S, CS_2, H_2SO_4), CO, CO_2, метали та їх сполуки (As, V, Fe, Cd, Cu, Ni, Hg, Se, Pb, Cr, Zn, Al_2O_3, Co, Mn, Be, Sb та ін), органічні аміни, неметанові леткі органічні сполуки та інші.

На даний час обмеження використання методів спектрального аналізу для контролю за станом забруднення повітря пов'язане із високою вартістю пристроїв, що їх реалізують, їх габаритами та необхідністю володіння спеціалізованими навичками. Проте вже існують мобільний клас пристроїв порівняно низької вартості (наприклад, Belec Compact Port HLC, SPECTROPORT, X-MET8000) та пристроїв, що використовують смартфони як платформу (наприклад, OHSP-350S/OHSP350SF), що дозволяють

контролювати наявність речовин, спектри яких знаходяться в межах видимого та ближнього ультрафіолетового/інфрачервоного діапазонів.

Використання розробленої системи контролю забруднення повітря разом із перспективними методами контролю (дистанційного зондування Землі та спектрального аналізу) 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.

6.7. Висновки до розділу

1. Проведені експериментальні дослідження стану забруднення повітря в м. Києві із 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 ГДК відповідних речовин в повітрі м. Києва. Проведені експериментальні дослідження показують, що існуюча система контролю забруднення повітря не відповідає сучасним вимогам щодо швидкої та інформативності. Використання морально застарілих інформативних параметрів (наприклад, ІЗА), що потребують усереднених даних за порівняно довгі періоди часу, не дозволяє визначити ступінь забруднення від певної речовини та оперативно впливати на функціонування відповідних джерел забруднення.

2. 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 ($PM_{2,5}$, PM_{10}), NO_2, CO, NH_3, O_3, CH_2O, CO_2 та рівня радіації. Отримані дані загалом характеризуються достатньо високим значенням коефіцієнта кореляції r (≥0,93) та коефіцієнтом детермінації R^2 (≥0,87). 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.

3. Проведено верифікацію методу локалізації джерела забруднення атмосферного повітря із використанням 16-ї променевої рози вітрів. В ході експерименту досліджувався розподіл концентрації SO_2 та NO_2 в повітрі поблизу Дарницької ТЕЦ в період опалювального сезону. Проведені експериментальні дослідження показали можливість використання розробленої методології локалізації джерел забруднення повітря на основі розробленої просторово-розгалуженої сенсорної мережі.

4. Проведені експериментальні дослідження щодо статистичних характеристик сенсорів мілкодисперсного пилу в польових умовах з використанням 5 сенсорів PMS 5003, 3 сенсорів PMS 7003 та BAM-пристрою як еталонного пристрою. Згідно наведених 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.

5. Для побудови градуювальних характеристик сенсорів мілкодисперсного пилу проведено регресійний аналіз даних між сенсорами

PMS 5003 та PMS 7003, і BAM-пристроєм. Встановлено, що для градуювання 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. Достовірність контролю, що здійснюється з використанням розроблених модулів, оцінювалась як відносний показник попадання результату контролю в довірчий інтервал значень розрахованих за регресією.

6. Встановлено перспективні напрями розвитку систем контролю забруднення повітря, що базуються на додатковому 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.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі сформульовано та вирішено **актуальну науково-прикладу 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 природніх 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, $PM_{2,5}$, 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 інформаційного-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, нестаціонарного 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 напряму 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_1, $PM_{2,5}$, PM_{10}), CO, CO_2, NO_2, SO_2, CH_2O, NH_3, 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 градуювання low-cost сенсорів. Встановлено, що для градуювання 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hua, Y., Oliphant, M., Hu, E. J. (2016). Development of renewable energy in Australia and China: A comparison of policies and status. *Renewable Energy*, 85, 1044-1051. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.060
2. Luong, N. D. (2015). A critical review on energy efficiency and conservation policies and programs in Vietnam. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 623-634. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.161
3. Кудря, С. О. (2015). Стан та перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні (за матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 7 жовтня 2015 р.). *Вісник Національної академії наук України*, (12), 19-26. https://doi.org/10.15407/visn2015.12.100
4. Денисюк, С. П., Таргонський, В. А. (2017). Сталий розвиток енергетики України у світових вимірах. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, (3), 7-31.
5. Lambert, J. G., Hall, C. A., Balogh, S., Gupta, A., Arnold, M. (2014). Energy, EROI and quality of life. Energy Policy, 64, 153–167. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.001
6. 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., Мартинюк, О.В., Мірошник, В.О., Попов, О.О., Сімейко, К.В., Станіціна, В.В., Танкевич, С.Є., Щокіна, В.А., Яцишин, А.В., Яцишина, Т.М. 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. https://doi.org/10.5281/zenodo.2529712
7. Черкасова, Т. І., Шишман, Н. В. (2018). Проблеми забезпечення ефективності модернізації комунальної теплоенергетики. *Бізнес-навігатор*, (2-1), 91-94.

8. Халатов, А. А. (2017). Енергетична безпека України: чи є запас міцності? *Вісник Національної академії наук України*, (9), 23-32. https://doi.org/10.15407/visn2017.09.023
9. Патон, Б. Є., Долінський, А. А., Басок, Б. І., Базєєв, Є. Т. (2012). Проект Державної цільової програми модернізації комунальної теплоенергетики на 2012–2016 роки—інноваційна основа технологічного оновлення систем теплозабезпечення населених пунктів України. *Вісник Національної академії наук України*, (9), 14-28.
10. Долінський, А. А., Басок, Б. І., Базєєв, Є. Т. (2012). Регіональні програми модернізації комунальної теплоенергетики–інноваційна основа технологічного оновлення систем теплозабезпечення населених пунктів України. Частина 1. *Промышленная теплотехника*, 34(3), 52-61.
11. Басок, Б. І., Базєєв, Є. Т., Кураєва, І. В. (2021). Адаптація комунальної теплоенергетики до змін клімату. *Вісник Національної академії наук України*, (4), 60-75. https://doi.org/10.15407/visn2021.04.060
12. Кириленко, О. В., Басок, Б. І., Базєєв, Є. Т., Блінов, І. В. (2020). Енергетика України та реалії глобального потепління. *Технічна електродинаміка*, (3), 52-61.
13. Басок, Б. І., Базєєв, Є. Т., Дубовський, С. В. (2020). Про проблему адаптації комунальної енергетики до глобального потепління (огляд). *Теплофізика та теплоенергетика*, 42(2), 48-59. https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2020.5
14. Халатов, А.А., Фіалко, Н.М., Тимченко, М.П. (2020). Енергетична безпека України: методологічні засади оцінки рівня безпеки та порівняльний аналіз поточного стану. *Теплофізика та теплоенергетика*, 42(2), 18-30. https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2020.2
15. Gattie, D. K. (2020). US energy, climate and nuclear power policy in the 21st century: The primacy of national security. *The Electricity Journal*, 33(1), 106690. https://doi.org/10.1016/j.tej.2019.106690

16. Wei, Y. M., Liang, Q. M., Wu, G., Liao, H. (2019). Effects of clean and renewable energy on national energy security. *Energy Economics*, 253–270. https://doi.org/10.1108/978-1-83867-293-520191010
17. Sabishchenko, O., Rębilas, R., Sczygiol, N., Urbański, M. (2020). Ukraine energy sector management using hybrid renewable energy systems. *Energies*, 13(7), 1776. https://doi.org/10.3390/en13071776
18. Van de Graaf, T., Colgan, J. D. (2017). Russian gas games or well-oiled conflict? Energy security and the 2014 Ukraine crisis. *Energy Research & Social Science*, 24, 59–64. https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.12.018
19. Yang, M., Cela, B., Yang, F. (2019). Innovative energy policy to transform energy systems in Ukraine. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 1–23. https://doi.org/10.1007/s11027-019-09898-x
20. Brusylovska, O. (2017). Energy safety of Ukraine: Russian factor. *Online Journal Modelling the New Europe*, (22), 139-160.
21. Rodríguez-Fernández, L., Carvajal, A. B. F., Ruiz-Gómez, L. M. (2020). Evolution of European Union's energy security in gas supply during Russia–Ukraine gas crises (2006–2009). *Energy Strategy Reviews*, 30, 100518. https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100518
22. Zaslavskyi, V., Pasichna, M. (2018). Optimization techniques for modelling energy generation portfolios in Ukraine and the EU: Comparative analysis. In *International Conference on Dependability and Complex Systems* (pp. 545-555). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91446-6_51
23. Dubrovskyi, V. V., Shraiber, O. A. (2020).World trends in the development of coal-fired thermal generation and their influence on the energy of Ukraine. The Problems of General Energy, 2(61), 11–16. https://doi.org/10.15407/pge2020.02.011
24. Nádudvari, Á., Abramowicz, A., Fabiańska, M., Misz-Kennan, M., Ciesielczuk, J. (2020). Classification of fires in coal waste dumps based on Landsat, Aster thermal bands and thermal camera in Polish and Ukrainian

mining regions. *International Journal of Coal Science & Technology*, 1–16. https://doi.org/10.1007/s40789-020-00375-4

25. Желєзна, Т.А., Драгнєв, С.В., Баштовий А.І. (2019). Можливості заготівлі агробіомаси та виробництва біопалив з неї комунальними підприємствами в Україні. *Теплофізика та теплоенергетика*, 2(41), 88-96. https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.12
26. Гелетуха, Г.Г., Желєзна, Т.А., Драгнєв, С.В., Баштовий, А.І. (2020). Основні тенденції та перспективи розвитку ринку моторних біопалив в ЄС та в Україні. *Теплофізика та теплоенергетика*, 1(42), 69-76. https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2020.8
27. Pryshliak, N., Tokarchuk, D. (2020). Socio-economic and environmental benefits of biofuel production development from agricultural waste in Ukraine. *Environmental & Socioeconomic Studies*, 8(1), 18–27. https://doi.org/10.2478/environ-2020-0003
28. Yemelyanov, O., Symak, A., Petrushka, T., Zahoretska, O.,Kusiy, M., Lesyk, R., Lesyk, L. (2019). Changes in energy consumption, economic growth and aspirations for energy independence: Sectoral analysis of uses of natural gas in Ukrainian economy. *Energies*, 12(24), 4724. https://doi.org/10.3390/en12244724
29. Yakovenko, K., Mišík, M. (2020). Cooperation and security: Examining the political discourse on natural gas transit in Ukraine and Slovakia. *Energies*, 13(22), 5969. https://doi.org/10.3390/en13225969
30. Bilan, T. R., Makarov, V. M., Kaplin, M. I. (2019). Prediction of the levels of development of coal industry with regard for risks and critical phenomena in the structure of its productive potential in the global coal market. *The Problems of General Energy*, 1(56), 12–18. https://doi.org/10.15407/pge2019.01.012
31. Horoshkova, L., Khlobystov, I., Volkov, V. (2020). Modelling of resource flows in the Coal industry of Ukraine. In *Geoinformatics: Theoretical and*

Applied Aspects 2020 (Vol. 2020, No. 1, pp. 1-6). European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo069

32. Solonenchuk, I. V. (2019). Peculiarities of reforming the energy resources market of Ukraine. *Management*, 30(2), 115–127. https://doi.org/10.30857/2415-3206.2019.2.9
33. Yemelyanov, O., Petrushka, T., Symak, A., Trevoho, O., Turylo, A., Kurylo, O., et al. (2020). Microcredits for sustainable development of small Ukrainian enterprises: Efficiency, accessibility, and government contribution. *Sustainability*, 12(15), 6184. https://doi.org/10.3390/su12156184
34. Ritchie, H., Roser, M. (2020). Energy. OurWorld in Data. https://ourworldindata.org/energy
35. Ediger, V. Ş. (2019). An integrated review and analysis of multienergy transition from fossil fuels to renewables. *Energy Procedia*, 156, 2–6. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.073
36. Shahzad, U., Fareed, Z., Shahzad, F., Shahzad, K. (2020). Investigating the nexus between economic complexity, energy consumption and ecological footprint for the United States: New insights from quantile methods. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123806. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123806
37. Hanif, I., Raza, S. M. F., Gago-de-Santos, P., Abbas, Q. (2019). Fossil fuels, foreign direct investment, and economic growth have triggered CO2 emissions in emerging Asian economies: Some empirical evidence. *Energy*, 171, 493–501. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.011
38. Oberschelp, C., Pfister, S., Raptis, C. E., Hellweg, S. (2019). Global emission hotspots of coal power generation. *Nature Sustainability*, 2(2), 113–121. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0221-6
39. Guo, Y., Chen, B., Li, J., Yang, Q., Wu, Z., Tang, X. (2020). The evolution of China's provincial shared producer and consumer responsibilities for energy-related mercury emissions. Journal of Cleaner Production, 245, 118678. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118678

40. International Energy Agency. Data & statistics. https://www.iea.org/data-and-statistics

41. Dong, K., Dong, X., Dong, C. (2019). Determinants of the global and regional CO2 emissions: What causes what and where? *Applied Economics*, 51(46), 5031–5044. https://doi.org/10.1080/00036846.2019.1606410

42. Khayyam, U., Nazar, U. (2021). Energy production and CO2 emissions: The case of coal fired power plants under China Pakistan economic corridor. *Journal of Cleaner Production*, 281, 124974. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124974

43. Li, K., Fang, L., He, L. (2019). How population and energy price affect China's environmental pollution? *Energy policy*, 129, 386–396. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.02.020

44. Amann, M., Kiesewetter, G., Schöpp, W., Klimont, Z., Winiwarter, W., Cofala, J., et al. (2020). Reducing global air pollution: The scope for further policy interventions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 378(2183), 20190331. https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0331

45. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Kameneva, I., Taraduda, D., et al. (2020). Risk assessment for the population of Kyiv, Ukraine as a result of atmospheric air pollution. *Journal of Health and Pollution*, 10(25), 200303. https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.25.200303

46. Chiu, Y. B., Lee, C. C. (2020). Effects of financial development on energy consumption: The role of country risks. *Energy Economics*, 90, 104833. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104833

47. Брич, В. Я., Федірко, М. М. (2018). Концепція енергоефективності в контексті сталого розвитку комунальної теплоенергетики України. *Український журнал прикладної економіки*, 3(1), 26-35.

48. Новіков, Д.А. (2020). Економічні аспекти реформування сфери теплопостачання. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». Серія: «Економічні науки»*, 5(37), 91-96. https://doi.org/10.25313/2520-2294-2020-5-6025

49. Запорожець, А.О. (2017). *Комп'ютеризована система контролю процесу спалювання палива в котлоагрегатах малої та середньої потужності* [Дис. канд. техн. наук: 05.13.05, Інститут електродинаміки НАН України].

50. Ключнікова, М.В. (2015). Теоретико-правові аспекти відтворення основних виробничих засобів підприємств комунальної теплоенергетики. *Технологічний аудит та резерви виробництва*, 1/6(21), 47-51. https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.38627

51. Запорожець, А.О., Свердлова, А.Д. (2017). Аналіз методів діагностування теплоенергетичних об'єктів. *Наукоємні технології*, 35(3), 259-265. http://doi.org/10.18372/2310-5461.35.11846

52. 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.

53. 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

54. 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

55. 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.

56. 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

57. Nechaieva, T.P. (2017). Assessment of critical scenarios on the receipt of investments for the development of Ukrainian generating capacities. *The Problems of General Energy*, 4(51), 5-14. https://doi.org/10.15407/pge2017.04.005

58. Розпорядження Кабінету міністрів України «*Про Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок*» №796-р від 8 листопада 2017 р. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/796-2017-%D1%80#Text

59. Галак, О.В., Сахненко, М.Д., Каракуркчі, Г.В., Матикін, О.В., Косарев, О.В., Белоусов, І.О. (2018). Методи очищення газових викидів від хімічно-небезпечних речовин для підвищення ефективності фільтрувальних систем. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів*, 18(1294), 89-93.

60. Вольчин, І.А., Гапонич, Л.С., Згоран, І.П. (2018). Вибір технології десульфуризації димових газів для українських вугільних теплових електростанцій. *Наукові праці НУХТ*, 4(24), 154-168. https://doi.org/10.24263/2225-2924-2018-24-4-18

61. Коломієць, О.М. (2019). Огляд технологій зменшення викидів оксидів азоту на вугільних теплових електростанціях. *Енерготехнології та ресурсозабезпечення*, (1), 50-59. https://doi.org/10.33070/etars.1.2019.05

62. Столяренко, Г.С. (2020). Переробка вуглекислоти відпрацьованих газів електростанцій. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, (1), 57-66. https://doi.org/10.24025/2306-4412.1.2020.185531

63. Коваленко, Л.О. (2017). Оцінка забруднення атмосферного повітря населених пунктів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 6, 133-139.

64. Тимошенко, О.А., Міновська, А.В. (2017). Оцінювання рівня забруднення атмосферного повітря стаціонарними та лінійними джерелами викидів. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва*, 6, 65-71.

65. Клименко, В.Г., Цигічко, О.Ю. (2010). *Забруднення атмосферного повітря: Методична розробка для студентів-географів*. ХНУ ім. В.Н. Каразіна.

66. Павличенко, А.В., Бучавий, Ю.В., Ангурець, О.В., Хазан, П.В. (2019). Перспективи впровадження системи оперативного інформування населення про якість атмосферного повітря промислових міст за міжнародними стандартами. *Ecological Safety and Labour Protection*, 57, 178-191. https://doi.org/10.33271/crpnmu/57.178

67. Гірій, В.А., Колісник, І.А., Косовець, О.О., Кузнєцова, Т.О. (2018). Стан забруднення навколишнього природного середовища на території України у 2017 р. *Праці Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського*, 14(28), 17-32.

68. Колісник, І.А., Косовець, О.О. (2006). Хімічне забруднення атмосферного повітря на початку XXI ст. *Праці Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського*, 2(16).

69. Яценко, Ю., Шевченко, О., Сніжко, С. (2018). Оцінка сучасного рівня та тенденцій забруднення атмосферного повітря міст діоксидом азоту. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*, 3(82), 87-95.

70. Яценко, Ю., Шевченко, О. (2017). Класифікація міст України за рівнем забруднення атмосферного повітря. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*, 3-4(68-69), 25-30. http://doi.org/10.17721/1728-2721.2017.68.4

71. *Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2017 році*. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. https://bit.ly/3pksOVS

72. Браверман, В.Я., Крутоголов, І.О. (2022). Економічна оцінка показників забруднення повітря твердопаливними локальними котельнями. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*, 1-2(167-168), 3-10. https://doi.org/10.20998/2313-8890.2022.01.01

73. Бешляга, О.В., Вовкодав, Г.М. (2019). Оцінка забруднення повітряного басейну міста Одеси фенолом. *Вісник Гідрометцентру Чорного та Азовського морів*, 1(23), 56-61.

74. Вовкодав, Г.М., Бешляга, О.В. (2020). Оцінка забруднення повітряного басейну міста Одеси сірководнем та фенолом. *Збалансоване природокористування*, (1), 94-101. https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2020.203935

75. Сафранов, Т.А., Приходько, В.Ю., Шаніна, Т.П., Гусєва, К.Д. (2019). SWOT-аналіз екологічної складової урбанізованої території (на прикладі міста Одеса). *Український гідрометеорологічний журнал*, 23, 121-134. https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.11

76. Чугай, А.В., Чернякова, О.І., Базика, Ю.В. (2018). Аналіз техногенного навантаження на повітряний басейн окремих промислово-міських агломерацій Східної України (на прикладі міста Дніпро). *Вісник ХНУ імені В.Н. Каразіна. Серія «Екологія»*, 19, 75-81. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2018-19-07

77. Бєлоконь К.В., Пірогова, І.М. (2021). Аналіз та оцінка рівня забруднення атмосферного повітря м. Запоріжжя. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні наук)*, 1(38), 149-158. https://doi.org/10.31319/2519-2884.38.2021.18

78. Павленко, О.І., Орєхова, О.В. (2020). Стан умов праці працівників промислових підприємств та якість атмосферного повітря екологічно небезпечного регіону. In *Challenges and achievements of medical science and education: Collective monograph* (pp. 235-252). Baltija Publishing. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-024-7-12

79. Бабушкіна, Р.О., Мацко, П.В., Шкляр, О.Д., Гаран, В.В. (2019). Аналіз результатів дослідження сучасного рівня забруднення атмосфери в Херсонській області. *Таврійський науковий вісник*, (109), 163-172. https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.109-1.25

80. Лаврова, Т.В., Коричевський, К.О., Войцехович, О.В. (2021). Забруднення грунтів і атмосферного повітря на територіях впливу колишнього уранового виробництва ВО «Придніпровський хімічний завод». *Вісник Одеського національного університету. Географічні і геологічні науки*, 2(39), 64-77. https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2(39).246195

81. Максименко, Н., Волкова, Л., Кротько, А. (2020). Просторово-часова оцінка екологічного ризику від забруднення атмосферного повітря м. Харкова. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Сер. Географія*, 1(48), 107-120. https://doi.org/10.25128/2519-4577.20.1.13

82. Кривенко, Г.М., Возняк, Л.В., Зорін, В.О. (2019). Аналіз викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*, 1(19), 85-93. https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-1(19)-85-93

83. Чугай, А.В., Пилип'юк, В.В., Боровська, Г.О. (2018). Аналіз техногенного навантаження на природнє середовище Запорізької області. *Вісник ХНУ імені В.Н. Каразіна. Серія «Екологія»*, 18, 97-105.

84. Коваленко, Л.О., Фоменко, Г.Р. (2019). Аналіз забруднення атмосферного повітря міських територій. *Комунальне господарство міст*, 1(147), 220-223. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2019-1-147-220-223

85. Василенко, Л.О., Березницька, Ю.О., Федоренко, С.В., Березний, М.І., Сегеда, П.Ф. (2022). Концентрація шкідливих речовин у м. Києві. *Агросвіт*, 4, 56–63. https://doi.org/10.32702/2306-6792.2022.4.56

86. Горський, А. (2021). Оцінка техногенного впливу стаціонарних джерел забруднення на стан повітряного басейну Київської агломерації. *Економіка природокористування і сталий розвиток*, 9(28), 72-79. https://doi.org/10.37100/2616-7689.2021.9(28).10

87. Волошкіна, О. С., Анпілова, Є. С., Клімова, І. В. (2020). Визначення ризику для здоров'я населення внаслідок підвищення забруднення атмосферного повітря в м. Києві. *Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky*, 2(8), 116-123.

88. Рабош, І.О., Кофанова, О.В. (2018). Оцінювання ризиків для здоров'я населення внаслідок забруднення довкілля автотранспортом (на прикладі міста Києва). *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 4, 115-123. https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2018.175646

89. Бреус, І., Карплюк, В., Русакова, Т. (2021). Чисельне моделювання забруднення атмосферного повітря навколо промислових підприємств Дніпропетровської області. Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка, 6(29), 11-27. http://dx.doi.org/10.15421/372102

90. Мініна, О., Шевченко, О., Мороз, Є. (2021). Забруднення довкілля як складова глобальної екологічної кризи: національний рівень. *Науковий вісник Полісся*, 2(21), 39-51. https://doi.org/10.25140/2410-9576-2020-2(21)-39-51

91. Гомонай, В.І., Богоста, А.С., Лобко, В.Ю., Федорішко, М.І. (2012). Дослідження рівня забруднення атмосферного повітря м. Ужгорода протягом 2011 року. *Науковий вісник Ужгородського університету (Сер. Хімія)*, 1(27), 90-95.

92. Шершун, С.М. (2015). Управління системою екологічного моніторингу в Україні: правові та організаційні питання. *Право і суспільство*, 1, 175-181.

93. Яцишин, А.В., Куцан, Ю.Г., Артемчук, В.О., Каменева, І.П., Попов, О.О., Ковач, В.О. (2019). Принципи та методи управління екологічною

безпекою на основі інтелектуального аналізу даних мережі моніторингу атмосферного повітря. *Електронне моделювання*, 4, 85-102.

94. Артемчук, В.О., Каменева, І.П., Яцишин, А.В., Яцишин, Т.М. (2018). Методичні та інформаційні засоби аналізу екологічних ризиків на основі даних моніторингу. *Моделювання та інформаційні технології*, 83, 48-62.
95. Артемчук, В.О., Яцишин, А.В., Попов, О.О., Кириленко, Ю.О., Яцишин, Т.М. (2018). Перспективи розробки математичних та програмних засобів перевірки екологічної ефективності прийняття управлінських рішень. *Моделювання та інформаційні технології*, 85, 75-80.
96. Бобрикова, Ю.С. Моніторинг навколишнього природного середовища в України. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій»* (20 травня 2021 р., Харків). С. 254-255.
97. Живченко, К.В. Екологічна безпека як складова державної політики України. *Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Трансформація фінансової системи України: тенденції та перспективи розвитку»* (27-28 листопада 2019 р., м. Миколаїв). С. 18-19.
98. Попов, С. Забруднення повітря в Україні: хто здійснює нагляд і контроль (1 листопада 2019 р.). https://sud.ua/ru/news/publication/153640-zabrudnennya-povitrya-v-ukrayini-khto-zdiysnyuye-naglyad-i-kontrol
99. Дмитрієва, О.О., Варламов, Є.М., Квасов, В.А., Палагута, О.А., Нестеренко, Л.М., Нестеренко, У.Ю. (2016). Стан мережі спостереження за атмосферним повітрям в Україні та її відповідність вимогам Директиви 2008/50/ЄС. *Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки*, 38, 99-110.
100. Постанова Кабінету міністрів України «Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря» №827 від 14 серпня 2019 р. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#Text

101. Долина, Л.Ф., Козачина, В.А., Пристинський, В.В. (2013). Моніторинг забруднення атмосферного повітря бенз(а)піреном та вуглеводнем. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*, 6, 91-97. https://doi.org/10.15802/ecsrt2013/51294

102. Ничик, О.В. (2011). *Моніторинг довкілля: Курс лекцій для студ. Напряму 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалнсоване природокористування» ден. та заоч. форм навч.* Національний університет харчових технологій

103. Артемчук, В.О. (2012). Основні проблеми оптимізації мережі моніторингу стану атмосферного повітря. *Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, 64, 7-11.

104. Артемчук, В.О. (2013). Класифікація задач оптимізації мереж моніторингу стану атмосферного повітря. *Моделювання та інформаційні технології*, 67, 10-15.

105. Артемчук, В.О. (2013). Використання GIS-орієнтованих сервісів при оптимізації мережі моніторингу стану атмосферного повітря. *Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, 69, 34-39.

106. Zhou, P., Huang, G., Zhang, L., Tsang, K. F. (2015). Wireless sensor network based monitoring system for a large-scale indoor space: data process and supply air allocation optimization. *Energy and Buildings*, 103, 365-374. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.042

107. Tang, Y., Miao, Y., Barnawi, A., Alzahrani, B., Alotaibi, R., Hwang, K. (2021). A joint global and local path planning optimization for UAV task scheduling towards crowd air monitoring. *Computer Networks*, 193, 107913. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.107913

108. Hu, Z., Bai, Z., Bian, K., Wang, T., Song, L. (2019). Real-time fine-grained air quality sensing networks in smart city: design, implementation,

and optimization. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(5), 7526-7542. https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2900751

109. Yuzhong, W. A. N. G., Huanqin, W. A. N. G., Juntao, H. U., Huaqiao, G. U. I. (2021). Optimization Design of Miniature Air Quality Monitoring System Based on Multi-Sensor Fusion Technology. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 16(4), 349.

110. 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

111. 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

112. 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

113. Тишкевич, Б., Вербицький І. (2018). Як Україна вимірює забруднення повітря? *Українська енергетика*. https://ua-energy.org/uk/posts/yak-ukraina-vymiriuie-zabrudnennia-povitria

114. Тишкевич, Б., Вербицький, І. (2018). Пальцем в небо? Як Україна вимірює забруднення повітря. *Mistosite*. https://mistosite.org.ua/ru/articles/paltsem-v-nebo-yak-ukraina-vymiriuie-zabrudnennia-povitria

115. Дмитриева, Е.А., Варламов, Е.Н., Квасов, В.А., Палагута, О.А. (2017). Требования директив 2008/50/ЕС и 2004/107/ЕС к сети наблюдения за качеством атмосферного воздуха и оценка ее состояния в Украине. *Экология и промышленность*, (1), 110-114.

116. Артемчук, В.О. (2013). Перспективи використання безпровідних сенсорних мереж. *Моделювання та інформаційні технології*, 68, 48-56.

117. Мокін, В.Б., Собко, Б.Ю., Дратований, М.В., Крижановський, Є.М., Горячев, Г.В. (2017). Створення інформаційної системи моніторингу забруднення атмосферного повітря міста на основі технології «інтернету речей». *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 3, 49-58.

118. Ткачук, К.К., Канар, М.О. (2015). Автоматична система моніторингу забруднення атмосфери промислового району в Донецькій області. *Геологія та охорона праці*, 29, 86-89.

119. Бордюг, Н.С., Ращенко, А.В., Лесь, А.В. (2021). Розробка проєкту системи моніторингу атмосферного повітря. *Екологічні науки*, 2(35), 15-19. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.2-35.2

120. Голік, Ю.С., Максюта, Н.С. (2020). Створення мережі громадського моніторингу атмосферного повітря та інформування населення. *Технологічний аудит та резерви виробництва*, 4(54), 36-40. https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.210376

121. Мокін, В.Б., Дзюняк, Д.Ю., Бондалєтов, К.О., Олійник, В.В. (2015). Метод і технологія моніторингу стану атмосферного повітря за допомогою універсальної інформаційно-вимірювальної системи з використанням мобільних пристроїв. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, 4. https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/456

122. Радовенчик, В.М., Іваненко, О.І., Крисенко, Т.В., Радовечник, Я.В. (2022). Системи моніторингу якості повітря в м. Києві. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*, 1, 70-79. https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2022.254161

123. Dhingra, S., Madda, R. B., Gandomi, A. H., Patan, R., Daneshmand, M. (2019). Internet of Things mobile–air pollution monitoring system (IoT-

Mobair). *IEEE Internet of Things Journal*, 6(3), 5577-5584. https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2903821

124. Parmar, G., Lakhani, S., Chattopadhyay, M. K. (2017, October). An IoT based low cost air pollution monitoring system. In *2017 International Conference on Recent Innovations in Signal processing and Embedded Systems (RISE)* (pp. 524-528). IEEE. https://doi.org/10.1109/RISE.2017.8378212

125. Senthilkumar, R., Venkatakrishnan, P., Balaji, N. (2020). Intelligent based novel embedded system based IoT enabled air pollution monitoring system. *Microprocessors and Microsystems*, 77, 103172. https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103172

126. Sai, K. B. K., Subbareddy, S. R., Luhach, A. K. (2019). IOT based air quality monitoring system using MQ135 and MQ7 with machine learning analysis. *Scalable Computing: Practice and Experience*, 20(4), 599-606. https://doi.org/10.12694/scpe.v20i4.1561

127. Gupta, H., Bhardwaj, D., Agrawal, H., Tikkiwal, V. A., Kumar, A. (2019, February). An IoT based air pollution monitoring system for smart cities. In *2019 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies and Systems (ICSETS)* (pp. 173-177). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICSETS.2019.8744949

128. Закон України «Про внесення змін до Конституції України (щодо стратегічного курсу держави на набуття повноправного членства України в Європейському Союзі та в Організації Північноатлантичного договору)» від 7 лютого 2019 р. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2680-19#Text

129. Гриб, О.М., Чугай, А.В. (2019). *Автоматизований моніторинг та оцінка якості атмосферного повітря. Методичні вказівки для підготовки студентів за спеціальностями 101 «Екологія» та 103 «Науки про Землю»*. Одеський державний екологічний університет.

130. Hegde, S., Min, K. T., Moore, J., Lundrigan, P., Patwari, N., Collingwood, S., Balch, A., Kelly, K. E. (2020). Indoor household particulate matter measurements using a network of low-cost sensors. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(2), 381-394. https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.01.0046

131. Dacunto, P. J., Klepeis, N. E., Cheng, K. C., Acevedo-Bolton, V., Jiang, R. T., Repace, J. L., Ott, W.R., Hildemann, L. M. (2015). Determining PM 2.5 calibration curves for a low-cost particle monitor: common indoor residential aerosols. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 17(11), 1959-1966. https://doi.org/10.1039/C5EM00365B

132. Migos, T., Christakis, I., Moutzouris, K., Stavrakas, I. (2019, May). On the Evaluation of Low-Cost PM Sensors for Air Quality Estimation. In *2019 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST)* (pp. 1-4). IEEE. https://doi.org/10.1109/MOCAST.2019.8742041

133. Awokola, B. I., Okello, G., Mortimer, K. J., Jewell, C. P., Erhart, A., Semple, S. (2020). Measuring air quality for advocacy in Africa (MA3): feasibility and practicality of longitudinal ambient PM2. 5 measurement using low-cost sensors. *International journal of environmental research and public health*, 17(19), 7243. https://doi.org/10.3390/ijerph17197243

134. Johnson, K. K., Bergin, M. H., Russell, A. G., Hagler, G. S. (2018). Field test of several low-cost particulate matter sensors in high and low concentration urban environments. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(3), 565. https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.10.0418

135. Khadem, M. I., Sgârciu, V. (2014). Smart sensor nodes for airborne particulate concentration detection. *UPB Sci. Bull. Ser. C*, 76(4), 3-12.

136. Du, Y., Wang, Q., Sun, Q., Zhang, T., Li, T., Yan, B. (2019). Assessment of PM2.5 monitoring using MicroPEM: A validation study in a city with elevated PM2.5 levels. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 171, 518-522. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.002

137. Cho, S. H., Chartier, R. T., Mortimer, K., Dherani, M., Tafatatha, T. (2016, October). A personal particulate matter exposure monitor to support

household air pollution exposure and health studies. In *2016 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)* (pp. 817-818). IEEE. https://doi.org/10.1109/GHTC.2016.7857373

138. Chartier, R., Phillips, M., Mosquin, P., Elledge, M., Bronstein, K., Nandasena, S., Thornburg, V., Rodes, C. (2017). A comparative study of human exposures to household air pollution from commonly used cookstoves in Sri Lanka. *Indoor air*, 27(1), 147-159. https://doi.org/10.1111/ina.12281

139. Xie, S., Meeker, J. R., Perez, L., Eriksen, W., Localio, A., Park, H., ... Himes, B. E. (2021). Feasibility and acceptability of monitoring personal air pollution exposure with sensors for asthma self-management. *Asthma research and practice*, 7(1), 1-11. https://doi.org/10.1186/s40733-021-00079-9

140. Sousan, S., Koehler, K., Hallett, L., Peters, T. M. (2017). Evaluation of consumer monitors to measure particulate matter. *Journal of aerosol science*, 107, 123-133. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.02.013

141. He, R., Han, T., Bachman, D., Carluccio, D. J., Jaeger, R., Zhang, J., Thirumurugesan, S., Andrews, C., Mainelis, G. (2020). Evaluation of two low-cost PM monitors under different laboratory and indoor conditions. *Aerosol science and technology*, 55(3), 316-331. https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1851649

142. Cowan, K., Kelly, T., Coutant, B., Riggs, K. (2001). Met one instruments BAM 1020 particle monitor. *Environmental Technology Verification Report*, *Battelle*, Columbus OH, 43201.

143. Magi, B. I., Cupini, C., Francis, J., Green, M., Hauser, C. (2020). Evaluation of PM2.5 measured in an urban setting using a low-cost optical particle counter and a Federal Equivalent Method Beta Attenuation Monitor. *Aerosol Science and Technology*, 54(2), 147-159. https://doi.org/10.1080/02786826.2019.1619915

144. Mohtar, Z. A., Faizah, N., Yusof, F., Ramli, N. A., Yahya, A. S., Tebal, N. (2013). Comparison of particulate matter (PM10) monitoring using Beta Attenuation Monitor (BAM) and simple instrument. *Int. J. Eng. Technol*, 3.

145. Zamora, M. L., Rice, J., Koehler, K. (2020). One year evaluation of three low-cost PM2.5 monitors. *Atmospheric environment*, 235, 117615. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117615

146. Zikova, N., Masiol, M., Chalupa, D. C., Rich, D. Q., Ferro, A. R., Hopke, P. K. (2017). Estimating hourly concentrations of PM2.5 across a metropolitan area using low-cost particle monitors. *Sensors*, 17(8), 1922. https://doi.org/10.3390/s17081922

147. Palmisani, J., Di Gilio, A., Viana, M., de Gennaro, G., Ferro, A. (2021). Indoor air quality evaluation in oncology units at two European hospitals: Low-cost sensors for TVOCs, PM2.5 and CO2 real-time monitoring. *Building and Environment*, 205, 108237. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108237

148. Liu, X., Hadiatullah, H., Zhang, X., Hill, L. D., White, A. H., Schnelle-Kreis, J., Bendl, J., Jakobi, G., Schloter-Hai, B., Zimmermann, R. (2021). Analysis of mobile monitoring data from the microAeth® MA200 for measuring changes in black carbon on the roadside in Augsburg. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(7), 5139-5151. https://doi.org/10.5194/amt-14-5139-2021

149. Williams, R. D., Knibbs, L. D. (2016). Daily personal exposure to black carbon: a pilot study. *Atmospheric Environment*, 132, 296-299. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.023

150. Craft, T. L., Cahill, C. F., Walker, G. W. (2014). Using an unmanned aircraft to observe black carbon aerosols during a prescribed fire at the RxCADRE campaign. In *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 77-82). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICUAS.2014.6842241

151. Devarakonda, S., Sevusu, P., Liu, H., Liu, R., Iftode, L., Nath, B. (2013). Real-time air quality monitoring through mobile sensing in metropolitan areas. In *Proceedings of the 2nd ACM SIGKDD international workshop on urban computing* (pp. 1-8). https://doi.org/10.1145/2505821.2505834

152. Zhao, Y., Shepherd, T. A., Li, H., Xin, H. (2015). Environmental assessment of three egg production systems–Part I: Monitoring system and indoor air quality. *Poultry Science*, 94(3), 518-533. https://doi.org/10.3382/ps/peu076

153. Lerner, U., Hirshfeld, O., Fishbasin, B. (2019). Optimal deployment of a heterogeneous air quality sensor network. *Journal of Environmental Informatics*, 34(2), 99-107.

154. Broday, D. M., Citi-Sense Project Collaborators. (2017). Wireless distributed environmental sensor networks for air pollution measurement—The promise and the current reality. *Sensors*, 17(10), 2263. https://doi.org/10.3390/s17102263

155. Thomas, G. W., Sousan, S., Tatum, M., Liu, X., Zuidema, C., Fitzpatrick, M., Koehler, K.A., Peters, T. M. (2018). Low-cost, distributed environmental monitors for factory worker health. *Sensors*, 18(5), 1411. https://doi.org/10.3390/s18051411

156. Querol, X., Alastuey, A., Gangoiti, G., Perez, N., Lee, H. K., Eun, H. R., ... Ahn, K. H. (2018). Phenomenology of summer ozone episodes over the Madrid Metropolitan Area, central Spain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(9), 6511-6533. https://doi.org/10.5194/acp-18-6511-2018

157. Vettikkat, L., Sinha, V., Datta, S., Kumar, A., Hakkim, H., Yadav, P., Sinha, B. (2020). Significant emissions of dimethyl sulfide and monoterpenes by big-leaf mahogany trees: discovery of a missing dimethyl sulfide source to the atmospheric environment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(1), 375-389. https://doi.org/10.5194/acp-20-375-2020

158. Aziz, H. A., Awang, N. R., Amin, M. F. M., Junaidi, N. F. M. (2020). Ground Level Ozone Fluctuational Characteristics within Two Industrial Areas in Malaysia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 549, No. 1, p. 012002). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/549/1/012002

159. Collier-Oxandale, A., Feenstra, B., Papapostolou, V., Zhang, H., Kuang, M., Der Boghossian, B., Polidori, A. (2020). Field and laboratory performance evaluations of 28 gas-phase air quality sensors by the AQ-SPEC program. *Atmospheric Environment*, 220, 117092. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117092

160. Stolle, L., Nalamasu, R., Rodenbeck, R., Davidson, K., Smarelli, C., Rosko, S., Wales, J., LeQuang, J.A.K., Pergolizzi, J. (2021). Ozone: A Novel Sterilizer for Personal Protective Equipment. *Cureus*, 13(9). https://doi.org/10.7759/cureus.18228

161. Zandbergen, D., Uitermark, J. (2020). In search of the smart citizen: Republican and cybernetic citizenship in the smart city. *Urban Studies*, 57(8), 1733-1748. https://doi.org/10.1177/0042098019847410

162. Mihăiţă, A. S., Dupont, L., Chery, O., Camargo, M., Cai, C. (2019). Evaluating air quality by combining stationary, smart mobile pollution monitoring and data-driven modelling. *Journal of cleaner production*, 221, 398-418. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.179

163. Khedo, K. K., Shenoy, P., Zeadally, K., Awotar, K., Ramdani, L. (2020). A Vehicular Internet of Things (IoT) System for High-Granularity Air Quality Monitoring in Smart Cities. In *Smart Technologies for Smart Cities* (pp. 111-133). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39986-3_6

164. Esposito, E., Salvato, M., Vito, S. D., Fattoruso, G., Castell, N., Karatzas, K., Francia, G. D. (2017). Assessing the Relocation Robustness of on Field Calibrations for Air Quality Monitoring Devices. In *AISEM Annual*

Conference on Sensors and Microsystems (pp. 303-312). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66802-4_38

165. Carruthers, D., Stidworthy, A., Clarke, D., Dicks, J., Jones, R., Leslie, I., Popoola, O.A.M., Seaton, M. (2019). Urban emission inventory optimisation using sensor data, an urban air quality model and inversion techniques. *International Journal of Environment and Pollution*, 66(4), 252-266.

166. Castell, N., Schneider, P., Vogt, M., Dauge, F. R., Lahoz, W., Bartonova, A. (2018). Can low-cost air quality sensors help to monitor air pollution in cities? In *11th International Conference on Air Quality Science and Application*. https://bit.ly/3SNx7Xv

167. McKercher, G. R., Salmond, J. A., Vanos, J. K. (2017). Characteristics and applications of small, portable gaseous air pollution monitors. *Environmental Pollution*, 223, 102-110. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.045

168. Peters, D. R., Popoola, O. A., Jones, R. L., Martin, N. A., Mills, J., Fonseca, E. R., ..., Alvarez, R. A. (2022). Evaluating uncertainty in sensor networks for urban air pollution insights. Atmospheric Measurement Techniques, 15(2), 321-334. https://doi.org/10.5194/amt-15-321-2022

169. Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., Bell, M., Norford, L. Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment international*, *75*, 199-205. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019

170. Hagler, G. S. W., Solomon, P. A., Hunt, S. W. (2014). New technology for low-cost, real-time air monitoring. *EM: Air and Waste Management Association's Magazine for Environmental Managers; Air & Waste Management Association: Pittsburgh, PA, USA*.

171. Rai, A. C., Kumar, P., Pilla, F., Skouloudis, A. N., Di Sabatino, S., Ratti, C., ..., Rickerby, D. (2017). End-user perspective of low-cost sensors

for outdoor air pollution monitoring. *Science of The Total Environment*, *607*, 691-705. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.266

172. Williams, D. E. (2019). Low cost sensor networks: How do we know the data are reliable? *ACS sensors*, 4(10), 2558-2565. https://doi.org/10.1021/acssensors.9b01455

173. Barbour, N., Schmidt, G. (2001). Inertial sensor technology trends. *IEEE Sensors journal*, *1*(4), 332-339. https://doi.org/10.1109/7361.983473

174. Megerian, S., Koushanfar, F., Potkonjak, M., Srivastava, M. B. (2005). Worst and best-case coverage in sensor networks. *IEEE transactions on mobile computing*, *4*(1), 84-92. https://doi.org/10.1109/7361.983473

175. Kumar, P., Martani, C., Morawska, L., Norford, L., Choudhary, R., Bell, M., Leach, M. (2016). Indoor air quality and energy management through real-time sensing in commercial buildings. *Energy and Buildings*, *111*, 145-153. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.037

176. Kumar, P., Skouloudis, A. N., Bell, M., Viana, M., Carotta, M. C., Biskos, G., Morawska, L. (2016). Real-time sensors for indoor air monitoring and challenges ahead in deploying them to urban buildings. *Science of the Total Environment*, *560*, 150-159. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.032

177. Báthory, C., Dobó, Z., Garami, A., Palotás, Á., Tóth, P. (2022). Low-cost monitoring of atmospheric PM—development and testing. *Journal of Environmental Management*, *304*, 114158. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114158

178. Ashoori, E., Parsnejad, S., Yin, H., Figueroa, J., Sepúlveda, N., Mason, A. J. (2021). A Low-Cost Liquid-Based Capacitive Sensor for PM 2.5 Monitoring. In *2021 IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)* (pp. 907-910). IEEE. https://doi.org/10.1109/MWSCAS47672.2021.9531893

179. Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D., Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment international*, *99*, 293-302. https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007

180. Karagulian, F., Barbiere, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., Redon, N., Crunaire, S., Borowiak, A. (2019). Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere*, *10*(9), 506. https://doi.org/10.3390/atmos10090506

181. Spinelle, L., Gerboles, M., Kok, G., Persijn, S., Sauerwald, T. (2017). Review of portable and low-cost sensors for the ambient air monitoring of benzene and other volatile organic compounds. *Sensors*, 17(7), 1520. https://doi.org/10.3390/s17071520

182. Candia, A., Represa, S. N., Giuliani, D., Luengo, M. Á., Porta, A. A., Marrone, L. A. (2018, November). Solutions for SmartCities: proposal of a monitoring system of air quality based on a LoRaWAN network with low-cost sensors. In *2018 Congreso Argentino de Ciencias de la Informática y Desarrollos de Investigación (CACIDI)* (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/CACIDI.2018.8584183

183. Morawska, L., Thai, P. K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., Bedini, A., Chai, F., Christensen, B., Dunbabin, M., Gao, J., Hagler, G.S.W., Jayaratne, R., Kumar, P., Lau, A.K.H., Louie, P.K.K., Mazaheri, M., Ning, Z., Motta, N., Mullins, B., Rahman, Md.M., Ristovski, Z., Shafiei, M., Tjondronegoro, D., Westerdahi, D., Williams, R. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone? *Environment international*, 116, 286-299. https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018

184. Badura, M., Batog, P., Drzeniecka-Osiadacz, A., Modzel, P. (2018). Evaluation of low-cost sensors for ambient PM2.5 monitoring. *Journal of Sensors*, *2018*. https://doi.org/10.1155/2018/5096540

185. Brienza, S., Galli, A., Anastasi, G., Bruschi, P. (2015). A low-cost sensing system for cooperative air quality monitoring in urban areas. *Sensors*, *15*(6), 12242-12259. https://doi.org/10.3390/s150612242

186. Lewis, A., Peltier, W. Richard, von Schneidemesser, E. (2018) Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications. Research Report. World Meteorological Organization (WMO), Geneva, Switzerland.

187. Mahajan, S., Kumar, P. (2020). Evaluation of low-cost sensors for quantitative personal exposure monitoring. *Sustainable Cities and Society*, *57*, 102076. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102076

188. Muñoz-Huerta, R. F., Guevara-Gonzalez, R. G., Contreras-Medina, L. M., Torres-Pacheco, I., Prado-Olivarez, J., Ocampo-Velazquez, R. V. (2013). A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: advantages, disadvantages and recent advances. *sensors*, *13*(8), 10823-10843. https://doi.org/10.3390/s130810823

189. Liu, S., Xia, C., Zhao, Z. (2016, October). A low-power real-time air quality monitoring system using LPWAN based on LoRa. In *2016 13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)* (pp. 379-381). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICSICT.2016.7998927

190. Phala, K. S. E., Kumar, A., Hancke, G. P. (2016). Air quality monitoring system based on ISO/IEC/IEEE 21451 standards. *IEEE Sensors Journal*, *16*(12), 5037-5045. https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2555935

191. Alberti, G., Zanoni, C., Magnaghi, L. R., Biesuz, R. (2020). Disposable and low-cost colorimetric sensors for environmental analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(22), 8331. https://doi.org/10.3390/ijerph17228331

192. Lewis, A. C., Lee, J. D., Edwards, P. M., Shaw, M. D., Evans, M. J., Moller, S. J., ..., White, A. (2016). Evaluating the performance of low cost

chemical sensors for air pollution research. *Faraday discussions*, *189*, 85-103. https://doi.org/10.1039/C5FD00201J

193. Schieweck, A., Uhde, E., Salthammer, T., Salthammer, L. C., Morawska, L., Mazaheri, M., Kumar, P. (2018). Smart homes and the control of indoor air quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *94*, 705-718. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.057

194. Thu, M. Y., Htun, W., Aung, Y. L., Shwe, P. E. E., Tun, N. M. (2018, November). Smart air quality monitoring system with LoRaWAN. In *2018 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IOTAIS)* (pp. 10-15). IEEE. https://doi.org/10.1109/IOTAIS.2018.8600904

195. Kumar, A., Singh, I. P., Sud, S. K. (2011). Energy efficient and low-cost indoor environment monitoring system based on the IEEE 1451 standard. *IEEE Sensors Journal*, *11*(10), 2598-2610. https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2148171

196. Mois, G., Folea, S., Sanislav, T. (2017). Analysis of three IoT-based wireless sensors for environmental monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *66*(8), 2056-2064. https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2677619

197. Lowther, S. D., Jones, K. C., Wang, X., Whyatt, J. D., Wild, O., Booker, D. (2019). Particulate matter measurement indoors: a review of metrics, sensors, needs, and applications. *Environmental Science & Technology*, *53*(20), 11644-11656. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03425

198. Lan, H., Hartonen, K., Riekkola, M. L. (2020). Miniaturised air sampling techniques for analysis of volatile organic compounds in air. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *126*, 115873. https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115873

199. Sokhi, R. S., Moussiopoulos, N., Baklanov, A., Bartzis, J., Coll, I., Finardi, S., ..., Kukkonen, J. (2022). Advances in air quality research–current and emerging challenges. *Atmospheric chemistry and physics*, *22*(7), 4615-4703. https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2349073

200. Capone, S., Forleo, A., Francioso, L., Rella, R., Siciliano, P., Spadavecchia, J., Presicce, D.S., Taurino, A. M. (2003). Solid state gas sensors: state of the art and future activities. *Journal of optoelectronics and Advanced Materials*, *5*(5), 1335-1348.

201. Quan, V. M., Gupta, G. S., Mukhopadhyay, S. (2011, February). Review of sensors for greenhouse climate monitoring. In *2011 IEEE Sensors Applications Symposium* (pp. 112-118). IEEE. https://doi.org/10.1109/SAS.2011.5739816

202. Simonds, M., Xiao, H., Levine, S. P. (1994). Optical remote sensing for air pollutants-review. *American Industrial Hygiene Association Journal*, *55*(10), 953-965. https://doi.org/10.1080/15428119491018466

203. Snyder, E. G., Watkins, T. H., Solomon, P. A., Thoma, E. D., Williams, R. W., Hagler, G. S., ..., Preuss, P. W. (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental science & technology*, *47*(20), 11369-11377. https://doi.org/10.1021/es4022602

204. Ihokura, K., Watson, J. (2017). *The stannic oxide gas sensor: principles and applications*. CRC press.

205. Postolache, O. A., Pereira, J. D., Girao, P. S. (2009). Smart sensors network for air quality monitoring applications. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, *58*(9), 3253-3262. https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2022372

206. Yi, W. Y., Lo, K. M., Mak, T., Leung, K. S., Leung, Y., Meng, M. L. (2015). A survey of wireless sensor network based air pollution monitoring systems. *Sensors*, *15*(12), 31392-31427. https://doi.org/10.3390/s151229859

207. Dinh, T. V., Choi, I. Y., Son, Y. S., Kim, J. C. (2016). A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *231*, 529-538. https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.03.040

208. Kumar, A., Singh, A., Kumar, A., Singh, M. K., Mahanta, P., Mukhopadhyay, S. C. (2018). Sensing technologies for monitoring intelligent

buildings: A review. *IEEE Sensors Journal*, *18*(12), 4847-4860. https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2829268

209. Ando, M., Biju, V., Shigeri, Y. (2018). Development of technologies for sensing ozone in ambient air. *Analytical Sciences*, *34*(3), 263-271. https://doi.org/10.2116/analsci.34.263

210. Koehler, K. A., Peters, T. M. (2015). New methods for personal exposure monitoring for airborne particles. *Current environmental health reports*, *2*(4), 399-411. https://doi.org/10.1007/s40572-015-0070-z

211. Castell, N., Viana, M., Minguillón, M. C., Guerreiro, C., Querol, X. (2013). Real-world application of new sensor technologies for air quality monitoring. *ETC/ACM Technical Paper*, *16*, 34.

212. Penza, M., EuNetAir Consortium. (2014). COST Action TD1105: Overview of sensor-systems for air-quality monitoring. *Procedia Engineering*, *87*, 1370-1377. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.698

213. Aleixandre, M., Gerboles, M. (2012). Review of small commercial sensors for indicative monitoring of ambient gas. *Chem. Eng. Trans*, *30*.

214. Bourgeois, W., Romain, A. C., Nicolas, J., Stuetz, R. M. (2003). The use of sensor arrays for environmental monitoring: interests and limitations. *Journal of Environmental Monitoring*, *5*(6), 852-860. https://doi.org/10.1039/B307905H

215. Mukhopadhyay, S. C. (Ed.). (2012). *Smart sensing technology for agriculture and environmental monitoring*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27638-5

216. Feinberg, S., Williams, R., Hagler, G. S., Rickard, J., Brown, R., Garver, D., ..., Garvey, S. (2018). Long-term evaluation of air sensor technology under ambient conditions in Denver, Colorado. *Atmospheric measurement techniques*, *11*(8), 4605-4615. https://doi.org/10.5194/amt-11-4605-2018

217. Penza, M., Suriano, D., Pfister, V., Prato, M., Cassano, G. (2017). Urban air quality monitoring with networked low-cost sensor-systems.

In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings* (Vol. 1, No. 4, p. 573). https://doi.org/10.3390/proceedings1040573

218. Liang, C. J., Yu, P. R. (2021). Assessment and Improvement of Two Low-Cost Particulate Matter Sensor Systems by Using Spatial Interpolation Data from Air Quality Monitoring Stations. *Atmosphere*, *12*(3), 300. https://doi.org/10.3390/atmos12030300

219. Clements, A. L., Griswold, W. G., Rs, A., Johnston, J. E., Herting, M. M., Thorson, J., Collier-Oxandate, A., Hannigan, M. (2017). Low-cost air quality monitoring tools: from research to practice (a workshop summary). *Sensors*, *17*(11), 2478. https://doi.org/10.3390/s17112478

220. Hunter, G., Xu, J., Biaggi-Labiosa, A., Ward, B., Dutta, P., Liu, C. C. (2011, July). Smart sensor systems for spacecraft fire detection and air quality monitoring. In *41st International Conference on Environmental Systems* (p. 5021). https://doi.org/10.2514/6.2011-5021

221. Cheng, Y., Li, X., Li, Z., Jiang, S., Li, Y., Jia, J., Jiang, X. (2014, November). AirCloud: A cloud-based air-quality monitoring system for everyone. In *Proceedings of the 12th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems* (pp. 251-265). https://doi.org/10.1145/2668332.2668346

222. White, R. M., Paprotny, I., Doering, F., Cascio, W. E., Solomon, P. A., Gundel, L. A. (2012). Sensors and 'apps' for community-based atmospheric monitoring. *EM Air Waste Manag. Assoc. Mag. Environ. Manag*, *5*, 36-40.

223. Zhou, X., Lee, S., Xu, Z., Yoon, J. (2015). Recent progress on the development of chemosensors for gases. *Chemical Reviews*, *115*(15), 7944-8000. https://doi.org/10.1021/cr500567r

224. Frank, J., Meixner, H. (2001). Sensor system for indoor air monitoring using semiconducting metal oxides and IR-absorption. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *78*(1-3), 298-302. https://doi.org/10.1016/S0925-4005(01)00829-2

225. Jiao, W., Hagler, G., Williams, R., Sharpe, R., Brown, R., Garver, D., ..., Buckley, K. (2016). Community Air Sensor Network (CAIRSENSE)

project: evaluation of low-cost sensor performance in a suburban environment in the southeastern United States. *Atmospheric measurement techniques*, *9*(11), 5281-5292. https://doi.org/10.5194/amt-9-5281-2016

226. Chapman, J., Truong, V. K., Elbourne, A., Gangadoo, S., Cheeseman, S., Rajapaksha, P., ..., Cozzolino, D. (2020). Combining chemometrics and sensors: Toward new applications in monitoring and environmental analysis. *Chemical Reviews*, *120*(13), 6048-6069. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00616

227. Rassaei, L., Marken, F., Sillanpää, M., Amiri, M., Cirtiu, C. M., Sillanpää, M. (2011). Nanoparticles in electrochemical sensors for environmental monitoring. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *30*(11), 1704-1715. https://doi.org/10.1016/j.trac.2011.05.009

228. Kumar, A., Gurjar, B. R. (2019). Low-cost sensors for air quality monitoring in developing countries–a critical view. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, *16*(2), 65-70. https://doi.org/10.3233/AJW190021

229. Piedrahita, R., Xiang, Y., Masson, N., Ortega, J., Collier, A., Jiang, Y., Li, K., Dick, R.P., Lv, Q., Hannigan, M., Shang, L. (2014). The next generation of low-cost personal air quality sensors for quantitative exposure monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, *7*(10), 3325-3336. https://doi.org/10.5194/amt-7-3325-2014

230. Seto, E., Carvlin, G., Austin, E., Shirai, J., Bejarano, E., Lugo, H., Olmedo, L., Calderas, A., Jerrett, M., King, G., Meltzer, D., Wilkie, A., Wong, M., English, P. (2019). Next-generation community air quality sensors for identifying air pollution episodes. *International journal of environmental research and public health*, *16*(18), 3268. https://doi.org/10.3390/ijerph16183268

231. Caubel, J. J., Cados, T. E., Kirchstetter, T. W. (2018). A new black carbon sensor for dense air quality monitoring networks. *Sensors*, *18*(3), 738. https://doi.org/10.3390/s18030738

232. Guo, H., Xiao, G., Mrad, N., Yao, J. (2011). Fiber optic sensors for structural health monitoring of air platforms. *Sensors*, *11*(4), 3687-3705. https://doi.org/10.3390/s110403687

233. Pillarisetti, A., Allen, T., Ruiz-Mercado, I., Edwards, R., Chowdhury, Z., Garland, C., Hill, L.D., Johnson, M., Litton, C.D., Lam, N.L., Pennise, D., Smith, K. R. (2017). Small, smart, fast, and cheap: microchip-based sensors to estimate air pollution exposures in rural households. *Sensors*, *17*(8), 1879. https://doi.org/10.3390/s17081879

234. Polidori, A., Papapostolou, V., Feenstra, B., Zhang, H. (2017). Field evaluation of low-cost air quality sensors. *South Coast Air Quality Management District (SCAQMD)*.

235. Potyrailo, R. A. (2016). Multivariable sensors for ubiquitous monitoring of gases in the era of internet of things and industrial internet. *Chemical reviews*, *116*(19), 11877-11923. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00187

236. Jiang, Q., Kresin, F., Bregt, A. K., Kooistra, L., Pareschi, E., Van Putten, E., ..., Wesseling, J. (2016). Citizen sensing for improved urban environmental monitoring. *Journal of Sensors*, *2016*. https://doi.org/10.1155/2016/5656245

237. Sekhar, P. K., Brosha, E. L., Mukundan, R., Garzon, F. (2010). Chemical sensors for environmental monitoring and homeland security. *The Electrochemical Society Interface*, *19*(4), 35.

238. Chow, J. C., Watson, J. G., Lowenthal, D. H., Richards, L. W. (2002). Comparability between PM2. 5 and particle light scattering measurements. *Environmental Monitoring and Assessment*, *79*(1), 29-45. https://doi.org/10.1023/A:1020047307117

239. Sioutas, C., Kim, S., Chang, M., Terrell, L. L., Gong Jr, H. (2000). Field evaluation of a modified DataRAM MIE scattering monitor for real-time PM2.5 mass concentration measurements. *Atmospheric Environment*, *34*(28), 4829-4838. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00244-2

240. Gu, F., Yang, J., Bian, B., He, A. (2007, November). Information entropy characteristic of the light scattering signal amplitude distribution of aerosols. In *Optical Design and Testing III* (Vol. 6834, p. 68343G). International Society for Optics and Photonics. https://doi.org/10.1117/12.757582

241. Quintana, P. J., Samimi, B. S., Kleinman, M. T., Liu, L. J., Soto, K., Warner, G. Y., Bufalino, C., Valencia, J., Francis, D., Hovell, M.H., Delfino, R. J. (2000). Evaluation of a real-time passive personal particle monitor in fixed site residential indoor and ambient measurements. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, *10*(5), 437-445. https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500105

242. Thomas, A., Gebhart, J. (1994). Correlations between gravimetry and light scattering photometry for atmospheric aerosols. *Atmospheric Environment*, *28*(5), 935-938. https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)90251-8

243. Northcross, A. L., Edwards, R. J., Johnson, M. A., Wang, Z. M., Zhu, K., Allen, T., Smith, K. R. (2013). A low-cost particle counter as a realtime fine-particle mass monitor. *Environmental Science: Processes & Impacts*, *15*(2), 433-439. https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)90251-8

244. Kumar, V., Sahu, M. (2021). Evaluation of nine machine learning regression algorithms for calibration of low-cost PM2.5 sensor. *Journal of Aerosol Science*, *157*, 105809. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105809

245. Budde, M., Leiner, S., Köpke, M., Riesterer, J., Riedel, T., Beigl, M. (2019). FeinPhone: Low-cost smartphone camera-based 2D particulate matter sensor. *Sensors*, *19*(3), 749. https://doi.org/10.3390/s19030749

246. Sousan, S., Koehler, K., Thomas, G., Park, J. H., Hillman, M., Halterman, A., Peters, T. M. (2016). Inter-comparison of low-cost sensors for measuring the mass concentration of occupational aerosols. *Aerosol Science and Technology*, *50*(5), 462-473. https://doi.org/10.1080/02786826.2016.1162901

247. López, F., De Frutos, J., González, A. M., Navarro, A. (1992). Integrated optical filters for infrared electrooptical gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *6*(1-3), 170-175. https://doi.org/10.1016/0925-4005(92)80051-X

248. Wang, H., Lenz, H., Szabo, A., Bamberger, J., Hanebeck, U. D. (2007, March). WLAN-based pedestrian tracking using particle filters and low-cost MEMS sensors. In *2007 4th workshop on positioning, navigation and communication* (pp. 1-7). IEEE. https://doi.org/10.1109/WPNC.2007.353604

249. Misas, C. J., Lopez-Higuera, J. M., Lopez-Amo, M. (2006). Adaptive filters applied to the interrogation of photonic sensors. *IEEE Sensors Journal*, *6*(3), 748-754. https://doi.org/10.1109/JSEN.2006.874035

250. Wang, X., Li, T., Sun, S., Corchado, J. M. (2017). A survey of recent advances in particle filters and remaining challenges for multitarget tracking. *Sensors*, *17*(12), 2707. https://doi.org/10.3390/s17122707

251. Kang, D. H., Kim, N. K., Kang, H. W. (2021). Hybrid structure of a ZnO nanowire array on a PVDF nanofiber membrane/nylon mesh for use in smart filters: photoconductive PM filters. *Applied Sciences*, *11*(17), 8006. https://doi.org/10.3390/app11178006

252. Alfano, B., Barretta, L., Del Giudice, A., De Vito, S., Di Francia, G., Esposito, E., ..., Polichetti, T. (2020). A review of low-cost particulate matter sensors from the developers' perspectives. *Sensors*, *20*(23), 6819. https://doi.org/10.3390/s20236819

253. Jovašević-Stojanović, M., Bartonova, A., Topalović, D., Lazović, I., Pokrić, B., Ristovski, Z. (2015). On the use of small and cheaper sensors and devices for indicative citizen-based monitoring of respirable particulate matter. *Environmental Pollution*, *206*, 696-704. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.08.035

254. Su, X., Sutarlie, L., Loh, X. J. (2020). Sensors and analytical technologies for air quality: Particulate matters and bioaerosols. *Chemistry–*

An Asian Journal, *15*(24), 4241-4255. https://doi.org/10.1002/asia.202001051

255. Pope, F. D., Gatari, M., Ng'ang'a, D., Poynter, A., Blake, R. (2018). Airborne particulate matter monitoring in Kenya using calibrated low-cost sensors. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *18*(20), 15403-15418. https://doi.org/10.5194/acp-18-15403-2018

256. Liang, L. (2021). Calibrating low-cost sensors for ambient air monitoring: Techniques, trends, and challenges. *Environmental Research*, *197*, 111163. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111163

257. Dierick, F., Buisseret, F., Eggermont, S. (2021). Low-Cost Sensors and Biological Signals. *Sensors*, *21*(4), 1482. https://doi.org/10.3390/s21041482

258. Buisseret, F., Eggermont, S., Dierick, F. (2021). Low-Cost Sensors and Biological Signals. *Sensors*, 21(4), 1482. https://doi.org/10.3390/s21041482

259. Penza, M. (2020). Low-cost sensors for outdoor air quality monitoring. *Advanced Nanomaterials for Inexpensive Gas Microsensors*, 235-288. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814827-3.00012-8

260. Giordano, M. R., Malings, C., Pandis, S. N., Presto, A. A., McNeill, V. F., Westervelt, D. M., Beekmann, M., Subramanian, R. (2021). From low-cost sensors to high-quality data: A summary of challenges and best practices for effectively calibrating low-cost particulate matter mass sensors. *Journal of Aerosol Science*, *158*, 105833. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105833

261. Frederickson, L. B., Lim, S., Russell, H. S., Kwiatkowski, S., Bonomaully, J., Schmidt, J. A., Hertel, O., Mudway, I., Barrat, B., Johnson, M. S. (2020). Monitoring excess exposure to air pollution for professional drivers in London using low-cost sensors. *Atmosphere*, *11*(7), 749. https://doi.org/10.3390/atmos11070749

262. Sayahi, T., Butterfield, A., Kelly, K. E. (2019). Long-term field evaluation of the Plantower PMS low-cost particulate matter

sensors. *Environmental pollution*, *245*, 932-940. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.065

263. Levy Zamora, M., Xiong, F., Gentner, D., Kerkez, B., Kohrman-Glaser, J., Koehler, K. (2018). Field and laboratory evaluations of the low-cost plantower particulate matter sensor. *Environmental science & technology*, *53*(2), 838-849. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05174

264. Zou, Y., Clark, J. D., May, A. A. (2021). Laboratory evaluation of the effects of particle size and composition on the performance of integrated devices containing Plantower particle sensors. *Aerosol Science and Technology*, 55(7), 848-858. https://doi.org/10.1080/02786826.2021.1905148

265. Caquilpán P, V., Aros G, G., Elgueta A, S., Díaz S, R., Sepúlveda K, G., Sierralta J, C. (2019). Advantages and challenges of the implementation of a low-cost particulate matter monitoring system as a decision-making tool. *Environmental Monitoring and Assessment*, *191*(11), 1-20. Https://doi.org/10.1007/s10661-019-7875-4

266. Yang, C. T., Chen, H. W., Chang, E. J., Kristiani, E., Nguyen, K. L. P., Chang, J. S. (2021). Current advances and future challenges of AIoT applications in particulate matters (PM) monitoring and control. *Journal of Hazardous Materials*, *419*, 126442. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126442

267. Duvall, R. M., Long, R. W., Beaver, M. R., Kronmiller, K. G., Wheeler, M. L., Szykman, J. J. (2016). Performance evaluation and community application of low-cost sensors for ozone and nitrogen dioxide. *Sensors*, *16*(10), 1698. https://doi.org/10.3390/s16101698

268. Olivares, G., Edwards, S. (2015). The Outdoor Dust Information Node (ODIN)–development and performance assessment of a low cost ambient dust sensor. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, *8*(7), 7511-7533. https://doi.org/10.5194/amtd-8-7511-2015

269. Vivacqua, R., Vassallo, R., Martins, F. (2017). A low cost sensors approach for accurate vehicle localization and autonomous driving application. *Sensors*, *17*(10), 2359. https://doi.org/10.3390/s17102359

270. Saeedi, S., El-Sheimy, N. (2015). Activity recognition using fusion of low-cost sensors on a smartphone for mobile navigation application. *Micromachines*, *6*(8), 1100-1134. https://doi.org/10.3390/mi6081100

271. Bernas, M., Płaczek, B., Korski, W., Loska, P., Smyła, J., Szymała, P. (2018). A survey and comparison of low-cost sensing technologies for road traffic monitoring. *Sensors*, *18*(10), 3243. https://doi.org/10.3390/s18103243

272. Schneider, P., Castell, N., Vogt, M., Dauge, F. R., Lahoz, W. A., Bartonova, A. (2017). Mapping urban air quality in near real-time using observations from low-cost sensors and model information. *Environment international*, *106*, 234-247. https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.05.005

273. Popa, A., Hnatiuc, M., Paun, M., Geman, O., Hemanth, D. J., Dorcea, D., Son, L.H., Ghita, S. (2019). An intelligent IoT-based food quality monitoring approach using low-cost sensors. *Symmetry*, *11*(3), 374. https://doi.org/10.3390/sym11030374

274. Sørensen, L. Y., Jacobsen, L. T., Hansen, J. P. (2017). Low cost and flexible UAV deployment of sensors. *Sensors*, *17*(1), 154. https://doi.org/10.3390/s17010154

275. Lim, C. C., Kim, H., Vilcassim, M. R., Thurston, G. D., Gordon, T., Chen, L. C., Lee, K., Heimbinder, M., Kim, S. Y. (2019). Mapping urban air quality using mobile sampling with low-cost sensors and machine learning in Seoul, South Korea. *Environment international*, *131*, 105022. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105022

276. Bigi, A., Mueller, M., Grange, S. K., Ghermandi, G., Hueglin, C. (2018). Performance of NO, NO2 low cost sensors and three calibration approaches within a real world application. *Atmospheric Measurement Techniques*, *11*(6), 3717-3735. https://doi.org/10.5194/amt-11-3717-2018

277. Malings, C., Tanzer, R., Hauryliuk, A., Kumar, S. P., Zimmerman, N., Kara, L. B., Presto, A.A., Subramanian, R. (2019). Development of a general calibration model and long-term performance evaluation of low-cost sensors for air pollutant gas monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, *12*(2), 903-920. https://doi.org/10.5194/amt-12-903-2019

278. Zaidan, M. A., Motlagh, N. H., Fung, P. L., Lu, D., Timonen, H., Kuula, J., ..., Hussein, T. (2020). Intelligent calibration and virtual sensing for integrated low-cost air quality sensors. *IEEE Sensors Journal*, *20*(22), 13638-13652. https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3010316

279. Hasenfratz, D., Saukh, O., Thiele, L. (2012, February). On-the-fly calibration of low-cost gas sensors. In *European Conference on Wireless Sensor Networks* (pp. 228-244). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28169-3_15

280. Venkatraman Jagatha, J., Klausnitzer, A., Chacón-Mateos, M., Laquai, B., Nieuwkoop, E., van der Mark, P., Vogt, U., Schneider, C. (2021). Calibration method for particulate matter low-cost sensors used in ambient air quality monitoring and research. *Sensors*, *21*(12), 3960. https://doi.org/10.3390/s21123960

281. Badura, M., Batog, P., Drzeniecka-Osiadacz, A., Modzel, P. (2019). Regression methods in the calibration of low-cost sensors for ambient particulate matter measurements. *SN Applied Sciences*, 1(6), 1-11. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0630-1

282. Penza, M., Suriano, D., Villani, M. G., Spinelle, L., Gerboles, M. (2014, November). Towards air quality indices in smart cities by calibrated low-cost sensors applied to networks. In *SENSORS*, 2014 IEEE (pp. 2012-2017). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICSENS.2014.6985429

283. Kosmopoulos, G., Salamalikis, V., Pandis, S. N., Yannopoulos, P., Bloutsos, A. A., Kazantzidis, A. (2020). Low-cost sensors for measuring airborne particulate matter: Field evaluation and calibration at a South-

Eastern European site. *Science of The Total Environment*, 748, 141396. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141396

284. Zusman, M., Schumacher, C. S., Gassett, A. J., Spalt, E. W., Austin, E., Larson, T. V., Carvlin, G., Seto, E., Kaufman, J.D., Sheppard, L. (2020). Calibration of low-cost particulate matter sensors: Model development for a multi-city epidemiological study. *Environment international*, 134, 105329. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105329

285. Liu, D., Zhang, Q., Jiang, J., Chen, D. R. (2017). Performance calibration of low-cost and portable particular matter (PM) sensors. *Journal of Aerosol Science*, *112*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.05.011

286. Lin, Y., Dong, W., Chen, Y. (2018). Calibrating low-cost sensors by a two-phase learning approach for urban air quality measurement. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, *2*(1), 1-18. https://doi.org/10.1145/3191750

287. Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M. G., Aleixandre, M., Bonavitacola, F. (2015). Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. Part A: Ozone and nitrogen dioxide. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *215*, 249-257. https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.03.031

288. Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M. G., Aleixandre, M., Bonavitacola, F. (2017). Field calibration of a cluster of low-cost commercially available sensors for air quality monitoring. Part B: NO, CO and CO2. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *238*, 706-715. https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.07.036

289. Markert, J. F., Budde, M., Schindler, G., Klug, M., Beigl, M. (2016, May). Private rendezvous-based calibration of low-cost sensors for participatory environmental sensing. In *Proceedings of the Second International Conference on IoT in Urban Space* (pp. 82-85). https://doi.org/10.1145/2962735.2962754

290. Müller, M., Graf, P., Meyer, J., Pentina, A., Brunner, D., Perez-Cruz, F., ..., Emmenegger, L. (2020). Integration and calibration of non-dispersive infrared (NDIR) CO 2 low-cost sensors and their operation in a sensor network covering Switzerland. *Atmospheric Measurement Techniques*, *13*(7), 3815-3834. https://doi.org/10.5194/amt-13-3815-2020

291. Aguiar, E. F. K., Roig, H. L., Mancini, L. H., de Carvalho, E. N. C. B. (2015). Low-cost sensors calibration for monitoring air quality in the federal district—Brazil. *Journal of environmental protection*, *6*(02), 173. https://doi.org/10.4236/jep.2015.62019

292. van Zoest, V., Osei, F. B., Stein, A., Hoek, G. (2019). Calibration of low-cost NO2 sensors in an urban air quality network. Atmospheric environment, 210, 66-75. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.04.048

293. Miskell, G., Salmond, J. A., Williams, D. E. (2018). Solution to the problem of calibration of low-cost air quality measurement sensors in networks. *ACS sensors*, *3*(4), 832-843. https://doi.org/10.1021/acssensors.8b00074

294. Kim, H., Müller, M., Henne, S., Hüglin, C. (2022). Long-term behavior and stability of calibration models for NO and NO 2 low-cost sensors. *Atmospheric Measurement Techniques*, *15*(9), 2979-2992. https://doi.org/10.5194/amt-15-2979-2022

295. Holstius, D. M., Pillarisetti, A., Smith, K. R., Seto, E. J. A. M. T. (2014). Field calibrations of a low-cost aerosol sensor at a regulatory monitoring site in California. *Atmospheric Measurement Techniques*, *7*(4), 1121-1131. https://doi.org/10.5194/amt-7-1121-2014

296. Zimmerman, N., Presto, A. A., Kumar, S. P., Gu, J., Hauryliuk, A., Robinson, E. S., ..., Subramanian, R. (2018). A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, *11*(1), 291-313. https://doi.org/10.5194/amt-11-291-2018

297. Sayahi, T., Kaufman, D., Becnel, T., Kaur, K., Butterfield, A. E., Collingwood, S., ..., Kelly, K. E. (2019). Development of a calibration chamber to evaluate the performance of low-cost particulate matter sensors. *Environmental Pollution*, *255*, 113131. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113131

298. Jiang, Y., Zhu, X., Chen, C., Ge, Y., Wang, W., Zhao, Z., ..., Kan, H. (2021). On-field test and data calibration of a low-cost sensor for fine particles exposure assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *211*, 111958. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111958

299. Hua, J., Zhang, Y., de Foy, B., Mei, X., Shang, J., Zhang, Y., ..., Zhou, D. (2021). Improved PM2. 5 concentration estimates from low-cost sensors using calibration models categorized by relative humidity. *Aerosol Science and Technology*, *55*(5), 600-613. https://doi.org/10.1080/02786826.2021.1873911

300. Levy Zamora, M., Buehler, C., Lei, H., Datta, A., Xiong, F., Gentner, D. R., Koehler, K. (2022). Evaluating the Performance of Using Low-Cost Sensors to Calibrate for Cross-Sensitivities in a Multipollutant Network. *ACS ES&T Engineering*. https://doi.org/10.1021/acsestengg.1c00367

301. Lee, H., Kang, J., Kim, S., Im, Y., Yoo, S., Lee, D. (2020). Long-term evaluation and calibration of low-cost particulate matter (PM) sensor. *Sensors*, *20*(13), 3617. https://doi.org/10.3390/s20133617

302. Barcelo-Ordinas, J. M., Ferrer-Cid, P., Garcia-Vidal, J., Ripoll, A., Viana, M. (2019). Distributed multi-scale calibration of low-cost ozone sensors in wireless sensor networks. *Sensors*, *19*(11), 2503. https://doi.org/10.3390/s20020363

303. Qin, X., Hou, L., Gao, J., Si, S. (2020). The evaluation and optimization of calibration methods for low-cost particulate matter sensors: Inter-comparison between fixed and mobile methods. *Science of The Total Environment*, *715*, 136791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136791

304. Kureshi, R. R., Mishra, B. K., Thakker, D., John, R., Walker, A., Simpson, S., Thakkar, N., Wante, A. K. (2022). Data-Driven Techniques for Low-Cost Sensor Selection and Calibration for the Use Case of Air Quality Monitoring. Sensors, 22(3), 1093. https://doi.org/10.3390/s22031093

305. Topalović, D. B., Davidović, M. D., Jovanović, M., Bartonova, A., Ristovski, Z., Jovašević-Stojanović, M. (2019). In search of an optimal in-field calibration method of low-cost gas sensors for ambient air pollutants: Comparison of linear, multilinear and artificial neural network approaches. *Atmospheric Environment*, *213*, 640-658. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.06.028

306. Concas, F., Mineraud, J., Lagerspetz, E., Varjonen, S., Liu, X., Puolamäki, K., ..., Tarkoma, S. (2021). Low-cost outdoor air quality monitoring and sensor calibration: A survey and critical analysis. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, *17*(2), 1-44. https://doi.org/10.1145/3446005

307. Chen, C. C., Kuo, C. T., Chen, S. Y., Lin, C. H., Chue, J. J., Hsieh, Y. J., Cheng, C. W., Wu, C. M., Huang, C. M. (2018, October). Calibration of low-cost particle sensors by using machine-learning method. In *2018 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS)* (pp. 111-114). IEEE. https://doi.org/10.1109/APCCAS.2018.8605619

308. Ferrer-Cid, P., Barcelo-Ordinas, J. M., Garcia-Vidal, J., Ripoll, A., Viana, M. (2019). A comparative study of calibration methods for low-cost ozone sensors in IoT platforms. *IEEE Internet of Things Journal*, *6*(6), 9563-9571. https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2929594

309. Wallace, L., Bi, J., Ott, W. R., Sarnat, J., Liu, Y. (2021). Calibration of low-cost PurpleAir outdoor monitors using an improved method of calculating PM2. 5. Atmospheric Environment, 256, 118432. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118432

310. Maag, B., Zhou, Z., Thiele, L. (2018). A survey on sensor calibration in air pollution monitoring deployments. *IEEE Internet of Things Journal*, *5*(6), 4857-4870. https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2853660

311. Sahu, R., Nagal, A., Dixit, K. K., Unnibhavi, H., Mantravadi, S., Nair, S., Simmhan, Y., Mishra, B., Zele, R., Sutaria, R., Motghare, V.M., Kar, P., Tripathi, S. N. (2021). Robust statistical calibration and characterization of portable low-cost air quality monitoring sensors to quantify real-time O3 and NO2 concentrations in diverse environments. *Atmospheric Measurement Techniques*, *14*(1), 37-52. https://doi.org/10.5194/amt-14-37-2021

312. Dallo, F., Zannoni, D., Gabrieli, J., Cristofanelli, P., Calzolari, F., de Blasi, F., ..., Barbante, C. (2021). Calibration and assessment of electrochemical low-cost sensors in remote alpine harsh environments. *Atmospheric Measurement Techniques*, *14*(9), 6005-6021. https://doi.org/10.5194/amt-14-6005-2021

313. Barcelo-Ordinas, J. M., Garcia-Vidal, J., Doudou, M., Rodrigo-Muñoz, S., Cerezo-Llavero, A. (2018, April). Calibrating low-cost air quality sensors using multiple arrays of sensors. In *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/WCNC.2018.8377051

314. Chu, H. J., Ali, M. Z., He, Y. C. (2020). Spatial calibration and PM2. 5 mapping of low-cost air quality sensors. *Scientific reports*, *10*(1), 1-11. https://doi.org/10.1038/s41598-020-79064-w

315. Veiga, T., Munch-Ellingsen, A., Papastergiopoulos, C., Tzovaras, D., Kalamaras, I., Bach, K., Votis, K., Akselsen, S. (2021). From a low-cost air quality sensor network to decision support services: Steps towards data calibration and service development. *Sensors*, *21*(9), 3190. https://doi.org/10.3390/s21093190

316. Patra, S. S., Ramsisaria, R., Du, R., Wu, T., Boor, B. E. (2021). A machine learning field calibration method for improving the performance of

low-cost particle sensors. *Building and Environment*, *190*, 107457. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107457

317. Hojaiji, H., Kalantarian, H., Bui, A. A., King, C. E., Sarrafzadeh, M. (2017, March). Temperature and humidity calibration of a low-cost wireless dust sensor for real-time monitoring. In *2017 IEEE sensors applications symposium (SAS)* (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/SAS.2017.7894056

318. Lee, C. H., Wang, Y. B., Yu, H. L. (2019). An efficient spatiotemporal data calibration approach for the low-cost PM2. 5 sensing network: A case study in Taiwan. *Environment international*, *130*, 104838. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.032

319. Hofman, J., Nikolaou, M., Shantharam, S. P., Stroobants, C., Weijs, S., La Manna, V. P. (2022). Distant calibration of low-cost PM and NO2 sensors; evidence from multiple sensor testbeds. *Atmospheric Pollution Research*, *13*(1), 101246. https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101246

320. Gonzalez, A., Boies, A., Swason, J., Kittelson, D. (2019). Field calibration of low-cost air pollution sensors. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 1-17. https://doi.org/10.5194/amt-2019-299

321. Cavaliere, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, F., Gioli, B., Gualtieri, G., Martelli, F., Matese, A., Toscano, P., Vagnoli, C., Zaldei, A. (2018). Development of low-cost air quality stations for next generation monitoring networks: Calibration and validation of PM2. 5 and PM10 sensors. *Sensors*, *18*(9), 2843. https://doi.org/10.3390/s18092843

322. Wang, Y., Du, Y., Wang, J., Li, T. (2019). Calibration of a low-cost PM2. 5 monitor using a random forest model. *Environment international*, *133*, 105161. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105161

323. Cordero, J. M., Borge, R., Narros, A. (2018). Using statistical methods to carry out in field calibrations of low cost air quality sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *267*, 245-254. https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.04.021

324. Raheja, G., Sabi, K., Sonla, H., Gbedjangni, E. K., McFarlane, C. M., Hodoli, C. G., Westervelt, D. M. (2022). A network of field-calibrated low-cost sensor measurements of PM2. 5 in Lomé, Togo, over one to two years. *ACS Earth and Space Chemistry*, 6(4), 1011-1021. https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.1c00391

325. Manikonda, A., Zíková, N., Hopke, P. K., Ferro, A. R. (2016). Laboratory assessment of low-cost PM monitors. *Journal of Aerosol Science*, *102*, 29-40. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2016.08.010

326. Steinle, S., Reis, S., Sabel, C. E., Semple, S., Twigg, M. M., Braban, C. F., Leeson, S.R., Heal, M.R., Harrison, D., Lin, C., Wu, H. (2015). Personal exposure monitoring of PM2.5 in indoor and outdoor microenvironments. *Science of the Total Environment*, 508, 383-394. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.003

327. Han, I., Symanski, E., Stock, T. H. (2017). Feasibility of using low-cost portable particle monitors for measurement of fine and coarse particulate matter in urban ambient air. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *67*(3), 330-340. https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1241195

328. Williams, R., Kaufman, A., Hanley, T., Rice, J., Garvey, S. (2014). Evaluation of field-deployed low cost PM sensors. EPA/600/R-14/464 (NTIS PB 2015-102104).

329. Wang, Y., Li, J., Jing, H., Zhang, Q., Jiang, J., Biswas, P. (2015). Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement. *Aerosol science and technology*, *49*(11), 1063-1077. https://doi.org/10.1080/02786826.2015.1100710

330. Alvarado, M., Gonzalez, F., Fletcher, A., Doshi, A. (2015). Towards the development of a low cost airborne sensing system to monitor dust particles after blasting at open-pit mine sites. *Sensors*, *15*(8), 19667-19687. https://doi.org/10.3390/s150819667

331. Sousan, S., Koehler, K., Hallett, L., Peters, T. M. (2016). Evaluation of the Alphasense optical particle counter (OPC-N2) and the Grimm portable aerosol spectrometer (PAS-1.108). *Aerosol Science and Technology*, *50*(12), 1352-1365. https://doi.org/10.1080/02786826.2016.1232859

332. Zikova, N., Hopke, P. K., Ferro, A. R. (2017). Evaluation of new low-cost particle monitors for PM2. 5 concentrations measurements. *Journal of Aerosol Science*, *105*, 24-34. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2016.11.010

333. Olivares, G., Longley, I., Coulson, G. (2012). Development of a low-cost device for observing indoor particle levels associated with source activities in the home. International Society of Exposure Science (ISES), Seattle, WA.

334. Kelly, K. E., Whitaker, J., Petty, A., Widmer, C., Dybwad, A., Sleeth, D., Martin, R., Butterfield, A. (2017). Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor. *Environmental pollution*, *221*, 491-500. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.039

335. Austin, E., Novosselov, I., Seto, E., Yost, M. G. (2015). Laboratory evaluation of the Shinyei PPD42NS low-cost particulate matter sensor. *PloS one*, *10*(9), e0137789. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137789

336. Gao, M., Cao, J., Seto, E. (2015). A distributed network of low-cost continuous reading sensors to measure spatiotemporal variations of PM2. 5 in Xi'an, China. *Environmental pollution*, *199*, 56-65. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.01.013

337. Johnson, K. K., Bergin, M. H., Russell, A. G., Hagler, G. S. (2016). Using low cost sensors to measure ambient particulate matter concentrations and on-road emissions factors. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 1-22. https://doi.org/10.5194/amt-2015-331

338. Freitas, M. C., Pacheco, A. M. G., Verburg, T. G., Wolterbeek, H. T. (2010). Effect of particulate matter, atmospheric gases, temperature, and humidity on respiratory and circulatory diseases' trends in Lisbon,

Portugal. *Environmental Monitoring and Assessment*, *162*(1), 113-121. https://doi.org/10.1007/s10661-009-0780-5

339. Zhang, L., Cheng, Y., Zhang, Y., He, Y., Gu, Z., Yu, C. (2017). Impact of air humidity fluctuation on the rise of PM mass concentration based on the high-resolution monitoring data. *Aerosol and Air Quality Research*, *17*(2), 543-552. https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.07.0296

340. Csavina, J., Field, J., Félix, O., Corral-Avitia, A. Y., Sáez, A. E., Betterton, E. A. (2014). Effect of wind speed and relative humidity on atmospheric dust concentrations in semi-arid climates. *Science of the Total Environment*, *487*, 82-90. https://doi.org/j.scitotenv.2014.03.138

341. Wang, J., Ogawa, S. (2015). Effects of meteorological conditions on PM2.5 concentrations in Nagasaki, Japan. *International journal of environmental research and public health*, *12*(8), 9089-9101. https://doi.org/10.3390/ijerph120809089

342. Tai, A. P., Mickley, L. J., Jacob, D. J. (2010). Correlations between fine particulate matter (PM2.5) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM2. 5 to climate change. *Atmospheric environment*, *44*(32), 3976-3984. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.060

343. Huang, C. H., Tai, C. Y. (2008). Relative humidity effect on PM2.5 readings recorded by collocated beta attenuation monitors. *Environmental Engineering Science*, *25*(7), 1079-1090. https://doi.org/10.1089/ees.2007.0142

344. Wang, J., Wang, Y., Liu, H., Yang, Y., Zhang, X., Li, Y., Zhang, Y., Deng, G. (2013). Diagnostic identification of the impact of meteorological conditions on PM2.5 concentrations in Beijing. *Atmospheric Environment*, *81*, 158-165. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.08.033

345. Zhang, X., Xu, X., Ding, Y., Liu, Y., Zhang, H., Wang, Y., Zhong, J. (2019). The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on PM2.5

mass reduction in key regions in China. *Science China Earth Sciences*, *62*(12), 1885-1902. https://doi.org/10.1007/s11430-019-9343-3

346. Chen, Z., Chen, D., Zhao, C., Kwan, M. P., Cai, J., Zhuang, Y., Zhao, B., Wang, X., Chen, B., Yang, J., Li, R., He, B., Gao, B., Wang, K., Xu, B. (2020). Influence of meteorological conditions on PM2.5 concentrations across China: A review of methodology and mechanism. *Environment international*, *139*, 105558. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105558

347. He, J., Gong, S., Yu, Y., Yu, L., Wu, L., Mao, H., Song, C., Zhao, S., Liu, H., Li, X., Li, R. (2017). Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014–2015 in major Chinese cities. *Environmental pollution*, *223*, 484-496. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.050

348. Kamińska, J. A. (2018). The use of random forests in modelling short-term air pollution effects based on traffic and meteorological conditions: a case study in Wrocław. *Journal of environmental management*, *217*, 164-174. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.094

349. Dayan, U., Levy, I. (2005). The influence of meteorological conditions and atmospheric circulation types on PM 10 and visibility in Tel Aviv. *Journal of Applied Meteorology*, *44*(5), 606-619. https://doi.org/10.1175/JAM2232.1

350. Raisi, L., Aleksandropoulou, V., Lazaridis, M., Katsivela, E. (2013). Size distribution of viable, cultivable, airborne microbes and their relationship to particulate matter concentrations and meteorological conditions in a Mediterranean site. *Aerobiologia*, *29*(2), 233-248. https://doi.org/10.1007/s10453-012-9276-9

351. Zhang, Q., Quan, J., Tie, X., Li, X., Liu, Q., Gao, Y., Zhao, D. (2015). Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, *502*, 578-584. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.079

352. Jo, E. J., Lee, W. S., Jo, H. Y., Kim, C. H., Eom, J. S., Mok, J. H., Kim, M. H., Lee, K., Kim, K. U., Park, H. K. (2017). Effects of particulate matter on respiratory disease and the impact of meteorological factors in Busan, Korea. *Respiratory Medicine*, *124*, 79-87. https://doi.org/10.1016/j.rmed.2017.02.010

353. Dung, N. A., Son, D. H., Tri, D. Q. (2019). Effect of Meteorological Factors on PM 10 Concentration in Hanoi, Vietnam. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, *7*(11), 138. https://doi.org/10.4236/gep.2019.711010

354. Galindo, N., Varea, M., Gil-Moltó, J., Yubero, E., Nicolás, J. (2011). The influence of meteorology on particulate matter concentrations at an urban Mediterranean location. *Water, Air, & Soil Pollution*, *215*(1), 365-372. https://doi.org/ 10.1007/s11270-010-0484-z

355. Pan, C., Kang, Z. M. (2022). Impact of Meteorological Conditions on PM 2.5 in Jiangsu Province from 2001 to 2019. *Huan jing ke xue= Huanjing kexue*, *43*(2), 649-662. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202104292

356. Jacob, D. J., Winner, D. A. (2009). Effect of climate change on air quality. *Atmospheric environment*, *43*(1), 51-63. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.051

357. Zhang, H., Wang, Y., Hu, J., Ying, Q., Hu, X. M. (2015). Relationships between meteorological parameters and criteria air pollutants in three megacities in China. *Environmental research*, *140*, 242-254. https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.04.004

358. Wang, X., Zhang, R. (2020). Effects of atmospheric circulations on the interannual variation in PM 2.5 concentrations over the Beijing–Tianjin–Hebei region in 2013–2018. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *20*(13), 7667-7682. https://doi.org/10.5194/acp-20-7667-2020

359. Fine, G. F., Cavanagh, L. M., Afonja, A., Binions, R. (2010). Metal oxide semi-conductor gas sensors in environmental monitoring. *Sensors*, *10*(6), 5469-5502. https://doi.org/10.3390/s100605469

360. Binions, R., Naik, A. J. T. (2013). Metal oxide semiconductor gas sensors in environmental monitoring. In *Semiconductor gas sensors* (pp. 433-466). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1533/9780857098665.4.433

361. Masson, N., Piedrahita, R., Hannigan, M. (2015). Approach for quantification of metal oxide type semiconductor gas sensors used for ambient air quality monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *208*, 339-345. https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.11.032

362. Jaaniso, R., Tan, O. K. (Eds.). (2013). *Semiconductor gas sensors*. Elsevier.

363. Peterson, P. J., Aujla, A., Grant, K. H., Brundle, A. G., Thompson, M. R., Vande Hey, J., Leigh, R. J. (2017). Practical use of metal oxide semiconductor gas sensors for measuring nitrogen dioxide and ozone in urban environments. *Sensors*, *17*(7), 1653. https://doi.org/10.3390/s17071653

364. Burgués, J., Marco, S. (2018). Low power operation of temperature-modulated metal oxide semiconductor gas sensors. *Sensors*, *18*(2), 339. https://doi.org/10.3390/s18020339

365. Isaac, N. A., Pikaar, I., Biskos, G. (2022). Metal oxide semiconducting nanomaterials for air quality gas sensors: operating principles, performance, and synthesis techniques. *Microchimica Acta*, *189*(5), 1-22. https://doi.org/10.1007/s00604-022-05254-0

366. Potyrailo, R. A., Go, S., Sexton, D., Li, X., Alkadi, N., Kolmakov, A., Amm, B., St-Pierre, R., Scherer, B., Nayeri, M., Wu, G., Collazo-Davila, C., Forman, D., Calvert, C., Mack, C., McConnell, P. (2020). Extraordinary performance of semiconducting metal oxide gas sensors using dielectric excitation. *Nature Electronics*, *3*(5), 280-289. https://doi.org/10.1038/s41928-020-0402-3

367. Liu, H., Zhang, L., Li, K. H. H., Tan, O. K. (2018). Microhotplates for metal oxide semiconductor gas sensor applications—Towards the CMOS-MEMS monolithic approach. *Micromachines*, *9*(11), 557. https://doi.org/10.3390/mi9110557

368. Baur, T., Amann, J., Schultealbert, C., Schütze, A. (2021). Field Study of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors in Temperature Cycled Operation for Selective VOC Monitoring in Indoor Air. *Atmosphere*, *12*(5), 647. https://doi.org/10.3390/atmos12050647

369. Moseley, P. T. (2017). Progress in the development of semiconducting metal oxide gas sensors: a review. *Measurement Science and Technology*, *28*(8), 082001. https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa7443

370. Palacín, J., Martínez, D., Clotet, E., Pallejà, T., Burgués, J., Fonollosa, J., Pardo, A., Marco, S. (2019). Application of an array of metal-oxide semiconductor gas sensors in an assistant personal robot for early gas leak detection. *Sensors*, *19*(9), 1957. https://doi.org/10.3390/s19091957

371. Baur, T., Schultealbert, C., Schütze, A., Sauerwald, T. (2018). Novel method for the detection of short trace gas pulses with metal oxide semiconductor gas sensors. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, *7*(1), 411-419. https://doi.org/10.5194/jsss-7-411-2018

372. Zhang, C., Luo, Y., Xu, J., Debliquy, M. (2019). Room temperature conductive type metal oxide semiconductor gas sensors for NO2 detection. *Sensors and Actuators A: Physical*, *289*, 118-133. https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.02.027

373. Galatsis, K., Wlodarski, W., Kalantar-Zadeh, K., Trinchi, A. (2002, December). Investigation of gas sensors for cabin air quality monitoring. In *2002 Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices. COMMAD 2002. Proceedings (Cat. No. 02EX601)* (pp. 229-232). IEEE. https://doi.org/10.1109/COMMAD.2002.1237234

374. Mahajan, S., Jagtap, S. (2020). Metal-oxide semiconductors for carbon monoxide (CO) gas sensing: A review. *Applied materials today*, *18*, 100483. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100483

375. Neri, G. (2015). First fifty years of chemoresistive gas sensors. *Chemosensors*, *3*(1), 1-20. https://doi.org/10.3390/chemosensors3010001

376. Wetchakun, K., Samerjai, T., Tamaekong, N., Liewhiran, C., Siriwong, C., Kruefu, V., Wisitsoraat, A., Tuantranont, A., Phanichphant, S. (2011). Semiconducting metal oxides as sensors for environmentally hazardous gases. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *160*(1), 580-591. https://doi.org/10.1016/j.snb.2011.08.032

377. Mirzaei, A., Leonardi, S. G., Neri, G. (2016). Detection of hazardous volatile organic compounds (VOCs) by metal oxide nanostructures-based gas sensors: A review. *Ceramics international*, *42*(14), 15119-15141. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.145

378. Lin, T., Lv, X., Hu, Z., Xu, A., Feng, C. (2019). Semiconductor metal oxides as chemoresistive sensors for detecting volatile organic compounds. *Sensors*, *19*(2), 233. https://doi.org/10.3390/s19020233

379. Mirzaei, A., Kim, H. W., Kim, S. S., Neri, G. (2019). Nanostructured semiconducting metal oxide gas sensors for acetaldehyde detection. *Chemosensors*, *7*(4), 56. https://doi.org/10.3390/chemosensors7040056

380. Inoue, T., Ohtsuka, K., Yoshida, Y., Matsuura, Y., Kajiyama, Y. (1995). Metal oxide semiconductor NO2 sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *25*(1-3), 388-391. https://doi.org/10.1016/0925-4005(95)85087-2

381. Meixner, H., Gerblinger, J., Lampe, U., Fleischer, M. (1995). Thin-film gas sensors based on semiconducting metal oxides. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *23*(2-3), 119-125. https://doi.org/10.1016/0925-4005(94)01266-K

382. Chai, H., Zheng, Z., Liu, K., Xu, J., Wu, K., Luo, Y., ..., Zhang, C. (2022). Stability of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 22(6), 5470-5481. https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3148264

383. Bastuck, M., Baur, T., Richter, M., Mull, B., Schütze, A., Sauerwald, T. (2018). Comparison of ppb-level gas measurements with a metal-oxide semiconductor gas sensor in two independent laboratories. *Sensors and*

Actuators B: Chemical, *273*, 1037-1046. https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.06.097

384. Nikolic, M. V., Milovanovic, V., Vasiljevic, Z. Z., Stamenkovic, Z. (2020). Semiconductor gas sensors: Materials, technology, design, and application. *Sensors*, *20*(22), 6694. https://doi.org/10.3390/s20226694

385. Sadik, O. A., Van Emon, J. M. (1996). Applications of electrochemical immunosensors to environmental monitoring. *Biosensors and Bioelectronics*, *11*(8), i-x. https://doi.org/10.1016/0956-5663(96)85936-7

386. Pokric, B., Krco, S., Drajic, D., Pokric, M., Jokic, I., Stojanovic, M. J. (2014, July). ekoNET-environmental monitoring using low-cost sensors for detecting gases, particulate matter, and meteorological parameters. In *2014 Eighth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing* (pp. 421-426). IEEE. https://doi.org/10.1109/IMIS.2014.57

387. Kumar, A., Hancke, G. P. (2014). Energy efficient environment monitoring system based on the IEEE 802.15. 4 standard for low cost requirements. *IEEE Sensors Journal*, *14*(8), 2557-2566. https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2313348

388. Mead, M. I., Popoola, O. A. M., Stewart, G. B., Landshoff, P., Calleja, M., Hayes, M., Baldovi,J.J., McLeod, M. W., Hodgson,T. F., Dicks,J., Lewis, A., Cohen, J., Baron, R., Saffel, J. R., Jones, R. L. (2013). The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks. *Atmospheric Environment*, *70*, 186-203. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.060

389. Hanrahan, G., Patil, D. G., Wang, J. (2004). Electrochemical sensors for environmental monitoring: design, development and applications. *Journal of environmental monitoring*, *6*(8), 657-664. https://doi.org/10.1039/B403975K

390. Tian, B., Hou, K. M., Diao, X., Shi, H., Zhou, H., Wang, W. (2019). Environment-adaptive calibration system for outdoor low-cost

electrochemical gas sensors. *IEEE Access*, *7*, 62592-62605. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2916826

391. Stetter, J. R., Li, J. (2008). Amperometric gas sensors a review. *Chemical reviews*, *108*(2), 352-366. https://doi.org/10.1021/cr0681039

392. Xiong, L., Compton, R. G. (2014). Amperometric gas detection: A review. *Int. J. Electrochem. Sci*, *9*(12), 7152-7181.

393. Helm, I., Jalukse, L., Leito, I. (2010). Measurement uncertainty estimation in amperometric sensors: A tutorial review. *Sensors*, *10*(5), 4430-4455. https://doi.org/10.3390/s100504430

394. Cao, Z., Buttner, W. J., Stetter, J. R. (1992). The properties and applications of amperometric gas sensors. *Electroanalysis*, *4*(3), 253-266. https://doi.org/10.1002/elan.1140040302

395. Baron, R., Saffell, J. (2017). Amperometric gas sensors as a low cost emerging technology platform for air quality monitoring applications: A review. *ACS sensors*, *2*(11), 1553-1566. https://doi.org/10.1021/acssensors.7b00620

396. Knake, R., Jacquinot, P., Hodgson, A. W., Hauser, P. C. (2005). Amperometric sensing in the gas-phase. *Analytica chimica acta*, *549*(1-2), 1-9. https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.06.007

397. Alber, K. S., Cox, J. A., Kulesza, P. J. (1997). Solid-state amperometric sensors for gas phase analytes: A review of recent advances. *Electroanalysis*, *9*(2), 97-101. https://doi.org/10.1002/elan.1140090202

398. Opekar, F., Štulík, K. (2002). Amperometric solid-state gas sensors: materials for their active components. *Critical reviews in analytical chemistry*, *32*(3), 253-259. https://doi.org/10.1080/10408340290765551

399. Carter, M. T., Stetter, J. R., Findlay, M. W., Meulendyk, B. J., Patel, V., Peaslee, D. (2016). Amperometric gas sensors: from classical industrial

health and safety to environmental awareness and public health. *ECS Transactions*, *75*(16), 91.

400. Chung, P. R., Tzeng, C. T., Ke, M. T., Lee, C. Y. (2013). Formaldehyde gas sensors: a review. *Sensors*, *13*(4), 4468-4484. https://doi.org/10.3390/s130404468

401. Awang, Z. (2014). Gas sensors: A review. *Sens. Transducers*, *168*(4), 61-75.

402. Zohora, S. E., Khan, A. M., Hundewale, N. (2013). Chemical sensors employed in electronic noses: A review. *Advances in computing and information technology*, 177-184. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31600-5_18

403. Karthikeyan, S., Pandya, H. M., Sharma, M. U., Gopal, K. (2015). Gas sensors-a review. *J. Environ. Nanotechnol*, *4*(4), 1-14. https://doi.org/10.13074/jent.2015.12.153163

404. Ota, K. I., Kreysa, G., Savinell, R. F. (Eds.). (2014). *Encyclopedia of applied electrochemistry*. New York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6996-5

405. Kalvoda, R. (1990). Electrochemical analysis for environmental control. *Electroanalysis*, *2*(5), 341-346. https://doi.org/10.1002/elan.1140020503

406. Li, T., Wu, Y., Huang, J., Zhang, S. (2017). Gas sensors based on membrane diffusion for environmental monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *243*, 566-578. https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.12.026

407. Afshar-Mohajer, N., Zuidema, C., Sousan, S., Hallett, L., Tatum, M., Rule, A. M., ..., Koehler, K. (2018). Evaluation of low-cost electro-chemical sensors for environmental monitoring of ozone, nitrogen dioxide, and carbon monoxide. *Journal of occupational and environmental hygiene*, *15*(2), 87-98. https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1388918

408. Wang, J. (2002). Portable electrochemical systems. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *21*(4), 226-232. https://doi.org/10.1016/S0165-9936(02)00402-8

409. Sun, L., Westerdahl, D., Ning, Z. (2017). Development and evaluation of a novel and cost-effective approach for low-cost NO2 sensor drift correction. *Sensors*, *17*(8), 1916. https://doi.org/10.3390/s17081916

410. Sun, L., Wong, K. C., Wei, P., Ye, S., Huang, H., Yang, F., Westerdahl, D., Louie, P. K. K., Luk, C. W. Y., Ning, Z. (2016). Development and application of a next generation air sensor network for the Hong Kong marathon 2015 air quality monitoring. *Sensors*, *16*(2), 211. https://doi.org/10.3390/s16020211

411. Popoola, O. A., Stewart, G. B., Mead, M. I., Jones, R. L. (2016). Development of a baseline-temperature correction methodology for electrochemical sensors and its implications for long-term stability. *Atmospheric environment*, *147*, 330-343. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.10.024

412. Yin, X., Zhang, L., Tian, F., Zhang, D. (2015). Temperature modulated gas sensing E-nose system for low-cost and fast detection. *IEEE Sensors Journal*, *16*(2), 464-474. https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2483901

413. Manzoli, A., Steffens, C., Paschoalin, R. T., Correa, A. A., Alves, W. F., Leite, F. L., Herrmann, P. S. (2011). Low-cost gas sensors produced by the graphite line-patterning technique applied to monitoring banana ripeness. *Sensors*, *11*(6), 6425-6434. https://doi.org/10.3390/s110606425

414. Hu, S. C., Wang, Y. C., Huang, C. Y., Tseng, Y. C. (2011). Measuring air quality in city areas by vehicular wireless sensor networks. *Journal of Systems and Software*, *84*(11), 2005-2012. https://doi.org/10.1016/j.jss.2011.06.043

415. Al Barakeh, Z., Breuil, P., Redon, N., Pijolat, C., Locoge, N., Viricelle, J. P. (2017). Development of a normalized multi-sensors system for low cost

on-line atmospheric pollution detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *241*, 1235-1243. https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.10.006

416. Johannessen, L. N., Grimstad, H. J., Skjetne, J. E., Myklebust, I. N., Svendsen, K. V. H. (2020). Embedded systems and the Internet of Things: Can low-cost gas sensors be used in risk assessment of occupational exposure? *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, *17*(10), 495-503. https://doi.org/10.1080/15459624.2020.1798453

417. Heimann, I., Bright, V. B., McLeod, M. W., Mead, M. I., Popoola, O. A. M., Stewart, G. B., Jones, R. L. (2015). Source attribution of air pollution by spatial scale separation using high spatial density networks of low cost air quality sensors. *Atmospheric Environment*, *113*, 10-19. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.057

418. Honeycutt, W. T., Ley, M. T., Materer, N. F. (2019). Precision and limits of detection for selected commercially available, low-cost carbon dioxide and methane gas sensors. *Sensors*, *19*(14), 3157. https://doi.org/10.3390/s19143157

419. Tanaka, Y., Nakamoto, T., Moriizumi, T. (2006). Study of highly sensitive smell sensing system using gas detector tube combined with optical sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *119*(1), 84-88. https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.11.068

420. Bruno, C., Licciardello, A., Nastasi, G. A. M., Passaniti, F., Brigante, C., Sudano, F., ..., Alessi, E. (2021, April). Embedded artificial intelligence approach for gas recognition in smart agriculture applications using low cost mox gas sensors. In *2021 Smart Systems Integration (SSI)* (pp. 1-5). IEEE. https://doi.org/10.1109/SSI52265.2021.9467029

421. Love, C., Nazemi, H., El-Masri, E., Ambrose, K., Freund, M. S., Emadi, A. (2021). A review on advanced sensing materials for agricultural gas sensors. *Sensors*, *21*(10), 3423. https://doi.org/10.3390/s21103423

422. Kumar, R., Jaiswal, M., Kushwaha, N., Bansal, S., Mazumder, N., Mittal, J. (2021). Nanomaterial-Based Gas Sensors for Agriculture Sector.

In *Biosensors in Agriculture: Recent Trends and Future Perspectives* (pp. 51-80). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66165-6_4

423. Nasiri, N., Clarke, C. (2019). Nanostructured chemiresistive gas sensors for medical applications. *Sensors*, *19*(3), 462. https://doi.org/10.3390/s19030462

424. Righettoni, M., Amann, A., Pratsinis, S. E. (2015). Breath analysis by nanostructured metal oxides as chemo-resistive gas sensors. *Materials Today*, *18*(3), 163-171. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.08.017

425. Falohun, A. S., Oke, A. O., Abolaji, B. M., Oladejo, O. E. (2016). Dangerous gas detection using an integrated circuit and MQ-9. *International Journal of Computer Applications*, *135*(7), 30-34.

426. Kodali, R. K., Yerroju, S. (2017, December). IoT based smart emergency response system for fire hazards. In *2017 3rd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT)* (pp. 194-199). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICATCCT.2017.8389132

427. Jain, P. C., Kushwaha, R. (2012, December). Wireless gas sensor network for detection and monitoring of harmful gases in utility areas and industries. In *2012 Sixth International Conference on Sensing Technology (ICST)* (pp. 642-646). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICSensT.2012.6461759

428. Cho, Y., Smits, K. M., Riddick, S. N., Zimmerle, D. J. (2022). Calibration and field deployment of low-cost sensor network to monitor underground pipeline leakage. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *355*, 131276. https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.131276

429. Williams, R., Kilaru, V., Snyder, E., Kaufman, A., Dye, T., Rutter, A., Russel, A., Hafner, H. (2014). Air sensor guidebook. *US Environmental Protection Agency*.

430. Borrego, C., Costa, A. M., Ginja, J., Amorim, M., Coutinho, M., Karatzas, K., Sioumis, Th., Katsifarakis, N., Konstantinidis, K., De Vito, S., Esposito, E., Smith, P., Andre, N., Gerard, P., Francis, L. A., Castell, N.,

Schneider, P., Viana, M., Minguillon, M. C., Reimringer, W., Otjes, R. P., von Sicard, O., Pohle, R., Elen, B., Suriano, D., Pfister, V., Prato, M., Dipinto, S., Penza, M. (2016). Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise. *Atmospheric Environment*, *147*, 246-263. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.050

431. Spinelle, L., Gerboles, M., Aleixandre, M. (2015). Performance evaluation of amperometric sensors for the monitoring of O3 and NO2 in ambient air at ppb level. *Procedia engineering*, *120*, 480-483. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.676

432. Lin, C., Gillespie, J., Schuder, M. D., Duberstein, W., Beverland, I. J., Heal, M. R. (2015). Evaluation and calibration of Aeroqual series 500 portable gas sensors for accurate measurement of ambient ozone and nitrogen dioxide. *Atmospheric Environment*, *100*, 111-116. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.002

433. Wahlborg, D., Björling, M., Mattsson, M. (2021). Evaluation of field calibration methods and performance of AQMesh, a low-cost air quality monitor. *Environmental monitoring and assessment*, *193*(5), 1-21. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09033-x

434. Castell, N., Dauge, F. R., Dongol, R., Vogt, M., Schneider, P. (2016, April). Uncertainty in air quality observations using low-cost sensors. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EPSC2016-5692).

435. Margaritis, D., Keramydas, C., Papachristos, I., Lambropoulou, D. (2021). Calibration of Low-cost Gas Sensors for Air Quality Monitoring. *Aerosol and Air Quality Research*, *21*, 210073. https://doi.org/10.4209/aaqr.210073

436. Williams, R., Long, R., Beaver, M., Kaufman, A., Zeiger, F., Heimbinder, M., Hang, I., Yap, R., Acharya, B., Ginwald, B., Kupcho, K., Robinson, S., Zaouak, O., Aubert, B., Hannigan, M., Piedrahita, R., Masson, N., Moran, B., Rook, M., Heppner, P., Cogar, C., Nikzad, N., Griswold,

W. *Sensor Evaluation Report, US Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2014*. EPA/600/R-14/143 (NTIS PB2015-100611).

437. Lewis, A., Edwards, P. (2016). Validate personal air-pollution sensors. *Nature*, *535*(7610), 29-31. https://doi.org/10.1038/535029a

438. Plaisance, H., Piechocki-Minguy, A., Garcia-Fouque, S., Galloo, J. C. (2004). Influence of meteorological factors on the NO2 measurements by passive diffusion tube. *Atmospheric Environment*, *38*(4), 573-580. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.09.073

439. Müller, I., Erbertseder, T., Taubenböck, H. (2022). Tropospheric NO2: Explorative analyses of spatial variability and impact factors. *Remote Sensing of Environment*, *270*, 112839. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112839

440. Samad, A., Obando Nuñez, D. R., Solis Castillo, G. C., Laquai, B., Vogt, U. (2020). Effect of relative humidity and air temperature on the results obtained from low-cost gas sensors for ambient air quality measurements. *Sensors*, *20*(18), 5175. https://doi.org/10.3390/s20185175

441. Breitegger, P., Schweighofer, B., Wegleiter, H., Knoll, M., Lang, B., Bergmann, A. (2020). Towards low-cost QEPAS sensors for nitrogen dioxide detection. *Photoacoustics*, *18*, 100169. https://doi.org/10.1016/j.pacs.2020.100169

442. Han, P., Mei, H., Liu, D., Zeng, N., Tang, X., Wang, Y., Pan, Y. (2021). Calibrations of Low-Cost Air Pollution Monitoring Sensors for CO, NO2, O3, and SO2. *Sensors*, *21*(1), 256. https://doi.org/10.3390/s21010256

443. Vajs, I., Drajic, D., Gligoric, N., Radovanovic, I., Popovic, I. (2021). Developing Relative Humidity and Temperature Corrections for Low-Cost Sensors Using Machine Learning. *Sensors*, *21*(10), 3338. https://doi.org/10.3390/s21103338

444. Miech, J. A., Stanton, L., Gao, M., Micalizzi, P., Uebelherr, J., Herckes, P., Fraser, M. P. (2021). Calibration of Low-Cost NO2 Sensors through Environmental Factor Correction. *Toxics*, *9*(11), 281. https://doi.org/10.3390/toxics9110281

445. Spinelle, L., Aleixandre, M., Gerboles, M. (2013). Protocol of evaluation and calibration of low-cost gas sensors for the monitoring of air pollution. *Publication Office of the European Union, Luxembourg*.

446. Hossain, M., Saffell, J., Baron, R. (2016). Differentiating NO2 and O3 at low cost air quality amperometric gas sensors. *ACS Sensors*, *1*(11), 1291-1294. https://doi.org/10.1021/acssensors.6b00603

447. Dieguez, A., Romano-Rodrıguez, A., Alay, J. L., Morante, J. R., Barsan, N., Kappler, J., Weimar, U., Göpel, W. (2000). Parameter optimisation in SnO2 gas sensors for NO2 detection with low cross-sensitivity to CO: sol–gel preparation, film preparation, powder calcination, doping and grinding. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *65*(1-3), 166-168. https://doi.org/10.1016/S0925-4005(99)00339-1

448. Cantalini, C., Pelino, M., Sun, H. T., Faccio, M., Santucci, S., Lozzi, L., Passacantando, M. (1996). Cross sensitivity and stability of NO2 sensors from WO3 thin film. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *35*(1-3), 112-118. https://doi.org/10.1016/S0925-4005(97)80039-1

449. Khan, M. A. H., Thomson, B., Debnath, R., Motayed, A., Rao, M. V. (2020). Nanowire-based sensor array for detection of cross-sensitive gases using PCA and machine learning algorithms. *IEEE Sensors Journal*, *20*(11), 6020-6028. https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2972542

450. Johansson, J. K., Mellqvist, J., Samuelsson, J., Offerle, B., Lefer, B., Rappenglück, B., Flynn, J., Yarwood, G. (2014). Emission measurements of alkenes, alkanes, SO2, and NO2 from stationary sources in Southeast Texas over a 5 year period using SOF and mobile DOAS. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *119*(4), 1973-1991. https://doi.org/10.1002/2013JD020485

451. Oletic, D., Jelicic, V., Antolovic, D., Bilas, V. (2014, November). Energy-efficient atmospheric CO concentration sensing with on-demand operating MOX gas sensor. In *SENSORS, 2014 IEEE* (pp. 795-798). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICSENS.2014.6985119

452. Oletic, D., Bilas, V. (2013). Empowering smartphone users with sensor node for air quality measurement. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 450, No. 1, p. 012028). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1742-6596/450/1/012028

453. Wen, T. H., Jiang, J. A., Sun, C. H., Juang, J. Y., Lin, T. S. (2013). Monitoring street-level spatial-temporal variations of carbon monoxide in urban settings using a wireless sensor network (WSN) framework. *International journal of environmental research and public health*, *10*(12), 6380-6396. https://doi.org/10.3390/ijerph10126380

454. Yaswanth, D., Umar, S. (2013). A Study on Pollution Monitoring system in Wireless Sensor Networks. *International Journal of Science, Engineering and Computer Technology*, *3*(9), 324.

455. Jelicic, V., Oletic, D., Sever, T., Bilas, V. (2015, April). Evaluation of mox gas sensor transient response for low-power operation. In *2015 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)* (pp. 1-5). IEEE. https://doi.org/10.1109/SAS.2015.7133584

456. Yaswanth, D., Satwik, B. B. (2014). A Study on Pollution Monitoring system in Wireless Sensor Networks. *Global Journal of Computer Science and Technology*.

457. Rossi, M., Brunelli, D. (2017). Gas sensing on unmanned vehicles: Challenges and opportunities. In *2017 New Generation of CAS (NGCAS)* (pp. 117-120). IEEE. https://doi.org/10.1109/NGCAS.2017.58

458. Saha, H. N., Auddy, S., Chatterjee, A., Pal, S., Pandey, S., Singh, R., Singh, R., Sharan, P., Banerjee, S., Ghosh, D., Maity, A. (2017). Pollution control using internet of things (IoT). In *2017 8th Annual Industrial Automation and Electromechanical Engineering Conference (IEMECON)* (pp. 65-68). IEEE. https://doi.org/10.1109/IEMECON.2017.8079563

459. Theunis, J., Stevens, M., Botteldooren, D. (2017). Sensing the environment. In *Participatory Sensing, Opinions and Collective*

Awareness (pp. 21-46). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25658-0_2

460. Taştan, M., Gökozan, H. (2019). Real-time monitoring of indoor air quality with internet of things-based E-nose. *Applied Sciences*, *9*(16), 3435. https://doi.org/10.3390/app9163435

461. Bathiya, B., Srivastava, S., Mishra, B. (2016, December). Air pollution monitoring using wireless sensor network. In *2016 IEEE international WIE conference on electrical and computer engineering (WIECON-ECE)* (pp. 112-117). IEEE. https://doi.org/10.1109/WIECON-ECE.2016.8009098

462. Suárez, J. I., Arroyo, P., Lozano, J., Herrero, J. L., Padilla, M. (2018). Bluetooth gas sensing module combined with smartphones for air quality monitoring. *Chemosphere*, *205*, 618-626. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.154

463. Lozano, J., Suárez, J. I., Meléndez, F., Rodríguez, S., Arroyo, P., Herrero, J. L., Carmona, P. (2019, June). Personal electronic systems for citizen measurements of air quality. In *2019 5th Experiment International Conference* (pp. 315-319). https://doi.org/10.1109/EXPAT.2019.8876471

464. Shelestov, A., Sumilo, L., Lavreniuk, M., Vasiliev, V., Bulanaya, T., Gomilko, I., Kolotii, A., Medianovskyi, K., Skakun, S. (2018, July). Indoor and outdoor air quality monitoring on the base of intelligent sensors for smart city. In *XVIII International Conference on Data Science and Intelligent Analysis of Information* (pp. 134-145). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97885-7_14

465. Cross, E. S., Williams, L. R., Lewis, D. K., Magoon, G. R., Onasch, T. B., Kaminsky, M. L., Worsnop, D. R., Jayne, J. T. (2017). Use of electrochemical sensors for measurement of air pollution: correcting interference response and validating measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, *10*(9), 3575-3588. https://doi.org/10.5194/amt-10-3575-2017

466. Liu, X., Jayaratne, R., Thai, P., Kuhn, T., Zing, I., Christensen, B., Lamont, R., Dunbabin, M., Zhu, S., Gao, J., Wainwright, D., Neale, D., Kan, R., Kirkwood, J., Morawska, L. (2020). Low-cost sensors as an alternative for long-term air quality monitoring. *Environmental research*, *185*, 109438. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109438

467. Bertrand, L., Dawkins, L., Jayaratne, R., Morawska, L. (2020). How to choose healthier urban biking routes: CO as a proxy of traffic pollution. *Heliyon*, *6*(6), e04195. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04195

468. Casey, J. G., Ortega, J., Coffey, E., Hannigan, M. (2018). Low-cost measurement techniques to characterize the influence of home heating fuel on carbon monoxide in Navajo homes. *Science of the Total Environment*, *625*, 608-618. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.312

469. Zuidema, C., Sousan, S., Stebounova, L. V., Gray, A., Liu, X., Tatum, M., Stroh, O., Thomas, G., Peters, T., Koehler, K. (2019). Mapping occupational hazards with a multi-sensor network in a heavy-vehicle manufacturing facility. *Annals of work exposures and health*, *63*(3), 280-293. https://doi.org/10.1093/annweh/wxy111

470. Pang, X., Shaw, M. D., Gillot, S., Lewis, A. C. (2018). The impacts of water vapour and co-pollutants on the performance of electrochemical gas sensors used for air quality monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *266*, 674-684. https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.03.144

471. Pang, X., Chen, L., Shi, K., Wu, F., Chen, J., Fang, S., Wang, J., Xu, M. (2021). A lightweight low-cost and multipollutant sensor package for aerial observations of air pollutants in atmospheric boundary layer. *Science of The Total Environment*, *764*, 142828. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142828

472. Wei, P., Ning, Z., Ye, S., Sun, L., Yang, F., Wong, K. C., Westerdahl, D., Louie, P. K. (2018). Impact analysis of temperature and humidity

conditions on electrochemical sensor response in ambient air quality monitoring. *Sensors*, *18*(2), 59. https://doi.org/10.3390/s18020059

473. Tryner, J., Phillips, M., Quinn, C., Neymark, G., Wilson, A., Jathar, S. H., Carter, E., Volckens, J. (2021). Design and testing of a low-cost sensor and sampling platform for indoor air quality. *Building and Environment*, *206*, 108398. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108398

474. Borghi, F., Spinazzè, A., Rovelli, S., Campagnolo, D., Del Buono, L., Cattaneo, A., Cavallo, D. M. (2017). Miniaturized monitors for assessment of exposure to air pollutants: A review. *International journal of environmental research and public health*, *14*(8), 909. https://doi.org/10.3390/ijerph14080909

475. Marinov, M. B., Topalov, I., Gieva, E., Nikolov, G. (2016, May). Air quality monitoring in urban environments. In *2016 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* (pp. 443-448). IEEE. https://doi.org/10.1109/ISSE.2016.7563237

476. Roberts, T. J., Braban, C. F., Oppenheimer, C., Martin, R. S., Freshwater, R. A., Dawson, D. H., Griffiths, P.T., Cox, R. A., Saffell, J. R., Jones, R. L. (2012). Electrochemical sensing of volcanic gases. *Chemical Geology*, *332*, 74-91. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.08.027

477. Ionascu, M. E., Castell, N., Boncalo, O., Schneider, P., Darie, M., Marcu, M. (2021). Calibration of CO, NO2, and O3 Using Airify: A Low-Cost Sensor Cluster for Air Quality Monitoring. *Sensors*, *21*(23), 7977. https://doi.org/10.3390/s21237977

478. Alhasa, K. M., Mohd Nadzir, M. S., Olalekan, P., Latif, M. T., Yusup, Y., Iqbal Faruque, M. R., Ahamad, F., Abd. Hamid, H. H., Aiyub, K., Md Ali S. H., Hhan, M.F., Abu Samah, A., Yusuff, I., Othman, M., Tengku Hassim, T. M. F., Ezani, N. E. (2018). Calibration model of a low-cost air quality sensor using an adaptive neuro-fuzzy inference system. *Sensors*, *18*(12), 4380. https://doi.org/10.3390/s18124380

479. Buck, A., Roberts, M. I., Overfelt, R. (2013). Transient response characteristics of electrochemical carbon monoxide sensors. In *43rd International Conference on Environmental Systems* (p. 3343). https://doi.org/10.2514/6.2013-3343

480. Yared, R. (2016). Sensor-Based Smart Oven System to Enhance Cooking Safety. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings* (Vol. 1, No. 2, p. 23). https://doi.org/10.3390/ecsa-3-S2003

481. Pannek, C., Weber, C., Vetter, T., Pohle, R., Engel, L., Eberhardt, A., Tarantik, K.R., Bauersfeld, M. L., Wöllenstein, J. (2019, June). Colorimetric Sensor System for the Detection of Low Co-Concentrations in Real Fire Tests. In *2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII)* (pp. 1345-1348). IEEE. https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808645

482. Xu, Q., Goh, H. C., Mousavi, E., Nabizadeh Rafsanjani, H., Varghese, Z., Pandit, Y., Ghahramani, A. (2022). Towards Personalization of Indoor Air Quality: Review of Sensing Requirements and Field Deployments. *Sensors*, *22*(9), 3444. https://doi.org/10.3390/s22093444

483. Williams, D. E., Henshaw, G. S., Bart, M., Laing, G., Wagner, J., Naisbitt, S., Salmond, J. A. (2013). Validation of low-cost ozone measurement instruments suitable for use in an air-quality monitoring network. *Measurement Science and Technology*, *24*(6), 065803. https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/6/065803

484. Bart, M., Williams, D. E., Ainslie, B., McKendry, I., Salmond, J., Grange, S. K., Alavi-Shoshtari, M., Steyn, D., Henshaw, G. S. (2014). High density ozone monitoring using gas sensitive semi-conductor sensors in the Lower Fraser Valley, British Columbia. *Environmental science & technology*, *48*(7), 3970-3977. https://doi.org/10.1021/es404610t

485. Moltchanov, S., Levy, I., Etzion, Y., Lerner, U., Broday, D. M., Fishbain, B. (2015). On the feasibility of measuring urban air pollution by

wireless distributed sensor networks. *Science of The Total Environment*, *502*, 537-547. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.059

486. Spinelle, L., Gerboles, M., Aleixandre, M., Bonavitacola, F. (2016). Evaluation of metal oxides sensors for the monitoring of O 3 in ambient air at ppb level. *Chemical Engineering Transactions*, *54*, 319-324. https://doi.org/10.3303/CET1654054

487. Miskell, G., Alberti, K., Feenstra, B., Henshaw, G. S., Papapostolou, V., Patel, H., Polidori, A., Salmond, J.A., Weissert, L., Williams, D. E. (2019). Reliable data from low cost ozone sensors in a hierarchical network. *Atmospheric Environment*, *214*, 116870. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116870

488. Sadighi, K., Coffey, E., Polidori, A., Feenstra, B., Lv, Q., Henze, D. K., Hannigan, M. (2018). Intra-urban spatial variability of surface ozone in Riverside, CA: viability and validation of low-cost sensors. *Atmospheric Measurement Techniques*, *11*(3), 1777-1792. https://doi.org/10.5194/amt-11-1777-2018

489. Liu, M., Barkjohn, K. K., Norris, C., Schauer, J. J., Zhang, J., Zhang, Y., Zhang, J., Zhang, Y., Hu, M., Bergin, M. (2020). Using low-cost sensors to monitor indoor, outdoor, and personal ozone concentrations in Beijing, China. *Environmental Science: Processes & Impacts*, *22*(1), 131-143. https://doi.org/10.1039/C9EM00377K

490. Mueller, M., Meyer, J., Hueglin, C. (2017). Design of an ozone and nitrogen dioxide sensor unit and its long-term operation within a sensor network in the city of Zurich. *Atmospheric Measurement Techniques*, *10*(10), 3783-3799. https://doi.org/10.5194/amt-10-3783-2017

491. Williams, D. E., Henshaw, G. S., Bart, M., Laing, G., Wagner, J., Naisbitt, S., Salmond, J. A. (2013). Validation of low-cost ozone measurement instruments suitable for use in an air-quality monitoring network. *Measurement Science and Technology*, *24*(6), 065803.

492. Pang, X., Shaw, M. D., Lewis, A. C., Carpenter, L. J., Batchellier, T. (2017). Electrochemical ozone sensors: A miniaturised alternative for ozone measurements in laboratory experiments and air-quality monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *240*, 829-837. https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.09.020

493. Masiol, M., Squizzato, S., Chalupa, D., Rich, D. Q., Hopke, P. K. (2019). Spatial-temporal variations of summertime ozone concentrations across a metropolitan area using a network of low-cost monitors to develop 24 hourly land-use regression models. *Science of The Total Environment*, *654*, 1167-1178. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.111

494. Badura, M., Batog, P., Drzeniecka-Osiadacz, A., Modzel, P. (2022). Low-and Medium-Cost Sensors for Tropospheric Ozone Monitoring—Results of an Evaluation Study in Wrocław, Poland. *Atmosphere*, *13*(4), 542. https://doi.org/10.3390/atmos13040542

495. Williams, D. E., Salmond, J., Yung, Y. F., Akaji, J., Wright, B., Wilson, J., Henshaw, G.S., Wells, D. B., Ding, G., Wagner, J., Laing, G. (2009, October). Development of low-cost ozone and nitrogen dioxide measurement instruments suitable for use in an air quality monitoring network. In *SENSORS, 2009 IEEE* (pp. 1099-1104). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICSENS.2009.5398568

496. Collier-Oxandale, A., Coffey, E., Thorson, J., Johnston, J., Hannigan, M. (2018). Comparing building and neighborhood-scale variability of CO2 and O3 to inform deployment considerations for low-cost sensor system use. *Sensors*, *18*(5), 1349. https://doi.org/10.3390/s18051349

497. Рингач, Н.О., Власик, Л.Й., Власик, Л.І., Колодніцька, Т.Л. (2022). Урбанізація і вплив на здоров'я забруднення повітря в Україні: загрози та можливості. Буковинський медичний вісник, 2(26), 69-76. https://doi.org/10.24061/2413-0737.XXV%D0%86.2.102.2022.13

498. Стахів, І.Р. (2013). Вплив забруднення повітряного середовища на стан здоров'я населення за 2001-2010 рр. *Збірник наукових праць «Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики»*, (10), 126-132.

499. Тарасова, В.В. (2103). Вплив забруднення атмосферного повітря на стан здоров'я населення. *Агросвіт*, 16, 24-28.

500. Корнус, О., Корнус, А., Шишук, В., Кононихін, В. (2012). Дослідження впливу забруднення атмосферного повітря на онкологічну захворюваність населення Сумської області. *Часопис соціально-економічної географії*, 13(2), 151-157.

501. Бєлаєва, І.В., Калінкіна, О.М., Боробова, Н.А. (2009). Вплив забруднення атмосферного повітря на темпи старіння людини. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Проблеми екології*, 1-2, 94-102.

502. Лико, С.М., Каськів, М.В. (2013). Вплив забруднення атмосферного повітря на стан захворюваності населення м. Рівне. *Питання біоіндикації та екології*, 18(2), 276-288.

503. Котко, Д.М., Гончарук, Н.Л., Шевцов, С.М., Левон, М.М. (2022). Забруднення повітря як фактор, що формує здоров'я та впливає на працездатність спортсменів. *Науковий часовис НПУ імені М.П. Драгоманова*, 4(149), 64-69. https://doi.org/10.31392/NPU-nc.series15.2022.4(149).15

504. Yun, X., Shen, G., Shen, H., Meng, W., Chen, Y., Xu, H., …,Tao, S. (2020). Residential solid fuel emissions contribute significantly to air pollution and associated health impacts in China. *Science advances*, 6(44), eaba7621. https://doi.org/10.1126/sciadv.aba7621

505. Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in public health*, 14. https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014

506. Kotcher, J., Maibach, E., & Choi, W. T. (2019). Fossil fuels are harming our brains: identifying key messages about the health effects of air pollution

from fossil fuels. *BMC public health*, 19(1), 1-12. https://doi.org/10.1186/s12889-019-7373-1

507. Campbell-Lendrum, D., & Prüss-Ustün, A. (2019). Climate change, air pollution and noncommunicable diseases. *Bulletin of the World Health Organization*, 97(2), 160. https://doi.org/10.2471/BLT.18.224295

508. Balmes, J. R. (2019). Household air pollution from domestic combustion of solid fuels and health. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 143(6), 1979-1987. https://doi.org/10.1016/j.jaci.2019.04.016

509. Guttikunda, S. K., & Jawahar, P. (2018). Evaluation of particulate pollution and health impacts from planned expansion of coal-fired thermal power plants in India using WRF-CAMx modeling system. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(12), 3187-3202. https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.04.0134

510. *Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease* (2016). World Health Organization (WHO). https://apps.who.int/iris/handle/10665/250141

511. Copat, C., Cristaldi, A., Fiore, M., Grasso, A., Zuccarello, P., Santo Signorelli, S., Conti, G.O., Ferrante, M. (2020). The role of air pollution (PM and NO2) in COVID-19 spread and lethality: a systematic review. *Environmental research*, 191, 110129. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110129

512. Travaglio, M., Yu, Y., Popovic, R., Selley, L., Leal, N. S., Martins, L. M. (2021). Links between air pollution and COVID-19 in England. *Environmental pollution*, 268, 115859. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115859

513. Dutheil, F., Baker, J. S., Navel, V. (2020). COVID-19 as a factor influencing air pollution?. Environmental pollution, 263, 114466. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114466

514. Fattorini, D., Regoli, F. (2020). Role of the chronic air pollution levels in the Covid-19 outbreak risk in Italy. *Environmental pollution*, 264, 114732. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114732

515. Martelletti, L., Martelletti, P. (2020). Air pollution and the novel Covid-19 disease: a putative disease risk factor. *SN comprehensive clinical medicine*, 2(4), 383-387. https://doi.org/10.1007/s42399-020-00274-4

516. Davidson, C. I., Phalen, R. F., Solomon, P. A. (2005). Airborne particulate matter and human health: a review. *Aerosol Science and Technology*, 39(8), 737-749. https://doi.org/10.1080/02786820500191348

517. Chen, L. C., & Lippmann, M. (2009). Effects of metals within ambient air particulate matter (PM) on human health. *Inhalation toxicology*, 21(1), 1-31. https://doi.org/10.1080/08958370802105405

518. Harrison, R. M., Yin, J. (2000). Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? *Science of the Total Environment*, 249(1-3), 85-101. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00513-6

519. Martinelli, N., Olivieri, O., Girelli, D. (2013). Air particulate matter and cardiovascular disease: a narrative review. *European journal of internal medicine*, 24(4), 295-302. https://doi.org/10.1016/j.ejim.2013.04.001

520. Ristovski, Z. D., Miljevic, B., Surawski, N. C., Morawska, L., Fong, K. M., Goh, F., Yang, I. A. (2012). Respiratory health effects of diesel particulate matter. *Respirology*, 17(2), 201-212. https://doi.org/10.1111/j.1440-1843.2011.02109.x

521. Li, Y., Henze, D. K., Jack, D., Kinney, P. L. (2016). The influence of air quality model resolution on health impact assessment for fine particulate matter and its components. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 9(1), 51-68. https://doi.org/10.1007/s11869-015-0321-z

522. Запорожец, А.А., Свердлова, 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

523. Winkowska, J., Szpilko, D., Pejić, S. (2019). Smart city concept in the light of the literature review. *Engineering Management in Production and Services*, 11(2), 70-86. https://doi.org/10.2478/emj-2019-0012

524. Eremia, M., Toma, L., Sanduleac, M. (2017). The smart city concept in the 21st century. *Procedia Engineering*, 181, 12-19. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.357

525. Duan, W., Nasiri, R., Karamizadeh, S. (2019). Smart City Concepts and Dimensions. In *Proceedings of the 2019 7th International Conference on Information Technology: IoT and Smart City* (pp. 488-492). https://doi.org/10.1145/3377170.3377189

526. Бабак, В.П., Запорожець, А.О., Свердлова, А.Д. (2016). Технологія Smart Grid в системах моніторингу об'єктів теплоенергетики. *Промислова теплотехніка*, 6(38), 71-81. https://doi.org/10.31472/ihe.6.2016.10

527. 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

528. Запорожець, А.О., Свердлова, А.Д. (2016). Розроблення ієрархічної системи діагностування теплоенергетичного обладнання. *Матеріали 8-ї Національної науково-технічної конференції UkrNDT-2016*, 22-24 листопада, 2016р., м. Київ. С. 152-157. https://bit.ly/3AhLgVz

529. 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

530. 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

531. 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

532. 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/ttpe.4.2020.1

533. 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.

534. Huang, B., Bai, X., Zhou, Z., Cui, Q., Zhu, D., & Hu, R. (2017). Energy informatics: Fundamentals and standardization. *ICT Express*, 3(2), 76-80. https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.05.006

535. Califf, C., Lin, X., Sarker, S. (2012). Understanding Energy Informatics: A Gestalt-Fit Perspective. *AMCIS 2012 Proceedings*, 13. https://aisel.aisnet.org/amcis2012/proceedings/GreenIS/13

536. Watson, R. T., Howells, J., Boudreau, M. C. (2012). Energy Informatics: Initial thoughts on data and process management. In *Green business process management* (pp. 147-159). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27488-6_9

537. 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.

538. 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

539. 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.

540. Запорожець, А.О. (2022). Дисперсійний аналіз в задачах моніторингу забруднення атмосферного повітря. *Збірник тез 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.

541. 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

542. 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

543. Запорожець, А.О. (2017). Аналіз засобів моніторингу забруднення повітря навколишнього середовища. *Наукоємні технології*, 3(35), 242-252. https://doi.org/10.18372/2310-5461.35.11844

544. Zaporozhets, A.O. (2020). *Control of Fuel Combustion in Boilers*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46299-4

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

546. Запорожець, А.О., Мартинюк, І.Д., Куценко, В.О., Коваленко, О.М. (2021). Математичні засоби для оцінювання впливу золовідвалів 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.

547. Carta, J. A., Ramirez, P., Bueno, C. (2008). A joint probability density function of wind speed and direction for wind energy analysis. *Energy Conversion and Management*, 49(6), 1309-1320. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.01.010

548. 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

549. 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

550. 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

551. 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.

552. 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

553. Запорожець, А.О., Свердлова, А.Д. (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.

554. 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

555. 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.

556. Zaporozhets, A.O., Eremenko, V.S., Serhiienko, 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 і Ko». P. 48-51. http://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2018.8526742

557. Zaporozhets, A., Eremenko, V., Serhiienko, 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

558. 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. *Збірник тез 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.

559. 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.

560. 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

561. 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.

562. 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.

563. 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

564. 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.

565. Babak, V., Zaporozhets, A., Kovtun, S., Serhiienko, R. (2018). Methods and means of heat losses monitoring for heat pipelines. *International Journal "NDT Days"*, 2(1), 213-221.

566. 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.

567. Zaporozhets, A. (2019). System for Diagnosing Main Pipelines of Heat Networks Based on UAVs. *International Journal "NDT Days"*, 1(2), 69-77.

568. 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.

569. Yilmaz, E., Hu, J. (2018). CFD study of quadcopter aerodynamics at static thrust conditions. In *Proceedings of the ASEE Northeast 2018 Annual Conference, West Hartford, CT, USA* (pp. 27-28).

570. Yoon, S., Diaz, P. V., Boyd Jr, D. D., Chan, W. M., Theodore, C. R. (2017). Computational aerodynamic modeling of small quadcopter vehicles.

In *American Helicopter Society (AHS) 73rd Annual Forum Fort Worth, Texas.*

571. Céspedes, J. F., Lopez, O. D. (2019). Simulation and validation of the aerodynamic performance of a quadcopter in hover condition using overset mesh. In *AIAA Aviation 2019 Forum* (p. 2824).

572. Zaporozhets, A. (2020). Overview of Quadrocopters 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

573. 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.

574. Бабак, В.П., Запорожець, А.О., Назаренко, О.О., Редько, О.О. (2017). Аналіз апроксимації результатів вимірювань теплового потоку бомбового калориметра в нестаціонарному режимі. *ScienceRise*, 37(8), 24-32. https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.108935

ДОДАТОК А
СТАТИСТИЧНА ТА НОРМАТИВНА ІНФОРМАЦІЯ ЩОДО ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ

Додаток А1. Загальні граничні обсяги викидів для усіх ВСУ, включених до НПСВ [т/рік]

Дата	SO_2	NO_x	Пил
31 грудня 2018 року	1017034.5	191300.3	205878.2
31 грудня 2019 року	920431.5	182133.1	185807.6
31 грудня 2020 року	823968.6	172965.8	165737.0
31 грудня 2021 року	727225.5	163798.5	145666.3
31 грудня 2022 року	630622.5	154631.3	125595.7
31 грудня 2023 року	534019.5	145464.0	105525.1
31 грудня 2024 року	437416.5	136296.7	85454.5
31 грудня 2025 року	340813.5	127129.5	65383.9
31 грудня 2026 року	244210.4	117962.2	45313.2
31 грудня 2027 року	147607.4	108794.9	25242.6
31 грудня 2028 року	51004.4	99627.7	5172.0
31 грудня 2029 року	51004.4	90460.4	5172.0
31 грудня 2030 року	51004.4	81293.1	5172.0
31 грудня 2031 року	51004.4	72125.9	5172.0
31 грудня 2032 року	51004.4	62958.6	5172.0
31 грудня 2033 року	51004.4	53791.3	5172.0

Додаток А2. Вимоги до щорічного скорочення обсягів викидів SO_2 (т/рік) у період 2018-2033 років

№	Назва установки	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	Кратність зменшення
1	Зуївська ТЕС (енергоблоки 1,2,3,4)	85439	77286,6	69134,1	60981,7	52829,2	44676,8	36524,4	28371,9	20219,5	12067,1	3914,6	21,8
2	Луганська ТЕС (енергоблоки 9,10,11)	30380	27560,9	24741,8	21922,6	19103,5	16284,4	13465,3	10646,2	7827,1	5007,9	2188,8	13,9
3	Луганська ТЕС (енергоблоки 13,14,15)	36030	32684,7	29339,3	25994	22648,7	19303,4	15958	12612,7	9267,4	5922,1	2576,7	14,0
4	Курахівська ТЕС (енергоблоки 3,4)	29909	27059,8	24210,6	21361,4	18512,2	15663	12813,8	9964,6	7115,4	4266,2	1416,9	21,1
5	Курахівська ТЕС (енергоблоки 8,9)	23322	21108,4	18894,8	16681,2	14467,6	12253,9	10040,3	7826,7	5613,1	3399,5	1185,9	19,7
6	Миронівська ТЕС	3693,3	3371,9	3050,4	2729	2407,5	2086,1	1764,6	1443,2	1121,8	800,3	478,9	7,7
7	Запорізька ТЕС (енергоблоки 1,2,3,4)	76087	68824,7	61562,4	54300,1	47037,8	39775,5	32513,3	25251	17988,7	10726,4	3464,1	22,0
8	Придніпровська ТЕС (енергоблоки 11,12)	15451,5	13996,9	12542,3	11087,7	9633,1	8178,5	6723,9	5269,3	3814,7	2360,1	905,5	17,1
9	Придніпровська ТЕС (енергоблоки 13,14)	11707,8	10598,4	9489	8379,6	7270,3	6160,9	5051,5	3942,1	2832,7	1723,3	613,9	19,1
10	Криворізька ТЕС (енергоблок 1)	27614,6	24945,9	22277,2	19608,5	16939,8	14271	11602,3	8933,6	6264,9	3596,2	927,5	29,8
11	Криворізька ТЕС (енергоблоки 3,4)	34682,7	31327,5	27972,4	24617,2	21262	17906,9	14551,7	11196,5	7841,4	4486,2	1131	30,7
12	Криворізька ТЕС (енергоблок 6)	19503,1	17614,7	15726,3	13837,9	11949,4	10061	8172,6	6284,2	4395,8	2507,4	618,9	31,5
13	Криворізька ТЕС (енергоблок 10)	46557,9	41945,6	37333,3	32721	28108,7	23496,4	18884,1	14271,8	9659,6	5047,3	435	107,0
14	Бурштинська ТЕС (енергоблоки 9,10,11,12)	55557,9	50254	44950,1	39646,2	34342,3	29038,4	23734,6	18430,7	13126,8	7822,9	2519	22,1
15	Бурштинська ТЕС (енергоблоки 8)	9446,1	8552,2	7658,3	6764,3	5870,4	4976,5	4082,6	3188,6	2294,7	1400,8	506,9	18,6
16	Добротвірська (енергоблоки 7, 8)	21493,7	19436,6	17379,6	15322,5	13265,5	11208,4	9151,4	7094,3	5037,3	2980,2	923,2	23,3
17	Ладижинська ТЕС (енергоблоки 1,2,3)	36164,2	32698,4	29232,7	25766,9	22301,1	18835,4	15369,6	11903,9	8438,1	4972,3	1506,6	24,0

18	Ладижинська ТЕС (енергоблоки 4,5,6)	22270,4	20179,7	18089,1	15998,4	13907,7	11817	9726,4	7635,7	5545	3454,3	1363,7	16,3
19	Вуглегірська ТЕС (енергоблоки 1,2,3,4)	143208,4	129313,4	115418,5	101523,5	87628,6	73733,6	59838,7	45943,7	32048,8	18153,8	4258,9	33,6
20	Зміївська ТЕС (енергоблоки 1,2)	15604	14132,2	12660,5	11188,7	9717	8245,2	6773,4	5301,7	3829,9	2358,2	886,4	17,6
21	Зміївська ТЕС (енергоблоки 7,8)	31844	28840,9	25837,9	22834,8	19831,8	16828,7	13825,7	10822,6	7819,6	4816,5	1813,5	17,6
22	Зміївська ТЕС (енергоблоки 9,10)	20276	18377,5	16479,1	14580,6	12682,1	10783,7	8885,2	6986,7	5088,3	3189,8	1291,3	15,7
23	Трипільська ТЕС (енергоблоки 1,2,3,4)	68155	61701	55247	48793	42339	35885	29431	22977	16523,1	10069,1	3615,1	18,9
24	Слов'янська ТЕС (енергоблок 7)	35247	31837,4	28427,8	25018,1	21608,5	18198,9	14789,3	11379,6	7970	4560,4	1150,8	30,6
25	Старобешівська ТЕС (енергоблок 4)	1103,4	1047,3	991,2	935	878,9	822,8	766,7	710,6	654,4	598,3	542,2	2,0
26	Старобешівська ТЕС (енергоблок 5)	12594,9	11361,4	10127,9	8894,4	7661	6427,5	5194	3960,6	2727,1	1493,6	260,2	48,4
27	Старобешівська ТЕС (енергоблоки 8,9,10)	19385	17589,5	15794	13998,5	12203,1	10407,6	8612,1	6816,6	5021,1	3225,6	1430,1	13,6
28	Старобешівська ТЕС (енергоблоки 11,12,13)	30133,8	27319,2	24504,6	21689,9	18875,3	16060,7	13246,1	10431,5	7616,9	4802,3	1987,7	15,2
29	Білоцеківська ТЕЦ (1)	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	1,0
30	Дарницька ТЕЦ (К-5, К-6, К-7, К-8)	7315	6681,4	6047,7	5414,1	4780,4	4146,8	3513,1	2879,5	2245,9	1612,2	978,6	7,5
31	Дарницька ТЕЦ (К-9, К-10)	2438	2239,7	2041,5	1843,2	1645	1446,7	1248,4	1050,2	851,9	653,6	455,4	5,4
32	Калуська ТЕЦ	1373,1	1262,6	1152,1	1041,5	931	820,5	710	599,4	488,9	378,4	267,9	5,1
33	Київська ТЕЦ-5	248,1	248,1	248,1	248,1	248,1	248,1	248,1	248,1	248,1	248,1	248,1	1,0
34	Київська ТЕЦ-5	713,1	713,1	713,1	713,1	713,1	713,1	713,1	713,1	713,1	713,1	713,1	1,0
35	Київська ТЕЦ-6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1,0
36	Київська ТЕЦ-6	857,1	857,1	857,1	857,1	857,1	857,1	857,1	857,1	857,1	857,1	857,1	1,0

37	Краматорська ТЕЦ	3134,1	2861,3	2588,4	2315,6	2042,8	1770	1497,1	1224,3	951,5	678,6	405,8	7,7
38	Кременчуцька ТЕЦ (котли 1-5)	4019,6	3646	3272,5	2899	2525,4	2151,9	1778,4	1404,8	1031,3	657,8	284,2	14,1
39	Одеська ТЕЦ (1)	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	26,7	1,0
40	Одеська ТЕЦ (2)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1,0
41	Сумська ТЕЦ	2219	2024,7	1830,3	1636	1441,6	1247,3	1053	858,6	664,3	469,9	275,6	8,1
42	Харківська ТЕЦ-5	168,4	174,7	181,1	187,4	193,8	200,1	206,5	212,8	219,2	225,5	231,9	0,7
43	Черкаська ТЕЦ (1)	34,4	34,4	34,4	34,4	34,4	34,4	34,4	34,4	34,4	34,4	34,4	1,0
44	Черкаська ТЕЦ (2)	18838	17021,1	15204,1	13387,2	11570,2	9753,3	7936,3	6119,4	4302,4	2485,5	668,5	28,2
45	Черкаська ТЕЦ (3)	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	1,0
46	Чернігівська ТЕЦ (котли 1-4)	12259,2	11144,8	10030,3	8915,9	7801,5	6687,1	5572,6	4458,2	3343,8	2229,4	1114,9	11,0
47	СТ1 (ТЕЦ-3) (котел 1)	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	1,0
48	СТ1 (ТЕЦ-3) (котел 2)	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	1,0
49	СТ1 (ТЕЦ-3) (котел 3)	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	1,0
50	СТ1 (ТЕЦ-3) (котел 4)	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	1,0
51	СТ1 (ТЕЦ-3) (котел 5)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,0
52	СТ1 (ТЕЦ-3) (котел 6)	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	1,0
53	СТ1 (ТЕЦ-3) (котел 7)	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	1,0
54	СТ2 (ТЕЦ-2) (котли 1,2,3)	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	1,0
55	СТ2 (ТЕЦ-2) (котел 7)	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	1,0

56	СТ2 (ТЕЦ-2) (котел 8)	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	1,0
57	СТ2 (ТЕЦ-2) (котел 9)	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	1,0
58	СТ2 (ТЕЦ-2) (котел 10)	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	1,0
59	Котельня Нивки (котел 1)	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	1,0
60	Котельня Нивки (котел 2)	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	1,0
61	Котельня Нивки (котел 3)	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	1,0
62	Котельня «Відрадний» (котел 1)	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	1,0
63	Котельня «Відрадний» (котел 2)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	1,0
64	Котельня «Відрадний» (котел 3)	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	1,0
65	Котельня «Відрадний» (котел 4)	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	1,0
66	Котельня «Микильська Борщагівка»	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	1,0
67	Котельня «Виноградар»	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	20,3	1,0
68	СТ «Біличі»	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	1,0
69	Котельня «Молодь»	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	1,0
70	Котельня «Воскресенка»	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	1,0
71	Котельня «Веркон»	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	1,0
72	Котельня «ПАР» (котли 4,5,6,7,8,9)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0
73	Котельня «Теремки» (котли 7,8)	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	1,0
74	Котельня «Центральна»	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	1,0

75	Котельня «Мінська»	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	1,0
76	Котельня, вул. Шекспіра, 17, котел 5	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	1,0
77	Котельня, вул. Столетова, 4 котел 4	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	1,0
78	Котельня, вул. Столетова, 4 котел 5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	1,0
79	Котельня, вул. Столетова, 4,котли 6, 7	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3	35,3	1,0
80	Котельня, пр. Московський, 275, котел 1	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	1,0
81	Котельня, пр. Московський, 275, котел 2	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	1,0
82	Котельня, пр. Московський, 275, котел 3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0
83	Котельня, пр. Московський, 275, котел 4	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	1,0
84	Котельня, пр. Московський, 275, котел 5	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	1,0
85	Котельня, вул. Енергетична, 3, котел 1	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	1,0
86	Котельня, вул. Енергетична, 3, котел 2	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	1,0
87	Котельня, вул. Енергетична, 3, котел 3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	1,0
88	Котельня, вул. Енергетична, 3, котел 4	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	1,0
89	Котельня, вул. Енергетична, 3, котел 5	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0
90	Котельня ПАТ ОПЗ	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	1,0

Додаток А3. Викиди забруднюючих речовин, в тому числі CO_2, у атмосферне повітря (1990-2018 рр.)

	Обсяги викидів забруднюючих речовин			Крім того, викиди CO_2		
	усього, тис.т	у тому числі		усього, млн.т	у тому числі	
		стаціонарними джерелами	пересувними джерелами[1]		стаціонарними джерелами	пересувними джерелами[1]
1990	15549,4	9439.1	6110,3	–	–	–
1991	14315,4	8774,6	5540,8	–	–	–
1992	12269,7	8632,9	3636,8	–	–	–
1993	10015,0	7308,3	2706,7	–	–	–
1994	8347,4	6201,4	2146,0	–	–	–
1995	7483,5	5687,0	1796,5	–	–	–
1996	6342,3	4763,8	1578,5	–	–	–
1997	5966,2	4533,2	1433,0	–	–	–
1998	6040,8	4156,3	1884,5	–	–	–
1999	5853,4	4106,4	1747,0	–	–	–
2000	5908,6	3959,4	1949,2	–	–	–
2001	6049,5	4054,8	1994,7	–	–	–
2002	6101,9	4075,0	2026,9	–	–	–
2003	6191,3	4087,8	2103,5	–	–	–
2004	6325,9	4151,9	2174,0	126,9	126,9	–
2005	6615,6	4464,1	2151,5	152,0	152,0	–
2006	7027,6	4822,2	2205,4	178,8	178,8	–
2007	7380,0	4813,3	2566,7	218,1	184,0	34,1
2008	7210,3	4524,9	2685,4	209,4	174,2	35,2
2009	6442,9	3928,1	2514,8	185,2	152,8	32,4
2010	6678,0	4131,6	2546,4	198,2	165,0	33,2
2011	6877,3	4374,6	2502,7	236,0	202,2	33,8
2012	6821,1	4335,3	2485,8	232,0	198,2	33,8
2013	6719,8	4295,1	2424,7	230,7	197,6	33,1
2014[2]	5346,2	3350,0	1996,2	194,7	166,9	27,8
2015[2]	4521,3	2857,4	1663,9	162,0	138,9	23,1
2016[2]	4498,1	3078,1	1420,0	150,6	150,6	–
2017[2]	3974,1	2584,9	1389,2	124,2	124,2	–
2018[2]	3866,7	2508,3	1358,4	126,4	126,4	–

[1] За 1990-2002 рр. відображаються дані по автомобільному транспорту; з 2003р. – по автомобільному, залізничному, авіаційному, водному транспорту; з 2007р. – по автомобільному, залізничному, авіаційному, водному транспорту та виробничій техніці, з 2016р. - по автомобільному транспорту.

[2] Без урахування тимчасово окупованої території Автономної Республіки Крим, м. Севастополя та частини тимчасово окупованих територій у Донецькій та Луганській областях.

Додаток А4. Викиди забруднюючих речовин у атмосферне повітря України за 1990-2018 рр., тис. т/рік

Рік	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
SO_2	**2782**	**1639**	**984,8**	**992,1**	**1033**	**1046**	**988,5**	**1133**	**1347**	**1343**	**1321**	**1263**	**1235**	**1363**	**1430,3**	**1413,3**	**1160,6**	**854**	**1093**	**743,1**	**715,7**
стаціонарні джерела	2782	1639	976,6	983,6	1024	1034	975,4	1120	1333	1313	1291	1235	1206	1333	1399,2	1381,8	1133,3	830,3	1076,4	726,2	698,1
пересувні джерела[1]	–	–	8,2	8,5	8,7	12,1	13,1	13,3	14,2	29,5	30	27,5	28,9	30,3	31,1	31,5	27,3	23,7	16,6	16,9	17,6
NO_2	**760,8**	**530,3**	**440,6**	**452**	**435,7**	**477,9**	**471,9**	**523,9**	**515,1**	**641,9**	**642**	**562,1**	**603,7**	**633**	**634,6**	**633,4**	**541,4**	**453**	**392,8**	**369,3**	**372,2**
стаціонарні джерела	760,8	423,8	320	328,1	309,4	306,0	291,7	343,7	325,8	336,6	330,9	279,2	310,5	333	332,5	333,3	288,1	233,8	240,2	215,5	215,3
пересувні джерела[1]	–	106,5	120,6	123,9	126,3	171,9	180,2	180,2	189,3	305,3	311,1	282,9	293,2	300	302,1	300,1	253,3	219,2	152,6	153,8	156,9
НМЛОС	–	–	–	–	–	–	**97**	**96,5**	**94,7**	**372,3**	**382,0**	**358,5**	**359,3**	**350,8**	**338,1**	**325,7**	**270,1**	**225,8**	**204,2**	**198,2**	**181,3**
стаціонарні джерела	–	–	–	–	–	–	91,7	91,1	87,5	82,3	73,7	66,9	66	65,2	57,5	54,5	50	47,3	52,2	53,1	43,7
пересувні джерела[1]	–	–	–	–	–	–	5,3	5,4	7,2	290	308,3	291,6	293,3	285,6	280,6	271,2	220,1	178,5	152	145,1	137,6
NH_3	**23.1**	**13,6**	**8,3**	**8,4**	**8,1**	**8,4**	**14,6**	**17,9**	**19,4**	**20,3**	**19,8**	**21,9**	**25,1**	**25,9**	**24,0**	**22,6**	**21,3**	**18,8**	**18,8**	**17,4**	**16,8**
стаціонарні джерела	23.1	13,6	8,3	8,4	8,1	8,4	14,6	17,9	19,4	20,3	19,8	21,9	25,1	25,9	24,0	22,6	21,3	18,8	18,8	17,4	16,8
пересувні джерела[1]	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,023	0,024	0,022	0,022	0,021	0,020	0,019	0,014	0,011	0,009	0,008	0,007
CO	**3274**	**2906**	**2777**	**2853**	**2865**	**2890**	**2991**	**2975**	**3051**	**3302**	**3177**	**2788**	**2952**	**2908**	**2830,5**	**2782,1**	**2283,4**	**1971,9**	**1874**	**1773,5**	**1761,1**
стаціонарні джерела	3274	1479	1231	1270	1257	1270	1319	1321	1358	1404	1185	915,5	1064	1066	1004.6	1007.2	828.4	764.1	802.8	728.4	744.3
пересувні джерела[1]	–	1427	1546	1582	1608	1620	1672	1655	1693	1897	1992	1872	1888	1842	1825,9	1774,9	1455	1207,8	1071,2	1045,1	1016,8
ЗЗЧ	**2019**	**1014**	**729,6**	**763,9**	**708,8**	**693,2**	**639,5**	**741,7**	**719,9**	**729,9**	**668,2**	**554**	**594,5**	**641**	**609,6**	**553,8**	**434,1**	**377,4**	**417,9**	**342,3**	**341,6**
стаціонарні джерела	2019	1014	729,6	763,9	708,8	693,2	626,4	697,9	705,5	696,8	634,9	523,6	562,1	606,6	573,7	516,8	401,8	349,6	395,8	319,5	317,5
пересувні джерела[1]	–	–	–	–	–	–	13,1	43,8	14,4	33,1	33,3	30,4	32,4	34,4	35,9	37,0	32,3	27,8	22,1	22,8	24,1
PM_{10}	–	–	–	–	–	–	**154,7**	**175,7**	**159,3**	**153,3**	**151,3**	**122,9**	**133,2**	**142,3**	**135,1**	**125,7**	**84,6**	**67,9**	**73,1**	**46,8**	**54,1**
стаціонарні джерела							154,7	175,7	159,3	153,3	151,3	122,9	133,2	142,3	135,1	125,7	84,6	67,9	73,1	46,8	54,1
пересувні джерела[1]	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PM_{25}	–	–	–	–	–	–	**74,7**	**70,2**	**50,4**	**49,3**	**46,4**	**37,7**	**40,7**	**42,3**	**34,5**	**27,1**	**24**	**19,7**	**34,1**	**13,5**	**21,2**
стаціонарні джерела	–	–	–	–	–	–	74,7	70,2	50,4	49,3	46,4	37,7	40,7	42,3	34,5	27,1	24	19,7	34,1	13,5	21,2
пересувні джерела[1]	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

[1]за 1990–2002 рр. відображаються дані по автомобільному транспорту; з 2003 р. – по автомобільному, залізничному, авіаційному, водному транспорту; з 2007 р. – по автомобільному, залізничному, авіаційному, водному транспорту та виробничій техніці.

Додаток А5. Викиди інших забруднюючих речовин

	ПАВ	Pb	Cu	Zn	Cr	Cd	Hg	Ni	As
1990	–	287,0	62,7	–	51,7	2,4	5,8	26,7	70,7
1995	–	52,0	7,3	–	53,9	5,1	0,2	4,3	10,3
2000	–	47,4	8,0	–	14,7	0,9	0,4	1,2	0,7
2001	–	37,9	14,5	–	24,6	1,0	0,4	1,7	0,8
2002	–	85,1	59,3	–	51,6	0,8	3,7	28,4	16,1
2003	–	102,4	67,7	–	81,6	0,9	4,3	49,3	39,0
2004	1202,7	158,4	85,5	358,8	1692	3,5	7,2	66,5	54,2
2005	986,1	251,4	101,4	537,2	164,4	3,6	5,8	98,0	51,2
2006	982,7	242,1	94,4	503,2	160,4	4,3	6,6	87,0	56,5
2007	1335,7	249,2	96,8	524,5	167,8	4,7	6,9	80,9	54,2
2008	1067,0	200,0	93,7	445,9	171,9	4,6	7,2	90,0	56,6
2009	411,2	159,3	79,1	372,9	112,5	3,1	5,7	83,1	48,7
2010	240,1	159,1	87,4	335,0	132,6	2,8	6,8	94,4	52,2
2011	168,8	152,0	88,9	350,2	135,8	2,8	7,8	97,1	56,8
2012	163,8	123,0	84,7	334,6	116,5	2,6	7,3	106,2	60,2
2013	155,0	109,7	77,8	298,2	97,8	2,5	6,4	84,8	55,1
2014	103,0	96,2	70,8	236,1	67,9	3,3	5,7	57,0	43,4
2015	85,6	83,2	60,0	231,5	61,8	4,0	4,9	45,4	36,0
2016	82,0	92,6	64,7	251,7	69,3	3,9	8,6	49,6	41,2
2017	90,7	85,5	68,8	172,2	54,0	2,6	6,4	42,6	37,0
2018	71,9	77,5	64,9	161,7	54,0	2,8	6,4	44,6	35,8

Додаток А6. Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення за регіонами в період 2010-2018 рр., тис. т

Регіони	Викиди забруднюючих речовин по регіонам, тис. т							
	2010	2014	2015	2016	2017	2018	у % до 2017р.	у % до підсумку
Україна	4131,6	3350,0	2857,4	3078,1	2584,9	2508,3	97,0	100,0
Автономна Республіка Крим	32,3	–	–	–	–	–	–	–
Вінницька	103,0	124,5	134,7	119,8	155,8	97,3	62,5	3,9
Волинська	8,2	4,3	4,7	4,7	5,1	5,1	98,9	0,2
Дніпропетровська	933,1	855,8	723,9	833,0	657,3	614,3	93,5	24,5
Донецька	1378,1	1043,0	917,6	981,4	784,8	790,2	100,7	31,5
Житомирська	18,4	10,9	9,0	9,3	10,3	13	125,5	0,5
Закарпатська	17,4	3,9	4,4	4,9	3,2	4	124,0	0,2
Запорізька	217,5	206,7	193,7	167,0	180,9	174,7	96,6	7,0
Івано-Франківська	169,2	228,8	223,9	196,7	198,3	221,4	111,6	8,8
Київська	106,8	96,2	78,1	98,2	48,2	81,3	168,6	3,2
Кіровоградська	14,8	11,8	14,2	11,8	12,2	12,2	99,7	0,5
Луганська	511,7	197,8	115,2	155,5	75,1	46,7	62,1	1,9
Львівська	113,2	100,2	102,4	103,1	109,1	106,7	97,8	4,3
Миколаївська	21,5	15,9	15,8	13,9	14,2	13,1	92,4	0,5
Одеська	29,2	23,2	26,1	26,4	29,6	37,4	126,4	1,5
Полтавська	72,8	62,9	55,6	56,2	55,9	52,1	93,3	2,1
Рівненська	12,9	11,6	10,2	9,1	9,6	9,1	95,5	0,4
Сумська	31,7	27,0	17,5	19,8	20,3	20,8	102,1	0,8
Тернопільська	18,5	8,2	8,5	9,0	10,6	10,2	96,4	0,4
Харківська	151,9	150,5	53,4	100,2	45,0	44,7	99,5	1,8
Херсонська	5,3	7,2	8,9	9,7	9,6	12,4	129,1	0,5
Хмельницька	19,1	17,1	18,3	21,7	21,1	22,1	104,8	0,9
Черкаська	61,2	66,7	57,5	52,3	48,3	57,9	119,8	2,3
Чернівецька	3,8	2,5	3,2	3,0	3,3	2,7	83,6	0,1
Чернігівська	47,4	41,9	33,9	37,1	31,6	29,7	93,9	1,2
м. Київ	28,6	31,4	26,7	34,3	45,5	29,2	64,3	1,2
м. Севастополь	4,0	–	–	–	–	–	–	–

Додаток А7. Викиди забруднюючих речовин у атмосферу від стаціонарних джерел забруднення за регіонами та окремими населеними пунктами

Населений пункт	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Україна	4095	4338	4299	4266	3350	2857	3078	2585	2508
Автономна Республіка Крим	32,3	32,9	32,7	26,6	…	…	…	…	…
Сімферополь	2,1	1,9	1,9	2,5	…	…	…	…	…
Армянськ	12,1	12,7	13,7	5,7	…	…	…	…	…
Керч	1,9	1,8	1,7	1,7	…	…	…	…	…
Красноперекопськ	7,9	7,8	7,3	6,9	…	…	…	…	…
Ялта	0,4	0,5	0,5	0,6	…	…	…	…	…
Вінницька область	103,0	87,3	101,3	149,5	124,5	134,7	119,8	155,8	97,3
Вінниця	3,4	4,2	4,1	2,9	3,3	15,8	12,1	13,6	2,5
Ладижин	74,8	59,3	75,6	125,3	88,2	78,8	66,1	94,7	73,5
Волинська область	8,2	7,6	7,3	6,6	4,3	4,7	4,7	5,1	5,1
Луцьк	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	0,8	0,8	0,4
Ковель	3,5	3,2	3,0	2,5	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4
Дніпропетровська область	933,1	950,4	962,0	940,5	855,8	723,9	833,0	657,3	614,3
Дніпро	110,0	110,0	110,4	104,8	87,7	48,5	80,6	45,7	47,1
Кам′янське	108,5	124,7	116,4	115,5	105,0	101,0	90,5	57,8	103,3
Зеленодольськ	173,4	205,3	219,3	185,2	155,7	66,9	146,1	48,1	28,6
Кривий Ріг	395,0	358,6	354,6	351,8	327,4	327,0	342,9	323,9	267,4
Нікополь	26,2	25,4	22,4	15,3	21,5	19,5	25,7	25,3	26,2
Донецька область	1378,1	1525,9	1514,8	1448,1	1043,0	917,6	981,4	784,8	790,2
Донецьк	80,2	71,1	71,6	70,8	…	…	…	…	…
Авдіївка	14,7	17,9	17,0	14,3	9,7	8,1	10,3	11,7	12,5
Вугледар	25,9	33,6	29,5	22,8	28,1	28,4	25,9	24,1	23,8
Горлівка	28,4	25,3	21,3	13,1	…	…	…	…	…
Дебальцеве	112,8	127,0	172,2	74,4	109,4	…	…	…	…
з нього м.Світлодарське	104,2	117,9	163,5	65,4	101,1	…	…	…	…
Торецьк	10,8	12,2	12,4	13,8	8,8	7,6	8,9	6,7	7,0
Добропілля	39,5	35,5	26,6	20,6	35,7	35,1	35,8	31,0	35,0
Єнакієве	67,4	83,2	77,3	75,2	43,9	42,7	42,7	…	…
Зугрес	70,8	98,7	99,4	116,5	…	…	53,7	…	…
Кіровське	50,0	57,5	59,4	70,9	…	…	…	…	…
Курахове	123,9	166,2	148,4	166,0	125,0	112,7	126,4	154,7	139,2
Покровськ	33,3	40,9	32,3	28,0	89,4	82,5	68,1	90,8	66,8
Макіївка	58,1	53,2	46,5	39,3	26,7	…	…	…	…
Маріуполь	364,3	382,4	330,4	333,8	289,4	249,6	257,3	288,2	316,6
Новий Світ	109,9	105,4	118,0	133,0	96,1	81,4	97,0	…	…
Райгородок	48,8	60,1	53,4	39,0	15,2	37,8	56,7	23,9	44,8
Родинське	32,9	40,5	32,0	27,7	24,4	22,1	17,8	17,8	17,2
Слов'янськ	1,6	1,6	1,5	1,1	0,4	0,7	0,4	0,3	0,6
Харцизьк	75,4	103,1	110,2	126,6	79,5	56,5	53,7	…	…
Житомирська область	18,4	19,0	18,5	17,2	10,9	9,0	9,3	10,3	13,0
Житомир	0,9	1,3	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,4	1,5
Бердичів	5,6	5,7	5,7	5,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2
Закарпатська область	17,4	17,2	8,1	7,7	3,9	4,4	4,9	3,2	4,0

Ужгород	1,4	1,1	0,6	0,3	1,2	1,8	1,0	0,1	0,1
Воловець	0,5	0,7	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,7	0,3
Запорізька область	217,5	229,3	207,6	245,9	206,7	193,7	167,0	180,9	174,7
Запоріжжя	109,6	117,0	92,3	94,1	86,7	83,3	70,2	69,9	71,3
Енергодар	100,3	104,9	107,7	145,5	113,5	103,9	91,4	105,3	98,2
Івано-Франківська область	169,2	221,8	196,7	202,9	228,8	223,9	196,7	198,3	221,4
Івано-Франківськ	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Бурштин	146,8	198,7	174,7	182,7	199,8	198,0	168,5	160,1	182,9
Київська область	106,8	113,6	129,4	111,9	96,2	78,1	98,2	48,2	81,3
Богуслав	1,9	1,9	1,1	1,3	0,6	1,1	0,0	0,0	0,0
Боярка	5,4	1,1	4,0	3,6	3,1	0,1	0,6	0,1	0,6
Біла Церква	1,2	1,4	1,4	1,4	1,3	2,0	6,3	3,5	1,5
Українка	82,8	91,7	109,2	91,8	76,9	55,5	74,7	23,3	53,8
Яготин	8,8	0,2	4,6	4,0	3,6	2,1	1,9	2,3	2,0
Кіровоградська область	14,8	15,2	16,8	15,7	11,8	14,2	11,8	12,2	12,2
Кропивницький	2,2	2,4	2,3	2,3	2,4	2,3	2,3	2,1	2,0
Олександрія	0,2	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
Луганська область	511,7	472,0	447,6	442,0	197,8	115,2	155,5	75,1	46,7
Луганськ	160,7	142,6	130,5	119,5	…	…	…	…	…
Алчевськ	89,3	96,8	106,0	111,8	68,9	25,5	47,3	6,0	…
Лисичанськ	31,1	33,3	22,1	18,8	16,1	16,6	16,6	16,4	13,4
Перевальськ	6,4	0,1	0,1	0,2	0,5	…	…	…	…
Самсонівка	51,4	42,2	38,7	38,1	…	…	…	…	…
Стаханов	23,9	22,2	19,9	17,4	…	…	…	…	…
Щастя	155,7	136,6	124,0	114,3	90,9	55,5	73,2	45,7	26,2
Львівська область	113,2	129,4	130,7	121,4	100,2	102,4	103,1	109,1	106,7
Львів	2,0	1,8	1,7	1,6	1,6	2,6	1,7	4,0	2,0
Добротвір	39,3	46,8	48,3	41,4	37,5	40,6	44,9	49,8	43,7
Миколаївська область	21,5	25,7	25,1	20,4	15,9	15,8	13,9	14,2	13,1
Миколаїв	5,9	8,2	7,6	6,2	5,0	5,5	3,6	3,3	3,0
Ольшанське	6,9	4,2	3,9	2,8	2,3	2,2	1,4	1,3	1,8
Одеська область	29,2	30,5	28,2	26,2	23,2	26,1	26,4	29,6	37,4
Одеса	14,4	15,2	13,1	11,9	10,5	9,7	11,9	12,0	18,3
Березівка	0,3	0,3	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4
Чорноморськ	1,1	0,8	1,0	1,1	1,2	1,1	0,0	0,0	1,6
Южне	2,7	2,6	2,3	2,6	2,6	2,5	1,7	1,6	1,6
Полтавська область	72,8	72,3	67,9	66,6	62,9	55,6	56,2	55,9	52,2
Полтава	1,8	1,6	1,4	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,1
Горішні плавні	11,3	12,7	12,9	12,2	12,8	12,2	9,2	9,9	10,9
Кременчук	18,7	19,9	20,7	19,8	18,6	16,1	20,8	18,7	15,5
Рівненська область	12,9	17,1	14,9	12,0	11,6	10,2	9,1	9,6	9,1
Рівне	4,5	5,9	4,7	4,0	4,4	3,7	3,2	2,8	2,6
Здолбунів	2,7	4,8	4,6	3,5	3,1	2,7	2,3	3,2	2,7
Сумська область	31,7	35,9	30,2	30,5	27,0	17,5	19,8	20,3	20,8
Суми	10,4	12,9	10,9	9,9	8,9	6,5	7,0	7,4	8,4
Конотоп	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2
Тернопільська область	18,5	20,4	20,9	15,9	8,2	8,5	9,0	10,6	10,2
Тернопіль	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7
Кременець	0,9	1,1	1,1	0,7	0,3	0,3	1,3	1,1	0,9
Харківська область	151,9	174,1	197,6	210,3	150,5	53,4	100,2	45,0	44,7
Харків	4,9	5,0	5,3	4,9	4,5	4,4	4,9	4,9	4,8
Балаклія	0,7	3,6	0,5	0,6	0,5	0,4	0,4	0,5	0,3
Слобожанське	108,1	126,2	151,3	164,3	113,9	22,8	55,9	11,2	10,5
Донець	3,5	2,9	3,0	3,6	2,8	2,5	2,6	3,6	1,1

Херсонська область	5,3	5,8	6,4	6,0	7,2	8,9	9,7	9,6	12,4
Херсон	3,5	4,2	4,2	4,2	5,4	5,4	3,0	2,6	3,5
Хмельницька область	19,1	18,7	16,4	17,2	17,1	18,3	21,7	21,1	22,1
Хмельницький	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0	1,1	1,0
Гуменці	9,4	9,5	6,9	7,1	7,8	7,1	7,6	7,8	8,5
Красилів	3,6	3,1	3,6	3,6	2,8	0,8	0,6	1,5	0,7
Черкаська область	61,2	62,2	69,4	73,1	66,7	57,5	52,3	48,3	57,9
Черкаси	32,3	30,4	35,7	39,9	36,4	29,8	23,8	20,1	24,4
Тальне	0,9	1,2	1,0	0,8	0,4	0,4	0,2	0,2	0,1
Чернівецька область	3,8	3,8	2,9	2,7	2,5	3,2	3,0	3,3	2,7
Чернівці	1,3	1,3	1,1	1,0	1,0	1,1	1,0	1,1	1,0
Чернігівська область	47,4	49,5	45,8	43,7	41,9	33,9	37,1	31,6	29,7
Чернігів	19,8	23,0	21,4	21,1	20,0	15,1	18,5	13,0	13,2
Олишівка	3,3	3,3	2,6	2,4	2,4	0,1	0,0	0,4	0,4
м.Київ	28,6	33,3	32,9	31,9	31,4	26,7	34,3	45,5	29,2
м.Севастополь	4,0	3,7	3,2	2,6	…	…	…	…	…

Додаток А8. Викиди забруднюючих речовин в повітря від стаціонарних джерел забруднення за видами економічної діяльності у 2018 р.

Види економічної діяльності	Код за КВЕД-2010	Кількість викидів забруднюючих речовин	
		тис.т	у % до підсумку
Усього		2508,3	100,0
Сільське, лісове та рибне господарство	A	78,2	3,1
Добувна промисловість і розроблення кар'єрів	B	445,1	17,7
у тому числі			
Добування кам'яного та бурого вугілля	05	321,4	12,8
Добування металевих руд	07	77,9	3,1
Добування інших корисних копалин			
і розроблення кар'єрів	08	8,9	0,4
Переробна промисловість	C	882,9	35,2
у тому числі			
Виробництво харчових продуктів	10	37,2	1,5
Виробництво коксу та продуктів			
нафтоперероблення	19	35,5	1,4
Виробництво хімічних речовин і			0,0
хімічної продукції	20	14,9	0,6
Виробництво іншої неметалевої			
мінеральної продукції	23	35,2	1,4
Металургійне виробництво	24	728,5	29,0
Постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря	D	988,8	39,4
Водопостачання; каналізація; поводження з відходами	E	16,2	0,7
Будівництво	F	3,4	0,1
Оптова та роздрібна торгівля; ремонт автотранспортних засобів і мотоциклів	G	4,2	0,2
Транспорт, складське господарство, поштова та кур'єрська діяльність	H	58,2	2,3
Тимчасове розміщування й організація харчування	I	0,2	0,0
Інформація та телекомунікації; фінансова та страхова діяльність; операції з нерухомим майном; діяльність у сфері адміністративного та допоміжного обслуговування	J, K, L, N	5,2	0,2
Професійна, наукова та технічна діяльність; освіта	M, P	5,5	0,2
Державне управління і оборона; обов'язкове соціальне страхування	O	14,0	0,6
Охорона здоров'я та надання соціальної допомоги; мистецтво, спорт, розваги та відпочинок; надання інших видів послуг	Q, R, S	6,4	0,3

Додаток А9. Перелік забруднюючих речовин в повітрі, концентрація яких контролюється

Список А

1) SO_2; 2) NO_2 та NO_x; 3) C_6H_6; 4) CO; 5) Pb; 6) PM_{10}; 7) $PM_{2,5}$; 8) Ar; 9) Cd; 10) Hg; 11) Ni; 12) $C_{20}H_{12}$*; 13) O_3.

*Для оцінки концентрації бенз(а)пірену на деяких пунктах спостережень, визначених у програмі державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря для кожної зони та агломерації проводиться оцінювання щодо інших поліциклічних ароматичних вуглеводнів, перелік яких включає бенз(а)трацен, бензо(b)флуорантен, індено(1,2,3-cd)пірен, дибенз(a,h)антрацен.

Список Б

1) NH_3; 2) $C_6H_5NH_2$; 3) HCl; 4) HCN; 5) Fe та його сполуки; 6) HNO_3; 7) H_2SO_4; 8) C_8H_{10}; 9) ЛОР*; 10) Mn та його сполуки; 11) Cu та його сполуки; 12) сажа; 13) H_2S; 14) CS_2; 15) C_6H_6O; 16) HF; 17) Cl; 18) C_6H_6ClN; 19) Cr та його сполуки; 20) Zn та його сполуки.

*(1-бутен; 1-пентен; 1,2,3-триметилбензол; 1,2,4-триметилбензол; 1,3-бутадієн; 1,3,5-триметилбензол; 2-пентен; ацетилен; бензол; етан; етилбензол; етилен; загальна кількість вуглеводнів, які не належать до гомологічного ряду метану; і-бутан; і-гексан; ізопрен; і-октан; і-пентан; м+п-ксилол; н-бутан; н-гексан; н-гептан; н-октан; н-пентан; о-ксилол; пропан; пропен; толуол; транс-2-бутен; формальдегід; цис-2-бутен

Додаток А10. Перелік зон та агломерацій, що встановлюються на території України

І. Зони:

1) Автономна Республіка Крим; 2) Вінницька; 3) Волинська; 4) Дніпропетровська; 5) Донецька; 6) Житомирська; 7) Закарпатська; 8) Запорізька; 9) Івано-Франківська; 10) Київська; 11) Кіровоградська; 12) Луганська; 13) Львівська; 14) Миколаївська; 15) Одеська; 16) Полтавська; 17) Рівненська; 18) Сумська; 19) Тернопільська; 20) Харківська; 21) Херсонська; 22) Хмельницька; 23) Черкаська; 24) Чернівецька; 25) Чернігівська.

Межі зон збігаються з межами відповідних адміністративно-територіальних одиниць. До складу зон не входять агломерації, що розташовані на їх території.

ІІ. Агломерації

1) Вінниця; 2) Горлівка; 3) Дніпро; 4) Донецьк; 5) Житомир; 6) Запоріжжя; 7) Київ; 8) Кривий Ріг; 9) Луганськ; 10) Львів; 11) Макіївка; 12) Маріуполь; 13) Миколаїв; 14) Одеса; 15) Полтава; 16) Севастополь; 17) Сімферополь; 18) Суми; 19) Харків; 20) Херсон; 21) Хмельницький; 22) Черкаси; 23) Чернівці; 24) Чернігів.

Межі агломерацій збігаються з межами відповідних міст.

Додаток А11. Верхній та нижній пороги оцінювання рівня забруднення повітря

1) SO_2

	Охорона здоров'я	Захист рослинності
Верхній поріг оцінювання	60 відсотків 24-годинної граничної величини (75 мкг/куб. метрів не має бути перевищено більш як три рази у будь-який календарний рік)	60 відсотків зимового критичного рівня (12 мкг/куб. метрів)
Нижній поріг оцінювання	40 відсотків 24-годинної граничної величини (50 мкг/куб. метрів не має бути перевищено більш як три рази у будь-який календарний рік)	40 відсотків зимового критичного рівня (8 мкг/куб. метрів)

2) Діоксид азоту та оксиди азоту (NO_x)

	Щогодинна гранична величина для захисту здоров'я людини (NO_2)	Щорічна гранична величина для захисту здоров'я людини (NO_2)	Щорічний критичний рівень для захисту рослинної та природної екосистем (NO_2)
Верхній поріг оцінювання	70 відсотків граничної величини (140 мкг/куб. метрів не має бути перевищено більше 18 разів у будь-який календарний рік)	80 відсотків граничної величини (32 мкг/куб. метрів)	80 відсотків критичного рівня (24 мкг/куб. метрів)
Нижній поріг оцінювання	50 відсотків граничної величини (100 мкг/куб. метрів не має бути перевищено більше 18 разів у будь-який календарний рік)	65 відсотків граничної величини (26 мкг/куб. метрів)	65 відсотків критичного рівня (19,5 мкг/куб. метрів)

3) Мілкодисперсний пил ($PM_{10}/PM_{2,5}$)

	Середнє значення $ТЧ_{10}$ за 24 години	Середнє значення $ТЧ_{10}$ на рік	Середнє значення $ТЧ_{2,5}$ на рік
Верхній поріг оцінювання	70 відсотків граничної величини (35 мкг/куб. метрів не має бути перевищено більше 35 разів у будь-який календарний рік)	70 відсотків граничної величини (28 мкг/куб. метрів)	70 відсотків граничної величини (17 мкг/куб. метрів)
Нижній поріг оцінювання	50 відсотків граничної величини (25 мкг/куб. метрів не має бути перевищено більше 35 разів у будь-який календарний рік)	50 відсотків граничної величини (20 мкг/$м^{-3}$)	50 відсотків граничної величини (12 мкг/куб. метрів)

4) Pb

	Річне середнє значення
Верхній поріг оцінювання	70 відсотків граничної величини (0,35 мкг/куб. метрів)
Нижній поріг оцінювання	50 відсотків граничної величини (0,25 мкг/куб. метрів)

5) C_6H_6

	Річне середнє значення
Верхній поріг оцінювання	70 відсотків граничної величини (3,5 мкг/куб. метрів)
Нижній поріг оцінювання	40 відсотків граничної величини (2 мкг/куб. метрів)

6) CO

	Середнє значення за 8 годин
Верхній поріг оцінювання	70 відсотків граничної величини (7 мг/куб. метрів)
Нижній поріг оцінювання	50 відсотків граничної величини (5 мг/куб. метрів)

7) Ar

	Річне середнє значення
Верхній поріг оцінювання	60 відсотків цільового показника (3,6 нг/куб. метрів)
Нижній поріг оцінювання	40 відсотків цільового показника (2,4 нг/куб. метрів)

8) Cd

	Річне середнє значення
Верхній поріг оцінювання	60 відсотків цільового показника (3 нг/куб. метрів)
Нижній поріг оцінювання	40 відсотків цільового показника (2 нг/куб. метрів)

9) Ni

	Річне середнє значення
Верхній поріг оцінювання	70 відсотків цільового показника (14 нг/куб. метрів)
Нижній поріг оцінювання	50 відсотків від цільового показника (10 нг/куб. метрів)

10) $C_{20}H_{12}$

	Річне середнє значення
Верхній поріг оцінювання	60 відсотків цільового показника (0,6 нг/куб. метрів)
Нижній поріг оцінювання	40 відсотків цільового показника (0,4 нг/куб. метрів)

Додаток А12. Методи оцінювання рівнів забруднюючих речовин

Для проведення фіксованих вимірювань застосовуються такі методи оцінювання:

1) SO_2 – згідно з ДСТУ EN 14212:2018 - (EN 14212:2012, IDT) Атмосферне повітря. Стандартний метод вимірювання концентрації діоксиду сірки методом ультрафіолетової флуоресценції;

2) NO_2 та NO_x – згідно з ДСТУ EN 14211:2018 - (EN 14211:2012, IDT) Атмосферне повітря. Стандартний метод вимірювання концентрації діоксиду азоту та монооксиду азоту методом хемілюмінесценції;

3) C_6H_6 – згідно з ДСТУ EN 14662-1:2018 (EN 14662-1:2005, IDT) Якість атмосферного повітря. Стандартний метод вимірювання концентрації бензолу (частини перша - третя);

4) CO – згідно з ДСТУ EN 14626:2018 (EN 14626:2012, IDT) Атмосферне повітря. Стандартний метод вимірювання концентрації монооксиду вуглецю методом недисперсійної інфрачервоної спектроскопії;

5) Pb – згідно з ДСТУ EN 14902:2018 (EN 14902:2005, IDT) Якість атмосферного повітря. Стандартний метод вимірювання вмісту Pb, Cd, As та Ni у фракції аерозольних частинок PM_{10};

6) PM_{10} – згідно з ДСТУ EN 12341:2018 (EN 12341:2014, IDT) Атмосферне повітря. Стандартний гравіметричний метод вимірювання масової концентрації аерозольних частинок PM_{10} або $PM_{2,5}$;

7) $PM_{2,5}$ – згідно з ДСТУ EN 12341:2018 (EN 12341:2014, IDT) Атмосферне повітря. Стандартний гравіметричний метод вимірювання масової концентрації аерозольних частинок PM10 або PM2,5;

8) Ar – згідно з ДСТУ EN 14902:2018 (EN 14902:2005, IDT) Якість атмосферного повітря. Стандартний метод вимірювання вмісту Pb, Cd, As та Ni у фракції аерозольних частинок PM10;

9) Cd – згідно з ДСТУ EN 14902:2018 (EN 14902:2005, IDT) Якість атмосферного повітря. Стандартний метод вимірювання вмісту Pb, Cd, As та Ni у фракції аерозольних частинок PM10;

10) Ni – згідно з ДСТУ EN 14902:2018 (EN 14902:2005, IDT) Якість атмосферного повітря. Стандартний метод вимірювання вмісту Pb, Cd, As та Ni у фракції аерозольних частинок PM10;

11) O_3 – згідно з ДСТУ EN 14625:2016 (EN 14625:2012, IDT) Повітря атмосферне. Стандартний метод вимірювання концентрації озону на основі фотометрії в ультрафіолетовій області спектра.

Додаток А13. Перелік шкідливих речовин, концентрація яких визначається згідно програми моніторингу якості атмосферного повітря

№	Речовина	К-сть міст
1	Пил, NO_2, SO_2	53
2	CO	49
3	NO	28
4	Важкі метали, $C_{20}H_{12}$	50
5	CH_2O	43
6	NH3, C_6H_5OH	23
7	HF	14
8	H_2S	16
9	HCl	11
10	Сажа	6
11	Розчинні сульфати	20
12	H_2SO_4, C_6H_6, C_7H_8, C_8H_{10}, C_8H_{10}	2
13	$C_6H_5NH_2$	1

ДОДАТОК Б

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАСОБІВ ТА СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ

Таблиця Б1. Технічні характеристики газоаналізатора 604EX20-C

Параметр	Значення
Діапазон вимірювань, [мг/м^3]	
CO	0…20
NO	0…5
NO_2, SO_2, NH_3	0…2
H_2S, O_3, Cl_2	0…1
Абсолютна похибка, [мг/м^3]	
CO	$\pm(0{,}2+0{,}1\cdot C_x)$
NO, NO_2, SO_2, NH_3, H_2S, O_3, Cl_2	$\pm(0{,}1+0{,}15\cdot C_x)$
Час вимірювання, [хв]	20
Наявність бездротового зв’язку	+, GSM-модем
Термін зберігання даних, [діб]	30
Живлення	220 В, 50 Гц
Робочий діапазон температур, [°C]	-10…+35°
Габаритні розміри, [см]	36x25x16
Маса, не більше, [кг]	6,5
Термін служби газоаналізатора, не менше, [роки]	6
Термін служби сенсорів, [роки]	1-2

Таблиця Б2. Технічні характеристики газоаналізатора 604EX20-П

Параметр	Значення
Діапазон вимірювань, [мг/м^3]	
CO	0…20
NO, NO_2, SO_2, NH_3, Cl_2	0…5
H_2S, O_3	0…1
Абсолютна похибка, [мг/м^3]	
CO	$\pm(0{,}2+0{,}15\cdot C_x)$
NO, NO_2, SO_2, NH_3, H_2S, O_3, Cl_2	$\pm(0{,}1+0{,}2\cdot C_x)$
Час вимірювання, [хв]	20
Наявність бездротового зв’язку	–
Живлення	
автономне	блок акумуляторів, 6,1-7,1 В
стаціонарне	мережевий адаптер, 220 В, 50 Гц
Час роботи без заряджання, не менше, [год]	8

Робочий діапазон температур, [°С]	-10…+35
Габаритні розміри, [см]	26х24х10,5
Маса, не більше, [кг]	2,5
Термін служби газоаналізатора, не менше, [роки]	6
Термін служби сенсорів, [роки]	1-2

Таблиця Б3. Технічні характеристики системи АСЕМА

Параметр	**Значення**
Діапазон вимірювань, [мг/м^3]	
CO, C_xH_y	0…50
NO, NO_2	0…10
SO_2, O_3	0…1
Абсолютна похибка, [мг/м^3]	
CO	$\pm(0{,}2+0{,}15\cdot C_x)$
C_xH_y	±3
NO, NO_2, SO_2, O_3	$\pm(0{,}005+0{,}15\cdot C_x)$
Час вимірювання, [хв]	20
Наявність бездротового зв’язку	+, GSM-модем
Термін зберігання даних, [роки]	5
Живлення	220 В, 50 Гц
Комплектація:	
газоаналізатори	645ХЛ 10, 667ФФ 05, 621ЕХ 20, 652ХЛ 05, 623КПІ 08

Таблиця Б4. Технічні характеристики «ГАК – Атмосфера»

Параметр	**Значення**
Діапазон вимірювань, [мг/м^3]	
CO	0…50
NO, NO_2	0…10
SO_2	0…1
Абсолютна похибка, [мг/м^3]	
CO	$\pm(0{,}2+0{,}15\cdot C_x)$
NO, NO_2, SO_2	$\pm(0{,}005+0{,}15\cdot C_x)$
Час вимірювання, [хв]	20
Наявність бездротового зв’язку	+, GSM-модем Siemens MS 35i
Термін зберігання даних, [роки]	10
Живлення	220 В, 50 Гц
Робочий діапазон температур, °С	+5…+40

Комплектація:	
газоаналізатори	645ХЛ 10, 621ЕХ 20, 667ФФ 05
шафа	STS 1666 (IP55)
джерело безперебійного електроживлення	Powercom BNT – 600 AP
термостат	ENDA ET 1311-230-H-XX
вентилятор	DP200A 120x38, 220В, 0,14 А
автоматичний вимикач	ВА47-29Ь В 10А

Таблиця Б5. Технічні характеристики поста «АТМОСФЕРА-10»

Параметр	**Значення**
Діапазон вимірювань, [мг/м^3]	
CO	0…50
NO, NO_2	0…10
SO_2	0…1
Абсолютна похибка, [мг/м^3]	
CO	$\pm(0{,}2+0{,}15\cdot C_x)$
NO, NO_2, SO_2	$\pm(0{,}005+0{,}15\cdot C_x)$
Метеопараметри:	
температура, ^{o}C	-40…+50
відносна вологість, [%]	30…98
атмосферний тиск. [гПа]	650…1080
швидкість вітру, [м/с]	1,5…50
напрям вітру, [град]	0…359
Абсолютна похибка вимірювання метеопараметрів:	
температура, ^{o}C	±0,8
відносна вологість, [%]	±10
атмосферний тиск. [гПа]	±1
швидкість вітру, [м/с]	±0,5 при $\upsilon\leq 5$ м/с ±10% при $\upsilon>5$ м/с
напрям вітру, [град]	±10
Час вимірювання, [хв]	20
Наявність бездротового зв’язку	+, GSM-модем Siemens MS 35i
Термін зберігання даних, [роки]	10
Живлення	220 В, 50 Гц

Робочий діапазон температур,	-30…+40
Комплектація:	
газоаналізатори	621ЕЧ 20, 667ФФ 05/667ФФ 20, 645 ХЛ 10/645ХЛ 20
джерело безперебійного електроживлення	Powercom BNT – 600 AP
кондиціонер	SH-07ZS8
обігрівач	DELONGHI

Таблиця Б6. Технічні характеристики пересувної екологічної лабораторії «ПЕЛКЗА»

Параметр	**Значення**
Діапазон вимірювань, [мг/м^3]	
CO, C_xH_y	0…50
NO, NO_2	0…10
SO_2, O_3	0…1
Абсолютна похибка, [мг/м^3]	
C_xH_y	±(0,3+0,15·C_x)
CO	±(0,2+0,15·C_x)
NO, NO_2, SO_2, O_3	±(0,005+0,15·C_x)
Час вимірювання, [хв]	20
Наявність бездротового зв’язку	+, GSM-модем Siemens MS 35i
Живлення	
автономне	акумулятор з перетворювачем, 12 В
стаціонарне	мережевий адаптер, 220 В, 50 Гц
Робочий діапазон температур, ^{o}C	+5…+40

Таблиця Б7. Вимірювальні параметри та їх діапазон АСКЗА ПОСТ-2

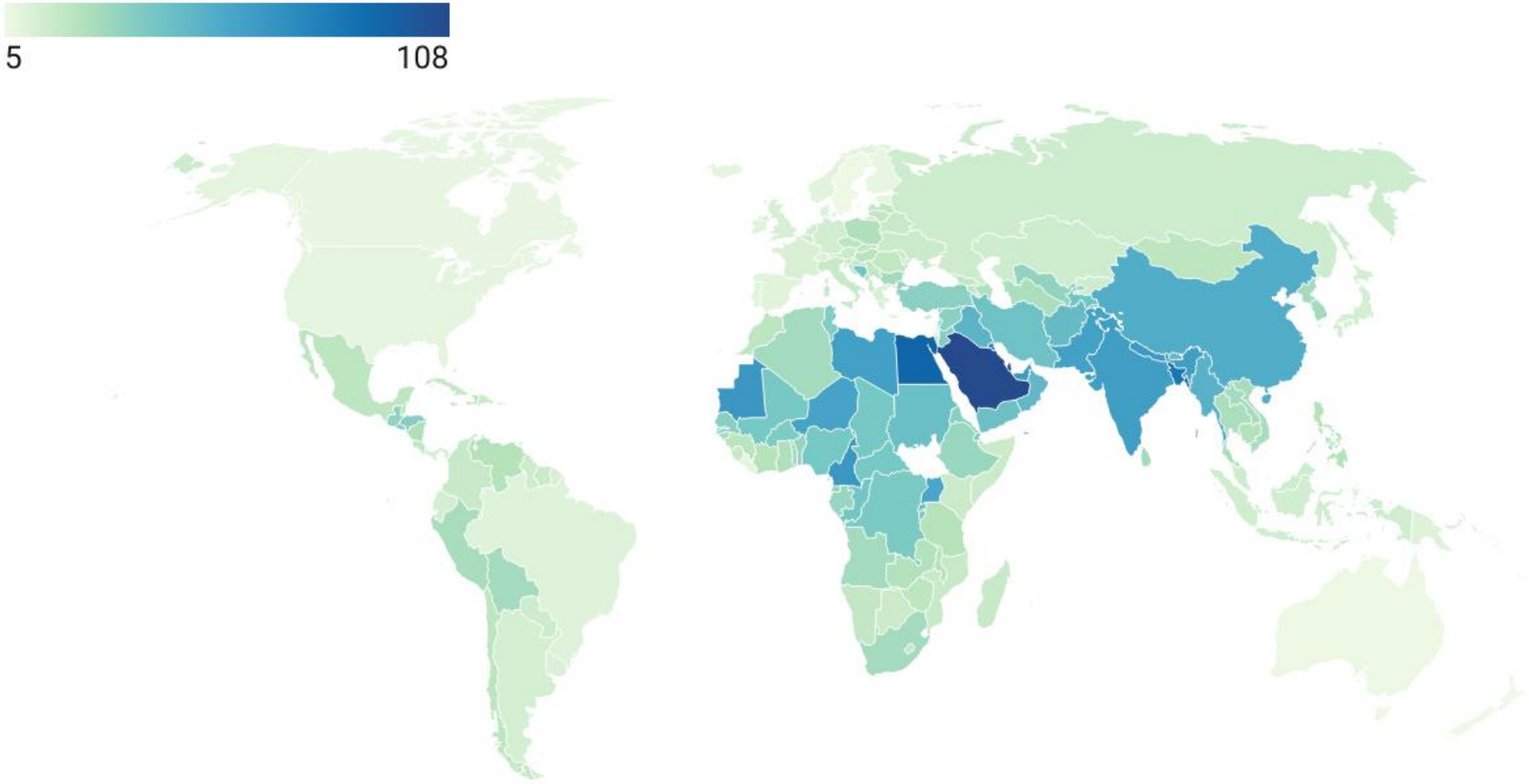
Вимірювальний параметр	Діапазон вимірювання
NO_2, [мг/м^3]	0…0,2…1…2.5
NO, NO_2, [мг/м^3]	0…0,1…0,5…2…10
C_xH_y (без метану), [мг/м^3]	0…5…15…50
CO, [мг/м^3]	0…5…50

O_3, [мг/м^3]	0…0,1…0,5…1
NH_3, [мг/м^3]	0…0,2…1…5
H_2S, [мг/м^3]	0…0,1…0,5
Пил, [мг/м^3]	0…3…10…30
Температура, [^{o}C]	-40…+50
Відносна вологість, [%]	0…100
Атмосферний тиск, [гПа]	650…1080
Швидкість вітру, [м/с]	0…35
Напрям вітру, [град]	0…359

ДОДАТОК В

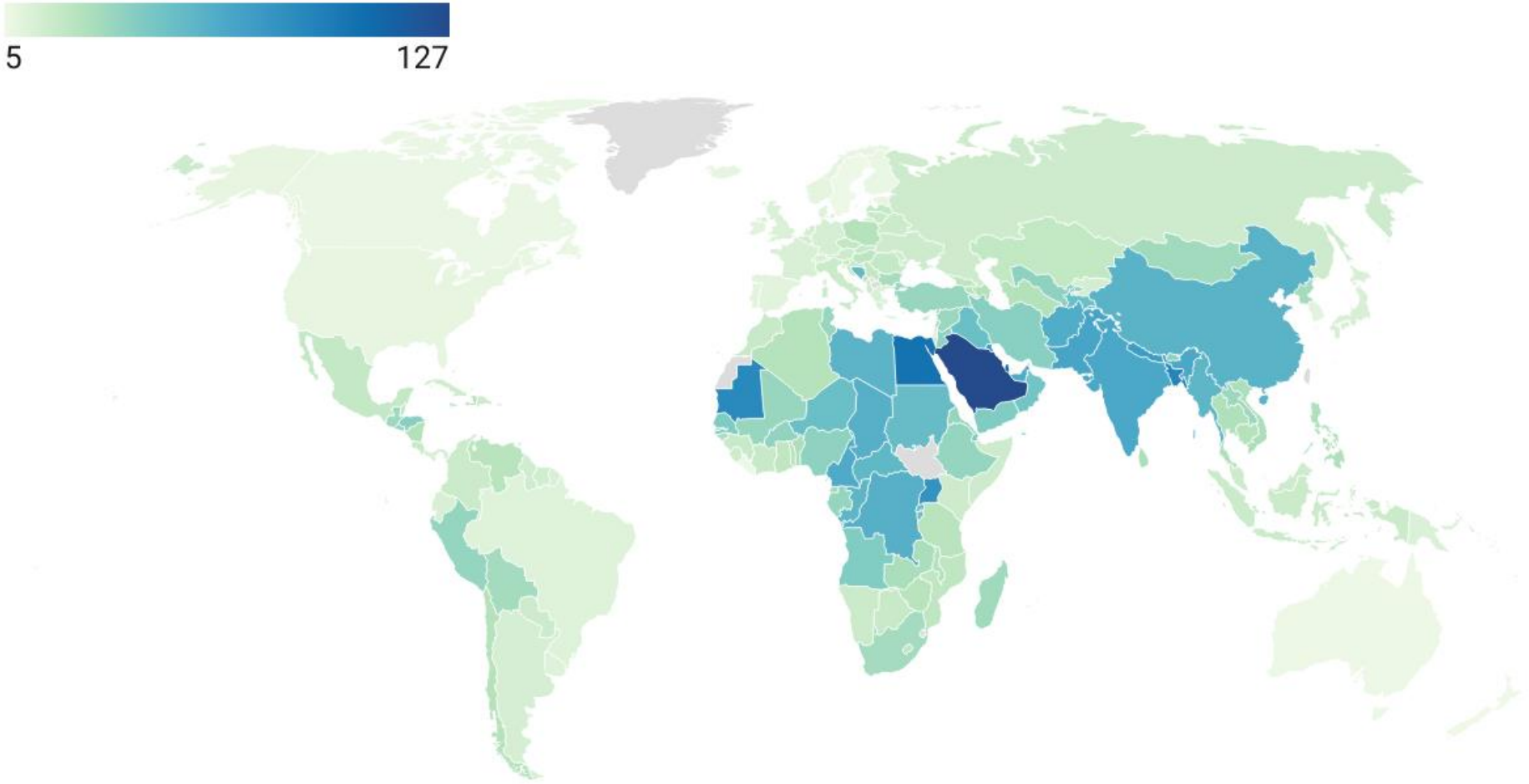
СТАТИСТИЧНІ ДАНІ ЩОДО ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ $PM_{2,5}$ ТА ПОШИРЕННЯ ЗАХВОРЮВАНЬ У КРАЇНАХ СВІТУ

Додаток В1. Медіанні значення концентрації $PM_{2,5}$ (міські + сільські райони)



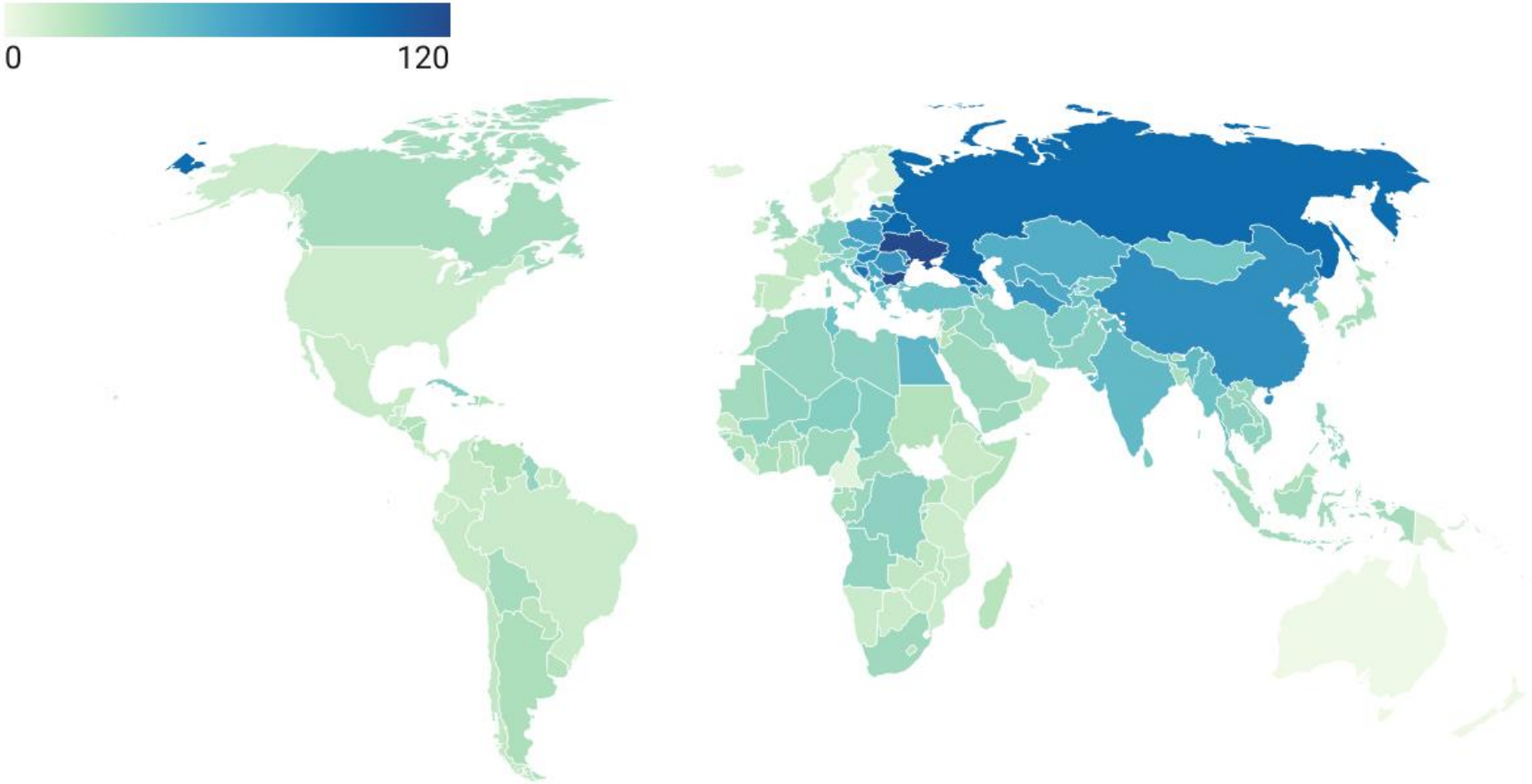
Source: Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease (2016)

Додаток В2. Медіанні значення концентрації $PM_{2,5}$ (міські райони)



Source: Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease (2016)

Додаток В3.Смерність від забрудненого повітря на 100 тис.чол



Source: Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease

Додаток В4. Кількість зафіксованих смертей від забрудненого повітря у світі (за даними [510])

Захворювання / Країна	Гостре захворюва-ння нижніх дихальних шляхів	Хронічне обструктив-не захворюванн я легенів	Рак легень	Ішемічн а хвороба серця	Інсульт	Загальна к-сть смертей
Австралія	0	1	14	58	20	93
Австрія	1	63	687	1642	496	2890
Азербайджан	135	45	238	2656	1222	4297
Албанія	8	20	184	850	780	1842
Алжир	341	131	633	5087	5231	11424
Ангола	3687	131	39	1491	1710	7058
Андорра	0	0	3	13	6	22
Антигуа і Барбуда	0	0	1	10	6	17
Аргентина	85	192	1500	5256	2723	9756
Афганістан	3772	188	301	3813	3071	11145
Бангладеш	3850	8316	4375	10291	10617	37449
Барбадос	1	0	4	22	17	44
Бахрейн	2	7	25	76	39	148
Беліз	1	1	3	18	13	36
Бельгія	1	115	1232	1276	718	3343
Бенін	714	41	19	767	1065	2606
Білорусь	4	57	563	6680	2146	9450
Болгарія	20	195	960	4031	3428	8634
Болівія	265	68	88	1126	973	2521
Боснія і Герцеґовина	2	100	583	1398	1454	3538
Ботсвана	35	3	10	89	136	272
Бразилія	198	539	2901	12987	9616	26241
Бруней Даруссалам	0	0	0	0	0	1
Буркіна Фаса	1651	72	45	1120	1735	4623
Бурунді	1378	45	21	532	1025	3001
Бутан	20	29	14	76	53	192
Вануату	0	0	0	1	1	2
Велика Британія	12	424	4803	7366	3749	16355
Венесуела	125	126	814	3466	1582	6113
В'єтнам	591	1127	4897	5081	15644	27340
Вірменія	8	53	370	1643	676	2750
Габон	58	18	16	138	155	385
Гаїті	574	14	98	801	1535	3022
Гана	968	72	75	1810	2804	5728
Гаяна	3	1	4	123	99	230
Гватемала	396	69	162	880	473	1980
Гондурас	99	81	93	809	493	1575
Гренада	0	0	1	11	9	22
Греція	1	70	844	2388	1705	5008
Грузія	12	52	192	2127	1358	3741
Ґвінея	690	32	16	723	1006	2466
Ґвінея-Бісау	159	7	4	120	174	464
Данія	0	39	402	434	263	1138
Демократична республіка Конґо	10520	473	87	4828	7124	23034

Джибуті	54	5	5	57	92	212
Домініка	0	0	1	6	5	13
Домініканська Республіка	85	20	164	1098	641	2008
Еквадор	86	43	152	875	615	1771
Екваторіальна Ґвінея	62	8	5	75	77	228
Еритрея	362	22	17	307	534	1243
Естонія	0	1	36	233	48	319
Ефіопія	5565	400	376	2320	4595	13257
Єгипет	951	1968	2079	22327	16206	43531
Ємен	1415	135	122	2849	2144	6667
Замбія	997	18	24	519	854	2411
Зімбабве	700	51	123	366	616	1856
Ізраїль	1	35	411	509	262	1219
Індія	39914	110500	26334	249388	195001	621138
Індонезія	2534	1000	4951	16781	36527	61792
Ірак	1010	173	728	4974	3200	10085
Іран	600	434	1460	16484	7290	26267
Ірландія	0	12	142	403	124	681
Ісландія	0	0	4	12	4	21
Іспанія	3	125	1834	3134	1765	6860
Італія	2	558	6391	8292	5814	21057
Йорданія	63	34	159	743	484	1483
Кабо-Верде	315	62	230	1249	1078	2934
Казахстан	38	43	121	2948	1744	4895
Камбоджа	2621	169	62	1736	2413	7000
Камерун	1	23	503	1060	300	1886
Канада	5	7	1	37	78	128
Катар	1	2	34	104	36	179
Кенія	2021	31	79	1192	1780	5102
Киргизія	48	33	73	1357	617	2129
Китай	6716	90626	228479	257638	449373	1032833
Кіпр	0	3	56	120	45	223
Колумбія	158	270	748	3688	1638	6502
Коморські Острови	32	2	1	31	59	125
Конго	324	43	8	386	484	1244
Коста-Ріка	2	26	65	380	172	644
Кот-д'Івуар	1431	64	42	1394	2038	4970
Куба	7	71	975	1989	1086	4127
Кувейт	12	3	35	319	117	487
Лаос	399	48	122	668	620	1857
Латвія	0	7	199	1156	496	1859
Лесото	82	16	6	89	195	387
Литва	1	16	223	1424	553	2216
Ліберія	63	4	2	75	91	236
Ліван	6	25	209	921	274	1434
Лівія	30	60	251	1038	674	2054
Люксембург	0	4	37	35	30	106
Мавританія	340	23	10	237	369	978
Маврікій	2	2	23	144	82	252
Мадагаскар	914	47	136	1135	1984	4215
Малаві	747	42	13	697	1207	2706
Малайзія	29	148	670	3630	1773	6251
Малі	2291	154	49	1122	1601	5218

Мальдіви	1	1	3	23	20	48
Мальта	0	1	27	76	25	129
Марокко	369	84	767	3379	3535	8134
Мексика	467	742	1336	9983	4269	16798
Мозамбік	1350	58	58	598	1278	3343
Молдова	16	26	188	1967	811	3008
Монако	0	0	1	4	2	8
Монголія	39	18	60	572	434	1123
М'янма	1530	1561	2780	5476	11316	22664
Намібія	34	10	9	92	162	306
Непал	740	1770	923	3328	3183	9943
Нігерія	22233	652	264	9618	13983	46750
Нігер	3168	99	7	1073	1835	6183
Нідерланди	1	137	1839	1203	836	4017
Нікарагуа	72	40	64	671	399	1247
Німеччина	5	569	6821	13392	5372	26160
Нова Зеландія	0	0	3	13	4	20
Норвегія	0	12	137	330	156	636
Об'єднані Арабські Емірати	9	13	62	399	172	655
Оман	10	6	25	257	180	477
Пакистан	13683	5688	2394	20772	16705	59241
Панама	15	5	36	227	142	425
Папуа-Нова Гвінея	165	10	26	186	132	519
Парагвай	42	16	108	529	465	1159
Перу	163	128	651	1949	1348	4239
Південна Корея	7	284	4695	2638	3899	11523
Південно-Африканська Республіка	1160	464	1638	4608	6486	14356
Північна Корея	230	1210	3334	3910	6911	15596
Північна Македонія	1	23	292	390	660	1366
Польща	12	483	5731	11987	8376	26589
Португалія	1	20	323	647	779	1769
Росія	133	723	9840	83938	46216	140851
Руанда	738	34	19	496	940	2227
Румунія	88	164	2115	6794	5336	14497
Сальвадор	46	76	97	953	326	1498
Саудівська Аравія	59	236	362	4128	3335	8119
Сейшельські Острови	0	0	2	10	5	18
Сенегал	613	67	32	529	764	2005
Сент-Вінсент і Ґренадіни	0	0	1	12	8	21
Сент-Люсія	1	0	3	15	18	38
Сербія	4	88	1341	2049	1952	5435
Сингапур	1	16	285	544	248	1094
Сирія	116	66	538	3779	1496	5994
Словаччина	5	21	416	2210	813	3465
Словенія	0	10	217	265	240	732
Соломонові Острови	0	0	0	0	0	0
Сомалі	1362	16	22	273	471	2144
Сполучені Штати Америки	33	721	8836	22560	5893	38043
Судан	2878	199	118	1738	3161	8093

Сурінам	2	0	8	31	33	74
Східний Тімор	50	2	26	73	58	210
Сьєрра-Леоне	745	15	8	398	617	1783
Таджикистан	501	86	95	1743	1189	3615
Таїланд	104	976	4323	9669	7302	22375
Танзанія	1912	110	36	1599	2108	5765
Того	484	19	12	372	566	1454
Трінідад і Тобаго	3	2	28	223	96	351
Туніс	45	102	492	2465	1527	4631
Туреччина	240	1065	6498	14813	10053	32668
Туркменістан	130	55	114	2425	944	3667
Угорщина	4	160	2000	4324	1659	8147
Уганда	3141	192	126	1624	2905	7989
Узбекистан	722	195	444	9984	4936	16282
Україна	63	268	2644	38707	12824	54507
Уругвай	4	14	169	308	217	713
Фіджі	0	0	0	2	0	2
Філіппіни	1666	599	2240	14067	10124	28696
Фінляндія	0	1	31	233	62	327
Франція	4	126	4256	3793	2774	10954
Хорватія	0	49	583	1404	806	2842
Центрально-африканська Республіка	452	64	12	306	381	1215
Чад	2426	61	20	731	1101	4340
Чехія	3	83	1210	3620	1194	6110
Чилі	17	89	587	1087	1042	2822
Чорногорія	0	1	77	160	145	382
Швейцарія	0	28	408	750	295	1482
Швеція	0	0	4	26	9	40
Шрі-Ланка	33	275	365	4846	2273	7792
Ямайка	8	8	82	246	349	693
Японія	18	281	9743	10286	10463	30790

ДОДАТОК Г
РЕЗУЛЬТАТИ КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ МІЖ СКЛАДОВИМИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ ТА РІВНЕМ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН

№	Набір вел.	$\hat{r}$	$\hat{r}'$	$\hat{t}$	$t_{v;0,05}$	$\lvert\hat{t}\rvert \geq t_{v;0,05}$	r_α	$\lvert\hat{r}'\rvert \geq r_\alpha$	$\overset{*}{Z}$	$tgh\overset{*}{Z}_1$	$tgh\overset{*}{Z}_2$
1	$A_{1,1}$	0,939	0,945	9,135	1,812	+	0,574	+	1,783	0,811	0,985
2	$A_{1,2}$	0,968	0,972	12,973	1,812	+	0,574	+	2,119	0,899	0,992
3	$A_{1,3}$	0,984	0,986	18,661	1,812	+	0,574	+	2,475	0,949	0,996
4	$A_{1,4}$	0,845	0,859	5,302	1,812	+	0,574	+	1,289	0,562	0,960
5	$A_{1,5}$	0,951	0,956	10,301	1,812	+	0,574	+	1,897	0,846	0,988
6	$A_{1,6}$	0,806	0,822	4,560	1,812	+	0,574	+	1,162	0,469	0,948
7	$A_{2,1}$	0,370	0,388	1,332	1,812	-	0,574	-	0,410	-0,239	0,787
8	$A_{2,2}$	0,528	0,549	2,078	1,812	+	0,574	-	0,617	-0,036	0,854
9	$A_{2,3}$	0,600	0,622	2,509	1,812	+	0,574	+	0,728	0,074	0,881
10	$A_{2,4}$	0,841	0,855	5,202	1,812	+	0,574	+	1,273	0,551	0,958
11	$A_{2,5}$	0,784	0,801	4,227	1,812	+	0,574	+	1,101	0,420	0,942
12	$A_{2,6}$	0,855	0,867	5,511	1,812	+	0,574	+	1,322	0,584	0,962
13	$A_{3,1}$	0,692	0,712	3,205	1,812	+	0,574	+	0,891	0,233	0,913
14	$A_{3,2}$	0,775	0,792	4,101	1,812	+	0,574	+	1,077	0,400	0,939
15	$A_{3,3}$	0,874	0,886	6,033	1,812	+	0,574	+	1,402	0,634	0,968
16	$A_{3,4}$	0,921	0,929	7,943	1,812	+	0,574	+	1,652	0,761	0,980
17	$A_{3,5}$	0,945	0,950	9,640	1,812	+	0,574	+	1,834	0,828	0,986
18	$A_{3,6}$	0,876	0,887	6,073	1,812	+	0,574	+	1,408	0,638	0,968
19	$A_{4,1}$	0,480	0,500	1,828	1,812	+	0,574	-	0,550	-0,103	0,835
20	$A_{4,5}$	0,566	0,588	2,297	1,812	+	0,574	+	0,674	0,021	0,869
21	$A_{4,6}$	0,477	0,497	1,812	1,812	+	0,574	-	0,546	-0,107	0,833
22	$A_{5,1}$	-0,744	-0,763	-3,728	1,812	+	0,574	+	-1,002	-0,930	-0,336
23	$A_{5,2}$	-0,840	-0,854	-5,187	1,812	+	0,574	+	-1,270	-0,958	-0,549
24	$A_{5,3}$	-0,857	-0,870	-5,579	1,812	+	0,574	+	-1,333	-0,963	-0,591
25	$A_{5,4}$	-0,721	-0,740	-3,480	1,812	+	0,574	+	-0,951	-0,922	-0,289

26	$A_{5,5}$	-0,890	-0,900	-6,548	1,812	+	0,574	+	-1,475	-0,972	-0,676
27	$A_{5,6}$	-0,711	-0,731	-3,383	1,812	+	0,574	+	-0,930	-0,919	-0,270
28	$A_{6,1}$	-0,705	-0,725	-3,326	1,812	+	0,574	+	-0,917	-0,917	-0,258
29	$A_{6,2}$	-0,504	-0,514	-2,474	1,740	+	0,454	+	-0,569	-0,785	-0,079
30	$A_{6,3}$	-0,852	-0,860	-6,934	1,740	+	0,454	+	-1,292	-0,945	-0,665
31	$A_{6,4}$	-0,826	-0,834	-6,231	1,740	+	0,454	+	-1,201	-0,934	-0,611
32	$A_{6,5}$	-0,894	-0,901	-7,498	1,771	+	0,512	+	-2,044	-0,967	-0,723
33	$A_{6,6}$	-0,726	-0,740	-3,969	1,771	+	0,512	+	-0,951	-0,908	-0,367
34	$A_{7,1}$	0,722	0,741	3,494	1,812	+	0,574	+	0,954	0,292	0,923
35	$A_{7,2}$	0,497	0,509	2,437	1,740	+	0,454	+	0,561	0,071	0,782
36	$A_{7,3}$	0,173	0,178	0,745	1,740	-	0,454	-	0,180	-0,301	0,585
37	$A_{7,4}$	-0,384	-0,395	-1,770	1,740	+	0,454	-	-0,417	-0,720	0,073
38	$A_{7,5}$	0,099	0,104	0,375	1,771	-	0,512	-	0,104	-0,432	0,585
39	$A_{7,6}$	-0,407	-0,422	-1,676	1,771	-	0,512	-	-0,450	-0,768	0,116
40	$A_{8,1}$	-0,555	-0,576	-2,229	1,812	+	0,574	+	-0,657	-0,864	-0,003
41	$A_{8,2}$	-0,372	-0,382	-1,703	1,740	-	0,454	-	-0,402	-0,712	0,088
42	$A_{8,3}$	-0,256	-0,263	-1,124	1,740	-	0,454	-	-0,269	-0,641	0,217
43	$A_{8,4}$	0,252	0,260	1,108	1,740	-	0,454	-	0,266	-0,221	0,639
44	$A_{8,5}$	-0,488	-0,504	-2,102	1,771	+	0,512	-	-0,554	-0,808	0,012
45	$A_{8,6}$	0,374	0,387	1,515	1,771	-	0,512	-	0,409	-0,156	0,751
46	$A_{9,1}$	0,514	0,535	2,003	1,812	+	0,574	-	0,597	-0,056	0,848
47	$A_{9,2}$	-0,078	-0,080	-0,331	1,740	-	0,454	-	-0,080	-0,516	0,388
48	$A_{9,3}$	0,508	0,519	2,506	1,740	+	0,454	+	0,576	0,085	0,788
49	$A_{9,4}$	0,759	0,769	4,955	1,740	+	0,454	+	1,017	0,483	0,906
50	$A_{9,5}$	0,766	0,780	4,489	1,771	+	0,512	+	0,479	0,445	0,923
51	$A_{9,6}$	0,931	0,937	9,635	1,771	+	0,512	+	1,709	0,816	0,979
52	$A_{10,1}$	0,826	0,840	4,903	1,812	+	0,574	+	1,223	0,515	0,954
53	$A_{10,2}$	0,403	0,413	1,872	1,740	+	0,454	-	0,440	-0,050	0,730
54	$A_{10,3}$	0,696	0,707	4,125	1,740	+	0,454	+	0,882	0,373	0,879
55	$A_{10,4}$	0,796	0,805	5,593	1,740	+	0,454	+	1,112	0,553	0,922
56	$A_{10,5}$	0,793	0,806	4,905	1,771	+	0,512	+	1,115	0,500	0,933

57	$A_{10,6}$	0,679	0,694	3,476	1,771	+	0,512	+	0,856	0,282	0,890
58	$A_{11,1}$	0,131	0,138	0,442	1,812	-	0,574	-	0,139	-0,473	0,660
59	$A_{11,2}$	-0,236	-0,243	-1,034	1,740	-	0,454	-	-0,248	-0,628	0,237
60	$A_{11,3}$	0,320	0,329	1,436	1,740	-	0,454	-	0,342	-0,147	0,681
61	$A_{11,4}$	0,623	0,635	3,391	1,740	+	0,454	+	0,750	0,254	0,845
62	$A_{11,5}$	0,555	0,571	2,509	1,771	+	0,512	+	0,649	0,083	0,838
63	$A_{11,6}$	0,859	0,868	6,300	1,771	+	0,512	+	1,325	0,640	0,955
64	$A_{12,1}$	0,914	0,922	7,537	1,812	+	0,574	+	1,603	0,740	0,978
65	$A_{12,2}$	0,831	0,839	6,364	1,740	+	0,454	+	1,219	0,622	0,936
66	$A_{12,3}$	0,790	0,800	5,490	1,740	+	0,454	+	1,097	0,542	0,920
67	$A_{12,4}$	0,452	0,463	2,153	1,740	+	0,454	+	0,501	0,011	0,758
68	$A_{12,5}$	0,814	0,825	5,273	1,771	+	0,512	+	1,174	0,543	0,940
69	$A_{12,6}$	0,416	0,431	1,720	1,771	-	0,512	-	0,461	-0,105	0,772
70	$A_{13,1}$	-0,643	-0,664	-2,805	1,812	+	0,574	+	-0,799	-0,896	-0,145
71	$A_{13,2}$	-0,416	-0,426	-1,994	1,740	+	0,454	-	-0,455	-0,738	0,034
72	$A_{13,3}$	-0,519	-0,531	-2,586	1,740	+	0,454	+	-0,592	-0,794	-0,102
73	$A_{13,4}$	-0,490	-0,502	-2,391	1,740	+	0,454	+	-0,551	-0,778	-0,061
74	$A_{13,5}$	-0,484	-0,500	-2,709	1,771	+	0,512	-	-0,549	-0,806	0,017
75	$A_{13,6}$	-0,405	-0,419	-1,662	1,771	-	0,512	-	-0,446	-0,767	0,119
76	$A_{14,1}$	0,071	0,075	0,237	1,812	-	0,574	-	0,075	-0,521	0,622
77	$A_{14,2}$	0,237	0,244	1,036	1,740	-	0,454	-	0,249	-0,237	0,628
78	$A_{14,3}$	-0,254	-0,262	-1,119	1,740	-	0,454	-	-0,268	-0,640	0,218
79	$A_{14,4}$	-0,568	-0,580	-2,933	1,740	+	0,454	+	-0,662	-0,818	-0,170
80	$A_{14,5}$	-0,416	-0,430	-1,717	1,771	-	0,512	-	-0,460	-0,772	0,106
81	$A_{14,6}$	-0,734	-0,748	-4,068	1,771	+	0,512	+	-0,969	-0,911	-0,383
82	$A_{15,1}$	0,462	0,482	1,740	1,812	-	0,574	-	0,526	-0,217	0,827
83	$A_{15,2}$	0,567	0,579	2,929	1,740	+	0,454	+	0,661	0,169	0,818
84	$A_{15,3}$	0,476	0,487	2,300	1,740	+	0,454	+	0,532	0,042	0,771
85	$A_{15,4}$	0,155	0,159	0,666	1,740	-	0,454	-	0,161	-0,318	0,572
86	$A_{15,5}$	0,528	0,544	2,339	1,771	+	0,512	+	0,610	0,044	0,826
87	$A_{15,6}$	0,194	0,202	0,743	1,771	-	0,512	-	0,205	-0,346	0,647

88	$A_{16,1}$	0,642	0,663	2,800	1,812	+	0,574	+	0,798	0,144	0,896
89	$A_{16,2}$	0,675	0,686	3,889	1,740	+	0,454	+	0,841	0,337	0,869
90	$A_{16,3}$	0,625	0,637	3,406	1,740	+	0,454	+	0,753	0,257	0,846
91	$A_{16,4}$	0,200	0,206	0,868	1,740	-	0,454	-	0,209	-0,274	0,604
92	$A_{16,5}$	0,902	0,909	7,873	1,771	+	0,512	+	1,523	0,743	0,970
93	$A_{16,6}$	0,367	0,380	1,483	1,771	-	0,512	-	0,400	-0,164	0,747
94	$A_{17,1}$	0,607	0,629	2,556	1,812	+	0,574	+	0,739	0,086	0,884
95	$A_{17,2}$	0,441	0,452	2,092	1,740	+	0,454	-	0,488	-0,002	0,752
96	$A_{17,3}$	-0,041	-0,043	-0,176	1,740	-	0,454	-	-0,043	-0,487	0,420
97	$A_{17,4}$	-0,478	-0,489	-2,314	1,740	+	0,454	+	-0,535	-0,772	-0,045
98	$A_{17,5}$	-0,054	-0,057	-0,204	1,771	-	0,512	-	-0,057	-0,553	0,469
99	$A_{17,6}$	-0,511	-0,527	-2,237	1,771	+	0,512	+	-0,586	-0,818	-0,020
100	$A_{18,1}$	0,775	0,793	4,111	1,812	+	0,574	+	1,078	0,401	0,939
101	$A_{18,2}$	0,766	0,776	5,074	1,740	+	0,454	+	1,035	0,497	0,910
102	$A_{18,3}$	0,712	0,723	4,318	1,740	+	0,454	+	0,914	0,401	0,886
103	$A_{18,4}$	0,268	0,276	1,185	1,740	-	0,454	-	0,284	-0,203	0,649
104	$A_{18,5}$	0,817	0,828	5,328	1,771	+	0,512	+	1,182	0,549	0,941
105	$A_{18,6}$	0,457	0,472	1,930	1,771	+	0,512	-	0,513	-0,053	0,793
106	$A_{19,1}$	0,106	0,112	0,355	1,812	-	0,574	-	0,112	-0,494	0,644
107	$A_{19,2}$	0,255	0,262	1,121	1,740	-	0,454	-	0,269	-0,218	0,640
108	$A_{19,3}$	0,132	0,136	0,565	1,740	-	0,454	-	0,137	-0,339	0,556
109	$A_{19,4}$	-0,044	-0,046	-0,189	1,740	-	0,454	-	-0,046	-0,490	0,417
110	$A_{19,5}$	0,579	0,595	2,666	1,771	+	0,512	+	0,685	0,118	0,848
111	$A_{19,6}$	0,661	0,677	3,316	1,771	+	0,512	+	0,823	0,252	0,883
112	$A_{20,1}$	0,461	0,481	1,734	1,812	-	0,574	-	0,524	-0,129	0,827
113	$A_{20,2}$	0,448	0,459	2,130	1,740	+	0,454	+	0,496	0,006	0,756
114	$A_{20,3}$	0,502	0,513	2,466	1,740	+	0,454	+	0,567	0,077	0,785
115	$A_{20,4}$	0,313	0,322	1,401	1,740	-	0,454	-	0,334	-0,155	0,677
116	$A_{20,5}$	0,811	0,822	5,210	1,771	+	0,512	+	1,164	0,536	0,939
117	$A_{20,6}$	0,772	0,785	4,563	1,771	+	0,512	+	1,057	0,455	0,925
118	$A_{21,1}$	0,690	0,710	3,190	1,812	+	0,574	+	0,888	0,230	0,912

119	$A_{21,2}$	0,515	0,527	2,556	1,740	+	0,454	+	0,586	0,096	0,792
120	$A_{21,3}$	0,108	0,111	0,461	1,740	-	0,454	-	0,112	-0,361	0,538
121	$A_{21,4}$	-0,366	-0,376	-1,674	1,740	-	0,454	-	-0,396	-0,709	0,094
122	$A_{21,5}$	0,176	0,183	0,671	1,771	-	0,512	-	0,185	-0,363	0,636
123	$A_{21,6}$	-0,347	-0,360	-1,391	1,771	-	0,512	-	-0,377	-0,736	0,187
124	$A_{22,1}$	0,579	0,600	2,374	1,812	+	0,574	+	0,694	0,040	0,873
125	$A_{22,2}$	0,559	0,572	2,872	1,740	+	0,454	+	0,650	0,158	0,814
126	$A_{22,3}$	0,613	0,625	3,297	1,740	+	0,454	+	0,732	0,238	0,840
127	$A_{22,4}$	0,328	0,337	1,476	1,740	-	0,454	-	0,351	-0,138	0,686
128	$A_{22,5}$	0,797	0,809	4,969	1,771	+	0,512	+	1,125	0,508	0,934
129	$A_{22,6}$	0,612	0,628	2,908	1,771	+	0,512	+	0,738	0,170	0,863
130	$A_{23,1}$	0,798	0,814	4,438	1,812	+	0,574	+	1,140	0,452	0,946
131	$A_{23,2}$	0,756	0,766	4,916	1,740	+	0,454	+	1,011	0,479	0,905
132	$A_{23,3}$	0,553	0,565	2,825	1,740	+	0,454	+	0,641	0,149	0,811
133	$A_{23,4}$	0,089	0,092	0,380	1,740	-	0,454	-	0,092	-0,378	0,524
134	$A_{23,5}$	0,628	0,644	3,034	1,771	+	0,512	+	0,765	0,196	0,869
135	$A_{23,6}$	0,217	0,225	0,834	1,771	-	0,512	-	0,229	-0,324	0,661
136	$A_{24,1}$	0,649	0,670	2,857	1,812	+	0,574	+	0,811	0,157	0,899
137	$A_{24,2}$	0,482	0,494	2,341	1,740	+	0,454	+	0,541	0,051	0,774
138	$A_{24,3}$	0,368	0,378	1,683	1,740	-	0,454	-	0,398	-0,092	0,710
139	$A_{24,4}$	-0,099	-0,102	-0,422	1,740	-	0,454	-	-0,102	-0,532	0,369
140	$A_{24,5}$	0,805	0,817	5,103	1,771	+	0,512	+	1,147	0,523	0,937
141	$A_{24,6}$	0,251	0,261	0,973	1,771	-	0,512	-	0,267	-0,290	0,682
142	$A_{25,1}$	0,718	0,737	3,453	1,812	+	0,574	+	0,945	0,284	0,921
143	$A_{25,2}$	0,664	0,676	3,781	1,740	+	0,454	+	0,822	0,320	0,865
144	$A_{25,3}$	0,743	0,754	4,728	1,740	+	0,454	+	0,981	0,455	0,900
145	$A_{25,4}$	0,503	0,515	2,476	1,740	+	0,454	+	0,569	0,079	0,785
146	$A_{25,5}$	0,926	0,931	9,201	1,771	+	0,512	+	1,666	0,810	0,977
147	$A_{25,6}$	0,785	0,798	4,774	1,771	+	0,512	+	1,093	0,483	0,930
148	$A_{26,1}$	0,392	0,411	1,424	1,812	-	0,574	-	0,436	-0,214	0,797
149	$A_{26,2}$	-0,257	-0,265	-1,132	1,740	-	0,454	-	-0,271	-0,642	0,215

150	$A_{26,3}$	0,313	0,322	1,400	1,740	-	0,454	-	0,333	-0,155	0,677
151	$A_{26,4}$	0,582	0,594	3,042	1,740	+	0,454	+	0,683	0,191	0,825
152	$A_{26,5}$	0,571	0,587	2,618	1,771	+	0,512	+	0,674	0,108	0,845
153	$A_{26,6}$	0,815	0,826	5,290	1,771	+	0,512	+	1,176	0,545	0,940

ДОДАТОК Д
ХАРАКТЕРИСТИКИ РІЗНОПРОМЕНЕВИХ РОЗ ВІТРІВ

Таблиця Д1. Характеристика 4-х променевої рози вітрів

№	Напрям	Діапазон значень, °	Δ, °
1	Північ (Пн)	315-45	90
2	Схід (Сх)	45-135	
3	Південь (Пд)	135-225	
4	Захід (Зх)	225-315	

Таблиця Д2. Характеристика 8-ми променевої рози вітрів

№	Напрям	Діапазон значень, °	Δ, °
1	Північ (Пн)	337,5-22,5	45
2	Північний схід (Пн-Сх)	22,5-67,5	
3	Схід (Сх)	67,5-112,5	
4	Південний схід (Пд-Сх)	112,5-157,5	
5	Південь (Пд)	157,5-202,5	
6	Південний захід (Пд-Зх)	202,5-247,5	
7	Захід (Зх)	247,5-292,5	
8	Північний захід (Пн-Зх)	292,5-337,5	

Таблиця Д3. Характеристика 16-ти променевої рози вітрів

№	Напрям	Діапазон значень, °	Δ, °
1	N	348,75-11,25	22,5
2	NNE	11,25-33,75	
3	NE	33,75-56,25	
4	ENE	56,25-78,75	
5	E	78,75-101,25	
6	ESE	101,25-123,75	
7	SE	123,75-146,25	
8	SSE	146,25-168,75	
9	S	168,75-191,25	
10	SSW	191,25-213,75	
11	SW	213,75-236,75	
12	WSW	236,75-258,75	
13	WSW	258,75-281,25	
14	WNW	281,25-303,25	
15	NW	303,25-326,25	
16	NNW	326,25-348,75	

ДОДАТОК Е
ПРИНЦИПОВІ СХЕМИ ЕЛЕМЕНТІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО МОДУЛЮ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯП ОВІТРЯ

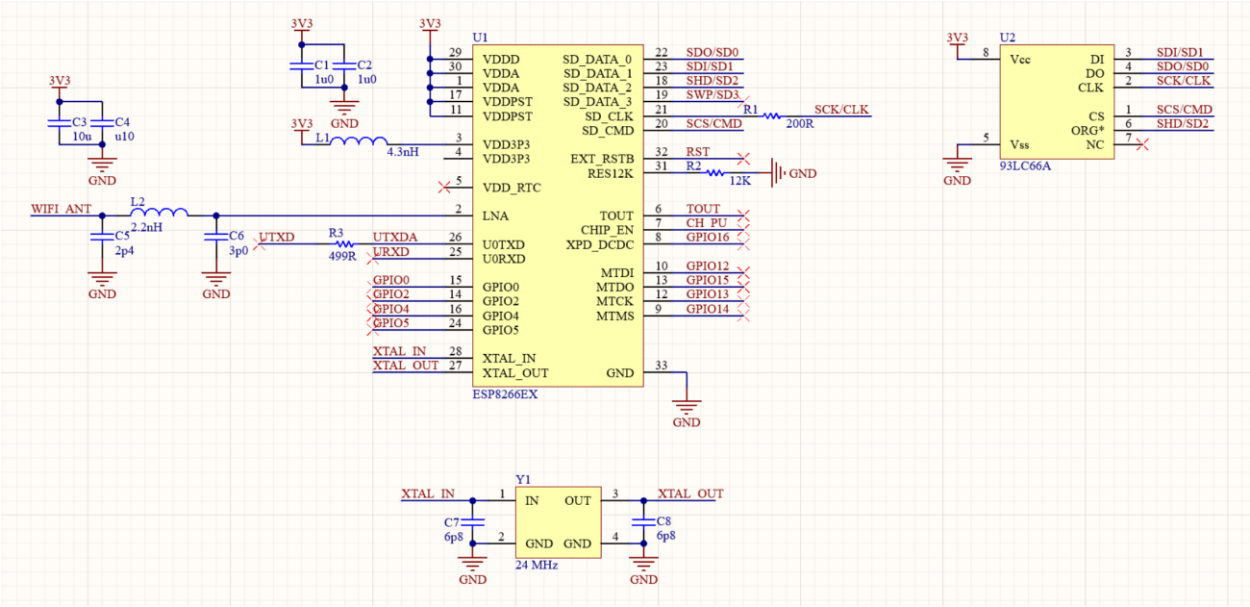


Рис. Е1. Електрична схема вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря

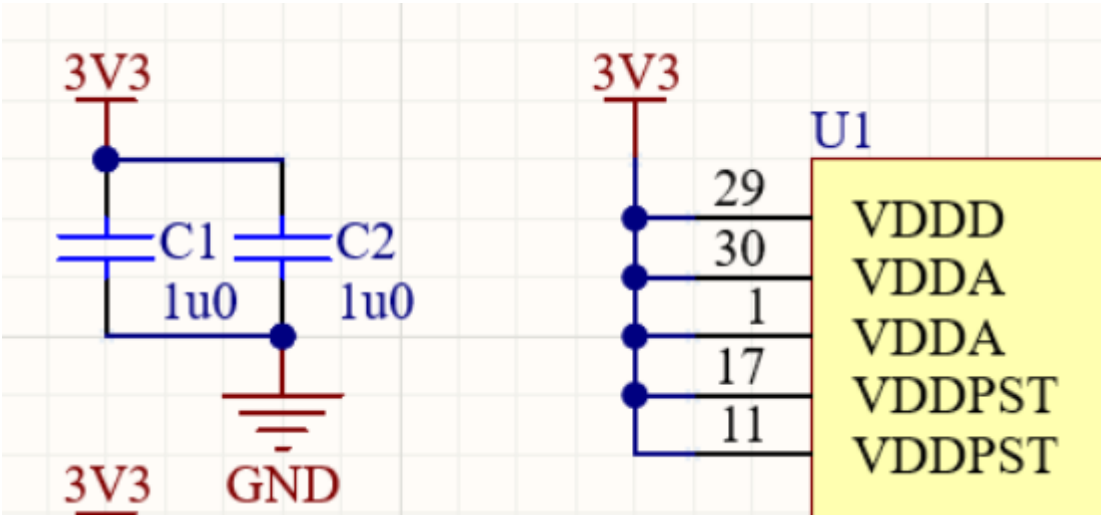


Рис. Е2. Цифровий блок живлення мікросхеми ESP8266EX

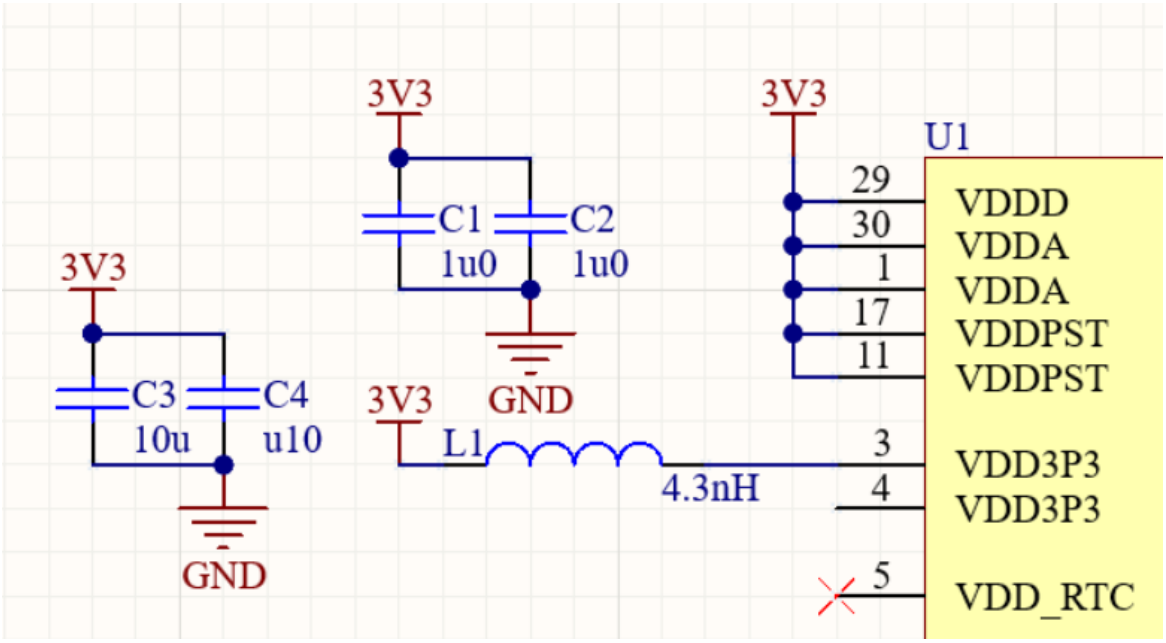


Рис. Е3. Аналоговий блок живлення мікросхеми ESP8266EX

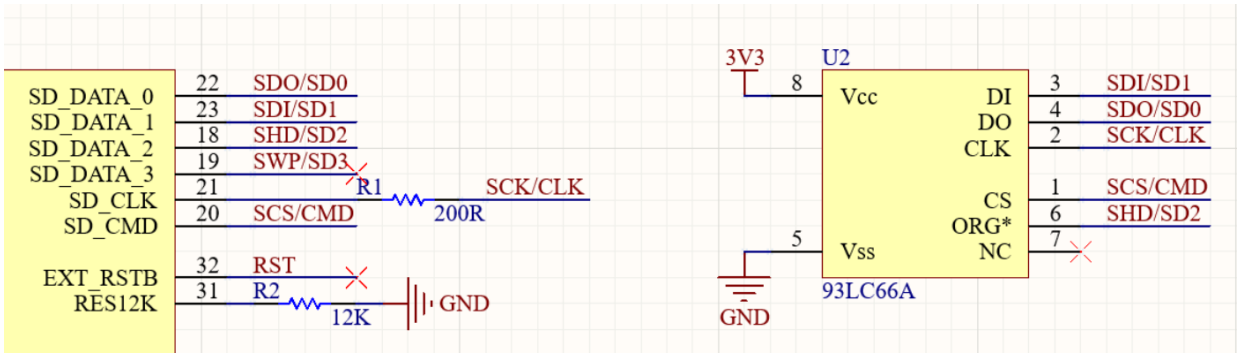


Рис.Е4. Флеш-пам’ять 93LC66A

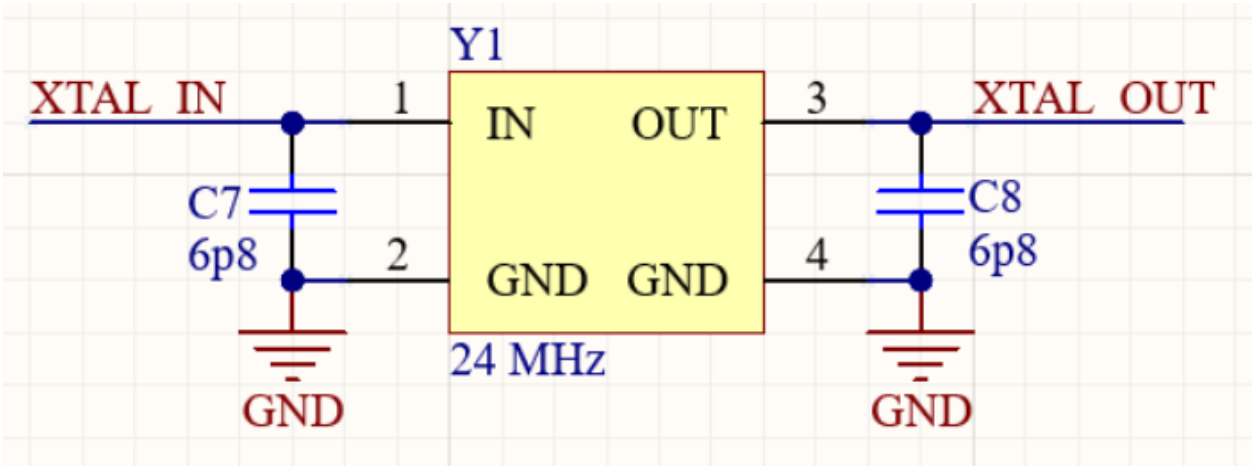


Рис. Е5. Кришталевий осцилятор 24 МГц

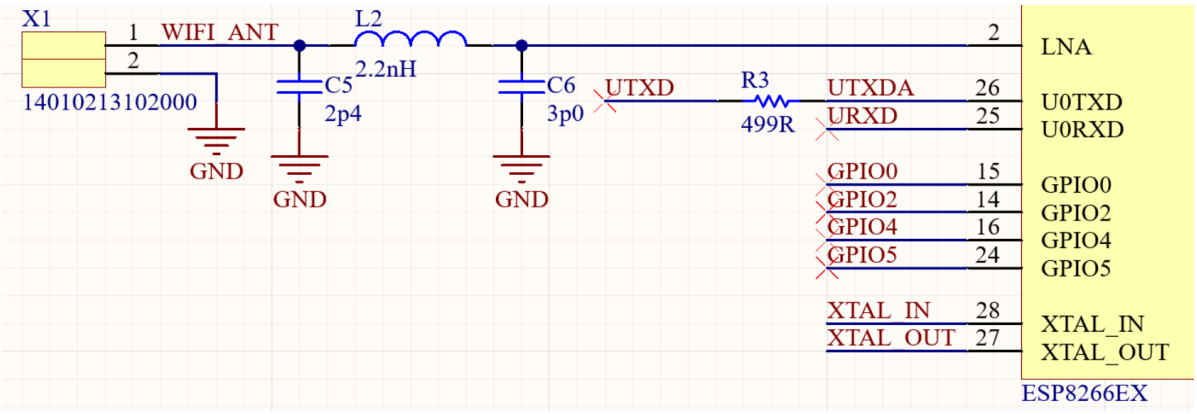


Рис. Е6. Радіочастотний блок мікросхеми ESP8266EX

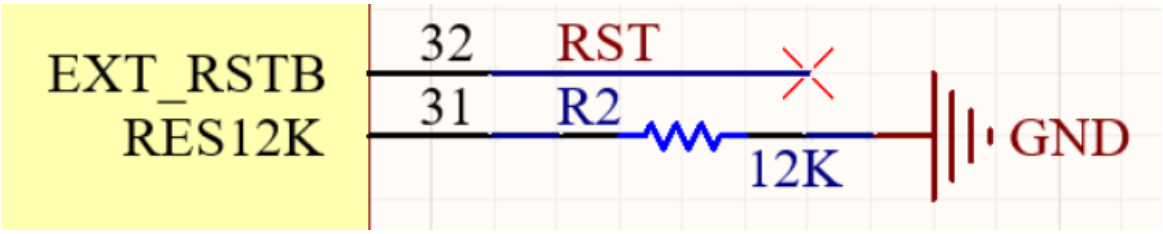


Рис. Е7. Зовнішній резистор 12 кОм



Рис. Е8. Підключення резистора 499 Ом для зменшення гармоніки 80 МГц

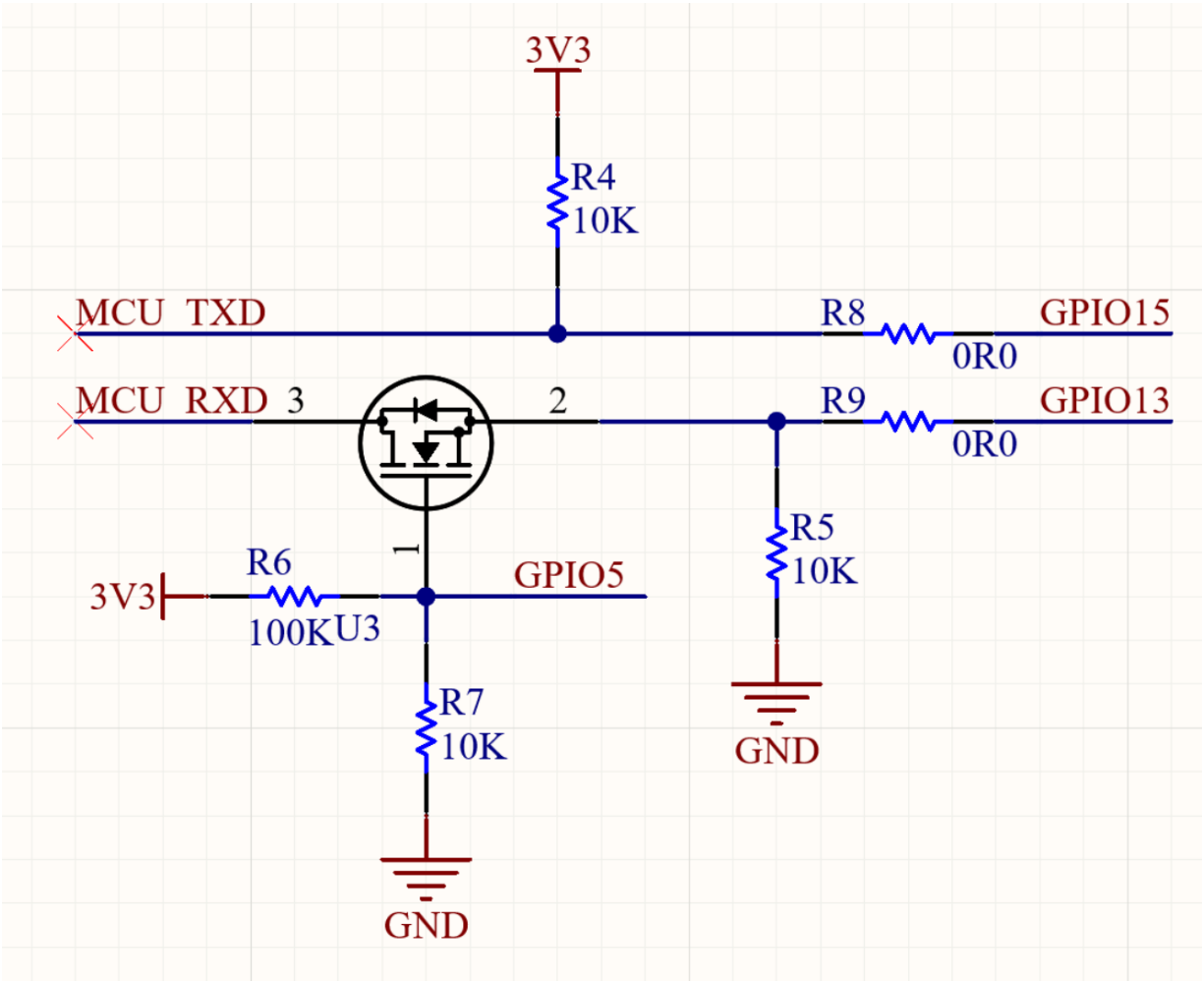


Рис. Е9. Схема перемикання рівнів напруги між GPIO13 та RxD

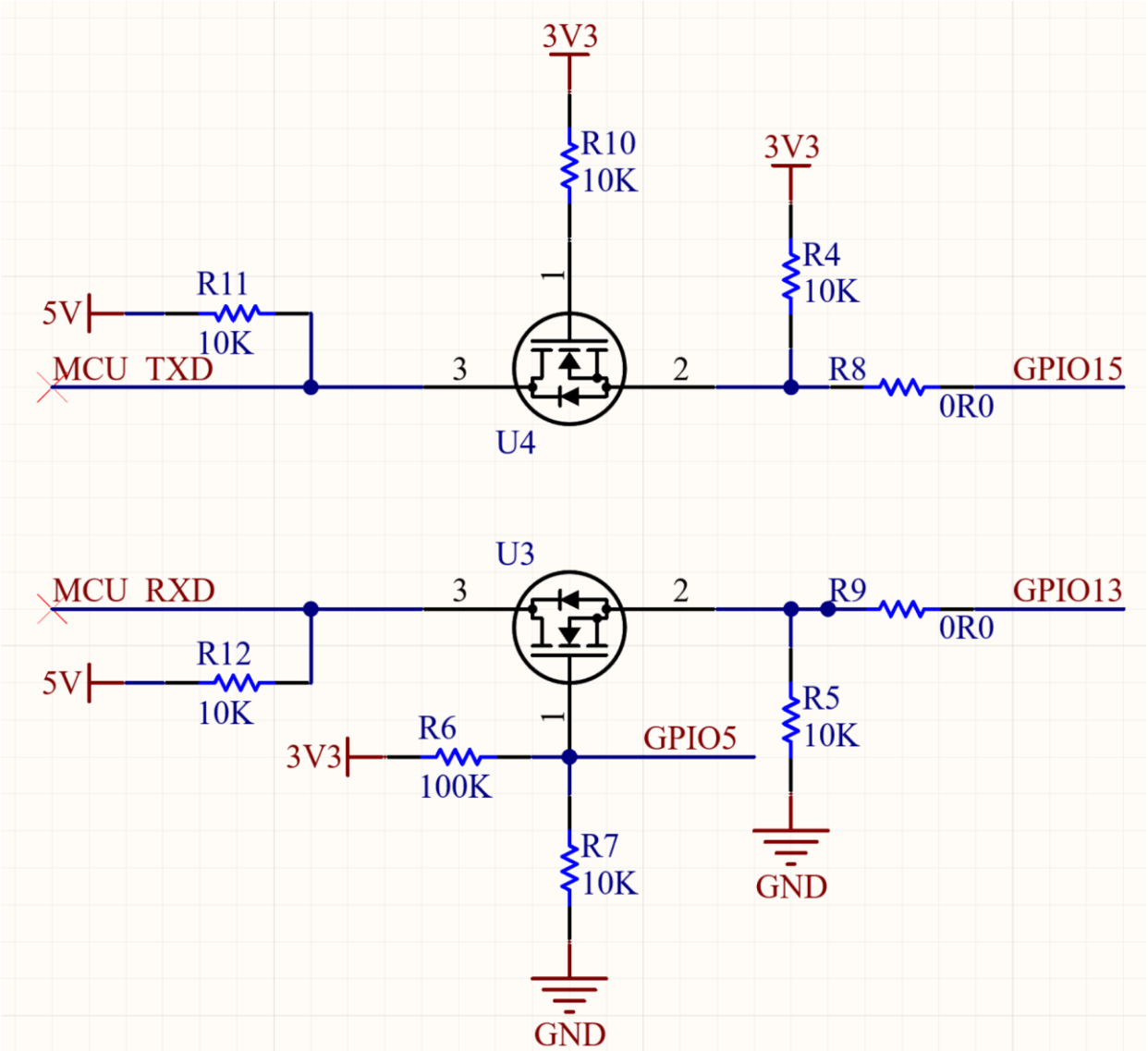
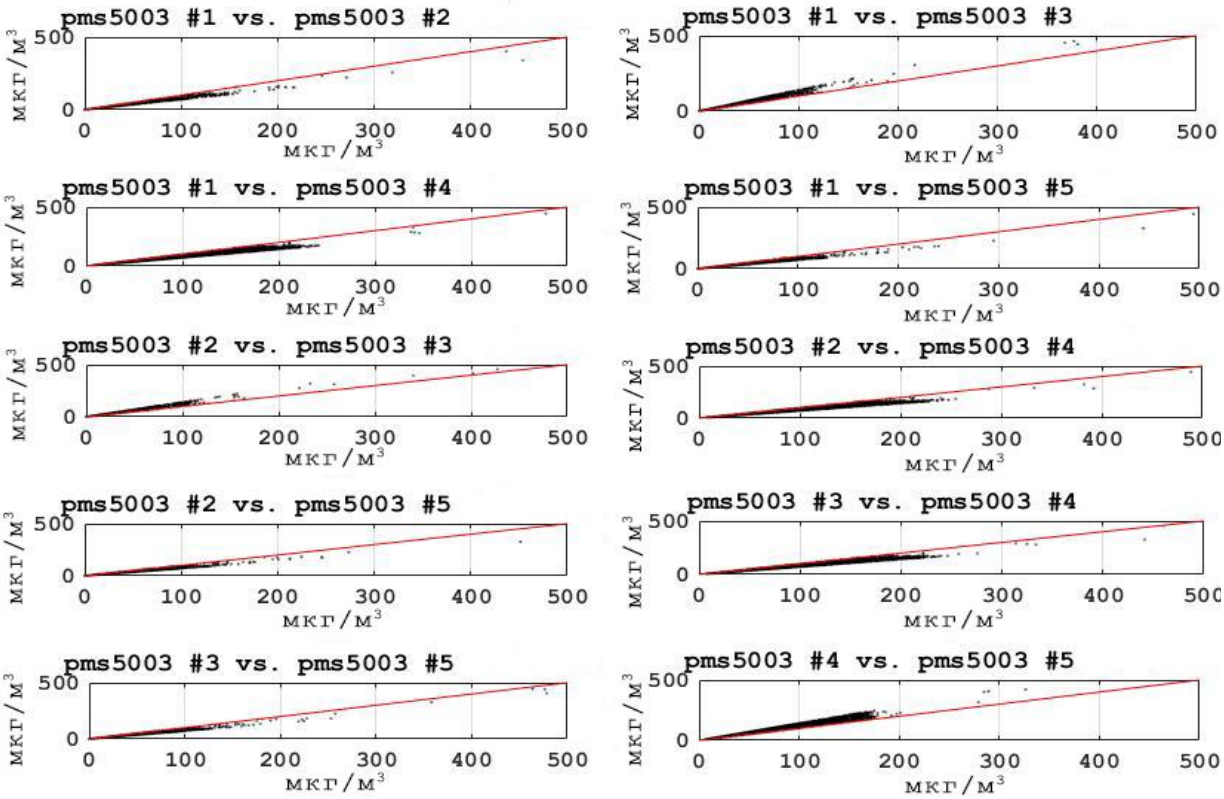


Рис. Е10. Схема перемикання рівнів напруги у випадку послідовного зв'язку з логічною системою 5 V

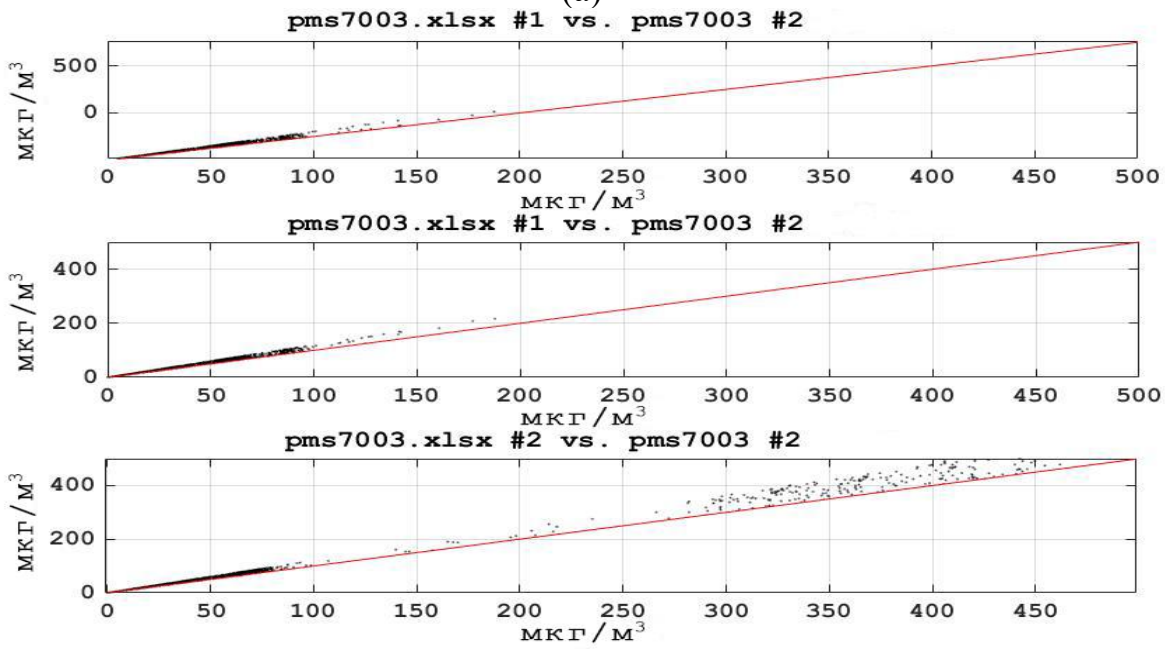
ДОДАТОК Ж. СПЕЦИФІКАЦІЯ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ РОЗРОБЛЕНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО МОДУЛЮ

Позначення	Назва компоненту	Значення	Пакет	Кількість
C1, C2	Ceramic Capacitor, SMD, 0402, X5R, 1u x 50V	1u0	0402	2
C3	Ceramic Capacitor, SMD, 0402, X5R, 10u x 6.3V	10u	0402	1
C4	Ceramic Capacitor, SMD, 0402, X5R, 0.1u x 25V	u10	0402	1
C5	Ceramic Capacitor, SMD, 0402, NP0, 2.4p x 50V	2p4	0805	1
C6	Ceramic Capacitor, SMD, 0402, NP0, 3p x 50V	3p0	0805	1
C7, C8	Ceramic Capacitor, SMD, 0402, NP0, 6.8p x 50V	6p8	0805	2
C9, C14	Ceramic Capacitor, SMD, 0603, X7R, 0.1u x 100V	u10	0603	2
C10	Ceramic Capacitor, SMD, 0603, X7R, 0.1u x 50V	u10	0603	1
C11, C12, C13	Ceramic Capacitor, SMD, 0805, X5R, 10u x 50V	10u	0805	3
C15	Ceramic Capacitor, SMD, 0603, X7R, 1u x 50V	1u	0603	1
D1	Zener Voltage Regulators, MMBZ5242BLT3G, SOT-23	MMBZ5242BLT3G	SOT-23	1
L1, L2	Inductor, LBMF1608T470M, 47uH x 35mA	4.3nH, 2.2nH	0603	2
L3	Power Inductor, VLS3012HBX-2R2M, 2.2uH x 3.15A	2.2uH	3x3mm	1
R1, R2, R3, R8, R9	Fixed resistor, SMD, 0402, 0R0 5%	200R, 12K, 499R, 0R0	0402	5
R4, R5, R7, R10, R11, R12	Fixed resistor, SMD, 0402, 10K 1%	10K	0402	6
R6	Fixed resistor, SMD, 0402, 100K 1%	100K	0402	1
R13	Fixed resistor, SMD, 0603, 12K 1%	12K0	0603	1
R14	Fixed resistor, SMD, 0603, 4K7 1%	4K7	0603	1
U1	IC, Wi-Fi Microcontroller, ESP8266EX, VFQFN-32	ESP8266EX	VFQFN-32	1
U2	IC, 4K Microwire Compatible Serial EEPROM, 93LC66A, SOIC-8	93LC66A	SOIC-8	1
U3, U4	N-Channel MOSFET Transistor, DMG3414U-7, SOT-23	DMG3414U-7	SOT-23	2
U5	P-Channel MOSFET Transistor, SSM3J351R,LF, SOT-23F	SSM3J351R,LF	SOT-723	1
U6	IC, R1271L331B-TR, WFDFN-12	R1271L331B-TR	WFDFN-12	1
X1	Terminal block, 14010213102000, 2 pos, 2.54mm	14010213102000	2 pos, 2.54mm	1
Y1	Crystal, ECS-240-18-33B-7KM-TR	24 MHz	SMD-4, 3.2x2.5mm	1

ДОДАТОК И
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБІЖНОСТІ ДАНИХ СЕНСОРІВ МІЛКОДИСПЕРСНОГО ПИЛУ

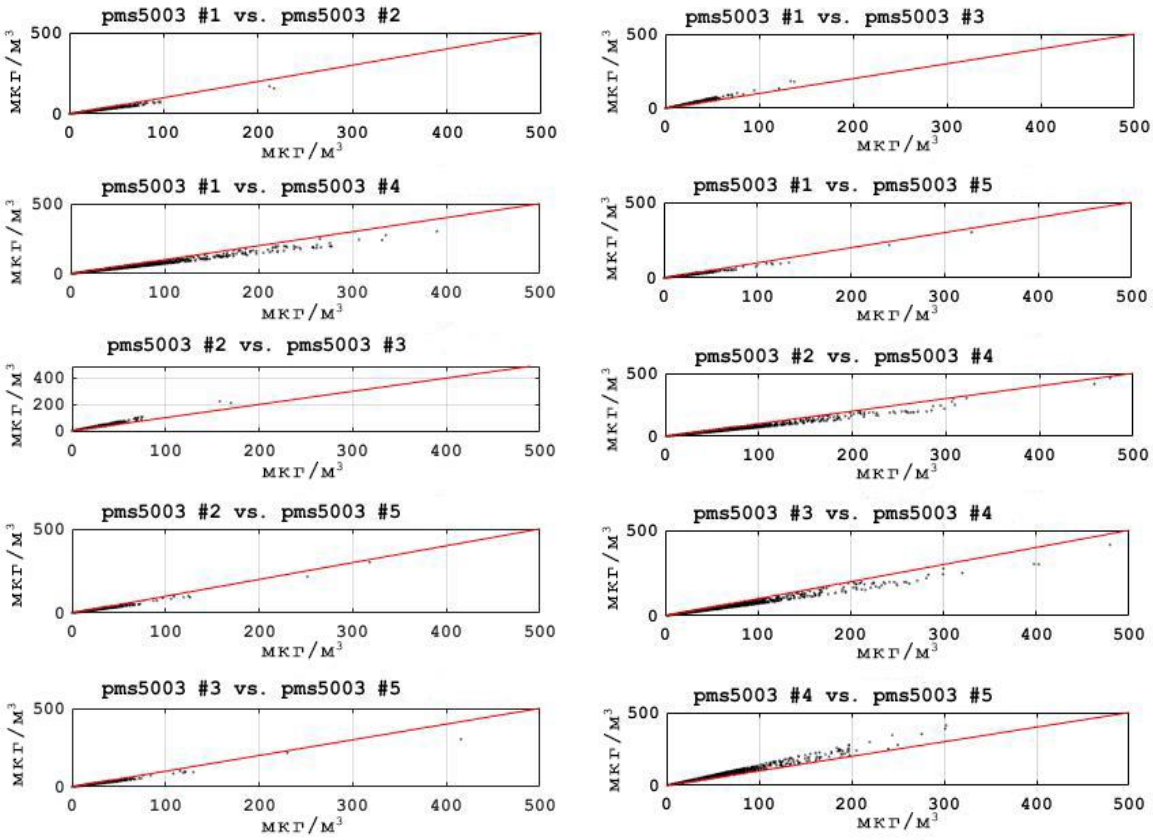


(а)

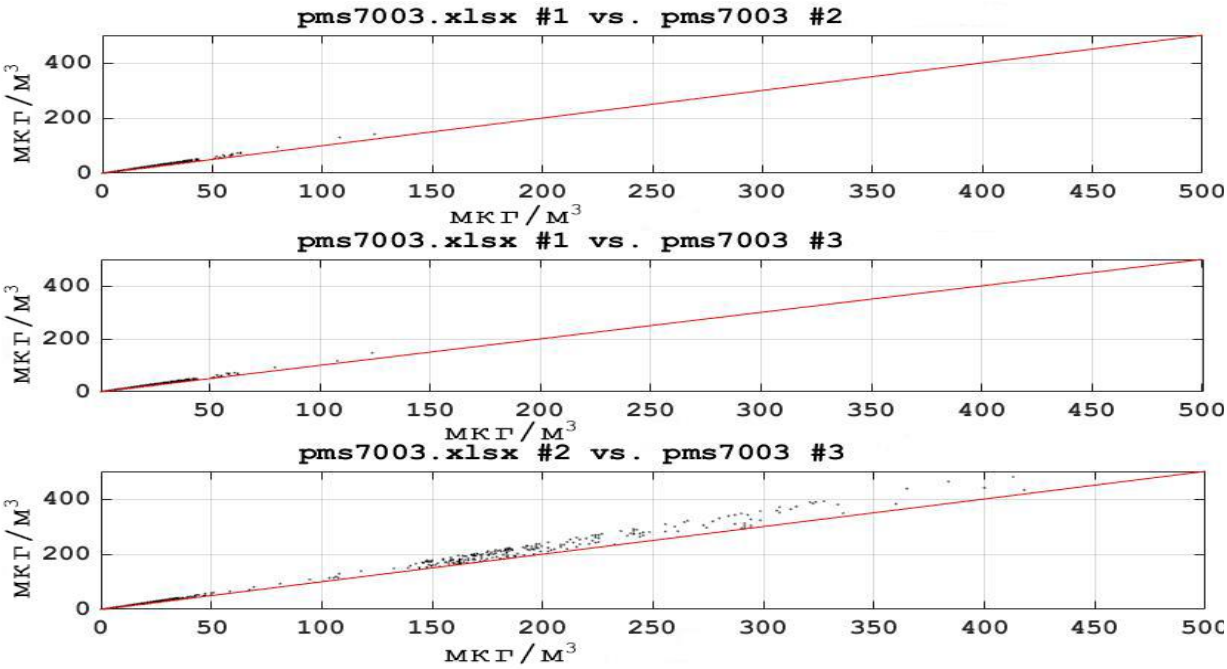


(б)

Рис. Ж1. Взаємозалежності результатів вимірювання концентрації PM_1 різними сенсорами типу PMS 5003 (а) та PMS 7003 (б)



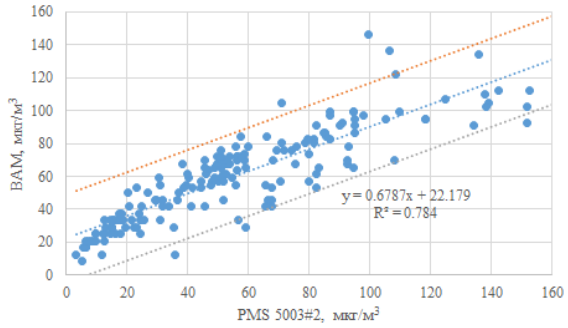
(а)



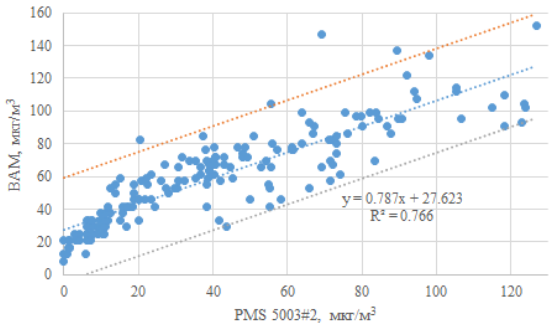
(б)

Рис. Ж2. Взаємозалежності результатів вимірювання концентрації PM_{10} різними сенсорами типу PMS 5003 (а) та PMS 7003 (б)

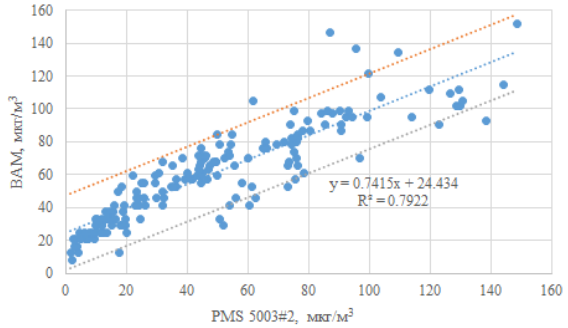
ДОДАТОК К
РЕЗУЛЬТАТИ РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ



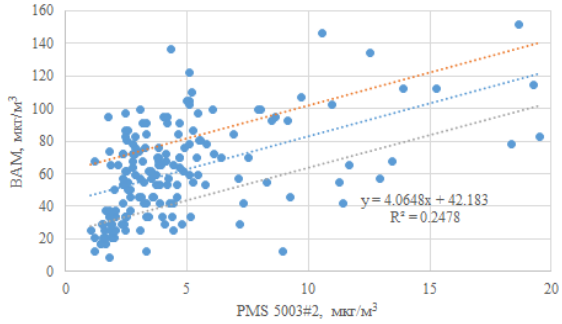
(а)



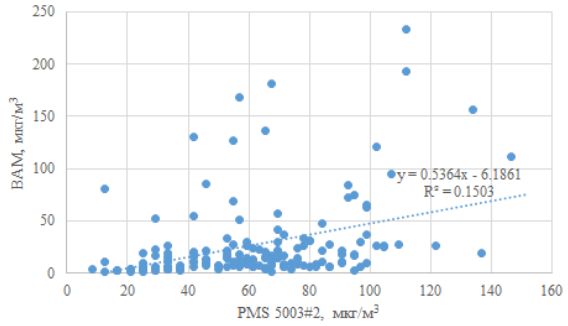
(б)



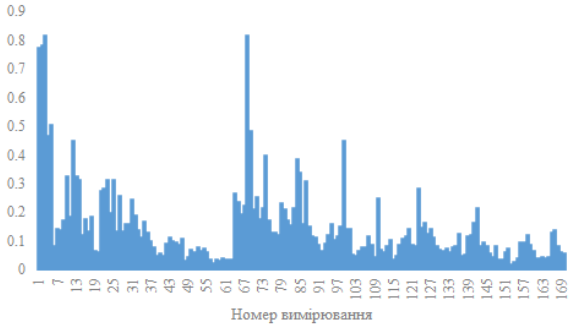
(в)



(г)



(д)



(е)

Рис 31. Залежності еталонних вимірювань $PM_{2.5}$ від деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 5003#2 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – СКВ, д – дисперсії) та значення коефіцієнта варіації (е)

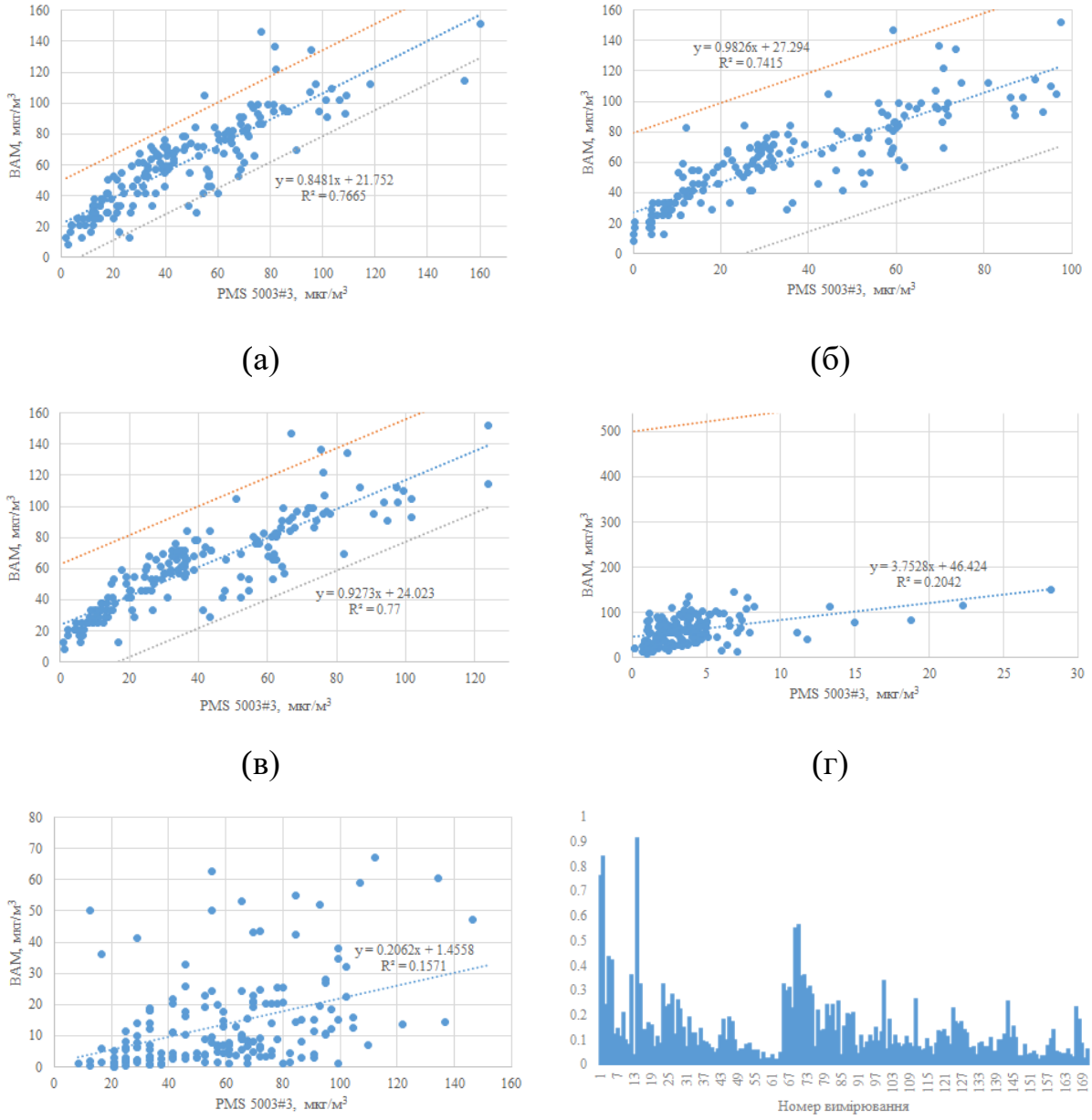


Рис. 32. Залежності еталонних вимірювань $PM_{2.5}$ від деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 5003#3 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – СКВ, д – дисперсії) та значення коефіцієнта варіації (е)

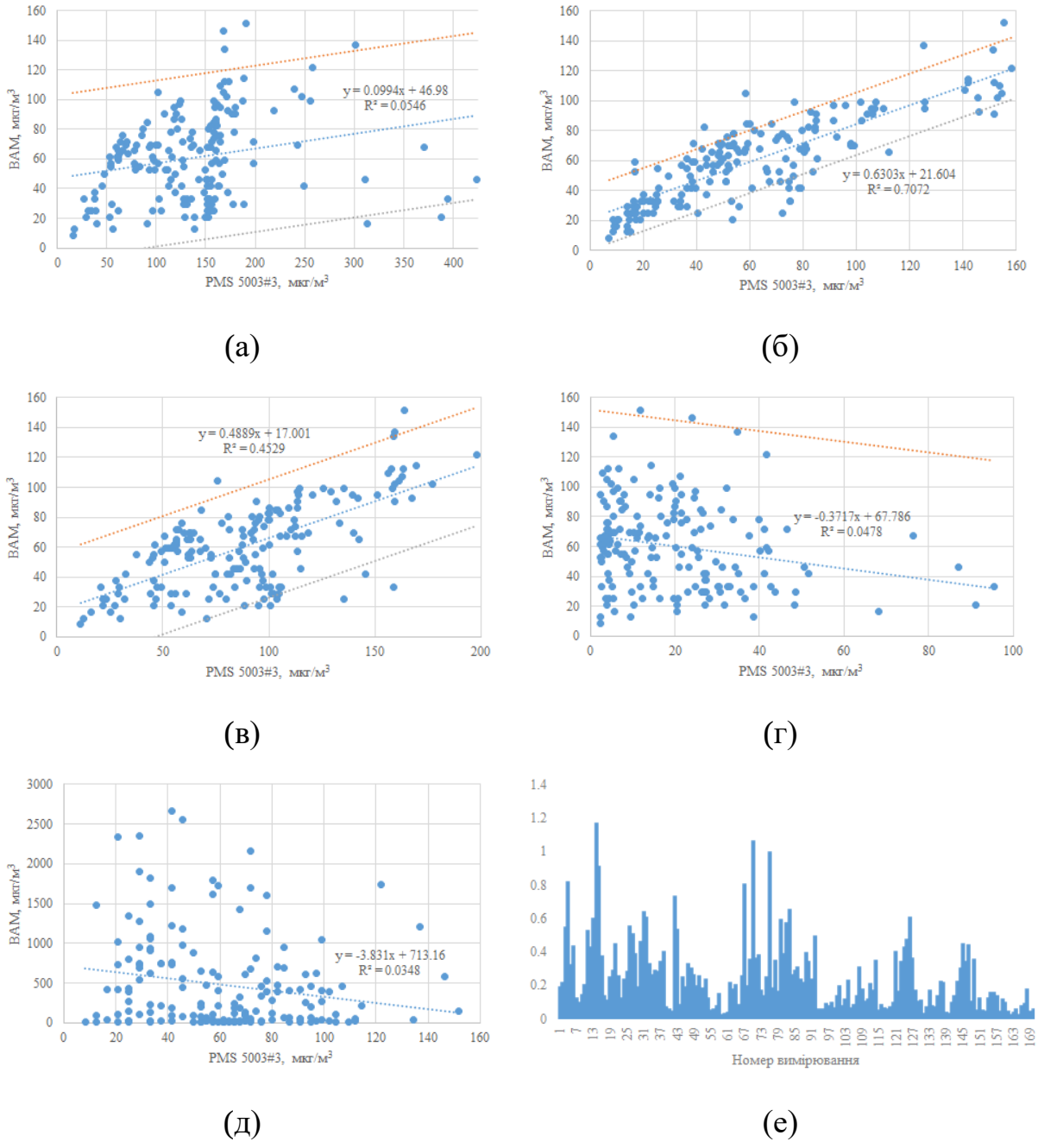
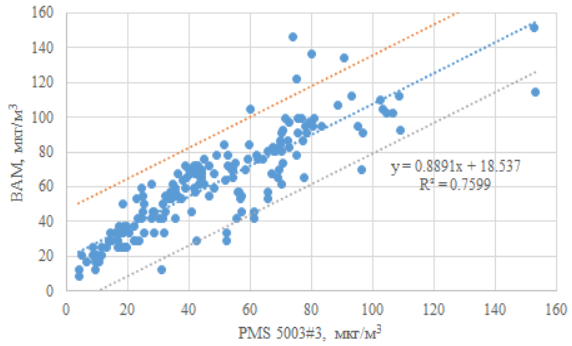
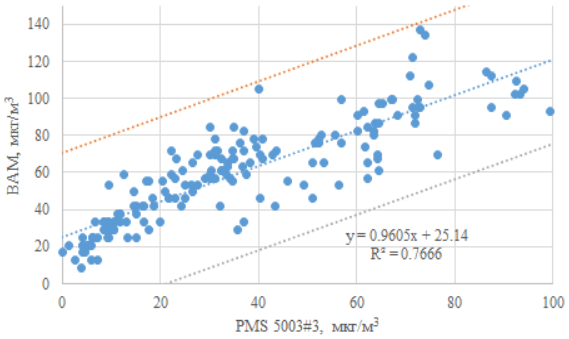


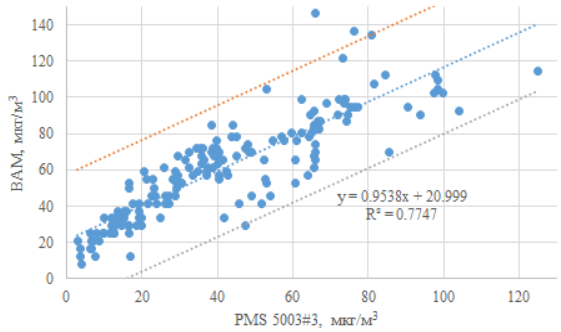
Рис. 33. Залежності еталонних вимірювань $PM_{2.5}$ від деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 5003#4 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – СКВ, д – дисперсії) та значення коефіцієнта варіації (е)



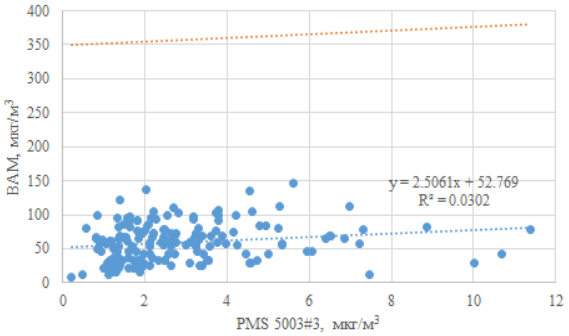
(а)



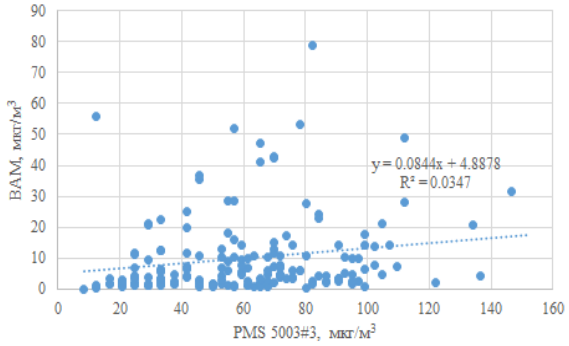
(б)



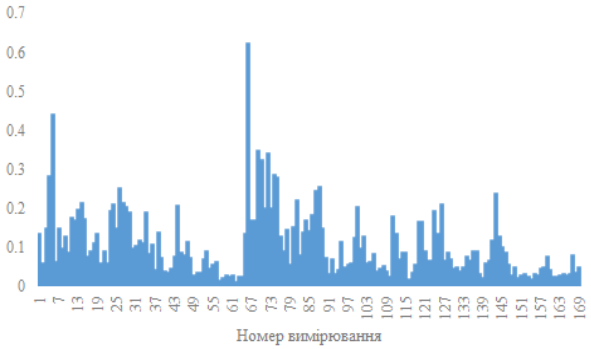
(в)



(г)



(д)



(е)

Рис. 34. Залежності еталонних вимірювань $PM_{2.5}$ від деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 5003#5 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – СКВ, д – дисперсії) та значення коефіцієнта варіації (е)

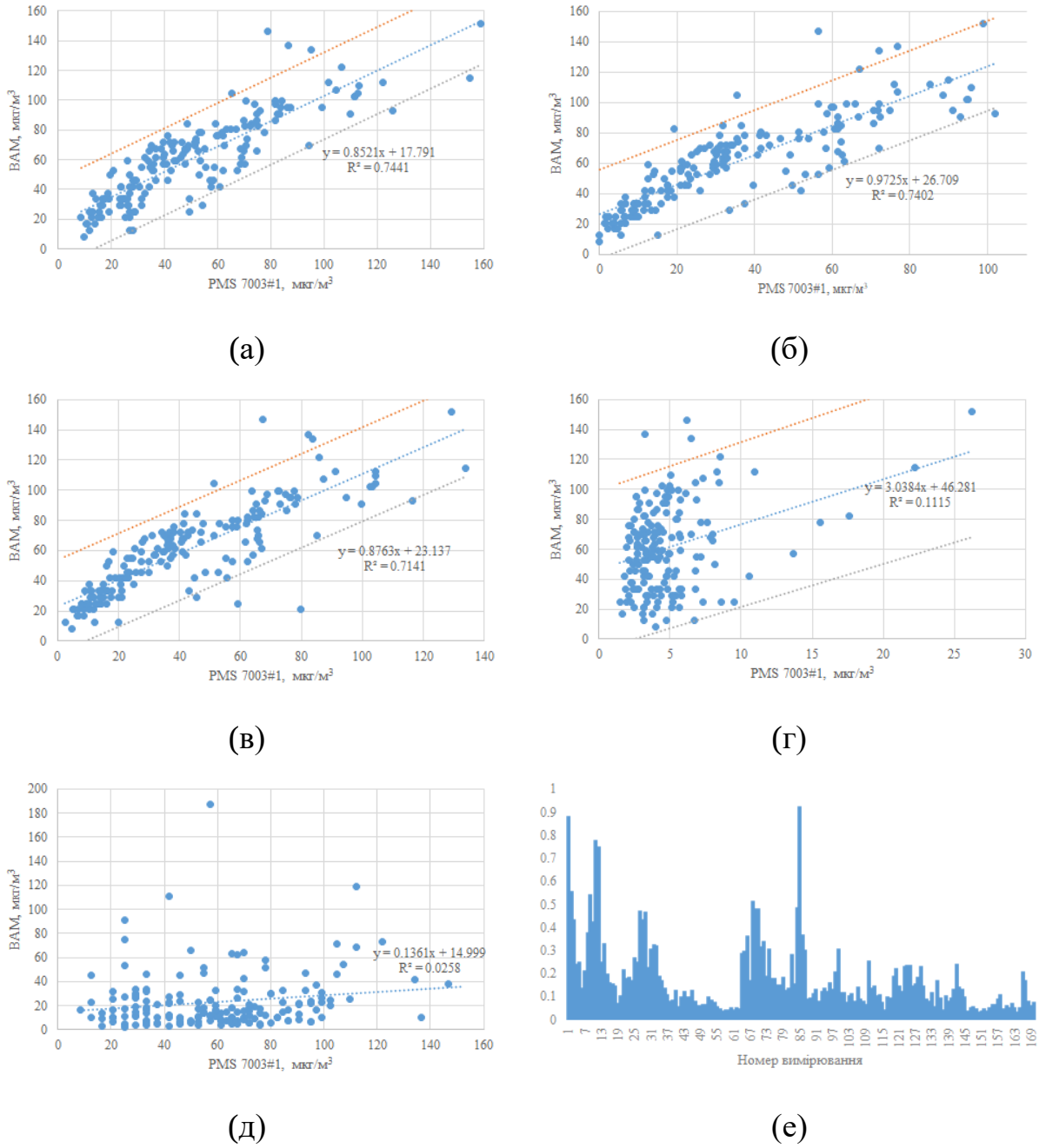


Рис. 35. Залежності еталонних вимірювань $PM_{2.5}$ від деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 7003#1 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – СКВ, д – дисперсії) та значення коефіцієнта варіації (е)

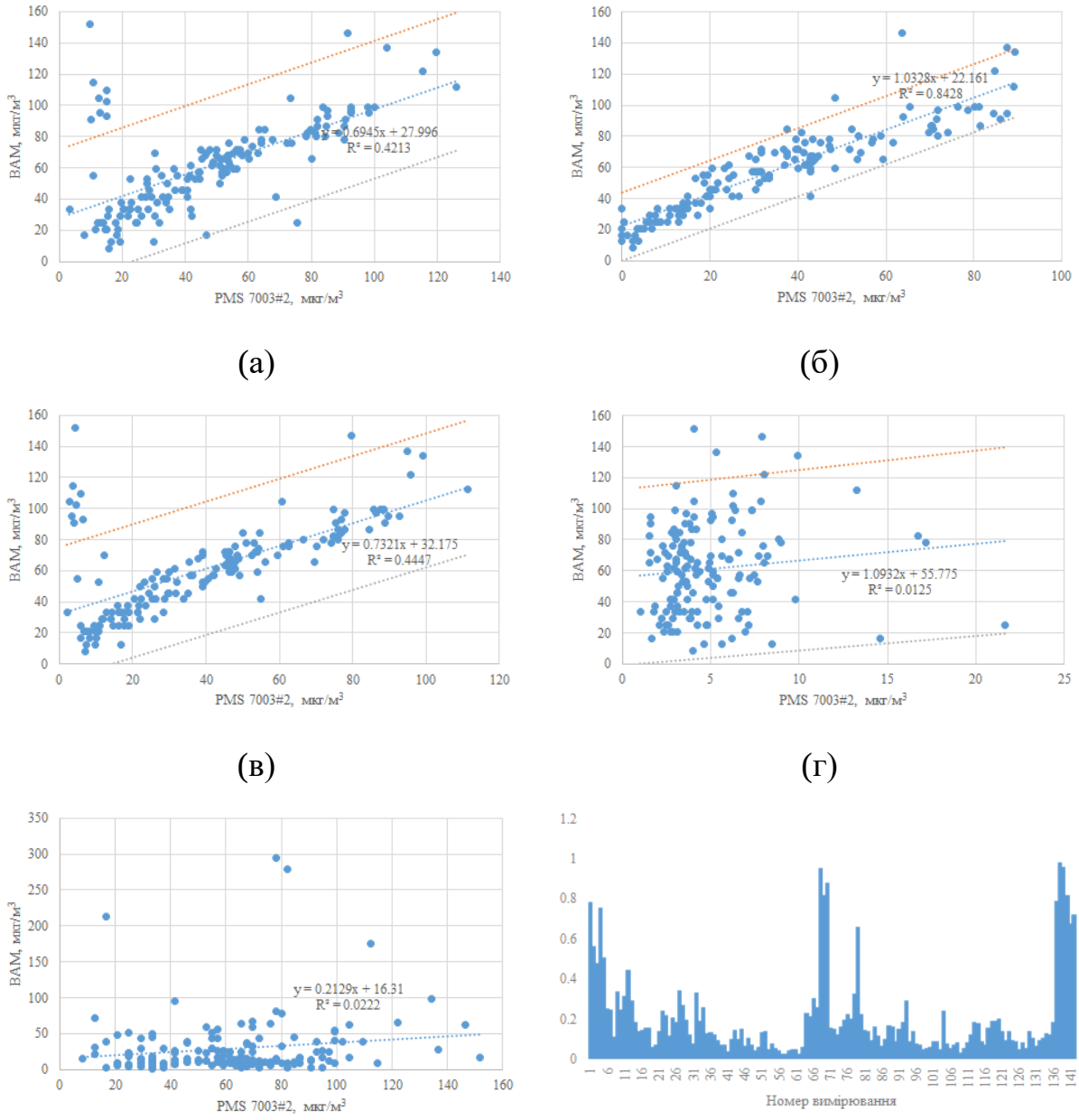
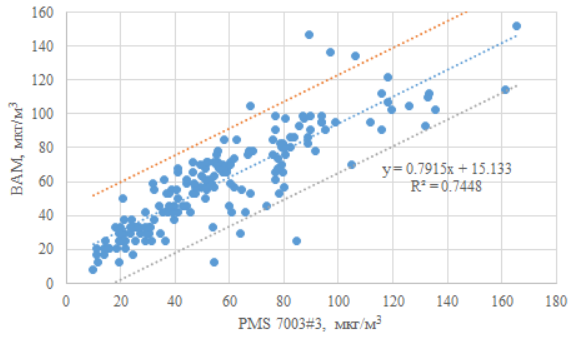
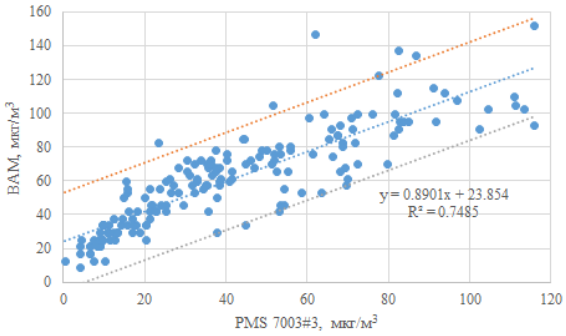


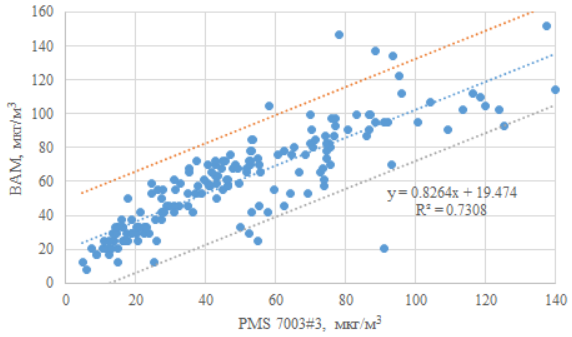
Рис. 36. Залежності еталонних вимірювань $PM_{2.5}$ від деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 7003#2 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – СКВ, д – дисперсії) та значення коефіцієнта варіації (е)



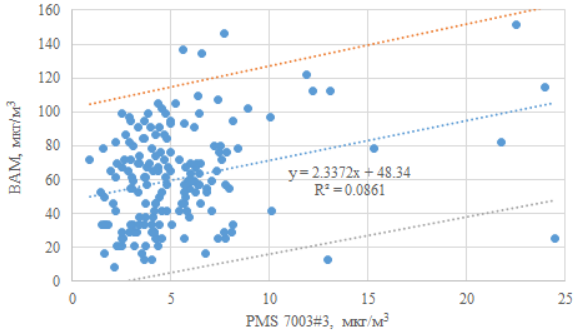
(а)



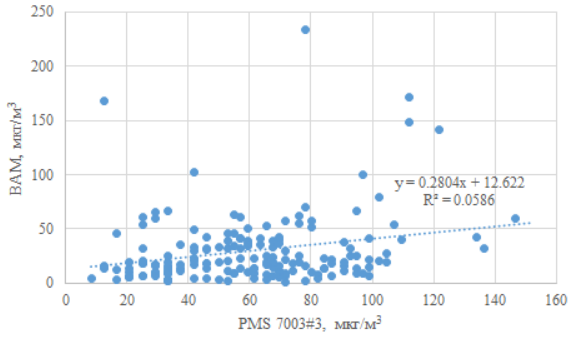
(б)



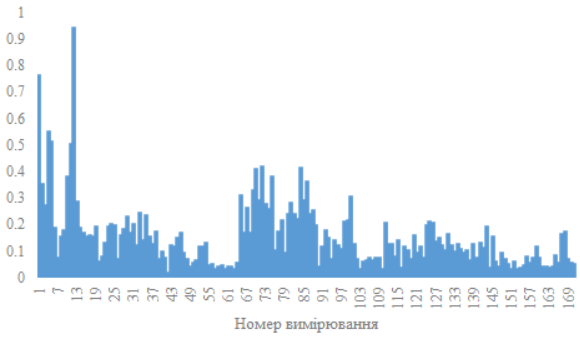
(в)



(г)



(д)



(е)

Рис. 37. Залежності еталонних вимірювань $PM_{2.5}$ від деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 7003#3 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – СКВ, д – дисперсії) та значення коефіцієнта варіації (е)

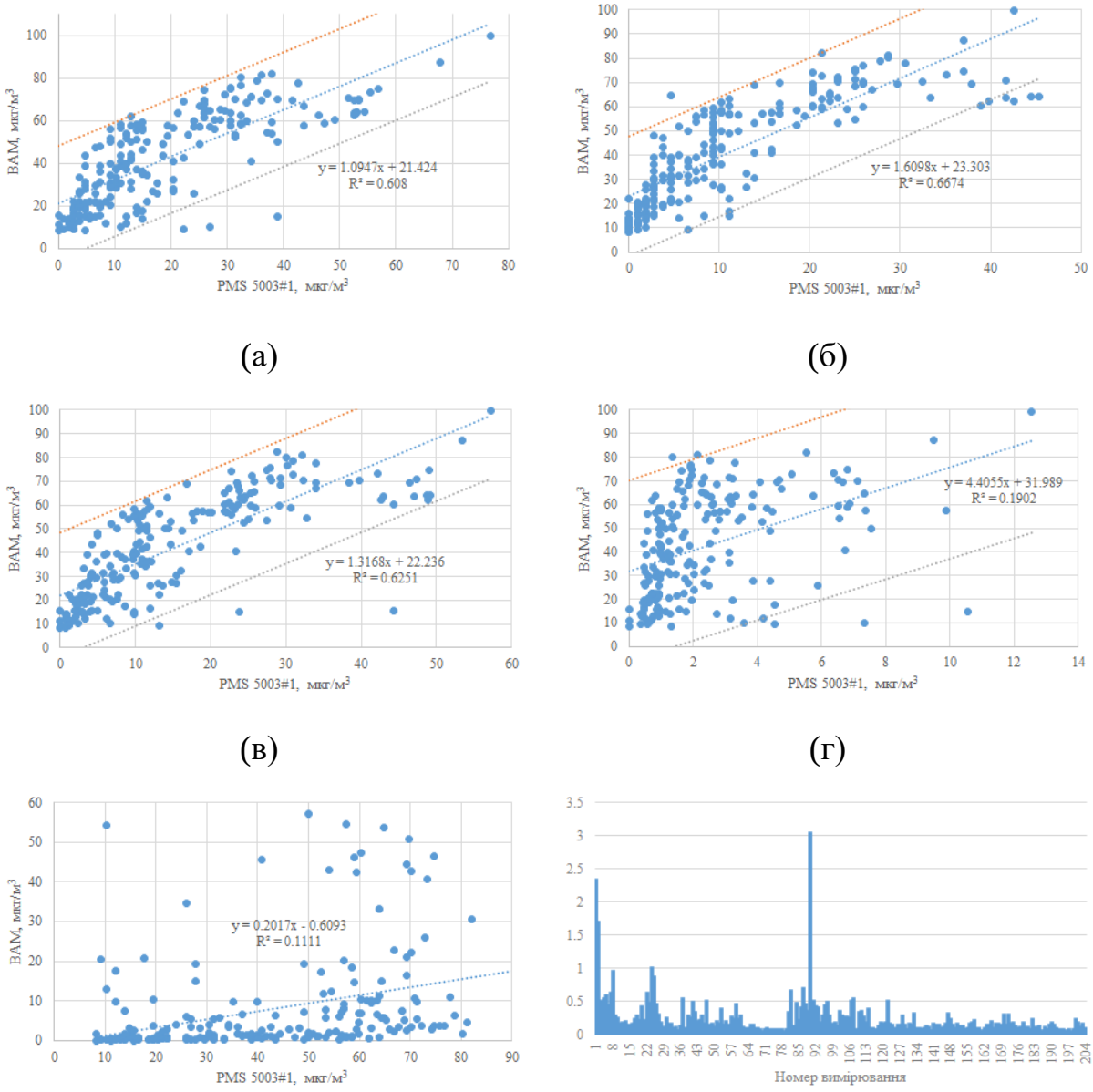


Рис. 38. Залежності еталонних вимірювань PM_{10} від деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 5003#1 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – СКВ, д – дисперсії) та значення коефіцієнта варіації (е)

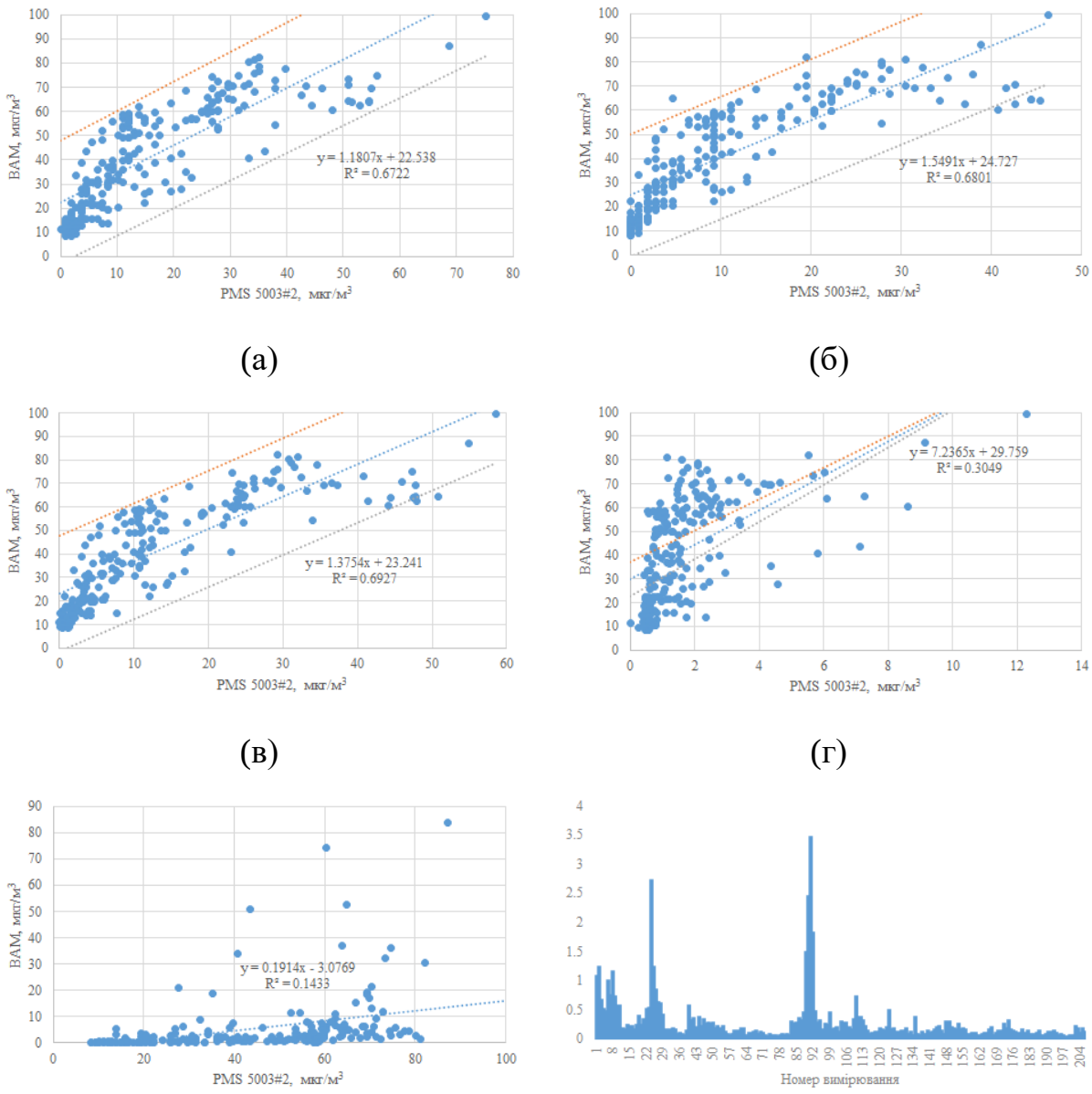
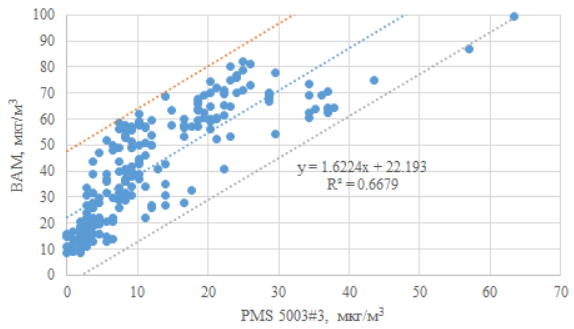
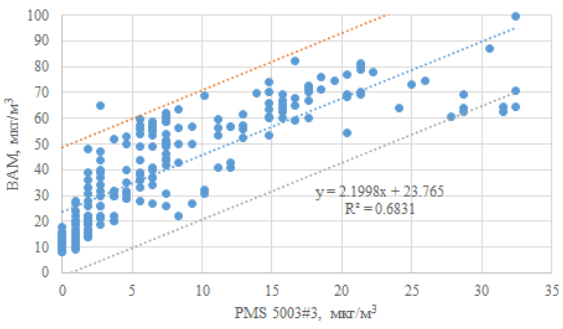


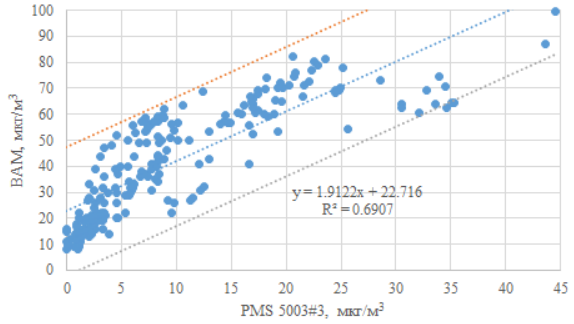
Рис. 39. Залежності еталонних вимірювань PM_{10} від деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 5003#2 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – СКВ, д – дисперсії) та значення коефіцієнта варіації (е)



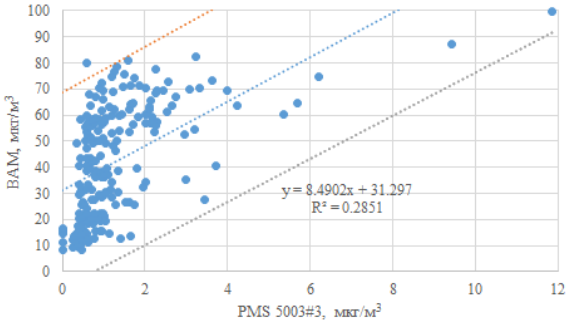
(а)



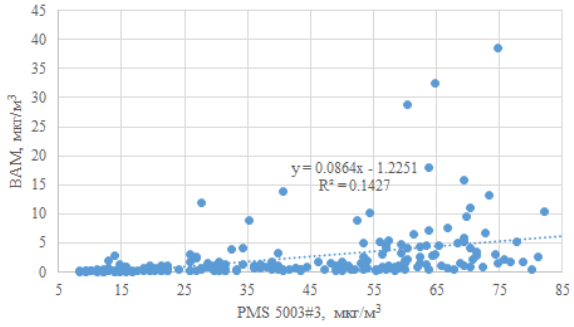
(б)



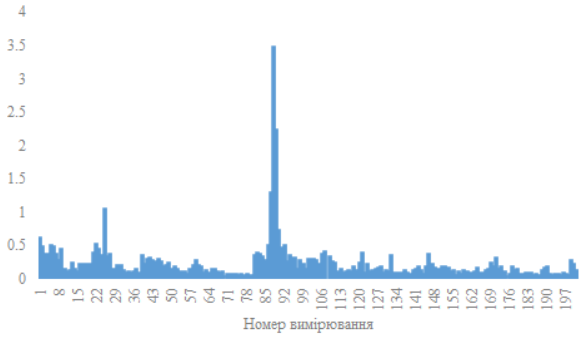
(в)



(г)



(д)



(е)

Рис. 310. Залежності еталонних вимірювань PM_{10} від деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 5003#3 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – СКВ, д – дисперсії) та значення коефіцієнта варіації (е)

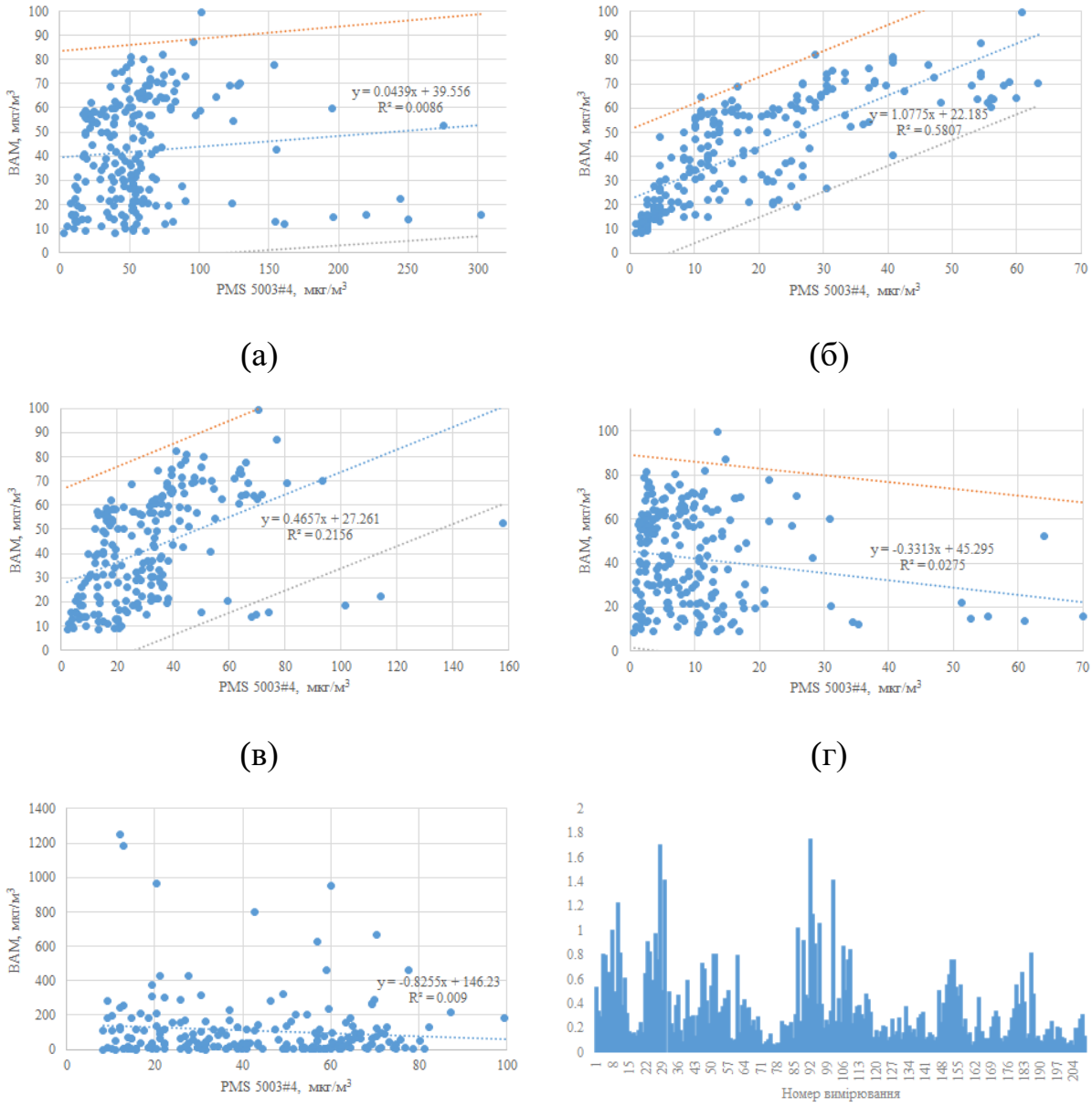


Рис. 311. Залежності еталонних вимірювань PM_{10} від деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 5003#4 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – СКВ, д – дисперсії) та значення коефіцієнта варіації (е)

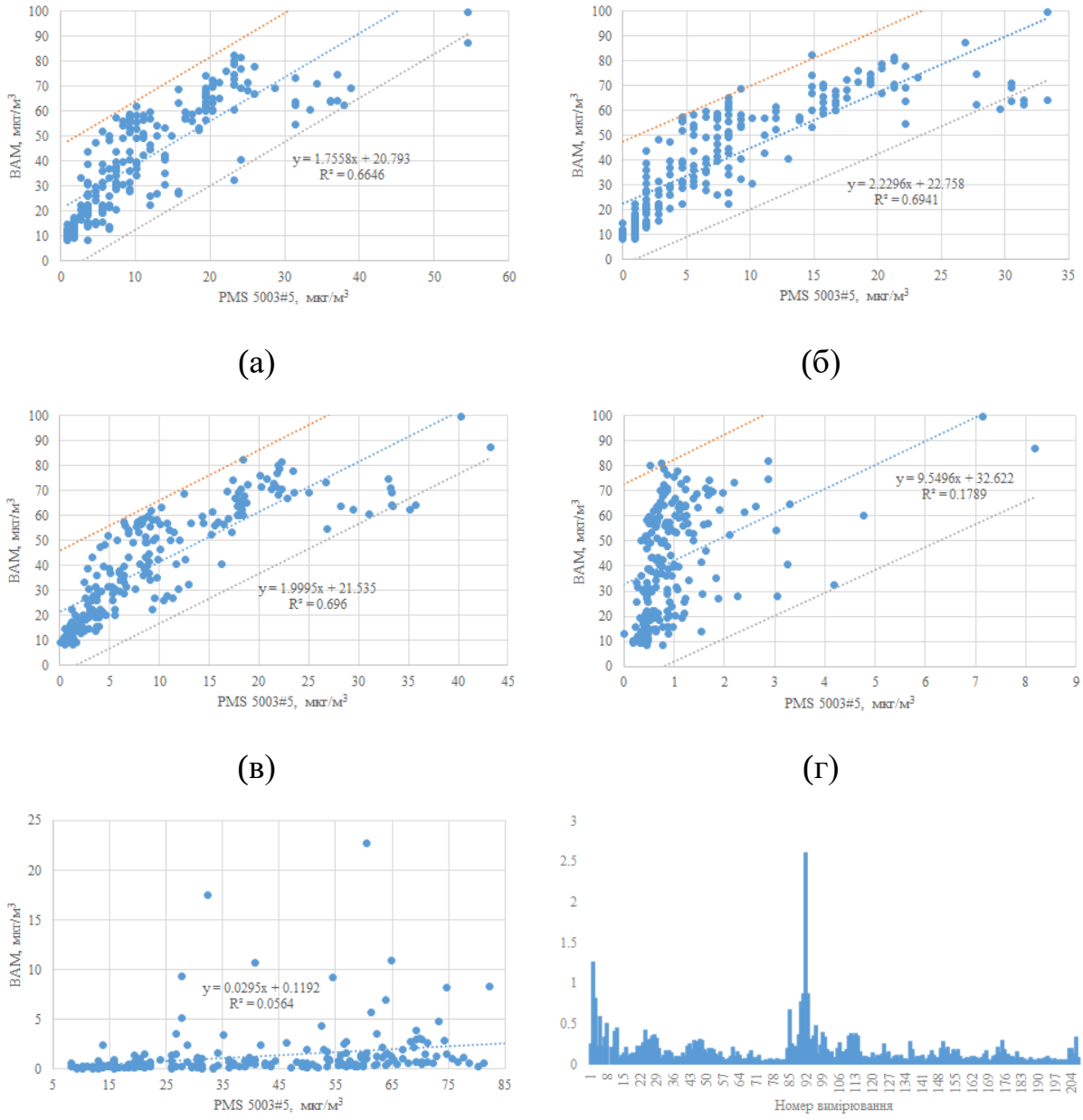


Рис. 312. Залежності еталонних вимірювань PM_{10} від деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 5003#5 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – СКВ, д – дисперсії) та значення коефіцієнта варіації (е)

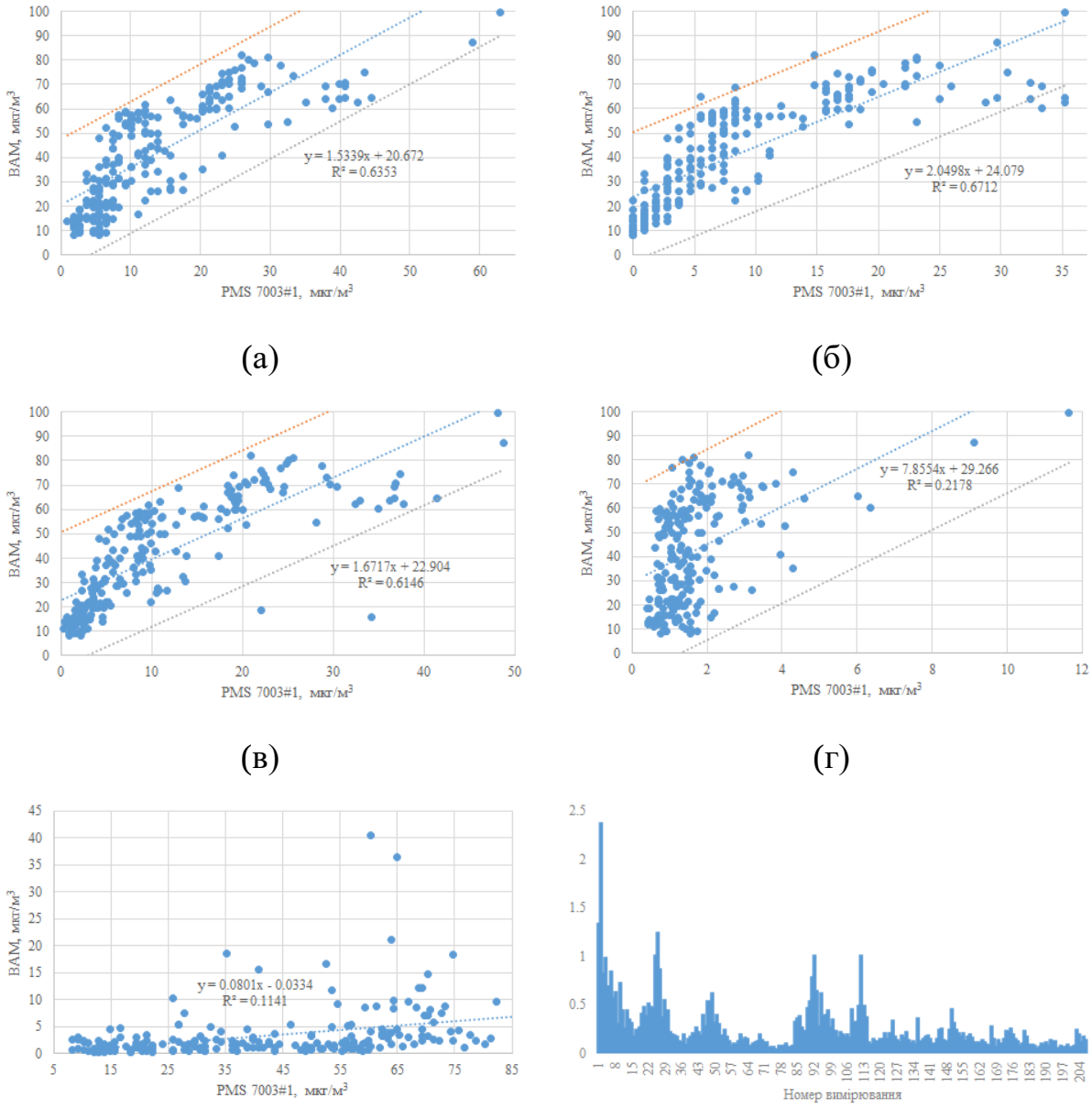
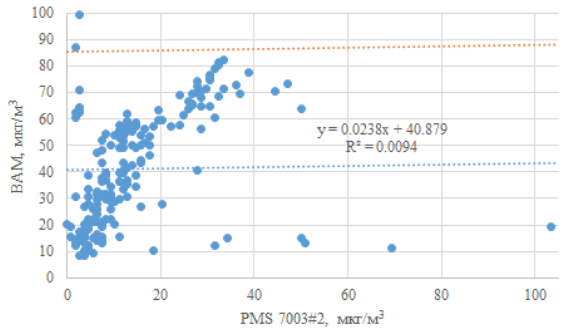
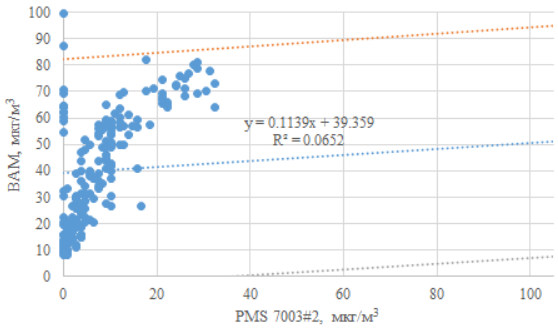


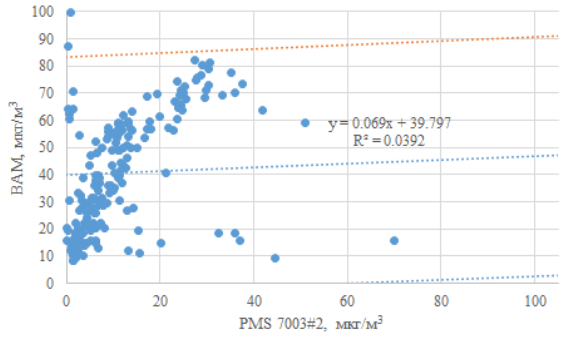
Рис. 313. Залежності еталонних вимірювань PM_{10} від деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 7003#1 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – СКВ, д – дисперсії) та значення коефіцієнта варіації (е)



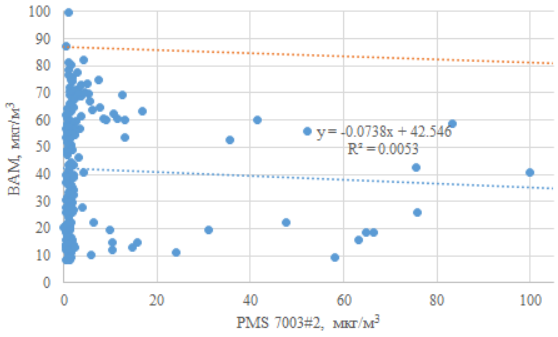
(а)



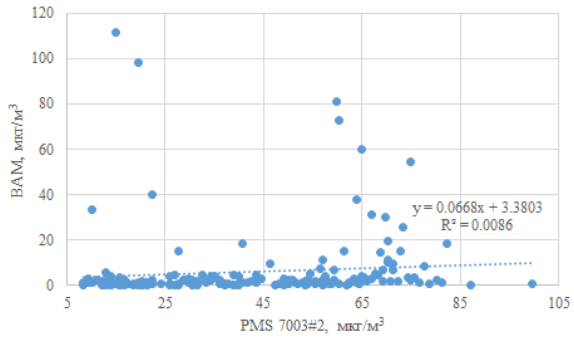
(б)



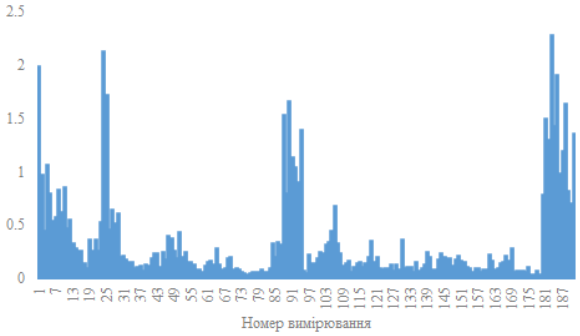
(в)



(г)

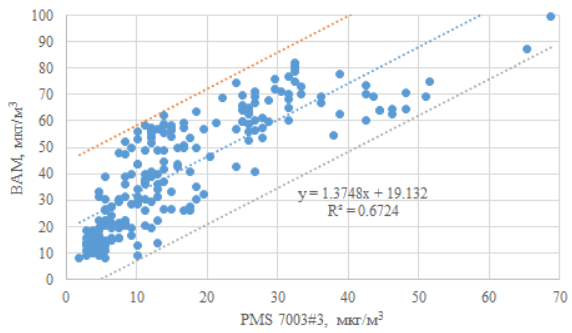


(д)

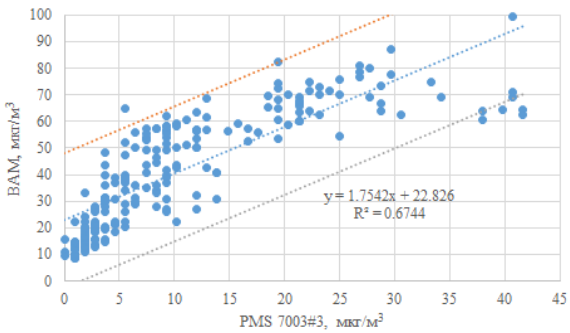


(е)

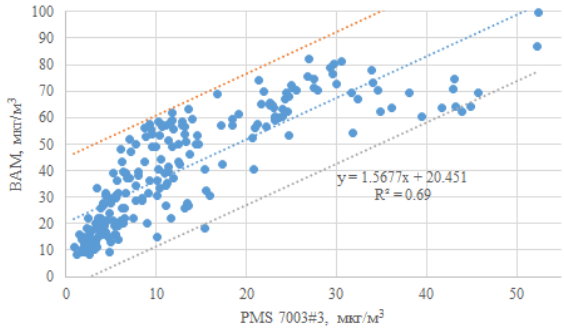
Рис. 314. Залежності еталонних вимірювань PM_{10} від деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 7003#2 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – СКВ, д – дисперсії) та значення коефіцієнта варіації (е)



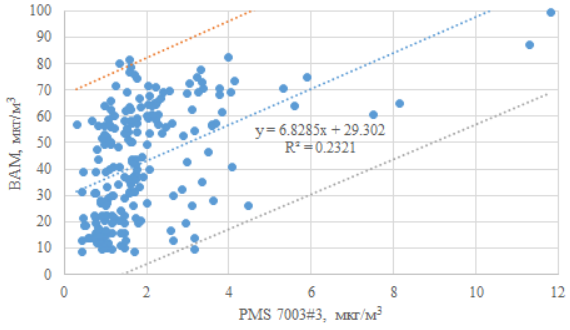
(а)



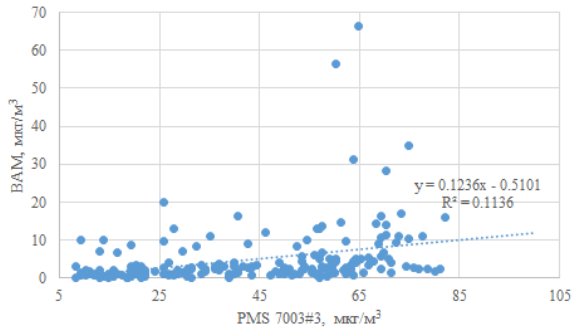
(б)



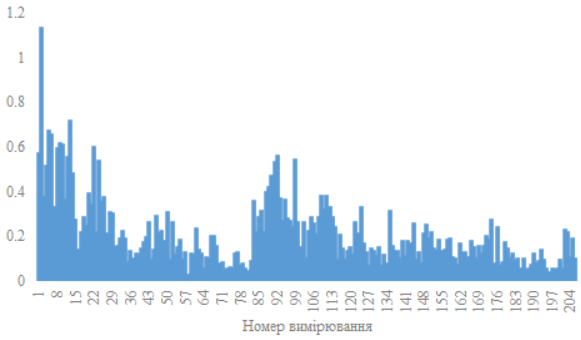
(в)



(г)



(д)



(е)

Рис. 315. Залежності еталонних вимірювань PM_{10} від деяких значень погодинних вибірок експериментальних даних сенсора PMS 7003#3 (а – максимального; б – мінімального, в – середнього, г – СКВ, д – дисперсії) та значення коефіцієнта варіації (е)

ДОДАТОК Л

КОПІЇ АКТІВ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ІТТФ НАН України,
член-кор. НАН України
_____ Ю.Ф. Снежкін
«____» листопада 2017 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ НВП
«Машинобудування»
_____ С.Г. Шевченко
«23» листопада 2017 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів наукової роботи

Даний акт складено про впровадження результатів другого етапу наукової-технічної роботи Інституту технічної теплофізики НАН України «Розроблення багаторівневої системи технічної діагностики основного та допоміжного обладнання теплоелектростанцій». При проведенні неруйнівного контролю об'єктів теплоенергетики ТОВ НВП «Машинобудування» впроваджені наступні наукові результати наукової роботи:

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект
Математичні методи відбору діагностичних ознак конструктивних елементів теплоенергетичних об'єктів	Зменшення розмірності діагностичного простору, обгрунтування вибору вирішальних правил для класифікації дефектів, підвищення достовірності діагностування
Структура вимірювального модулю системи діагностування тепло-енергетичного обладнання	Прийняття діагностичних рішень по об'єкту діагностики в цілому; виявлення, класифікація та прогнозування поширення дефекту на ранніх стадіях його зародження; калібрування сенсорів системи діагностування в режимі реального часу; підвищення достовірності діагностування

Завідувач відділом ТДОЕ
ІТТФ НАН України
чл.-кор. НАН України
_____ В.П. Бабак
«____» листопада 2017 р.

Заст. директора з наукової роботи
ТОВ НВП «Машинобудування»
_____ О.В. Мозговой
«23» листопада 2017 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Головний інженер
ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ»
А.П. Шевченко
«23» 10 2018р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даним актом підтверджується, що на Державному підприємстві «Завод «Електроважмаш» буде впроваджено результати комплексного наукового завдання Об 4.5. «Розроблення багаторівневої системи технічної діагностики основного та допоміжного обладнання теплоелектростанцій» Інституту електродинаміки та Інституту технічної теплофізики НАН України. Період виконання вказаного завдання 2016 - 2018 р.р.:

Зокрема, розроблені алгоритми, методи та програмне забезпечення, які є основою побудованої багаторівневої системи моніторингу і діагностики, що дозволяють розширити можливості існуючих діагностичних систем ЕО, підвищити їх ступінь надійності та точність і вірогідність діагностики окремих частин основного обладнання теплоелектростанцій рекомендовано використовувати при проектуванні, виготовлені та модернізації генеруючого обладнання для підвищення його надійності в експлуатації.

Головний конструктор по турбогенераторам
ДП «ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ»,
Лауреат державної премії України,
кандидат технічних наук **К.О. Кобзар**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Заст. директора ІТТФ НАН України,
член-кор. НАН України

_____ В.П. Бабак
«___» грудня 2018 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ
«Укрекоконсалт»

_____ Д.В. Гулевець
«___» грудня 2018 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів наукової роботи

Даний акт складено про впровадження результатів другого етапу наукової роботи Інституту технічної теплофізики НАН України № 1.7.1.883 «Розвиток науково-практичних засад моніторингу довкілля та технічного стану об'єктів теплоенергетики на базі безпілотних авіаційних комплексів».

При проведенні контролю об'єктів теплоенергетики ТОВ «Укрекоконсалт» впроваджені наступні наукові результати наукової роботи:

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект
Математичні моделі та структурні схеми систем моніторингу об'єктів комунальної та промислової теплоенергетики.	Підвищена точність локалізації ділянок з дефектами, прогнозування розповсюдження концентраційних полів забруднюючих речовин від об'єктів енергетики.
Метод визначення температури теплоносія в трубопроводі та інтегральних тепловтрат на ділянці теплотраси із використанням накладних перетворювачів температури та теплового потоку.	Визначення інтегральних та питомих тепловтрат на ділянках теплотрас в експлуатаційному режимі, встановлення об'єктивного технічного стану тепломереж, зменшення похибки результатів вимірювань за наявності в трубопроводі витоків теплоносія. Економічний ефект не розраховувався.

Старший науковий співробітник
відділу МОТП ІТТФ НАН України

_____ А.О. Запорожець
«___» грудня 2018 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач відділом МОТП.
ІТТФ НАН України
_____ В.П. Бабак
«2» вересня 2019 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ
«БУД-БУД»
_____ С.І. Корнієнко
«2» вересня 2019 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів наукової роботи

Даний акт складено про впровадження результатів наукової-технічної роботи відділу моніторингу та оптимізації теплофізичних процесів Інституту технічної теплофізики НАН України в рамках науково-дослідної роботи № Н.Е.4.6.-19 «Розроблення системи моніторингу рівня шкідливих викидів ТЕС та діагностування обладнання електростанцій, що використовують відновлювальні джерела енергії, на базі Smart Grid з урахуванням їх спільної роботи». При проведенні контролю забруднення повітря виробничих приміщень ТОВ «Буд-Буд» впроваджені наступні наукові результати роботи:

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект
Метод непрямого вимірювання концентрації кисню в повітрі	Вимірювання парціальної густини кисню в повітря на основі метеорологічних параметрів (температури, відносної вологості, атмосферного тиску)
Вимірювальний модуль системи екологічного моніторингу стану забруднення навколишнього повітря	Моніторинг метеорологічних параметрів стану забруднення навколишнього повітря та повітря виробничих приміщень за наступними показниками: температура, відносна вологість, атмосферний тиск, пил PM2.5, пил PM10, формальдегід CH_2O, вуглекислий газ CO_2, кисень O_2

Старш. наук. співроб. МОТП
ІТТФ НАН України
_____ А.О. Запорожець
«2» вересня 2019 р.

National Aviation University

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор Інституту технічної теплофізики НАН України, академік НАН України

_____ Ю. Ф. Снєжкін

«___» _____ 2019 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор Національного авіаційного університету з наукової роботи, проф.

_____ В. П. Харченко

«3» 12 2019 р.

А К Т

упровадження виконаної науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи у навчальний процес Національного авіаційного університету

Ми, що нижче підписалися, декан факультету екологічної безпеки, інженерії та технологій, д.т.н., проф. Бойченко С.В., доценти Яковлєва А.В. і Трофімов І.Л. разом зі старшим науковим співробітником Інституту технічної теплофізики НАН України, к.т.н. Запорожець А.О. склали цей акт про те, що результати науково-дослідної роботи за відомчою тематикою 1.7.1.888 „Розвиток наукових засад термогазодинаміки енергетичних установок та моніторингу викидів забруднюючих речовин", що виконується Інститутом технічної теплофізики НАН України у вигляді монографії та методу використовуються у навчальному процесі Національного авіаційного університеті на кафедрі хімії і хімічної технології.

Назва результату НДР, що впроваджується	**Форма упровадження** (монографія, підручник, навчальний посібник, конспект лекцій, методична розробка, лабораторний практикум, програма курсу, постановка лабораторного роботи, програма, продовження розробки у дипломній роботі)	**Ефект від впровадження**
Монографії «Моделі та міри у вимірюваннях», «Information Provision of Diagnostic Systems for Energy Facilities»	Монографії «Моделі та міри у вимірюваннях» та «Information Provision of Diagnostic Systems for Energy Facilities» використовується як методичний матеріал під час викладання навчальної дисципліни «Альтернативні авіаційні паливо-мастильні матеріали», що викладається для студентів спеціальності 161 «Хімічна технологія та інженерія», ОПП «Хімічні технології альтернативних енергоресурсів»	Покращення якості викладання матеріалів, рівня підготовки фахівців та підвищення рівня забезпеченості літературою
Метод непрямого вимірювання концентрації кисню в повітрі	Метод непрямого вимірювання концентрації кисню використовується при моніторингу довкілля як додатковий інформативний параметр якості атмосферного повітря	Підвищення точності вимірювання концентрації кисню в повітрі, підвищення рівня інформативності процесу моніторингу повітря

С.н.с. відділу МОТП ІТТФ НАН України, к.т.н. А.О. Запорожець

Декан ФЕБІТ НАУ, проф., д.т.н. С.В. Бойченко

Доцент кафедри ХіХТ ФЕБІТ к.т.н. А.В. Яковлєва

Доцент кафедри ХіХТ ФЕБІТ к.т.н. І.Л. Трофімов

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ІТТФ НАН України,
академік НАН України
_____ О.І. Сокалюк
«27» листопада 2019 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ
«Передові мембранні технології»
_____ О.А. Мажуга
«27» листопада 2019 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів наукової роботи

Даний акт складено про впровадження результатів наукової-технічної роботи відділу моніторингу та оптимізації теплофізичних процесів Інституту технічної теплофізики НАН України в рамках відомчої тематики 1.7.1.888 «Розвиток наукових засад термогазодинаміки енергетичних установок та моніторингу викидів забруднюючих речовин». При проведенні контролю забруднення повітря як виробничих приміщень ТОВ «Передові мембранні технології», так і навколишнього атмосферного повітря впроваджені наступні наукові результати роботи:

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект
Метод непрямого вимірювання концентрації кисню в повітрі	Вимірювання парціальної густини кисню в повітря на основі метеорологічних параметрів (температури, відносної вологості, атмосферного тиску)
Вимірювальний модуль системи екологічного моніторингу стану забруднення навколишнього повітря	Моніторинг метеорологічних параметрів стану забруднення навколишнього повітря та повітря виробничих приміщень за наступними показниками: температура, відносна вологість, атмосферний тиск, пил PM2.5, пил PM10, формальдегід CH_2O, вуглекислий газ CO_2, кисень O_2

С.н.с. відділу МОТП
ІТТФ НАН України, к.т.н.
_____ А.О. Запорожець
«27» листопада 2019 р.

Керівник проекту
ТОВ «Передові мембранні технології»
_____ В.М. Остапенко
«27» листопада 2019 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор
Інституту технічної теплофізики НАН України
_____ Ю.Ф. Снєжкін
10 грудня 2020 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор
Національного авіаційного університету з навчальної роботи
_____ А.Г. Гудманян
10 грудня 2020 р.

АКТ
упровадження виконаної науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи у навчальний процес Національного авіаційного університету

Ми, що нижче підписалися, декан факультету екологічної безпеки, інженерії та технологій, д.т.н., проф. Бойченко С.В., доценти Яковлєва А.В. і Трофімов І.Л. разом зі старшим науковим співробітником Інституту технічної теплофізики НАН України, к.т.н. Запорожець А.О., склали цей акт про те, що результати наукового завдання «Розроблення системи моніторингу рівня шкідливих викидів ТЕС та діагностування обладнання електростацій, що використовують відновлювальні джерела енергії, на базі Smart Grid з урахуванням їх спільної роботи» за етапом 2 «Розроблення структури та програмного забезпечення системи діагностування обладнання електростанцій, які використовують відновлювані джерела енергії, та екологічного моніторингу як mesh-мережі з використанням GSM-передавачів», що виконується Інститутом технічної теплофізики НАН України, у вигляді монографії та методу використовуються у навчальному процесі Національного авіаційного університету на кафедрі хімії і хімічної технології.

Назва результату НДР, що впроваджується	**Форма упровадження** (монографія, підручник, навчальний посібник, конспект лекцій, методична розробка, лабораторний практикум, програма курсу, постановка лабораторної роботи, програма, продовження розробки у дипломній роботі)	**Ефект від впровадження**
Монографія «Control of Fuel Combustion in Boilers»	Монографія «Control of Fuel Combustion in Boilers» використовуються як методичний матеріал під час викладання навчальних дисциплін «Використання альтернативних палив у теплових двигунах», «Основи хіммотології» ОПП Хімічні технології альтернативних ресурсів	Покращення якості викладання матеріалів, рівня підготовки фахівців та підвищення рівня забезпеченості літературою
Метод прогнозування аномальних станів теплотехнічного обладнання на базі нейронних мереж	Метод прогнозування аномальних станів використовується в системах діагностики та моніторингу функціонування складних теплоенергетичних систем та їх компонентів, зокрема при спалюванні різних видів палив	Використання нейронної мережі у системах діагностува-ння забезпечує під-вищення достовірності прогнозування ано-мальних станів на 9%

С.н.с. відділу МОТП ІТТФ НАН України,
к.т.н., старш. дослідник
А.О. Запорожець

Декан ФЕБІТ НАУ,
проф., д.т.н.
С.В. Бойченко

Заступник декана ФЕБІТ НАУ
к.т.н.
А.В. Яковлєва

Доцент кафедри ХіХТ ФЕБІТ НАУ
к.т.н.
І.Л. Трофімов

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор
Інституту технічної теплофізики НАН України
_____ Ю.Ф. Снєжкін
10 грудня 2020 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор
Національного авіаційного університету з навчальної роботи
_____ А.Г. Гудманян
10 грудня 2020 р.

АКТ
упровадження виконаної науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи у навчальний процес Національного авіаційного університету

Ми, що нижче підписалися, декан факультету екологічної безпеки, інженерії та технологій, д.г.н., проф. Бойченко С.В., доценти Яковлєва А.В. і Трофімов І.Л. разом зі старшим науковим співробітником Інституту технічної теплофізики НАН України, к.т.н. Запорожець А.О., склали цей акт про те, що результати наукового проєкту №1-102/01 «Розроблення методів і засобів підвищення екологічної ефективності та довговічності димових труб теплоенергетичних установок» за етапом 1 «Дослідження ефективності застосування комплексних методів захисту димових труб котлоагрегатів на основі уточнених даних щодо зовнішньої аеродинаміки і теплообміну цих труб та розроблення адаптивних методів моніторингу концентрації забруднюючих речовин на базі бездротових сенсорних мереж», що виконується Інститутом технічної теплофізики НАН України, у вигляді монографій та вимірювального модулю використовуються у навчальному процесі Національного авіаційного університету на кафедрі хімії і хімічної технології.

Назва результату НДР, що впроваджується	**Форма упровадження** (монографія, підручник, навчальний посібник, конспект лекцій, методична розробка, лабораторний практикум, програма курсу, постановка лабораторної роботи, програма, продовження розробки у дипломній роботі)	**Ефект від впровадження**
Монографії «Diagnostic Systems For Energy Equipments» та «Systems, Decision and Control in Energy I»	Монографії «Diagnostic Systems For Energy Equipments» та «Systems, Decision and Control in Energy I» використовуються як методичний матеріал під час викладання навчальної дисципліни «Контроль та керування альтернативними хіміко-технологічними процесами» ОПП «Хімічні технології альтернативних енергоресурсів»	Покращення якості викладання матеріалів, рівня підготовки фахівців та підвищення рівня забезпеченості літературою
Вимірювальний модуль системи моніторингу забруднення повітря	Вимірювальний модуль системи моніторингу забруднення повітря використовується при дослідженнях рівня концентрації таких забруднювачів як мілкодисперсний пил (PM2.5, PM10), діоксид вуглецю (CO_2), монооксид вуглецю (CO), озон (O_3), формальдегід (CH_2O) в повітрі	Підвищення рівня інформативності процесу моніторингу повітря, оптимізація збору та обробки даних моніторингу

С.н.с. відділу МОТП ІТТФ НАН України,
к.т.н., старш. дослідник
А.О. Запорожець

Декан ФЕБІТ НАУ,
проф., д.т.н.
С.В. Бойченко

Заступник декана ФЕБІТ НАУ
к.т.н.
А.В. Яковлєва

Доцент кафедри ХіХТ ФЕБІТ НАУ
к.т.н.
І.Л. Трофімов

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор Інституту технічної теплофізики НАН України,
академік НАН України
_____ Юрій СНЄЖКІН

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Ректор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», член-кор. НАН України
_____ Сергій СОКОЛ

АКТ
упровадження виконаної науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи у навчальний процес Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Ми, що нижче підписалися, завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем НТУ ХПІ, д.т.н., Гапон Д.А. разом зі старшим науковим співробітником Інституту технічної теплофізики НАН України, к.т.н., старш. дослідником Запорожцем А.О., склали цей акт про те, що результати наукової роботи Н.Е. 4.6 «Розроблення системи моніторингу рівня шкідливих викидів ТЕС та діагностування обладнання електростанцій, що використовують відновлювані джерела енергії, на базі Smart Grid з урахуванням їх спільної роботи» за етапом 3 «Розроблення дослідного зразка системи діагностування системи обладнання електростанцій, які використовують відновлювані джерела енергії, та екологічного моніторингу довкілля», що виконується Інститутом технічної теплофізики НАН України, у вигляді монографії використовуються у навчальному процесі Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» на кафедрі автоматизації та кібербезпеки енергосистем.

Назва результату НДР, що впроваджується	Форма упровадження	Ефект від впровадження
Структура системи діагностування обладнання електростанцій, які використовують відновлювані джерела енергії, та екологічного моніторингу довкілля	Environmental Control for Ensuring Cities Safety / D. Gulevets, A. Zaporozhets, V. Isaienko, K. Babikova // Springer International Publishing, 2021. - 109 p. doi: 10.1007/978-3-030-66710-8	Запропонована структура система діагностування дозволяє комплексно проводити вимірювання різних характеристик та параметрів функціонування об'єктів енергетики (зокрема, концентрації забруднення повітря), зменшити час локалізації джерела забруднення, в режимі реального часу спостерігати за результатами вимірювання, зберігати та опрацьовувати ретроспективні дані моніторингу з використанням хмарних технологій.

С.н.с. відділу моніторингу та оптимізації теплофізичних процесів ІТТФ НАН України,
к.т.н., старш. дослідник
Артур ЗАПОРОЖЕЦЬ

Зав. кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем НТУ «ХПІ»,
д.т.н., доцент
Дмитро ГАПОН

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор Інституту технічної теплофізики НАН України,
академік НАНУкраїни
_____ Юрій СНЄЖКІН

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Ректор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», член-кор. НАН України
_____ Євген СОКОЛ

АКТ
упровадження виконаної науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи у навчальний процес Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Ми, що нижче підписалися, завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем НТУ ХПІ, д.т.н., Гапон Д.А. разом зі старшим науковим співробітником Інституту технічної теплофізики НАН України, к.т.н., старш. дослідником Запорожцем А.О., склали цей акт про те, що результати наукової роботи № 1.7.883 «Розвиток науково-практичних засад моніторингу довкілля та технічного стану об'єктів теплоенергетики на базі безпілотних авіаційних комплексів» за етапом 5 «Створення методики дистанційного моніторингу характеристик довкілля та технічного стану об'єктів теплоенергетики на базі безпілотних авіаційних комплексів і розроблення структури та алгоритмів апаратно-програмного забезпечення розроблених систем», що виконується Інститутом технічної теплофізики НАН України, у вигляді монографії використовуються у навчальному процесі Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» на кафедрі автоматизації та кібербезпеки енергосистем.

Назва результату НДР, що впроваджується	Форма упровадження	Ефект від впровадження
Структура керування багатофункціональної системи моніторингу параметрів довкілля на базі безпілотних авіаційних комплексів	Control of Overhead Power Lines with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) / ed. by Ye.I. Sokol, A. Zaporozhets // Springer International Publishing, 2021. - 157 p. doi: 10.1007/978-3-030-69752-5	Структура, розроблена на основі алгоритму ковзної орієнтації з фільтрами Калмана та комплексування систем орієнтації, дозволила підвищити точність визначення кутів тангажу і крену і усунути похибки визначення місцеположення літального апарату, пов'язані з наявністю залишкових некомпенсованих магнітних завад та обумовлених кутом ковзання БПЛА

С.н.с. відділу моніторингу та оптимізації теплофізичних процесів ІТТФ НАН України,
к.т.н., старш. дослідник
Артур ЗАПОРОЖЕЦЬ

Зав. кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем НТУ «ХПІ»,
д.т.н., доцент
Дмитро ГАПОН

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор Інституту технічної теплофізики
НАН України,
академік НАН України
Юрій СНЄЖКІН

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Ректор Національного технічного
університету «Харківський політехнічний
інститут», член-кор. НАН України
Євген СОКОЛ

АКТ
упровадження виконаної науково-дослідної
та дослідно-конструкторської роботи у навчальний процес
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»

Ми, що нижче підписалися, завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем НТУ ХПІ, д.т.н. Гапон Д.А. разом зі старшим науковим співробітником Інституту технічної теплофізики НАН України, к.т.н., старш. дослідником Запорожцем А.О., склали цей акт про те, що результати наукової роботи № Р.7.3.1 «Розроблення моделей, методу та методики визначення стану промислових конструкцій за даними системи їх моніторингу з прогнозуванням залишкового ресурсу» за етапом 1 «Дослідження технічного стану промислових конструкцій та основних методів їх діагностування з використанням ієрархічних систем», що виконується Інститутом технічної теплофізики НАН України, у вигляді монографії використовуються у навчальному процесі Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» на кафедрі автоматизації та кібербезпеки енергосистем.

Назва результату НДР, що впроваджується	Форма упровадження	Ефект від впровадження
Методи локалізації дефектів в елементах будівельних конструкцій енергетичних об'єктів	Models and Measures in Measurements and Monitoring / V.P. Babak, S.V. Babak, V.S. Eremenko, Yu.V. Kuts, M.V. Myslovych, L.M. Scherbak, A.O. Zaporozhets // Springer International Publishing, 2021. - 266 p. doi: 10.1007/978-3-030-70783-5	Запропоновані методи та їх модифікації дозволяють з високою точністю визначити місця утворення та типи дефектів в композиційних матеріалах, що використовуються в будівельних конструкціях об'єктів енергетики

С.н.с. відділу моніторингу та оптимізації теплофізичних процесів ІТТФ НАН України,
к.т.н., старш. дослідник
Артур ЗАПОРОЖЕЦЬ

Зав. кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем НТУ «ХПІ»,
д.т.н., доцент
Дмитро ГАПОН

МІНІСТЕРСТВО ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ

НАУКОВИЙ ПАРК ДЕРЖАВНОЇ ЕКОЛОГІЧНОЇ АКАДЕМІЇ ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ ТА УПРАВЛІННЯ "ЧОРНОБИЛЬ"

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Цей акт засвідчує, що наукові результати Попова О.О., Яцишина А.В., Артемчука В.О., Ковач В.О., Запорожця А.О. та Кириленка Ю.О. використані ТОВ «Науковий парк Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління «Чорнобиль» в рамках виконання науково-дослідних робіт. Впровадженими результатами є: 1) математичні та програмні засоби для визначення впливу місця зберігання золошлаків на забруднення атмосферного повітря та населення прилеглих територій, що дозволяють із задовільною точністю проводити відповідне моделювання та прогнозування; 2) математичні та програмні засоби оцінювання та аналізу екологічних ризиків при аварійному фонтануванні газових свердловин виснажених родовищ, що дозволять адекватно описувати рух газової суміші по стовбуру свердловини, міграцію забруднюючих речовин в атмосферному повітрі за різних режимів викидів та метеорологічних сценаріїв, та оцінювати екологічні ризики на здоров'я персоналу та населення та населення прилеглих територій; 3) математичне та програмне забезпечення для оцінки забруднення компонентів довкілля внаслідок інцидентів, пов'язаних з розливами рідких радіоактивних рідин у приміщеннях радіаційно-небезпечних об'єктів та навколишньому природному середовищі, що дозволяє оцінювати дози опромінення персоналу та населення під час таких подій; 4) непрямий метод вимірювання концентрації складових повітря на базі основних газових законів та врахуванні метеорологічних характеристик атмосферного повітря, що дозволяє з високою точністю проводити дослідження складу повітря без застосування газоаналізуючих пристроїв; 5) моделі прогнозування концентрації складових повітря на базі дискретного перетворення Фур'є та ретроспективної інформації, що дозволяє з високою точністю прогнозувати зміни складу атмосферного повітря та враховувати ці дані в сферах екології, енергетики, медицини, сільського господарства тощо.

В.о. Генерального директора Тарас ІВАЩЕНКО

«14» грудня 2021 р.

ДОДАТОК М
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., Serhiienko, 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 Quadrocopters 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.**, Свердлова, 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.**, Свердлова, А.Д. (2017). Аналіз методів діагностування теплоенергетичних 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/ttpe.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., Serhiienko, 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.**, Свердлова, А.Д. (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., Serhiienko, 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 золовідвалів 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 пилiння золошлаковідвалів об'єктів теплоенергетики. *Матеріали IX Міжнародної науково-практичної Інтернет-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. (2017). *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 нестаціонарному 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.

Відомості про апробацію результатів дисертації

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на:

1. The International Symposium on Sustainable Aviation (ISSA-2017) (м. Київ, 10-13 вересня 2017 р., форма участі – заочна участь).

2. XXXVI науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (до 100-річчя Національної академії наук України) (м. Київ, 16 травня 2018 р., форма участі – заочна участь).

3. Міжнародна науково-практична конференція «Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: виклики для університетів наук про життя» (м. Київ, 23-25 травня 2018 р., форма участі – усна доповідь).

4. 2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) (м. Львів, 11-14 вересня 2018 р., форма участі – заочна участь).

5. Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019) (м. Запоріжжя, 15-19 квітня 2019 р., форма участі – заочна участь).

6. XXXVII науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (м. Київ, 15 травня 2019 р., форма участі – заочна участь).

7. 15th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer (м. Херсон, 12-15 червня 2019 р., форма участі – усна доповідь).

8. 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL) (м. Созополь, Болгарія, 6-8 вересня 2019 р., форма участі – заочна участь).

9. III Міжнародна науково-практична конференція “Мехатронні системи: інновації та інжиніринг” (м. Київ, 10 жовтня 2019 р., форма участі – усна доповідь).

10. 9-а Національна науково-технічна конференція «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2019» (м. Київ, 19-21 листопада 2019 р., форма участі – усна доповідь).

11. XXXVIII науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (м. Київ, 15 травня 2020 р., форма участі – заочна доповідь).

12. Workshops on Quantum Information Technologies and Edge Computing (QuaInT+doors 2021) (м. Житомир, 11 квітня 2021 р., форма участі – усна доповідь).

13. XXXIX науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (м. Київ, 12 травня 2021 р., форма участі – заочна участь).

14. IX Міжнародна науково-практична Інтернет-конференція “Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні 2021” (м. Київ, 13-14 травня 2021 р., форма участі – заочна участь).

15. 2nd International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2021) (м. Кривий Ріг, 19-21 травня 2021 р., форма участі – усна доповідь).

16. Всеукраїнська науково-практична Internet-конференція «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку» (м. Черкаси, 11-21 червня 2021 р., форма участі – заочна участь).

17. 2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD) (м. Київ, 19-21 жовтня 2021 р., форма участі – усна доповідь).

18. XII Міжнародна онлайн-конференція “Проблеми теплофізики та теплоенергетики” (м. Київ, 26-27 жовтня 2021 р., форма участі – усна доповідь).

19. 1st International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2021 (м. Тернопіль, 16-18 листопада 2021 р., форма участі – усна доповідь).

20. XL науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (м. Київ, 11 травня 2022 р.)

21. 3rd International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2022) (м. Кривий Ріг, 24-27 травня 2022 р., форма участі – усна доповідь).