

ВІДГУК

офіційного опонента, завідувача відділу електричних і магнітних вимірювань Інституту електродинаміки Національної академії наук України, доктора технічних наук, старшого наукового співробітника

Мельника Володимира Григоровича,

на дисертаційну роботу **Запорожця Артура Олександровича** на тему **“Науково-практичні засади створення засобів та методів контролю забруднення повітря об’єктами енергетики”**, подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин (152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка)

Актуальність теми. 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.

Виходячи з цього, актуальність теми дисертаційного дослідження **Запорожця А.О.**, яка присвячена розв’язку проблеми 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, не викликає сумніву.

Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Вона складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 574 найменувань та 11 додатків. Зміст роботи викладено на 372 сторінках основного тексту, 141 рисунків та 50 таблиць.

У **вступі** проведено обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання дослідження і наукову новизну. Показаний зв'язок з науковими програмами і планами НДР, а також особистий внесок дисертанта.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасної структури енергетичного балансу України та світу. 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.

Проведено аналіз перспективних типів сенсорів забруднюючих речовин, що можуть бути використанні для створення економічно і технічно ефективних систем контролю забруднення повітря. Розглянуті технічні і метрологічні характеристики цих сенсорів. Розглянуті переваги та недоліки металоксидних та електрохімічних сенсорів різних газоподібних речовин (NO_2 , CO , O_3) та сформовані відповідні рекомендації щодо їх використання в системах контролю забруднення повітря.

Визначено ключові напрями розвитку системи контролю забруднення повітря 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.

Запропоновано ієрархічне представлення структури 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 відповідну ієрархічну структуру системи контролю забруднення повітря, особливістю якої є формування відповідних даних на різних ієрархічних рівнях та надання доступу до них відповідних груп користувачів. Сформовано мету, задачі та вимоги до даних системи контролю забруднення повітря.

Запропоновані математичні моделі поля забруднення повітря у виді векторного випадкового поля, неоднорідного за просторовими аргументами, нестационарного в часі, та такого, що залежить від впливу різних факторів.

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.

Запропоновані алгоритми опрацювання даних контролю забруднення повітря з використанням 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.

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. Проведено верифікацію запропонованого 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 методичними особливостями локалізації джерел забруднення на базі просторово-розгалуженої бездротової сенсорної мережі.

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 напрямку 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.

У *п'ятому розділі* наведена апаратно-програмна реалізація системи контролю забруднення повітря на базі бездротової сенсорної мережі. Запропонована елементна база вимірювальних модулів, що може змінюватись в залежності від потреб системи контролю. Розглянуті характеристики кількох типів недорогих сенсорів, що можуть бути застосовані. 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 контролю 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.

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. Запропонована блок-схема алгоритму контролю забруднення повітря на базі БПЛА гелікоптерного типу.

У *шостому розділі* розглянуто результати експериментальних досліджень розробленої системи контролю забруднення повітря, що проводились на базі вимірювальних модулів, оснащених оптичними,

електрохімічними та іншими типами сенсорів. В наглядному вигляді подано отримані експериментальні дані вимірювання метеорологічних параметрів (температури, відносної вологості та абсолютного тиску), мілкодисперсного пилу (PM_{2,5}, PM₁₀), NO₂, CO, NH₃, O₃, CH₂O, CO₂ та рівня радіації. Отримані дані загалом характеризуються достатньо високим значенням коефіцієнта кореляції r ($\geq 0,93$) та коефіцієнтом детермінації R^2 ($\geq 0,87$). В ході експерименту проведено дослідження щодо сили кореляційного зв'язку між метеорологічними параметрами та концентраціями забруднюючих речовин, показано позитивний взаємозв'язок між значенням концентрацій NO₂, CO, O₃ 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. Отримані результати підтверджують можливість використання коефіцієнту детермінації R^2 , коефіцієнту кореляції r , розмаху R та коефіцієнту варіації C_v як інформативних параметрів технічного стану вимірювальних модулів та системи контролю забруднення повітря загалом. Встановлено критерії несправності сенсора та ситуації, що потребує підвищеної уваги оператора системи контролю до цього сенсора.

Встановлено, що для градування 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.

У висновках сформульовані основні наукові результати.

У додатках до дисертаційної роботи наведено статистичну та нормативну інформацію щодо хімічного забруднення атмосферного повітря, технічні характеристики розглянутих засобів та систем контролю забруднення повітря, статистичні дані щодо забруднення повітря PM_{2,5} та поширення

захворювань у країнах світу, результати кореляційного аналізу між складовими енергетичного балансу та рівнем викидів забруднюючих речовин, характеристик різнопроменевих роз вітрів, принципові схема елементів вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря, специфікація друкованої плати вимірювального модулю, результати дослідження збіжності даних сенсорів мілкодисперсного пилю, результати регресійного аналізу, копії 12 актів впровадження результатів дисертаційної роботи та список публікацій здобувача.

Основні наукові результати досліджень та наукова новизна дисертації.

Подана дисертаційна робота визначається науковою новизною, що характеризується світовим та загальнонаціональним значенням, та полягає в тому, що в ній:

1) удосконалено науково-практичні засади статистичного дослідження впливу складових енергетичного балансу (типів спожитих енергоносіїв, галузей, що їх споживають, і секторів перетворення) на викиди низки поширених забруднюючих речовин у повітря (CO_2 , SO_2 , NO_2 , CO , $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10}) із використанням оцінки коефіцієнта їх кореляції за малих обсягів досліджуваних вибірок;

2) вперше запропоновано ітераційний метод розв'язання оберненої задачі розповсюдження забруднюючих речовин у повітрі із використанням розроблених оптимізаційних моделей та модифікованого методу Ньютона;

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;

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;

5) вперше запропоновано використання набору лінійних математичних моделей для градування сенсорів дрібнодисперсного пилю, що встановлюють зв'язок між характеристиками даних вимірювальних модулів (максимальне, мінімальне, середнє значення, середнє квадратичне відхилення) та відповідними даними еталонного засобу контролю (ВАМ-пристрою);

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;

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.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає в наступному:

1) створено ієрархічну структуру системи контролю забруднення повітря, що дозволило сформувати 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;

2) розроблено систему контролю забруднення повітря об'єктами енергетики;

3) розроблені вимірювальні модулі, що базуються на використанні low-cost сенсорів метеорологічних параметрів (температури, відносної вологості, абсолютного тиску) та забруднюючих речовин (мілкодисперсний пил (PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$), CO , CO_2 , NO_2 , SO_2 , CH_2O , NH_3 та ін.);

4) запропоновано критерії для оцінювання працездатності сенсорів системи контролю, що запобігає використанню неякісних даних, дозволяє встановити та попередити аномальні режими функціонування об'єктів контролю, та визначити в цілому технічний стан системи контролю;

5) розроблено програмне забезпечення системи контролю забруднення повітря об'єктами енергетики;

6) проведено експериментальні дослідження статистичних характеристик сенсорів вимірювальних модулів;

7) результати дослідження впроваджено на підприємствах країни та у навчальному процесі вищих навчальних закладів.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечено використанням фундаментальних законів класичної теорії та сучасних програмних продуктів, комплексним характером досліджень, узгодженістю отриманих результатів із даними інших авторів (де це порівняння можливе), обговоренням висунутих наукових положень та зроблених висновків на багатьох міжнародних та національних науково-технічних конференціях, численними експериментами. Отримані експериментальні результати дозволяють стверджувати про високу ефективність застосування розроблених наукових положень та засобів контролю забруднення повітря.

Дисертаційна робота містить результати власних досліджень автора, у роботі відсутні академічний плагіат, фабрикації, фальсифікації.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях.

Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно висвітлено у 20 наукових публікаціях, серед яких 2 монографії, 16 статей у наукових періодичних виданнях інших держав та України, з яких 9 включено до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science (серед яких 4 наукові публікації віднесені до Q2 та 1 – до Q3), та 2 патенти на винахід України. Відповідно до п. 2 наказу МОН від 23.09.2019 № 1220 «Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», це дозволяє прирівняти їх кількісно до 29 наукових публікацій. Додатково зміст дисертаційної роботи відображено у 7 публікаціях. Також наявні 23 публікації у збірниках матеріалів міжнародних та Всеукраїнських науково-технічних конференціях.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідались й обговорювалися на 21 міжнародних та національних науково-технічних конференціях, симпозіумах та семінарах.

Відповідність змісту реферату основним положенням дисертації.

Оформлення реферату за своїм обсягом, структурою та змістом відповідає чинним вимогам до оформлення дисертаційних робіт. Основний зміст автореферату ідентичний змісту основних положень дисертації.

Зауваження по дисертаційній роботі і реферату:

1. Проблемою створення метрологічного забезпечення розроблюваної мережевої інформаційно-вимірювальної системи є великий і непередбачуваний вплив численних чинників на отримувані дані. Їх достовірність визначається в роботі за оцінками статистичних характеристик (випадкові похибки) та калібруванням за даними звірення з еталонним приладом. Але умови звірення відрізняються від робочих умов. Тому бажано було розглянути вплив основних квазістатичних чинників, що змінюють ці умови, та показати шляхи їх урахування.

2. В роботі постійно акцентується застосування low-cost сенсорів. Але важлива ціна не сенсорів, а системи в цілому, включно з урахуванням її ефективності, вартістю обслуговування тощо. Більш важливими є принципи дії, технічні і експлуатаційні характеристики сенсорів. До речі, автор так і діяв при виборі сенсорів, що застосовуються. Нарешті, отримані результати не пов'язані з вартістю сенсорів, хіба що через вартість виготовлених зразків вимірювальних модулів.

3. При аналізі елементної бази разом розглядаються технічні і цінові показники сенсорів (датчики, первинні перетворювачі) та приладів з їх

застосуванням (табл. 1.12, 1.13 та інші). Це варто було б розділити для більш об'єктивної оцінки варіантів.

4. В розділі 3.3 автор наводить алгоритм опрацювання даних контролю забруднення повітря з використанням методів дисперсійного аналізу, проте в дисертаційній роботі відсутнє його практичне застосування.

5. Розроблено алгоритм визначення технічної справності вимірювального модуля за оцінкою статистичних характеристик, що відображують його технічний стан. Для вимірювальних засобів краще застосовувати поняття «працездатність» - коли відхилення характеристик не виходять за встановлені межі. Але при цьому необхідно контролювати не тільки статистичні характеристики.

6. Зауваження до стор. 191, 192. Розглядаються сенсори генераторного типу (активні, відгук на неелектричний вплив у вигляді струму, напруги) та ті, що перетворюють цей вплив на параметр імпедансу (пасивні). Завдяки нормованим характеристикам перетворення сенсорів на їх виходах з'являється кодований інформативний сигнал (інформація). Рисунок 2.21 зображує цей процес дещо інакше, тому потребує корекції або пояснень.

7. В підрозділі 5.1 дається опис контролера ESP8266, що застосовано в розробленому вимірювальному модулі. Опис надто детальний, місцями незрозумілий. На стор. 327 – 330 подано дуже об'ємні діаграми концентрацій забруднень по Києву. Весь цей матеріал не сприяє поясненню принципів питань. Його доцільно біло віднести до додатків.

8. По тексту дисертації зустрічаються окремі граматичні помилки, стилістично невдалі формулювання.

Загальні висновки

Вищевказані зауваження та недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаного дисертаційного дослідження, не зменшують її наукову новизну та практичну значимість і не знижують загального позитивного сприйняття проведеного обсягу досліджень.

Вважаю, що дисертаційна робота *А.О. Запорожця* “*Науково-практичні засади створення засобів та методів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики*”, яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин, є завершеною науковою працею, в якій вирішено нову науково-прикладну проблему, яка полягає у створенні теоретичних засад, розробленні та практичному застосуванні засобів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що забезпечує локалізацію джерел забруднення повітря на базі просторово розгалужених бездротових сенсорних мереж. Дисертаційна робота відповідає вимогам

паспорту наукової спеціальності 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин (152 – метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка), а також вимогам «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197, а її автор, **Запорожець Артур Олександрович**, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за даною спеціальністю.

**Офіційний опонент,
завідувач відділу
електричних і магнітних вимірювань
Інституту електродинаміки
НАН України,
докт. техн. наук, ст. наук. спів.,
лауреат Державної премії України
в галузі науки і техніки**

ВОЛОДИМИР МЕЛЬНИК

