

ВІДГУК

офіційного опонента Райтера Петра Миколайовича
на дисертаційну роботу Запороженя Артура Олександровича "Науково-практичні
засади створення засобів та методів контролю забруднення повітря об'єктами
енергетики" подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі
спеціальності 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» (152 –
Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка)

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Розвиток матеріального виробництва національних економік та підвищення стандартів життя суспільств нерозривно пов'язані із зростанням об'ємів енергоспоживання. Поряд з цим, значна частина виробництв генерації енергії використовує, як первинне її джерело, енергію хімічних зав'язків викопних палив, яка перетворюється в корисні види енергії та роботу з використанням процесів їх спалювання. Масштабне спалювання викопного палива в процесах енергогенерації призводить до негативного впливу на довкілля не лише підвищенням ризику швидкого глобального потепління, а і збільшенням концентрації викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря. Це вимагає постійного моніторингу як за динамікою зміни концентрації забруднюючих речовин, так і локації найбільш проблемних місць поряд з об'єктами енергетики, де зароджуються процеси забруднення повітря та мають місце небезпечні руйнівні явища та процеси для людини та довкілля. Враховуючи значні об'єми контрольованих повітряних мас, площі поверхонь, важкодоступність таких протяжних об'єктів контролю, розробка та вдосконалення нових методів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики та локалізація джерел забруднення на базі просторово розгалужених бездротових low-cost сенсорних мереж, є надзвичайно актуальною науково-технічною проблемою. Складність вирішення проблеми зумовлена, як складністю просторової ідентифікації малих концентрацій шкідливих домішок в повітрі існуючими давачами на фоні атмосферних процесів, так і складністю опрацювання значних об'ємів інформації для отримання достовірних оцінок стану довкілля.

Базовим нормативним документом є Директива 2008/50/ ЄС, яка визначає рамкові вимоги щодо контролю та оцінки якості атмосферного повітря і згідно з якою, Україна має імплементувати окремі її положення. Зокрема, встановити по всій своїй території зони та агломерації за ступенем забруднення атмосферного повітря, а також порядок їх перегляду. У випадках, коли рівні вмісту забруднювачів перевищують будь-яку з нормативних граничних величин або існує ризик такого перевищення, є потреба розробити плани дій щодо якості повітря для відповідних територій. Але для оцінки ефективності реалізації таких планів дій нагально необхідним є розроблення систем детального, тривалого і надійного моніторингу стану забруднення атмосферного повітря особливо навколо об'єктів енергетики.

Незважаючи на те, що вирішенням задач контролю забруднення повітря об'єктами енергетики займаються вже давно, є значний досвід та наукові напрацювання у вирішенні вказаної проблеми, власне для локалізації джерел забруднення на базі просторово розгалужених бездротових low-cost сенсорних мереж, відсутні як загальноприйняті методології діагностування, так і такі системи комплексного контролю які реалізують вказані методики. Це суттєво підвищує актуальність вирішення поставлених в роботі задач та відповідно цінність запропонованих автором підходів, методів та систем для їх вирішення.

Актуальність роботи безсумнівно підтверджує значний об'єм (до 15) науково-дослідних тематик за відомчим замовленням НАН України, виконуваних по вказаній проблематиці автором, в яких він виконував роботи як науковий керівник, відповідальний виконавець та виконавець досліджень.



2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій та їх достовірність

Обґрунтованість та достовірність наукових положень і висновків дисертації зумовлені проведеним порівняльним аналізом літературних джерел, які включають 574 найменувань стосовно теми дисертації, математичною та логічною строгістю побудови моделей, коректністю постановки й вирішення завдань досліджень, використанням широко апробованих методів теорії інформаційно-вимірювальних систем, теорії електротехнічного приладобудування, теорії керування, теорії вимірювань, теорії випадкових процесів, фізичного та математичного моделювання, теорії ймовірностей, теорії алгоритмів, математичної статистики та планування багатofакторного експерименту, обробки та верифікації його результатів, а також результатами лабораторних та промислових досліджень і випробувань.

3. Повнота висвітлення результатів в опублікованих працях, апробація роботи

Наукові положення та отримані автором теоретичні й практичні результати досліджень достатньо повно представлені в опублікованих наукових працях і апробовані на міжнародних й всеукраїнських конгресах та конференціях.

За темою дисертації опубліковано загалом 50 наукових праць, з них 20 публікацій, що розкривають основний зміст дисертації: 18 наукових праць у вітчизняних та закордонних фахових виданнях (із них 4 одноосібних) та 2 патенти України. До науково-метричних баз Scopus та Web of Science, із вказаних 18 публікацій автора дисертації, входять 9 праць, ще 7 у фахових іноземних виданнях та виданнях України, 2 монографії (у видавництві Springer).

Також слід відмітити, що серед вказаних 18 публікацій 4 наукові праці опубліковані у виданнях, віднесених до квартиля Q2, та 1 публікація у виданні, віднесеному до квартиля 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», у сукупності із зазначеними вище публікаціями прирівнюються до 29 наукових публікацій, які розкривають основні наукові результати дисертації.

Внесок дисертанта у публікації, написані у співавторстві, є визначальним.

Робота пройшла апробацію на 23 міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях з публікацією їх матеріалів. Також автор наводить 7 публікацій в яких додатково і більш детально відображено зміст дисертаційної роботи.

4. Оцінка структури та змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Запорожця А.О. складається із вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (574 найменування) та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 539 сторінок, містить 156 рисунків, 50 таблиць та 11 додатків на 87 сторінках.

У вступі наведено загальну характеристику дисертаційної роботи. Обґрунтовано актуальність теми, на підставі чого сформульована мета й основні задачі дослідження, обрано об'єкт та предмет дослідження, висвітлено наукову новизну, практичну цінність та впровадження отриманих результатів досліджень. Подано відомості про публікації, особистий внесок в них з добувача та апробацію роботи.

Перший розділ присвячено детальному аналізу сучасного стану енергетичного балансу України та світу. На підставі ґрунтового аналізу літературних джерел в дисертації показано, що одними із головних споживачів енергетичних ресурсів є ТЕС, ТЕЦ, котельні, які, в процесі спалювання викопного палива, генерують значні об'єми забруднюючих речовин в навколишнє середовище, зокрема, в повітря. Автором показано, що наведений рівень викидів забруднюючих речовин в повітря від об'єктів енергетики зумовлений наявністю лише пиловловлювачів, як газоочисного обладнання на енергетичних підприємствах, що вже тривалий час не відповідають проектним показникам та сучасним екологічним вимогам. Власне це зумовило прийняття ряду нормативних та законодавчих документів, зокрема і Національного плану скорочення викидів від великих спалювальних установок, а отже, і зумовило необхідність модернізації їх, заміну застарілих пиловловлювачів на сучасні електрофільтри чи тканинні фільтри, створення систем очищення вихідних газів від NOx. На підставі проведеного аналізу автор обґрунтовано показав, що, враховуючи поточний стан енергетичного обладнання, актуальним є забезпечення контролю забруднення повітря від цих об'єктів.

Причому, на основі дослідження змісту актуальних нормативних актів та вітчизняних наукових публікацій, автором показано, що для кількісної оцінки забруднення повітря в Україні використовуються морально застарілі інформаційні показники, які не в повній мірі відповідають сучасним вимогам щодо швидкодії та доступності, зокрема, індекс забруднення атмосфери (ІЗА).

В роботі детально проаналізовано та візуалізовано відображено значний обсяг статистичних даних щодо викидів забруднюючих речовин (CO₂, SO₂, NO₂, CO, PM₁₀, PM_{2,5}, ПАВ, Zn, Pb, Cu, Cr, Ni, As) в повітря від стаціонарних джерел забруднення за період 1990-2018 рр. Також в розділі викладено детально проаналізовано параметри сучасних, так званих, low-cost сенсорів забруднюючих речовин, які доцільно застосовувати для створення систем контролю забруднення повітря.

Загалом, проведений в першому розділі аналіз методологічного та апаратного забезпечення систем контролю забруднення повітря дозволив автору коректно визначити ключові напрями їх розвитку та конкретно сформулювати науково-прикладну проблему досліджень дисертації та основні завдання для вирішення поставленої проблеми.

У другому розділі обґрунтовано і узагальнено сформовану автором методологію контролю забруднення повітря на базі просторово-розгалужених бездротових сенсорних мереж, що містить три напрями розвитку науково-практичних засад: теоретичний, методичний та апаратно-програмне забезпечення.

Розроблена структура системи контролю забруднення повітря в рамках концепції Smart Energy, що є елементом концепції Smart City, забезпечує надійність та безпеку функціонування об'єктів енергетики, сприяє зменшенню екологічного навантаження на повітря в межах міст чи агломерацій та покращенню самопочуття населення. Автором на основі обґрунтованих доказів доведено, що 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.

Проаналізована фізична коректність і необхідність постановки вимірювальних експериментів, виконання завдань і умов їх проведення і на основі аналізу дій для досягнення більш високих метрологічних характеристик доводиться необхідність, в першу чергу, удосконалення та розвитку моделей і мір.

Побудовано математичні моделі поля забруднення повітря у виді векторного випадкового поля, неоднорідного за просторовими аргументами, нестационарного в часі, та такого, що залежить від впливу різних факторів. Запропоновані математичні моделі інтенсивності інформаційних параметрів забруднення повітря (ІПЗП) в просторі і часі, чим забезпечується можливість виконувати дослідження із визначенням просторово-часових характеристик за умови проведення контролю у різних обмежених областях

простору на скінченних інтервалах часу. Аналогічно, автором у випадку дослідження просторово-часових сигналів з використанням випадкових моделей визначати, як правило, за допомогою статистичних оцінок характеристик сигнальних полів в рамках кореляційної (енергетичної) теорії. Важливою особливістю розробленої теорії є запропонована система тверджень визначення завдань використання ресурсів системи контролю забруднення повітря для вирішення проблем енергетичної інформатики (EI), основою якої є первинні дані.

Третій розділ направлений на розвиток методів статистичного опрацювання даних контролю системи забруднення повітря. При цьому автором запропонував оригінальний алгоритм кореляційного аналізу між складовими енергетичного балансу (X – типами енергетичних ресурсів, сектором перетворення та галузями-споживачами енергоресурсів) та викидами забруднюючих речовин (Y – CO_2 , SO_2 , NO_2 , CO , PM_{10} , $PM_{2,5}$) на прикладі України.

Для реалізації статистичного оцінювання за умов відносно малих розмірів вибірок, автором запропоновано як інформативний параметр кореляційного аналізу використати скориговану оцінку коефіцієнта кореляції. Виконані автором розрахунки свідчать, 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 ($\hat{r}' > 0,95$).

Детальний аналіз автором особливостей застосування регресійного та дисперсійного аналізу, та запропоновані алгоритми опрацювання даних контролю забруднення повітря, що реалізуються з використанням відомих критеріїв Фішера, Ектона, та інших дозволив автору довести можливість значного спрощення процесу 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.

Автором також розроблено 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. Слід відмітити, що даний метод був верифікований шляхом порівняння наборів даних між ПС №7 і №20, та №3 і №5 Центральної геофізичної обсерваторії ім. Б. Срезневського (ЦГО), оскільки вони мали схожий набір параметрів вимірювання та були активовані в один і той період часу. На основі експериментальної верифікації запропонованого методу автором в роботі чітко доведено, що рівень коректного функціонування вибраних ПС системи контролю забруднення повітря за розглянуті періоди часу складає від 56,6% до 76,3%.

Окремо слід відмітити, як позитивне досягнення досліджень автора, запропонований ним метод прогнозування об'ємної концентрації кисню в повітрі, що базується на використанні математичної моделі залежності концентрації кисню в повітрі від метеорологічних параметрів (температури, відносної вологості, абсолютного тиску). Для вирішення завдання прогнозування об'ємної концентрації кисню автор визначає вид та коефіцієнти математичної апроксимації. В роботі автор доводить доцільність вибору дискретного перетворення Фур'є для апроксимації даних зумовлений їх квазіперіодичним характером та можливістю пошуку функціональної залежності з коефіцієнтом детермінації близьким до 1 і наводить розроблену ним модель апроксимації у вигляді виразу оберненому перетворенню Фур'є.

У четвертому розділі наведено методичні особливості локалізації джерел забруднення на базі просторово-розгалуженої бездротової сенсорної мережі.

Це виконано за допомогою дослідження складу забруднюючих речовин, що утворюється в процесі спалювання різних видів палива, та особливості їх поширення під дією різних метеорологічних факторів. Ці дослідження дозволили автору обґрунтувати

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

Виконані аналітичні виведення та розрахунки дозволили довести автору, що функції щільності розподілу швидкості та напрямку вітру згідно ізотропної та анізотропної Гаусових моделей дозволяють визначити переважний напрям поширення забруднювачів. А знаючи цей напрямок, автор резонно стверджує, що можна локалізувати зону, де розміщено джерело забруднення атмосфери і тим самим отримати результат розв'язання оберненої задачі. Наведені результати доповнюють зазначену методику, використовуючи ймовірнісний підхід опрацювання даних контролю.

Результати ґрунтовних розрахунків дозволили автору розробити оптимізаційні математичні моделі для вирішення оберненої задачі екологічних досліджень, а саме локалізації джерела забруднення та визначення концентрації викидів забруднюючих речовин. Поставлені задачі чисельно змодельовані у прикладному програмному пакеті MATLAB 2019b, що дозволило отримати детальне графічне представлення даних, отриманих сенсором для різних умов контролю.

Дуже цікавим для практичного застосування є розроблена автором модифікація класичного методу Ньютона для знаходження чисельного розв'язку побудованих математичних моделей визначення параметрів джерела забруднення повітря, що дозволило підвищити швидкодію класичного методу Ньютона. Запропонована автором модель, що є окремим випадком і вирішує обернену задачу екологічних досліджень з використанням 1 джерела забруднення та 1 ПС. Перевагами запропонованого автором 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, який безпосередньо використовується для отримання чисельних розв'язків на кожній ітерації.

П'ятий розділ дисертації присвячено розробці апаратно-програмної реалізації системи контролю забруднення повітря на базі бездротової сенсорної мережі.

Запропоновані методи та система оброблення сигналу дозволили автору дисертації розробити свою структуру вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря, що базується на використанні low-cost сенсорів. На фото наведених в роботі відображено власне вимірювальний модуль системи контролю забруднення повітря та окремо наведені технічні характеристики вимірювального модулю системи контролю забруднення повітря. Також автором розроблена і переставлена структура програмного пакету системи контролю забруднення повітря, що базується на використанні 4-х блоків: 1) блоку взаємодії з апаратним забезпеченням; 2) блоку керування; 3) блоку візуалізації інформації; 4) блоку статистичного опрацювання даних.

Безумовною практичною цінністю роботи є запропоновані автором науково-практичні аспекти визначення технічної справності сенсорів вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря, що базується на використанні статистичних характеристик вибірок даних (коефіцієнта детермінації R^2 , розмаху R та коефіцієнта варіації C_v). 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.

В п'ятому розділі викладено запропоновані автором використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) гелікоптерного типу як платформ для вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря. Автор доводить, що модульна структура БПЛА дозволяє швидко і порівняно недорого замінювати пошкоджені елементи, а наявність спеціального підвісу також дозволяє швидко змінювати контрольно-вимірювальну апаратуру, що адаптує БПЛА для дослідження різних забруднюючих речовин. На основі даних аеродинамічних досліджень показано, що зона під 'квадрокоптером

характеризується відсутністю чи відносно слабкими повітряними потоками, що робить можливим розташування там вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря.

Виконані автором дисертаційної роботи дослідження показали, використання БПЛА, як платформи для мобільного контролю забруднення повітря, дозволяє сформувати поля концентрації забруднюючих речовин на різних висотах. При ним слушно пропонується використання air quality index (AQI) як інформативного параметру контролю.

Шостий розділ є найбільш об'ємним розділом дисертаційної роботи. У цьому розділі розглянуто результати експериментальних досліджень розробленої системи контролю забруднення повітря.

Детально наведено результати та аналіз проведених експериментальних досліджень стану забруднення повітря в м. Києві з використанням існуючої системи контролю забруднення повітря. На основі отриманих даних зафіксовано рівні забруднення для кожної з досліджуваних речовин (SO_2 , CO , NO_2 , NO , HF , HCl , CH_2O , NH_3 , завислі речовини) на відповідних ПС за період досліджень. Встановлено факти багаторазового перевищення гранично-допустимих концентрацій відповідних речовин в повітрі м. Києві. Також наведено результати експериментальних досліджень розроблених вимірювальних модулів системи контролю забруднення повітря. Отримані дані загалом характеризуються достатньо високим значенням коефіцієнта кореляції r ($\geq 0,93$) та коефіцієнтом детермінації R^2 ($\geq 0,87$), що свідчить про якість проведення експериментів. В ході експерименту виконано оцінку 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.

Виконані автором експериментальні дослідження доводять, 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. Автором експериментально встановлено, що значення коефіцієнта варіації C_v більше ніж 300% інформує про несправність сенсора (такий сенсор потребує заміни /очищення). Знаходження значення коефіцієнта варіації в межах від 200% до 300% потребує підвищеної уваги оператора системи контролю до цього сенсора. Для побудови лінійних градувальних характеристик сенсорів мілкодисперсного пилу проведено регресійний аналіз даних між сенсорами PMS 5003 та PMS 7003, і ВАР-пристроєм.

На мою думку, автором експериментально доведено перспективність напрямів розвитку систем контролю забруднення повітря, що базуються на використанні методів дистанційного зондування Землі та спектрального аналізу та 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.

Завершують дисертаційну роботу висновки, список літературних джерел та додатки. Додаток містить зібрані автором дані про значення викидів забруднюючих речовин, методи оцінювання їх рівнів, технічні характеристики засобів та систем контролю, результати кореляційного аналізу виконаного автором в роботі, схеми розробленої системи контролю та результати регресійного аналізу експериментальних даних, а також копії завірених актів, що підтверджують впровадження за результатами виконання наукових досліджень.

5. Наукова новизна дисертаційної роботи

До найбільш суттєвих наукових результатів дисертаційної роботи слід віднести:

- 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.

- 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 швидкість 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.

- 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.

- 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 степеневий відстані), що дає змогу кількісно оцінити параметри функціонування системи контролю та сформулювати профілі ретроспективних даних для вибраних об'єктів.

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

- 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 Cv) як динамічних характеристик, що дозволяє встановити ступінь варіативності результатів контролю та підвищити достовірність контролю за рахунок завчасного виявлення технічно несправних сенсорів.

- 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.

6. Практична цінність дисертаційної роботи

Практична цінність дисертаційної роботи Запорожця А.О. полягає в реалізації запропонованої ним системи контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що дозволило комплексно оцінити вплив енергоємних підприємств на екологічний стан навколишнього середовища, створення і доведення до практичного застосування за безпосередньої участі автора наступних патентозахищених інформаційно-вимірювальних систем контролю та діагностування стану доквілля:

- алгоритми, схеми, методи та програмне забезпечення багаторівневої системи моніторингу енергетичного обладнання впроваджено в ДП «Завод «Електроважмаш»» (м. Харків, 2018 р.), ТОВ «Укрекоконсалт» (м. Київ, 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, 2019 р.), ТОВ «Передові мембранні технології» (м. Київ, 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, 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, 2019-2020 р.) та кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет» (2021 р.)

Також цінним з кута зору практичного застосування результатів дисертаційних досліджень та розробок автора роботи є практичне розроблення ним:

- вимірювальних модулів, що базуються на використанні low-cost сенсорів метеорологічних параметрів (температури, відносної вологості, абсолютного тиску) та забруднюючих речовин (мілкодисперсний пил (PM1, PM2,5, PM10), CO, CO2, NO2, SO2, CH2O, NH3 та ін.), що дозволило реалізувати просторово-розгалужену бездротову сенсорну мережу для контролю забруднення повітря об'єктами енергетики.

- інформативних критеріїв для оцінювання справності сенсорів системи контролю, що дає 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.

- розроблення програмного забезпечення системи контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що дозволило 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.

Проведені експериментальні дослідження статистичних характеристик сенсорів вимірювальних модулів дозволяють обґрунтувати їх практичне використання для системи контролю забруднення повітря.

Позитивні результати застосування вказаних практичних розробок завірені копіями актів впровадження, які наведені в додатку дисертаційної роботи Запорожця А.О.

7. Зауваження по дисертаційній роботі

1. На рисунках 1.3, 1.4, 1.7, 1.8 із-за невдалого, на мою думку, вибору однакових кольорів важко визначити усі складники рисунку, що відповідають в на цих рисунках легенді.

2. На стор. 170 роботи доцільно б було більш детально дати пояснення змісту структурної функції і чому вона є доцільна для використання в роботі.

3. Автором на ст. 184 роботи стверджується, що «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». Доцільно пояснити, що мається на увазі під певним математичним апаратом та математичною статистикою?

4. Доцільно пояснити, як практично можна задати чи визначити M5 - міру захисту інформації конкретного процесу контролю (вказану на ст.185 роботи).

5. На мою думку вимагає більш точного пояснення чим термін діапазон невизначеності результату вимірювання з теорії невизначеності вимірювань відрізняється від введеного автором терміну ймовірнісна нормована міра.

6. Доцільно пояснити твердження автора на ст.194 – «реалізація стаціонарного білого шуму», оскільки якщо шум нестаціонарний, то він вже не може бути білим шумом. Також, що автор розуміє під поняттям «стаціонарна компонента шумового сигналу»?

7. На стор.195 роботи сказано, що «Далі інформаційний сигнал через інтерфейсний канал передачі даних надходить до цифрової підсистеми обробки інформаційних сигналів, де формується стаціонарна компонента досліджуваного шумового сигналу ... шляхом використання відомого способу емпіричної модованої декомпозиції з метою вилучення з первинного часового ряду ... періодичних і трендових компонент, які обумовлюють нестаціонарність первинного шумового сигналу». Виникає питання чи «спосіб емпіричної модованої декомпозиції» є емпірична мода декомпозиція методу Гільберта-Хуанга і яким чином «періодичні і трендові компоненти обумовлюють нестаціонарність первинного шумового сигналу» - може навпаки?

8. В дисертаційній роботі є дуже незначна кількість стилістичних помилок та помилок перекладу на які вказано дисертанту (наприклад, «Це являється основою...», «Функція може не володіти...», «в якості»).

Зроблені зауваження не стосуються основних положень дисертації, мають частковий характер та суттєво не впливають на позитивну оцінку роботи.

8. Висновок по дисертаційній роботі в цілому

Дисертація Запорожця А.О. "Науково-практичні засади створення засобів та методів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики" є завершеною науковою працею, її написано технічно грамотною українською мовою, вона добре ілюстрована та оформлена відповідно до вимог Державного стандарту України та вимог Міністерства освіти і науки України. Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані у докторській дисертації є новими, мають загальнонаціональне та в частині світове значення.

Зміст дисертаційної роботи цілком відповідає спеціальності 05.11.13 – прилади та методи контролю та визначення складу речовин, за якою вона подана до захисту.

Автореферат дисертації адекватно відображає основний зміст, положення, висновки, рекомендації дисертаційної роботи та відповідає вимогам, що встановлено Міністерством освіти і науки України до авторефератів.

Результати наукових досліджень, за якими здобувач захистив кандидатську дисертацію за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти, не виносяться на захист рецензованої дисертації на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук.

Дисертаційна робота Запорожця А.О. є науковою працею, в якій отримані нові науково обгрунтовані теоретичні і експериментальні результати, що в сукупності вирішують важливу наукову проблему контролю забруднення повітря об'єктами енергетики, що забезпечує локалізацію джерел забруднення повітря на базі просторово розгалужених бездротових сенсорних мереж. В дисертаційній роботі викладено результати власних досліджень автора, в роботі відсутні академічний плагіат, фабрикації, фальсифікації.

Вважаю, що дисертаційна робота "Науково-практичні засади створення засобів та методів контролю забруднення повітря об'єктами енергетики" за актуальністю, науковим рівнем розробок та їх практичним втіленням, необхідною кількістю публікацій та апробацій повністю відповідає вимогам МОН України щодо докторських дисертацій і зокрема відповідає вимогам п. 7 та 9 «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 присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 - прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Офіційний опонент
завідувач кафедри енергетичного менеджменту
і технічної діагностики
Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу
Міністерства освіти і науки України,
доктор технічних наук, професор

Петро РАЙТЕР

Підпису	<i>Петра Райтера</i>
посвідчую	<i>В. В. [Signature]</i>
Учений секретар ІФНТУНГ	
к. р.	20 р.

