

Голові спеціалізованої вченої ради  
ДФ 58.082.108  
Західноукраїнського національного  
університету  
доктору технічних наук, професору  
Диваку Миколі Петровичу

## **РЕЦЕНЗІЯ**

доктора технічних наук, професора, професора кафедри кібербезпеки  
Західноукраїнського національного університету

**Пасічника Романа Мирославовича**

на дисертаційну роботу Тимчишина Богдана Степановича на тему  
«Інтелектуалізована програмна система для проактивного управління  
екосистемою міста», подану на здобуття ступеня доктора філософії за  
спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення»

### **1. Актуальність теми дисертаційного дослідження.**

В умовах стрімкої урбанізації та техногенного навантаження на довкілля, питання забезпечення екологічної безпеки міст набуває критичного значення. Традиційні підходи до моніторингу, що базуються на реактивній моделі управління, вже не здатні ефективно вирішувати проблеми в умовах щільної забудови та нелінійності атмосферних процесів. Сучасні виклики вимагають переходу до проактивного управління, що базується на сценарному моделюванні та прогнозуванні.

Дисертаційна робота Тимчишина Б.С. присвячена розв'язанню актуального науково-прикладного завдання – підвищення ефективності управління екосистемою урбанізованих територій шляхом розробки інтелектуалізованої програмної системи. Актуальність роботи підсилюється необхідністю інтеграції різнорідних даних, метеорологічних, геопросторових, технологічних, та складних математичних моделей прогнозування поширення забруднення атмосфери

єдиний контур управління, що є складною задачею інженерії програмного забезпечення.

## **2. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі**

Дисертаційна робота є завершеною науково-дослідною роботою, яка складається з анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Логічна структура роботи визначається її метою та сформульованими науково-практичними завданнями.

Вступ містить обґрунтування актуальності обраної теми, формулювання мети та основних завдань дослідження. Надано узагальнену характеристику наукової новизни та практичної цінності досягнутих результатів. Також висвітлено апробацію ключових положень роботи, перелік публікацій за матеріалами дисертації та детально визначено особистий внесок автора у колективні наукові роботи.

У першому розділі виконано детальний огляд сучасних програмних рішень (зокрема AERMOD View та BREEZE) і специфіки моніторингу атмосферних викидів. Дослідження виявило суттєву невідповідність між вимогами до проактивного екологічного менеджменту та обмеженнями наявного монолітного програмного забезпечення. Здійснено порівняльний аналіз математичних моделей розсіювання домішок від точкових джерел, за результатами чого обчислювальним ядром системи обрано модель AERMOD. Доведено доцільність розробки інтелектуалізованої системи на основі семантичних моделей для сценаріїв оптимізації розміщення об'єктів теплогенерації.

Другий розділ присвячено переходу до моделей, керованих знаннями, що зумовлено складністю інтеграції різнорідних даних у класичних підходах. Розроблено гібридну архітектуру, де доменна онтологія UESO пов'язує геопросторові та файлові масиви. Виконано формалізацію ієрархії класів (із залученням стандартів SWEET та GeoSPARQL). Описано моделі оцінювальних та оптимізаційних сценаріїв, де останні інтерпретовано як задачі комбінаторної оптимізації.

У третьому розділі представлено математичне забезпечення системи. Задачу розміщення джерел техногенного навантаження (зокрема когенераційних установок) формалізовано як задачу дискретної комбінаторної оптимізації. Цільова функція мінімізує ризики перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) на основі прогнозних значень концентрації шкідливих викидів точках рецепторах, які отримують за допомогою обчислювального модуля AERMOD. У фреймворку DEAR, обчислювальної платформи для швидкого прототипування та тестування еволюційних алгоритмів на Python, адаптовано еволюційні алгоритми для задачі дискретної оптимізації на основі уніфікованих операторів. Запропоновано метод адаптивного вибору стратегії, що автоматично підбирає алгоритм залежно від складності завдання. На прикладі м. Тернопіль підтверджено ефективність підходу для децентралізації систем тепlopостачання.

Четвертий розділ описує технічну реалізацію та впровадження системи. Обґрунтовано вибір мікросервісного підходу та сервіс-орієнтованої архітектури як найбільш адаптивної для задач сценарного аналізу. Ключовою особливістю розробленої архітектури є впровадження спеціалізованих сервісів-обгортки. Ці компоненти забезпечують безшовну інтеграцію розрахункового ядра AERMOD (яке є консольним додатком) з іншими модулями системи, перетворюючи «сирі» дані у стандартизовані API-відповіді. Це дозволяє динамічно керувати параметрами моделювання та автоматизувати передачу результатів до аналітичного блоку.

Описано реалізацію підсистеми збереження даних, що базується на гібридному підході. Для забезпечення високої швидкості доступу та цілісності інформації поєднано: реляційні бази даних (для структурованих параметрів джерел викидів та результатів розрахунків); графові сховища (для підтримки розробленої онтології UESO та семантичних зв'язків); файлові сховища (для збереження великомасштабних сіток розсіювання та метеорологічних даних). Розроблена схема бази даних оптимізована для швидкої вибірки геопросторових об'єктів та підтримки сценаріїв.

Деталізовано процес контейнеризації компонентів системи за допомогою Docker та їх оркестрацію в середовищі Kubernetes. Таке рішення забезпечує

автоматичне створення додаткових екземплярів розрахункових сервісів при пікових навантаженнях, автоматичне відновлення сервісів у разі збоїв, що критично важливо для тривалих обчислювальних процесів оптимізації.

Описано принципи побудови клієнтської частини системи. Реалізовано інтерактивну карту (на основі сучасних ГІС-бібліотек), що дозволяє користувачу в реальному часі змінювати розташування об'єктів теплогенерації та отримувати візуалізацію полів концентрації забруднюючих речовин. Інтерфейс підтримує управління параметрами алгоритмів та відображення прогресу оптимізації.

Наведено результати комплексного навантажувального тестування системи. Експериментально підтверджено, що впровадження розробленої архітектури та методів адаптивного вибору стратегій дозволило досягти суттєвого скорочення часу виконання оптимізаційних процедур (порівняно з послідовним запуском традиційного ПЗ), високої стабільності роботи системи при одночасній обробці кількох сценаріїв розміщення об'єктів когенерації, ефективного використання обчислювальних ресурсів хмарного середовища.

Висновки по роботі висвітлюють отримані результати та за своїм рівнем відповідають вимогам, які висуваються до дисертаційних робіт.

Додатки до роботи є змістовними, підтверджують та відображають результати роботи та містять довідки і акти про впровадження та використання результатів дисертаційного дослідження.

Структурна побудова дисертації є логічною та послідовно відображає етапи вирішення сформульованих наукових завдань. Представлені наукові результати є достатньо обґрунтованими, оскільки базуються на комплексному застосуванні сучасних методів системного аналізу, онтологічного моделювання та комбінаторної оптимізації. Достовірність положень і висновків підтверджено коректністю використаних математичних моделей, зокрема використанням модуля AERMOD, результатами обчислювальних експериментів, а також практичним впровадженням розробленої програмної системи.

Аналіз роботи дозволяє стверджувати, що мета дослідження досягнута в повному обсязі, а сама дисертація відповідає всім критеріям завершеної наукової кваліфікаційної праці.

### **3. Наукова новизна дисертаційної роботи**

Основні наукові положення, результати та висновки дисертації отримані здобувачем самостійно, є новими, достатньо обґрунтованими та підтверджуються результатами комп'ютерних експериментів.

Результати дисертаційної роботи, що претендують на наукову новизну:

вперше:

- розроблено доменну онтологічну модель для інформаційного забезпечення процесів екологічного моделювання, яка, на відміну від традиційних файлових або реляційних структур, забезпечує семантичну інтеграцію гетерогенних даних міської екосистеми, що дозволило підвищити ефективність та достовірність прийняття рішень усунувши семантичні колізії та мінімізувавши вплив людського фактору при підготовці сценаріїв моделювання;

- запропоновано адаптивний метод оптимізації розміщення джерел техногенного навантаження, який, на відміну від існуючих, базується на уніфікації програмної реалізації еволюційних операторів для різних метаевристик та здійснює керований онтологією вибір стратегії пошуку, що дозволило скоротити час пошуку рішення до прийнятних для оперативної роботи меж в умовах високої обчислювальної складності оцінки цільової функції;

- запропоновано архітектуру інтелектуалізованої системи проактивного управління екосистемою міста із застосуванням сервіс-орієнтованого підходу для оркестрації обчислювального ядра регуляторної моделі AERMOD, яка, на відміну від існуючих монолітних програмних комплексів, забезпечує повну інкапсуляцію обчислювальної логіки, слабку зв'язність компонентів та надає стандартизований програмний інтерфейс для доступу до функціоналу інтелектуалізованої системи, що забезпечує високу пропускну здатність для виконання обчислювальних процедур адаптивної оптимізації та сценарного моделювання;

набула подальшого розвитку:

- математична модель вибору локацій джерел теплогенерації, яка, на відміну від існуючих на основі геометричних обмежень у вигляді фіксованих санітарно-захисних зон, базується на формалізації задачі як дискретної комбінаторної оптимізації з цільовою функцією, що задана алгоритмічно на основі чисельної моделі розсіювання, що дозволило здійснити пошук оптимальних рішень за критерієм мінімізації індексу забруднення у точках-рецепторах з урахуванням міської забудови.

#### **4. Дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових результатів в опублікованих працях.**

Дисертаційну роботу викладено на 205 сторінках, при цьому обсяг основного тексту становить 170 сторінок. Ілюстративний матеріал представлено 56 рисунками та 13 таблицями, що забезпечує наочність отриманих результатів. Список використаних джерел налічує 128 найменувань. Додаткові матеріали, що підтверджують результати досліджень, винесено у 3 додатки.

Робота виконана державною мовою з дотриманням норм наукового стилю. Виклад матеріалу характеризується логічною послідовністю, чіткістю формулювань та коректним використанням професійної термінології галузі інформаційних технологій. Структура рукопису та стиль подання наукових положень, висновків і рекомендацій сприяють їх однозначному сприйняттю. Оформлення дисертації повністю відповідає вимогам нормативних документів МОН України.

Результати перевірки на наявність академічного плагіату засвідчують високий рівень оригінальності дослідження. У тексті дисертації відсутні некоректні запозичення; всі використані ідеї та розробки інших науковців супроводжуються належними посиланнями на першоджерела, що підтверджує дотримання принципів академічної доброчесності.

Повноту викладу матеріалів дисертації підтверджено публікацією 7 наукових праць. Здобувачем опубліковано 3 статті у наукових фахових виданнях та 4 праці у матеріалах міжнародних конференцій. Вагомим показником рівня досліджень є те, що 3 публікації індексуються у наукометричній базі Scopus.

## **5. Практичне значення результатів дисертаційної роботи**

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у створенні цілісного комплексу архітектурних рішень та дієвого прототипу інтелектуалізованої системи підтримки прийняття рішень (СППР). Розроблений інструментарій надає фахівцям муніципальних служб науково обґрунтовану базу для ефективного управління міською екосистемою та гарантування екологічної безпеки населення.

Запропоноване математичне та програмне забезпечення дозволяє автоматизувати вирішення ключових прикладних завдань: оптимізації міської інфраструктури, де завдяки методу адаптивної оптимізації забезпечується вибір раціональних локацій для об'єктів теплоенергетики (котелень, когенераційних установок), що мінімізує техногенне навантаження на рекреаційні та житлові зони. Система дозволяє оперативно прогнозувати екологічні наслідки модернізації або реструктуризації мереж теплопостачання, оцінюючи різні варіанти розвитку подій у режимі прийняттного часу.

Візуалізація та підтримка рішень на основі системи дозволяє підвищити якість містобудівного планування за рахунок трансформації складних розрахункових даних у наочну аналітичну інформацію, що легко інтерпретується управлінцями. Результати дослідження формують верифіковану базу даних, необхідну для розробки перспективних схем теплопостачання та проходження процедур оцінки впливу на довкілля.

Достовірність запропонованих підходів підтверджується успішною апробацією прототипу системи на реальних об'єктах енергетичної інфраструктури м. Тернопіль. Практична придатність та ефективність впроваджених рішень засвідчені відповідним актом впровадження, що підтверджує готовність системи до експлуатації в умовах реального муніципального управління.

## **6. Зауваження до дисертації**

Поряд із якісним виконанням дисертаційного дослідження, варто звернути увагу на окремі дискусійні питання присутні в роботі:

1. У другому розділі при описі онтології не достатньо чітко описано механізм оновлення онтологічної моделі при зміні структури вхідних даних або нормативної

бази. Чи потребує цей процес втручання розробника, чи система має механізми автоматичного розширення бази знань?

2. В третьому розділі автор пропонує метод адаптивного вибору стратегії оптимізації на основі складності задачі. Однак, порогові значення для перемикання між методами оптимізації визначені емпіричним шляхом для конкретної апаратної та програмної конфігурації. Було б корисно навести загальні рекомендації щодо налаштування цих порогів для інших обчислювальних середовищ.

3. В третьому розділі зазначається, що пошук рішення задачі розміщення об'єктів здійснюється на заздалегідь відфільтрованій множині допустимих локацій. Водночас у тексті дисертації недостатньо чітко розкрито та математично формалізовано критерії і механізми врахування фізичних (доступність земельної ділянки, наявність інженерних мереж, охоронних зон) та економічних (вартість підключення комунікацій) обмежень, на основі яких формується цей початковий простір пошуку до моменту застосування метаевристичних алгоритмів.

Зроблені зауваження не зменшують загальну позитивну оцінку дисертаційного дослідження, а лише вказують на складність досліджуваної проблематики та можуть слугувати орієнтиром подальшої наукової роботи.

## **7. Висновки**

Представлена дисертаційна робота «Інтелектуалізована програмна система для проактивного управління екосистемою міста» має обґрунтовану актуальність, містить завершені наукові дослідження, результати яких мають наукову новизну та практичну значимість. У роботі розв'язано актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності проактивного управління екологічною безпекою урбанізованих територій шляхом розробки архітектури, семантичних моделей та методів адаптивної оптимізації розміщення джерел техногенного навантаження в межах інтелектуалізованої програмної системи. Отримані результати відіграють важливу роль для розвитку галузі знань 12 Інформаційні технології та спеціальності 121 Інженерія програмного забезпечення.

Отже, з огляду на актуальність теми дисертації, сформовану наукову новизну, практичне значення одержаних результатів, повноту викладу у наукових працях та відсутність порушень академічної доброчесності вважаємо, що дисертаційна робота відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій», Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44), а її автор Тимчишин Богдан Степанович, заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення.

Рецензент:

професор кафедри кібербезпеки  
Західноукраїнського національного університету,  
доктор технічних наук, професор



Роман ПАСІЧНИКА

|                                 |                 |
|---------------------------------|-----------------|
| Підпис                          | Пасічника       |
| Завіряю:                        |                 |
| НАЧАЛЬНИК<br>ЗАГАЛЬНОГО ВІДДІЛУ | Анна Сешек (СШ) |