ВІДГУК
офіційного опонента
на дисертаційну роботу Голінка Ігоря Михайловича
"Математичні моделі та оптимізація систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури",
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи

1. Актуальність теми дисертаційного дослідження

1.1. Зростаюча роль об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ), зокрема, захищених центрів прийняття рішень, обробки і зберігання важливих даних, енергетичних систем тощо, у забезпеченні життєдіяльності суспільства зумовлює необхідність підвищення їх надійності, живучості та здатності до адаптації в умовах змін зовнішнього середовища. Надійне функціонування ОКІ є одним із пріоритетних напрямів національної безпеки більшості країн світу. Для України це питання набуває особливої актуальності у зв'язку з дією правового режиму воєнного стану та суттєвим зростанням ризиків фізичного руйнування, втрати енергоспоживання, кібернетичних та інших впливів.

Однією з важливих умов стабільної роботи ОКІ є підтримання оптимальних параметрів штучного мікроклімату в технічних і громадських приміщеннях. Від параметрів штучного мікроклімату на ОКІ значною мірою залежить працездатність високочутливого електронного обладнання, на яке суттєво впливають його перегрів, конденсація вологи, що міститься у повітрі, нестабільність температурних режимів, а також ефективність роботи персоналу. У цьому контексті системи кондиціювання повітря (СКП) є критично важливими для забезпечення кібер- та фізичної безпеки та сталого використання ОКІ.

1.2. Традиційні СКП, що базуються на використанні локальних алгоритмів регулювання, не здатні реалізувати весь комплекс вимог до забезпечення штучного мікроклімату ОКІ, які пов'язані з можливістю врахування технічних, інформаційних, соціальних та енергетичних аспектів управління мікрокліматом. Це створює потребу в розробленні інформаційних систем підтримки прийняття рішень (ІСППР) та їх математичного забезпечення, які здатні забезпечити стійке та оптимізоване управління параметрами мікроклімату в реальному часі.

Особливу значущість дослідження набуває в контексті нормативного визначення в Україні чотирьох рівнів управління ОКІ: загальнодержавний, галузевий, місцевий та об'єктовий. Проте ці рівні мають обмежене використання цифрових інструментів, що негативно впливає на оперативність і ефективність управлінських рішень, що актуалізує розроблення та впровадження ІСППР для управління штучним мікрокліматом ОКІ.

1.3. Таким чином, тема дисертації Голінка І.М., яка присвячена вирішенню важливої науково-прикладної проблеми створення комплексного

математичного апарату, що орієнтований на розроблення ІСППР, яка забезпечувала б ефективність функціонування, стійкість (живучість), безпеку ОКІ в умовах цифрової трансформації та зростаючих загроз, є безумовно актуальною.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами та темами

Дослідження за дисертаційною роботою виконувались згідно із планами наукових досліджень Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та МОН України.

Основні наукові результати отримано в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт: «Підвищення ефективності та надійності функціонування устаткування ТЕС та малої енергетики в змінних режимах експлуатації» (номер державної реєстрації 0112U001751); «Розробка засобів із продовження надійної та економічної експлуатації енергогенеруючих об'єктів у маневрених режимах» (номер державної реєстрації 0114U000564); «Управління енергоспоживанням об'єктів комунальної енергетики» (номер державної реєстрації 0117U000469); «Побудова інформаційно-аналітичної платформи для супроводження функціонування кіберфізичних систем» (номер державної реєстрації 0120U102298).

3. Структура, зміст дисертаційної роботи та відповідність встановленим вимогам

3.1. Дисертаційна робота складається з вступу, сімох розділів основного тексту, висновків, списку використаних джерел (309 найменувань) та додатків. Обсяг основного тексту роботи становить 321 сторінку, додатків – 39 сторінок. У роботі представлено 100 рисунків і 16 таблиць, що ілюструють теоретичні положення, результати моделювання та експериментальні дослідження. Оформлення дисертації відповідає чинним вимогам щодо структури та змісту.

У *вступі* обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів, наведено відомості про зв'язок роботи з науковими темами та інформацію щодо публікацій автора і апробацію результатів дослідження на наукових конференціях.

Перший розділ присвячено аналізу наукових джерел, що стосуються тематики дослідження, зокрема, розглянуто класифікацію ОКІ, обґрунтовано доцільність використання штучного мікроклімату як одного з базових чинників забезпечення стабільного функціонування ОКІ. Розглянуто нормативні документи, які регламентують вимоги до параметрів мікроклімату на об'єктах КІ. Проведено аналіз існуючих моделей кліматичного обладнання та методів управління СКП. Встановлено, що наявні наукові підходи не забезпечують достатню ефективність комплексного управління штучним мікрокліматом ОКІ, що обумовлює необхідність подальших досліджень.

У *другому розділі* запропоновано методологічні засади (концепція, принципи та комплекс взаємопов'язаних моделей, методів і програмних засобів) моделювання та оптимізації систем штучного мікроклімату ОКІ, що базуються на системному підході до управління мікрокліматом, що охоплює: аналіз процесу підготовки повітря на обладнанні кондиціонера; побудову багатовимірної математичної моделі кондиціонера для наявного процесу кондиціонування повітря; розробку ІСППР для системної інтеграції кондиціонера у кіберфізичну систему КІ.

Проведено аналіз технологічного процесу кондиціювання повітря як складної технічної системи з високим ступенем структурної варіативності. Запропоновано нову концепцію управління процесом кондиціювання повітря, яка передбачає розв'язання задач управління в координатах температури та вологовмісту повітря. Етапи реалізації сформованої методології та системного підходу послідовно розглядаються у наступних розділах дисертації.

У *третьому розділі* здійснено розробку аналітичних моделей кліматичного обладнання СКП. Отримано низку динамічних моделей, що охоплюють основні компоненти СКП, зокрема, динамічні моделі теплообмінних апаратів (електрокалорифера, водяного калорифера, водяного охолоджувача), камер зволоження (форсуночного зволоження, парового зволоження), камери змішування повітря, приміщення. Запропоновані моделі враховують зміну вологовмісту повітря шляхом включення диференційного рівняння, що дозволяє описувати динаміку масообмінних процесів. Це вирізняє моделі розділу від існуючих моделей-аналогів, у яких процеси масообміну ігноруються. Всі моделі подано у двох формах – стандартному вигляді простору станів та у вигляді матричних передатних функцій.

Четвертий розділ присвячено аналізу концептуальної невизначеності аналітичних моделей кліматичного обладнання та розробленню комплексних моделей СКП, для чого класифіковано параметри моделей кліматичного обладнання. Встановлено, що числові значення коефіцієнтів тепло- та масовіддачі залежні від чинників різної природи, що зумовлює наявність концептуальної невизначеності.

Для уточнення невизначених параметрів у моделях запропоновано алгоритм пасивної ідентифікації, який реалізується з використанням технології цифрових двійників. Такий підхід дає змогу коригувати параметри моделей без необхідності втручання у роботу реального обладнання СКП. Ефективність алгоритму підтверджено результатами імітаційного моделювання. Для побудови комплексної моделі СКП у розділі запропоновано методику агрегування моделей кліматичного обладнання. На основі цієї методики побудовано чотири комплексні моделі, що відповідають найбільш поширеним технологічним схемам кондиціювання повітря.

У *п'ятому розділі* запропоновано ІСППР для управління мікрокліматом ОКІ. Розроблена ІСППР базується на системному підході, що представлений у третьому розділі та поєднує принципи ієрархічного управління, багатокритеріальну оптимізацію, параметричну ідентифікацію та адаптацію моделей кліматичного обладнання до зміни зовнішніх умов. Запропоновано

трирівневу архітектуру ІСППР: нижній рівень містить граничні пристрої локального керування СКП, які забезпечують збір технологічних даних для середнього рівня ІСППР; середній – реалізується хмарними сервісами цифрових двійників, які містять бази даних, інструменти параметричної ідентифікації та адаптації моделей кліматичного обладнання для наявних СКП; верхній – виконує функції підтримки прийняття рішень і координації підсистем з метою досягнення цільових показників мікроклімату кіберфізичних ОКІ.

Шостий розділ присвячено розробленню методів оптимізації одноконтурних систем керування, що функціонують на основі спрощених моделей об'єкта керування. Запропоновані методи оптимізації орієнтовані на практичну імплементацію та характеризуються універсальністю, що забезпечує їх застосування для маловитратної модернізації локальних систем керування кондиціонерами на нижньому рівні ІСППР.

Сьомий розділ аналізує впроваджені системи керування, які реалізовано на основі запропонованої методології та розробленого математичного забезпечення. Реалізовані рішення охоплюють: систему керування кондиціонером AERMEC NTC 22; навчально-тренажерного комплекс, що моделює функціонування СКП; системи керування інженерним обладнанням багатоповерхових будівель. Зазначені приклади впровадження є підтвердженням працездатності та ефективності розробленого системного та математичного забезпечення.

У *висновках* сформульовано основні результати дисертаційного дослідження, які дозволяють оцінити внесок здобувача в подальший розвиток методів і моделей оптимального управління штучним мікрокліматом об'єктів критичної інфраструктури. Матеріали *додатків* включають допоміжні розрахункові дані; документи, що підтверджують впровадження отриманих результатів; перелік публікацій здобувача за темою дисертації.

3.2. Дисертація написана українською мовою з коректним використанням сучасної наукової і загальновизнаної термінології. Виклад матеріалу характеризується послідовністю, структурною логічністю. Стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, нових наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття та використання. Результати проілюстровані достатньою кількістю рисунків і таблиць, що полегшує розуміння матеріалу.

3.3. Результати перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння дозволяють зробити висновок, що вона є результатом самостійних досліджень здобувача, не містить елементів фальсифікації, фабрикації, компіляції, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають відповідні посилання на джерела. Перелік джерел є достатнім для визначення рівня наукової новизни у порівнянні з відомими результатами.

3.4. У тексті реферату відображено основні положення, зміст, результати та висновки дисертації. Зміст реферату та основні положення дисертаційної роботи є ідентичними.

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих в дисертації та їх достовірність

Вихідні положення дисертаційної роботи є коректними. Результати досліджень, що наведені в дисертаційній роботі, викладені з належною аргументацією, із посиланням на відповідні джерела.

4.1. Обґрунтованість наукових результатів підтверджується:

- достатньою для досягнення поставленої мети повнотою і коректністю запропонованих і використаних математичних моделей для управління СКП, які базуються на використанні принципів системного аналізу для формування узагальненої концепції управління штучним мікрокліматом ОКІ;
- застосуванням методології математичного моделювання для дослідження динамічних процесів тепло- та масообміну кліматичного обладнання кондиціонерів, та методів сучасної теорії керування та оптимізації динамічних систем – для розроблення алгоритмів управління СКП;
- побудовою математичних моделей на основі аналітичного моделювання з коректним урахуванням фундаментальних законів тепло- і масообміну, що описують процеси обробки повітряної суміші у кондиціонерах та ін.

4.2. Для забезпечення *достовірності результатів моделювання*:

- запропоновано алгоритм пасивної ідентифікації, який забезпечує адаптацію моделей до реального процесу кондиціювання та дозволяє зіставити розрахункові дані з контрольованими;
- розроблений методологічний апарат було перевірено при розв'язанні низки практичних задач з управління штучним мікрокліматом ОКІ (розділ 7).

Достовірність наукових і практичних результатів, що отримані у дисертації, опосередковано підтверджується також їх оприлюдненням у рецензованих фахових виданнях, а також апробацією на НТК.

5. Наукова новизна отриманих результатів

5.1. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження забезпечили розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми створення комплексного математичного апарату для опису, аналізу, ідентифікації та оптимізації штучного мікроклімату ОКІ, що сприяє підвищенню їх функціональної стійкості, енергоефективності та адаптованості до зміни зовнішніх умов.

5.2. До найбільш вагомих нових наукових результатів, які отримано у дисертаційному дослідженні, мають належний теоретичний та практичний рівні, слід віднести такі положення (надано в формулюваннях автора без суттєвих змін):

1) вперше отримано комплексні моделі центральних та прецизійних кондиціонерів як багатовимірних об'єктів керування в просторі станів;

2) вперше запропоновано підхід до розробки цифрового двійника кліматичного обладнання СКП, що забезпечує відтворення динаміки стану обладнання кондиціонера в режимі реального часу протягом усього терміну експлуатації обладнання;

3) вперше для управління штучним мікрокліматом запропоновано метод непрямого контролю вологовмісту повітряної суміші на основі вимірювань температури, відносної вологості та барометричного тиску, що створює умови для незалежної роботи контурів стабілізації температури та вологості;

4) вперше розроблено методику побудови комплексної моделі кондиціонера у просторі станів, яка дозволяє отримати багатовимірну модель СКП для існуючих технологій кондиціювання повітря;

5) вперше розроблено чисельну процедуру параметричної оптимізації класичних систем керування у часовій області, яка ґрунтується на використанні часової характеристики об'єкта без необхідності попередньої апроксимації його передатною функцією

6) удосконалено аналітичні моделі кліматичного обладнання (моделі: теплообмінних апаратів; камер зволоження; камери змішування повітря; приміщення для кондиціювання), які на відміну від існуючих враховують масообміні процеси;

7) розвинуто метод пасивної ідентифікації параметрів аналітичних моделей кліматичного обладнання шляхом чисельного пошуку коефіцієнтів тепло- і масообміну із використанням інструментарію цифрового двійника;

8) удосконалено чисельну процедуру оптимізації багатовимірного лінійно-квадратичного регулятора, яка відрізняється наявністю логіки вибору обладнання кондиціонера для здійснення оптимального керування;

9) удосконалено методи параметричної оптимізації традиційних систем керування за інтегральними показниками якості із мінімізацією керуючого впливу.

5.3. На наш погляд, автор цілком міг би додатково сформулювати як окремий новий науковий результат «*елементи методології запропоновано методологічні засади (концепція, принципи та комплекс взаємопов'язаних моделей, методів і програмних засобів) моделювання та оптимізації систем штучного мікроклімату ОКІ*».

5.4. Представлена в дисертації сукупність нових наукових результатів є суттєвим внеском автора в розвиток методів моделювання та розроблення складних кіберфізичних систем.

6. Практичне значення результатів роботи

6.1. У дисертаційному дослідженні наводиться низка прикладних інструментів, що використовуються для розв'язання задач управління штучним мікрокліматом ОКІ. Розроблені рішення успішно апробовані на прикладі керування центральним кондиціонером у реальних умовах експлуатації, що підтверджує їх функціональну придатність. Запропоновані математичні моделі, методи, алгоритми керування доведено до рівня практичної реалізації, що забезпечує їх застосування для формування та підтримання штучного мікроклімату на промислових підприємствах і в установах соціальної сфери.

6.2. Результати наукових досліджень використані при впроваджені системи управління центральним кондиціонером AERMEC NCT 22, який забезпечує підтримання штучного мікроклімату у виробничому приміщенні друкарського цеху Банкнотно-монетного двору Національного банку України. На основі розроблених математичних моделей кліматичного обладнання створено програмний продукт у вигляді навчально-тренажерний комплексу системи штучного мікроклімату. Цей комплекс використовується інженерно-технічним персоналом Банкнотно-монетного двору для удосконалення практичних навичок з управління та експлуатації промислових систем штучного мікроклімату.

6.3. Промислові впровадження підтвердили високу ефективність запропонованого математичного забезпечення для розроблення інформаційно-керуючих систем штучного мікроклімату, що функціонують в умовах реального експлуатаційних умовах. Результати розв'язання прикладних задач підтверджені актами впровадження в практичну діяльність ТОВ «ТЕПЛОІНФОРМ», ТОВ «КОВЧЕГ» та НВП «ІКМ».

7. Повнота викладення результатів в опублікованих працях

Основні наукові та практичні результати дослідження достатньо повно висвітлені у 52 наукових публікації, серед яких: 1 монографія; 2 розділи у колективних монографіях, що проіндексовано в наукометричній базі даних (НБД) SCOPUS; 20 статей у наукових фахових виданнях України (з яких 1 стаття належить до категорії «А» та індексується у НБД SCOPUS); 6 статей у закордонних наукових журналах, що індексуються у НБД SCOPUS (з них 3 статті у виданнях третього квартилю – Q3); 2 патенти на корисну модель, що засвідчують прикладну цінність отриманих результатів; 21 публікація у збірниках матеріалів наукових конференцій (з них 6 індексуються у НБД SCOPUS).

8. Зауваження та дискусійні питання

8.1. Автор використовує термін «кіберфізичні об'єкти критичної інфраструктури», для забезпечення штучного мікроклімату яких використовуються СКП. На наш погляд, такі системи, враховуючи їх складну ІТ-інфраструктуру і вбудованість в об'єкти КІ, власне є кіберфізичними системами та відповідають сучасним поглядам на їх сутність і формальне визначення. Тому використання додаткового терміну «кіберфізичні об'єкти» не є достатньо обґрунтованим.

8.2. На нашу думку, більшої системності потребує представлення показників (ефективності, безпеки, надійності, живучості) систем кондиціювання повітря з огляду на їх кіберфізичну природу. Тим більше, що йдеться про ОКІ, вимоги до яких стають все більш жорсткими. Звісно, питання захищеності інформаційної інфраструктури СКП на рівні інформаційних та операційних технологій може бути предметом окремих досліджень.

8.3. При розробленні і дослідженні СППР доцільно було приділити певну увагу аспекту "інтелектуальності" системи та використання відповідних рішень на базі засобів штучного інтелекту, оскільки у дисертації значну частину параметрів, необхідних для оптимізації СКП, задає оператор-людина (див. п.5.1.1 – п.5.1.3).

8.4. У третьому розділі розробляються математичні моделі обладнання СКП із використанням звичайних диференційних рівнянь. Водночас температура та вологість у приміщенні є фізично розподіленими змінними. У пункті 3.4 відсутнє належне обґрунтування прийнятих припущень щодо зведення розподілених змінних до зосередженої математичної моделі приміщення.

8.5. У підрозділі 4.2 для ідентифікації параметрів аналітичної моделі кліматичного обладнання пропонується використовувати методи оптимізації нульового порядку, які вимагають великих обчислювальних ресурсів, але, на жаль, жодних оцінок обчислювальної складності цих методів не наведено.

8.6. В пункті 4.3.1 для ідентифікації параметрів (коефіцієнта тепловіддачі та втрати повітря) моделі (4.3) використовується метод оптимізації Нелдера-Міда, але загально відомо, що він суттєво залежить від початкових параметрів і не має теоретичної гарантії збіжності («застрягає» у локальному екстремумі). Те ж саме стосується використаних для оптимізації параметрів налаштувань цифрового регулятора (п. 5.2.2) методів сканування та Хука-Дживса. Потрібне додаткове пояснення як автор розв'язує це питання.

8.7. Слід зазначити, що зазначені недоліки і зауваження ніяким чином не зменшують відзначеної вище наукової та практичної цінності дисертаційного дослідження, можуть розглядатися в контексті майбутніх розробок.

9. Загальний висновок

9.1. Дисертаційна робота Голінка Ігоря Михайловича на тему «Математичні моделі та оптимізація систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури», відповідає формулі й галузі досліджень паспорту спеціальності 01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи.

9.2. Дисертація є завершеною науковою працею, у якій отримано нові результати, що в сукупності вирішують важливу науково-технічну проблему створення математичного апарату для комплексного опису, аналізу, ідентифікації та оптимізації систем штучного мікроклімату, актуальність якої зумовлена потребами підприємств критичної інфраструктури у забезпеченні їхньої енергоефективності та резильєнтності в змінних умовах зовнішнього середовища.

9.3. За актуальністю теми, обсягом та рівнем теоретичних і практичних досліджень, достовірністю та обґрунтованістю висновків, науковою новизною та практичною цінністю, змістом та оформленням, дисертація повністю відповідає вимогам п. 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого Постановою Кабінету міністрів України

від 17.11.2021 №1197, а її автор, Голінко Ігор Михайлович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент:
Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки
член-кореспондент НАН України,
завідувач кафедри кібербезпеки та інтелектуальних
інформаційних технологій Національного
аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»,
доктор технічних наук, професор _____ Вячеслав ХАРЧЕНКО

8 червня 2026 року.

Підпис Харченка Вячеслава Сергійовича засвідчую.
Вчений секретар Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»,
кандидат технічних наук, доцент _____ Тетяна БОНДАРЄВА

«08» 06 2026 року