ВІДГУК

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

Актуальність теми дисертаційного дослідження. Сучасним викликом для України є розвиток ефективної системи управління активами критичної інфраструктури в умовах режиму воєнного стану, що супроводжується зростанням загроз і структурних трансформацій. На загальнодержавному рівні повноваження щодо управління об'єктами критичної інфраструктури нормативно визначені за відповідними галузевими органами виконавчої влади. На рівні підприємств, установ і організацій відповідальність за безперервність функціонування таких об'єктів покладається на суб'єктів господарювання.

В українському законодавстві виокремлено чотири рівні управління активами критичної інфраструктури: загальнодержавний, галузевий, місцевий та об'єктовий. Однак, на практиці зазначена система зберігає переважно адміністративний характер, що супроводжується недостатнім використанням інформаційних технологій, аналітичних інструментів і систем підтримки управлінських рішень. Такий підхід обмежує ефективність управління, знижує його гнучкість, адаптивність і здатність своєчасно реагувати на зміни зовнішнього середовища.

Забезпечення високої ефективності функціонування підприємств та установ критичної інфраструктури потребує впровадження комплексного підходу до управління їх інженерними системами, зокрема інтеграції систем кондиціювання повітря у загальну архітектуру управління об'єктами критичної інфраструктури. Системи кондиціювання повітря є невід'ємним елементом технологічної безпеки, оскільки вони забезпечують оптимальні умови для стабільної роботи технологічного обладнання, що використовується у сфері зв'язку, енергетики, інформаційної безпеки та систем управління. Водночас системи кондиціювання повітря виконують важливу функцію зі створення комфортного мікроклімату у приміщеннях закладів охорони здоров'я, фінансових і соціальних установ, а також у спорудах підземної інфраструктури. Підтримання належних параметрів температури та вологості повітря сприяє збереженню працездатності персоналу, підвищує надійність роботи технологічного обладнання та забезпечує стабільність життєдіяльності населення в умовах підвищеного навантаження чи надзвичайних ситуацій.

Традиційні системи кондиціювання повітря, що функціонують за принципом локального регулювання, демонструють обмежену здатність до комплексного врахування багатофакторних вимог, властивих управлінню мікрокліматом об'єктів критичної інфраструктури. Їхня архітектура не передбачає інтеграції технічних, інформаційних, соціальних та енергетичних аспектів, які визначають міждисциплінарний характер процесів формування штучного мікроклімату. У результаті такі системи не забезпечують необхідного рівня гнучкості, адаптивності та ефективності в умовах змінних зовнішніх і внутрішніх впливів.

Зазначені обмеження зумовлюють потребу у створенні інформаційної системи підтримки прийняття рішень та відповідного математичного забезпечення, які здатні здійснювати динамічний аналіз параметрів мікроклімату, прогнозувати їх зміну та формувати оптимальні керуючі дії у режимі реального часу. Запровадження таких систем сприятиме підвищенню стійкості, енергоефективності і надійності функціонування об'єктів критичної інфраструктури, забезпечуючи інтеграцію

управлінських рішень у межах єдиного інформаційного простору, що обумовлює актуальність теми дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Тематика роботи і отримані результати безпосередньо пов'язані з науково-дослідними роботами, що виконувались згідно із планами наукових досліджень КПІ імені Ігоря Сікорського з 2012 р. у рамках держбюджетних тем: № 2539-п «Підвищення ефективності та надійності функціонування устаткування ТЕС та малої енергетики в змінних режимах експлуатації» (2012–2013 р., № держреєстрації 0112U001751); № 2716-п «Розробка засобів із продовження надійної та економічної експлуатації енергогенеруючих об'єктів у маневрених режимах» (2014–2015 р., № держреєстрації 0114U000564); № 2009-п «Управління енергоспоживанням об'єктів комунальної енергетики» (2017–2018 р., № держреєстрації 0117U000469); № 2313-п «Побудова інформаційно-аналітичної платформи для супроводження функціонування кіберфізичних систем» (2020–2022 р., № держреєстрації 0120U102298).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації, забезпечується коректністю використаних методів дослідження, внутрішньою логічною узгодженістю отриманих результатів, а також підтвердженням їх достовірності шляхом впровадження. Впровадження результатів дослідження є не лише підтвердженням їх прикладної цінності, а й важливим етапом верифікації розроблених математичних моделей і методів оптимізації.

У роботі реалізовано єдиний комплекс математичних моделей та обчислювальних методів для оптимізації процесів управління системами кондиціювання повітря, який поєднує методологію системного аналізу, математичного моделювання, сучасної теорії керування та оптимізації динамічних систем.

Такий міждисциплінарний підхід забезпечив теоретичну обґрунтованість розробленої концепції управління штучним мікрокліматом.

Коректність побудованих математичних моделей підтверджується їх відповідністю фундаментальним законам тепло- і масообміну, а також здатністю адекватно описувати процеси підготовки повітря у системах штучного мікроклімату. Запропонований метод пасивної ідентифікації підвищує достовірність моделювання, забезпечуючи адаптацію моделей до фактичних умов експлуатації кондиціонерів та узгодження розрахункових і виміряних параметрів.

Наукова й практична значущість отриманих результатів підтверджена апробацією положень дисертації на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях, а також публікацією основних результатів у рецензованих фахових виданнях. Апробація наукових результатів здійснена шляхом їх впровадження у виробничу діяльність ТОВ «ТЕПЛОІНФОРМ», ТОВ «КОВЧЕГ» та НВП «ІКМ», що підтверджено відповідними актами.

Структура та зміст дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел з 309 найменувань та 7 додатків. Обсяг дисертації становить 360 сторінок, з яких 321 сторінка основного тексту.

У *вступі* поставлена наукова проблема, мета і завдання дослідження, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, наведено наукову новизну і практичну значущість результатів, інформацію про публікації і апробацію результатів дослідження.

Перший розділ дисертації присвячено аналізу публікацій дотичних до тематики дослідження, класифікації об'єктів критичної інфраструктури та впливу штучного мікроклімату на їх функціонування. У розділі розглянуто існуючі математичні моделі

обладнання кондиціонерів та методи управління системами кондиціювання повітря. Встановлено, що існуючі теоретичні підходи не враховують багатофакторність вимог об'єктів критичної інфраструктури, що зумовлює потребу у подальших дослідженнях.

У другому розділі дисертації обґрунтовано нову концепцію оптимізації управління системами кондиціювання повітря, яка передбачає: 1) дослідження динаміки процесу тепломасообміну за температурою та вологовмістом повітря; 2) синтез багатовимірних систем управління штучним мікрокліматом із застосуванням сучасних методів оптимізації.

Встановлено, що системи кондиціювання повітря належать до класу складних технічних систем із властивостями множинності, емерджентності та синергізму. Для реалізації запропонованої концепції оптимізації управління системами кондиціювання повітря розроблено системний підхід, який реалізується у три етапи: аналіз існуючої технології кондиціювання повітря; формалізація процесу кондиціювання повітря у вигляді багатовимірної моделі; розроблення інформаційної системи підтримки прийняття рішень для оптимізації управління штучним мікрокліматом об'єктів критичної інфраструктури. Зазначені три етапи послідовно деталізуються в наступних розділах дисертації.

У *третьому розділі* представлено результати розроблення аналітичних моделей обладнання кондиціонера та побудовано комплекс динамічних моделей, що охоплюють основні компоненти систем кондиціювання повітря: моделі теплообмінних апаратів – електрокалорифера, водяного калорифера та водяного охолоджувача; моделі камер зволоження – форсуночного та парового типів; модель камери змішування повітря; модель мікроклімату у приміщенні.

Четвертий розділ дисертації присвячено класифікації параметрів аналітичних моделей обладнання систем кондиціювання повітря. Встановлено, що коефіцієнти тепломасообміну залежать від конструктивних, експлуатаційних та середовищних чинників, що зумовлює концептуальну невизначеність аналітичних моделей. Для її подолання запропоновано метод пасивної ідентифікації, реалізований із використанням інструментарію цифрових двійників, який забезпечує адаптацію моделей до реальних умов. У розділі також розроблено методику агрегування запропонованих аналітичних моделей з метою побудови комплексної моделі системи штучного мікроклімату. На основі цієї методики сформовано чотири комплексні моделі систем кондиціювання повітря у просторі станів, що відображають сучасні технології кондиціювання повітря.

П'ятий розділ дисертації присвячено розробленню інформаційної системи підтримки прийняття рішень, орієнтованої на управління штучним мікрокліматом кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури. Запропонована інформаційна система підтримки прийняття рішень ґрунтується на системному підході, сформульованому у третьому розділі та інтегрує наступні ключові принципи: ієрархічну організацію управління, багатокритеріальну оптимізацію, параметричну ідентифікацію та адаптацію моделей кліматичного обладнання до змін зовнішніх умов. Архітектура інформаційної системи підтримки прийняття рішень реалізована у вигляді трирівневої керуючої системи.

У *шостому розділі* удосконалено методи оптимізації традиційних систем керування за інтегральними показниками якості на основі спрощених моделей об'єкта керування. Запропоновані методи оптимізації мають прикладну спрямованість і відзначаються високим рівнем універсальності для маловитратної модернізації локального керування системами кондиціювання повітря, що забезпечує їх ефективне використання на нижньому рівні інформаційної системи підтримки прийняття рішень.

У *сьомому розділі* розглядаються промислові впровадження систем керування, створені на основі запропонованого системного підходу та розроблених методів. Результати дисертації впроваджено для: системи управління кондиціонером

AERMEC NCT 22 виробничого приміщення друкарського цеху Банкнотно-монетного двору Національного банку України; для математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення навчально-тренажерного комплексу системи штучного мікроклімату; для керування інженерним обладнанням двох теплопунктів багатоповерхових будівель.

У розділі *висновків* узагальнюються отримані результати дисертаційного дослідження.

Додатки містять допоміжні розрахункові матеріали; документи, що підтверджують впровадження результатів дисертаційної роботи; перелік публікацій здобувача.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розвитку теоретичних засад математичного моделювання, ідентифікації та обчислювальної оптимізації складних динамічних систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури.

До найбільш вагомих наукових результатів дисертаційної роботи належать:

1. Вперше розроблено комплекс багатовимірних математичних моделей систем кондиціювання повітря у просторі станів, які формалізують взаємопов'язані процеси тепломасообміну під час підготовки повітряної суміші та забезпечують можливість дослідження динаміки систем штучного мікроклімату засобами сучасної теорії керування.

2. Вперше запропоновано методологію побудови цифрових двійників систем штучного мікроклімату, що базується на поєднанні математичних моделей у просторі станів, процедур параметричної ідентифікації та механізмів адаптації моделей до поточних умов функціонування об'єкта.

3. Розроблено новий метод непрямого визначення вологовмісту повітряної суміші за результатами вимірювання температури, відносної вологості та барометричного тиску, який забезпечує математичне розділення каналів керування температурою і вологістю та підвищує точність формалізації процесів кондиціювання повітря.

4. Вперше запропоновано методику агрегування математичних моделей окремих елементів кліматичного обладнання у комплексні багатовимірні моделі систем кондиціювання повітря, що забезпечує формалізований синтез моделей для різних технологічних схем підготовки повітря.

5. Розроблено чисельний метод параметричної оптимізації систем керування, який використовує часові характеристики об'єкта як вихідну інформацію про його динамічні властивості та забезпечує визначення оптимальних параметрів регуляторів без необхідності побудови детальної аналітичної моделі.

6. Удосконалено математичні моделі кліматичного обладнання шляхом урахування масообмінних процесів у повітряних потоках, що підвищує адекватність опису реальних процесів функціонування систем штучного мікроклімату.

7. Набув подальшого розвитку метод пасивної параметричної ідентифікації математичних моделей систем кондиціювання повітря, який, на відміну від відомих підходів, використовує інструментарій цифрових двійників для уточнення параметрів тепломасообміну в процесі експлуатації.

8. Удосконалено метод оптимізації багатовимірних лінійно-квадратичних регуляторів для динамічних систем штучного мікроклімату шляхом урахування поточного стану зовнішнього середовища, що забезпечує адаптивне формування оптимальних керуючих впливів.

9. Набули подальшого розвитку обчислювальні методи оптимізації традиційних систем автоматичного керування за інтегральними критеріями якості, які

характеризуються високою точністю, обчислювальною ефективністю та придатністю до програмної реалізації в системах реального часу.

Сукупність отриманих результатів формує цілісну науково-методологічну основу для математичного моделювання, ідентифікації та оптимізації систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури. Отримані результати мають системний характер, охоплюють повний цикл дослідження — від розроблення математичних моделей і методів їх параметричної ідентифікації до створення алгоритмів оптимального керування та їх практичного впровадження. У сукупності вони можуть бути кваліфіковані як вагомий внесок у розвиток наукового напряму, пов'язаного з математичним забезпеченням функціонування систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури.

Практичне значення результатів роботи. Розроблені математичні моделі, методи та алгоритми керування доведено до практичного впровадження. Їх прикладна цінність полягає у створенні багатофункціонального математичного та алгоритмічного забезпечення, призначеного для управління штучним мікрокліматом об'єктів критичної інфраструктури. Апробацію розробленого математичного апарату для оптимізації управління штучним мікрокліматом здійснено на прикладі керування центральним кондиціонером AERMEC NCT 22, який забезпечує підтримання штучного мікроклімату у виробничому приміщенні друкарського цеху Банкнотно-монетного двору Національного банку України. На основі побудованих моделей обладнання кондиціонера розроблено прикладне програмне забезпечення – навчально-тренажерний комплекс системи штучного мікроклімату. Зазначений комплекс передано інженерно-технічному персоналу Банкнотно-монетного двору Національного банку України для формування практичних навичок з управління та експлуатації промислових систем штучного мікроклімату.

Результати промислового впровадження засвідчили високу ефективність розробленого математичного забезпечення, що стало основою для створення інформаційно-керуючих систем штучного мікроклімату. Реалізовані рішення підтвердили високу працездатність і адаптивність в умовах реального експлуатаційного середовища, що свідчить про їхню прикладну придатність для використання на об'єктах критичної інфраструктури.

Повнота викладення і апробації основних результатів дисертаційної роботи у наукових публікаціях. Результати дисертації повною мірою відображено у 52 наукових публікаціях, серед яких: 1 монографія; 2 розділи у колективних монографіях (індексовані у базі даних Scopus); 20 статей у наукових фахових виданнях України (з яких 1 стаття належить до категорії «А» та індексується у Scopus); 6 статей у закордонних наукових журналах, що входять до бази Scopus (з них 3 статті віднесено до Q3); 2 патенти на корисну модель, що засвідчує прикладну цінність результатів; 21 публікація у збірниках матеріалів наукових конференцій (з них 6 індексуються у базі Scopus).

Мова та стиль дисертації та реферату. Оформлення дисертації відповідає встановленим нормативним вимогам, а виклад здійснено з дотриманням норм наукової української мови.

Реферат стисло передає зміст дисертації. З тексту реферату зрозуміла наукова і практична значущість роботи та особистий внесок здобувача. Зміст реферату та основні положення дисертаційної роботи є ідентичними.

Оформлення дисертації та реферату узгоджується з чинними вимогами Міністерства освіти і науки України щодо підготовки та оформлення дисертаційних робіт.

Відповідність теми та змісту дисертації паспорту спеціальності, за якою її подано до захисту. Тема дисертації та її зміст відповідають формулі й галузі досліджень, відповідно до положень, що викладені в паспорті спеціальності 01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи.

Дискусійні положення та зауваження щодо дисертаційної роботи. Дисертаційна робота виконана на високому науковому та методичному рівні, містить значний обсяг теоретичних і прикладних результатів, які мають наукову новизну та практичну цінність. Разом з тим окремі положення дисертації викликають дискусію або потребують додаткового обґрунтування та уточнення.

1. У другому розділі запропоновано метод визначення вологовмісту повітряної суміші за виміряними значеннями температури, відносної вологості та барометричного тиску. Водночас доцільним було б навести більш розгорнуте порівняння його характеристик із відомими методами, зокрема щодо точності, обчислювальної складності та стійкості до похибок вимірювання.
2. У четвертому розділі наведено результати параметричної ідентифікації моделей електрокалорифера та водяного калорифера. З огляду на заявлену універсальність запропонованого методу пасивної ідентифікації, доцільно було б подати аналогічні результати також для інших типів кліматичного обладнання, розглянутих у дисертації.
3. Під час побудови комплексних моделей систем кондиціювання повітря недостатньо уваги приділено аналізу питань структурної та параметричної ідентифікованості моделей. Більш детальне дослідження можливих випадків неоднозначного визначення параметрів дозволило б підвищити переконливість отриманих результатів.
4. Представлена у п'ятому розділі інформаційна система підтримки прийняття рішень орієнтована переважно на оптимізацію температурно-вологісних параметрів мікроклімату. Водночас для багатьох об'єктів критичної інфраструктури важливим показником якості повітря є концентрація CO_2, яка згадується в роботі під час аналізу предметної області. Тому доцільним було б розглянути можливість інтеграції відповідних критеріїв до системи підтримки прийняття рішень.
5. Автором розроблено підхід до побудови цифрових двійників кліматичного обладнання систем кондиціювання повітря. Разом з тим потребує більш детального висвітлення питання відмінності запропонованого підходу від існуючих концепцій цифрових двійників, представлених у сучасних міжнародних дослідженнях.
6. Промислова апробація розроблених моделей та методів виконана переважно на базі систем кондиціювання типу AERMEC NCT 22 та споріднених об'єктів. Розширення експериментальної бази за рахунок інших типів обладнання дозволило б більш переконливо підтвердити універсальність запропонованих математичних моделей і методів оптимізації.
7. Для оцінювання ефективності систем штучного мікроклімату автор використовує традиційні енергетичні показники. Водночас додаткове застосування ексергетичного підходу могло б забезпечити більш глибокий аналіз втрат енергії та резервів підвищення енергоефективності систем кондиціювання повітря.

Зазначені зауваження не знижують наукової цінності виконаної роботи, мають переважно рекомендаційний характер і можуть розглядатися як напрями подальшого розвитку досліджень. У цілому вони не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації та не ставлять під сумнів достовірність і значущість отриманих результатів.

Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам. Вважаю, що дисертаційна робота Голінка Ігоря Михайловича «Математичні моделі та оптимізація систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної

інфраструктури» є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому вирішено важливу науково-технічну проблему створення математичного забезпечення для аналізу, ідентифікації та оптимізації систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури.

Особливої ваги результати дисертаційного дослідження набувають в умовах воєнного стану та необхідності забезпечення безперервного функціонування об'єктів критичної інфраструктури України. Розроблені математичні моделі, методи і алгоритми спрямовані на підвищення функціональної стійкості, енергоефективності та надійності інженерних систем кіберфізичних об'єктів, що має важливе значення для забезпечення національної безпеки держави.

За актуальністю, рівнем наукової новизни, теоретичним і практичним значенням, обґрунтованістю наукових положень і висновків дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 7, 8 та 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 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:
провідний науковий співробітник відділу
моделювання та ідентифікації теплових
процесів в енерготехнологічному обладнанні
Інституту енергетичних машин і систем
імені А.М. Підгорного НАН України
доктор технічних наук, професор, Романова Тетяна РОМАНОВА

Підпис Романової Т.Є. засвідчую

Учений секретар
Інституту енергетичних машин і систем
імені А.М. Підгорного НАН України
доктор технічних наук, старший науковий співробітник Сергій УГРІМОВ

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МАШИН І СИСТЕМ ІМ.А.М.ПІДГОРНОГО НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ
№03534570
УКРАЇНА