ВІДГУК

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

Актуальність теми дисертаційного дослідження.

Інтеграція України в європейський простір, загрози та ризики що принесла війна ставлять перед урядом країни важливі задачі по формуванню стратегічних пріоритетів державної політики у сфері національної безпеки, нової структури соціально-економічних відносин, забезпечення ефективного державного та регіонального управління, надійного і ефективного функціонування об'єктів критичної інфраструктури (КІ) з використанням загальноприйнятих стандартів, сучасних комп'ютерних систем та інформаційних технологій.

Ефективне прийняття рішень при управлінні критичними системами та КІ, повинно базуватись на інтеграції консолідованих даних, які отримуються із різних джерел в результаті моніторингу за різноманітними техніко-економічними показниками та критеріями, зберігаються та обробляються в базах даних та знань, системах підтримки прийняття рішень (СППР), оскільки об'єкти КІ формують основу життєзабезпечення країни це – системи енергетики та зв'язку, об'єкти оборони, державні урядові та фінансові установи, транспорт, водні ресурси та якість навколишнього середовища. Вразливість до зовнішніх впливів об'єктів КІ, особливо в умовах воєнних дій, гібридних загроз і кібертероризму, надзвичайно актуалізують проблеми стійкості КІ.

Одним із важливих показників забезпечення стабільної роботи об'єктів КІ є наявність нормальних умов праці для персоналу, а саме мікроклімат у технічних і адміністративних приміщеннях установ. Системи кондиціювання та якості повітря відіграють важливу роль у створенні комфортного середовища для ефективної роботи фахівців та забезпечують оптимальні умови для функціонування високочутливого електронного та енергетичного обладнання. Порушення температурного режиму для обладнання при функціонуванні, підвищена вологість повітря можуть спричинити перегрів, конденсацію, збої та відмову електронної апаратури, які впливають на фізичний стан та кібербезпеку об'єктів КІ.

Сучасні системи забезпечення та підтримки мікроклімату мають обмежені можливості адаптації до зміни зовнішніх умов та енергоємні. Існуючі методи управління, як правило, базуються на локальних алгоритмах регулювання, які не забезпечують узгодженості між соціальними, технічними, енергетичними та інформаційними аспектами управління. Це вимагає розробки та впровадження нових підходів до побудови оптимальних систем управління штучним мікрокліматом,

здатних враховувати складність процесів кондиціювання та взаємозв'язки між їх різноманітними параметрами.

У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення комплексного математичного апарату, який описує функціонування систем штучного мікроклімату у складі кіберфізичних об'єктів КІ. Такі системи мають забезпечувати безперервний моніторинг, аналітичну обробку даних, прогнозування зміни параметрів середовища та формування адаптивних керуючих впливів у режимі реального часу. Реалізація цих підходів сприятиме підвищенню енергоефективності, зниженню експлуатаційних витрат і зміцненню стійкості об'єктів КІ до зовнішніх та внутрішніх впливів.

Дисертаційна робота Голінко І.М. присвячена вирішенню наукової проблеми пов'язаної з розробкою єдиного математичного апарату для опису, аналізу, ідентифікації та оптимізації процесів підготовки повітря для систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів КІ, яка має вагоме наукове та практичне значення.

Результати наукових досліджень дисертаційної роботи сприятимуть удосконаленню методології управління штучним мікрокліматом на об'єктах КІ, формуванню нових підходів до побудови енергоефективних та адаптивних систем, а також забезпеченню безпеки і стійкого функціонування КІ України.

Зв'язок виконаного дослідження з галузевими науковими програмами, пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки.

Дисертаційна робота виконувались відповідно до тематики науково-дослідних робіт Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та МОН України в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт: "Підвищення ефективності та надійності функціонування устаткування ТЕС та малої енергетики в змінних режимах експлуатації" (ДР № 0112U001751); "Розробка засобів із продовження надійної та економічної експлуатації енергогенеруючих об'єктів у маневрених режимах" (ДР № 0114U000564); "Управління енергоспоживанням об'єктів комунальної енергетики" (ДР № 0117U000469); "Побудова інформаційно-аналітичної платформи для супроводження функціонування кіберфізичних систем" (ДР № 0120U102298), у виконанні етапів цих науково-дослідних робіт здобувач брав участь як виконавець.

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

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Голінко І.М базується на аналізі літературних джерел щодо теми дослідження, узгодженій постановці мети і задач дослідження, а також на основі використанні сучасних методів дослідження із посиланням на відповідні джерела.

Розроблені моделі та інформаційна технологія базуються на використанні методів математичного моделювання та принципів системного аналізу, перевіреного на практиці апарату аналітичного моделювання із використанням результатів сучасних досліджень вітчизняних і зарубіжних вчених, теорії прийняття рішень.

Запропонований математичний апарат для аналізу і синтезу складних технічних систем перевірено при розв'язанні низки практичних задач а обґрунтованість запропонованих рішень і наукових положень підтверджена їх впровадженням у виробничу практику ТОВ «ТЕПЛОЇНФОРМ», 'ГОВ «КОВЧЕГ» та НВП «ІКМ», результати перевірені комп'ютерними експериментами, результати яких не протирічать загально відомим фактам, що підтверджено відповідними актами впровадження.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність наукових і практичних результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановок задач, застосуванням відомих математичних методів аналізу, відповідністю змісту математичних моделей та фізичній суті процесів, які вони визначають. Експериментальні дослідження та акти впровадження результатів підтверджують коректність моделей та отриманих результатів.

Отримані у дисертації результати підтверджується також їх публікацією в рецензованих фахових виданнях і апробацією на авторитетних міжнародних наукових конференціях.

Наукова новизна результатів роботи.

Здобувач здійснив теоретичні й експериментальні дослідження, що розширюють наукові основи моделювання кіберфізичних систем та вдосконалюють методи оптимального керування багатовимірними динамічними системами за умов концептуальної невизначеності.

Серед найсуттєвіших оригінальних наукових результатів, що отримані в дисертації, слід відзначити такі:

Вперше розроблено:

- для простору станів отримано комплексні моделі центральних та прецизійних кондиціонерів як єдиного багатовимірного об'єкта керування;
- підхід до розробки цифрового двійника кліматичного обладнання кондиціонера, що створює умови для гарантованого функціонування обладнання;
- для управління штучним мікрокліматом запропоновано метод контролю за непрямим показником вологовмісту повітряної суміші, що створює умови для незалежної роботи контурів стабілізації температури та вологості;
- методику розробки комплексних математичних моделей у просторі станів, яка дозволяє отримати багатовимірну модель системи кондиціювання повітря різної інженерної реалізації;
- розроблено чисельний метод параметричної оптимізації для традиційних систем керування, яка використовує часову характеристику об'єкта керування без попередньої апроксимації передатною функцією;

Удосконалено та розвинуто:

- аналітичні моделі для обладнання що підтримує клімат, які на відміну від існуючих враховують масообмін; використання запропонованих моделей дозволяє проводити комплексний аналіз динамічних властивостей кондиціонера будь якої технологічної реалізації;

- метод пасивної ідентифікації коефіцієнтів тепло та масообміну для кліматичного обладнання кондиціонера із використанням комп'ютерної моделі цифрового двійника;
- чисельну процедуру оптимізації багатовимірного лінійно-квадратичного цифрового регулятора (ЛКЦР) для системи кондиціювання повітря (СКП), який на відміну від класичної процедури синтезу ЛКЦР відрізняється наявністю логіки вибору обладнання кондиціонера для здійснення оптимального керування, що дозволяє системі керування адаптуватися до зміни зовнішнього середовища;
- методи параметричної оптимізації традиційних систем керування за інтегральними показниками якості із мінімізацією керуючого впливу.

Значимість отриманих результатів для науки та практичного використання.

Теоретичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у тому, що вони розширюють науково-методичну основу для розробки інформаційно- аналітичних систем моніторингу та управління штучним мікрокліматом кіберфізичних об'єктів КІ з метою мінімізації часу та енергії при генерації, прийнятті рішень при управлінні різноманітними об'єктами КІ, що дозволяє забезпечити ефективність управління ними.

Практична цінність результатів роботи визначається створенням багатофункціонального математичного і алгоритмічного забезпечення для оптимізації управління штучним мікрокліматом кіберфізичних об'єктів КІ. Запропоновані математичні моделі, методи та алгоритми керування кондиціонерами доведені до рівня практичної реалізації. Розроблений системний підхід до управління штучним мікрокліматом рекомендований для використання на промислових підприємствах та установах соціальної сфери.

Отримані наукові результати впроваджено для:

1) системи керування кондиціонером AEKMEC NCT 22 виробничого приміщення друкарського цеху Банкнотно-монетного двору Національного банку України;
2) розробленого програмного забезпечення навчально-тренажерного комплексу системи штучного мікроклімату;
3) двох систем керування інженерним обладнанням теплопункту промислової будівлі.

Результати промислових впроваджень підтверджені актами впровадження які засвідчують високу ефективність розробленого математичного забезпечення для проєктування інформаційно-керуючих систем штучного мікроклімату.

Повнота викладення наукових результатів роботи, висновків і рекомендацій в опублікованих працях.

Основні наукові та практичні результати дослідження у повній мірі висвітлено у 52 наукових працях, у тому числі:

- 1 монографія;
- 2 розділи у колективних монографіях, що індексується Scopus;

- 20 статей у наукових періодичних виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України (з них 1 стаття включена до категорії "А", що індексується Scopus);
- 6 статей у наукових періодичних виданнях інших держав з напряму за яким підготовлено дисертацію, що індексується Scopus (з них 3 статті, віднесені до квартилю Q3 класифікації SCImago Journal and Country Rank);
- 2 патенти на корисну модель;
- 21 публікація у матеріалах наукових конференціях (з них 6 публікацій, що індексується Scopus).

Якість та кількість публікацій відповідають п.7 та 9 "Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук".

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації із додатками складає 360 сторінок. Оформлення дисертації виконано відповідно до діючих вимог.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету і завдання, об'єкт та предмет, методи дослідження, наведено інформацію щодо зв'язку роботи з науковими темами, представлено наукову новизну отриманих результатів і їх практичне значення, інформацію щодо особистого внеску здобувача в публікаціях та апробації результатів роботи.

У **першому розділі** здійснено огляд літературних джерел за темою дослідження, проведено огляд міжнародних стандартів, що регламентують вимоги до штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів КІ. Розглянуто характерні особливості процесу підготовки повітря на обладнанні кондиціонера, проведено систематизацію наявних моделей кліматичного обладнання та методів управління системами кондиціювання повітря.

Другий розділ присвячений розробці системному підходу до управління штучним мікрокліматом об'єктів КІ та представлено структурну схему його запровадження. Запропонований у розділі системний підхід охоплює: аналіз процесів підготовки повітря на обладнанні кондиціонера; побудову багатовимірної математичної моделі кондиціонера для наявних технологій кондиціювання; впровадження інформаційної СППР, що забезпечує інтеграцію систем кондиціювання повітря у кіберфізичні об'єкти КІ.

Ідеологія системного підходу у наступних розділах використовується при формалізації математичних моделей для моделювання систем кондиціювання повітря.

У третьому розділі здійснено формалізацію у вигляді математичних моделей фізичних процесів тепло- та масообміну, що відбуваються під час підготовки повітря на обладнанні кондиціонера. Розроблено сім динамічних моделей кліматичного обладнання, а саме: електричного та водяного калориферів; водяного охолоджувача; форсуночного та парового зволожувачів; камери змішування повітря; приміщення. Динамічні рівняння моделей приведено до стандартної форми простору станів. На відміну від існуючих, запропоновані моделі враховують тепло- та масообміні процеси

підготовки повітряної суміші. Представлено графічні малюнки обладнання та результати моделювання.

У четвертому розділі проведено класифікацію параметрів моделей кліматичного обладнання. Числові значення коефіцієнтів тепло- і масовіддачі залежать від низки факторів різної природи. Для подолання параметричної невизначеності коефіцієнтів тепло- і масовіддачі моделей розроблено підхід до розкриття невизначеності в моделях та алгоритм пасивної ідентифікації з використанням інструментарію цифрових двійників, що дозволяє уточнювати параметри моделей без втручання в роботу обладнання кондиціонера. Наведено приклад розробки цифрових двійників для процесу нагріву повітря. Ефективність підходу підтверджено імітаційним моделюванням електричного та водяного калориферів. Розроблено методику агрегування моделей кліматичного обладнання у комплексну модель кондиціонера. На основі запропонованої методики побудовано чотири комплексні моделі для найбільш поширених технологій кондиціювання.

У п'ятому розділі розглянуто інформаційну СППР для оптимізації управління мікрокліматом кіберфізичних об'єктів КІ. СППР ґрунтується на системному підході та поєднує ієрархічне управління, розгляді однокритеріальних та багатокритеріальних задач оптимізації, параметричну ідентифікацію та адаптацію моделей кліматичного обладнання до змін зовнішнього середовища. Представлена в розділі архітектура СППР реалізована як трирівнева структура: нижній рівень охоплює периферійні пристрої для локального керування кондиціонерами та збору даних; середній рівень представлений хмарними сервіси цифрових двійників із базами даних, інструментами параметричної ідентифікації та адаптації моделей; верхній рівень забезпечує стратегічну підтримку прийняття рішень і координацію підсистем для досягнення цілей управління мікрокліматом кіберфізичних об'єктів КІ. Представлені чисельні приклади дослідження моделей задач.

Шостий розділ присвячений розробці експрес-методів оптимізації традиційних систем керування, де властивості об'єкта керування описуються наближеними моделями. Запропоновані методи є універсальними та придатні для маловитратної модернізації систем локального керування кондиціонерами на нижньому рівні СППР. Представлені результати чисельних експериментів та таблиці залежностей оптимальних настроювань регуляторів для різних параметрів регуляторів та критеріїв.

У сьомому розділі наводяться опис реалізованих систем управління із використанням розробленого в дисертації математичного, алгоритмічного забезпечення та розрахунків, які представлені в додатках. Детально розглянуто інформаційно-керуючу систему для підтримки мікроклімату друкарського приміщення Банкнотно-монетного двору Національного банку України. Результати дисертаційного дослідження впроваджено для: керування центральним кондиціонером АЕКМЕС БТС 22; програмного забезпечення навчально-тренажерного комплексу системи штучного мікроклімату; керування інженерним обладнанням двох багатоповерхових будівель.

У **висновках** узагальнено основні результати дисертації, що демонструють внесок здобувача у розвиток методології математичного моделювання складних кіберфізичних систем шляхом формалізації процесів управління штучним мікрокліматом об'єктів КІ.

Додатки містять: основні розрахункові параметри та результати розрахунків різноманітних коефіцієнтів на основі моделей кліматичного обладнання та систем керування кондиціонером CV-P 2L N-63B/F-N; функціональну схему керування промисловим кондиціонером AERMEC NTC 22; чотири акти впровадження отриманих результатів; перелік конференцій па яких були оприлюднені результати дисертації та наявні публікації за тематикою дисертаційної роботи.

Дисертація написана українською мовою, має логічну структуру, послідовність викладення результатів з використанням загальновизнаної наукової термінології. Теоретичні положення, практичні результати та рекомендації подані у доступній формі, доповнені ілюстраціями та таблицями із розрахунками показників для кращого сприйняття матеріалу.

Перевірка на текстові співпадіння підтвердила самостійність дослідження, відсутність фальсифікацій, компіляцій і плагіату. Усі запозичення належним чином оформлені з посиланням на джерела.

Автореферат дисертаційної роботи гарно оформлений, написаний чітко, його зміст повністю відповідає структурі, основним положенням дисертації та її результатам, сформульованим висновкам.

Зауваження щодо дисертаційної робот та дискусійні питання.

1. У першому розділі дисертації доцільно виокремити підрозділ, присвячений аналітичним висновкам щодо актуальних проблематики та напрямів дослідження.
2. На сторінці 74 на рис.2.2 представлені структури моделей ПСЦК: *а*) лінійна структура та *б*) паралельна структура. В теорії надійності лінійна структура це послідовна система і паралельна система. Доцільно малюнок *б*) представити так як це прийнято в теорії надійності, приклад паралельної структури представлено автором на рис. 2.4.
3. В підрозділі 2.6 доцільно зробити посилання на публікації в яких представлено результати підрозділу так як це зроблено в інших підрозділах дисертації.
4. У списку прийнятих скорочень дисертації відсутні окремі позначення, зокрема ПІ-закон регулювання, ПІ- та І-ПІ ?.
5. У п.3.4 розглядається математична модель приміщення без просторового розподілення температури та вологості повітря, у підрозділі бажано було аргументувати прийняте припущення.
6. Запропонована у розділі 5 ІСППР не містить у складі модуля для оцінки концентрації CO_2 та витрати повітря на 1 особу, які в загальному вигляді розглянуто в п.1.2.
7. На стор.236 представлено параметри критерію якості (5.17). Необхідно пояснити значення параметрів **S=0, Q=I** та **R** - вагома симетрична додатна матриця, яка $\mathbf{R} \approx \mathbf{0}$.

8. У дисертаційній роботі наявні окремі стилістичні недоліки. Зокрема, у п.7.2 термін «учбово-тренажерний комплекс (УТК)» доцільно замінити на «навчально-тренажерний комплекс (НТК)», що відповідає сучасним нормам української науково-технічної термінології.

Перелічені зауваження не знижують рівень дисертаційної роботи і не впливають на загальну позитивну характеристику дисертації.

Загальний висновок.

Дисертаційна робота Голінка І.М. тема «Математичні моделі та оптимізація систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи. Дисертація є завершеним науковим дослідженням, спрямованим на вирішення важливої науково-прикладної проблеми розробки єдиного математичного апарату для опису, аналізу, ідентифікації та оптимізації штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів КІ. Використаний у роботі системний підхід при розробці та створена інформаційна СППР можуть використовуватись при дослідженні широкого класу складних технічних систем.

Вважаю, що за актуальністю обраної теми, достовірністю і обґрунтованістю висновків, обсягом та новизною теоретичних та прикладних досліджень, значимістю отриманих результатів для науки і практики дисертаційна робота повністю відповідає вимогам, визначеним пунктами 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року, а здобувач Голінко Ігор Михайлович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент:
професор кафедри математичної інформатики
факультету комп'ютерних наук та кібернетики
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка,
доктор технічних наук, професор _____ **Володимир ЗАСЛАВСЬКИЙ**

Підпис Заславського В.А. засвідчую

НАЧАЛЬНИК
ВІДДІЛУ КАДРІВ
О. Г. ІВАНЧЕНКО
08.06.2026

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Ідентифікаційний код 02070944
ВІДДІЛ КАДРІВ