

**Міністерство освіти та науки України  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна**

**Голінко Ігор Михайлович**

УДК 519.6

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ ШТУЧНОГО  
МІКРОКЛІМАТУ КІБЕРФІЗИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ  
ІНФРАСТРУКТУРИ**

**01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи**

**РЕФЕРАТ**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**доктора технічних наук**

**Харків – 2026**

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Офіційні  
опоненти:

член-кор. НАН України, доктор технічних наук, професор  
**Харченко Вячеслав Сергійович**,  
Національний аерокосмічний університет «Харківський  
авіаційний інститут», завідувач кафедри кібербезпеки та  
інтелектуальних інформаційних технологій;

доктор технічних наук, професор  
**Заславський Володимир Анатолійович**,  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
професор кафедри математичної інформатики;

доктор технічних наук, професор  
**Романова Тетяна Євгеніївна**,  
Інститут енергетичних машин і систем імені А. М. Підгорного  
НАН України, провідний науковий співробітник.

Захист відбудеться « 24 » червня 2026 р. о 14 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 64.051.09 у Харківському національному університеті імені  
В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна за адресою 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий «23» травня 2026 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 64.051.09



Євгеній МЕНЯЙЛОВ

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У сучасних умовах нестабільності глобального середовища та технологічних ризиків залежність суспільства від надійності функціонування об'єктів критичної інфраструктури (КІ) та їх безпека стає пріоритетним завданням розвитку держав всього світу. Особливої актуальності набуває питання розробки математичних моделей та обчислювальних методів для управління штучним мікрокліматом кіберфізичних об'єктів (КФО) КІ, що обумовлено потребою установ та підприємств КІ у забезпеченні параметрів мікроклімату для сталого функціонування людських, технічних і інформаційних компонентів в умовах концептуальної невизначеності. Проблематика дослідження має міждисциплінарний характер, що поєднує підходи та методи математичного моделювання, обчислювальної математики, інженерії, енергетики та інформаційних технологій.

Системи штучного мікроклімату відіграють ключову роль у підтриманні працездатності високочутливого електронного обладнання на об'єктах зв'язку, енергетики, інформаційної безпеки та управління. Окрім того, системи кондиціонування повітря (СКП) створюють комфортні умови мікроклімату для закладів охорони здоров'я, фінансової сфери, центрів соціальних послуг, підземної забудови, забезпечуючи працездатність персоналу та населення в умовах підвищеного навантаження або надзвичайних ситуацій. Сьогодні практично неможливо уявити сучасне існування суспільства без СКП, які забезпечують технологічні та гігієнічні вимоги до повітря у приміщеннях. Спектр систем штучного мікроклімату дуже різноманітний – від побутових до промислових кондиціонерів із високими вимогами до стабільності температури, вологості та низки інших параметрів повітря.

Адаптація штучного мікроклімату для промислових потреб об'єктів КІ набуває особливої актуальності, оскільки від цього в значній мірі залежить якість продукції, зменшення відходів, ефективність роботи працівників. Контроль мікроклімату сприяє підвищенню рівня фізичної та кібербезпеки, запобігаючи аваріям від перегріву обладнання або конденсації вологи. Таким чином, СКП слід розглядати як реальний інструмент надійного функціонування об'єктів КІ.

Однією із важливих характеристик СКП є її питоме енергоспоживання. З цих причин розробники СКП інтенсифікують процеси тепло- та масопередачі кліматичного обладнання, вдосконалюють технологічний процес (ТП) підготовки повітряної суміші. Результатом вдосконалення процесу кондиціонування повітря є більше декількох десятків технологій кондиціонування повітря, кожна із яких вимагає індивідуального підходу, оскільки відсутні уніфіковані методики управління СКП.

Досягнення високих показників ефективності сучасних підприємств та установ КІ можливе за умови інтегрування СКП у кіберфізичну систему (КФС), що передбачає аналіз структури системи управління для існуючих модифікацій кондиціонерів, розробки ефективних алгоритмів управління та методів інтегрування СКП у КФО КІ. СКП представляє собою специфічний об'єкт керування (ОК), у якому діапазон зміни вхідних та вихідних величин (навантажень, параметрів навколишнього середовища, відхилень регульованих

параметрів та інше) дуже широкий. В залежності від використаного обладнання, СКП як ОК є складним та багатомірним.

На сьогодні питання математичного моделювання та оптимізації СКП залишаються недостатньо дослідженими. Існуючі математичні моделі, як правило, орієнтовані на дослідження окремих компонентів кондиціонера, що не охоплює процес підготовки повітря як єдиного багатовимірного ОК. Відсутність комплексних математичних моделей дослідження кондиціонера в просторі станів ускладнює застосування сучасних чисельних методів оптимального керування та формування керуючих впливів, що враховують специфіку функціонування СКП в реальних умовах експлуатації. Розробка ефективних обчислювальних методів оптимізації СКП потребує створення адекватних математичних моделей дослідження цієї складної технічної системи із урахуванням специфіки її функціонування в конкретних умовах експлуатації.

Важливий виклик сьогодення для України полягає у розбудові системи управління активами КІ в умовах сучасних загроз та трансформацій. На загальнодержавному рівні функції управління об'єктами КІ нормативно закріплені за відповідними секторальними органами. На рівні окремих підприємств та установ відповідальність за забезпечення безперервного функціонування об'єктів КІ покладається на юридичних осіб або фізичних осіб-підприємців, які здійснюють господарську діяльність у відповідних сферах. Законодавчо в Україні активи КІ мають чотири рівні управління: загальнодержавний; галузевий; місцевий; об'єктовий. Проте, сьогодні зазначені рівні мають переважно адміністративний характер управління із обмеженим використанням сучасних математичних моделей, обчислювальних методів та цифрових інструментів, що істотно впливає на ефективність управлінських рішень, знижуючи їх оперативність, адаптивність та якість.

У цьому контексті аналіз наукових досліджень свідчить про високий потенціал використання обчислювальних методів математичного моделювання для систем підтримки прийняття рішень управління штучним мікрокліматом КФО КІ. Математичні моделі здатні інтегрувати різномірні аспекти, відображати мультидисциплінарний характер проблематики та враховувати невизначеності різної природи за допомогою чисельних методів. Їх використання створює основу для розроблення стійких та адаптивних стратегій управління, що визначає актуальність обраної теми дисертаційного дослідження.

Аналіз наукових праць вітчизняних та зарубіжних дослідників виявив ключову науково-прикладну проблему: наявні математичні моделі кліматичного обладнання описують лише процеси теплообміну окремих елементів кондиціонера та не охоплюють масообмінні процеси підготовки повітряної суміші, що унеможлиблює розгляд системи штучного мікроклімату як єдиного багатовимірного об'єкта керування. Відсутність комплексних математичних моделей у просторі станів, методів їх параметричної ідентифікації та чисельної оптимізації багатовимірних систем керування з урахуванням специфіки функціонування кліматичного обладнання в умовах параметричної та стохастичної невизначеності суттєво обмежує можливості проектування

ефективних систем управління штучним мікрокліматом кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури.

Таким чином, беручи до уваги викладені положення, існує об'єктивна необхідність розвитку методів математичного моделювання та обчислювальних підходів до управління систем штучного мікроклімату КФО КІ.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалась згідно із планами наукових досліджень КПІ ім. Ігоря Сікорського та МОН України у рамках держбюджетних тем:

- № 2539-п “Підвищення ефективності та надійності функціонування устаткування ТЕС та малої енергетики в змінних режимах експлуатації” (2012–2013 р., номер державної реєстрації 0112U001751);
- № 2716-п “Розробка засобів із продовження надійної та економічної експлуатації енергогенеруючих об'єктів у маневрених режимах” (2014–2015 р., номер державної реєстрації 0114U000564);
- № 2009-п “Управління енергоспоживанням об'єктів комунальної енергетики” (2017–2018 р., номер державної реєстрації 0117U000469);
- № 2313-п “Побудова інформаційно-аналітичної платформи для супроводження функціонування кіберфізичних систем” (2020–2022 р., номер державної реєстрації 0120U102298).

В зазначених науково-дослідних роботах автор брав участь як виконавець.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення якості функціонування систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури на основі розроблення єдиного математичного апарату – комплексних багатовимірних моделей у просторі станів, що враховують тепло- та масообмінні процеси підготовки повітряної суміші, методів параметричної ідентифікації та чисельної оптимізації систем керування в умовах параметричної та стохастичної невизначеності. Досягнення поставленої мети передбачає створення єдиного математичного апарату для опису, аналізу, ідентифікації та оптимізації процесів підготовки повітря для складних технічних систем штучного мікроклімату.

Основні задачі дисертаційної роботи наступні.

1. Запропонувати універсальний підхід до дослідження та управління системами штучного мікроклімату КФО КІ, а саме:
  - сформулювати концепцію керування СКП з урахуванням особливостей фізичних процесів підготовки повітряної суміші на кліматичному обладнанні;
  - розробити системний підхід до дослідження та управління СКП.
2. Побудувати динамічні моделі тепло- та масообмінних процесів в інженерних елементах кліматичних систем, що враховують багатовимірність фізичного процесу підготовки повітряної суміші на технологічному обладнанні кондиціонера.
3. Розробити методи ідентифікації параметрів математичних моделей кліматичного обладнання із використанням інструментарію цифрових двійників, експериментальних даних та симуляцій.
4. Побудувати комплексні моделі систем штучного мікроклімату у просторі станів, адаптовані для промислових та прецизійних кондиціонерів.

5. Розробити метод непрямого визначення вологовмісту повітря на основі параметрів температури та відносної вологості повітря, що вимірюються.
6. Вдосконалити методи параметричної оптимізації одновимірних динамічних систем із використанням регуляторів (ПІ-, ПІД- та їх модифікацій), що дозволяє мінімізувати керуючі впливи та похибки у часовій області.
7. Запропонувати чисельні методи оптимального керування багатовимірними динамічними системами, зокрема на основі лінійно-квадратичних, інтегральних та енергетичних критеріїв.
8. Провести чисельні експерименти, верифікацію розроблених моделей та дослідження стійкості системи, оцінити ефективність запропонованих методів оптимізації та керування в умовах розв'язання прикладних задач кондиціонування повітря.

*Об'єкт дослідження* – динамічні процеси тепло- та масообміну, які проходять у системах штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури.

*Предмет дослідження* – математичні моделі динамічних процесів тепло- та масообміну у кліматичному обладнанні кондиціонерів, чисельні методи параметричної ідентифікації та оптимального керування системами штучного мікроклімату, а також алгоритмічні засоби побудови цифрових двійників кліматичного обладнання.

**Методи досліджень**, застосовані в дисертаційній роботі, ґрунтуються на: апараті диференціальних рівнянь та математичному моделюванні у просторі станів для побудови динамічних моделей кліматичного обладнання СКП; методах чисельного моделювання для дослідження динамічних процесів тепло- та масообміну кліматичного обладнання кондиціонерів; методах комп'ютерного моделювання та ідентифікації під час розроблення та симуляції цифрових двійників кліматичного обладнання; методах чисельної оптимізації динамічних систем для розробки методів оптимального керування СКП та дослідження ефективності розроблених алгоритмів керування.

У дисертації отримано нові результати в галузі математичного моделювання, чисельних методів та інженерії оптимізації систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури.

**Наукова новизна одержаних результатів** визначається наступними теоретичними і практичними результатами, отриманими автором. Наведені результати в сукупності формують єдиний математичний апарат вирішення науково-прикладної проблеми моделювання та оптимізації систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури.

*Вперше:*

- 1) для промислових та прецизійних кондиціонерів запропоновано комплексні математичні моделі в просторі станів, отримані шляхом агрегування моделей кліматичного обладнання, які відрізняються від існуючих одночасним врахуванням тепло- та масообміну при підготовці повітряної суміші, що забезпечує можливість моделювання робочих режимів кондиціонера як єдиного багатовимірного об'єкта керування в реальному часі;

- 2) розроблено підхід до побудови цифрового двійника кліматичного обладнання, який ґрунтується на сумісному використанні аналітичної моделі, вимірних даних та методу пасивної ідентифікації, що відрізняється від відомих інтеграцією запропонованої чисельної процедури параметричної ідентифікації з адаптацією цифрової моделі обладнання та забезпечує відтворення динаміки стану кліматичного обладнання в режимі реального часу протягом усього терміну експлуатації обладнання;
- 3) запропоновано метод непрямого визначення вологовмісту повітря на основі вимірювань температури, відносної вологості та барометричного тиску, який на відміну від традиційного підходу прямого вимірювання, дозволяє математично розмежувати канали керування температурою та вологістю в багатовимірних системах керування кондиціонером, що підвищує точність підтримання нормованих параметрів штучного мікроклімату;
- 4) для систем штучного мікроклімату запропоновано методіку розроблення комплексної динамічної моделі шляхом агрегування динамічних моделей кліматичного обладнання у просторі станів, яка на відміну від традиційного підходу забезпечує отримання багатовимірної математичної моделі системи кондиціювання повітря для довільної технологічної схеми підготовки повітряної суміші;
- 5) розроблено чисельну процедуру параметричної оптимізації традиційних систем керування у часовій області, яка використовує часову перехідну характеристику об'єкта керування без попередньої апроксимації передатною функцією та на відміну від частотних і корневих методів синтезу дозволяє зменшити похибку моделювання системи за рахунок виключення етапу апроксимації об'єкта керування.

*Удосконалено та розвинуто:*

- 6) аналітичні моделі кліматичного обладнання, які відрізняються від існуючих застосуванням диференціального рівняння масообміну та введенням нелінійної залежності коефіцієнтів тепло- та масообміну від робочих режимів кондиціонера, що підвищило точність чисельного моделювання та забезпечило врахування вологості повітряної суміші;
- 7) метод пасивної ідентифікації невизначених параметрів математичних моделей кліматичного обладнання, заснований на чисельному пошуку коефіцієнтів тепло- та масообміну, що на відміну від класичного методу найменших квадратів не потребує лінеаризації моделі та забезпечує відносну похибку ідентифікації невизначених параметрів не більше 5%;
- 8) чисельну процедуру оптимізації багатовимірного лінійно-квадратичного регулятора для систем штучного мікроклімату, яка на відміну від класичної процедури враховує логіку вибору обладнання кондиціонера для здійснення оптимального керування залежно від поточного стану зовнішнього середовища, що дозволяє системі керування адаптуватися до зміни умов експлуатації;
- 9) методи параметричної оптимізації одновимірних традиційних систем керування за інтегральними критеріями якості, які у порівнянні з існуючими забезпечують вищу практичну точність розрахунків і зручність програмної реалізації в

широкому діапазоні зміни динамічних властивостей об'єкта керування в різних галузях промисловості.

**Практична цінність.** Отримані результати мають істотне практичне значення для розроблення, аналізу та оптимізації систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури. Запропоновані підходи та математичне забезпечення дають можливість створення енергоефективних, надійних і технологічно адаптивних інженерних рішень. Теоретичні положення та висновки роботи доведено до рівня конкретних технічних пропозицій і практичних рішень, придатних для безпосереднього впровадження в інженерну практику. До результатів, що мають найбільше практичне значення, належать:

- 1) комплексні математичні моделі промислових та прецизійних кондиціонерів, які можуть використовуватися проектними організаціями та службами автоматизації під час проектування і модернізації інженерних кліматичних систем для оцінювання їх динаміки, прогнозування режимів функціонування та обґрунтованого вибору структур і законів керування на об'єктах критичної інфраструктури;
- 2) цифрові двійники кліматичного обладнання, які можна впроваджувати в системи технічної діагностики, керування та моніторингу об'єктів, для яких критично важливим є оперативне відстеження параметрів мікроклімату; розроблена методика формує підґрунтя для розвитку й впровадження технологій Smart Building і Smart Infrastructure, зокрема для дистанційного керування, діагностики та оптимізації роботи інженерних кліматичних систем у режимі реального часу;
- 3) метод непрямого визначення вологовмісту повітря, який дає змогу суттєво покращити якість керування штучним мікрокліматом шляхом математичного розмежування каналів регулювання температури та вологості; метод може бути інтегрований у мікроконтролерні, SCADA та інформаційно-вимірвальні системи для оперативного контролю вологісних характеристик у промислових, складських і технологічних приміщеннях об'єктів критичної інфраструктури;
- 4) аналітичні моделі кліматичного обладнання, що забезпечують підвищення точності інженерних розрахунків під час проектування та експлуатації систем нагрівання, охолодження та зволоження повітря, що дає змогу оптимізувати вибір обладнання, раціоналізувати режими його роботи та зменшувати енергетичні витрати;
- 5) чисельні методи оптимізації одновимірних і багатовимірних цифрових систем керування мікрокліматом, які забезпечують можливість автоматизації процесів керування складними технічними системами та можуть бути інтегровані в мікроконтролерні автоматизовані системи керування технологічними процесами, вентиляційним та кліматичним обладнанням на підприємствах різних галузей промисловості.

Таким чином, результати роботи створюють наукове та інструментальне підґрунтя для підвищення ефективності систем штучного мікроклімату на всіх етапах їх життєвого циклу - від проектування та оптимізації до експлуатації й технічного обслуговування. Практична реалізація отриманих результатів підтверджена актами впровадження на Банкотно-монетному дворі Національного

банку України та на промислових підприємствах, що засвідчує їх готовність до широкого застосування на об'єктах критичної інфраструктури з підвищеними вимогами до енергоефективності, надійності та автономності.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення, розробки та висновки, сформульовані у дисертації та у публікаціях [8, 9, 12, 15, 23, 29, 35, 36, 43] є результатом самостійно проведених досліджень автора.

В роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать ряд наукових результатів та положень: [1] – розділ 5, де розглянуто підхід до чисельної оптимізації традиційних систем керування у часовій області; [2, 50, 51] – підхід до розробки моделі цифрового двійника в умовах концептуальної невизначеності та модель цифрового двійника електричного калорифера в просторі Лапласа; [3, 52] – архітектура інтелектуальної системи управління мікрокліматом промислового підприємства; [4, 32] – розподілена модель водяного калорифера; [5] – розробка дискретної моделі теплообмінного апарату; [6, 48] – процедура параметричної оптимізації цифрової системи керування у часовій області; [7] – розробка структури системи керування кондиціонером за методом “точки роси”; [10, 34] – розробка структури системи керування кондиціонером за методом “оптимального режиму”; [11] – інженерний метод параметричної оптимізації системи керування за каналом збурення; [13, 37, 47] – динамічна модель камери форсуночного зволожувача; [14, 39] – комплексна модель СКП із паровим зволожувачем та процедура синтезу лінійно-квадратичного цифрового регулятора для СКП із паровим зволожувачем; [16, 38] – методика розробки комплексної моделі СКП у просторі станів та процедура синтезу лінійно-квадратичного цифрового регулятора для СКП із форсуночним зволожувачем; [17, 40] – комплексна модель прецизійного кондиціонера із паровим зволожувачем та процедура синтезу лінійно-квадратичного цифрового регулятора для прецизійного кондиціонера із паровим зволожувачем; [18, 42] – математична модель мікроклімату промислового приміщення; [19, 46] – структура, критерії та алгоритми функціонування СППР для оптимізації процесів кондиціонування повітря; [20] – комплексна модель прецизійного кондиціонера із форсуночним зволожувачем та процедура синтезу лінійно-квадратичного цифрового регулятора для прецизійного кондиціонера із форсуночним зволожувачем; [21, 41] – математична модель електричного калорифера; [22] – підхід до розробки кіберфізичних систем з гарантованою живучістю та безпекою; [24] – аналітичний метод оптимізації цифрового регулятора із врахуванням стохастичних збурень; [25, 44] – динамічна модель парового зволожувача; [26, 49] – математична модель цифрового двійника електричного калорифера в просторі станів та алгоритм ідентифікації параметричної невизначеності математичної моделі електричного калорифера; [27] – експрес-метод оптимізації системи керування за каналом регулювання; [28] – інженерний метод параметричної оптимізації цифрової системи керування; [30] – розробка алгоритмічного забезпечення для мікропроцесорного контролера; [31] – розробка програмного забезпечення для мікропроцесорного контролера; [33] – метод чисельної оптимізації системи керування із врахуванням керуючого впливу; [45] – динамічна модель водяного калорифера у просторі станів.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації були представлені та оприлюднені на наукових, науково-технічних і науково-практичних конференціях:

- VII–XII Міжнародних науково-практичних конференціях “Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики” (КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, 2009 – 2014);
- XXI Міжнародній конференції з автоматичного управління “Автоматика–2014” (КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, 2014);
- X Міжнародній науково-практичній конференції “Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки” (КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, 2015);
- V Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з автоматичного управління (ХНТУ, м. Херсон: 2017);
- III–VI Міжнародних науково-практичних конференціях “Математика в сучасному технічному університеті” (НТУУ “КПІ”, м. Київ, 2014 – 2017);
- Міжнародній науковій конференції “Мікро- та нанонеоднорідні матеріали: моделі та експеримент” (ЦММППММ ім. Я.С. Підстригача, м. Львів, 2018);
- Міжнародній науковій конференції “Modeling, Control and Information Technologies” (НТВГП, м. Рівне, 2019);
- International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications 2019 – 2021 (Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, 2019 – 2021);
- International Workshop on Computer Modelling and Intelligent Systems 2020, 2023 (National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, 2020, 2023);
- IEEE 3rd International Conference on System Analysis and Intelligent Computing (Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, 2023);
- XXI, XXII Міжнародні науково-практичні конференції “Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем” (ДНУ, м. Дніпро, 2023, 2024).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 52 друкованих праці: монографія [1]; 2 розділи у колективних монографіях [2, 3], що індексуються SCOPUS; 20 статей у фахових виданнях України, в тому числі 17 статей у фахових виданнях [4 – 20], стаття у фаховому виданні категорії «А» [21], 2 статті у фахових виданнях категорії «Б» [22, 23]; 6 статей у закордонних виданнях, які індексуються SCOPUS [24 – 29]; 2 патенти на корисну модель [30, 31]; 21 публікація у матеріалах конференцій, в тому числі 6 публікацій, що індексуються SCOPUS [45 – 50].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, семи розділів, списку використаних джерел з 308 найменувань та додатків. Обсяг дисертації складає 321 сторінку основного тексту та 39 сторінки додатків, 100 рисунків, 16 таблиць.

Автор висловлює щире подяку д.т.н., проф., чл.-кор. НАН України **Панкратовій Наталії Дмитрівні** за наукове консультування при проведенні досліджень і виконанні роботи.

## ОСНОВНІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$c$  – теплоємність, Дж/(кг °С);  $\rho$  – щільність, кг/м<sup>3</sup>;  $F$  – площа поверхні, м<sup>2</sup>;  $M$  – маса, кг;  $N$  – потужність, Вт;  $P$  – тиск, Па;  $r$  – теплота пароутворення, Дж/кг;  $V$  – об'єм, м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup> °С);  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі, кг/(м<sup>2</sup> сек);  $E$  – коефіцієнт адіабатного зволоження;  $\theta$  – температура, °С;  $G$  – витрата, кг/сек;  $d$  – вологовміст повітря, г/кг;  $\varphi$  – відносна вологість повітря, %;  $h$  – ентальпія повітря, Дж/кг.

Індекси:  $A$  – повітря,  $M$  – металева поверхня теплообміну,  $P$  – пара,  $S$  – стінка приміщення,  $W$  – водяний теплоносій,  $K$  – калорифер,  $O$  – охолоджувач, ПЗ – паровий зволожувач.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено об'єкт, предмет, мету і завдання дисертаційної роботи. Наведено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів. Представлено зв'язок роботи з пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки, наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертації і публікації.

**Перший розділ** роботи присвячено аналізу сучасного стану забезпечення штучного мікроклімату об'єктів КІ. Наведено означення об'єкта КІ в розумінні країн Європейського Союзу та дано означення поняттю кіберфізичного об'єкта (КФО) КІ. КФО КІ – це спеціалізовані соціотехнічні системи, які інтегрують фізичні споруди, інженерно-технічні комплекси та цифрові інформаційно-керуючі модулі з метою забезпечення безперервного функціонування ключових соціальних, оборонних і технологічних процесів у штатних та надзвичайних умовах. Здійснено літературний огляд законодавчих актів України щодо класифікації об'єктів КІ. До активів КІ належать підприємства та установи, які функціонують в ключових галузях промисловості та сфері соціальних послуг. Більшість об'єктів КІ потребує стабільного мікроклімату у виробничих та громадських приміщеннях, створюючи умови для надійного функціонування технологічного обладнання та забезпечуючи комфортні умови мікроклімату для закладів соціальної сфери.

Забезпечення штучного мікроклімату КФО КІ набувають особливого значення у сучасних умовах зростання безпекових, соціальних і технічних викликів. Підтримання оптимальних параметрів штучного мікроклімату не лише сприяє збереженню фізіологічного здоров'я персоналу, але й позитивно впливає на його психоемоційний стан та працездатність. Проведено огляд міжнародних стандартів, що регламентують вимоги до штучного мікроклімату КФО КІ та узагальнено основні параметри штучного мікроклімату, до яких належать температура, вологість, концентрація CO<sub>2</sub>, витрата припливного повітря на одну особу, мінімальна площа життєвого простору на одну особу та тривалість забезпечення автономного функціонування об'єкта критичної інфраструктури. Адаптація цих параметрів повинна забезпечити працездатність людей у складних обставинах, зберегти їхній психоемоційний стан, підтримати моральну стійкість, а також забезпечити ефективне функціонування об'єктів КІ у критичних ситуаціях.

У розділі розглянуто класифікацію СКП. Відмічено, що кліматична техніка має розгалужену класифікацію в залежності від призначення кондиціонера, його розташування відносно приміщень, способу підготовки повітряної суміші, тощо. Проведено огляд особливостей процесу підготовки повітряної суміші на кліматичному обладнанні. Зроблено літературний огляд наявних моделей кліматичного обладнання. Сучасний науковий підхід до моделювання СКП використовує принцип декомпозиції, згідно якого СКП поділяється на функціональні елементи, які досліджуються для покращення їх характеристик та системи в цілому. Аналіз наявних моделей кліматичного обладнання показав, що існуючі математичні моделі враховують лише процеси теплообміну, оскільки для управління кондиціонерами найчастіше використовується метод “точки роси”, де температура є непрямим показником вологості. Відсутність моделей масообміну звужує коло досліджуваних задач, що впливає на якісні характеристики систем керування. Іншою слабкою стороною існуючих моделей є відсутність комплексних математичних моделей системного типу для підготовки повітря як єдиного багатовимірного об’єкта керування.

Проведено огляд методів керування СКП. Найбільше розповсюдження отримали метод керування СКП за температурою “точки роси” та метод керування за “оптимальним режимом”. Керування кондиціонером за методом “точки роси” характеризується значною перевитратою холодо- та теплоносія, що пояснюється охолодженням повітря до “точки роси” і повторним нагріванням на калорифері другого підігріву. Щоб уникнути додаткового охолодження та повторного нагрівання повітря реалізують процес керування за методом “оптимального режиму”. Для цього випадку термодинамічна модель СКП неперервно змінюється, забезпечуючи мінімальну витрату тепла та холоду. В таких системах керування необхідно враховувати взаємний вплив контурів стабілізації температури та відносної вологості. Проте, відсутність моделей масообміну для кліматичного обладнання звужує коло досліджуваних задач, що впливає на якісні характеристики систем керування.

У **другому розділі** розглядається системний підхід до управління штучним мікрокліматом об’єктів КІ. Формування штучного мікроклімату об’єктів КІ є багатокомпонентним процесом, який має свої відмінності від організації кліматичних умов у звичайних громадських, чи виробничих приміщеннях. Важливий виклик полягає у необхідності забезпечення стійкості функціонування об’єктів КІ. Мікроклімат об’єктів КІ повинен бути стабільним та контрольованим незалежно від умов зовнішнього середовища, сезонності, аварійних ситуацій, чи терористичних атак. Порушення мікроклімату може призвести до псування сировини та матеріалів, збою електронного обладнання, втрати чутливих даних у дата-центрах, або загрози життю людей в установах КІ. Призначення СКП для об’єктів КІ полягає у фізичному підтриманні параметрів мікроклімату середовища та забезпеченні сталого функціонування людських, машинних і інформаційних компонентів в умовах автономності та підвищеної концептуальної невизначеності.

Система штучного мікроклімату для КФО КІ об’єднує у собі взаємопов’язані підсистеми різної природи, а саме:

- технічна підсистема включає сенсорний контроль, систему кондиціонування та вентиляції повітря, резервне живлення та локальні обчислювальні вузли;
- екологічна підсистема відповідає за адаптивне управління мікрокліматом середовища, ергономікою простору, рівнем вібрацій і шуму із урахуванням енергообмежених режимів та мінімізації споживання ресурсів;
- соціальна підсистема охоплює процеси взаємодії людей в умовах замкненого простору (групову динаміку, психоемоційний стан, моральну втому);
- когнітивна підсистема працює як цифровий інтерфейс довіри, підтримує орієнтацію в ситуації, забезпечує комунікацію, рекомендовану поведінку, інтелектуальну фільтрацію інформації.

В роботі для вирішення питання штучного мікроклімату об'єктів КІ детально розробляється технічна підсистема з побудовою моделей, методів, технологій, обчислювальних модулів, алгоритмів управління для КФО КІ. Технічна підсистема виступає ядром системи штучного мікроклімату КФО КІ усього комплексу з забезпеченням живучості функціонування КФС. Також у роботі частково розглянуто екологічна підсистема, у якій реалізуються енергообмежуючі режими із мінімізацією споживання ресурсів.

На підставі аналізу проблематики досліджень розроблено та запропоновано методологію системного підходу до управління СКП в рамках КФО КІ. На рис. 1 наведено блок-схему системного підходу. Запропонований системний підхід ґрунтується на: комплексному використанні математичних моделей кліматичного обладнання, що відображують процес підготовки повітря на обладнанні кондиціонера; методах синтезу багатовимірних систем керування кондиціонерами; аналізі даних процесу кондиціонування для ідентифікації, адаптації та прогнозування функціонування СКП.

Системна методологія дослідження складається з трьох основних етапів. Оскільки досліджується складна динамічна система, послідовно розглядаються задачі системної декомпозиції, розроблення динамічних моделей, агрегування моделей та їх системна інтеграція. Відповідні етапи детально висвітлено у розділах дисертаційної роботи.

На першому етапі здійснюється аналіз технологічного процесу підготовки повітряної суміші. У розділі проведено системний аналіз існуючих технологій підготовки повітряної суміші. На основі систематизації типових технологічних рішень встановлено, що СКП слід розглядати як окремий клас об'єктів, які характеризуються високим ступенем структурної варіативності.

На другому етапі виконується системна декомпозиція СКП на функціональні блоки кліматичного обладнання. Розроблення аналітичних моделей для функціональних блоків розглянуто у третьому розділі. У четвертому розділі досліджено проблематику усунення концептуальної невизначеності моделей кліматичного обладнання та їх агрегування в комплексну модель кондиціонера.

Третій етап присвячено системній інтеграції СКП у КФО КІ. На цьому етапі розв'язується низка задач, пов'язаних зі статистичною обробкою вхідної інформації, фільтрацією завад, оцінюванням параметрів тепло- та масообміну для ідентифікації математичних моделей кліматичного обладнання, а також

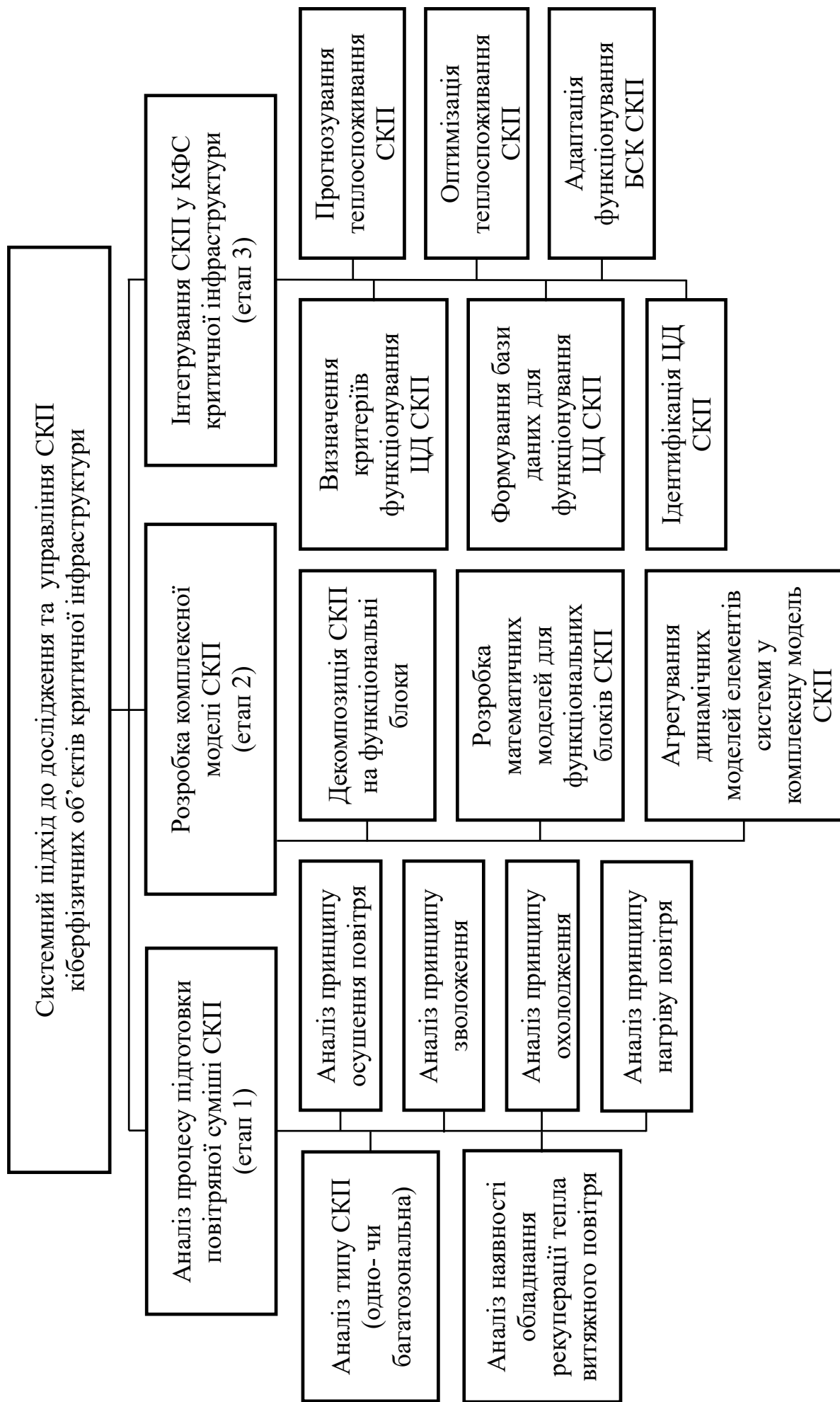


Рис. 1. Блок-схема системного підходу до управління СКП

оптимізацією та адаптацією функціонування багатовимірних систем керування (БСК) кондиціонерами.

З метою практичної реалізації першого етапу запропонованого системного підходу в роботі проведено аналіз існуючих технологій підготовки повітря. На основі узагальнення типових технологічних рішень ідентифіковано декілька десятків варіантів реалізації технологічної підготовки повітряної суміші на обладнанні кондиціонерів. Встановлено, що СКП характеризуються властивостями множинності, цілісності, емерджентності, еквіпотенційності та синергізму, що дає підстави віднести їх до категорії складних технічних систем.

До теперішнього часу не існує єдиної класифікації СКП, оскільки відомі автори, такі як Ю.С. Бондар, О.І. Липа, О.М. Белова, В.М. Богословський, О.О. Гололін, О.В. Нестеренко, Ю.В. Стефанов, П.В. Участкін та інші пропонують різні методики класифікації систем кондиціонування. Віддати перевагу одній із класифікацій важко. Кожна класифікація по-своєму відображує різноманітність технологічних рішень СКП. Більшість класифікацій обумовлює тісну залежність методів керування від технології підготовки повітря на обладнанні кондиціонера. У дисертаційній роботі запропоновано класифікацію СКП як об'єкта управління, яку зображено на рис. 2.



Рис. 2. Класифікація СКП як об'єкта управління

Блоки 1 – 3 класифікації являються суто технологічними та характеризують технологію кондиціонування повітря. За даними блоками класифікації можна виділити більше двох десятків технологічних схем кондиціонування повітря, кожна із яких має індивідуальні особливості реалізації в залежності від потреб замовника. Четвертий блок класифікації характеризує режим функціонування СКП. Для промислових об'єктів КІ система управління кондиціонером працює в режимі стабілізації параметрів мікроклімату у приміщенні, компенсуючи природні та виробничі збурення. Для об'єктів КІ соціального призначення система управління кондиціонером адаптує мікроклімат до комфортного сприйняття людиною.

Значний вклад в розробку теоретичних основ керування СКП внесли роботи Г.В. Архіпова, Б.В. Баркалова, Ю.С. Бондаря, В.Н. Богословського, А.Я. Креслиня, С.В. Нефелова, М.Б. Халамайзера, R.W. Haines, J.I. Levenhagen, Z. Falko, H. Zhang, F. Ziller та інших. Аналіз літературних джерел виділяє якісне і кількісне керування процесом кондиціонування, де використовуються методи “точки роси” та “оптимального режиму”.

Аналіз робіт вказаних авторів виділяє принцип управління СКП, який ґрунтується на термодинамічній моделі системи кондиціонування в координатах температури та відносної вологості повітря. Використання даного принципу дозволило всебічно дослідити СКП, де реалізується метод керування за температурою “точки роси”. Керування за методом “точки роси” характеризується перевитратою холодо- та теплоносія. Щоб уникнути охолодження із повторним нагріванням повітря використовують керування за “оптимальним режимом”. У цьому випадку термодинамічна модель СКП неперервно змінюється, забезпечуючи мінімальну витрату тепла та холоду. Для таких систем керування необхідно враховувати взаємний вплив контурів регулювання температури та вологості. Наявні на сьогодні підходи до розв’язання завдання управління СКП за методом “оптимального режиму” не відповідають сучасним вимогам.

Сучасні системи керування кондиціонерами стабілізують температуру та відносну вологість у приміщенні або на виході центрального кондиціонера. Із експериментальних досліджень відомо:

- між температурою та відотною вологістю повітря існує однозначна нелінійна залежність;
- значення вологовмісту залишається постійним при нагріванні повітря, в той час, як відносна вологість зменшується (зміна температури на 1 °C приводить до зміни відносної вологості близько 3 %);
- при охолодженні повітря (до моменту конденсації вологи) вологовміст також залишається постійним.

Тому, використання у контурі регулювання вологовмісту повітря замість відносної вологості дозволяє розмежувати вплив між контурами стабілізації температури та вологості для єдиного матеріального потоку повітря.

Для практичного визначення вологовмісту запропоновано математичну модель непрямого контролю вологовмісту

$$d = \frac{83045.9 \cdot \varphi \cdot 10^{\frac{156+8.12 \theta}{236+\theta}}}{P_{\theta} - 133.3 \cdot \varphi \cdot 10^{\frac{156+8.12 \theta}{236+\theta}}}, \quad (1)$$

яку отримано на основі відомих емпіричних залежностей. Модель (1) відображає нелінійну залежність між вологовмістом  $d$  та відотною вологістю  $\varphi$  повітря із врахуванням температури  $\theta$  та барометричного тиску  $P_{\theta}$ .

У розділі запропоновано нову концепцію управління СКП, яка передбачає розв’язання задач керування на основі агрегування кліматичного обладнання у складну СКП та відрізняється від традиційного підходу за такими ознаками:

- 1) дослідження динаміки тепло- та масообміну кліматичного обладнання в координатах температури та вологовмісту повітря із подальшим створенням комплексних моделей СКП як єдиного багатовимірного ОК;
- 2) розмежування взаємного впливу між контурами регулювання температури та вологості;
- 3) використання сучасних алгоритмів синтезу оптимальної структури багатовимірної системи керування;
- 4) інтеграція СКП в архітектуру КФО КІ.

**Третій розділ** присвячено розробці динамічних моделей тепло- та масообміну для основного кліматичного обладнання СКП. Це другий етап системного підходу, що запропонований у дисертації. Побудова моделей здійснюється на основі аналітичного моделювання з використанням фундаментальних законів тепло- і масообміну, які описують процеси обробки повітряної суміші на обладнанні кондиціонера.

Розроблено математичну модель водяного охолоджувача, яка містить чотири динамічних елементи та враховує наявність фазових перетворень повітряної суміші:

$$\begin{cases} T_W \frac{d \Delta \theta_W}{dt} + \Delta \theta_W = k_0 \Delta \theta_{W0} + k_1 \Delta \theta_M + k_2 \Delta G_W; \\ T_M \frac{d \Delta \theta_M}{dt} + \Delta \theta_M = k_3 \Delta \theta_W + k_4 \Delta \theta_A; \\ T_A \frac{d \Delta \theta_A}{dt} + \Delta \theta_A = k_5 \Delta \theta_{A0} + k_6 \Delta \theta_M + k_7 \Delta G_A + k_8 \Delta d_{A0} + k_9 \Delta d_A; \\ T_d \frac{d \Delta d_A}{dt} + \Delta d_A = k_{10} \Delta d_{A0} + k_{11} \Delta G_A + k_{12} \Delta \theta_M; \end{cases} \quad (2)$$

де  $K_W = c_W G_W + \alpha_0 F_0$ ,  $T_W = c_W M_W / K_W$ ,  $k_0 = c_W G_W / K_W$ ,  $k_1 = 1 - k_0$ ,

$k_2 = c_W (\theta_{W0} - \theta_W) / K_W$ ;  $K_M = \alpha_0 F_0 + \alpha_1 F_1$ ,  $T_M = c_M M_M / K_M$ ,  $k_3 = \alpha_0 F_0 / K_M$ ,

$k_4 = 1 - k_3$ ;  $K_A = c_A G_A + \alpha_1 F_1$ ,  $T_A = \frac{c_A M_A}{K_A}$ ,  $k_5 = \frac{c_A G_A}{K_A}$ ,  $k_6 = \frac{\alpha_1 F_1}{K_A} \left( 1 + \frac{r A}{1000 c_A} \right)$ ,

$k_7 = \frac{1}{K_A} \left[ c_A (\theta_{A0} - \theta_A) + \frac{r}{1000} (d_{A0} - d_A) \right]$ ,  $k_8 = \frac{r G_A}{1000 K_A}$ ,  $k_9 = -\frac{r}{1000 K_A} \left( G_A + \frac{\alpha_1 F_1}{c_A} \right)$ ;

$K_d = G_A + \frac{\alpha_1 F_1}{c_A}$ ,  $T_d = \frac{\omega V_A}{K_d}$ ,  $k_{10} = \frac{G_A}{K_d}$ ,  $k_{11} = \frac{d_{A0} - d_A}{K_d}$ ,  $k_{12} = \frac{\alpha_1 F_1 A}{c_A K_d}$ . (3)

Модель (2) представлено у просторі станів:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}_1 \mathbf{U}_1 + \mathbf{B}_2 \mathbf{F}_2 + \mathbf{B}_3 \mathbf{F}_3; \quad (4)$$

$$\text{де } \mathbf{X}' = \begin{bmatrix} \Delta \theta'_A \\ \Delta d'_A \\ \Delta \theta'_M \\ \Delta \theta'_W \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1/T_A & k_9/T_A & k_6/T_A & 0 \\ 0 & -1/T_d & k_{12}/T_d & 0 \\ k_4/T_M & 0 & -1/T_M & k_3/T_M \\ 0 & 0 & k_1/T_W & -1/T_W \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_A \\ \Delta d_A \\ \Delta \theta_M \\ \Delta \theta_W \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ k_2/T_W \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} k_5/T_A & k_8/T_A \\ 0 & k_{10}/T_d \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} k_7/T_A \\ k_{11}/T_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{U}_1 = \Delta G_W, \mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} \Delta \theta_{A0} \\ \Delta d_{A0} \end{bmatrix}, \mathbf{F}_3 = \Delta G_A. \quad (5)$$

Модель (2) представлено у вигляді матричної передатної функції:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W} \mathbf{U}; \quad (6)$$

$$\text{тут } \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_A \\ \Delta d_A \end{bmatrix}, \mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} & W_{14} & W_{15} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} & W_{24} & W_{25} \end{bmatrix}, \mathbf{U} = [\Delta \theta_{A0} \Delta d_{A0} \Delta G_A \Delta \theta_{W0} \Delta G_W]^T;$$

$$\begin{aligned} A(p) &= a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1, W_{11} = (b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0) / A(p), \\ W_{12} &= (b_7 p^3 + b_6 p^2 + b_5 p + b_4) / A(p), W_{13} = (b_{11} p^3 + b_{10} p^2 + b_9 p + b_8) / A(p), \\ W_{14} &= (b_{13} p + b_{12}) / A(p), W_{15} = (b_{15} p + b_{14}) / A(p), W_{21} = (c_1 p + c_0) / A(p), \\ W_{22} &= (c_5 p^3 + c_4 p^2 + c_3 p + c_2) / A(p), W_{23} = (c_9 p^3 + c_8 p^2 + c_7 p + c_6) / A(p), \\ W_{24} &= (c_{11} p + c_{10}) / A(p), W_{25} = (c_{13} p + c_{12}) / A(p); \end{aligned} \quad (7)$$

$a_1 \dots a_4, b_0 \dots b_{14}, c_0 \dots c_{13}$  визначаються за коефіцієнтами (3).

Отримано динамічну модель форсуночного зволожувача, яка містить три динамічних елементи, враховує тепломасообмін повітряної суміші та може використовуватися для моделювання процесів у камері сотового зволоження:

$$\begin{cases} T_A \frac{d \Delta \theta_A}{dt} + \Delta \theta_A = k_0 \Delta \theta_{A0} + k_1 \Delta G_A + k_2 \Delta \theta_W + k_3 \Delta d_{A0} + k_4 \Delta d_A; \\ T_d \frac{d \Delta d_A}{dt} + \Delta d_A = k_5 \Delta G_A + k_6 \Delta \theta_{A0} + k_7 \Delta \theta_A; \\ T_W \frac{d \Delta \theta_W}{dt} + \Delta \theta_W = k_8 \Delta \theta_{W0} + k_9 \Delta G_{W0} + k_{10} \Delta \theta_{A0} + k_{11} \Delta \theta_A. \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{Де } K_A = G_A c_A + G_W c_W / E, T_A = c_A M_A / K_A, k_0 = \frac{1}{K_A} \left[ c_A G_A - \left( 1 - \frac{1}{E} \right) c_W G_W \right],$$

$$k_1 = \frac{1}{K_A} \left[ c_A (\theta_{A0} - \theta_A) + \frac{r}{1000} (d_{A0} - d_A) \right], k_2 = c_W G_W / K_A, k_3 = r G_A / (1000 K_A), k_4 = -k_3;$$

$$T_d = \omega V_A / G_A, k_5 = \frac{1}{G_A} \left[ \left( 1 - \frac{1}{E} \right) A \theta_{A0} + \frac{A}{E} \theta_A + B - d_A \right], k_6 = A \left( 1 - \frac{1}{E} \right), k_7 = \frac{A}{E}; \quad (9)$$

$$K_W = G_{W0} + G_W, T_W = M_W / K_W, k_8 = G_{W0} / K_W, k_9 = (\theta_{W0} - \theta_W) / K_W,$$

$$k_{10} = (1 - 1/E)(G_W / K_W), k_{11} = G_W / (E K_W).$$

Модель (8) представлено у просторі станів (4), де

$$\mathbf{X}' = \begin{bmatrix} \Delta \theta'_A \\ \Delta d'_A \\ \Delta \theta'_W \end{bmatrix}; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1/T_A & k_4/T_A & k_2/T_A \\ k_7/T_d & -1/T_d & 0 \\ k_{11}/T_W & 0 & -1/T_W \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_A \\ \Delta d_A \\ \Delta \theta_W \end{bmatrix}; \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_8/T_W \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} k_0/T_A & k_3/T_A \\ k_6/T_d & 0 \\ k_8/T_W & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} k_1/T_A & 0 \\ k_5/T_d & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{U}_1 = \Delta\theta_{W0}; \mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} \Delta\theta_{A0} \\ \Delta d_{A0} \end{bmatrix}; \mathbf{F}_3 = \Delta G_A. \quad (10)$$

Модель (8) представлено у вигляді матричної передатної функції (6), де

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \Delta\theta_A \\ \Delta d_A \end{bmatrix}, \mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} & W_{14} & W_{15} \\ W_{21} & 0 & W_{23} & W_{24} & W_{25} \end{bmatrix}, \mathbf{U} = [\Delta\theta_{A0} \Delta d_{A0} \Delta G_A \Delta\theta_{W0} \Delta G_{W0}]^T;$$

$$\begin{aligned} A(p) &= a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1, W_{11} = (b_2 p^2 + b_1 p + b_0)/A(p), \\ W_{12} &= (b_5 p^2 + b_4 p + b_3)/A(p), W_{13} = (b_8 p^2 + b_7 p + b_6)/A(p), W_{14} = (b_{10} p + b_9)/A(p), \\ W_{15} &= (b_{12} p + b_{11})/A(p), W_{21} = (c_2 p^2 + c_1 p + c_0)/A(p), W_{22} = (c_4 p + c_3)/A(p), \\ W_{23} &= (c_7 p^2 + c_6 p + c_5)/A(p), W_{24} = c_8/A(p); W_{25} = c_9/A(p); \end{aligned} \quad (11)$$

$a_1 \dots a_3, b_0 \dots b_{12}, c_0 \dots c_9$  визначаються за коефіцієнтами (9).

Запропоновано динамічну модель камери парового зволоження, яка містить два динамічних елементи, що описується системою диференційних рівнянь:

$$\begin{cases} T_A \frac{d\Delta\theta_A}{dt} + \Delta\theta_A = k_0 \Delta\theta_{A0} + k_1 \Delta G_A + k_2 \Delta N_E + k_3 \Delta d_{A0} + k_4 \Delta d_A; \\ T_d \frac{d\Delta d_A}{dt} + \Delta d_A = k_5 \Delta d_{A0} + k_6 \Delta G_A + k_7 \Delta N_E; \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{де } T_A &= \frac{M_A}{G_A}; T_d = \frac{\omega V_A}{G_A}; k_0 = 1; k_1 = \frac{1}{G_A} \left[ \theta_{A0} - \theta_A + \frac{r(d_{A0} - d_A)}{1000 c_A} \right]; k_2 = \frac{r}{c_A G_A (r - c_W \theta_{W0})}; \\ k_3 &= \frac{r}{1000 c_A}; k_4 = -k_3; k_5 = 1; k_6 = \frac{d_{A0} - d_A}{G_A}; k_7 = \frac{1000}{G_A (r - c_W \theta_{W0})}. \end{aligned} \quad (13)$$

Модель (12) представлено у просторі станів (4), де

$$\begin{aligned} \mathbf{X}' &= \begin{bmatrix} \Delta\theta'_A \\ \Delta d'_A \end{bmatrix}; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1/T_A & k_4/T_A \\ 0 & -1/T_d \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta\theta_A \\ \Delta d_A \end{bmatrix}; \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} k_2/T_A \\ k_7/T_d \end{bmatrix}, \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} k_0/T_A & k_3/T_A \\ 0 & k_5/T_d \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_3 &= \begin{bmatrix} k_1/T_A \\ k_6/T_d \end{bmatrix}, \mathbf{U}_1 = \Delta N_E, \mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} \Delta\theta_{A0} \\ \Delta d_{A0} \end{bmatrix}, \mathbf{F}_3 = \Delta G_A. \end{aligned} \quad (14)$$

Модель (12) представлено у вигляді матричної передатної функції (6), де

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \Delta\theta_A \\ \Delta d_A \end{bmatrix}, \mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} & W_{14} & 0 \\ 0 & W_{22} & W_{23} & W_{24} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{V}^T = [\Delta\theta_{A0} \Delta d_{A0} \Delta G_A \Delta N_E 0];$$

$$\begin{aligned} A(p) &= a_2 p^2 + a_1 p + 1, W_{11} = (b_1 p + b_0)/A(p), W_{12} = (b_3 p + b_2)/A(p), \\ W_{13} &= (b_5 p + b_4)/A(p), W_{14} = (b_7 p + b_6)/A(p); \end{aligned} \quad (15)$$

$a_1, a_2, b_0 \dots b_7$  визначаються за коефіцієнтами (13).

Розроблено динамічну модель приміщення, яка містить три динамічних елементи та враховує тепломасообмін повітряної суміші:

$$\begin{cases} T_A \frac{d \Delta \theta_A}{dt} + \Delta \theta_A = k_0 \Delta \theta_{A0} + k_1 \Delta G_A + k_2 \Delta \theta_S + k_3 \Delta N_E; \\ T_S \frac{d \Delta \theta_S}{dt} + \Delta \theta_S = k_4 \Delta \theta_A + k_5 \Delta \theta_N; \\ T_d \frac{d \Delta d_A}{dt} + \Delta d_A = k_6 \Delta d_{A0} + k_7 \Delta G_A; \end{cases} \quad (16)$$

тут  $K_A = c_A G_A + \alpha_0 F_0$ ,  $K_S = \alpha_0 F_0 + \alpha_1 F_1$ ,  $T_A = c_A M_A / K_A$ ,  $T_S = c_S M_S / K_S$ ,  
 $T_d = \omega V_A / G_A$ ;  $k_0 = c_A G_A / K_A$ ,  $k_1 = (\theta_{A0} - \theta_A) / K_A$ ,  $k_2 = \alpha_0 F_0 / K_A$ ,  $k_3 = 1 / K_A$ ,  
 $k_4 = \alpha_0 F_0 / K_S$ ,  $k_5 = 1 - k_4$ ,  $k_6 = 1$ ,  $k_7 = (d_{A0} - d_A) / G_A$ . (17)

Модель (16) представлено у просторі станів (4), де

$$\mathbf{X}' = \begin{bmatrix} \Delta \theta'_A \\ \Delta d'_A \\ \Delta \theta'_S \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1/T_A & 0 & k_2/T_A \\ 0 & -1/T_d & 0 \\ k_4/T_S & 0 & -1/T_S \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_A \\ \Delta d_A \\ \Delta \theta_S \end{bmatrix}, \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} k_3/T_A & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & k_5/T_S \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} k_0/T_A & 0 \\ 0 & k_6/T_d \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} k_1/T_A \\ k_7/T_d \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{U}_1 = \mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} \Delta N_E \\ \Delta \theta_N \end{bmatrix}; \mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} \Delta \theta_{A0} \\ \Delta d_{A0} \end{bmatrix}; \mathbf{F}_3 = \Delta G_A. \quad (18)$$

Модель (16) представлено у вигляді матричної передатної функції (6), де

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_A \\ \Delta d_A \end{bmatrix}, \mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_{11} & 0 & W_{13} & W_{14} & W_{15} \\ 0 & W_{22} & W_{23} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{U} = [\Delta \theta_{A0} \Delta d_{A0} \Delta G_A \Delta N_E \Delta \theta_N]^T;$$

$$A(p) = a_2 p^2 + a_1 p + 1, W_{11} = (b_1 p + b_0) / A(p), W_{13} = (b_3 p + b_2) / A(p),$$

$$W_{14} = (b_5 p + b_4) / A(p), W_{15} = b_6 / A(p), W_{22} = k_6 / (T_d p + 1), W_{23} = k_7 / (T_d p + 1). \quad (19)$$

$a_1, a_2, b_0 \dots b_6$  визначаються за коефіцієнтами (17).

Взагалі, у роботі розроблено сім аналітичних моделей: електричного та водяного калориферів; водяного охолоджувача; форсуночного та парового зволожувачів; камери змішування повітря; приміщення. Будь-яку із моделей кліматичного обладнання кондиціонера можна розглядати як типовий динамічний елемент у СКП із п'ятьма входами  $\mathbf{U} = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \ u_5]^T$  та двома виходами  $\mathbf{Y} = [y_1 \ y_2]^T$ . Динамічні моделі представлені залежностями – у просторі станів (4) та матричною передатною функцією (6). Для всіх моделей вхідними змінними  $u_1$  та  $u_2$  є початкова температура  $\Delta \theta_{A0}$  та вологовміст  $\Delta d_{A0}$  повітря, що надходить на обладнання, вихідними  $y_1$  та  $y_2$  – кінцева температура  $\Delta \theta_A$  та вологовміст  $\Delta d_A$ .

У четвертому розділі розглянуто підхід до подолання концептуальної невизначеності аналітичних моделей, побудованих у третьому розділі, а також розглянуто методику розроблення комплексних моделей СКП із наявних моделей кліматичного обладнання.

Практика застосування аналітичних моделей показує, що адекватне відтворення фізичних процесів у таких моделях є рідкісним явищем, що зумовлено значним рівнем концептуальної невизначеності на етапі їх розроблення. Для забезпечення необхідного мікроклімату СКП об'єднують в собі механічні,

термодинамічні, електронні та інформаційні процеси, що ускладнює побудову коректних аналітичних моделей кліматичного обладнання.

У розділі проведено класифікацію параметрів аналітичних моделей кліматичного обладнання, узагальнену блок-схему якої представлено на рис. 3. Параметри аналітичних моделей, що отримані у третьому розділі, умовно згруповано таким чином: габаритні розміри (блок 1); теплофізичні параметри конструкційних матеріалів (блок 2); теплофізичні параметри матеріальних потоків (блок 3); параметри тепло- та масообміну між матеріальними потоками (блок 4).



Рис. 3. Узагальнена блок-схема параметрів моделей кліматичного обладнання

Для блоків 1 – 3 даної класифікації чисельні значення теплофізичних величин із достатньою інженерною точністю визначаються із довідників. Числові значення коефіцієнтів тепло- та масовіддачі (блок 4) залежить від низки факторів, зокрема: температури, вологості та витрати повітря; температури та витрати тепло- або холодоносія апарату; конструктивних особливостей поверхні теплообміну та низки інших факторів. З огляду на велику кількість чинників, що впливають на числові значення коефіцієнтів тепло- та масовіддачі, ці параметри слід віднести до концептуальної невизначеності аналітичних моделей кліматичного обладнання. Вони становлять єдиний цілісний комплекс взаємозалежних величин, які мають неоднозначний та суперечливий вплив на динамічні властивості кліматичного обладнання. Ці коефіцієнти є предметом досліджень у теплотехніці, їх пошук ґрунтується на теорії подібності та експериментальних дослідженнях.

Ідентифікацію невизначених параметрів аналітичних моделей запропоновано проводити на основі пасивного експерименту із застосуванням інструментарію цифрового двійника (ЦД). Для моделей (4), (6) ідентифікації підлягають коефіцієнти тепло- та масообміну. На рис. 4 зображена структурна схема параметричної ідентифікації невизначених параметрів аналітичних моделей із використанням методу найменших квадратів (МНК). Вихідні змінні процесу кондиціонування  $X$  ( $Y$ ) та керуючий вплив  $U$  вимірюється за допомогою датчиків КФС. В якості критерію ідентифікації використано середньоквадратичне відхилення, що мінімізує квадрат помилки вимірних значень змінних процесу кондиціонування повітря  $X$  ( $Y$ ) та оцінок вектора  $\bar{X}$  ( $\bar{Y}$ ) аналітичної моделі при однаковому вхідному впливі  $U$ . Для моделі (4) критерій якості має вигляд:

$$I = M \left\{ \int_{t_0}^{t_0+t_f} (\mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}})^T \mathbf{Q} (\mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}}) dt \right\} \rightarrow \min; \quad (20)$$

для моделі (6)

$$I = M \left\{ \int_{t_0}^{t_0+t_f} (\mathbf{Y} - \bar{\mathbf{Y}})^T \mathbf{Q} (\mathbf{Y} - \bar{\mathbf{Y}}) dt \right\} \rightarrow \min; \quad (21)$$

тут  $t_0$  – початковий час тренду,  $t_f$  – тривалість вибірки тренду,  $\mathbf{Q}$  – одинична квадратна матриця,  $T$  – оператор транспонування матриць,  $M$  – оператор математичного очікування, який враховує промислові збурення.

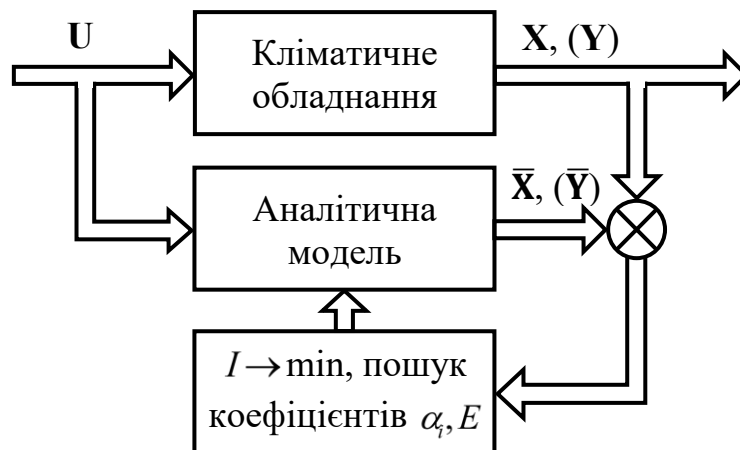


Рис. 4. Структурна схема параметричної ідентифікації аналітичної моделі кліматичного обладнання

У розділі розглянуто чисельний алгоритм МНК для пасивної ідентифікації невизначених параметрів аналітичних моделей. Ідентифікація аналітичних моделей не є самоціллю. Надалі ці моделі використовуються для побудови ЦД кліматичного обладнання, який використовується у КФС КІ для оптимізації та прогнозування енергоспоживання СКП, адаптації системи управління кондиціонером до зовнішнього середовища та багато іншого. У розділі представлено підхід до проектування ЦД кліматичного обладнання кондиціонера. Запропонований підхід включає такі основні етапи:

- 1) ідентифікація невизначених параметрів аналітичних моделей кліматичного обладнання;
- 2) перехід від неперервної моделі до її дискретного аналога, що реалізує функції ЦД кліматичного обладнання;
- 3) адаптація ЦД – у разі зниження точності функціонування ЦД (наприклад, внаслідок нестационарності процесів кондиціонування) здійснюється повернення до етапу 1 з метою уточнення параметрів.

У розділі наведено приклади розробки ЦД кліматичного обладнання, де розкривається концептуальна невизначеність аналітичних моделей за запропонованим підходом. Як приклад, на рис. 5 наведено ілюстрацію основних етапів розробки ЦД для водяного нагрівача CVP2-HW2. На рис. 5, а наведено еталонні дані та часові характеристики змінних стану аналітичної моделі електричного водонагрівача HE 36/2 до ідентифікації невизначених параметрів.

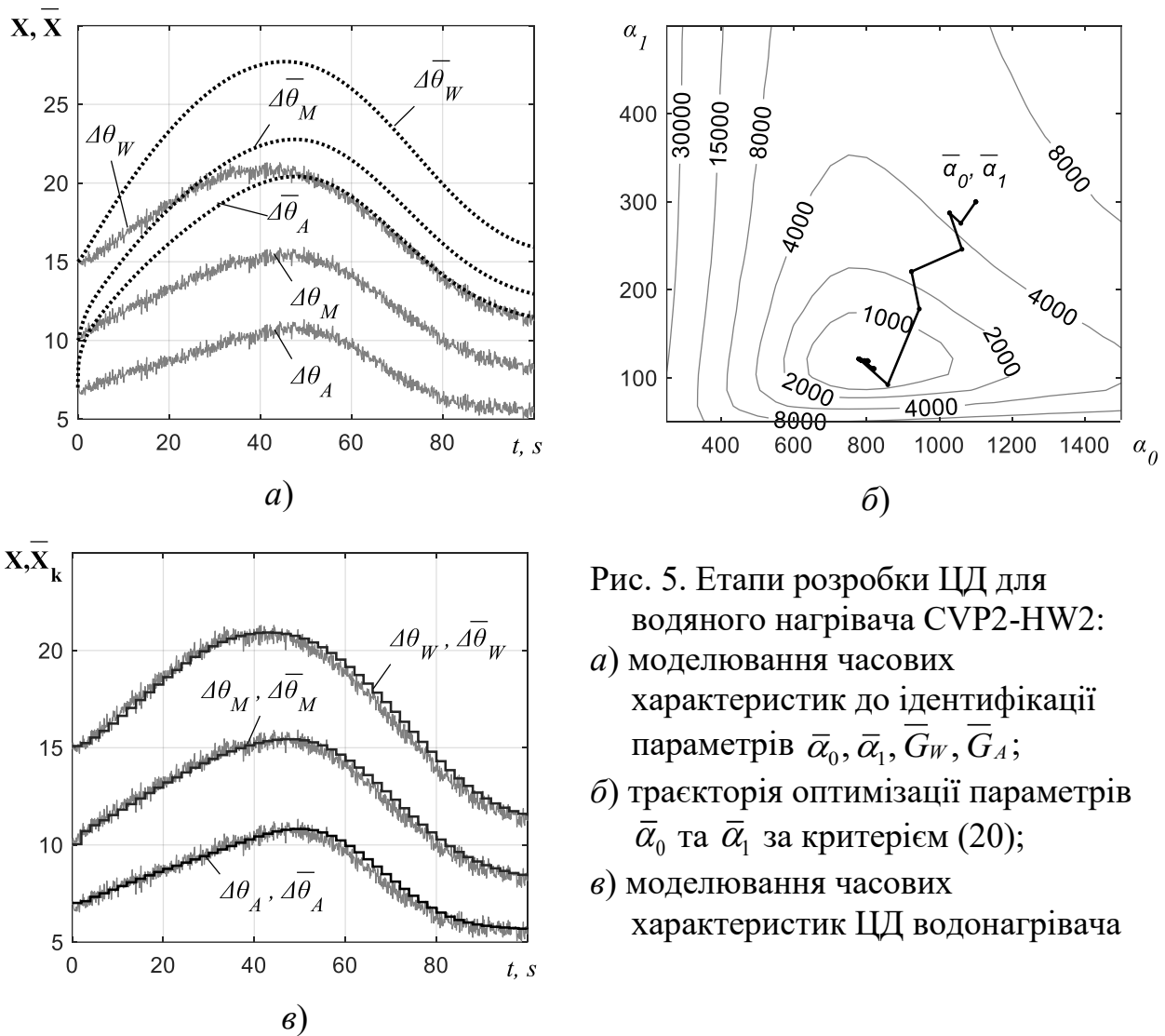


Рис. 5. Етапи розробки ЦД для водяного нагрівача CVP2-HW2:  
 а) моделювання часових характеристик до ідентифікації параметрів  $\bar{\alpha}_0, \bar{\alpha}_1, \bar{G}_W, \bar{G}_A$ ;  
 б) траєкторія оптимізації параметрів  $\bar{\alpha}_0$  та  $\bar{\alpha}_1$  за критерієм (20);  
 в) моделювання часових характеристик ЦД водонагрівача

Далі, на рис. 5, б зображено траєкторію оптимізації коефіцієнтів тепловіддачі  $\bar{\alpha}_0$  та  $\bar{\alpha}_1$  за критерієм (20), а на рис. 5, в наведено часові характеристики для еталонних змінних стану  $X$  та змінних стану ЦД водяного калорифера  $\bar{X}_k$  після ідентифікації невизначених параметрів. Для усіх розглянутих у дисертації прикладів відносна

похибка пошуку невизначених параметрів аналітичних моделей кліматичного обладнання не перевищила 5%.

У розділі сформульована методика розробки комплексної моделі кондиціонера як єдиного багатовимірної ОК. Для запропонованої методики використовуються динамічні моделі кліматичного обладнання у просторі станів (4). Для розробки комплексної динамічної моделі кондиціонера в просторі станів

$$\begin{cases} \mathbf{X}' = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{D}\mathbf{F}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X}; \end{cases} \quad (22)$$

необхідно враховувати послідовність динамічних моделей згідно технологічної схеми кондиціонера та дотримуватися такої послідовності дій.

1. Визначити кількісний склад кліматичного обладнання  $N$  для конкретного кондиціонера, де  $N$  – кількість одиниць обладнання.
2. Для наявного обладнання, вибрати необхідні моделі кліматичного обладнання у просторі станів.
3. Визначити збурюючі та регулюючі канали впливу для технологічної системи кондиціонера  $\mathbf{U}_1^i, \mathbf{F}_2^i, \mathbf{F}_3^i$ , де  $i = 1 \dots N$ , використовуючи математичні моделі кліматичного обладнання, що наведені у розділу 3.
4. Для комплексної моделі СКП сформувати вектор керування  $\mathbf{U}$  та збурення  $\mathbf{F}$  із наявних керуючих впливів  $\mathbf{U}_1^i$  та  $\mathbf{F}_2^i$  кліматичного обладнання.
5. Сформувати матрицю станів  $\mathbf{A}$  комплексної моделі кондиціонера, діагональними елементами якої є матриці станів  $\mathbf{A}^i$  кліматичного обладнання.
6. Сформувати матриці  $\mathbf{C}^i$  із відповідних матриць  $\mathbf{B}_2^i$ , які забезпечують передачу вектору вихідних змінних станів попередньої моделі  $\mathbf{X}^{i-1}$  на відповідні змінні станів поточної моделі  $\mathbf{X}^i$  обладнання кондиціонера.
7. Сформувати матрицю  $\mathbf{B}$  та  $\mathbf{D}$  із відповідних матриць  $\mathbf{B}_1^i$  та  $\mathbf{B}_2^i$ .

Як приклад, для моделі (22) представлено матриці, які визначають комплексну модель центрального кондиціонера із паровим зволожувачем (для спрощення інтерпретації верхній індекс матриць  $i$  замінено на абревіатуру обладнання кондиціонера):

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{K1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{A}^O & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_2 & \mathbf{A}^{K2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_3 & \mathbf{A}^{ПЗ} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{K1} \\ \mathbf{X}^O \\ \mathbf{X}^{K2} \\ \mathbf{X}^{ПЗ} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1^{K1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^O & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{K2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{ПЗ} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1^{K1} \\ \mathbf{U}_1^O \\ \mathbf{U}_1^{K2} \\ \mathbf{U}_1^{ПЗ} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_2^{K1} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \mathbf{F}_2^{K1}; \quad \mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} & & & \\ & \mathbf{B}_2^O & & \\ & & & \\ & & & \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} & & & \\ & & \mathbf{B}_2^{K2} & \\ & & & \\ & & & \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_3 = \begin{bmatrix} & & & \\ & & \mathbf{B}_2^{ПЗ} & \\ & & & \\ & & & \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Розмірність матриць (23):  $\mathbf{A}$  –  $[14 \times 14]$ ,  $\mathbf{B}$  –  $[14 \times 4]$ . Комплексна модель містить математичні моделі обладнання: водяних калориферів K1, K2; охолоджувача O та парового зволожувача ПЗ.

Для основних технологічних рішень однозональних центральних та прецизійних кондиціонерів отримано чотири комплексні моделі СКП. Розмірність матриць моделей варіюється від 14 до 20 в залежності від технології кондиціонування та типу кліматичного обладнання. Наявність комплексних математичних моделей кондиціонерів, де враховуються тепло- та масообмінні процеси підготовки повітря, є необхідною умовою для постановки і вирішення задачі оптимізації та адаптації управління СКП в рамках запропонованої концепції.

У п'ятому розділі розглядаються заключний третій етап системного підходу управління штучним мікрокліматом об'єктів КІ. На цьому етапі вирішується завдання інтегрування СКП у КФО КІ. Для інтегрування СКП у КФО КІ запропоновано використати інформаційну систему підтримки прийняття рішень (ІСППР), структурна схема якої зображена на рис. 6. ІСППР розроблено із використанням принципів системного аналізу: принципу ієрархічності, оптимальності рішень, адаптивності математичних моделей, ідентифікації та мінімізації впливу невизначеностей, які присутні в системі управління кондиціонерами; принципу функціональної ортогональності, тощо.

ІСППР побудована за ієрархічним принципом, який передбачає наявність трьох рівнів управління із мережевими зв'язками між рівнями. На нижньому рівні ІСППР функціонують граничні пристрої, що здійснюють первинну обробку сенсорної інформації та реалізують локальні контури керування СКП. У межах дослідження запропоновано методи оптимізації традиційних і багатовимірної системи керування (БСК) локальними кліматичними установками, що спрямовані на підвищення ефективності їхньої роботи за рахунок адаптації алгоритмів управління до зміни зовнішнього середовища.

На середньому рівні функціонують хмарні сервіси КФО КІ. Тут реалізуються технології великих даних та ЦД. В рамках ІСППР для управління СКП агреговані дані від ПЛК за IoT-протоколами надходять у підсистему обробки інформації. Підсистема обробки інформації виконує аналіз вхідних даних (фільтрація, нормування, заповнення пропусків, агрегування даних), поповнює базу даних (БД) новою інформацією та надає оперативну інформацію про стан СКП: величину збурюючих впливів; режими роботи камер рециркуляції повітря, водяних калориферів, охолоджувачів, парозволожувачів, приміщень та інше. БД використовується усіма хмарними сервісами для аналізу та підтримки управлінських рішень на підприємстві. Для функціонування системи оперативного управління мікрокліматом підприємства КІ використовується інструментарій ЦД СКП, що містить дві підсистеми: підсистему моделювання та підсистему вирішення задач.

Мінімізація стохастичних невизначеностей зовнішніх випадкових збурень та похибок вимірювань виконується за допомогою методів оптимальної фільтрації

вимірювань на етапі вимірювання та підготовки даних для моделювання. Параметрична невизначеність коефіцієнтів тепло- та масообміну аналітичних

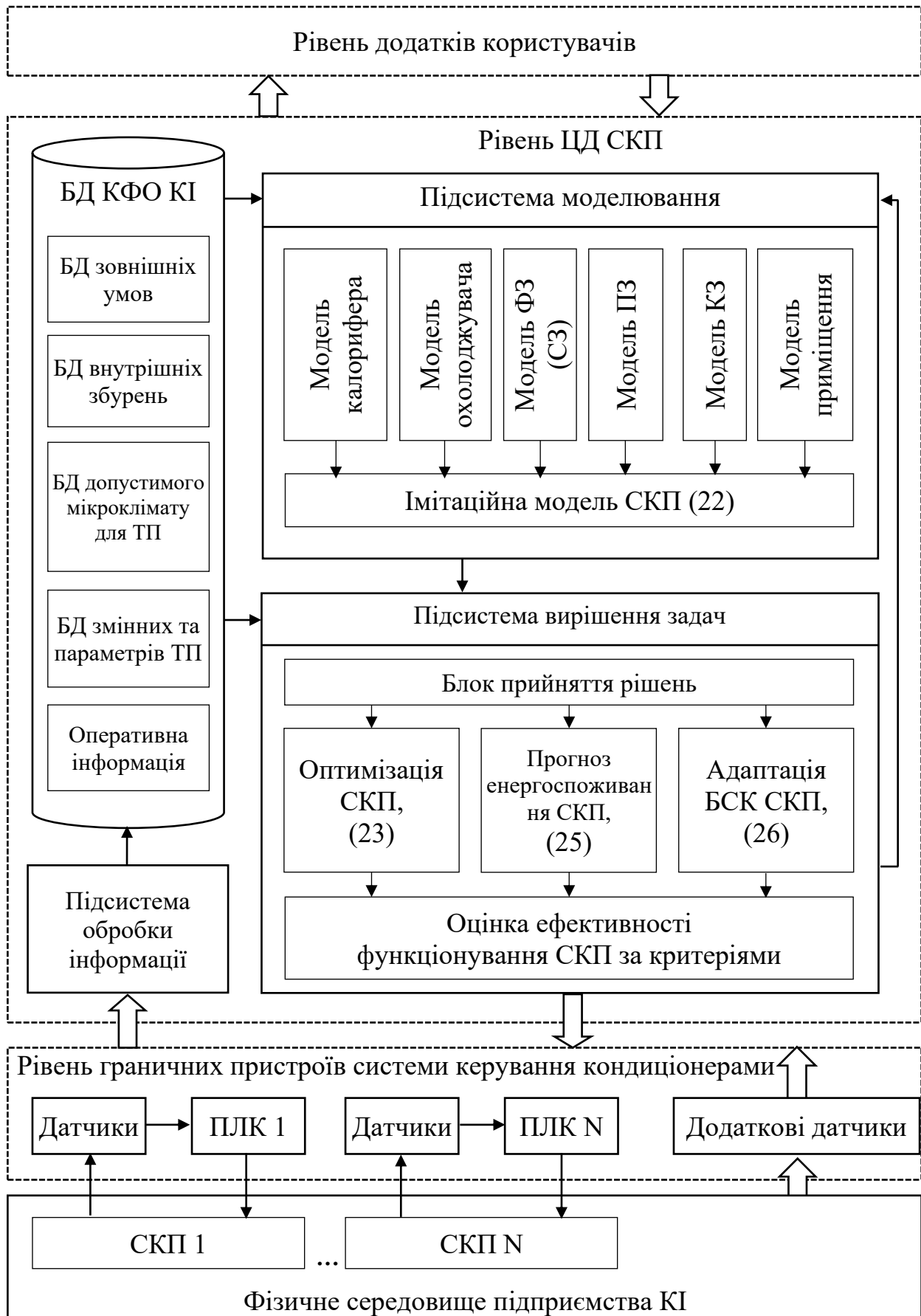


Рис. 6. Структурна схема ІСППР для управління СКП

моделей кліматичного обладнання мінімізується шляхом використання наявних історичних даних та методу пасивної ідентифікації, наведеного у четвертому розділі, чим досягається їх високий рівень адекватності процесу кондиціонування повітря. Для наявних на підприємстві КІ кондиціонерів проектується імітаційні моделі з використанням методики розробки комплексної моделі СКП у просторі станів.

Підсистема вирішення задач забезпечує оперативне управління з врахуванням наступних дій: оптимізації СКП; прогнозування енергоспоживання СКП; адаптації БСК кондиціонером. Ефективність оперативного управління мікрокліматом підприємства КІ оцінюється за відповідними критеріями. Далі, інформація надається на застосунки відповідальних осіб для ухвалення управлінських рішень.

Завдання оперативного управління з оптимізації СКП відноситься до екологічної підсистеми ІСШМ КФО КІ. Воно необхідне для визначення допустимих меж температури та вологості у приміщенні об'єкта КІ, а також для визначення коефіцієнта рециркуляції (для СКП із рециркуляцією), що впливає на економне використання енергетичних ресурсів. Штучний мікроклімат фізичного середовища приміщення залежить від особливості функціонування установи КІ. Для промислових об'єктів КІ оптимізація роботи СКП в першу чергу направлена на забезпечення якісної роботи технологічного обладнання виробництва. Для об'єктів КІ соціального спрямування (медичні заклади, метрополітен, бомбосховища, інше) оптимізація роботи СКП направлена на підтримання комфортних кліматичних умов перебування людини.

Оцінка ефективності функціонування СКП проводиться ЦД із використанням моделі (22) на основі критерію мінімізації енергоспоживання

$$\sum_i^N Q_i \rightarrow \min, \quad (23)$$

де  $Q_i$  – енергоспоживання  $i$ -го апарату кондиціонера. Для водяного теплоносія

$$Q_i = G_i c_i (\theta_{i0} - \theta_i), \quad (24)$$

$G_i, c_i$  – відповідно витрата та теплоємність теплоносія;  $\theta_{i0}, \theta_i$  – температура прямого та зворотного теплоносія. У розділі розглянуто етапи сценаріїв оптимізації енергоспоживання за критерієм (23) для об'єктів КІ промислового та соціального призначення.

Завдання оперативного управління з прогнозування енергоспоживання відноситься до технічної підсистеми ІСШМ КФО КІ. Ця функція забезпечується ЦД СКП, враховуючи прогнозовані зовнішні і внутрішні збурення. Погодинний прогноз зовнішніх збурень із глибиною до 30 днів отримується через компетентні сервіси прогнозу погоди. Прогнозні значення внутрішніх збурень визначаються на основі наявних історичних даних у приміщенні. Далі, для комплексної моделі СКП (22) інтегруються витрати енергоспоживання із врахуванням прогнозних збурень

$$E = \sum_i^N Q_i, \quad (25)$$

де  $Q_i$  – енергоспоживання  $i$ -го апарату кондиціонера (24).

Завдання оперативного управління з адаптації БСК кондиціонера також відноситься до технічної підсистеми ІСШМ КФО КІ. Адаптація БСК кондиціонера здійснюється при переході СКП із зимового режиму роботи на літній або навпаки. Завдання оперативного управління із адаптації БСК кондиціонера необхідно для коригування налаштувань системи за зміни динамічних властивостей кондиціонера, оскільки у різну пору року використовується відповідне обладнання кондиціонера. У розділі розглянуто етапи адаптації БСК кондиціонера за критерієм

$$I = \int_{t_0}^{t_0+t_f} (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U}) dt \rightarrow \min, \quad (26)$$

Система керування кондиціонером може бути реалізована із використанням одномірного або багатовимірного методів керування. Якщо модернізується існуюча система керування кондиціонером, то рекомендується використовувати одномірні методи оптимізації. У випадку інсталяції нової СКП, перспективним підходом буде синтез та оптимізація БСК нижнього рівня із використанням лінійно-квадратичного цифрового регулятора (ЛКЦР).

Для адаптації традиційних систем керування у розділі наведено розроблену чисельну процедуру параметричної оптимізації цифрової системи керування із модифікаціями І-ПД-, ПД-Д- або ПД-регуляторів. Для адаптації одномірних цифрових систем керування запропоновано критерій

$$I = \begin{cases} T_{KV} \sum_{s=0}^{N-1} [q|e_s| + (1-q)|z_s - K_1 u_s - K_2 \lambda_s|], & \text{при } Nvr = 1; \\ T_{KV} \sum_{s=0}^{N-1} [q e_s^2 + (1-q)(z_s - K_1 u_s - K_2 \lambda_s)^2], & \text{при } Nvr = 2, \end{cases} \quad (27)$$

де  $q$  – ваговий коефіцієнт;  $e_s$  – помилка регулювання;  $z_s$  – завдання системи керування;  $K_1$  та  $K_2$  – коефіцієнти передачі для каналів регулювання та збурення;  $u_s$ ,  $\lambda_s$  – сигнали управління та збурення;  $Nvr$  – варіант критерію (модульний чи квадратичний);  $N$  – кількість кроків спостереження;  $T_{KV}$  – час дискретизації. На відміну від класичного критерію (26), критерій (27) враховує технологічні особливості одномірного керування, що розглянуто у цьому розділі. У процедурі чисельної оптимізації системи керування в якості вхідної інформації про динамічні властивості ОК використовується часова характеристика. Запропонована процедура оптимізації за часовими характеристиками ОК відкриває можливість оптимізації налаштувань цифрового регулятора (ЦР) без етапу апроксимації динамічних властивостей об'єкта, що дозволяє зменшити похибку обчислень за рахунок виключення етапу апроксимації.

Використання одномірних методів оптимізації передбачає аналіз структурних схем керування кондиціонером. На основі запропонованої концепції управління СКП у розділі отримано структурні схеми керування для центральних та прецизійних кондиціонерів де у контурі регулювання вологості використовується вологовміст повітря (1). Такий підхід дозволяє розмежувати вплив між контурами регулювання температури та вологості для єдиного матеріального потоку повітряної суміші. Отримані структурні схеми керування

для центральних та прецизійних кондиціонерів класифікуються як багатовимірні із змінною структурою каналів регулювання та одним перехресним зв'язком для будь-якого режиму роботи кондиціонера. Враховуючи наявність тільки одного перехресного зв'язку, налаштування регуляторів температури та вологості можна проводити традиційними методами оптимізації систем керування.

Для адаптації БСК у розділі удосконалено класичну процедуру оптимізації системи керування із ЛКЦР, де враховано особливості керування обладнанням кондиціонера за критерієм (26), який для цифрової БСК набуде вигляду:

$$I = \mathbf{X}_N^T \mathbf{S} \mathbf{X}_N + \sum_{s=0}^{N-1} [\mathbf{X}_s^T \mathbf{Q} \mathbf{X}_s + \mathbf{U}_s^T \mathbf{R} \mathbf{U}_s], \quad (28)$$

де,  $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{Q}$  – вагові додатні напіввизначені матриці;  $\mathbf{R}$  – вагова симетрична додатна матриця;  $\mathbf{X}_s$ ,  $\mathbf{U}_s$  – відповідно вектор станів та вектор керування СКП.

Для якісної підтримки температури та вологовмісту повітря на виході кондиціонера або у приміщенні вектор простору станів  $\mathbf{X}$  комплексної моделі СКП (22) доповнено  $p$ -мірним вектором

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{C} \mathbf{X}, \quad (29)$$

що забезпечує наявність інтегральної складової за параметрами вектора  $\mathbf{Z}$ . В результаті зростає розмірність вектору станів на  $p$  (на кількість нових змінних), а розширена модель ОК в просторі станів прийме вигляд

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{X}' \\ \mathbf{Z}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{U}, \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C} \mathbf{X}. \end{cases} \quad (30)$$

Розширена модель СКП (30) приводиться до дискретного виду

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{s+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{X}_s + \mathbf{B}_d \mathbf{U}_s, \\ \mathbf{Y}_s = \mathbf{C}_d \mathbf{X}_s, \end{cases} \quad (31)$$

де  $\mathbf{A}_d = e^{\mathbf{A}T_{kv}}$ ,  $\mathbf{B}_d = \int_0^{T_{kv}} e^{\mathbf{A}(T_{kv}-\tau)} \mathbf{B} d\tau$ .

Синтез багатовимірного ЦР запропоновано проводити на основі розв'язку рівняння Ріккати. В загальному випадку оптимальний ЛКЦР представляється залежністю

$$\mathbf{U}_s = -\mathbf{K}_d \mathbf{X}_s. \quad (32)$$

Регулятор формує зворотний зв'язок за станом параметрів ОК, використовуючи матрицю коефіцієнтів передачі  $\mathbf{K}_d$ . Матриця зворотного зв'язку визначається як

$$\mathbf{K}_d = \left( \mathbf{R} + \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d \right)^{-1} \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{A}_d. \quad (33)$$

Параметри ЛКЦР шукаються як результат розв'язку рівняння Ріккати

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q} + \mathbf{A}_d^T \mathbf{P} \left[ \mathbf{I} - \mathbf{B}_d \left( \mathbf{R} + \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d \right)^{-1} \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \right] \mathbf{A}_d. \quad (34)$$

Класичний алгоритм синтезу ЛКЦР із інтегральною складовою у законі керування зводиться до наступної послідовності дій.

1. Задаються параметри критерію (28) відповідно до вимог КФО КІ.
2. Формується розширена неперервна модель СКП (30).
3. За (30) визначається дискретна модель СКП (31).

4. Далі, шукаємо розв'язок матричного рівняння Рікатті (34).

5. За (34) проводиться розрахунок параметрів ЛКЦР (33).

В залежності від технології кондиціонування для керування СКП використовується від 3-ох до 5-ти одиниць кліматичного обладнання. При цьому, у регулюванні приймає участь не більше 2-х апаратів, оскільки стабілізується два параметри – температура та вологовміст повітря. Для СКП кількість регулюючих впливів більша за кількість змінних регулювання. З цих причин виникає задача вибору обладнання для формування керуючих впливів. Дана особливість накладає обмеження на використання класичної процедури оптимізації ЛКЦР. Враховуючи наявність логічних перемикачів між обладнанням кондиціонера задачу адаптації ЛКЦР поділено на окремі підзадачі, що дозволило врахувати наявність логічного керування. Вибір кліматичного обладнання для обробки повітря проводиться на основі належності температури та вологовмісту зовнішнього середовища до відповідної області  $h-d$  діаграми. Границі областей аналізуються при проектуванні БСК кондиціонера та залежать від технології кондиціонування повітря. Для отриманих комплексних моделей кондиціонерів, за допомогою  $h-d$  діаграм у розділі проведено аналіз робочих областей функціонування обладнання кондиціонера та визначені границі кожної області.

Як приклад, на  $h-d$  діаграмі рис. 7 продемонстровано сім областей функціонування кліматичного обладнання СКП із паровим зволожувачем.

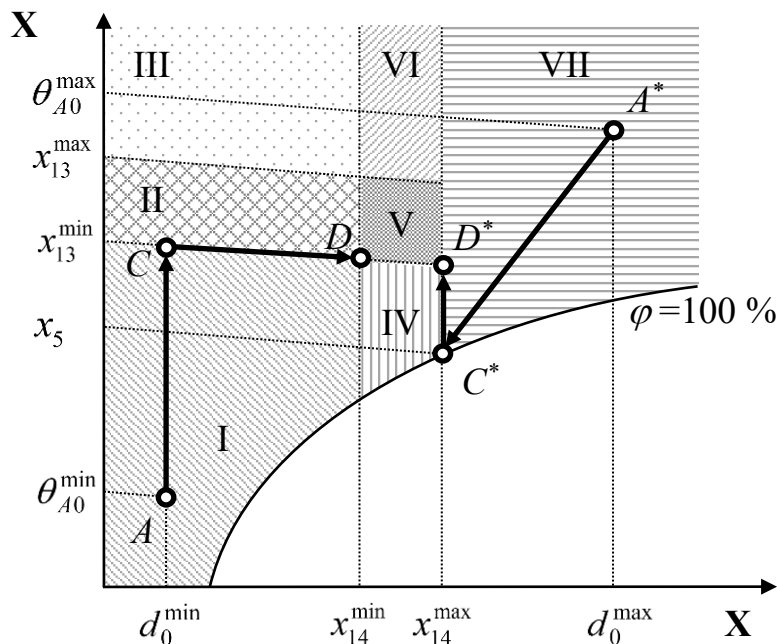


Рис. 7.  $h-d$  діаграма СКП із паровим зволожувачем

Для комплексної моделі кондиціонера (22) із паровим зволожувачем нижче наведено розширену комплексну модель (30).

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{X}' \\ \mathbf{Z}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{\text{I-VII}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{U}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C} \mathbf{X}; \end{cases} \quad (35)$$

$$\text{де } \mathbf{B}_I = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1^{K1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_1^{ПЗ} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{II} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_1^{ПЗ} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{III} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_1^O & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_1^{ПЗ} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_{IV} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{B}_1^{K2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_V = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{VI} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_1^O & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{VII} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_1^O & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{B}_1^{K2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Наповнення матриці керування  $\mathbf{B}_{I-VII}$  для областей  $h-d$  діаграми (рис. 7) варіюється, що дозволяє організувати логіку перемикання кліматичного обладнання СКП в залежності від параметрів температури та вологості навколишнього середовища. Враховуючи, що матриці  $\mathbf{B}_{I-VII}$  для кожної області  $h-d$  діаграми індивідуальні, необхідно розрахувати чисельні значення матриці зворотного зв'язку  $\mathbf{K}_{dI-VII}$  (33) для кожної області за класичною процедурою оптимізації ЛКЦР, залежності (28) – (34).

За запропонованими у розділі методами адаптації проведено імітаційне моделювання перехідних процесів БСК на прикладі кондиціонера CV-P 2L N-63B/F-N фірми VTS CLIMA. Для коректного порівняння результатів забезпечено тотожність критеріїв та початкові умови для комплексної моделі СКП. На рис. 8 наведено часові характеристики традиційної системи керування, де в контурі стабілізації вологості використовується вологовміст повітря та відносна вологість, у табл. 1 наведено кількісні показники якості перехідних процесів.

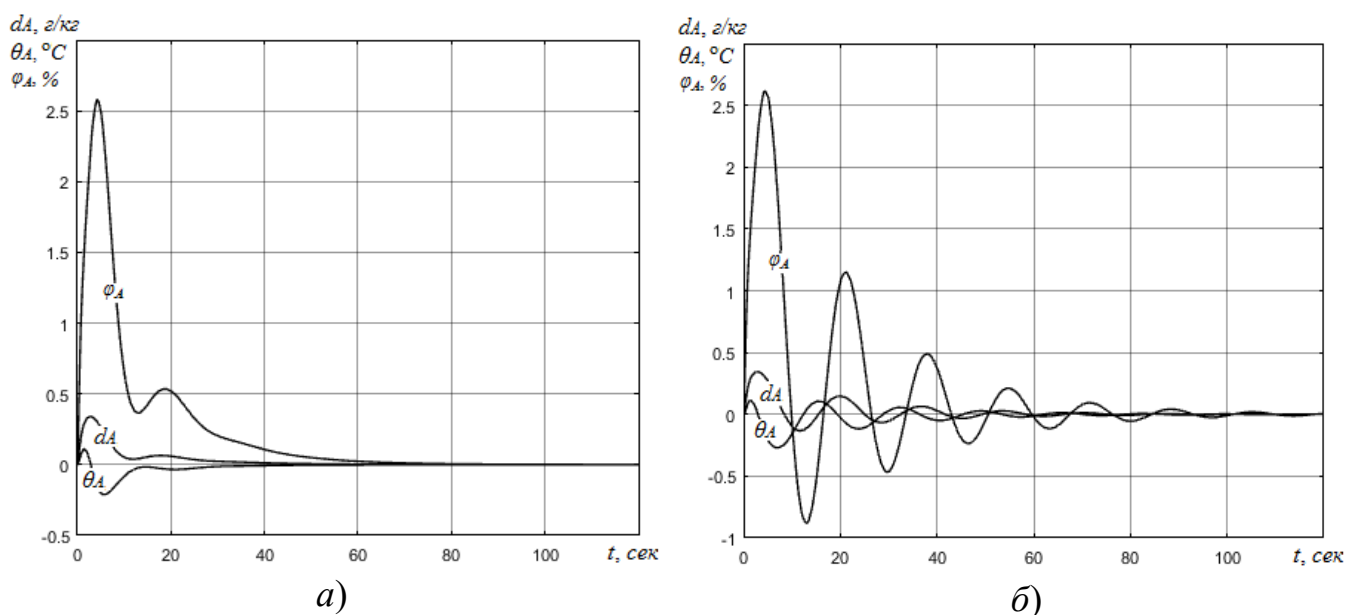


Рис. 8. Дослідження перехідних процесів для традиційної системи керування кондиціонером CV-P 2L N-63B/F-N при стабілізації:  
а) вологовмісту повітря; б) відносної вологості повітря

Таблиця 1. Показники якості перехідних процесів у системі керування

Параметр стабілізації	$\int  \Delta\theta_A  dt$	$\int  \Delta d_A  dt$	$\int  \Delta\varphi_A  dt$	$Max  \Delta\theta_A $	$Max  \Delta d_A $	$Max  \Delta\varphi_A $
стабілізація вологовмісту повітря	1.96	3.34	28.0	0.21	0.34	2.65
стабілізація відносної вологості повітря	3.98	4.61	36.4	0.27	0.34	2.61

Таким чином, використання вологовмісту замість відносної вологості повітря в контурі регулювання вологості дозволяє розмежувати взаємний вплив між контурами регулювання температури та вологості, також покращуються інтегральні показники якості у 1.5 – 2 рази, зменшується коливність та тривалість перехідних процесів.

На рис. 9 представлено результати імітаційного моделювання для БСК кондиціонера CV-P 2L N-63B/F-N із ЛКЦР та одномірними ЦР, у табл. 2 наведено кількісні показники якості перехідних процесів.

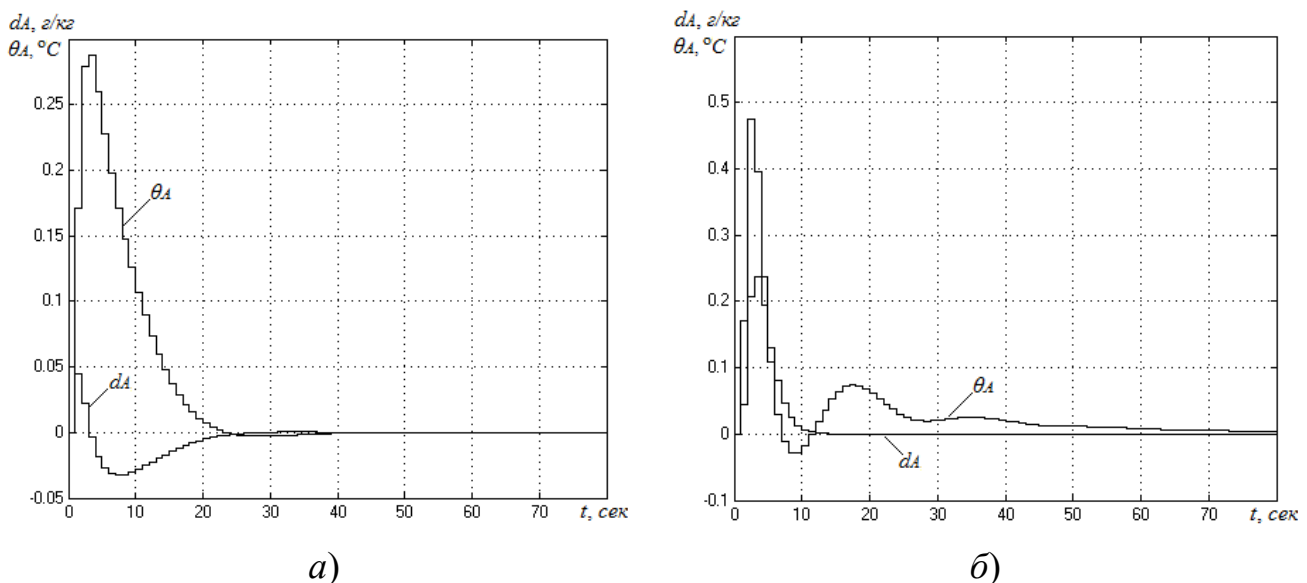


Рис. 9. Перехідні процеси БСК кондиціонера CV-P 2L N-63B/F-N:  
а – БСК із ЛКЦР; б – БСК із двома ЦР

Таблиця 2. Показники якості перехідних процесів у БСК із ЛКЦР та ЦР

БСК	$\int  \theta_A  dt$	$\int  d_A  dt$	$Max  \theta_A $	$Max  d_A $
БСК із ЛКЦР	2.41	0.42	0.287	0.044
БСК із ЦР	2.97	0.99	0.475	0.238

За результатами моделювання можна зробити висновок, що БСК із ЛКЦР краще компенсує ступінчаті збурення за температурою та вологовмістом навколишнього середовища, що пояснюється урахуванням більшого числа змінних за якими проводиться стабілізація вихідних величин. Використання БСК

із ЛКЦР покращує інтегральні показники якості у 1.2 – 2.3 рази у порівнянні із двовимірною системою керування із ЦР, також зменшується коливність та тривалість перехідних процесів.

**Шостий розділ.** У розділі удосконалено експрес-методи оптимізації традиційних систем керування за інтегральними показниками якості при апроксимації ОК наближеними моделями ланок першого та другого порядків із запізненням. Використовуючи чисельні методи, отримано функціональні залежності для оптимізації неперервних та цифрових регуляторів за каналами регулювання та збурення, де в якості вхідної інформації налаштування регуляторів використано коефіцієнт передачі, постійні часу та транспортне запізнення ОК. Проведено порівняння отриманих залежностей із існуючими. У порівнянні із існуючими запропоновані залежності забезпечують вищу точність розрахунку, зручні для програмної реалізації та можуть застосовуватися для налаштування одномірних систем керування в широкому діапазоні зміни динамічних властивостей ОК у різних галузях промисловості.

Запропоновано методику використання розроблених експрес-методів для оптимізації цифрових систем керування. Методика проста у використанні та не потребує використання теорії  $Z$ -перетворення цифрових систем.

Проведено оцінку експрес-методів на точність синтезу регуляторів. У порівнянні із існуючими, запропоновані розрахункові залежності покращують якість перехідних процесів у системі керування в середньому на 2% за модульними критеріями та на 50% за квадратичними критеріями якості. Імітаційне моделювання підтвердило ефективність використання запропонованих експрес-методів налаштування регуляторів для систем керування кондиціонерів.

Розроблено аналітичний метод оптимізації ЦР при наявності стохастичних збурень. Для стохастичного випадку квадратичний критерій якості (27) має вигляд

$$J_{t+1} = M \left\{ q(w_t - y_{t+1})^2 + (1 - q)(w_t - K u_t)^2 \right\}, \quad (36)$$

де  $w_t$  – завдання ЦР при  $[nT_{KV}] \leq t < [(n+1)T_{KV}]$ ;  $q$  – ваговий коефіцієнт,  $q \in [0...1]$ ;  $K$  – коефіцієнт передачі ОК за каналом регулювання. Структурна схема системи керування, зображена на рис. 10.

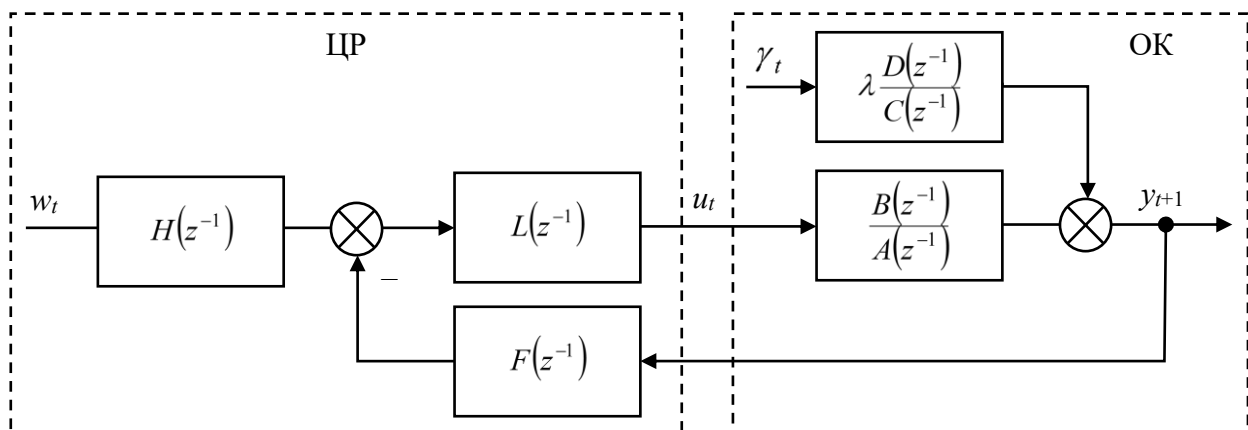


Рис. 10. Структурна схема стохастичної системи керування

Для структурної схеми системи керування із стохастичним ОК отримано рівняння оптимального ЦР із мінімальною дисперсією:

$$u(z) = L(z^{-1}) [H(z^{-1})w(z) - F(z^{-1})y(z)], \quad (37)$$

де  $L(z^{-1}) = \frac{A(z^{-1})}{K^2(1-q)A(z^{-1})D(z^{-1}) + qb_1B(z^{-1})C(z^{-1})z}$ ;  $H(z^{-1}) = (qb_1 + K(1-q))D(z^{-1})$ ;  
 $F(z^{-1}) = qb_1(D(z^{-1}) - C(z^{-1}))z$ .

При  $A(z^{-1}) = C(z^{-1})$  та/або  $q=1$  маємо окремі випадки реалізації ЦР:

1) якщо  $A(z^{-1}) = C(z^{-1})$ , то  $L(z^{-1}) = \frac{1}{K^2(1-q)D(z^{-1}) + qb_1B(z^{-1})z}$ ,

$$H(z^{-1}) = (qb_1 + K(1-q))D(z^{-1}), \quad F(z^{-1}) = qb_1(D(z^{-1}) - C(z^{-1}))z;$$

2) якщо  $q=1$ , то  $L(z^{-1}) = \frac{A(z^{-1})}{b_1B(z^{-1})C(z^{-1})z}$ ,  $H(z^{-1}) = b_1D(z^{-1})$ ,

$$F(z^{-1}) = b_1(D(z^{-1}) - C(z^{-1}))z;$$

3) якщо  $q=1$  та  $A(z^{-1}) = C(z^{-1})$ , то  $L(z^{-1}) = \frac{1}{b_1B(z^{-1})z}$ ,  $H(z^{-1}) = b_1$ ,

$$F(z^{-1}) = b_1(D(z^{-1}) - C(z^{-1}))z.$$

Як приклад, у роботі розглянуто синтез оптимального ЦР для стабілізації температурного режиму на виході стельового кондиціонера CV-R 2L N-63B/F-N.

Результати моделювання перехідних процесів зображено на рис. 11. Як видно із графіків, ЦР добре компенсує випадковий шум  $\gamma_t = M\{-0.5, 0.5\}$ . Незважаючи на значну амплітуду випадкового збурення, ЦР системи керування стабілізує вихідну величину  $y_t$  із незначним дрейфом навколо завдання  $w_t$ .

Розглянуті у розділі методи синтезу традиційних систем керування мають універсальний характер та можуть використовуватися для проектування систем керування у різних галузях промисловості.

У цьому розділі наведено впроваджені системи керування кондиціонерами, які розроблені на основі запропонованого системного підходу та створених математичних моделей. Вони є не лише як приклад інженерної реалізації, а є засобом верифікації системно-аналітичних методів, розроблених у дисертаційній роботі.

Наведено структуру та описано функціональні можливості реалізованої інформаційно-керуючої системи для центрального кондиціонера АЕРМЕС NCT 22, який встановлено у друкарському цеху Банкотно-монетного

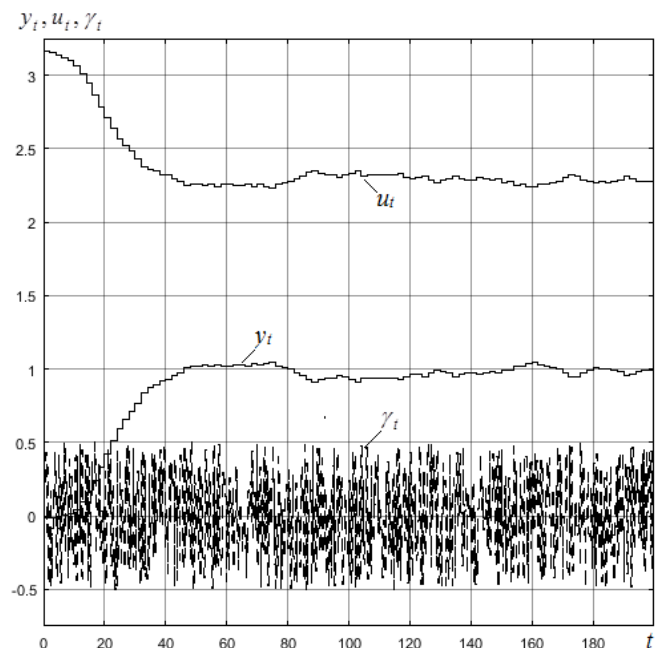


Рис. 11. Дослідження перехідних процесів для стохастичної системи керування

двору Національного банку України. Налаштування системи керування центральним кондиціонером виконано на основі запропонованої концепції управління СКП. Проведено експериментальну перевірку ефективності розробленої системи керування штучним мікрокліматом шляхом аналізу статистичних даних, отриманих у процесі вимірювань змінних температури та вологості повітря у виробничому приміщенні. На рис. 12 подано добові тренди температури та відносної вологості повітря, що зафіксовані у шести контрольованих зонах приміщення.

Оцінку стабільності процесу керування штучним мікрокліматом здійснено із застосуванням контрольних карт Шухарта. Результати статистичного аналізу контрольних карт свідчать, що процес стабілізації температури у приміщенні перебуває у статистично керованому стані, тоді як процес стабілізації відносної вологості не відповідає умовам статистично керованого стану. Проведено аналіз причин виходу системи керування з квазістаціонарного режиму, серед яких:

- температурні збурення, спричинені вмиканням друкарського обладнання на початку робочої зміни;
- температурні збурення, викликані вимиканням обладнання наприкінці робочої зміни;
- перехід системи керування кондиціонером AERMES NCT 22 у режим енергозбереження в нічний час, тощо.

Впродовж року система керування кондиціонером проходила експериментальну експлуатацію, що було зумовлено підвищеними вимогами до параметрів штучного мікроклімату у приміщенні друкарського цеху. У розділі наведено річні тренди температури та відносної вологості повітря, зареєстровані під час роботи системи. Реалізована система забезпечує підтримання температури на рівні  $20 \pm 1,5$  °C та відносної вологості  $52,5 \pm 2$  %, незалежно від пори року та температурних збурень друкарського обладнання, що задовольняє технічне завдання замовника. За результатами впровадження системи керування кондиціонером AERMES NCT 22 отримано акт впровадження, підписаний директором ТОВ «ТЕПЛОІНФОРМ» О.Н. Єрохіною від 25.09.2025 та головним інженером БМД НБ України Ю.В. Талімоновим від 29.09.2025.

На основі розробленого математичного забезпечення СКП створено програмне забезпечення, що реалізує учбово-тренажерний комплекс системи штучного мікроклімату. У розділі наведено структурну схему СКП, що моделюється та здійснено опис основних елементів інтерфейсу оператора. Учбово-тренажерний комплекс використовується співробітниками Банкотно-монетного двору Національного банку України для опанування принципів підготовки повітряної суміші на обладнанні центрального кондиціонера (акт впровадження, підписаний директором ТОВ «ТЕПЛОІНФОРМ» О.Н. Єрохіною від 25.09.2025).

Також у розділі наведено результати апробації запропонованих методів і алгоритмів для керування інженерним обладнанням промислових об'єктів. В актах впровадження зафіксовано досягнутий економічний ефект (акт впровадження, підписаний директором ТОВ «КОВЧЕГ» В.В. Герасимчук від 15.05.2013 та акт впровадження, підписаний директором НВП «ІКМ» О.В. Ляховецький від 11.04.2012).

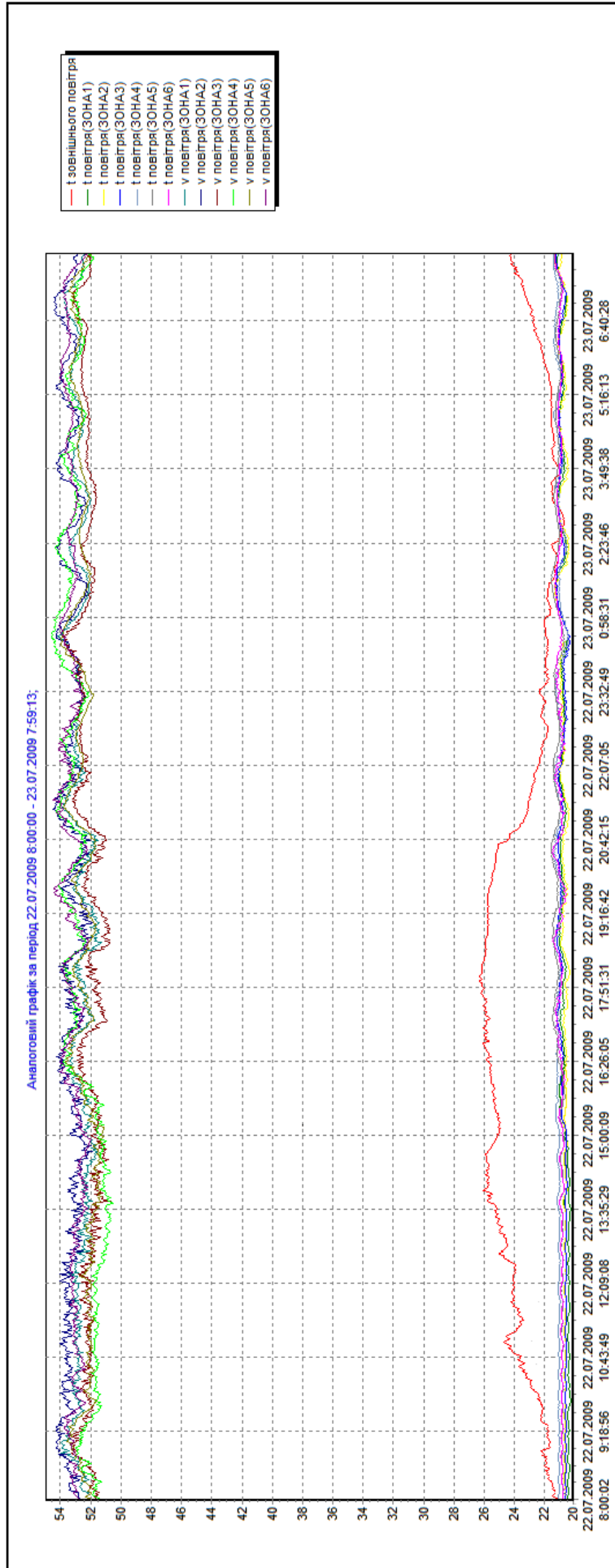


Рис. 12. Тренди температури та відносної вологості у приміщенні друкарського цеху на протязі доби

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних та експериментальних досліджень вирішено актуальну науково-прикладну проблему – розроблено єдиний математичний апарат для опису, аналізу, ідентифікації та оптимізації систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури як складний багатовимірний об'єкт управління процесом підготовки повітряної суміші в умовах параметричної та стохастичної невизначеності, що забезпечує підвищення якості функціонування систем кондиціонування повітря різної інженерної реалізації.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи полягають у наступному.

1. Запропоновано нову концепцію управління системами штучного мікроклімату, яка ґрунтується на оптимізації багатовимірних систем керування кондиціонерами в координатах температури та вологовмісту повітря із урахуванням концептуальної невизначеності експлуатаційних умов об'єктів критичної інфраструктури, що дозволяє математично розмежувати взаємний вплив контурів регулювання температури та вологості.
2. Розроблено системний підхід до дослідження та оптимізації систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури, що ґрунтується на трьох послідовних етапах: аналізі технологічного процесу підготовки повітряної суміші; побудові багатовимірних математичних моделей кліматичного обладнання у просторі станів з методами параметричної ідентифікації; оптимізації та адаптації систем керування з інтеграцією у кіберфізичну систему об'єкта.
3. Для найпоширеніших технологій промислового та прецизійного кондиціонування повітря побудовано нові багатовимірні математичні моделі у просторі станів, що відрізняються від існуючих одночасним урахуванням процесів тепло- та масообміну та забезпечують математичний опис нестационарної динаміки підготовки повітряної суміші як єдиного багатовимірного об'єкта керування.
4. Розроблено підхід до побудови цифрових двійників кліматичного обладнання як програмно-апаратних систем моделювання, що інтегрують математичні моделі кліматичного обладнання, алгоритми параметричної ідентифікації, обчислювальні процедури прогнозування та методи оптимізації систем керування у режимі реального часу протягом усього терміну експлуатації.
5. Розроблено математичний метод непрямого обчислення вологовмісту повітряної суміші на основі вимірних значень температури, відносної вологості та барометричного тиску, що забезпечує математичне розмежування зв'язаних каналів керування температурою та вологістю у багатовимірних моделях систем кондиціонування повітря та підвищує точність підтримання нормованих параметрів мікроклімату.
6. Для кліматичного обладнання кондиціонерів створено комплекс аналітичних моделей (електричного та водяного калориферів, водяного охолоджувача, форсуночного та парового зволожувачів, камери змішування повітря, приміщення) у формі простору станів та матричних передатних функцій. На відміну від існуючих, запропоновані моделі враховують процеси тепло- та

- масообміну, що дозволяє проводити якісний та кількісний аналіз динамічних властивостей систем кондиціонування повітря довільної технологічної реалізації.
7. Розроблено чисельний алгоритм пасивної параметричної ідентифікації коефіцієнтів тепло- та масообміну для математичних моделей кліматичного обладнання, що не потребує лінеаризації моделі та забезпечує адаптивність математичних моделей до реального процесу кондиціонування повітря з відносною похибкою ідентифікації невизначених параметрів не більше 5% за результатами обчислювального експерименту.
  8. Запропоновано методику агрегування аналітичних моделей кліматичного обладнання у єдину багатовимірну математичну модель системи кондиціонування повітря у просторі станів. Методика формалізує процедуру побудови комплексних моделей довільної структурної конфігурації та забезпечує отримання математичних описів у формі, придатній для застосування сучасних методів оптимізації динамічних систем.
  9. Запропоновано ієрархічну інформаційну систему підтримки прийняття рішень для управління штучним мікрокліматом кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури, що інтегрує: граничні обчислювальні пристрої з алгоритмами локального керування; хмарні сервіси цифрових двійників з методами параметричної ідентифікації та оптимізації; верхній рівень стратегічного узгодження з алгоритмами багатокритеріальної оптимізації та адаптації.
  10. Розроблено чисельну процедуру параметричної оптимізації традиційних одновимірних систем керування у часовій області на основі часової перехідної характеристики об'єкта керування без етапу апроксимації передатною функцією, що підвищує точність обчислень та зменшує методичну похибку налаштування параметрів регуляторів.
  11. Побудовано чисельну процедуру оптимізації багатовимірного лінійно-квадратичного цифрового регулятора для систем кондиціонування повітря, яка враховує логіку вибору керуючого обладнання кондиціонера залежно від поточного стану зовнішнього середовища. За результатами обчислювального моделювання використання багатовимірних цифрових регуляторів забезпечує покращення інтегральних показників якості у 1.2–2.3 рази порівняно з одновимірними цифровими регуляторами.
  12. Удосконалено експрес-методи оптимізації параметрів регуляторів одновимірних систем керування за каналами регулювання та збурення. Запропоновані розрахункові залежності забезпечують високу обчислювальну точність, зручні для програмної реалізації та можуть застосовуватися для адаптивного налаштування систем керування у широкому діапазоні зміни динамічних властивостей об'єктів керування. Порівняно з існуючими методами, запропоновані формули покращують якість перехідних процесів у середньому на 2% за модульними критеріями та на 50% за квадратичними критеріями якості.
  13. Запропоновані математичні моделі, обчислювальні методи параметричної ідентифікації та алгоритми чисельної оптимізації систем керування кондиціонерами доведено до рівня програмної реалізації, експериментально верифіковано на промислових об'єктах та підтверджено актами впровадження.

Таким чином, розв'язано важливу науково-прикладну проблему – розроблено єдиний математичний апарат, що забезпечує комплексний опис, ідентифікацію та оптимізацію систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури, де система штучного мікроклімату розглядається як складний багатовимірний об'єкт управління процесом кондиціонування повітря із урахуванням параметричної та стохастичної невизначеності.

Поставлена мета дисертаційного дослідження досягнута в повному обсязі – підвищено якість функціонування систем штучного мікроклімату на основі розроблених комплексних математичних моделей у просторі станів, методів параметричної ідентифікації та чисельної оптимізації в умовах параметричної та стохастичної невизначеності.

Дисертаційна робота поглиблює наукові основи методології математичного моделювання складних кіберфізичних систем та розвиває теорію оптимальних рішень у частині синтезу, ідентифікації та адаптації багатовимірних динамічних систем керування. Запропонований системний підхід та інформаційна система підтримки прийняття рішень є універсальними інструментами, придатними для застосування до широкого класу складних технічних систем, математичні моделі яких формалізуються у просторі станів.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Монографії*

1. Голінко І.М. Моделювання та оптимізація систем керування [Текст]: монографія / І.М. Голінко, А.І. Кубрак. –Кам'янець–Подільський: ПП Буйницький, 2012. – 262 с.
2. N. Pankratova, I. Golinko, Approach to development of digital twin model for cyber-physical system in conditions of conceptual uncertainty. In Book Chapter 1 M. Zgurovsky & N. Pankratova (Eds.), System Analysis and Artificial Intelligence (Ser. Studies in Computational Intelligence, – 2023, Vol. 1107). Springer, 2023. p. 3–25.
3. N. Pankratova, I. Golinko, Architecture of an Intelligent Microclimate Control System for an Industrial Enterprise. In Book M. Zgurovsky & N. Pankratova (Eds.), System Analysis and Data Mining (Ser. Studies in Systems, Decision and Control, – 2026, Vol. 609). Springer, 2025. p. 21–36.

*Статті у наукових фахових виданнях України*

4. Голінко І.М. Динамічна модель теплового режиму калорифера / І.М. Голінко, А.П. Ладанюк, Л.Д. Кошелєва // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. –2009, № 3(16). –С. 59–63.
5. Голінко І.М. Моделювання температурного режиму теплообмінника / І.М. Голінко, А.І. Кубрак., А.С. Кравченко // Східно–Європейський журнал передових технологій. –2010, №2/7(44). –С. 24–27.
6. Голінко І.М. Синтез цифрової системи керування за інтегральними показниками якості / І.М. Голінко, А.І. Кубрак, В.Г. Трегуб // Наукові вісті Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. –2011, № 6. –С. 54–59.
7. Голінко І.М. Аналіз системи керування для штучного мікроклімату за методом “точки роси” / І.М. Голінко, В.Г. Трегуб // Східно–Європейський журнал передових технологій. –2011, № 2/10(50). –С. 53–55.
8. Голінко І.М. Оптимізація цифрових систем керування із ПІ–Д та І–ПД регуляторами / І.М. Голінко // Наукові вісті Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. –2012, № 2. –С. 50–58.
9. Голінко І.М. Синтез оптимальних систем керування із мінімізацією керуючого впливу / І.М. Голінко // Радіoeлектронні і комп'ютерні системи. –2012. –№ 2(54). –С. 79–88.
10. Голінко І.М. Аналіз системи керування для промислового кондиціонера із парозволожувачем / І.М. Голінко, В.Г. Трегуб // Східно–Європейський журнал передових технологій. –2012, Том 6, № 8(60). –С. 14–18.
11. Голінко І.М. Инженерный метод оптимизации ПИ регулятора по каналу возмущения / И.М. Голинко, А.И. Кубрак, И.Е. Галицька // Механіка гіроскопічних систем. –2013, № 26. –С. 21–31.
12. Голінко І.М. Динамічна модель тепломасообміну для водяного охолоджувача промислового кондиціонера / І.М. Голінко // Наукові вісті Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. –2014, № 6. –С. 27–34.

13. Голінко І.М. Динамічна модель тепломасообмінних процесів у камері форсуночного зволоження / І.М. Голінко, А.І. Кубрак, І.Є. Галицька // Інформаційні системи, механіка та керування. 2014. № 11, –С. 61–71.
14. Голінко І.М. Синтез оптимального лінійно-квадратичного цифрового регулятора для промислового кондиціонера із паровим зволожувачем / І.М. Голінко, І.Є. Галицька // Механіка гіроскопічних систем. – 2014. № 28, –С. 15–26
15. Голінко І.М. Принципи синтезу автоматичних систем керування промисловими кондиціонерами / І.М. Голінко // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2016. № 8, –С. 33–42.
16. Голінко І.М. Оптимізація багатовимірних систем керування для комплексів штучного мікроклімату / І.М. Голінко, І.Є. Галицька // Прикарпатський вісник НТШ. Серія Число. –2016, № 1(33). –С. 61–73.
17. Голінко І.М. Процедура синтезу багатовимірного регулятора для прецизійного кондиціонера із паровим зволожувачем / І.М. Голінко, І.Є. Галицька // Механіка гіроскопічних систем. – 2017. № 34, –С. 21–31.
18. Голінко І.М. Промислове приміщення як динамічний елемент системи керування штучним мікрокліматом / І.М. Голінко, І.Є. Галицька // Інформаційні системи, механіка та керування. –2018. № 18, –С. 104–114.
19. Голінко І.М. Інтегрування систем керування мікрокліматом в автоматизовану систему керування підприємством / І. Голінко, І. Галицька // Інформаційні системи, механіка та керування. –2019. № 20, –С. 78–87.
20. Панкратова Н.Д. Синтез многомерной системы управления для прецизионного комплекса искусственного микроклимата / Н.Д. Панкратова, П.И. Бидюк, И.М. Голинко // Системні дослідження та інформаційні технології. –2020. № 1, –С. 7–20.
21. Pankratova N. Electric heater mathematical model for cyber-physical systems / N. Pankratova, I. Golinko // System research and information technologies. –2021, № 2. p. 7–17.
22. Pankratova N.D. Reliable operation of cyber-physical system with accompanied by a digital twin / N.D. Pankratova, I.M. Golinko, V.A Pankratov // Problems of applied mathematics and mathematical modelling. – 2023, Vol. 23. p. 212–223.
23. Голінко І.М. Розробка цифрового двійника процесу теплообміну в умовах концептуальної невизначеності / І.М. Голінко // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2025. вип. 68. –С. 20–29.

*Статті у наукових фахових виданнях, що індексується SCOPUS*

24. Golinko I.M. An optimization of a digital controller for a stochastic control system / I. Golinko, V. Drevetskiy // Informatics, Control, Measurement in Economy and Environmental Protection, 2019, Vol. 9(3). p. 74–77.
25. Golinko I.M. Time-variant model of heat-and-mass exchange for steam humidifier / I. Golinko, V. Drevetskiy // Informatics, Control, Measurement in Economy and Environmental Protection, 2020, Vol. 10(2). p. 24–27.

26. Pankratova N. Development of Digital Twins to Support the Functioning of Cyber-physical Systems / N. Pankratova, I. Golinko // Computer Science Journal of Moldova. – 2023, vol.31, № 3(93). p. 299–320.
27. Golinko I.M. An Express Method for Optimally Tuning an Analog Controller with Respect to Integral Quality Criteria / I.M. Golinko, Yu.M. Kovrigo, A.I. Kubrak // Thermal Engineering, 2014, Vol. 61, No. 3, p. 189–197
28. Golinko I.M. Engineering Method of Optimization of Digital Control Systems / I.M. Golinko, A.P. Ladanyuk, A.I. Kubrak // Journal of Automation and Information Sciences, 2014, Vol. 46, No. 2, p. 67–75.
29. Golinko I.M. Optimal Tuning of a Control System for a Second–Order Plant with Time Delay / I.M. Golinko // Thermal Engineering, 2014, Vol. 61, No. 7, p. 524–532.

*Патенти на корисну модель*

30. Пат. № 44799 Україна, Регулюючий мікропроцесорний контролер / Ковриго Ю.М., Коновалов М.А., Голінко І.М., Бунке С.А.; Заявник та власник НТУУ “КПІ”. – № u200905450; заявл. 29.05.2009; опубл. 12.10.2009, Бюл. № 19. – 8 с.: іл.
31. Пат. 54042 Україна, Універсальний мікропроцесорний контролер / Ковриго Ю.М., Коновалов М.А., Голінко І.М., Бунке О.С.; Заявник та власник НТУУ “КПІ”. – № u201004874; заявл. 23.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20. – 8 с.: іл.

*Матеріали конференцій*

32. Кошелева Л.Д. Нелінійна модель динамічних режимів водяних калориферів / Л.Д. Кошелева, І.М. Голінко // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: тези доповідей VII міжнародної науково–практичної конференції, 21 –25 квітня 2009 р. –Київ, 2009. –С. 215.
33. Сиротинський С.О. Налаштування систем керування за інтегральними показниками якості / С.О. Сиротинський, І.М. Голінко // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: тези доповідей IX міжнародної науково–практичної конференції, 18 –22 квітня 2011 р. –Київ, 2011. –С. 303.
34. Голінко І.М. Аналіз та забезпечення ефективного керування системами штучного мікроклімату / І.М. Голінко, С.Г. Степаненко, І.Є. Галицька, В.Ю. Степаненко // Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно–космічної техніки: збірка доповідей IX Міжнародної науково–практичної конференції, 17 – 18 квітня 2013 р., – Київ, 2013. С. 172–175.
35. Голінко І.М. Нестационарна модель тепло- та масообміну для водяного охолоджувача / І.М. Голінко // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: тези доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції, 22 – 25 квітня 2014 р. – Київ, 2014. –С. 138.
36. Голінко І.М. Нестационарна модель тепло- та масообміну для камери парового зволоження / І.М. Голінко // Автоматика – 2014: тези доповідей XXI Міжнародної конференції з автоматичного управління, 23 – 27 вересня 2014 р. – Київ, 2014. –С. 104–105.

37. Голінко І.М. Моделювання динаміки режиму тепломасообміну для камери форсуночного зволоження / І.М. Голінко, І.Є. Галицька // Математика в сучасному технічному університеті: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції, 25 – 26 грудня 2014 р. , –К.: НТУУ “КПІ”, 2015. –С. 22–27.
38. Голінко І.М. Комплексна динамічна модель промислового кондиціонера із форсуночним зволожувачем у просторі станів / І.М. Голінко, І.Є. Галицька // Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки: збірка доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції, 16 - 17 квітня 2015 р., –Київ, 2015. –С. 201-206.
39. Голінко І.М. Процедура синтезу оптимальної системи керування для промислових комплексів штучного мікроклімату / І.М. Голінко, І.Є. Галицька // Математика в сучасному технічному університеті: матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, 24–25 грудня 2015 р., –К.: НТУУ “КПІ”, 2016. –С. 31–34.
40. Голінко І.М. Динамічна модель прецизійного кондиціонера із паровим зволожувачем / І.М. Голінко, І.Є. Галицька // Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з автоматичного управління, 11 – 13 квітня 2017 р. –Херсон: ХНТУ, 2017. –С. 43–46.
41. Голінко І.М. Математична модель електричного калорифера у просторі станів / І.М. Голінко, І.Є. Галицька // Математика в сучасному технічному університеті: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, 29–30 грудня 2016 р. –К.: НТУУ “КПІ”, 2017. –С. 41-44.
42. Голінко І.М. Динамічна модель мікроклімату для промислового приміщення, що кондиціонуються / І.М. Голінко, І.Є. Галицька // Математика в сучасному технічному університеті: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції, 28–29 грудня 2017 р. , –К.: НТУУ “КПІ”, 2018. –С. 32-35.
43. Голінко І.М. Математичне моделювання та керування промисловими системами штучного мікроклімату / І.М. Голінко // Матеріали Міжнародної наукової конференції: Мікро- та нанонеоднорідні матеріали: моделі та експеримент, 17 – 18 вересня 2018 р. – Львів, 2018. –С. 23–25.
44. Golinko I. Mathematical Model of Heat-and-Mass Transfer for Steam Humidifier / I. Golinko, V. Drevetskiy // Proceedings of the International Scientific Conference: Modeling, Control and Information Technologies – 2019, pp. 35-36.
45. Golinko I. Mathematical Model of Heat Exchange for Non-stationary Mode of Water Heater / I. Golinko, I. Galytska. // Advances in Computer Science for Engineering and Education. – 2020, pp. 58–67
46. Pankratova N.D. Decision support system for microclimate control at large industrial enterprises / N.D. Pankratova, P.I. Bidyuk, I.M. Golinko // CEUR Workshop Proceedings. – 2020. pp. 489–498.
47. Golinko I. Mathematical Modeling of Dynamic Heat-Mass Exchange Processes for a Spray-Type Humidifier / I. Golinko, I. Galytska. // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021, pp. 63–74.

48. Golinko I. Parametric Optimization of Time-Domain Digital Control System / I. Golinko, I. Galytska. // Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. – 2022, pp. 47–60
49. Pankratova N. Digital Twin Simulation for Cyber-Physical Systems on Electric Heater Example / N. Pankratova, I. Golinko // IEEE 3rd International Conference on System Analysis and Intelligent Computing, – 2022, pp. 22–27.
50. Pankratova N. Development of digital twin based on a model with fractional-rational uncertainty / N. Pankratova, I. Golinko // International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2023). – 2023, 3392, pp. 11–22.
51. Pankratova N. Mathematical models development of digital twin under conceptual uncertainty conditions / N. Pankratova, I. Golinko // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (МПЗІС-2023): Тези доповідей XXI Міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпро: ДНУ, 2023. С. 33–34
52. Pankratova N. Architecture of intelligent microclimate control system within enterprise cyber-physical system / N. Pankratova, I. Golinko // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (МПЗІС-2024): Тези доповідей XXII Міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпро: ДНУ, 2024. С. 38–39

## АНОТАЦІЯ

**Голінко І.М. Математичні моделі та оптимізація систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Міністерство освіти і науки України, Київ, 2026.

Дисертаційне дослідження спрямоване на розв'язок актуальної науково-прикладної проблеми розробки єдиного математичного апарату для опису, аналізу, ідентифікації та оптимізації систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури. Актуальність дослідження обумовлена зростаючими вимогами підприємств і установ критичної інфраструктури у забезпеченні параметрів штучного мікроклімату для сталого функціонування людських, технічних та інформаційних компонентів в умовах невизначеності зовнішнього середовища та експлуатаційних режимів. Проблематика дослідження базується на використанні математичних підходів, що поєднують аналітичне та чисельне моделювання, методи ідентифікації та оптимізації нестационарних процесів тепло- та масообміну для аналізу фізичного процесу підготовки повітряної суміші на обладнанні кондиціонерів різної технічної реалізації.

У дисертаційній роботі запропоновано нові математичні моделі, розроблено методи чисельної ідентифікації та оптимізації систем штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури. Створені моделі забезпечують математичний опис нестационарної динаміки процесів кондиціонування повітря в формі систем диференціальних рівнянь у просторі станів з урахуванням багатовимірного характеру технологічних взаємодій, наявних невизначеностей та нелінійностей. Розроблені чисельні методи спрямовано на підвищення точності обчислювального моделювання, прогнозування параметрів мікроклімату та оптимізації критеріїв ефективності функціонування динамічних систем кондиціонування повітря. Отримані результати формують наукове підґрунтя для створення обчислювальних методів та алгоритмів інтелектуального адаптивного керування мікрокліматом у сучасних кіберфізичних об'єктах критичної інфраструктури.

У роботі виконано аналіз фізичного процесу формування штучного мікроклімату для кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури. Результати дослідження показали, що забезпечення штучного мікроклімату має технічне та соціальне спрямування, оскільки від параметрів мікроклімату залежить функціонування важливого технічного обладнання, а також фізичне здоров'я та працездатність персоналу, що перебуває у установах критичної інфраструктури. Проведено огляд міжнародних стандартів, що регламентують вимоги до штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури. На основі аналізу літературних джерел узагальнено основні параметри штучного мікроклімату, до яких належать температура, вологість, концентрація CO<sub>2</sub>, витрата припливного повітря на одну особу, мінімальна площа життєвого простору на одну особу та

тривалість забезпечення автономного функціонування об'єкта критичної інфраструктури.

Забезпечення нормативних параметрів штучного мікроклімату є суттєво важливим для промислових підприємств та установ соціальної сфери критичної інфраструктури, зокрема закладів охорони здоров'я, підземної забудови, центрів соціальних послуг та інших громадських установ. У виробничих умовах системи штучного мікроклімату сприяють стабільності функціонування технологічних процесів і підвищенню їх економічної ефективності. У соціальній сфері системи штучного мікроклімату впливають на безпеку, комфорт і життєздатність середовища для людей. Оцінка впливу штучного мікроклімату на якість виготовлення продукції та умови перебування людей є складним завданням, що носить мультидисциплінарний характер та потребує системного підходу для підтримки управлінських рішень в умовах концептуальної невизначеності та зростаючих вимог до ефективності функціонування систем кондиціонування повітря.

У дисертації запропоновано системний підхід до управління системами кондиціонування повітря, які інтегруються у кіберфізичні об'єкти критичної інфраструктури. Запропонований системний підхід складається з трьох основних етапів та охоплює: поглиблений аналіз технологічного процесу підготовки повітря як об'єкта моделювання; побудову багатовимірних математичних моделей для наявних технологій кондиціонування повітря та розробку чисельних методів ідентифікації параметрів моделей; оптимізація та адаптація системи управління кондиціонерами та впровадження розподіленої системи підтримки прийняття рішень, що забезпечує інтеграцію систем кондиціонування повітря у кіберфізичні об'єкти критичної інфраструктури. Етапи виконання запропонованого системного підходу послідовно розглядаються у розділах дисертації.

Для реалізації першого етапу системного підходу у дисертації проведено аналіз сучасного стану математичного моделювання систем кондиціонування повітря. На основі систематизації типових технологічних рішень ідентифіковано декілька десятків варіантів технологій підготовки повітряної суміші, що дозволяє розглядати системи кондиціонування повітря як окремий клас об'єктів математичного моделювання з високим ступенем структурної варіативності. Встановлено, що системи кондиціонування повітря характеризуються множинністю, цілісністю, емерджентністю, еквіпотенційністю та синергізмом, що дозволяє класифікувати їх як складні технічні системи. Критично проаналізовано існуючі математичні моделі кліматичного обладнання. Проведено аналіз існуючих методів управління кліматичним обладнанням та законів керування, що застосовуються для систем кондиціонування повітря. Для подолання наявних обмежень запропоновано нову концепцію управління процесами кондиціонування повітря, яка передбачає розв'язання задач оптимізації в координатах температури та вологовмісту повітря з урахуванням взаємодії кліматичного обладнання. Для непрямого контролю вологовмісту розроблено математичну залежність, що на основі вимірювань температури, відносної вологості та барометричного тиску дозволяє визначати вологовміст повітря.

У межах другого етапу системного підходу запропоновано математичні моделі кліматичного обладнання. У роботі розроблено сім аналітичних моделей: електричного та водяного калориферів; водяного охолоджувача; форсуночного та парового зволожувачів; камери змішування повітря; приміщення. Ці моделі дозволяють проводити кількісний та якісний аналіз динамічних характеристик обладнання кондиціонера. На відміну від існуючих, запропоновані моделі враховують тепло- та масообмінні процеси підготовки повітряної суміші. Математичні моделі наведено у стандартній формі простору станів і матричних передатних функцій.

Для розроблених аналітичних моделей кліматичного обладнання виконано класифікацію їх параметрів. Встановлено, що числові значення коефіцієнтів тепло- та масовіддачі моделей кліматичного обладнання кондиціонера залежить від низки факторів, які становлять єдиний комплекс взаємозалежних величин та мають неоднозначний вплив на динамічні властивості. Для усунення концептуальної невизначеності аналітичних моделей кліматичного обладнання запропоновано алгоритм пасивної ідентифікації, який реалізується інструментарієм цифрового двійника та забезпечує адаптивність моделей до реального процесу кондиціонування повітря. Наведено приклади обчислювального експерименту з використанням цифрового двійника для електричного та водяного калориферів. Під час чисельного моделювання відносна похибка пошуку невизначених параметрів не перевищила 5%. Розроблено методику агрегування моделей кліматичного обладнання у єдину багатовимірну модель системи кондиціонування повітря. Отримано чотири комплексні моделі для найпоширеніших технологій центрального кондиціонування повітря.

На третьому етапі системного підходу запропоновано систему підтримки прийняття рішень управління штучним мікрокліматом кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури із використанням наступних ключових принципів: ієрархічної організації функціонуючих компонентів системи; багатокритеріальної оптимізації управлінських рішень; адаптивності математичних моделей до змін зовнішнього середовища; параметричної ідентифікації аналітичних моделей та мінімізації впливу концептуальної невизначеності.

Структура системи підтримки прийняття рішень реалізована у вигляді трирівневої моделі, компоненти якої інтегруються за допомогою мережових зв'язків. На нижньому рівні функціонують граничні пристрої кіберфізичної системи, які здійснюють первинну обробку сенсорних даних та локальне керування кондиціонерами. У межах дослідження запропоновано чисельні методи оптимізації традиційних і багатовимірних систем керування локальними кондиціонерами, які забезпечують адаптацію алгоритмів керування до зміни навколишнього середовища.

На середньому рівні системи функціонують хмарні сервіси цифрових двійників кондиціонерів, які репрезентують цифрові копії функціонуючих кондиціонерів у режимі реального часу. Цей рівень забезпечує інтеграцію баз даних, що містять поточні та архівні тренди змінних кондиціонерів, конфігураційні характеристики обладнання та інші дані, а також підсистеми моделювання та вирішення задач. На цьому рівні застосовуються методи

параметричної ідентифікації моделей кліматичного обладнання та методи адаптації системи керування до зовнішніх і внутрішніх збурень за прийнятими критеріями ефективності. У межах цього рівня реалізуються чисельні алгоритми оперативного управління: оптимізації енергоспоживання; прогнозування енергоспоживання; адаптації системи керування до зовнішнього середовища.

Верхній рівень системи призначений для підтримки процесу прийняття управлінських рішень, забезпечуючи стратегічне узгодження функціонування підсистем для досягнення загальної мети управління мікрокліматом кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури.

Запропоновано експрес-методи оптимізації традиційних систем керування, де властивості об'єкта керування описуються наближеною моделлю. Експрес-методи розроблялися для широкого діапазону динамічних властивостей об'єкта керування за каналами регулювання та збурення, що дозволяє їх використання для оптимізації систем керування у різних галузях промисловості.

За результатами проведених досліджень створено багатофункціональне математичне та алгоритмічне забезпечення для реалізації системи управління штучним мікрокліматом кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури. Запропоновані математичні моделі, методи та алгоритми керування кондиціонерами доведено до практичної реалізації.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні науково обґрунтованого математичного та алгоритмічного забезпечення для розроблення, аналізу та оптимізації енергоефективних систем штучного мікроклімату. Запропоновані аналітичні моделі та цифрові двійники кліматичного обладнання, комплексні математичні моделі промислових і прецизійних кондиціонерів процесів тепло- і масообміну забезпечують підвищення точності інженерних розрахунків, підтримку режимів керування, а також можливість дистанційного моніторингу, діагностики та оптимізації роботи кліматичних систем у реальному часі. Розроблені чисельні методи традиційної та багатовимірної оптимізації регуляторів є універсальними і можуть бути інтегровані в мікроконтролерні автоматизовані системи керування, що сприяє зниженню енергетичних витрат, підвищенню надійності, адаптивності та автономності інженерних рішень для промислових підприємств, дата-центрів, медичних установ та інших об'єктів з підвищеними вимогами до параметрів мікроклімату.

Отримані наукові результати впроваджено для системи управління кондиціонером AERMEC NCT 22, учбово-тренажерного комплексу системи штучного мікроклімату та двох систем керування інженерним обладнанням теплових пунктів.

У роботі здійснено експериментальну перевірку ефективності розробленого математичного та алгоритмічного забезпечення системи керування штучним мікрокліматом виробничого приміщення друкарського цеху Банкотно-монетного двору Національного банку України. Стабільність параметрів мікроклімату оцінювалася за допомогою контрольних карт Шухарта.

За результатами статистичної обробки експериментальних даних встановлено, що процес стабілізації температури у приміщенні перебуває у статистично керованому стані. Водночас процес регулювання відносної вологості

повітря не відповідає умовам статистично керованого стану, що зумовлено наявністю значних промислових збурень у виробничому середовищі. Запропонована система керування кондиціонером AERMEC NCT 22 забезпечує підтримання температури на рівні  $20 \pm 1,5$  °C та відносної вологості  $52,5 \pm 2$  %, незалежно від пори року та зовнішніх теплових впливів технологічного обладнання друкарського цеху.

Результати промислових випробувань підтвердили високу ефективність і надійність запропонованих інформаційно-керуючих систем управління кондиціонерами, синтезованих на основі розроблених багатофункціональних математичних моделей, методів ідентифікації та чисельної оптимізації, що забезпечують підвищення стабільності параметрів штучного мікроклімату в умовах реального виробництва.

**Ключові слова:** система штучного мікроклімату, критична інфраструктура, кіберфізичний об'єкт, кіберфізична система, система кондиціонування повітря, кліматичне обладнання, математична модель, ідентифікація, оптимізація, адаптація, критерій якості, система підтримки прийняття рішень.

## SUMMARY

**Golinko I. M. Mathematical models and artificial microclimate systems optimization for critical infrastructure cyber-physical facilities.** Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for scientific Technical Sciences Doctor degree on the specialty 01.05.02 – Mathematical Modelling and Computational Methods. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation research addresses a relevant scientific and applied problem of developing a unified mathematical framework for the description, analysis, identification, and optimization of artificial microclimate in cyber-physical facilities of critical infrastructure. The relevance of the study is driven by the growing demands of critical infrastructure enterprises and institutions to maintain artificial microclimate parameters that ensure the sustainable operation of human, technical, and information components under conditions of external environmental uncertainty and variable operational modes. The research based on the use of mathematical approaches that combine analytical and numerical modeling, as well as methods for identifying and optimizing non-stationary heat and mass transfer processes, to analyze the physical process of air mixture preparation in air conditioning equipment of various technical designs.

The dissertation proposes novel mathematical models and develops numerical methods for the identification and optimization of artificial microclimate systems in cyber-physical facilities of critical infrastructure. The developed models provide a mathematical description of the non-stationary dynamics of air conditioning processes in the form of state-space differential equation systems, accounting for the multidimensional nature of technological interactions, inherent uncertainties, and nonlinearities. The proposed numerical methods are aimed at improving the accuracy of computational modeling, forecasting microclimate parameters, and optimizing performance criteria for dynamic air conditioning systems. The obtained results form a scientific foundation for the development of computational methods and algorithms for intelligent adaptive microclimate control in modern cyber-physical facilities of critical infrastructure.

The work analyzes the physical process of forming an artificial microclimate for cyber-physical facilities of critical infrastructure. The findings demonstrate that artificial microclimate provision has both technical and social dimensions, as microclimate parameters directly affect the operation of critical technical equipment as well as the physical health and work capacity of personnel present at critical infrastructure facilities. A review of international standards governing artificial microclimate requirements for cyber-physical facilities of critical infrastructure was conducted. Based on a literature survey, the key artificial microclimate parameters were generalized, including temperature, humidity, CO<sub>2</sub> concentration, fresh air supply rate per person, minimum living space area per person, and the duration of autonomous operation of a critical infrastructure facility.

Compliance with normative microclimate parameters is critically important for industrial enterprises and social-sector institutions of critical infrastructure, in particular

healthcare facilities, underground built-up areas, social-service centers and other public institutions. In industrial conditions, artificial-microclimate systems contribute to the stability of technological processes and to the improvement of their economic efficiency. In the social sphere, such systems affect safety, comfort and habitability for people. The assessment of the artificial microclimate's influence on the quality of manufactured products and on the conditions of people's presence is a complex, multidisciplinary task that requires a systematic approach to supporting management decisions under conceptual uncertainty and increasing demands for the efficiency of air-conditioning systems.

The dissertation proposes a systematic approach to the control of air-conditioning systems integrated into critical infrastructure cyber-physical facilities. The proposed approach consists of three main stages, covering: an in-depth analysis of the technological process of air preparation as the modelling object; the construction of multidimensional mathematical models for existing air-conditioning technologies and the development of numerical identification methods for model parameters; optimization and adaptation of the control system for air conditioners, along with the distributed decision-support system implementation that ensures integration of air-conditioning systems into critical infrastructure cyber-physical facilities. The stages of the proposed systematic approach are treated sequentially in the dissertation chapters.

For the implementation of the first stage of the systematic approach, the dissertation analyses the current state of mathematical modelling of air-conditioning systems. By systematizing typical technical solutions, several dozen variants of air-mixture preparation technologies are identified, enabling air-conditioning systems to be considered as a separate class of mathematical modelling objects with a high degree of structural variability. It is established that air-conditioning systems are characterized by multiplicity, wholeness, emergence, equipotentiality and synergy, permitting their classification as complex technical systems. Existing mathematical models of climate equipment are critically analysed, and current methods of climate-equipment control and control laws for air-conditioning systems are examined. To overcome the existing limitations, a new concept for control air-conditioning processes is proposed, involving the solution of optimization problems in the coordinates of air temperature and moisture content, taking into account the interaction of climate equipment. For indirect measurement of moisture content, a mathematical relationship is developed that, based on measurements of temperature, relative humidity and barometric pressure, allows determination of the air moisture content.

Within the second stage of the systematic approach, mathematical models of climate equipment are proposed. Seven analytical models are developed: electric and water-based heaters; water cooler; spray and steam humidifiers; air mixing chamber; and room. These models enable both quantitative and qualitative analysis of the dynamic characteristics of air-conditioning equipment. In contrast to existing models, the proposed models explicitly account for heat and mass-transfer processes in air-mixture preparation. The mathematical models are presented in the standard state-space form and as matrix transfer functions.

For the developed analytical models of climate equipment, a classification of their parameters is carried out. It is established that the numerical values of heat and mass

transfer coefficients of climate-equipment models depend on a number of factors that form a single complex of interdependent quantities, exerting an ambiguous influence on the dynamic properties. To eliminate conceptual uncertainty in the analytical models, an algorithm of passive identification is proposed, realized with the aid of digital twin tool and ensuring model adaptability to the real air-conditioning process. Examples of computational experiments using the digital twin for electric and water heaters are presented; in numerical modelling, the relative error of determining uncertain parameters did not exceed 5%. A methodology for aggregating climate-equipment models into a single multidimensional model of the air-conditioning system is developed, and four integral models are obtained for the most widespread technologies of central air conditioning.

At the third stage of the systematic approach, a decision-support system for managing the artificial microclimate of critical infrastructure cyber-physical facilities is proposed, based on the following key principles: hierarchical organization of the system's functioning components; multi-criterion optimization of management decisions; adaptability of mathematical models to changing external conditions; parametric identification of analytical models and minimization of the impact of conceptual uncertainty.

The structure of the decision-support system is implemented as a three-level model, whose components are integrated using network connections. At the lower level, boundary devices of the cyber-physical system perform primary processing of sensor data and local control of air conditioners. Within the study, numerical methods of optimization of conventional and multidimensional control systems for local air conditioners are proposed, providing adaptation of control algorithms to changes in the external environment.

At the middle level, cloud services of digital twins of air conditioners operate, representing digital copies of functioning air conditioners in real time. This level ensures integration of databases containing current and historical trends of air-conditioner variables, equipment configuration characteristics and other data, as well as modelling and problem-solving subsystems. At this level, parameter identification methods for climate-equipment models and adaptation methods of the control system to external and internal disturbances, according to predefined efficiency criteria, are applied. Within this level, numerical algorithms of operational control are realized: energy-consumption optimization, energy-consumption forecasting, and adaptation of the control system to external conditions.

The upper level of the system is designed to support the management decision-making process, ensuring strategic coordination of subsystem operations to achieve the overall goal of managing the microclimate of critical infrastructure cyber-physical facilities.

Express methods for optimizing traditional control systems are proposed, where the properties of the control plant are described by an approximate model. The express methods were developed for a wide range of dynamic properties of the control plant across control and disturbance channels, which allows them to be used for optimizing control systems in various industries.

Based on the research results, a multifunctional mathematical and algorithmic support has been created for the realization of an artificial-microclimate management system for critical infrastructure cyber-physical facilities. The proposed mathematical models, methods and control algorithms for air conditioners have been brought to practical implementation.

The practical value of the obtained results lies in the creation of scientifically grounded mathematical and algorithmic support for the development, analysis and optimization of energy-efficient artificial-microclimate systems of critical infrastructure cyber-physical facilities. The proposed comprehensive mathematical models of industrial and precision air conditioners, digital twins of climate equipment, and analytical models of heat and mass transfer processes ensure higher accuracy of engineering calculations, support of control modes, and the possibility of remote monitoring, diagnostics and real-time optimization of climate systems. The developed numerical methods of conventional and multidimensional regulator optimization are universal and can be embedded into microcontroller-based automation systems, contributing to reduced energy consumption, increased reliability, adaptability and autonomy of engineering solutions for industrial plants, data centers, medical facilities and other objects with enhanced requirements for microclimate parameters.

The scientific findings have been implemented in the AERMEC NCT 22 air conditioning control system, a training and simulation complex for artificial microclimate system, and two control systems for heating station engineering equipment.

An experimentally tested the effectiveness of the developed mathematical and algorithmic support for the artificial microclimate control system of the production premises of the printing shop of the Banknote Mint of the National Bank of Ukraine. The stability of the microclimate parameters was assessed using Shewhart control charts.

According to the results of statistical processing of experimental data, it was established that the process of temperature stabilization in the room is in a statistically controlled state. At the same time, the process of regulating relative air humidity does not correspond to the conditions of a statistically controlled state, which is due to the presence of significant industrial disturbances in the production environment. The proposed AERMEC NCT 22 air conditioning control system maintains a temperature of  $20 \pm 1.5$  °C and a relative humidity of  $52.5 \pm 2$  %, regardless of the season and external thermal influences from the printing shop's technological equipment.

The results of industrial tests have confirmed the high efficiency and reliability of the proposed information and management systems for air-conditioner control, synthesized on the basis of the developed multifunctional mathematical models, identification methods and numerical optimization, which ensure improved stability of artificial microclimate parameters under real-world production conditions.

**Keywords:** artificial microclimate system, critical infrastructure, cyber-physical facilities, cyber-physical system, air-conditioning system, climate equipment, mathematical model, identification, optimization, adaptation, quality criterion, decision-support system.

