

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ “КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Голінко Ігор Михайлович

УДК 519.6

ДИСЕРТАЦІЯ

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

01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



І.М. Голінко

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 розроблення комплексного науково-прикладного підходу до математичного моделювання та чисельного аналізу системи штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури, що обумовлено зростаючою потребою підприємств та 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.

Обмеженість наявних математичних моделей кліматичного обладнання, відсутність системності в їх побудові, а також фрагментарність нормативно-правової бази зумовлюють науково-прикладну проблему управління системами штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури. Її розв'язання потребує комплексного підходу на основі залучення апарату математичного моделювання та обчислювальних методів розв'язання складних задач з використанням експериментальних даних та симуляцій.

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 кондиціювання 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 кондиціювання повітря. Отримані результати формують наукове підґрунтя для створення обчислювальних методів та алгоритмів інтелектуального адаптивного керування мікрокліматом у сучасних кіберфізичних об'єктах критичної інфраструктури.

У дисертації проведено 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 CO₂, 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 кондиціювання повітря. Для подолання наявних обмежень запропоновано нову концепцію управління процесами кондиціювання 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 масообміні 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 кондиціювання 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 AERMES NCT 22 (акт випробовування, підписаний директором ТОВ «ТЕПЛОІНФОРМ» О.Н. Єрохіною від 25.09.2025 та головним інженером БМД НБ України Ю.В. Талімоновим від 29.09.2025); учбово-тренажерного комплексу системи штучного мікроклімату, (акт впровадження УТК СШМ, підписаний директором ТОВ «ТЕПЛОІНФОРМ» О.Н. Єрохіною від 25.09.2025); системи керування інженерним обладнанням (акт впровадження, підписаний директором ТОВ «КОВЧЕГ» В.В. Герасимчук від 15.05.2013); системи керування інженерним обладнанням тепловипускної промислової будівлі НВП «ІКМ» (акт впровадження, підписаний директором НВП «ІКМ» О.В. Ляховецький від 11.04.2012).

У роботі здійснено експериментальну перевірку ефективності розробленого математичного та алгоритмічного забезпечення системи керування штучним мікрокліматом виробничого приміщення друкарського цеху Банкнотно-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 AERMES 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 кондиціювання повітря, кліматичне обладнання, математична модель, ідентифікація, оптимізація, адаптація, критерій якості, система підтримки прийняття рішень.

ABSTRACT

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 is aimed at developing a comprehensive scientific and applied approach to the mathematical modelling and numerical analysis of the artificial microclimate system of critical infrastructure cyber-physical facilities, motivated by the growing need of critical-infrastructure enterprises and institutions to ensure microclimate parameters for the stable operation of human, technical and information components under conditions of external-environmental uncertainty and variable operating regimes. The research is grounded on the application of mathematical methods that combine analytical and numerical modelling, identification and optimization techniques for non-stationary heat and mass transfer

processes, used to analyze the physical process of air-mixture preparation on air-conditioning equipment of various technical realizations.

The limited adequacy of climate equipment existing mathematical models, the lack of systematicity in their construction, and fragmentation of the regulatory-legal framework lead to a scientific-applied problem in the management of artificial-microclimate systems of critical infrastructure cyber-physical facilities. Its solution requires a comprehensive approach based on mathematical modelling and computational methods for solving complex problems, using experimental data and simulations.

The dissertation proposes new mathematical models and develops numerical methods of identification and multi-criterion optimization of artificial-microclimate systems of critical infrastructure cyber-physical facilities. The created models provide a mathematical description of the non-stationary dynamics of air-conditioning processes in the state space form differential equations system, taking into account the multidimensional nature of technological interactions, existing uncertainties and nonlinearities. The numerical methods developed are directed at increasing the accuracy of computational modelling, predicting microclimate parameters, and optimizing criteria of efficiency for the operation of dynamic air-conditioning systems. The obtained results form a scientific basis for the development of computational methods and algorithms of intelligent adaptive control of microclimate in modern critical infrastructure cyber-physical facilities.

The dissertation analyses the physical process of forming an artificial microclimate for critical infrastructure cyber-physical facilities. The research shows that ensuring artificial microclimate has both technical and social orientations, since the performance of critical technical equipment as well as the physical health and work capacity of personnel depend on microclimate parameters in critical-infrastructure facilities. An overview is given of international standards that regulate requirements for the artificial microclimate of critical infrastructure cyber-physical facilities. Based on the literature analysis, the main microclimate parameters are generalized, including temperature, humidity, CO₂ concentration,

supply air flow per person, minimum living space area per person, and the duration of a critical-infrastructure facilities autonomous operation.

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 obtained scientific results have been implemented in: the control system of the air conditioner AERMEC NCT 22 (testing report signed by the General Director of LLC “TEPLOINFORM” O.N. Yerokhina on 25.09.2025 and by the Chief Engineer of the Banknote-Minting Yard of the National Bank of Ukraine Yu.V. Talimonov on 29.09.2025); the training and simulation complex of an artificial-microclimate system (introduction report of the simulator complex signed

by the Director of LLC “TEPLOINFORM” O.N. Yerokhina on 25.09.2025); the control system of engineering equipment (introduction report signed by the Director of LLC “KOVCHEH” V.V. Herasymchuk on 15.05.2013); and the control system of engineering equipment of the boiler house of the industrial building of the enterprise-development company “IKM” (introduction report signed by the Director of NPP “IKM” O.V. Lyakhovetskyi on 11.04.2012).

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 ± 1.5 °C and a relative humidity of 52.5 ± 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.

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. *(розділ колективної монографії, індексується SCOPUS)*
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. *(розділ колективної монографії, індексується SCOPUS)*

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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
9. Голінко І.М. Синтез оптимальних систем керування із мінімізацією керуючого впливу / І.М. Голінко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. –2012. –№ 2(54). –С. 79–88. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*

11. Голинко И.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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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 *(фахове видання)*
15. Голінко І.М. Принципи синтезу автоматичних систем керування промисловими кондиціонерами / І.М. Голінко // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2016. № 8, –С. 33–42. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання категорії «А», індексується SCOPUS)*
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. *(фахове видання категорії «Б»)*

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. (*фахове видання категорії «Б»*)

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. (*закордонне видання, індексується SCOPUS*)
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. (*закордонне видання, індексується SCOPUS*)
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. (*закордонне видання, індексується SCOPUS*)
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 (*закордонне видання, індексується SCOPUS Q3*)
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. (*закордонне видання, індексується SCOPUS Q3*)
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. (*закордонне видання, індексується SCOPUS Q3*)

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. Настройка 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 (*індексується SCOPUS*)
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. (*індексується SCOPUS*)
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. (*індексується SCOPUS*)
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 (*індексується SCOPUS*)
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. (*індексується SCOPUS*)
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. (*індексується SCOPUS*)
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

ЗМІСТ

	стр.	
ПРИЙНЯТІ СКОРОЧЕННЯ.....	26	
ОСНОВНІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	27	
ВСТУП	28	
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СИСТЕМ ШТУЧНОГО МІКРОКЛІМАТУ		
КІБЕРФІЗИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ.....	41	
1.1 Кіберфізичні об'єкти критичної інфраструктури та сфери їх застосування	41	
1.2 Особливості забезпечення штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури.....	44	
1.3 Міжнародні стандарти штучного мікроклімату для кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури.....	49	
1.4 Кондиціювання повітря в критичній інфраструктурі: обґрунтування та класифікація	52	
1.5 Характерні особливості процесу підготовки повітря на кліматичному обладнанні.....	55	
1.6 Динамічні моделі кліматичного обладнання кондиціонера: аналіз і систематизація	59	
1.7 Аналіз процесів керування для систем кондиціювання повітря.....	66	
РОЗДІЛ 2 СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО УПРАВЛІННЯ ШТУЧНИМ МІКРОКЛІМАТОМ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ		72
2.1 Технологічна підготовка повітря на обладнанні центральних кондиціонерів.....	72	
2.2 Технологічна підготовка повітря на обладнанні місцевих кондиціонерів	76	
2.3 Характерні системні особливості кондиціонера як складної технічної системи	79	
2.4 Класифікація системи кондиціювання повітря як об'єкта керування.....	83	

2.5 Концептуальні основи керування системами кондиціонерами	85
2.6 Визначення вологовмісту повітря за змінними, що вимірюються	88
2.7 Системний підхід до управління мікрокліматом об'єктів критичної інфраструктури	90
2.8 Висновки до другого розділу	93
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КЛІМАТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ КОНДИЦІОНЕРІВ	95
3.1 Динамічні моделі теплообмінних апаратів	95
3.1.1 Динамічна модель електричного калорифера	95
3.1.2 Динамічна модель водяного калорифера	101
3.1.3 Динамічна модель охолоджувача	108
3.2 Динамічні моделі камер зволоження	116
3.2.1 Динамічна модель камери форсуночного зволоження	116
3.2.2 Динамічна модель камери парового зволоження	125
3.3 Динамічна модель камери змішування повітря	130
3.4 Динамічна модель приміщення	132
3.5 Аналіз структури математичних моделей кліматичного обладнання ...	137
3.6 Висновки до третього розділу	140
РОЗДІЛ 4 ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛЕЙ КЛІМАТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНИХ МОДЕЛЕЙ КОНДИЦІОНЕРІВ	141
4.1 Аналіз параметричної невизначеності аналітичних моделей кліматичного обладнання	142
4.2 Підхід до розкриття концептуальної невизначеності аналітичних моделей кліматичного обладнання	144
4.3 Підхід до розробки цифрового двійника кліматичного обладнання	149
4.3.1 Приклад розробки цифрового двійника для процесу нагрівання повітря електрокалорифером	154
4.3.2 Приклад розробки цифрового двійника для нагрівання повітря водяним калорифером	162

4.4 Розробка комплексної моделі системи кондиціювання повітря у просторі станів.....	166
4.4.1 Методика розробки комплексної моделі кондиціонера у просторі станів.....	167
4.4.2 Модель кондиціонера із форсуночним зволожувачем.....	168
4.4.3 Модель кондиціонера із паровим зволожувачем.....	171
4.5 Висновки до четвертого розділу.....	175
РОЗДІЛ 5 ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ШТУЧНОГО МІКРОКЛІМАТУ КІБЕРФІЗИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ.....	176
5.1 Інформаційна система управління мікрокліматом підприємства критичної інфраструктури.....	177
5.1.1 Оперативне управління з оптимізації системи кондиціювання повітря.....	182
5.1.2 Оперативне управління з прогнозування енергоспоживання	186
5.1.3 Оперативне управління з адаптації АСК кондиціонером.....	187
5.2 Адаптація традиційних систем керування для комплексів штучного мікроклімату	189
5.2.1 Аналіз цифрової системи регулювання у часовій області.....	189
5.2.2 Аналіз критеріїв оптимізації та постановка задачі оптимізації	194
5.2.3 Процедура чисельної оптимізації одноконтурної АСК.....	197
5.2.4 Структурні схеми керування кондиціонером для стабілізації температури та вологовмісту повітря за методом “точки роси”.....	201
5.2.5 Структурні схеми керування кондиціонером для стабілізації температури та вологовмісту повітря за методом “оптимального режиму”	207
5.3 Адаптація багатовимірних систем керування для комплексів штучного мікроклімату	212
5.3.1 Аналіз критерію якості, умови керованості, спостережуваності та постановка задачі оптимізації для багатовимірних систем штучного мікроклімату	212

5.3.2 Синтез лінійно-квадратичного цифрового регулятора для технологічних комплексів штучного мікроклімату	215
5.3.3 Адаптація цифрового регулятора для кондиціонера з форсуночним зволожувачем.....	218
5.3.4 Адаптація цифрового регулятора для кондиціонера з паровим зволожувачем.....	224
5.4 Приклади адаптації традиційної та багатовимірної системи керування кондиціонером	230
5.4.1 Адаптація традиційної системи керування кондиціонером	231
5.4.2 Адаптація багатовимірної системи керування кондиціонером.....	235
5.5 Висновки до п'ятого розділу	240
РОЗДІЛ 6 ЕКСПРЕС-МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАДИЦІЙНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ.....	242
6.1 Оптимізація неперервної АСК за каналом регулювання.....	242
6.2 Оптимізація цифрової АСК за каналом регулювання.....	248
6.3 Оптимізація АСК для об'єкту другого порядку із запізненням.....	253
6.4 Оптимізація АСК за каналом збурення	256
6.5 Застосування експрес-методів для оптимізації цифрових АСК	261
6.6 Оптимізація цифрової АСК у стохастичному середовищі	263
6.7 Висновки шостого розділу	271
РОЗДІЛ 7 ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧИХ СИСТЕМ	272
7.1 Інформаційно-керуюча система штучного мікроклімату друкарського цеху Банкотно-монетного двору Національного банку України.....	272
7.2 Учбово-тренажерний комплекс системи кондиціонування повітря.....	286
7.3 Інші впроваджені системи керування	289
7.4 Висновки до сьомого розділу	291
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.....	292
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	296
ДОДАТКИ.....	322

ПРИЙНЯТІ СКОРОЧЕННЯ

АРМ – автоматизоване робоче місце;
АСК – автоматична система керування;
БД – база даних;
ЄС – Європейський Союз
ІСППР – інформаційна система підтримки прийняття рішень;
К1 – калорифер першого підігріву;
К2 – калорифер другого підігріву;
КЗ – камера змішування;
КІ – критична інфраструктура
ККШ – контрольні карти Шухарта;
КФО – кіберфізичний об'єкт;
КФС – кіберфізична система;
ЛКЦР – лінійно-квадратичний цифровий регулятор;
О – охолоджувач;
ОЕСР – Організації економічного співробітництва та розвитку
ОК – об'єкт керування;
ПЛК – програмно логічний контролер;
ПСЦК – припливна система центрального кондиціонера;
СЗ – сотовий зволожувач;
СКП – система кондиціонування повітря;
ТП – технологічний процес;
УТК – учбово-тренажерний комплекс;
ФЗ – форсуночний зволожувач;
ЦД – цифровий двійник;
ЦР – цифровий регулятор;
ERP – Enterprise Resource Planning;
IIoT – Industrial Internet of Things;
MES – Manufacturing Execution System;
SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition.

ОСНОВНІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

c – теплоємкість повітря, Дж/(кг °C);

D – абсолютна вологість повітря, кг/м³;

d – вологовміст повітря, г/кг;

F – площа поверхні, м²;

G – витрата, кг/сек;

h – ентальпія вологого повітря, Дж/кг;

L, C, H , – глибина, ширина та висота кліматичного обладнання, м;

M – маса, г, кг;

n – кількість теплообмінних трубок, шт.;

N – потужність, Вт;

P – тиск, Па;

r – теплота пароутворення, Дж/кг;

V – об'єм, м³;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м² °C);

β – коефіцієнт масовіддачі, кг/(м² сек);

θ – температура, °C;

ρ – щільність, кг/м³;

φ – відносна вологість повітря, %;

індекси умовних позначень: A – повітря, E – електричний нагрівач,

M – металева поверхня теплообміну, P – пара, S – стінка приміщення,

W – вода.

ВСТУП

У сучасних умовах спостерігається посилення залежності суспільства від надійності функціонування об'єктів критичної інфраструктури (КІ). 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, системи штучного мікроклімату КФО КІ слід розглядати як реальний інструмент супроводження 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 до математичного моделювання та обчислювальних методів управління, 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 та розробку математичних моделей для наявних модифікацій кондиціонерів, проектування ефективних обчислювальних алгоритмів оптимального керування. 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 багатовимірним динамічним об'єктом, що потребує розробки комплексних математичних моделей.

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 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 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 різноманітні 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.

Таким чином, беручи до уваги викладені положення, існує об'єктивна необхідність розвитку методів математичного моделювання та обчислювальних підходів управління для 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 Міністерства освіти і науки 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 розроблення математичних моделей, цифрових двійників та чисельних методів оптимізації динамічних процесів тепло- та масообміну для систем штучного мікроклімату КФО КІ, що забезпечить науково обґрунтований аналіз, синтез та оптимальне керування кліматичними системами в умовах параметричної, структурної та стохастичної невизначеності, а також сприятиме підвищенню їх енергоефективності, стійкості та надійності. 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 кондиціювання повітря.

Об'єктом дослідження є динамічні процеси тепло- та масообміну в системах штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури.

Предметом дослідження є математичні моделі динамічних процесів тепло- та масообміну в системах штучного мікроклімату, чисельні методи їх

аналізу, ідентифікації та оптимального керування, 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 такими теоретичними і практичними результатами, отриманими автором.

Вперше:

- 1) для промислових та прецизійних кондиціонерів запропоновано комплексні математичні моделі в просторі станів, отримані шляхом агрегування моделей кліматичного обладнання, які відрізняються від існуючих врахуванням масообмінних процесів та технології обробки повітряної суміші на кліматичному обладнанні, що забезпечує можливість моделювання робочих режимів кондиціонера в реальному часі;
- 2) запропоновано застосування та розроблення підходу до побудови цифрового двійника кліматичного обладнання, який ґрунтується на комплексному використанні аналітичної моделі, вимірних даних та методу пасивної ідентифікації, які відрізняється від відомих інтеграцією запропонованої чисельної процедури параметричної ідентифікації із адаптацією цифрової моделі обладнання, що забезпечує відтворення

динаміки стану кліматичного обладнання в режимі реального часу на протязі всього терміну експлуатації;

- 3) запропоновано метод непрямого визначення вологовмісту повітря на основі психрометричних залежностей між температурою, відносною вологістю та атмосферним тиском, який на відміну від традиційного підходу прямого вимірювання, забезпечує функціональне розв'язання контурів стабілізації температури та вологості, що підвищує точність нормованих параметрів штучного мікроклімату;
- 4) для систем штучного мікроклімату запропоновано методику розробки комплексної динамічної моделі із агрегуванням розроблених оптимізаційних моделей кліматичного обладнання, яка на відміну від традиційного підходу для наявних технологічних схем підготовки повітря забезпечує отримання багатовимірної моделі СКП в просторі станів;
- 5) розроблено чисельну процедуру параметричної оптимізації традиційних систем керування у часовій області, засновану на використанні інтегралу згортки, яка на відміну від частотних та кореневих методів синтезу використовує часову характеристику об'єкта, що 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 урахуванням 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 аналітичного методу найменших квадратів усуває обмеження лінійності та забезпечує відносну похибку ідентифікації невизначених параметрів не більше 5%;

- 8) чисельну процедуру оптимізації багатовимірного лінійно-квадратичного регулятора для СКП, яка на відміну від класичної процедури враховує логіку вибору обладнання кондиціонера для здійснення оптимального керування, що дозволяє системі керування адаптуватися до зміни зовнішнього середовища;
- 9) методи параметричної оптимізації традиційних систем керування за інтегральними критеріями, які у порівнянні із існуючими забезпечують високу практичну точність розрахунків та зручність для програмної реалізації в широкому діапазоні зміни динамічних властивостей об'єкта керування.

Практична цінність отриманих результатів має істотне практичне значення для розроблення, аналізу та оптимізації систем штучного мікроклімату КФО КІ. Запропоновані підходи та математичне забезпечення дає 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 під час проєктування і модернізації інженерних кліматичних систем для оцінювання їх динаміки, прогнозування режимів функціонування та обґрунтованого вибору структур і законів керування;
- 2) цифрові двійники кліматичного обладнання 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 дає змогу істотно покращити якість керування штучним мікрокліматом; метод можна інтегрувати в мікроконтролерні, SCADA та інформаційно-вимірювальні системи для оперативного контролю вологісних характеристик у промислових, складських і технологічних приміщеннях;
- 4) аналітичні моделі кліматичного обладнання забезпечують підвищення точності інженерних розрахунків під час проєктування та експлуатації систем нагрівання, охолодження та зволоження повітря, що дає змогу оптимізувати вибір обладнання, раціоналізувати режими його роботи та зменшувати енергетичні втрати;
- 5) чисельні методи традиційної та багатовимірної оптимізації цифрового керування системами мікроклімату забезпечують можливість автоматизації процесів керування складними технічними системами та можуть бути впроваджені в системи керування технологічними процесами, енергетичними комплексами та вентиляційним обладнанням.

Таким чином, результати роботи створюють умови для підвищення ефективності систем штучного мікроклімату на всіх етапах їх життєвого циклу – від проєктування, аналізу та оптимізації до експлуатації. Запропоновані математичні моделі та чисельні методи можуть бути покладені в основу розроблення інтелектуальних систем керування мікрокліматом, цифрових двійників інженерних комплексів та адаптивних систем моніторингу, що є особливо важливим для об'єктів КІ з підвищеними вимогами до енергоефективності, надійності та автономності.

Отримані наукові результати впроваджено для:

- 1) системи управління кондиціонером AERMEC NCT 22 виробничого приміщення друкарського цеху Банкотно-монетного двору Національного банку України, що забезпечило стабілізацію температури $20 \pm 1,5$ °C та вологості $52,5 \pm 2$ % у приміщенні цеху незалежно пори року та температурних збурень друкарського обладнання, (акт випробовування алгоритму керування промисловим кондиціонером К6, підписаний

- директором ТОВ «ТЕПЛОІНФОРМ» О.Н. Єрохіною від 25.09.2025 та головним інженером БМД НБ України Ю.В. Талімоновим від 29.09.2025);
- 2) учбово-тренажерного комплексу системи штучного мікроклімату, (акт впровадження УТК СШМ, підписаний директором ТОВ «ТЕПЛОІНФОРМ» О.Н. Єрохіною від 25.09.2025);
 - 3) системи керування інженерним обладнанням тепловпункту промислової будівлі, що забезпечило стабілізацію температури зворотного теплоносія за мережевим графіком із точністю $\pm 1,4$ °C та подачу гарячої води $60 \pm 1,3$ °C; у порівнянні із опалювальним сезоном 2009 – 2010 року теплоспоживання будівлі зменшилося на 52,7 Гкал., що складає 15,7 % до модернізації; (акт впровадження системи керування, підписаний директором ТОВ «КОВЧЕГ» В.В. Герасимчук від 15.05.2013);
 - 4) системи керування інженерним обладнанням тепловпункту промислової будівлі НВП «ІКМ», що забезпечило стабілізацію температури зворотного теплоносія за мережевим графіком із точністю $\pm 1,5$ °C; у порівнянні із опалювальним сезоном до модернізації теплоспоживання зменшилося на 47,2 Гкал., що складає економію 17,3 %, (акт впровадження, підписаний директором НВП «ІКМ» О.В. Ляховецький від 11.04.2012).

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” (ЦММППІММ ім. Я.С. Підстригача, м. Львів, 2018);
- Міжнародній науковій конференції “Modeling, Control and Information Technologies” (НТБГП, 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 індексується SCOPUS [24 – 29];
- 2 патенти на корисну модель [30, 31];
- 21 публікація у матеріалах конференцій, в тому числі 6 публікацій, що індексується SCOPUS [45 – 50].

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

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СИСТЕМ ШТУЧНОГО МІКРОКЛІМАТУ

КІБЕРФІЗИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

1.1 Кіберфізичні об'єкти критичної інфраструктури та сфери їх застосування

У сучасних умовах стрімкого розвитку інформаційних технологій, глобалізації та зростання геополітичних загроз громадяни та підприємства стають все більше залежними від великого набору інфраструктур, що охоплюють енергетичні мережі, банківський сектор, телекомунікації, Інтернет тощо. У США національна програма захисту критичної інфраструктури започаткована в 1998 році за адміністрації Клінтона, а в 2003 році оновлена за адміністрації Буша. Європейська Рада в червні 2004 року закликала Європейську Комісію підготувати загальну стратегію захисту критичної інфраструктури. Комісія Європейського Союзу (ЄС) 20 жовтня 2004 року прийняла Комюніке про захист критичної інфраструктури (КІ) в боротьбі з тероризмом. Виклик захисту КІ був визнаний майже всіма державами ЄС. Нова директива про стійкість об'єктів КІ ЄС вступила в дію з 14 грудня 2022 року. Політики дедалі більше усвідомлюють загрози, що виникають від радикальних політичних рухів та терористичних атак, а також усвідомлюють необхідність розвитку спроможності реагування у разі стихійних лих [1]. Безпека об'єктів КІ та збереження їх функціональності стає одним із пріоритетних завдань в сфері національної безпеки держав всього світу.

Поняття **об'єкта критичної інфраструктури** охоплює системи, мережі або їх частини, порушення функціонування або руйнування яких призведе до найсерйозніших наслідків для соціальної та економічної сфери держави, негативно вплине на рівень її обороноздатності та національної безпеки [2]. Перехід від об'єктів КІ до кіберфізичних об'єктів КІ полягає в інтеграції цифрових компонентів у фізичне функціонування об'єктів.

Таким чином, **кіберфізичні об'єкти критичної інфраструктури** – 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. Вони можуть розташовуватися у різних середовищах – наземному, підводному, підземному, повітряному чи космічному, що зумовлює специфіку їхніх архітектурних рішень, рівня захищеності та вимог до автономності. Незалежно від просторового розташування, ці об'єкти поєднують фізичне середовище з кіберпростором, формуючи єдину адаптивну екосистему, здатну підтримувати життєзабезпечення людей, стабільність роботи обладнання та стійкість управлінських процесів. Визначальною рисою кіберфізичних об'єктів КІ є поєднання високого рівня захищеності з підвищеними вимогами до енергоефективності, надійності систем мікроклімату, безпеки даних і когнітивної стійкості персоналу, що визначає їх ключову роль у гарантуванні національної безпеки та суспільної стійкості.

При цьому **кіберфізичні системи (КФС)**, спеціалізовані соціотехнічні системи, є ключовими компонентами сучасної критичної інфраструктури. КФС інтегрують обчислювальні, комунікаційні та фізичні процеси для забезпечення ефективного функціонування в критичних сферах.

В Україні імплементовано концепцію ЄС, наразі питання об'єктів КІ регулюється відповідними нормативно-правовими актами [3 – 6]. В умовах зростання зовнішніх загроз, нестабільності глобального середовища та технологічних ризиків об'єкти КІ стають основою безпеки, сталого розвитку та ефективного управління державою. До таких об'єктів можуть належати системи подачі води, підприємства з виробництва та зберігання харчових продуктів, електростанції, телекомунікаційні мережі, транспортні підприємства, заклади охорони здоров'я, а також багато інших об'єктів, що мають стратегічне значення.

Сфери КІ тісно переплетені між собою. Виведення з ладу одного об'єкта може спричинити збої в роботі інших елементів цієї системи. Варто підкреслити глибоку і складну залежність між критичною інфраструктурою та сектором оборони. Навіть одиничне пошкодження або знищення елемента КІ може мати фатальні наслідки. Яскравим прикладом цього є теракт на Каховській гідроелектростанції, що спричинив великі людські жертви та масштабну техногенну катастрофу. Наслідки цієї трагедії ще довго залишатимуться відчутними [7].

До сфер КІ в Україні належать підприємства та установи різної форми власності, що працюють у наступних галузях [8]: енергетична; хімічна; продовольча; транспортна; фінансова та банківська; інформаційно-технологічна та телекомунікаційна; комунальне господарство: водо-, тепло-, газопостачання; охорона здоров'я тощо. Рішення щодо визнання належності об'єкта до активів КІ приймають секторальні органи – державні органи, відповідальні за захист секторів КІ. Перелік секторів КІ регламентується постановою № 1109 Кабінету Міністрів України [4]. В Україні функціонує система класифікації об'єктів за рівнем їх критичності. Класифікація за критичністю дає можливість більш раціонально розподіляти ресурси для захисту об'єктів від можливих ризиків. Постанова № 1109 поділяє об'єкти КІ на чотири категорії [4]. Критична інфраструктура класифікується за розгалуженою структурою, що охоплює різні типи об'єктів.

Гармонійне функціонування та взаємодія секторів КІ має вирішальне значення у повсякденному житті суспільства та в умовах надзвичайних ситуацій. Порушення або знищення об'єктів КІ може мати серйозні наслідки для безпеки та здоров'я громадян, економічної стабільності держави, виникнення кризових ситуацій регіонального або навіть національного масштабу.

Наукове осмислення проблем захисту об'єктів КІ є важливим кроком до формування ефективної державної політики у сфері безпеки. У фаховій літературі наголошується на необхідності системного підходу до управління

об'єктами КІ, що включає не лише технічні аспекти безпеки, а також інституційні, правові та соціальні механізми реагування. Таким чином, розробка підходів до управління об'єктами КІ сприяє розумінню викликів, з якими стикаються сучасні держави, та пошуку ефективних шляхів їх подолання.

У сучасних умовах нестабільності глобального середовища та технологічних ризиків безпека об'єктів критичної інфраструктури стає пріоритетним завданням розвитку держав всього світу. На сучасному етапі система управління активами критичної інфраструктури в Україні розбудовується, її нормативно-правове регулювання забезпечується відповідними законодавчими актами. Водночас, характер управління залишається переважно адміністративним із обмеженим використанням інформаційних механізмів та цифрових інструментів. До складу активів критичної інфраструктури належать підприємства та установи, що функціонують в ключових галузях промисловості та сфері соціальних послуг. Переважна більшість об'єктів критичної інфраструктури потребує стабільного мікроклімату у виробничих та громадських приміщеннях, створюючи умови для надійного функціонування технологічного обладнання та забезпечуючи комфортні умови мікроклімату для закладів соціальної сфери. Системи кондиціонування повітря як допоміжна технологія набула широкого застосування в енергетичній, харчовій, хімічній, фармацевтичній, машинобудівній та інших критичних галузях промисловості. Для низки підприємств системи кондиціонування повітря стали реальним важелем прибутку.

1.2 Особливості забезпечення штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури

Забезпечення штучного мікроклімату для КФО КІ набувають особливого значення у сучасних умовах зростання безпекових, соціальних і технічних викликів. Їхнє вирішення забезпечує не лише підтримання

фізіологічно прийнятних параметрів середовища, але й створює умови для збереження психоемоційної стабільності людей, що перебувають у замкненому просторі, наприклад під землею. Найбільш очевидною сферою застосування таких систем є *бомбосховища*, де від ефективності системи кондиціювання та рівня CO₂ безпосередньо залежить здатність великої кількості людей витримувати тривале перебування під землею. У цьому випадку система виконує життєво важливу функцію забезпечення фізичного виживання, одночасно підтримуючи інформаційний та соціальний баланс.

Не менш важливим напрямом використання є *службові пункти управління*, де завдання полягає не тільки у збереженні життєздатності персоналу, а також у забезпеченні їхньої здатності до прийняття стратегічних рішень у надзвичайних умовах. Тут системи мікроклімату виступають як критичний чинник збереження працездатності керівного складу, адже навіть незначні відхилення у параметрах середовища можуть знижувати когнітивні здібності, концентрацію та швидкість реакції персоналу.

Особливе значення системи штучного мікроклімату мають у *соціальних та медичних закладах*, які призначені для тривалого перебування вразливих груп населення: дітей; літніх людей; пацієнтів із хронічними захворюваннями. У таких об'єктах система мікроклімату повинна враховувати не лише стандартні параметри штучного мікроклімату, але за потреби в адаптивному керуванні освітленням, шумовим фоном, ергономікою простору та психоемоційною підтримкою. Це підкреслює гуманітарний вимір інтегрованих систем, де технічні засоби поєднуються з соціальними та когнітивними підходами.

Окрему групу становлять *автономні технічні об'єкти*, серед яких: сховища даних, енергетичні вузли або транспортні комунікації. Для таких об'єктів критичним є забезпечення стабільності роботи обладнання, захисту від перегріву чи надмірної вологості, а також створення умов для ефективного функціонування обслуговуючого персоналу. У таких випадках системи штучного мікроклімату розглядаються як елемент кіберфізичного захисту, що

поєднує інженерні рішення з інтелектуальними технологіями моніторингу та управління.

Наведені вище системи покликані забезпечувати не лише базову життєздатність людей і техніки, а також керованість соціотехнічних процесів у замкненому просторі. У бомбосховищах пріоритетом є підтримання параметрів повітря, що дають можливість безперервного перебування людей у замкненому просторі від 24 до 72 годин. На такі автономні інтервали орієнтуються керівництва з проектування укриттів (для захисту від ураганів до 36 годин, для захисту від тропічних ураганів до 72 години) [9, 10].

Просторова площа об'єкта КІ визначає навантаження на систему повітрообміну, гуманітарні стандарти мінімуму життєвого простору становлять $\geq 3.5 \text{ м}^2/(\text{на особу})$, що зменшує ризики перегріву, зростання вмісту вуглекислого газу (CO_2) та конфліктності для групи людей [11, 12]. Для управління кількісним складом CO_2 повітря практично використовуються цільові рівні концентрації $\text{CO}_2 \leq \sim 1000 \text{ ppm}$ (parts per million) як робочий орієнтир комфорту. Слід пам'ятати, що стандарти Американського товариства інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря (ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) не встановлюють формальної границі на рівень CO_2 , натомість регламентують мінімальні об'ємні витрати свіжого повітря. Практичний індикатор $\sim 700 \text{ ppm}$ вище фону забезпечується відповідним півітрообміном у приміщенні і скрадає близько 7.5 л/с на людину [13 – 16].

За рекомендацією Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ/WHO) для помірного та холодного клімату тепловий комфорт у холодному сезоні досягається за температур не нижче 18°C , робочі діапазони температур становлять $18 - 24^\circ\text{C}$ залежно від активності та одягу, комфортний діапазон відносної вологості становить $40 - 60\% \text{ RH}$ (Relative Humidity). Зазначені інтервали пов'язують зі зниженням респіраторних ризиків і кращим самопочуттям населення [17, 18, 21, 22].

Для службових командних пунктів вкрай важливо уникати когнітивного виснаження, яке швидко зростає при підвищеному CO_2 і тепловому стресі. Практика експлуатації приміщень управління орієнтується на середній рівень концентрації $\text{CO}_2 \leq 800 - 1000 \text{ ppm}$ як орієнтир адекватної вентиляції (при тому, що гранично допустимий виробничий 8-годинний рівень становить 5000 ppm) [19, 20]. Витрати свіжого повітря задають “із запасом”, не нижче типових 7.5 л/с на особу (або більше при високій щільності робочих місць або обладнання у приміщенні), підтримуючи вологість $40 - 60\% \text{ RH}$ та робочі температури близько $20 - 24^\circ\text{C}$; ці параметри мінімізують скарги на сонливість, головний біль і допомагають утримувати стабільну швидкість мислення та точність прийняття рішень [13, 15, 18; 21, 22].

Для соціальних та медичних закладів (діти, літні люди, пацієнти з хронічними захворюваннями) вимоги є суворішими. Тут, окрім індивідуального простору $\geq 3.5 \text{ м}^2/(\text{на особу})$, як гуманітарного мінімуму, доцільно закладати додатковий резерв площі для ліжок, колясок та процедурних зон. Для вразливих груп населення комфортна температура становить переважно $20 - 22^\circ\text{C}$, а вологість $40 - 60\% \text{ RH}$ як компроміс між ризиком сухості слизових і ростом хвороботворних мікроорганізмів, що складає понад $60 - 70\% \text{ RH}$ [17, 18]. Система повітрообміну має автоматично збільшувати витрату зовнішнього повітря при наближенні CO_2 до 1000 ppm та утримуючись нижче регуляторних меж 5000 ppm . Для запобігання внутрішнім лікарняним інфекціям важливі чіткі маршрути повітря, фільтрація та контроль вологості [19, 18; 21, 22].

Для автономних технічних об’єктів (дата-центри, енергетичні вузли, транспортні камери) комбінують проектні завдання штучного мікроклімату для персоналу, враховуючи теплові баланси обладнання. Людська зона повинна відповідати наведеним вище діапазнам температур, вологості та повітрообміну, тоді як машинні зони часто потребують підвищеної вентиляції та осушення повітря. За умов аварій чи блокування доступу орієнтиром слугує автономність $24 - 72$ години, з локальним резервом енергії для безперервної

вентиляції та підтримання нормативів CO₂, температури та вологості [9, 10]. Як базову “планку тісноти” можна застосовувати мінімальні площі із FEMA (Federal Emergency Management Agency – Федеральне агентство США з управління у надзвичайних ситуаціях) для короточасних укриттів. Наприклад, у сценаріях дуже короткої тривалості за рекомендаціями мінімальний особовий простір становить $\approx 0.46 \text{ м}^2/(\text{на особу})$, однак для тривалого перебування перевага за гуманітарними нормами становить $\geq 3.5 \text{ м}^2/(\text{на особу})$, що краще узгоджуються із тепловими та психофізіологічними потребами людини [9, 12].

Таким чином, можна отримати узагальнені характеристики штучного мікроклімату для КФО КІ:

- робоча ціль підтримки концентрації CO₂ становить $\leq 800 - 1000 \text{ ppm}$;
- витрата вентиляційного повітря не менше $\sim 7.5 \text{ л/с}$ на особу;
- температура повітря $\geq 18 \text{ }^\circ\text{C}$, комфортний діапазон температур $18 - 24 \text{ }^\circ\text{C}$;
- вологість повітря $40 - 60\% \text{ RH}$;
- площа особового простору на особу $\geq 3,5 \text{ м}^2$;
- автономність перебування $24 - 72 \text{ год}$ залежно від сценарію ризику.

Адаптація системи штучного мікроклімату до об’єктів КІ має забезпечити повноцінне функціонування людей у складних обставинах, зберегти їхній психоемоційний стан, підтримати моральну стійкість і забезпечити ефективне функціонування об’єктів КІ у критичних ситуаціях. Це робить розробку надзвичайно цінною з позицій сучасної обороноздатності та національної безпеки.

Таким чином, для забезпечення штучного мікроклімату КФО КІ визначено узагальнені параметри мікроклімату та їх допустимі діапазони підтримки. Інтеграція СКП із модулем інтелектуального прийняття рішень забезпечує генерацію оптимальних сценаріїв управління, які в підсумку впливають на фізичне середовище, підтримуючи його стабільність, комфортність і безпеку для людей та обладнання.

1.3 Міжнародні стандарти штучного мікроклімату для кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури

Штучний мікроклімат у КФО КІ розглядають як результат інтеграції технічних, екологічних, соціальних і когнітивних підсистем керування, де нормативи якості повітря, теплового комфорту та життєзабезпечення інтегруються з енергетичними, ергономічними та організаційними обмеженнями [14, 17, 75, 76].

Так, базові вимоги до мінімальної вентиляції й прийнятної якості повітря закріплені в стандарті ASHRAE 62.1 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – Американське товариство інженерів з опалення, охолодження та кондиціювання повітря), який визначає процедури оцінки зовнішньої якості повітря, розрахунки подачі зовнішнього повітря та вимоги до документації, що прямо стосується проєктування КФО КІ в різних середовищах розміщення [14].

Міжнародні стандарти ASHRAE 55 і ISO 7730 (International Organization for Standardization – Міжнародна організація зі стандартизації) задають критерії теплового середовища, такі як PMV (Predicted Mean Vote – передбачене середнє теплове відчуття) та PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied – прогнозований відсоток незадоволених), які у поєднанні визначають допустимі діапазони температури та вологості та методи їх перевірки для умов тривалого перебування персоналу [75, 76].

Підхід WHO Housing and Health Guidelines (World Health Organization – Всесвітня організація охорони здоров'я) підсилює ці інженерні норми доказовою базою впливу житлових або укрітєвих умов на здоров'я, зокрема щільність розміщення, вологісний режим і заходи зі зниження ризиків [17].

Для підземних об'єктів (бомбосховища, командні пункти, медичні укриття) критичними є стабілізація CO₂ (Carbon Dioxide — вуглекислий газ), температури та вологості за умов герметизації й обмежених ресурсів енергії та повітря. У практиці цивільного захисту настанови FEMA P-361 (Federal Emergency Management Agency – Федеральне агентство США з управління у

надзвичайних ситуаціях) для безпечних приміщень (safe rooms) і суміжні стандарти ICC 500 (International Code Council – Міжнародна рада з кодексів) задають цільові рівні стійкості систем до екстремальних впливів і автономності, що прямо впливають на вимоги до HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning – систем опалення, вентиляції та кондиціювання повітря), фільтрації та резервування живлення [9].

Для гуманітарних укріплень Sphere Handbook (Humanitarian Charter and Minimum Standards in Humanitarian Response – Гуманітарна хартія та мінімальні стандарти у гуманітарному реагуванні) наводить мінімальні норми площі та життєзабезпечення (зазвичай $\approx 3,5$ м² на особу як орієнтир для планування), які, у поєднанні з гігієнічними рекомендаціями ВООЗ, використовують як вихідні дані для проектування мікроклімату у притулках і сховищах [17, 77].

З точки зору граничних концентрацій CO₂ у повітрі для тривалого перебування персоналу, NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health – Національний інститут охорони праці та здоров'я США) у своєму Pocket Guide to Chemical Hazards (Довіднику з хімічних небезпек) фіксує рекомендоване середньозмінне значення TWA (Time-Weighted Average – середньозмінне зважене за часом значення) 5000 ppm і STEL (Short-Term Exposure Limit – короткострокове граничне значення впливу) 30 000 ppm, що використовується як верхня межа для сценаріїв аварійної або тимчасової експлуатації. У системному проектуванні КФО КІ це трансформується в робочі цілі ≤ 800 –1000 ppm як критерій якості середовища для підтримки когнітивної працездатності [78].

Для підводних інфраструктур (офшорні або морські модулі, підводні лабораторії) до вимог додатково входять суворі герметичність, контроль конденсації та корозійні ризики. Галузеві гіді з habitability (життєпридатності середовища) від ABS (American Bureau of Shipping — Американське бюро судноплавства) встановлюють вимоги до шуму, вібрації, освітлення й indoor climate (внутрішнього клімату), які напряду впливають на параметри HVAC і

методики інструментальних випробувань у житлових і робочих зонах [79]. Такі документи задають перевірені підходи до оцінювання середовища і можуть бути імплементовані в кіберфізичні контури керування як цільові функції оптимізації (комфорт ↔ енерговитрати ↔ надійність).

Для космічних об'єктів архітектура ECLSS (Environmental Control and Life Support System – система екологічного контролю та життєзабезпечення) є прикладом високорівневої інтеграції підсистем водопідготовки, ревіталізації повітря, генерації кисню, вилучення CO₂ та відведення тепла – з жорсткими вимогами до автономності, моніторингу і відмовостійкості. Поточні технічні брифінги NASA OCHMO (Office of the Chief Health and Medical Officer – Офіс головного лікаря НАСА) і факт-листи NASA MSFC (Marshall Space Flight Center – Центр космічних польотів імені Джорджа Маршалла) описують склад і вимоги до вентиляції, вологості, контрольованих меж тиску та газового складу та використання «замкнених циклів» (регенерація води/кисню), що є методологічним еталоном для екстремальних і підземних сценаріїв [42, 43].

Узагальнюючи, корпус міжнародних стандартів і керівництв формує спільну методологію для всіх середовищ розташування:

- нормативи вентиляції та теплового комфорту (ASHRAE 62.1, ASHRAE 55, ISO 7730);
- доказові санітарно-гігієнічні рамки для житла або укриттів (WHO, Sphere);
- критерії стійкості й безпеки для екстремальних впливів (FEMA P-361);
- галузеві вимоги до життєпридатності середовища (ABS Habitability Guide);
- еталонні інтегровані життєзабезпечувальні системи для замкнених об'ємів (NASA ECLSS).

Разом вони підтримують системний підхід до КФО КІ: від сенсорики та цифрових двійників (digital twins) – до ієрархічного керування мікрокліматом і прийняття рішень з урахуванням людського фактора та обмежень автономності [9, 14, 17, 42, 43, 75, 76, 79].

1.4 Кондиціювання повітря в критичній інфраструктурі: обґрунтування та класифікація

В умовах зростаючої залежності суспільства від стабільного функціонування об'єктів КІ системи кондиціювання повітря (СКП) набувають особливої актуальності. Вони не лише забезпечують комфортні умови мікроклімату для людей, а й відіграють ключову роль на промислових об'єктах КІ підвищуючи стабільність роботи обладнання, запобігаючи його перегріву, накопиченню вологи, пилу або корозійних домішок.

Нижче наведено основні промислові галузі КІ, де використовуються технологічні СКП. Розглянемо причини, що викликають необхідність підтримки мікроклімату у промислових приміщеннях [24, 26].

1. Оборонна промисловість (точне приладобудування, електрика та радіоелектроніка) [23]:

- зміна розмірів матеріалів при коливанні температури повітря;
- корозія металів при підвищеній вологості повітря;
- вплив підвищеної вологості повітря на діелектричні властивості гігроскопічних ізоляційних матеріалів;
- вплив пилу повітря на якість кінцевої продукції.

2. Фармацевтична та хімічна промисловість:

- втрата сипкості порошкових речовин при підвищеній вологості повітря;
- зміна форми та механічних властивостей гігроскопічних матеріалів при коливанні вологості повітря;
- зміна консистенції колоїдних плівок і тіл при коливаннях температури і відносної вологості повітря;
- зміна швидкості протікання хімічних реакцій при коливаннях температури і вологості повітря;
- вплив пилу повітря на якість кінцевої продукції.

3. Харчова промисловість [27]:

- втрата сипкості порошкових речовин при підвищеній вологості повітря;

- уповільнення біохімічних процесів і діяльності мікроорганізмів при зниженні температури повітря;
 - залежність швидкості висихання вологих гігроскопічних матеріалів від вологості повітря.
4. Тваринництво [28]: комфортні умови мікроклімату для вирощування тварин.

На об'єктах КІ також використовуються комфортні СКП. Комфортні СКП призначені для підтримання штучного мікроклімату (температури, вологості, чистоти та швидкості руху повітря), які відповідають оптимальним санітарно-гігієнічним нормам [29]:

- комфортні кліматичні умови для перебування людини;
- вільне від бактерій та пилу середовище (для запобігання хвороб).

До основних активів КІ, де підтримуються комфортні умови мікроклімату відносяться наступні.

1. Охорона здоров'я (діагностичні медичні центри, клініки та госпіталі).
2. Транспорт та пошта (метрополітен великих міст, підземні транспортні сполучення, приміщення державних установ).
3. Цивільний захист населення та територій (об'єкти підземної урбаністики міст, бомбосховища, приміщення державних установ).

Спектр СКП дуже різноманітний та має розгалужену класифікацію в залежності від призначення кондиціонера [30 – 33]. На сьогодні нормативної класифікації СКП не існує, але на практиці та у технічній літературі історично склалася термінологія. Спеціалісти проводять класифікацію СКП за різними ознаками кондиціонера. В основі класифікації СКП відображається фізичний процес обробки повітряної суміші на обладнанні кондиціонера [35]. Залежно від розташування кондиціонера відносно приміщень, що обслуговуються, СКП поділяються на *центральні* та *місцеві*. За тиском, що створюють вентилятори кондиціонерів розрізняють СКП *із низьким тиском, середнім та високим тиском*. За наявності власного джерела теплоти і холоду розрізняють

автономні та неавтономні кондиціонери. За принципом обробки повітря СКП поділяють на прямоточні, рециркуляційні та комбіновані.

Центральні СКП являють собою неавтономні кондиціонери, в яких проводиться підготовка повітря з подальшим його розподілом по приміщеннях за допомогою повітроводів. Самі кондиціонери знаходяться поза приміщеннями, що обслуговуються.

Місцеві СКП виготовляються на базі автономних і неавтономних кондиціонерів та встановлюються в приміщеннях, що обслуговується.

Автономні кондиціонери у своєму складі мають весь комплекс обладнання, що дозволяє провести необхідну обробку повітря відповідно до нормативних вимог по очищенню, нагріванню, охолодженню, осушенню, зволоженню та розподілу повітря, а також засоби керування та дистанційного контролю. Для роботи автономної СКП необхідно подати лише електричну енергію. До автономних СКП відносяться моноблочні віконні, шафові кондиціонери, спліт-системи. *Неавтономні кондиціонери* не мають вбудованих агрегатів, які є джерелами тепла і холоду. До таких кондиціонерів від джерел тепло- та холодопостачання подаються теплові агенти (вода, фреон).

Найбільше розповсюдження в промисловості отримали центральні СКП. За кількістю приміщень, що обслуговуються центральні СКП поділяються на: *однотональні, багатотональні*. Однотональні СКП застосовуються для обслуговування одного приміщення з рівномірним розподілом тепло- і вологовиділення. Багатотональні СКП застосовуються для обслуговування декількох приміщень або приміщення з нерівномірним розподілом тепло- і вологовиділення.

Таким чином, кліматична техніка має розгалужену класифікацію. Винайдення кондиціонера обумовлено промисловими потребами. Активи КІ будь-якої держави характеризуються особливими вимогами щодо підтримання штучного мікроклімату, необхідного для стабільного функціонування технологічного обладнання на промислових об'єктах, а також

для забезпечення комфортних умов перебування людей у соціально значущих приміщеннях КІ. СКП відіграють ключову роль у забезпеченні стійкості та ефективності функціонування підприємств та установ, які відносяться до об'єктів КІ.

1.5 Характерні особливості процесу підготовки повітря на кліматичному обладнанні

При проектуванні СКП (для полегшення аналізу тепломасообмінних процесів на обладнанні кондиціонера) дослідники використовують графічні номограми [23, 30 – 32]. Найбільше розповсюдження отримали $h - d$ діаграма Рамзіна, діаграми Мольте та Керрієра. У країнах західної Європи для аналізу процесів кондиціювання повітря використовуються діаграми Мольте та Керрієра [38]. Історично склалося, що в Україні та країнах СНД розповсюджена $h - d$ діаграма, яку запропонував у 1918 р. професор петербурзького університету Л.К. Рамзін. Діаграма однозначно відображає взаємозв'язок параметрів вологого повітря за певного атмосферного тиску повітря. $H - d$ діаграма є нормативним документом відповідно до Державного стандарту України ДСТУ 3651.1-97 [39].

Діаграма Рамзіна будується в косокутній системі координат [30, 31]. У Додатку А представлена $h - d$ діаграма, що визначає залежність основних характеристик повітряної суміші для заданого барометричного тиску. По осі абсцис відкладається вологовміст повітря d

$$d = 1000 \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{с}}}, \quad (1.1)$$

тут $M_{\text{п}}$ – маса пари у повітряній суміші, г; $M_{\text{с}}$ – маса сухого повітря у повітряній суміші, кг.

По осі ординат під кутом 135° відкладається ентальпія h вологого повітря. Також, наносяться криві відносної вологості φ

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}} \approx \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{н}}}, \quad (1.2)$$

тут ρ_{Π} – абсолютна вологість повітряної суміші, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_H – максимально можлива густина водяної пари у вологому повітрі, що відповідає густині насиченої водяної пари, $\text{кг}/\text{м}^3$; P_H – тиск насиченої пари, Па ; P_{Π} – парціальний тиск парів води, Па .

Парціальний тиск водяної пари вологого повітря однозначно визначається вологовмістом та не залежить від температури [30, 37]

$$P_{\Pi} = \frac{P_6 d}{623 + d} . \quad (1.3)$$

Тиск насиченої пари можна визначити за залежністю, яку запропонував М. І. Фільнеєв [40]

$$P_H = 133.3 \cdot 10^{\frac{156 + 8.12 \theta}{236 + \theta}} , \quad (1.4)$$

або за довідковими таблицями [41]. Якщо відомо температуру повітря θ та його відносну вологість φ використовуючи залежності (1.2) – (1.4) можна розрахувати вологовміст d повітряної суміші.

В загальному випадку методи обробки повітряної суміші можна розділити на дві основні групи: сухі та вологі методи [35]. Вибір методу диктується техніко-економічним обґрунтуванням та можливими технологічними способами реалізації необхідного мікроклімату у приміщенні. Сухі методи обробки повітря реалізуються за рахунок взаємодії повітря з поверхнею теплообмінних апаратів. Вологі методи обробки повітря реалізуються за рахунок безпосереднього контакту між повітрям і водою у камерах зрошування. Розглянемо детальніше особливості функціонування кліматичного обладнання СКП.

Для нагрівання повітря в кондиціонерах використовуються теплообмінні апарати, часто їх називають калориферами. Загальною ознакою калориферів є наявність теплообмінної поверхні між повітрям та теплоносієм. Нагрівання повітря поверхневим теплообмінним апаратом на $h - d$ діаграмі зображується вертикальною лінією (див. Додатк А). Вологовміст повітря при контакті з сухою гарячою поверхнею калорифера не змінюється. Температура та ентальпія при нагріванні збільшуються, а відносна вологість зменшується.

Для охолодження та висушування повітря у СКП використовуються теплообмінні апарати, які називають охолоджувачами повітря. Конструкція охолоджувачів аналогічна водяним калориферам. В процесі охолодження повітря може конденсуватися волога. На першому етапі повітряна суміш охолоджується із постійним вологовмістом. На цьому етапі процес охолодження зворотний нагріву, який розглянуто вище. Далі, процес охолодження повітряної суміші супроводжується конденсацією вологи. На другому етапі відносна вологість залишається постійною $\varphi_{BC} \approx 98\%$. При подальшому охолодженні температура, ентальпія та вологовміст повітряної суміші зменшується.

Режим зволоження в СКП використовується для зрошення припливного повітря до необхідної вологості. Найбільше розповсюдження отримали два метода зволоження повітря: адіабатне та ізотермічне [44]. Адіабатне зволоження реалізується у камерах форсуночного та сотового зволоження повітря, ізотермічне – у камерах парового зволоження. Конструктивно перераховані камери зволоження та методи керування ними відрізняються. Розглянемо особливості протікання процесів зволоження у даних камерах.

Адіабатне зволоження. В камері форсуночного зрошування здійснюється адіабатне зволоження повітря (див. Додатк А). Процес адіабатного зволоження у координатах $h - d$ діаграми зображаться прямою нахиленою під кутом приблизно 45° до осі d ($h = \text{const}$). Фазовий перехід води із рідкого стану у пару проходить шляхом вільного випаровування. При цьому має місце перехід частини явного тепла у приховане. При збільшенні вологовмісту повітряної суміші зменшується її температура. Конструктивно форсуночні зволожувачі проектується таким чином, щоб забезпечити відносну вологість 100 % в точці роси. На практиці вдається досягнути $\varphi_B \approx 98\%$.

Більшість недоліків форсуночних камер зрошення повітря усунено у камерах сотового зволоження за рахунок використання сотові насадки, що збираються з гофрованих гігроскопічних листів. У сотових камерах

реалізується адіабатне зволоження повітря. Ефективність адіабатного зволоження залежить від глибини насадки за ходом повітря і швидкості припливного повітря. Витрата зрошуючої води повинна бути достатньою для підтримки вологості гігроскопічного матеріалу насадки сотового шару в стані гігроскопічного насичення.

Ізотермічне зволоження. Процес ізотермічного зволоження проходить при постійній температурі повітря у камерах парового зволоження. У повітря безпосередньо вноситься насичена пара. Фазовий перехід води із рідини у пару відбувається за рахунок парогенератора. Найчастіше у СКП використовують електричні парогенератори.

Процес парового зволоження зображується горизонтальною прямою на $h-d$ діаграмі, що паралельна осі d . Ентальпія повітряної суміші росте за рахунок тепла пароутворення. Також, росте вологовміст та відносна вологість повітря. Якщо знехтувати теплотою пари, що вноситься в потік повітря, температура повітряної суміші залишається практично незмінною. Важливою перевагою методу парового зволоження є гарантія відсутності хвороботворних бактерій в зволожуючому середовищі, яким є пара. Тому, методи парового зволоження широко використовуються в системах кондиціонування приміщень: реанімацій та операційних; для виробництва, фасування та пакування чистих матеріалів та ін.

З метою зниження витрати теплоти на обробку припливного повітря у СКП утилізується теплота витяжного повітря. Для утилізації тепла витяжного повітря у кондиціонерах використовують рециркуляцію повітря та теплообмінні апарати різної конструкції.

Повернення частини повітря в приміщення в початкову ділянку СКП дозволяє значно скоротити витрату тепла та холоду на обробку повітря. Такі схеми знайшли застосування в тих випадках, коли у приміщенні не виділяються шкідливі гази. Для організації рециркуляції повітря застосовуються змішувальні блоки. У камеру змішування надходить припливне повітря із витратою G_A (параметрами повітря із витратою G_A : θ_A –

температура, d_A – вологовміст, h_A – ентальпія) та повітря рециркуляції із витратою G_B (θ_B , d_B , h_B). Відношення $n = G_B/G_A$ називається коефіцієнтом рециркуляції та показує, яка кількість повітря із параметрами точки B припадає на 1 кг повітря із станом точки A . Для припливного повітря, що характеризується параметрами точки A , B та C можна записати баланси теплоти і вологи за співвідношенням [24, 30]:

$$\begin{cases} h_A + n \cdot h_B = (1 + n) h_C; \\ d_A + n \cdot d_B = (1 + n) d_C; \end{cases} \quad (1.5)$$

тут h_C , d_C – ентальпія та вологовміст повітряної суміші у камері змішування.

У теплообмінних камерах рекуперації передача тепла від витяжного повітря до припливного здійснюється через пластини рекуператора, які виконуються із металічних або неметалічних матеріалів. В камерах рекуперації із неметалічними пластинами окрім тепла передається потік вологи. Теплообмінні потоки в пластинчатих рекуператорах можуть організовуватися за прямоточною, протиточною та перехресною схемами. Металеві пластинчаті рекуператори класифікуються як поверхневі теплообмінні апарати, для яких процес теплообміну в координатах $h - d$ діаграми аналогічний калориферам нагріву повітря.

1.6 Динамічні моделі кліматичного обладнання кондиціонера: аналіз і систематизація

СКП є складною технічною системою, де переплітаються між собою роботи дослідників різних технічних спеціальностей. Тут досліджуються повітрообмінні процеси [52–58], розробляються альтернативні технології штучного мікроклімату [59–66], підвищується ефективність експлуатації обладнання кондиціонерів [67–74] та інше. Усі напрямки досліджень ґрунтуються на наявності самого об'єкту дослідження – СКП. Підґрунтям для технологічної обробки повітря є дослідження процесів тепло- та масообміну кліматичного обладнання кондиціонера.

Значний вклад в розвиток теоретичних основ проектування СКП, розробки нового обладнання, вдосконалення схемних рішень внесли українські дослідники В.В. Джеджула [32], О.М. Горін [61], В.В. Вичужанін [67], Н.В. Жихарєва [124], О.І. Липа [125], М.Ф. Друкований [126], В.С. Кравченко [127] та закордонні спеціалісти W. Carrier [128], S.N. Nuggenhalli [129], S.K. Wang [130], W.F. Stoecker [131], R. McDowall [132]. Дослідження динамічних режимів кліматичного обладнання та розробка теоретичних основ управління СКП розглянуто в роботах Е.С. Бондаря [31, 39], С.В. Нефєлова [133], О.О. Римкевича [134], О.Г. Сотнікова [135], R.J. Auvil [136], R.W. Haines та D.C. Hittle [137], F. Shadpour [138] та інших науковців.

Перспективним напрямком досліджень із розробки математичних моделей СКП є використання статистичних методів аналізу та машинного навчання. Це дає змогу оцінювати динамічну поведінку системи мікроклімату на основі історичних даних. Серед наявних публікацій слід виділити науковців із університету Пердью [104] (США), таїландських науковців із університету Таммасат [105], китайських науковців із різних університетів [106 – 110]. У своїх дослідженнях науковці застосовують моделі Маркова, авторегресії, нейронні мережі та динамічні мережі Байєса. Варто зауважити, що більшість публікацій, які використовують методологію системного аналізу, зосереджені на місцевих кондиціонерах, що реалізують сухі методи обробки повітря. Такі системи є технологічно простіші у реалізації порівняно з центральними кондиціонерами.

Сучасна методологія дослідження складних технічних систем використовує принцип декомпозиції, згідно якого СКП поділяється на функціональні підсистеми для детального аналізу їхніх властивостей та впливу на систему загалом. Водночас аналіз СКП не є самодостатньою метою, оскільки вона виконує роль допоміжної технології у промисловому виробництві. Публікації останніх років [111–114] переконливо свідчать, що концептуальні тенденції в управлінні складними технічними системами

ґрунтуються за принципом агрегування технологій і систем управління виробництвом в єдину кіберфізичну систему [16, 109, 114, 115].

Із зазначених міркувань системний підхід як методологія наукових досліджень [46, 116] дає можливість провести всебічний аналіз СКП врахувавши складність процесу підготовки повітря для об'єктів КІ, виконавши глибинний аналіз всіх сторін функціонування такої системи. Методологія системного підходу розроблена і викладена у роботах М.З. Згуровського та Н.Д. Панкратової [46], В.М. Кунцевича [117], П.І. Бідюка [118], В.Я. Данилова [119] та багатьох інших українських та закордонних авторів. Як зазначалося вище, на сьогодні дослідники проводять декомпозицію кондиціонера на функціональні блоки, розробляють математичні моделі цих елементів СКП та оптимізують їх функціонування. Проведемо огляд існуючих математичних моделей кліматичного обладнання СКП.

У роботі В.В. Кафарова [120] розглянуто моделювання нестационарних процесів теплообміну для поверхневих теплообмінних апаратів. Запропоновані математичні моделі теплообміну представляються системою диференціальних рівнянь в часткових похідних без врахування теплоаккумуляції у трубках теплообмінника та із врахування теплоаккумуляції трубчатки. Модель без врахування теплоаккумуляції у трубках теплообмінника є неприйнятною для кліматичного обладнання розглянутого, оскільки теплоаккумуляція трубчатки є суттєвою.

Розглянуті недоліки динамічних моделей теплообмінного обладнання враховано у роботах [121, 122]. Запропонована модель містить диференціальне рівняння, що описує теплоаккумуляцію корпусу теплообмінного апарату. Даний динамічний елемент не суттєвий, враховуючи теплоізоляцію корпусу та його незначну площу теплообміну, яка на порядок менша порівняно із площею оребреної трубчатки. Наявність четвертого диференціального рівняння ускладнює модель. До недоліків розглянутих моделей слід віднести однофазність середовища матеріальних потоків, оскільки при охолодженні та осушенні повітря частина вологи із повітряної суміші може конденсуватися.

В роботі В.І. Федорова [123] розглядаються математичні моделі теплообмінників із зміною агрегатного стану матеріальних потоків при конденсації пари. Ідею методу елементарних балансів, що запропоновано Федоровим, слід використати при розробці моделі тепло- та масообміну для рідинних охолоджувачів та калориферів.

Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що в інженерних розрахунках динамічні властивості теплообмінника типу “рідина–повітря” описують ланкою першого порядку незалежно від каналу впливу [39, 135, 139]. При цьому виявляється, що стала часу не залежить від каналу впливу. Сталу часу та коефіцієнт передачі можна визначити розрахунковим шляхом, на практиці також користуються графоаналітичним методом [135].

В роботі [134] аналітична модель теплообмінного апарата описується системою диференціальних рівнянь в часткових похідних. Розв’язок аналітичної моделі автори пропонують проводити використовуючи перетворення Лапласа, в публікації канал регулювання теплообмінного апарату представлено аперіодичною ланкою другого порядку із запізненням.

В роботі [140] запропоновано розподілену модель, яка описує процес теплообміну для нестационарних температурних полів рідини, теплообмінної стінки та повітря. Задача зводиться до розв’язання двох рівнянь у частинних похідних і одного звичайного диференціального рівняння. Як недолік, слід відзначити обмеженість використання моделі для рідинних охолоджувачів, оскільки модель не враховує масообміні процеси при охолодженні та осушенні повітря. Зазначений недолік враховано у статті [141], де система диференціальних рівнянь теплообміну доповнюється рівнянням масообміну, яке враховує конденсацію вологи повітряної суміші під час охолодження.

Автори роботи [102] запропонували нелінійну динамічну модель для теплообмінника (охолоджувача), яка поєднує метод згрупованих параметрів (Lumped Parameter Method, LPM) і метод рухомої межі (Moving Boundary Method, MBM). Вдосконалений метод відноситься до напрямку LMTD (Log Mean Temperature Difference) і використовується для розрахунку теплообміну

в умовах фазового переходу. Запропонована модель є компромісною між точністю, швидкістю та стійкістю, Вона може бути використана для моделювання великих систем, де обчислювальні витрати є критичним фактором.

У роботі [107] автори поєднують фізико-механістичний підхід із методами машинного навчання. Основна ідея статті – ідентифікація коефіцієнта теплопередачі K для оптимального управління теплообмінником. Для точного визначення параметра K використовується метод глибокого підкріпленого навчання (Deep Deterministic Policy Gradient, DDPG). Випробування на двох наборах реальних даних підтвердили ефективність методу навіть при зміні витрати рідини. Середня відносна похибка між прогнозованими та реальними значеннями склала менше 5%.

Складність нестаціонарних тепломасообмінних процесів в зрошувальних камерах ускладнює отримання однозначних динамічних та статичних характеристик. У дослідників відрізняються не тільки розрахункові залежності, а також і види передатних функцій. Найбільш наочною інтерпретацією динамічних процесів у зрошувальній камері є її подання у вигляді двох динамічних ланок [39, 135]. Перша ланка – сам простір камери зрошування де проходять тепломасообмінні процеси. Друга ланка – піддон форсуночної (або сотової) камери зрошування або парогенератор для парового зволожувача. Як правило, камеру зрошування представляють підсилювальною ланкою із змінним коефіцієнтом передачі, який залежить від початкових параметрів припливного повітря та вибраного каналу керування зрошувальною камерою. Другу ланку (піддон форсуночної камери або парогенератор) представляють аперіодичною ланкою із сталою часу, яка пропорційна об'єму води на зрошення.

Розрахункові залежності для визначення коефіцієнтів передатних функцій форсуночних камер зволоження можна знайти в роботі О.В. Степанова [142]. Основний недолік запропонованих моделей – лінійний математичний опис нестаціонарних процесів у камері зволоження. Автори

роботи [139] пропонують математичний опис камери зволоження у вигляді аперіодичної ланки першого порядку.

У роботах [143, 144] Вичужанін В.В. запропонував модель парового зволожувача у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь. Як недолік, слід відзначити відсутність моделювання теплової акумуляції у ємності парогенератора, яка буде суттєвою враховуючи масу парогенератора.

Для дослідження тепло- та масообміну у роботах Л.М. Зусмановича [145, 146] використовуються безрозмірні залежності, які характеризують зміну ентальпії та температури повітряної суміші при безпосередньому контакті повітря із водою. Безрозмірні залежності для визначення зміни ентальпії та температури отримані на основі розв'язку системи диференціальних рівнянь повного та явного теплообміну.

У роботі [147] П.В. Участкін запропонував дослідження процесів у форсуночних зволожувачах, використовуючи поняття об'ємних коефіцієнтів тепло- та масообміну. За суттю математичного опису процесів моделі Л.М. Зусмановича та П.В. Участкін не відрізняються.

Проведені експериментальні дослідження процесу тепломасообміну на поверхні окремих вільно падаючих краплин дозволили узагальнити результати у критеріальній формі [148, 149]. Слід відзначити, що вказані критеріальні залежності не можуть використовуватися для практичних розрахунків коефіцієнтів тепло- та масообміну у форсуночних камерах кондиціонерів із-за відсутності даних про діаметри краплин та величини результуючої швидкості повітря, що обтікає краплини.

Камери змішування повітря як об'єкт керування прийнято розглядати як безінерційну пропорційну ланку [31, 68, 135], коефіцієнт підсилення якої знаходиться із системи рівнянь теплового та масового балансів (1.5).

Важливим динамічним елементом у системі керування штучним мікрокліматом є приміщення. Зазвичай у приміщеннях, де проходить кондиціонування, змінне теплове навантаження, вологість – відносно стала, а повітряне навантаження потребує деякої мінімальної витрати зовнішнього

повітря. Моделювання процесів тепло- та повітрообміну у приміщеннях із джерелами тепла розглядається в багатьох роботах, зокрема в [47, 54, 150 – 152]. Організацію повітрообміну в промислових цехах розглянуто в роботах М.Й. Гримітліна, Г.М. Позіна, А.Я. Ткачука, В.П. Корбута, В.Б. Довгалюка та багатьох інших. При чисельному моделюванні процесів тепло- та повітрообміну дослідники використовують зосереджені та розподілені моделі промислових приміщень. Розподілені моделі використовуються для визначення конвективних струменів при проектуванні та розробці приточно-витяжних систем повітрообміну у промислових приміщеннях, що дозволяє компенсувати тепловиділення обладнання та усунути температурні розподілення за просторовими координатами приміщення. Коректно запроектована система повітрообміну приміщення (із врахуванням теплових збурень обладнання) дозволяє суттєво зменшити просторове розподілення температури повітря у приміщенні, а саме приміщення розглядається як динамічний елемент системи керування із зосередженими параметрами.

Із розглянутих міркувань, при розробці системи управління для СКП приміщення розглядаються як динамічний елемент системи керування із зосередженими параметрами [29]. Такі об'єкти регулювання достатньо досліджені: аналітично отримані та експериментально підтверджені значення коефіцієнтів передачі та сталі часу для передатних функцій.

У роботі [135] аналітично отримана передатна функція приміщення за каналом зміни температури припливного повітря як аперіодична ланка із корекцією. Параметри моделі визначаються за показниками кратності повітрообміну, узагальненим розміром приміщення та коефіцієнтів теплопередачі для огорожуючих стін.

У монографії [122] автори розглядають модель проточної ємності із товстими стінами, як систему із двох диференціальних рівнянь, яка враховує температурне розподілення за товщиною огорожуючої стінки.

1.7 Аналіз процесів керування для систем кондиціонування повітря

Високоякісна робота СКП, точність стабілізації параметрів повітря, зниження експлуатаційних витрат та строків окупності кліматичного обладнання суттєво залежить від алгоритмів управління та технологічної реалізації кондиціонера. Історія розвитку СКП нерозривно пов'язана із розробкою систем керування кондиціонерами [39, 128]. Кондиціонер може працювати тільки в автоматичному режимі, для СКП ручного режиму керування не існує, що є особливістю даного ТП.

Аналіз процесів керування показав, що для СКП відомі різні функціональні рішення контурів регулювання. Це визначається технологією підготовки повітря та залежить від типу та кількісного складу кліматичного обладнання кондиціонера. На сьогодні, для керування СКП використовують одноконтурні системи регулювання, які забезпечують автоматичну стабілізацію параметрів відособлених апаратів кліматичного обладнання, що пов'язані у єдиний технологічний процес підготовки повітря.

У нормативному документі ДБН В.2.5-67:2013 [154] регламентуються загальні вимоги до керування СКП. Для керування СКП діапазон змінних (навантажень, регульованих величин, зовнішніх та внутрішніх збурень) дуже широкий. Ряд керуючих впливів обмежений, а деякі елементи поки що залишаються некерованими. Тому при проектуванні систем керування кондиціонерами застосовуються нетрадиційні рішення, інколи із позиційним регулюванням, що в цілому негативно відзначається на якості керування [39, 155 – 159].

Сьогодні для управління складними нелінійними процесами науковці впроваджують використання методів нечіткого та нейронного керування [160 – 166]. Використання даних методів для СКП має свої обмеження. По-перше, методи нейронного та нечіткого керування рекомендовано для керування процесами, які погано вивчені та не мають адекватних моделей ТП [162]. Процеси тепло- та масообміну вивчені та описуються аналітичними залежностями. Якщо дослідник у своєму розпорядженні має адекватну модель

фізичного процесу, то класичні методи оптимізації системи дають кращі результати. По-друге, для нейронних регуляторів виникає задача розробки нейронної мережі та її навчання, а для систем нечіткого керування – задача фазифікації та дефазифікації значень змінних керування у нечіткий формат [161, 163, 166]. Кожна із задач має свої складності, які взаємопов'язані із динамічними властивостями ТП. Складність даних задач співмірна із складністю математичного опису ТП. По-третє, враховуючи теоретичні та експериментальні дослідження в Україні та за її межами, розробники СКП віддають перевагу класичним методам керування. Літературний огляд не виявив посилань на промислове використання нейронних мереж для керування СКП, що може свідчити про складність або неефективність нейронних методів керування промисловими кондиціонерами. У роботах [167, 168] автори провели дослідження окремих контурів регулювання СКП із нечіткою логікою. Авторами відмічено, що основною складністю є коректне визначення fuzzy-правил для ефективного впливу на процес регулювання.

Як правило, у більшості випадків керування СКП обмежується рекомендаціями із вибору закону регулювання для типових контурів [39, 139]. При розробці систем керування кондиціонерами, наладчики віддають перевагу ПІ- та ПІД-регуляторам [31, 39, 134]. На сьогодні ПІД-регулятори налічують більше десятка структур, серед яких у технічних системах найчастіше використовуються наступні: класична (ідеальна) [172]; послідовна [171], що використовується у пневматичних та електронних регуляторах; із фільтром для диференціальної складової [170, 172]; регулятори із модифікованою структурою [170, 171]. ПІ-Д- та І-ПІД-регулятори широко використовують закордонні фірми ABB, Honeywell, Fisher-Rosemount, Foxboro, SATT Instruments, Toshiba та інші [173]. Сьогодні ПІ-Д- та І-ПІД-регулятори розглядають як окремий тип реалізації закону керування [170, 173] та широко використовують для керування неперервними енергоємними процесами [174 – 176].

Аналіз процесів керування СКП дозволяє виокремити принципи кількісного та якісного регулювання [39, 133 – 139, 156, 160, 180 – 182]. При кількісному регулюванні необхідні параметри мікроклімату у приміщенні досягаються шляхом зміни витрати повітря, що надходить у приміщення. Кількісне регулювання застосовується в тільки у багатозональних СКП. Якісне регулювання застосовуються в одно- та багатозональних СКП та виділяє типові методи керування кондиціонерами: керування за температурою “точки роси”; керування за методом “оптимального режиму”.

Серед названих найбільше розповсюдження отримав метод керування СКП за температурою “точки роси” [39]. Для даного методу керування кондиціонером може використовуватися форсуночний або сотовий зволожувач. Для даного методу регулювання повітря послідовно проходить обробку на калорифері першого підігріву, охолоджувачі, зволожувачі і далі надходить на калорифер другого підігріву. У холодну пору року регулятор температури “точки роси” впливає на клапан теплоносія калорифера першого підігріву таким чином, щоб повітря нагрілося до температури “точки роси” за зволожувачем. У камері зволоження повітря адіабатно охолоджується та зволожується до “точки роси”. В теплу пору року температура “точки роси” за зволожувачем підтримується регулятором впливом на клапан холодоносія охолоджувача.

Таким чином, незалежно від поточних значень зовнішнього мікроклімату, після зволожувача повітря завжди має однакові параметри, що характеризуються “точкою роси”. Далі, повітря нагрівається до заданої температури у приміщенні на калорифері другого підігріву. За стабілізацію температури на виході кондиціонера (або у приміщенні) відповідає контур стабілізації температури за калорифером другого підігріву, який впливає на потужність калорифера. Вологість приміщення стабілізується непрямым способом, значення температури “точки роси” є непрямым показником вологості у приміщенні.

У роботах [156, 180, 184] можна детальніше ознайомитися із функціонуванням систем керування для кондиціонера за методом “точки роси”. Використання розглянутого методу керування можливе тільки у СКП із форсуночним або сотовим зволожувачем. До переваг кондиціонерів де реалізується метод “точки роси” слід віднести їх високу продуктивність, а система керування дозволяє точно стабілізувати параметри мікроклімату. Керування СКП за методом “точки роси” передбачає мінімальні витрати на технічні засоби керування та їх налагодження. Недоліком методу керування за температурою “точки роси” є його неекономічність. При адіабатному зволоженні повітря переохолоджується, що потребує додаткового нагрівання. У методі керування за “оптимальним режимом” даний недолік відсутній.

Процес керування СКП за методом “точки роси” характеризується значною перевитратою холодо- та теплоносія [39], 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” [24, 133 – 135, 157, 158, 184]. Для цього випадку термодинамічна модель СКП в координатах $h - d$ діаграми неперервно змінюється, забезпечуючи мінімальну витрату тепла та холоду. В таких системах керування необхідно враховувати взаємний вплив контурів стабілізації температури та відносної вологості. Взаємопов’язані системи регулювання із двома стабілізуючими контурами описуються складними залежностями, а їх апаратна реалізація має високу вартість.

Для методу керування за “оптимальним режимом” повітря послідовно проходить обробку на калорифері першого підігріву, охолоджувачі, калорифері другого підігріву і надходить на паровий зволожувач. Регулятори температури та відносної вологості здійснюють прямий вплив на обладнання кондиціонера в залежності від параметрів повітря на виході кондиціонера та зовнішнього середовища. Алгоритм керування СКП із парозволожувачем за “оптимальним режимом” програмується на ПЛК. Перемикання програмних

регуляторів температури та вологості на необхідний виконуючий механізм здійснюється програмним вибором кліматичного обладнання. У літературі пропонуються різні інтерпретації алгоритму керування за “оптимальним режимом”, проте інсталювати СКП не розповсюджують тонкощі своїх напрацювань, апелюючи до комерційної таємниці.

До недоліків СКП із парозволожувачем слід віднести їх невисоку продуктивність, яка обмежується потужністю парогенераторів. До переваг використання камер парового зволоження відносяться їх стерильні властивості, що запобігає розмноженню бактерій та широко використовується у медичній промисловості [29, 186].

Найчастіше для керування СКП використовують метод “точки роси”, який характеризується значною перевитратою холодо- та теплоносія за рахунок охолодження повітря до температури “точки роси” і повторним нагріванням на калорифері другого підігріву. За останні десятиліття у СКП почали використовуватися парогенератори, ультразвукові, плівкові, капілярно-пористі та інші типи зволожувачів. Нові технології зволоження дозволяють уникнути охолодження повітря із повторним нагріванням. При цьому використовується метод керування за “оптимальним режимом”. 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.

На сьогодні розробка системи управління кондиціонерами із взаємопов’язаними контурами керування досліджено недостатньо, а контури регулювання температури та вологості розглядаються без врахування їх взаємодії.

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.

Розробка ефективної системи управління залежить від всебічного аналізу технологічної системи, особливостей її функціонування, що дозволяє синтезувати коректні керуючі впливи. Аналіз існуючих рішень не виявив наукових рекомендацій щодо інтегрування СКП у інтелектуальну систему штучного мікроклімату об'єктів критичної інфраструктури. Така система має забезпечувати стає функціонування людських, технологічних та інформаційних компонентів в умовах автономності та підвищеної концептуальної невизначеності. Наведені недоліки об'єктивно свідчать про відсутність системного підходу до створення інтелектуальної системи штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури.

РОЗДІЛ 2

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО УПРАВЛІННЯ ШТУЧНИМ МІКРОКЛІМАТОМ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

2.1 Технологічна підготовка повітря на обладнанні центральних кондиціонерів

Проведемо аналіз основних технологічних схем обробки повітря на обладнанні центральних кондиціонерів з метою подальшої декомпозиції технічної складової системи штучного мікроклімату. Як зазначалося в п.1.4, на об'єктах КІ можуть використовуватися центральні та місцеві СКП. За своїм складом кліматичне обладнання припливної системи центрального кондиціонера (ПСЦК) суттєво не відрізняється місцевих СКП [24, 33, 37, 45].

На рис. 2.1 зображено основні технологічні схеми для обробки повітря на центральному кондиціонері. Тут прийнято наступні позначення: К1, К2 – калорифери першого та другого підігріву; О – охолоджувач; ФЗ – форсуночний зволожувач; СЗ – сотовий зволожувач; ПЗ – парозволожувач. До складу ПСЦК входить кліматичне обладнання, що розглянуто в п.1.5. Кліматичне обладнання центрального кондиціонера дає можливість застосовувати сухі та вологі методи обробки повітря, що дозволяє змінювати температуру та вологість повітря у приміщенні де використовується центральний кондиціонер.

На СКП повітря послідовно проходить обробку та змінює свої властивості за закономірностями тепломасообміну кліматичного обладнання. Особливістю технології кондиціювання є строга послідовність обробки повітря на відповідному кліматичному обладнанні, що обумовлено фізичними законами теплової та вологої обробки повітряної суміші. Саме з цих причин на рис. 2.1 зображено чотири можливі реалізації ПСЦК. Для будь-якої зображеної вище схеми неприпустимо міняти послідовність обладнання. З точки зору системного аналізу ця характеристика дає можливість визначити важливу властивість центрального кондиціонера як складної системи, а саме –

його *множинність* [187]. Одна і та ж сукупність кліматичного обладнання (калорифер, охолоджувач та зволожувач) є множиною систем.

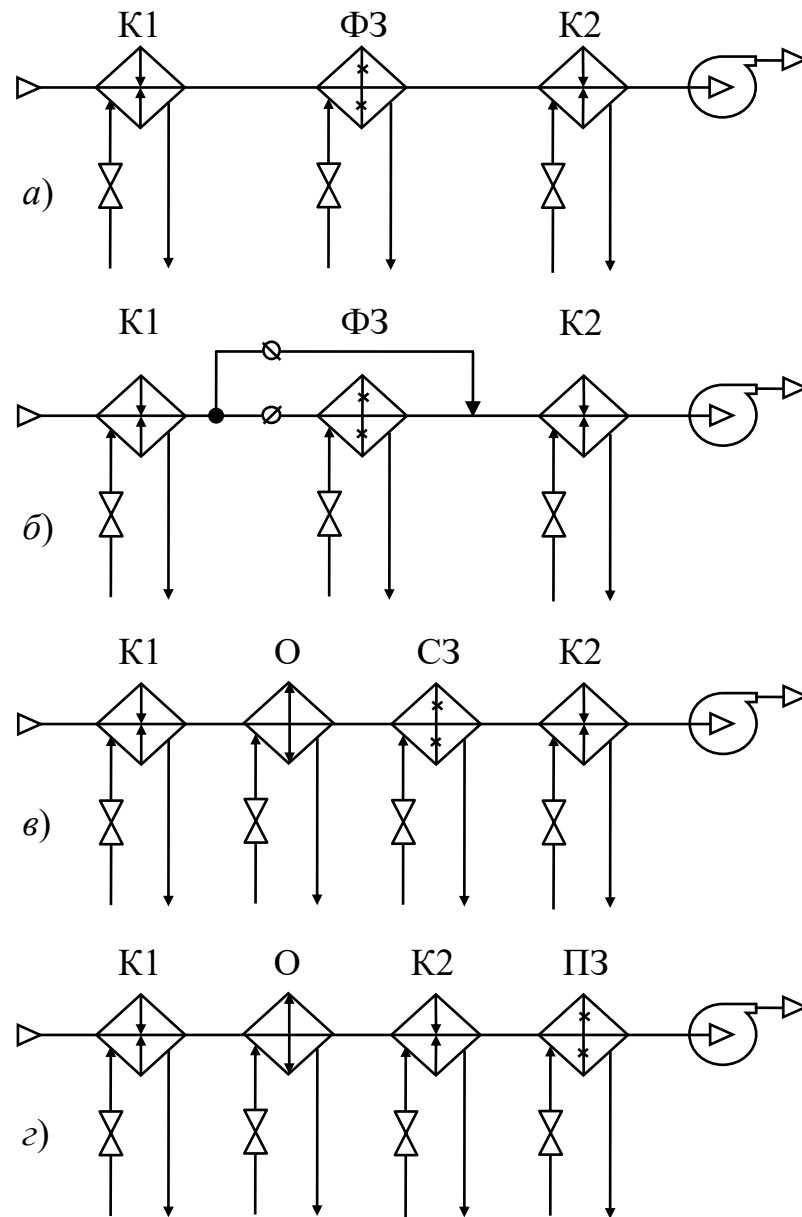


Рис. 2.1. Основні технологічні схеми ПСЦК: а) із форсуночним зволожувачем; б) із форсуночним зволожувачем та обвідним каналом; в) із сотовим зволожувачем; г) із паровим зволожувачем

Для розглянутих технологічних схем характерні *лінійна* та *паралельна абстрактні моделі структур*, що зображені на рис. 2.2. Лінійна структура характеризує послідовну обробку повітря на обладнанні кондиціонера. Обвідний канал, який присутній на рис. 2.1 (б) є різновидом паралельної обробки повітря, яке змішується після ФЗ. В лінійних та паралельних

структурах всі зв'язки вважаються рівноцінними, оскільки тут відсутні підлеглі елементи.

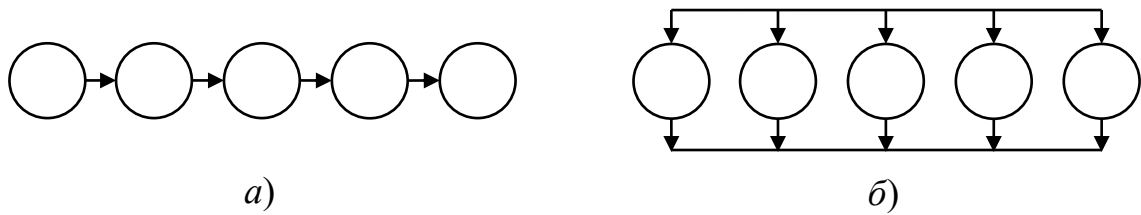


Рис. 2.2. Різновиди абстрактних моделей для структури ПСЦК:
а) лінійна структура; б) паралельна структура

Щоб підвищити ефективність центрального кондиціонера на виробництві утилізують тепло відпрацьованого (витяжного) повітря. На рис. 2.3 зображені можливі варіанти технологічних схем утилізації теплоти витяжного повітря для ПСЦК. В центральних кондиціонерах застосовується

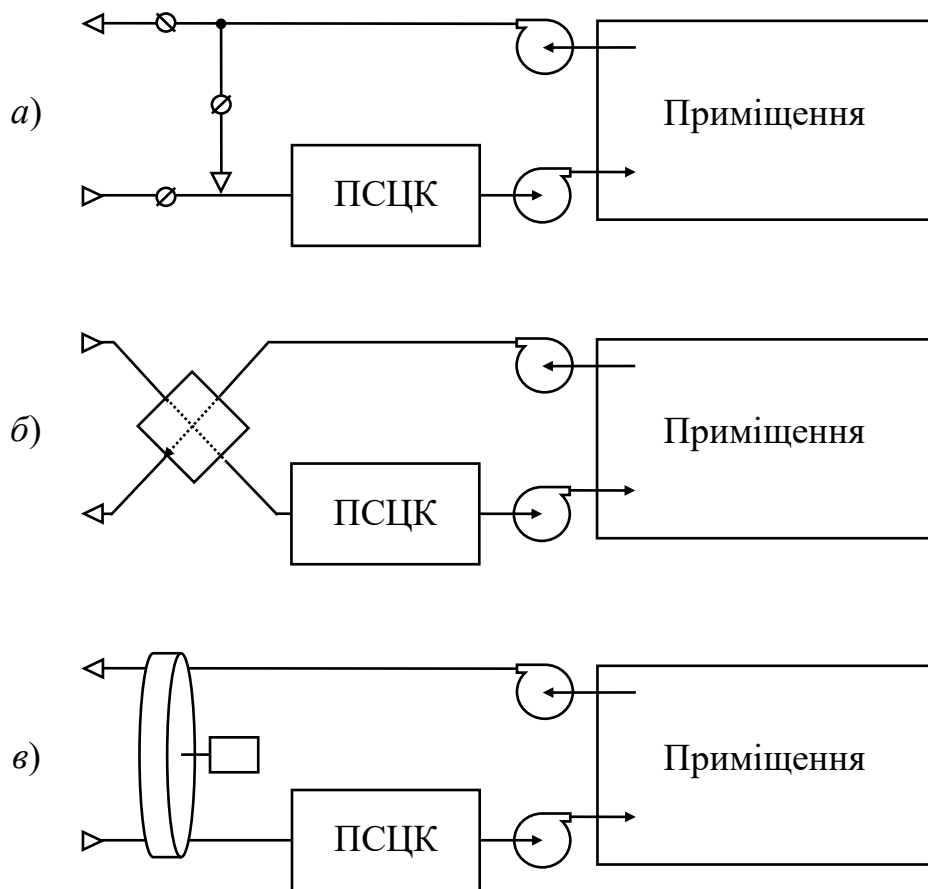
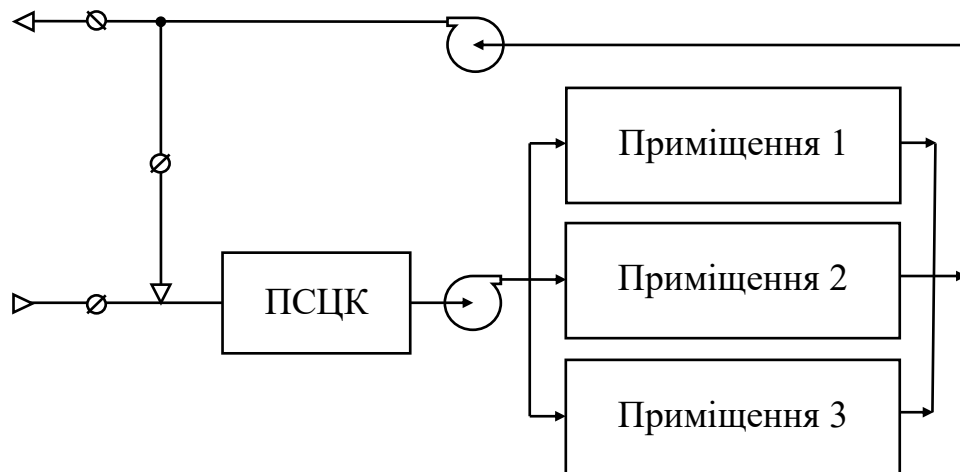


Рис. 2.3. Технологічні схеми утилізації теплоти витяжного повітря:
а) рециркуляція повітря; б) рекуперація на пластинчастому теплообміннику;
в) рекуперація із обертовим регенеративним теплообмінником

Щоб заощадити матеріальні ресурси на придбання кліматичної техніки та її експлуатацію часто використовується один центральний кондиціонер, який обслуговує декілька приміщень [24, 33, 39]. Технологічну схему такої СКП зображено на рис. 2.4.



класифікацією теорії систем [49] для двох останніх технологічних схем СКП (окрім лінійної та паралельної структур) характерна *структура із зворотнім зв'язком*, що зображена на рис. 2.5.

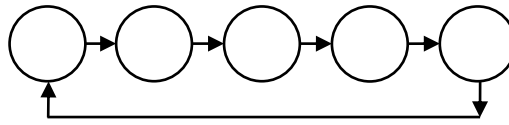


Рис. 2.5. Структура системи із зворотнім зв'язком

Таким чином, ПСЦК в залежності від економічної доцільності та вимог замовника може інтегруватися у систему штучного мікроклімату КФО КІ за різними схемами. На основі аналізу розглянутих схем можна нарахувати декілька десятків технологічних схем центрального кондиціонування. Топологія абстрактних моделей центральних кондиціонерів може змінюватися від простої лінійної структури до структури із зворотнім зв'язком. Найчастіше сучасні системи центрального кондиціонування містять змішану структуру, яка поєднує лінійну, паралельну та зустрічно-паралельну топології.

2.2 Технологічна підготовка повітря на обладнанні місцевих кондиціонерів

Деякі промислові об'єкти КІ можуть мати кілька виробничих зон або одну велику єдину зону, яка потребує центральної системи кондиціонування для забезпечення виробничих потреб [41, 50]. Інколи, в процесі проектування нових технологічних ліній на виробництві КІ техніко-економічне обґрунтування потребує кліматичного обладнання, розташованого всередині локальної зони промислового приміщення. Такий тип системи кондиціонування класифікується як місцева СКП.

Місцеві системи кондиціонування можуть бути сконструйовані за однією із технологічних схем центральних кондиціонерів, див. рис. 2.1. Але найчастіше технологічна схема місцевих кондиціонерів спрощуються. Як правило, місцеві СКП обладнані тільки теплообмінним обладнанням, яке дозволяє застосовувати сухий метод обробки повітря [35]. Обладнання такого

кондиціонера дозволяє здійснити три із чотирьох можливих процесів: осушка, нагрів або охолодження. Найпростішу конструкцію автономного місцевого кондиціонера зображено на рис. 2.6.

Наведена вище конструкція віконного кондиціонера може забезпечити нагрів або охолодження повітря у приміщенні, оскільки внутрішня частина кондиціонера містить один теплообмінний апарат (випарник). Зовнішній та внутрішній теплообмінні блоки з'єднані між собою. Внутрішній теплообмінний апарат може працювати у реверсному режимі як на нагрів так і на охолодження повітря у приміщенні. Коли віконний кондиціонер працює на охолодження повітря у приміщенні (літня пора року), на випарнику може конденсуватися надмірна вологість, але така конструкція не забезпечує необхідну вологість у приміщенні.

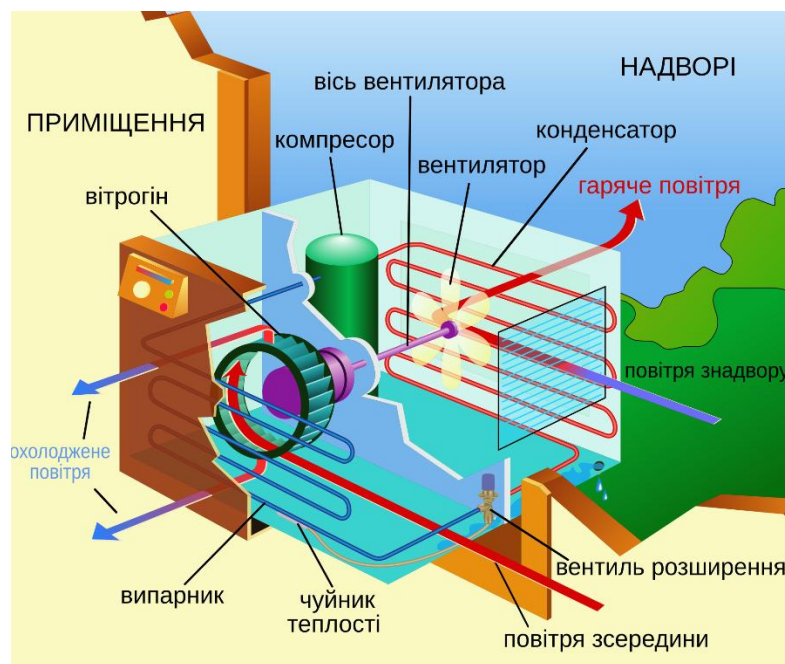


Рис. 2.6. Конструкція віконного кондиціонера

Для осушення повітря у приміщенні місцевий кондиціонер повинен містити два теплообмінні апарати – охолоджувач та калорифер (і обов'язково в такі послідовності). Спочатку охолоджувач конденсує надмірну вологість у приміщенні до заданої, а калорифер – нагріває повітря до необхідного значення. Найчастіше для промислового використання застосовують місцеві

неавтономні кондиціонери із охолоджувачем та калорифером. Для роботи теплообмінного обладнання до місцевого кондиціонера підводять траси тепло- та холодопостачання. В рідких випадках до складу кліматичного обладнання місцевих СКП входить парозволожувач. Такі місцеві кондиціонери відносяться до шафового виконання і можуть розглядатися як підвид сучасних спліт-систем. Конструктивно це обладнання виконується у вигляді вертикальної стійки, схожої на шафу. Шафові кондиціонери мають високу продуктивність холоду (до 100 кВт), а також велику продуктивність по рециркуляції повітря [51].

Основні технологічні схеми шафних кондиціонерів зображено на рис. 2.7. Тут прийнято наступні позначення: К – калорифер; О – охолоджувач; ТО – теплообмінник; ПЗ – парозволожувач. Шафний кондиціонер, що зображений на рис. 2.7 (а) реалізує тільки сухий метод обробки повітря, його принцип обробки повітря аналогічний розглянутому на рис. 2.6, а конструктивна відмінність полягає у підключенні до зовнішнього джерела тепло- та холодопостачання. Наступні дві технологічні схеми (див. рис. 2.7 б, в) реалізують сухі та вологі методи обробки повітря, що дозволяє виконати

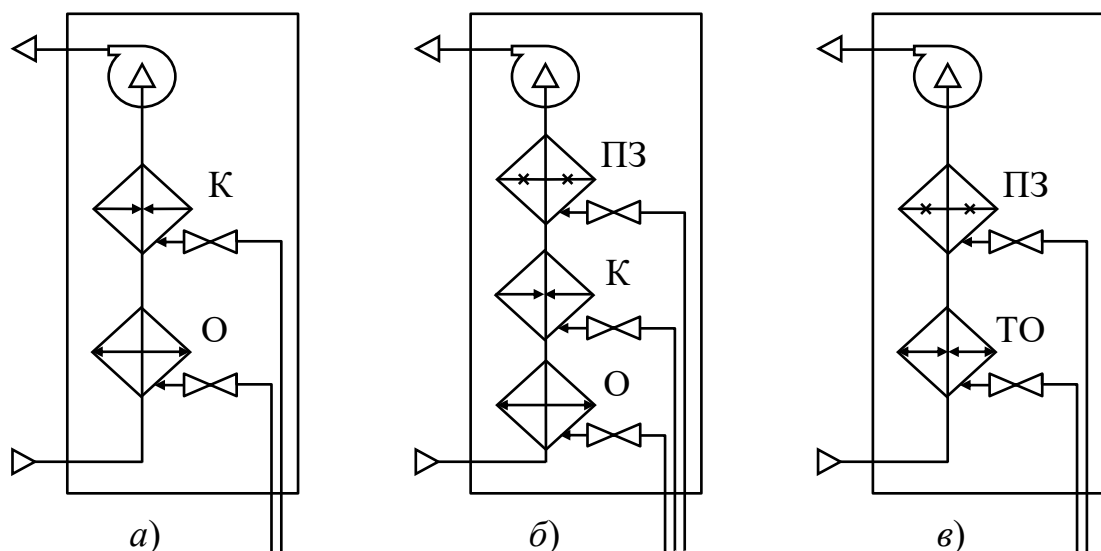


Рис. 2.7. Технологічна схема шафного кондиціонера: а) із охолоджувачем О та калорифером К; б) із паровим зволожувачем ПЗ, охолоджувачем О та калорифером ; в) із паровим зволожувачем та теплообмінником ТО, який функціонує у режимі калорифера та охолоджувача

повний цикл підготовки повітря у приміщенні. Основна відмінність між двома останніми технологічними схемами полягає у сумісному використанні теплообмінника ТО на нагрів та охолодження для випадку на рис. 2.7 (в).

Розглянуті технологічні схеми місцевого кондиціонування повітря мають лінійну структуру (див. рис. 2.2 а), яка характеризує послідовну обробку повітря. Оскільки місцеві СКП встановлюються безпосередньо у приміщенні, де проходить циклічна рециркуляція повітря, то для місцевих кондиціонерів характерна структура із зворотнім зв'язком (див. рис. 2.5). Також потрібно враховувати, що інколи для підвищення якості мікроклімату у приміщенні встановлюють декілька шафних кондиціонерів, тому для місцевих СКП також характерна паралельна структура моделі (див. рис. 2.2, б). Таким чином, топологія абстрактних моделей місцевих кондиціонерів може змінюватися. Найчастіше місцеві СКП містять змішану структуру, яка поєднує лінійну, паралельну та зустрічно-паралельну топології.

2.3 Характерні системні особливості кондиціонера як складної технічної системи

Зазвичай, технічні системи класифікуються за різними ознаками, наприклад: мета функціонування (призначення); взаємодія із зовнішнім середовищем; спосіб організації; характер зв'язків між елементами; спосіб керування; функції та інше. За числом елементів, характером та типом зв'язків системи поділяються на великі (прості) і складні [116 – 119, 187, 188]. Поняття “складність системи” не має чітко окресленого визначення, фахівці різних галузей знань розуміють його по-різному. На сьогодні, системні аналітики схиляються до думки, що складність систем, явищ і процесів не може бути відображена за допомогою універсального показника. У різних системах складові проблемних явищ проявляються по-різному. Поняття складності системи вивчається науковцями як із якісного боку так і кількісними показниками. Існують цілі концепції визначення складності системи, направлені на вимірювання її складності кількісним способом. Наприклад,

В.Р. Ешбі запропонував оцінювати складність кількістю можливих станів системи, а для врахування ймовірності знаходження системи у i -му стані застосовують залежність К. Шеннона [188].

Складні технічні системи характеризуються низкою властивостей, які визначають їхню структуру та поведінку. З позиції методології системного аналізу, основними властивостями таких систем є: множинність; цілісність; емерджентність; еквіпотенційність; синергізм та інші [187, 188]. На основі огляду п.2.3 та п.2.4 розглянемо характерні системні властивості СКП.

Множинність – одна і та ж сукупність елементів є множиною систем, які відрізняються системоутворючими властивостями та конкретними відношеннями між компонентами у системі. Технологія обробки повітря для центральних та місцевих СКП містить наступне кліматичне обладнання:

- калорифер для нагрівання повітря;
- охолоджувач для охолодження або осушення повітря;
- зволожувач для збільшення вологості повітря;
- обладнання для утилізації тепла (теплообмінники, камери змішування, інше).

Технологічний процес підготовки повітря проходить у послідовності, яка визначається наявним кліматичним обладнанням. Як зазначалося у п.2.2 та п.2.3, топологія технологічних схем СКП містить лінійну, паралельну, кільцеву та змішані структури. На основі цих топологій проєктувальниками розроблено біля декількох десятків різновидів та варіацій технологічних схем центрального та місцевого кондиціювання, що демонструє властивість множинності СКП для забезпечення необхідного мікроклімату у приміщенні (або групі приміщень). Властивість множинності є характерною особливістю кондиціонерів повітря, що виділяє ці системи в окремий клас об'єктів дослідження.

Цілісність – властивість системи, коли система функціонує як єдине неподільне ціле, а її властивості не зводяться до простої суми властивостей її окремих компонентів. Основним завданням будь-якої СКП є забезпечення

необхідного мікроклімату у середовищі. СКП здатна зберігати свою цілісність функціонування при зміні температури та вологості навколишнього середовища та температурних збурень промислового обладнання. Кожному компоненту СКП притаманна відповідна функція (нагрівання, зволоження, осушення або охолодження повітря), яку не здатний виконати інший компонент. Для аналізу взаємодії кліматичного обладнання дослідники використовують діаграми Рамзіна, або Мольте [23, 30 – 32]. На основі наведеного можна стверджувати, що будь-яка СКП володіє властивістю цілісності як складної системи, де кожний елемент виконує свої індивідуальні функції.

Емерджентність – властивість системи, коли її поведінка або характеристики не можуть бути пояснені виключно через властивості її окремих елементів, а виникають у результаті їхньої взаємодії. Як зазначалося вище, СКП містить кліматичне обладнання, що відповідає технологічному процесу підготовки повітря. Підтримка необхідного мікроклімату у приміщенні – не є простою сумою функцій кожного окремого компонента СКП. Окрім кліматичного обладнання кондиціонер доповнюється системою керування, яка забезпечує стабілізацію температури та вологості. Окреме кліматичне обладнання не здатне підтримувати стабільну температуру та вологість. Лише завдяки взаємодії сенсорів, ПЛК та впливу виконавчих механізмів на обладнання кондиціонера – така система здатна підтримувати задані параметри мікроклімату. Завдяки взаємодії ПЛК із кондиціонером через сенсори та виконавчі механізми дорогі компоненти системи забезпечуються захистом від перевантажень, програмне забезпечення ПЛК здійснює самодіагностику системи, забезпечує її енергоефективність через оптимізацію роботи кліматичного обладнання. СКП демонструє емерджентні властивості, оскільки її загальна функціональність виходить за межі можливостей окремих елементів. Адаптація до змін у середовищі, оптимізація енергоспоживання та забезпечення необхідного мікроклімату у приміщенні – це результат взаємодії її усіх компонентів і не є властивістю жодного із них окремо. Таким чином,

СКП – це не просто набір взаємозв'язаних компонентів, а складна технічна система, що набуває нових якостей завдяки взаємодії своїх компонентів.

Поняття *еквіпотенційності* у системному аналізі пов'язане із інтегрованістю підпорядкованої системи у систему вищого рівня. Тобто, кожен систему можна розглядати як підсистему вищого рівня, і навпаки – підсистема може розглядатися як система зі своєю структурою, функціями та зв'язками між її компонентами. СКП має усі ознаки еквіпотенційності, оскільки застосовується на виробництві як допоміжна технологія. Мікроклімат промислових приміщень є необхідною умовою для стабільної та якісної роботи технологічного обладнання на об'єктах КІ (див. п.1.4). Усі наявні на об'єктах КІ СКП використовуються як підсистеми із ієрархічною системою управління. Рациональне використання СКП на підприємствах КІ підвищує якість продукції, збільшує ефективність використання сировини та надійність функціонування технологічного обладнання в умовах зовнішнього впливу навколишнього середовища на виробництво продукції.

Синергізм визначає ефективність взаємодії компонентів складної системи, коли сумісна взаємодія компонентів складної системи дає більший ефект, ніж проста сума індивідуальних ефектів від функціонування елементів системи. СКП демонструє певний рівень синергізму, оскільки взаємодія її технологічних компонентів із системою керування кондиціонера забезпечує підтримку необхідного мікроклімату у приміщенні. Проте, система керування температурою та відносною вологістю розглядається без врахування їх взаємодії для єдиного матеріального потоку повітря. Під керуванням СКП розуміють автоматичну стабілізацію параметрів відособлених апаратів, об'єднаних у єдиний технологічний процес. Літературний огляд не виявив комплексного підходу до інтеграції наявних на підприємстві кондиціонерів у єдину інформаційно-керуючу систему. На думку автора, синергічні властивості СКП потребують подальшого покращення, що і є метою дослідження цієї роботи.

Таким чином, СКП слід розглядати як складну технічну систему, що об'єднує в собі механічні, термодинамічні, електронні та інформаційні процеси для забезпечення необхідного мікроклімату на кіберфізичних об'єктах КІ. СКП містять ключові характеристики складних систем, що підтверджує їх високий рівень організації та функціональної складності. Складність СКП обумовлена не лише наявністю численних компонентів, але й їхньою взаємодією, що забезпечує динамічну адаптацію до зовнішніх умов і потреб об'єктів КІ. Сучасні тенденції розвитку КФО КІ спрямовані на підвищення рівня інтелектуалізації таких систем.

2.4 Класифікація системи кондиціювання повітря як об'єкта керування

Узагальнення відомостей про фізичні процеси підготовки повітряної суміші є складним завданням, що пояснюється відсутністю до теперішнього часу єдиної класифікації СКП (див. п.1.4). 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 кондиціювання. Віддати перевагу одній із існуючих класифікацій достатньо важко, оскільки кожна з класифікацій по-своєму відображує різноманітність технологічних рішень кондиціювання.

Більшість класифікацій [24, 31, 37, 39] обумовлює тісний зв'язок систем керування із технологічною реалізацією СКП. З наведених міркувань у роботі запропоновано класифікацію, що характеризує функціональні особливості керування СКП для об'єктів КІ за наступними ознаками:

- 1) кількістю зон промислового кондиціювання (однозональні або багатозональні);
- 2) принципом роботи обладнання зволоження повітря (адіабатне, ізотермічне або політропне зволоження);

3) принципом утилізації тепла витяжного повітря (без утилізації, із рециркуляцією повітря, із рекуперацією повітря на пластинчатому, обертовому теплообмінниках та інше);

4) особливості функціонування об'єктів КІ:

- характер збурень у приміщенні (теплові та/або вологові зовнішні та/або внутрішні збурення);
- характер роботи керування кондиціонером (стабілізуюча система керування для промислових об'єктів КІ або адаптивна система керування для створення комфортних умов перебування людей).

Класифікація СКП як об'єкта управління зображена на рис. 2.8. Блоки 1 – 3 класифікації являються суто технологічними та характеризують технологію кондиціювання повітря. За даними блоками класифікації можна виділити більше двох десятків технологічних схем кондиціювання повітря, кожна із яких має індивідуальні особливості реалізації в залежності від потреб



Рис. 2.8. Класифікація СКП як об'єкт управління

замовника. Четвертий блок класифікації характеризує режим управління СКП. Для промислових об'єктів КІ система керування кондиціонера 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.

Наявні збурення носять стохастичний та детермінований характер. Збурення можна контролювати та враховувати у системі управління. Серед факторів збурення основними є: зміна температури та вологості навколишнього середовища; вплив технологічного обладнання виробництва на температуру та вологість промислового приміщення; похибки вимірів датчиків та інше. Збурення навколишнього середовища носять періодичний характер, що можна прослідкувати на спеціалізованих інформаційних ресурсах [191]. Внутрішні збурення залежать від характеру функціонування об'єкту КІ, де використовується СКП. За вказаною вище класифікацією СКП слід розглядати як окремий клас складних об'єктів управління, які потребують системного підходу до дослідження та розробки системи управління кондиціонером.

2.5 Концептуальні основи керування системами кондиціонерами

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 (див. п.1.7) виділяє якісне і кількісне керування процесом кондиціювання, де використовуються методи “точки роси” та “оптимального режиму”.

На сьогодні всебічно досліджено спосіб керування СКП за методом “точки роси”, який ґрунтується на термодинамічній моделі системи кондиціювання в координатах температури та відносної вологості $h - d$ діаграми. Даний спосіб керування передбачає стабілізацію температури “точки роси” після зволожувача (незалежно від пори року) та температури повітря на виході СКП. При цьому, температура “точки роси” є непрямым показником відносної вологості, що регулюється. Оскільки стабілізується два

температурних параметри, розробка системи керування кондиціонером проводиться із врахуванням динаміки теплообмінних процесів обладнання. Керування за методом “точки роси” характеризується перевитратою холодо- та теплоносія, що пояснюється охолодженням повітря до температури “точки роси” із повторним нагріванням на калорифері другого підігріву.

За останні десятиліття у кондиціонерах почали використовуватися парогенератори, ультразвукові, плівкові, капілярно-пористі та інші типи зволожувачів [125]. Нові технології зволоження дозволяють уникнути охолодження повітря із повторним нагріванням. При цьому використовується метод керування за “оптимальним режимом”. Тут термодинамічна модель СКП неперервно змінюється, забезпечуючи мінімальну витрату тепла та холоду [160].

Для таких систем керування необхідно враховувати взаємний вплив контурів стабілізації температури та відносної вологості. Наявні на сьогодні підходи до розв’язання наведених задач керування СКП за методом “оптимального режиму” не відповідають сучасним вимогам. Літературний аналіз підтверджує, що питання синтезу взаємопов’язаних контурів керування для СКП розглянуто недостатньо повно. Існуючі рішення із управління СКП обмежуються на рівні побудови функціональних схем та вибору типу регулятора [143, 181]. Для СКП недостатньо досліджені задачі побудови комплексних математичних моделей кондиціювання повітря як єдиного багатовимірного ОК. Забезпечення високої якості управління кондиціонером вимагає суттєво змінити підхід як до визначення математичних моделей кліматичного обладнання, так і до синтезу системи управління кондиціонером.

Відомо, що система керування кондиціонером стабілізує температуру та відносну вологість повітря на виході СКП або у приміщенні. Проте, теплотехнічні розрахунки обладнання та вибір кондиціонера для конкретного типу приміщення проводять із використанням параметрів температури та вологовмісту повітряної суміші [24, 30]. Такий підхід має логічне пояснення. При постійному значенні вологовмісту відносна вологість нелінійно залежить

від температури повітря. Зміна температури повітря на 1 °C приводить до зміни відносної вологості близько 3 %. З цих причин кліматичне обладнання ПСЦК для регулювання температури впливає на відносну вологість на виході кондиціонера.

Значення вологовмісту залишається постійним при нагріванні повітря на калориферах, в той час як відносна вологість зменшується. При охолодженні повітря до моменту конденсації вологовміст теж залишається постійним і лише з моменту конденсації пари значення вологовмісту зменшується. З цих міркувань підґрунтям для нової концепції керування СКП є стабілізація вологовмісту повітря. Використання параметру вологовмісту замість відносної вологості повітря у системі управління кондиціонером дозволить зменшити вплив між контурами регулювання температури та вологості, а в деяких режимах роботи контури регулювання будуть функціонувати незалежно.

На основі проведеного аналізу математичних моделей обладнання кондиціонера (див. п.1.6) та враховуючи сучасний стан керування СКП (див. п.1.7), сформулюємо нові концептуальні основи для оптимізації управління обладнанням кондиціонерів. Нова концепція оптимізації управління СКП ґрунтується на принципові агрегування та відрізняється від традиційного підходу за такими наступними ознаками:

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

2.6 Визначення вологовмісту повітря за змінними, що вимірюються

Управління СКП передбачає контроль температури та відносної вологості повітря на виході кондиціонера. Контроль даних параметрів здійснюється датчиками температури та відносної вологості, або використовується спільний датчик. У рамках нової концепції керування СКП запропоновано проводити стабілізацію мікроклімату за непрямим показником вологовмісту повітряної суміші. На основі відомих залежностей (1.1) – (1.4) вологовміст повітряної суміші можна визначати як

$$d = \frac{83045.9 \cdot \varphi \cdot 10^{\frac{156+8.12 \cdot \theta}{236+\theta}}}{P_{\theta} - 133.3 \cdot \varphi \cdot 10^{\frac{156+8.12 \cdot \theta}{236+\theta}}}, \quad (2.1)$$

де d – вологовміст повітря, г/кг; φ – відносна вологість повітря в долях одиниці; θ – температура вологого повітря, °C; P_{θ} – барометричний тиск, Па.

За (2.1) проведемо імітаційний розрахунок вологовмісту повітря. Визначимо вологовміст повітря, якщо відомо відносну вологість $\varphi = 40 \%$, температуру $\theta = -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ та барометричний тиск $P_{\theta} = 99000 \text{ Па}$ повітря. За залежністю (2.1) маємо

$$d = \frac{83045.9 \cdot 0.4 \cdot 10^{\frac{156+8.12 \cdot (-5)}{236-5}}}{99000 - 133.3 \cdot 0.4 \cdot 10^{\frac{156+8.12 \cdot (-5)}{236-5}}} = 1.06 \frac{\text{г}}{\text{кг}},$$

результат розрахунку співпадає із значенням визначеним за h – d діаграмою, див. Додаток А.

Залежність (2.1) легко реалізується на ПЛК. Програмним шляхом можна визначити вологовміст повітря d за вимірюною температурою θ , відносною вологістю φ та барометричним тиском P_{θ} . Значення барометричного тиску P_{θ} можна отримати із інформаційних ресурсів метеорологічних служб.

Інколи, при моделюванні процесів тепло- та масообміну для обладнання кондиціонера доводиться розв'язувати задачі зворотні до (2.1). При цьому, також можна використати залежності (1.1) – (1.4), після нескладних математичних перетворень отримуємо

$$\varphi = \frac{P_{\theta} d}{133.3 (623 + d) 10^{\frac{156+8.12 \theta}{236+\theta}}}, \quad (2.2)$$

де φ – відносна вологість повітря в долях одиниці; P_{θ} – барометричний тиск, Па; d – вологовміст повітря, г/кг; θ – температура вологого повітря, °C.

За (2.2) проведемо імітаційний розрахунок відносної вологості повітря. Визначимо відносну вологість повітря, якщо відомий вологовміст $d = 1.06$ г/кг, температура $\theta = -5$ °C та барометричний тиск $P_{\theta} = 99000$ Па повітря. Використовуючи залежність (2.2), отримаємо

$$\varphi = \frac{99000 \cdot 1.06}{133.3 (623 + 1.06) \cdot 10^{\frac{156+8.12 \cdot (-5)}{236-5}}} = 0.4, \text{ або } 40 \ \%.$$

Проведемо аналіз похибки непрямого контролю вологовмісту від погрішностей вимірів датчиків мікроклімату. В останні роки для контролю температури та відносної вологості повітря використовується сумісний датчик, в якому для визначення відносної вологості використовується ємнісний або резистивний методи [39]. Розглянемо спрощену структурну схему регулювання вологості повітря, яку зображено на рис. 2.9.

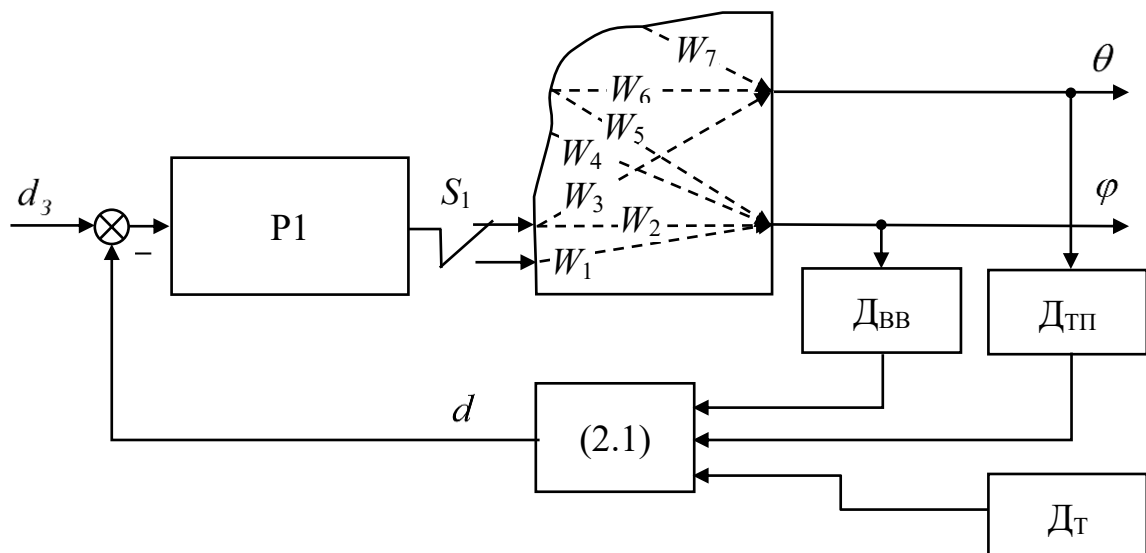


Рис. 2.9. Структурна схем регулювання вологовмісту повітря

На схемі комутатор S_1 використовується для перемикання регулятора вологості $P1$ на управління зволожувачем (збільшення вологості, канал W_1), або на охолоджувач (конденсація надмірної вологи, канал W_2). Для спрощення

аналізу збурюючі канали впливу $W_3 - W_7$ СКП розглядати не будемо. Запропонована математична модель (2.1) “транслює” погрішність датчиків температури повітря (D_{TP}), відносної вологості (D_{BV}) та тиску повітря (D_T) на ПІ-регулятор вологовмісту $P1$ у вигляді розрахованого значення вологовмісту повітря d . Із курсу теорії керування відомо, що якщо в системі керування використовується ПІ-закон регулювання, то така система має нульову статичну погрішність, при умові якщо датчик не вносить додаткової похибки [172]. Якщо датчик має погрішність, то статична похибка регулювання буде рівною величині похибки датчика у системі керування із ПІ-регулятором.

Оскільки “джерелами похибки” у розглянутій системі керування є датчики D_{TP} , D_{BV} , D_T та враховуючи постулати теорії керування можна стверджувати, що запропонований принцип регулювання за вологовмістом не вносить додаткової похибки. Похибка в системі стабілізації вологовмісту повністю залежить від якості датчиків мікроклімату. Окрім цього, запропонований принцип підвищує точність регулювання вологості за рахунок врахування барометричного тиску атмосферного повітря, який у навколишньому середовищі постійно коливається. Відомо, що при психометричному контролі відносної вологості потрібно враховувати барометричний тиск повітря. Проте барометричний тиск для керування СКП не враховується і вважається сталим, що вносить додаткову погрішність.

2.7 Системний підхід до управління мікрокліматом об’єктів критичної інфраструктури

На сучасному етапі розвитку інформаційних технологій все більшого значення набувають інтелектуальні системи управління. Вони дозволяють здійснювати системне раціональне управління мікрокліматом у реальному часі на основі даних із численних сенсорів, аналізу трендів та прогнозних моделей. Такі системи інтегруються з іншими компонентами управління обладнанням будівель, енергетичними установками, системами охорони та пожежної безпеки, тим самим об’єднуючи кіберфізичні об’єкти у складні

КФС. Максимальний ефект від впровадження СКП досягається за рахунок їх інтегрування в КФС.

Аналіз світової практики впровадження КФС вказує на значне підвищення ефективності роботи підприємства за рахунок зменшення: енерговитрат, виробничих простоїв, оптимального розподілу матеріальних та енергетичних потоків, використання прихованих резервів виробництва, тощо. Тому інтегрування СКП у КФО КІ є одним із пріоритетних напрямів наукового дослідження роботи.

У першому розділі роботи проведено літературний огляд за тематикою дисертації та спорідненими напрямками, висвітлені результати досліджень, які отримані науковцями. Зокрема, наведено аналіз сучасного стану технології підготовки повітря, освітлені сучасні підходи до управління СКП, проведено аналіз математичних методів моделювання кліматичного обладнання кондиціонера, розглянуто методи і закони керування, що використовуються для СКП, виділені невирішені задачі. На підставі аналізу проблематики досліджень розроблено та запропоновано системний підхід до управління СКП КФО КІ. Структурну схему системного підходу до управління СКП наведено на рис. 2.10.

Системний підхід до управління СКП КФО КІ складається із трьох основних етапів. На першому етапі аналізується технологічний процес підготовки повітряної суміші. Наявні технології підготовки повітряної суміші розглянуто у п.2.1 та п.2.2, для полегшення аналізу першого етапу у п.2.4 запропоновано класифікацію СКП як об'єкта управління.

На другому етапі здійснюється аналіз тепло- та масообмінних процесів обробки повітря на кліматичному обладнанні кондиціонера, проводиться декомпозиція СКП на окремі функціональні блоки, які далі описуються математичними залежностями із використанням апарату диференціальних рівнянь. Отримані динамічні моделі повинні мати однакову структуру та концепцію реалізації для їх подальшого агрегування у комплексну модель

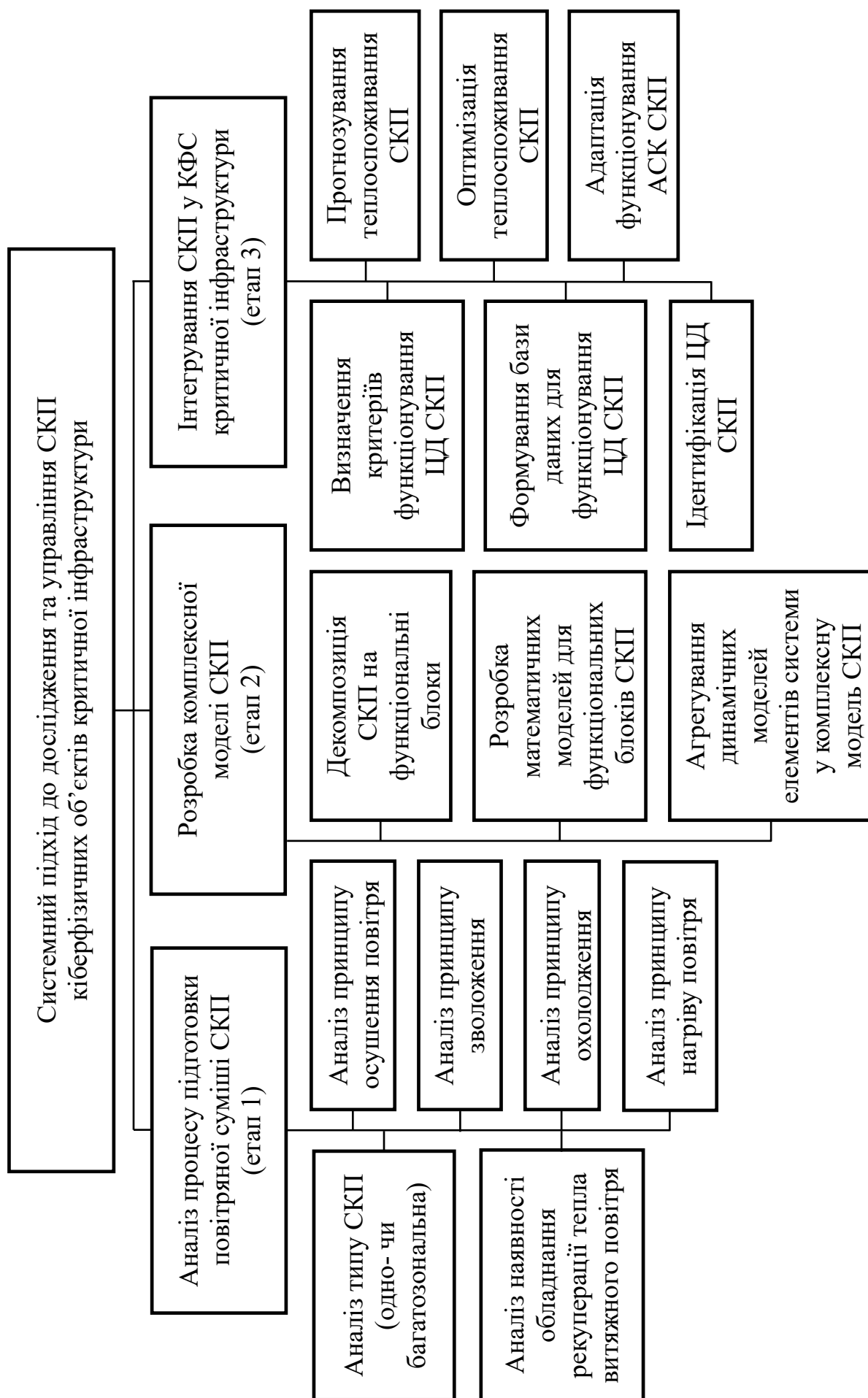


Рис. 2.10. Структурна схема системного підходу до управління СКП

кондиціонера. Другий етап є надзвичайно важливим, оскільки визначає методи управління СКП. Розробку математичних моделей кліматичного обладнання розглянуто у третьому розділі дисертації, наведено узагальнену структуру математичної моделі кліматичного обладнання. У четвертому розділі проведено аналіз параметрів аналітичних моделей кліматичного обладнання, що залежать від різних факторів, розглянуто методи параметричної ідентифікації та запропоновано методику розробки комплексної моделі СКП.

Заключний, третій етап, стосується інтегрування СКП у КФО КІ. На цьому етапі розв'язується потужна низка задач, які стосуються: статистичної обробки вхідної інформації; фільтрації завад; оцінки параметрів тепло- та масопереносу для ідентифікації математичних моделей кліматичного обладнання; оптимізації та адаптації функціонування системи управління кондиціонером, тощо. Для інтегрування СКП у КФО КІ використовується інструментарій цифрового двійника (ЦД). Ці задачі розглядаються у четвертому та п'ятому розділі. У шостому розділі розглядається оптимізація традиційних систем керування для задач маловитратної автоматизації СКП, де динамічні властивості ОК описуються наближеною моделлю.

У сьомому розділі розглянуто приклади реалізованих інформаційно-керуючих систем штучного мікроклімату.

2.8 Висновки до другого розділу

1. Проведено аналіз технологічної підготовки повітря на обладнанні центральних та місцевих СКП. Встановлено, що технологічна конфігурація кондиціонера може варіюватися від простої лінійної структури до складних схем із зворотним зв'язком. Найпоширенішими є змішані топології, які поєднують елементи лінійної, паралельної та зустрічно-паралельної організації. На основі систематизації типових технологічних рішень ідентифіковано декілька десятків варіантів технологій кондиціювання, що

дозволяє розглядати кондиціонери як окремий клас об'єктів керування з високим ступенем структурної варіативності.

2. Виконано аналіз системних властивостей кондиціонерів повітря. Встановлено, що СКП характеризуються множинністю, цілісністю, емерджентністю, еквіпотенційністю та синергізмом, що дозволяє класифікувати їх як складні технічні системи.
3. Запропоновано класифікацію систем кондиціонування повітря як об'єкта керування.
4. Розроблено нову концепцію оптимального управління процесами кондиціонування повітря для об'єктів КІ, в основу якої покладено управління СКП в координатах температури та вологовмісту повітря із врахуванням взаємодії кліматичного обладнання.
5. Запропоновано математичну залежність для непрямого контролю вологовмісту повітря (2.1), яка обернено пропорційна барометричному тиску та нелінійно залежить від температури та відносної вологості повітряної суміші. Непрямий контроль вологовмісту повітря дозволяє для єдиного матеріального потоку повітря розмежувати взаємозв'язок між змінними мікроклімату повітря, що регулюються.
6. Використання вологовмісту повітря в контурі стабілізації вологості створює передумови незалежної роботи контурів регулювання температури та вологості, оскільки на відміну від відносної вологості змінна вологовмісту не залежить від температури повітряної суміші. При необхідності, за залежністю (2.2) вологовміст повітря можна перерахувати у значення відносної вологості.
7. Запропоновано системний підхід до управління СКП КФО критичної інфраструктури, етапи виконання якого послідовно розглядаються у розділах дисертації.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КЛІМАТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ КОНДИЦІОНЕРІВ

У третьому розділі роботи розглядаються питання другого етапу системного підходу до управління СКП (див. п.2.9). У розділі розглянуті динамічні моделі тепло- та масообміну кліматичного обладнання СКП. Слід зауважити, що призначення математичних моделей, що розглядаються в даному розділі – дослідження динамічних режимів роботи кліматичного обладнання для аналізу та управління кондиціонерами. Отримані моделі не пристосовані для проектування обладнання кондиціонера, їх застосування для таких задач не розглядається.

3.1 Динамічні моделі теплообмінних апаратів

Як зазначалося у першому розділі поверхневі теплообмінні апарати застосовуються для нагріву, охолодження та осушення зовнішнього повітря. При нагріванні повітря калорифером (див. п.1.3.1) між теплоносієм та повітрям мають місце теплообмінні процеси (вологівміст повітря не змінюється). Якщо повітря охолоджується та осушується, окрім теплообміну, мають місце масообмінні процеси (конденсація вологи), що необхідно враховувати. Щоб уникнути повторень та скоротити математичні викладки, у підрозділі спочатку розглядається теплообмінні процеси для калориферів, далі – динамічні моделі ускладнюються масообміном для водяних охолоджувачів.

3.1.1 Динамічна модель електричного калорифера

При розробці динамічної моделі електричного калорифера прийнято наступні спрощення: теплообмін із навколишнім середовищем відсутній; модель містить два динамічні елементи (повітря та елементи ТЕНів) із зосередженими параметрами; фізичні властивості матеріальних потоків та теплообмінної поверхні приведені до усереднених значень робочого діапазону апарату [195, 196].

Розрахункова схема електричного калорифера представлена на рис. 3.1. Для нагрівання повітря у калорифері використовуються ТЕНи, які приєднуються до електромережі через симісторний електричний перетворювач. Електричний перетворювач пропорційно сигналу регулятора змінює електричну потужність $N_E(t)$, за рахунок чого ТЕНи нагріваються до температури $\theta_E(t)$. Уся електрична потужність йде на нагрівання повітря. Перехресно до розташування ТЕНів подається повітря з витратою $G_A(t)$. $\theta_{A0}(t)$, $\theta_A(t)$ – температура повітря на вході і виході калорифера; $d_{A0}(t)$, $d_A(t)$ – вологовміст на вході і виході апарату. Геометричні розміри калорифера: L , C , H , – глибина, ширина та висота калорифера. Проведемо аналіз теплового балансу у динаміці для кожного динамічного елемента калорифера.

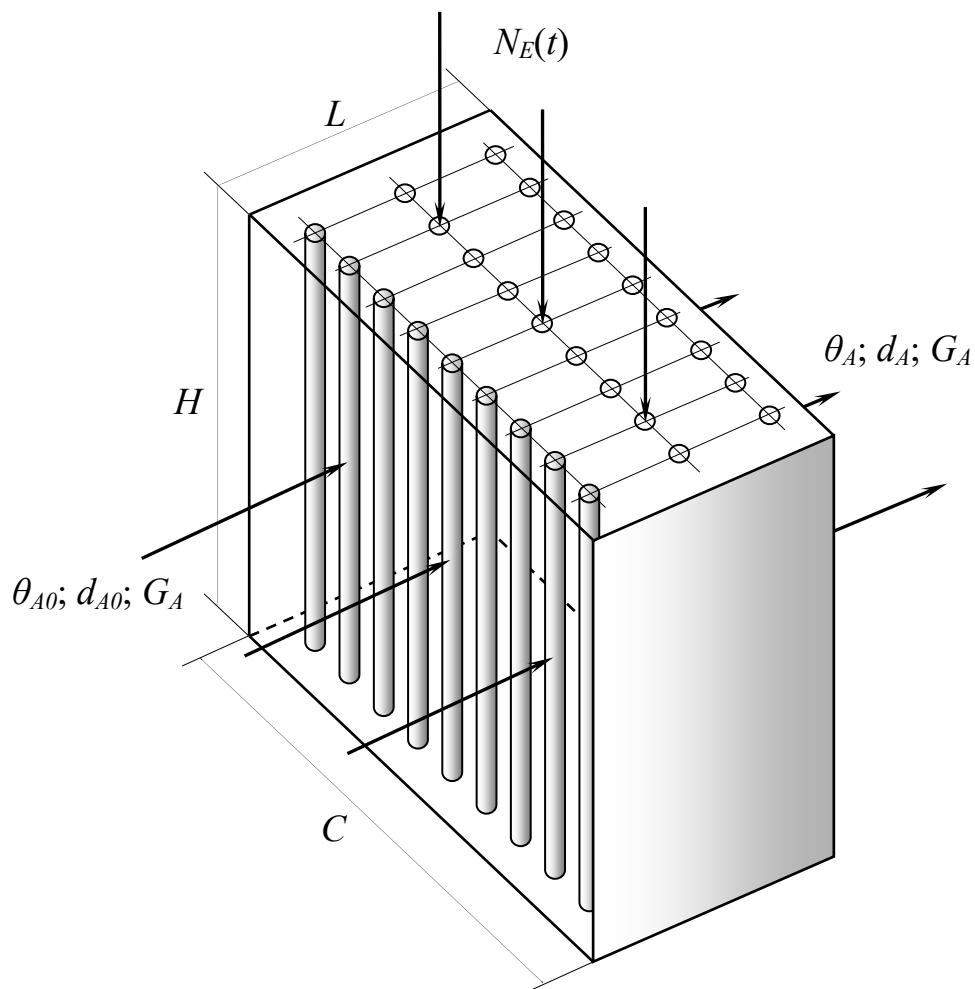


Рис. 3.1. Розрахункова схема електричного калорифера

Тепловий баланс для ТЕНів:

$$N_E - \alpha_0 F_0 (\theta_E - \theta_A) = M_E c_E \frac{d\theta_E}{dt}, \quad (3.1)$$

тут c_E – приведена теплоємність ТЕНа (конструктивно ТЕН містить металічні та діелектричні матеріали, теплоємність яких осереднюється пропорційно долі маси кожного елементу); M_E – загальна маса ТЕНів; α_0 – коефіцієнт тепловіддачі між повітрям у калорифері та зовнішньою поверхнею ТЕНів; F_0 – загальна площа оребреної поверхні ТЕНів. Після спрощення рівняння (3.1) у приростах прийме вигляд:

$$T_E \frac{d\Delta\theta_E}{dt} + \Delta\theta_E = k_0 \Delta N_E + k_1 \Delta\theta_A, \quad (3.2)$$

де $K_E = \alpha_0 F_0$; $T_E = \frac{c_E M_E}{K_E}$; $k_0 = \frac{1}{K_E}$; $k_1 = 1$.

Тепловий баланс для повітряного простору калорифера записується у вигляді:

$$G_A c_A (\theta_{A0} - \theta_A) + \alpha_0 F_0 (\theta_E - \theta_A) = M_A c_A \frac{d\theta_A}{dt}, \quad (3.3)$$

тут c_A – теплоємність повітря; M_A – маса повітря у об'ємі $L \times C \times H$ калорифера.

Після спрощення та лінеаризації рівняння (3.3) прийме вигляд:

$$T_A \frac{d\Delta\theta_A}{dt} + \Delta\theta_A = k_2 \Delta\theta_E + k_3 \Delta\theta_{A0} + k_4 \Delta G_A, \quad (3.4)$$

де $K_A = c_A G_A + \alpha_0 F_0$; $T_A = \frac{c_A M_A}{K_A}$; $k_2 = \frac{\alpha_0 F_0}{K_A}$; $k_3 = 1 - k_2$; $k_4 = \frac{c_A (\theta_{A0} - \theta_A)}{K_A}$.

Для систем кондиціонування повітря важливо моделювати характеристики вологого повітря, що нагрівається. З теплотехнічних властивостей повітря відомо, що зі збільшенням температури пароповітряної суміші її відносна вологість зменшується (збільшення температури на 1 °C призводить до зменшення вологи приблизно на 3%), при цьому вміст вологи залишається постійним [39]. Окрім цього, на вологість впливає атмосферний тиск. З цих причин, матеріальний баланс для газового простору калориферу подано у змінних вологовмісту:

$$\frac{G_A}{1000}(d_{A0} - d_A) = V_A \frac{d\rho_A}{dt}, \quad (3.5)$$

тут $d_{A0}(t)$, $d_A(t)$ – вологовміст на вході і виході апарату; ρ_A – густина повітря; V_A – об’єм газового простору калорифера. Густина вологого повітря визначається із рівняння [24]

$$\rho_A = \omega \left(1 + \frac{d_A}{1000} \right), \quad (3.6)$$

де ω – густина сухого повітря за нормальних умов. Враховуючи (3.6), рівняння (3.5) після математичних перетворень набуде вигляду:

$$T_d \frac{d\Delta d_A}{dt} + \Delta d_A = k_5 \Delta d_{A0} + k_6 \Delta G_A, \quad (3.7)$$

де $T_d = \frac{\omega V_A}{G_A}$; $k_5 = 1$; $k_6 = \frac{d_{A0} - d_A}{G_A}$.

Рівняння (3.2), (3.4) та (3.7) описують динаміку тепло- та масообміну для електричного калорифера:

$$\begin{cases} T_E \frac{d\Delta\theta_E}{dt} + \Delta\theta_E = k_0 \Delta N_E + k_1 \Delta\theta_A; \\ T_A \frac{d\Delta\theta_A}{dt} + \Delta\theta_A = k_2 \Delta\theta_E + k_3 \Delta\theta_{A0} + k_4 \Delta G_A; \\ T_d \frac{d\Delta d_A}{dt} + \Delta d_A = k_5 \Delta d_{A0} + k_6 \Delta G_A. \end{cases} \quad (3.8)$$

Для зручності аналізу отримаємо матричний вигляд системи (3.8) у просторі станів [197]:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}, \quad (3.9)$$

тут $\mathbf{X}' = \begin{bmatrix} \Delta\theta'_A \\ \Delta d'_A \\ \Delta\theta'_E \end{bmatrix}$; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1/T_A & 0 & k_2/T_A \\ 0 & -1/T_d & 0 \\ k_1/T_E & 0 & -1/T_E \end{bmatrix}$; $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta\theta_A \\ \Delta d_A \\ \Delta\theta_E \end{bmatrix}$;

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} k_3/T_A & 0 & k_4/T_A & 0 \\ 0 & k_5/T_d & k_6/T_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_0/T_E \end{bmatrix}; \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \Delta\theta_{A0} \\ \Delta d_{A0} \\ \Delta G_A \\ \Delta N_E \end{bmatrix}.$$

Добуток $\mathbf{B}\mathbf{U}$ (3.9) розкладено на керуючу ($\mathbf{U}_1$) та збурюючу ($\mathbf{F}_2$, $\mathbf{F}_3$) складові, що у подальшому спростить отримання комплексних моделей:

$$\mathbf{BU} = \mathbf{B}_1 \mathbf{U}_1 + \mathbf{B}_2 \mathbf{F}_2 + \mathbf{B}_3 \mathbf{F}_3,$$

$$\text{де } \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_0/T_E \end{bmatrix}; \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} k_3/T_A & 0 \\ 0 & k_5/T_d \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} k_4/T_A \\ k_6/T_d \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{U}_1 = \Delta N_E; \mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} \Delta \theta_{A0} \\ \Delta d_{A0} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{F}_3 = \Delta G_A.$$

Представимо (3.8) системою алгебраїчних рівнянь в області Лапласа.

$$\begin{cases} \Delta \theta_E (T_E p + 1) = k_0 \Delta N_E + k_1 \Delta \theta_A; \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\begin{cases} \Delta \theta_A (T_A p + 1) = k_2 \Delta \theta_E + k_3 \Delta \theta_{A0} + k_4 \Delta G_A; \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\begin{cases} \Delta d_A (T_d p + 1) = k_5 \Delta d_{A0} + k_6 \Delta G_A. \end{cases} \quad (3.12)$$

Із (3.10) знаходимо $\Delta \theta_E(p)$, знайдене підставляємо у (3.11), після групування подібних та спрощення отримаємо:

$$\Delta \theta_A = \frac{1}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} [(b_1 p + b_0) \Delta \theta_{A0} + (b_3 p + b_2) \Delta G_A + b_4 \Delta N_E], \quad (3.13)$$

$$\text{де } a_2 = \frac{T_E T_A}{1 - k_1 k_2}; \quad a_1 = \frac{T_E + T_A}{1 - k_1 k_2}; \quad b_0 = \frac{k_3}{1 - k_1 k_2}; \quad b_1 = \frac{k_3 T_E}{1 - k_1 k_2}; \quad b_2 = \frac{k_4}{1 - k_1 k_2};$$

$$b_3 = \frac{k_4 T_E}{1 - k_1 k_2}; \quad b_4 = \frac{k_0 k_2}{1 - k_1 k_2}.$$

З (3.12) отримуємо рішення для змінної Δd_A

$$\Delta d_A = \frac{1}{T_d p + 1} [k_5 \Delta d_{A0} + k_6 \Delta G_A]. \quad (3.14)$$

Застосовуючи зворотне перетворення Лапласа [172], можна знайти аналітичний розв'язок (3.13), (3.14) за каналами впливу. Представимо (3.13) та (3.14) багатовимірною моделлю у області Лапласа [178]

$$\mathbf{Y} = \mathbf{WU}. \quad (3.15)$$

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

$$W_{11} = \frac{b_1 p + b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + 1}; \quad W_{13} = \frac{b_3 p + b_2}{a_2 p^2 + a_1 p + 1}; \quad W_{14} = \frac{b_4}{a_2 p^2 + a_1 p + 1}; \quad W_{22} = \frac{k_5}{T_d p + 1};$$

$$W_{23} = \frac{k_6}{T_d p + 1}.$$

Для електричного калорифера НЕ 36/2 ПСЦК CV-P 2L N-63B/F-N [198] проведено імітаційне моделювання динамічних процесів за каналами впливу. У Додатку Б.1 представлено довідкову таблицю теплофізичних величин

калорифера НЕ 36/2, розрахунки параметрів для моделі. На рис. 3.2 наведено результати дослідження перехідних процесів.

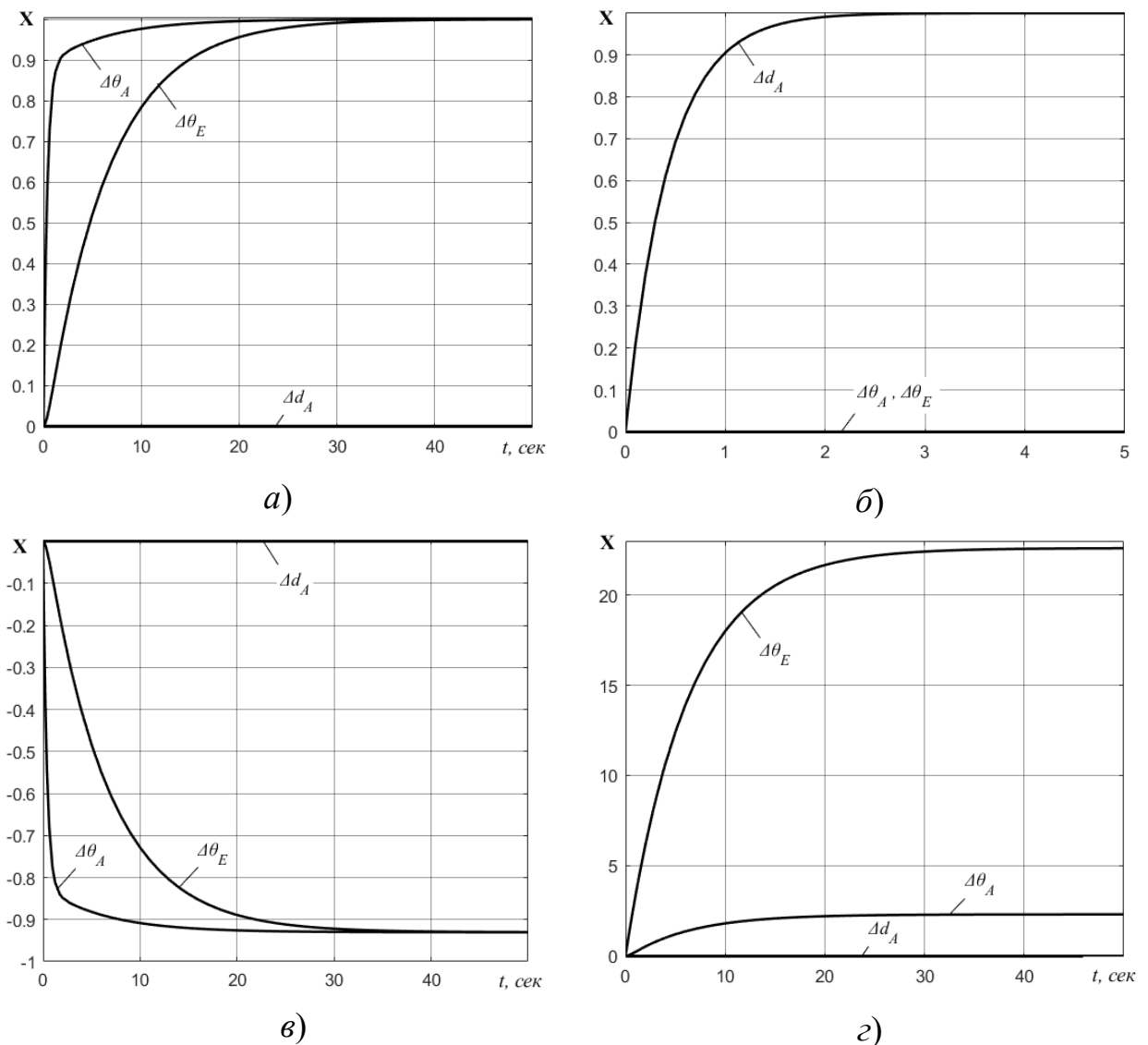


Рис. 3.2. Моделювання перехідних процесів для НЕ 36/2 за каналами впливу:

- а) $\Delta\theta_{A0} \rightarrow X$, $\Delta\theta_{A0} = 1^\circ\text{C}$; б) $\Delta d_{A0} \rightarrow X$, $\Delta d_{A0} = 1 \text{ г/кг}$;
 в) $\Delta G_{A0} \rightarrow X$, $\Delta G_{A0} = 0.1 \text{ кг/сек}$; г) $\Delta N_{E0} \rightarrow X$, $\Delta N_{E0} = 1000 \text{ Вт}$

Отримані перехідні процеси мають малу інерційність та аперіодичний характер. Інерційність каналу регулювання більша за інерційність каналів збурення, що пояснюється невеликим об'ємом повітряного простору калорифера $V_A = 0.152 \text{ м}^3$ із відносно значною витратою повітря $G_A = 0.43 \text{ кг/сек}$, що нагрівається.

3.1.2 Динамічна модель водяного калорифера

При розробці динамічної моделі водяного калорифера прийнято наступні спрощення: теплообмін із навколишнім середовищем відсутній; модель містить три динамічні елементи із зосередженими параметрами (вода, теплообмінна поверхня та повітря); фізичні властивості матеріальних потоків та поверхні теплообміну приведені до усереднених значень робочого діапазону. Результати дослідження опубліковано у [201 – 203]. Розрахункова схема водяного калорифера представлена на рис. 3.3.

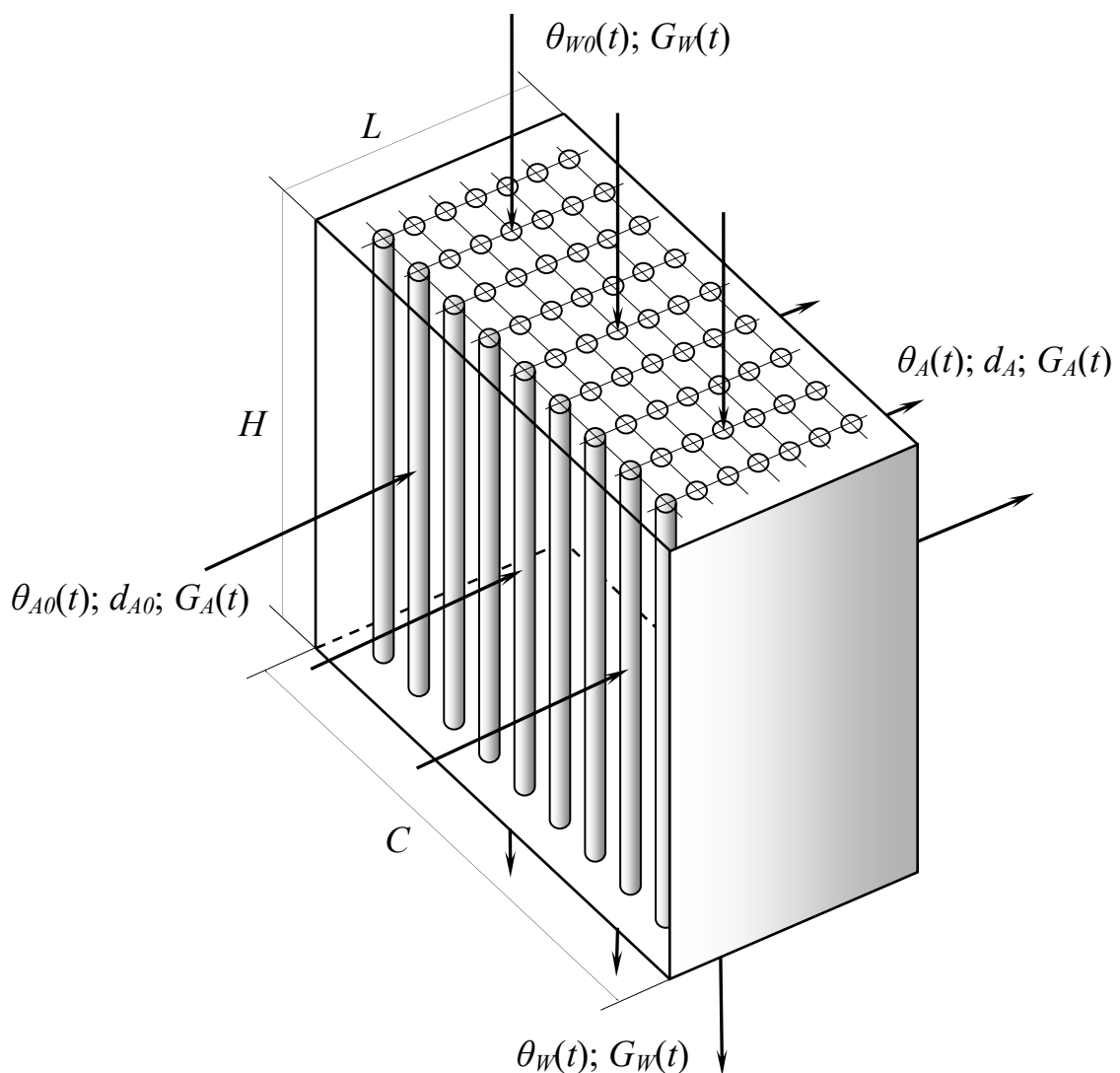


Рис. 3.3. Розрахункова схема калорифера

Гріючим теплоносієм є вода із витратою $G_w(t)$, температура теплоносія на вході у калорифер $\theta_{w0}(t)$, на виході – $\theta_w(t)$. Калорифер містить n трубок

довжиною H . Теплоносій нагріває теплообмінні трубки усереднена температура яких $\theta_M(t)$. Перехресно до руху теплоносія у калорифер надходить повітря із витратою $G_A(t)$. Вхідна температура повітря – $\theta_{A0}(t)$, вхідна – $\theta_A(t)$. Вологовміст повітря на вході – $d_{A0}(t)$, на виході – $d_A(t)$. Геометричні розміри теплообмінника: L, C, H , – глибина, ширина та висота калорифера. Розглянемо тепловий баланс у динаміці для кожного динамічного елемента.

Тепловий баланс для теплоносія, що протікає у трубках:

$$G_W c_W (\theta_{W0} - \theta_W) - \alpha_0 F_0 (\theta_W - \theta_M) = M_W c_W \frac{d\theta_W}{dt}, \quad (3.16)$$

тут c_W – теплоємність теплоносія; α_0 – коефіцієнт тепловіддачі між теплоносієм та внутрішньою поверхнею труб; F_0 – площа внутрішньої поверхні усіх труб, $F_0 = n L \pi d_0$, d_0 – внутрішній діаметр труб; M_W – маса теплоносія в усіх трубах калорифера, $M_W = n \rho_W L \pi d_0^2 / 4$, ρ_W – густина теплоносія. Після спрощення та лінеаризації рівняння (3.16) прийме вигляд:

$$T_W \frac{d \Delta \theta_W}{dt} + \Delta \theta_W = k_0 \Delta \theta_{W0} + k_1 \Delta \theta_M + k_2 \Delta G_W, \quad (3.17)$$

$$\text{де } K_W = c_W G_W + \alpha_0 F_0; T_W = \frac{c_W M_W}{K_W}; k_0 = \frac{c_W G_W}{K_W}; k_1 = 1 - k_0; k_2 = \frac{c_W (\theta_{W0} - \theta_W)}{K_W}.$$

Тепловий баланс для теплообмінної поверхні калорифера:

$$\alpha_0 F_0 (\theta_W - \theta_M) - \alpha_1 F_1 (\theta_M - \theta_A) = M_M c_M \frac{d\theta_M}{dt}, \quad (3.18)$$

тут c_M – теплоємність металу; α_1 – коефіцієнт тепловіддачі між зовнішньою поверхнею труб та повітрям; F_1 – площа зовнішньої поверхні теплообміну калорифера; M_M – маса металу теплообмінної поверхні. Після спрощення рівняння (3.18) отримаємо диференційне рівняння у приростах:

$$T_M \frac{d \Delta \theta_M}{dt} + \Delta \theta_M = k_3 \Delta \theta_W + k_4 \Delta \theta_A, \quad (3.19)$$

$$\text{де } K_M = \alpha_0 F_0 + \alpha_1 F_1; T_M = \frac{c_M M_M}{K_M}; k_3 = \frac{\alpha_0 F_0}{K_M}; k_4 = 1 - k_3.$$

Тепловий баланс для повітряного простору калорифера:

$$G_A c_A (\theta_{A0} - \theta_A) - \alpha_1 F_1 (\theta_M - \theta_A) = M_A c_A \frac{d\theta_A}{dt}, \quad (3.20)$$

тут c_A – теплоємність повітря; M_A – маса повітря у об'ємі $H \times L \times C$ калорифера.

Після спрощення та лінеаризації рівняння (3.20) маємо:

$$T_A \frac{d \Delta \theta_A}{dt} + \Delta \theta_A = k_5 \Delta \theta_{A0} + k_6 \Delta \theta_M + k_7 \Delta G_A, \quad (3.21)$$

$$\text{де } K_A = c_A G_A + \alpha_1 F_1; T_A = \frac{c_A M_A}{K_A}; k_5 = \frac{c_A G_A}{K_A}; k_6 = 1 - k_5; k_7 = \frac{c_A (\theta_{A0} - \theta_A)}{K_A}.$$

Для опису матеріального балансу повітряної суміші водяного калориферу використаємо залежність (3.5), оскільки ці процеси ідентичні.

Враховуючи (3.6), отримаємо:

$$T_d \frac{d \Delta d_A}{dt} + \Delta d_A = k_8 \Delta d_{A0} + k_9 \Delta G_A, \quad (3.22)$$

$$\text{де } T_d = \frac{\omega V_A}{G_A}; k_8 = 1; k_9 = \frac{d_{A0} - d_A}{G_A}.$$

Рівняння (3.17), (3.29), (3.21) та (3.22) представляють динамічну модель теплообміну для водяного калорифера. Представимо математичну модель системою звичайних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} T_W \frac{d \Delta \theta_W}{dt} + \Delta \theta_W = k_0 \Delta \theta_{W0} + k_1 \Delta \theta_M + k_2 \Delta G_W; \\ T_M \frac{d \Delta \theta_M}{dt} + \Delta \theta_M = k_3 \Delta \theta_W + k_4 \Delta \theta_A; \\ T_A \frac{d \Delta \theta_A}{dt} + \Delta \theta_A = k_5 \Delta \theta_{A0} + k_6 \Delta \theta_M + k_7 \Delta G_A; \\ T_d \frac{d \Delta d_A}{dt} + \Delta d_A = k_8 \Delta d_{A0} + k_9 \Delta G_A. \end{cases} \quad (3.23)$$

Отримаємо матричний вигляд системи (3.23) у просторі станів:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}, \quad (3.24)$$

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

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} k_5/T_A & 0 & k_7/T_A & 0 & 0 \\ 0 & k_8/T_d & k_9/T_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_0/T_W & k_2/T_W \end{bmatrix}; \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \Delta\theta_{A0} \\ \Delta d_{A0} \\ \Delta G_A \\ \Delta\theta_{W0} \\ \Delta G_W \end{bmatrix}.$$

Добуток $\mathbf{BU}$ (3.24) розкладено на збурюючу та керуючу складові:

$$\mathbf{BU} = \mathbf{B}_1 \mathbf{U}_1 + \mathbf{B}_2 \mathbf{F}_2 + \mathbf{B}_3 \mathbf{F}_3,$$

$$\text{де } \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ k_0/T_W \end{bmatrix}; \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} k_5/T_A & 0 \\ 0 & k_8/T_d \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} k_7/T_A \\ k_9/T_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{U}_1 = \Delta\theta_{W0}; \mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} \Delta\theta_{A0} \\ \Delta d_{A0} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{F}_3 = \Delta G_A.$$

Далі, подамо систему диференціальних рівнянь (3.23) як систему алгебраїчних рівнянь в області Лапласа.

$$\begin{cases} \Delta\theta_W(T_W p + 1) = k_0 \Delta\theta_{W0} + k_1 \Delta\theta_M + k_2 \Delta G_W; & (3.25) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta\theta_M(T_M p + 1) = k_3 \Delta\theta_W + k_4 \Delta\theta_A; & (3.26) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta\theta_A(T_A p + 1) = k_5 \Delta\theta_{A0} + k_6 \Delta\theta_M + k_7 \Delta G_A. & (3.27) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta d_A(T_d p + 1) = k_8 \Delta d_{A0} + k_9 \Delta G_A. & (3.28) \end{cases}$$

З (3.25) знаходимо $\Delta\theta_W(p)$; з (3.26) визначимо $\Delta\theta_M(p)$, враховуючи $\Delta\theta_W(p)$; знайдене $\Delta\theta_M(p)$ підставляємо у (3.27), після групування подібних та спрощення отримаємо:

$$\Delta\theta_A = \frac{1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} \left[(b_2 p^2 + b_1 p + b_0) \Delta\theta_{A0} + (b_5 p^2 + b_4 p + b_3) \Delta G_A + b_6 \Delta\theta_{W0} + b_7 \Delta G_W \right], \quad (3.29)$$

$$\text{де } a_3 = \frac{T_W T_M T_A}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}; \quad a_2 = \frac{T_W T_M + T_W T_A + T_M T_A}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6};$$

$$a_1 = \frac{T_W + T_M + T_A - k_1 k_3 T_A - k_4 k_6 T_W}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}; \quad b_0 = \frac{k_5 (1 - k_1 k_3)}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}; \quad b_1 = \frac{k_5 (T_W + T_M)}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6};$$

$$b_2 = \frac{k_5 T_W T_M}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}; \quad b_3 = \frac{k_7 (1 - k_1 k_3)}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}; \quad b_4 = \frac{k_7 (T_W + T_M)}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6};$$

$$b_5 = \frac{k_7 T_W T_M}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}; b_6 = \frac{k_0 k_3 k_6}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}; b_7 = \frac{k_2 k_3 k_6}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}.$$

З (3.28) отримуємо рішення для змінної Δd_A

$$\Delta d_A = \frac{1}{T_d p + 1} [k_8 \Delta d_{A0} + k_9 \Delta G_A]. \quad (3.30)$$

Застосовуючи зворотне перетворення Лапласа, можна знайти аналітичний розв'язок (3.29), (3.30) за каналами регулювання та збурення.

Представимо (3.29), (3.30) багатовимірною моделлю у області Лапласа:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W} \mathbf{U}, \quad (3.31)$$

$$\text{де } \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_A \\ \Delta d_A \end{bmatrix}; \mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_{11} & 0 & W_{13} & W_{14} & W_{15} \\ 0 & W_{22} & W_{23} & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{U} = [\Delta \theta_{A0} \Delta d_{A0} \Delta G_A \Delta \theta_{W0} \Delta G_W]^T;$$

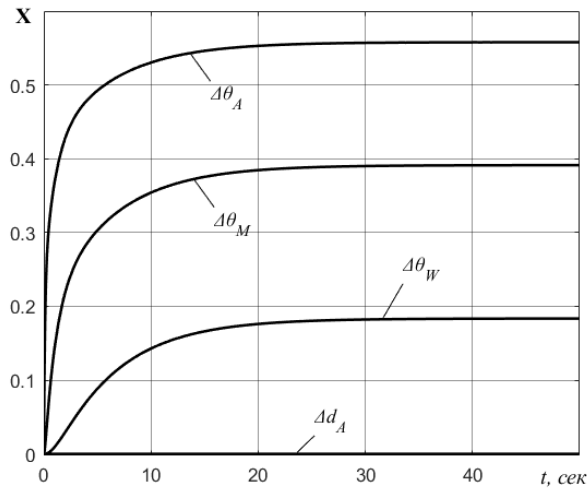
$$W_{11} = \frac{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}; W_{13} = \frac{b_5 p^2 + b_4 p + b_3}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1};$$

$$W_{14} = \frac{b_6}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}; W_{15} = \frac{b_7}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1};$$

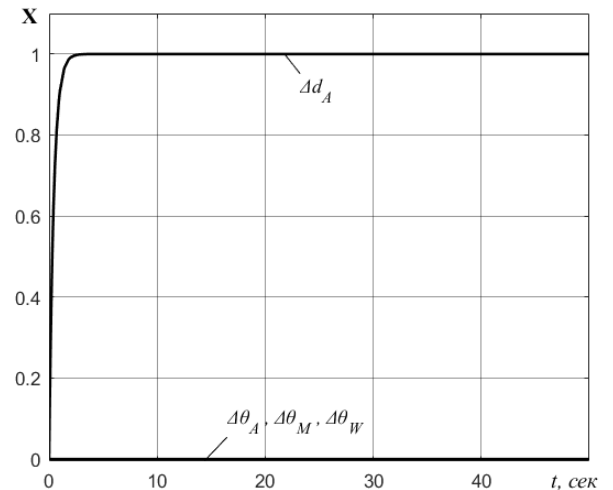
$$W_{22} = \frac{k_8}{T_d p + 1}; W_{23} = \frac{k_9}{T_d p + 1}.$$

За моделлю (3.24) проведемо моделювання перехідних процесів для калорифера CVP2-HW2 ПСЦК CV-P 2L N-63B/F-N виробництва фірми VTS CLIMA [198]. У Додатку Б.2 представлено таблицю теплофізичних величин калорифера CVP2-HW2 та розрахунки коефіцієнтів аналітичної моделі. На рис. 3.4 наведено результати моделювання за каналами впливу. Як і для електричного калорифера, перехідні процеси для водяного калорифера носять аперіодичний характер, а змінні стану температури не залежать від вологовмісту повітря, що характерно для процесу нагріву повітряної суміші.

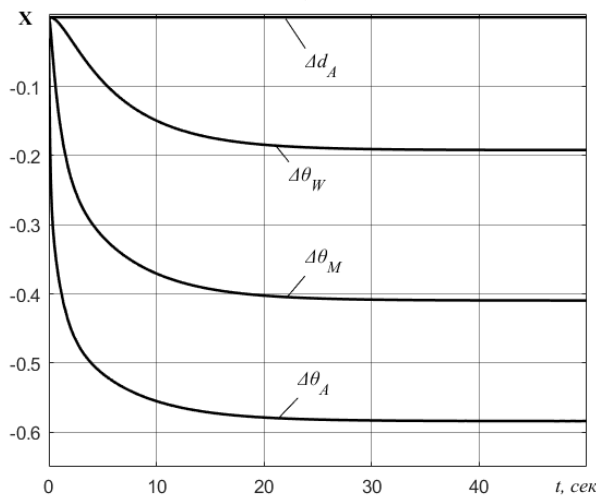
У п.1.4 відмічено, що для моделювання теплообмінних процесів у калориферах дослідники використовують аналітичні моделі із зосередженими та розподіленими параметрами. Використання розподілених моделей покращує точність розрахунків, проте, сама модель стає дещо складнішою. Із іншої сторони не завжди ускладнення моделі приводить до збільшення точності.



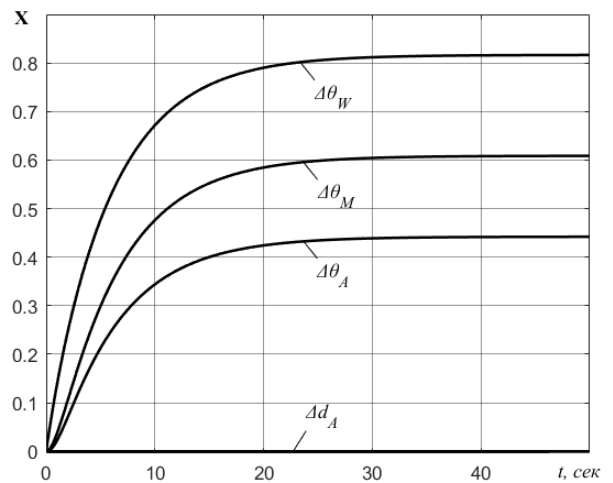
а)



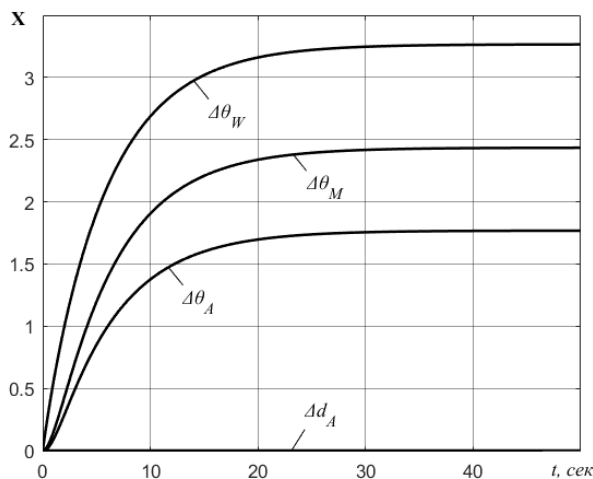
б)



в)



г)



д)

Рис. 3.4. Перехідні процеси у калорифері CVP2-HW2 за каналами впливу:

а) $\Delta\theta_{A0} \rightarrow X$, $\Delta\theta_{A0} = 1^\circ\text{C}$;

б) $\Delta d_{A0} \rightarrow X$, $\Delta d_{A0} = 1 \text{ г/кг}$;

в) $\Delta G_{A0} \rightarrow X$, $\Delta G_{A0} = 0.05 \text{ кг/сек}$;

г) $\Delta\theta_{W0} \rightarrow X$, $\Delta\theta_{W0} = 1^\circ\text{C}$;

д) $\Delta G_{W0} \rightarrow X$, $\Delta G_{W0} = 0.05 \text{ кг/сек}$

На основі моделі кожухотрубного теплообмінника [204, 205] автором отримано динамічну модель для водяного калорифера із розподіленими

параметрами [121, 206]. У моделі калорифера повітряний простір розглядається як зосереджена ємкість (враховується інтенсивне перемішування повітря вентилятором), а теплоносій та теплообмінна трубчатка – як елемент із розподіленням температури за довжиною трубчатки. Програмну реалізацію математичної моделі калорифера із розподіленими параметрами представлено у [122]. Із Додатку Б.2 у розроблену програму вводилися параметри теплофізичних величин калорифера CVP2-HW2. Результати моделювання перехідних процесів за каналами впливу для водяного калорифера із розподіленими параметрами практично повторювали результати зображені на рис. 3.4, що пояснюється наявністю зосередженої ємкості повітряного простору калорифера, яка “осереднила” результати розрахунків розподілених параметрів для трубчатки та теплоносія. Схожі дослідження проведено у роботі [207] із аналогічними висновками.

Аналітичне моделювання теплообмінних процесів із розподіленими параметрами достатньо складне завдання, в розв’язку з’являються трансцендентні функції [122]. Для таких задач рекомендувати аналітичні розв’язки, не варто. На практиці використовуються чисельні методи. Розглядаючи поверхневі теплообмінні апарати, які використовуються у ПКШМ, можна констатувати, що довжина теплообмінних труб (> 2 м) порівняно із середньою швидкістю теплоносія у трубах ($1.5 - 2$ м/сек) несуттєва. Також необхідно враховувати, що повітря інтенсивно перемішується вентиляторами кондиціонера. Практичні дослідження нестационарного теплообміну характеризують процес як явно аперіодичний (див. п.1.4). У [134] Римкевич приводить експериментально отримані передатні функції для рідинних теплообмінників, які описуються передатними функціями другого порядку без запізнення. У даному підрозділі отримана динамічна модель калорифера (3.31) описується аперіодичними ланками третього порядку. Враховуючи викладене, можна зробити висновок, що використання розподілених моделей для моделювання теплообмінних апаратів промислових кондиціонерів недоцільно.

3.1.3 Динамічна модель охолоджувача

При розробці динамічної моделі масо- та теплообміну у водяному охолоджувачі прийнято наступні спрощення [208, 209]: теплообмін із навколишнім середовищем відсутній; модель містить три динамічні елементи із зосередженими параметрами (вода, теплообмінна поверхня та повітряна суміш); критеріальні рівняння масообміну подібні критеріальним рівнянням теплопередачі, тобто справедливо співвідношення Люїса $\beta c/\alpha = 1$; процес конденсації вологи проходить на всій поверхні охолоджувача (із сторони повітряної суміші) для будь-яких режимів роботи; термічний опір плівки конденсату на поверхні теплообміну із повітрям нехтовно малий; лінія насичення на $h-d$ діаграмі ($\varphi = 100\%$) наближено описується прямою в діапазоні зміни температури стінки

$$d_M = A\theta_M + B, \quad (3.32)$$

де d_M – вологовміст на лінії насичення, θ_M – температура теплообмінної стінки, A і B – коефіцієнти; фізичні властивості матеріальних потоків та поверхні теплообміну приведені до усереднених значень, що виправдовується їх незначною зміною у межах робочого діапазону. Як правило, температура вхідного холодоносія у охолоджувачі становить $6-8^\circ\text{C}$, при цьому температура теплообмінної поверхні не перевищує 15°C . Із достатньою інженерною точністю [140] для діапазону температур $6-15^\circ\text{C}$ у рівнянні (3.32) можна прийняти значення коефіцієнтів $A = 0.58 \text{ г}/(^{\circ}\text{C кг})$ і $B = 2.2 \text{ г/кг}$.

Розрахункова схема водяного охолоджувача, що моделюється, зображена на рис. 3.5. Холодоносієм є вода із витратою $G_W(t)$, температура холодоносія на вході у охолоджувач $\theta_{W0}(t)$, на виході – $\theta_W(t)$. Охолоджувач містить n трубок довжиною L . Холодоносієм охолоджує теплообмінні трубки усереднена температура яких $\theta_M(t)$. Перехресно руху холодоносія у охолоджувач подається повітряна суміш із витратою $G_A(t)$. Вхідна температура повітря – $\theta_{A0}(t)$, початковий вологовміст – d_{A0} ; вихідна температура повітря – $\theta_A(t)$, вологовміст – d_A . Геометричні розміри

теплообмінника: L , C , H , – глибина, ширина та висота охолоджувача. Тепловий баланс для холодоносія у трубках та теплообмінної поверхні охолоджувача аналогічний калориферу (див. п.3.1.2), тому не розглядається.

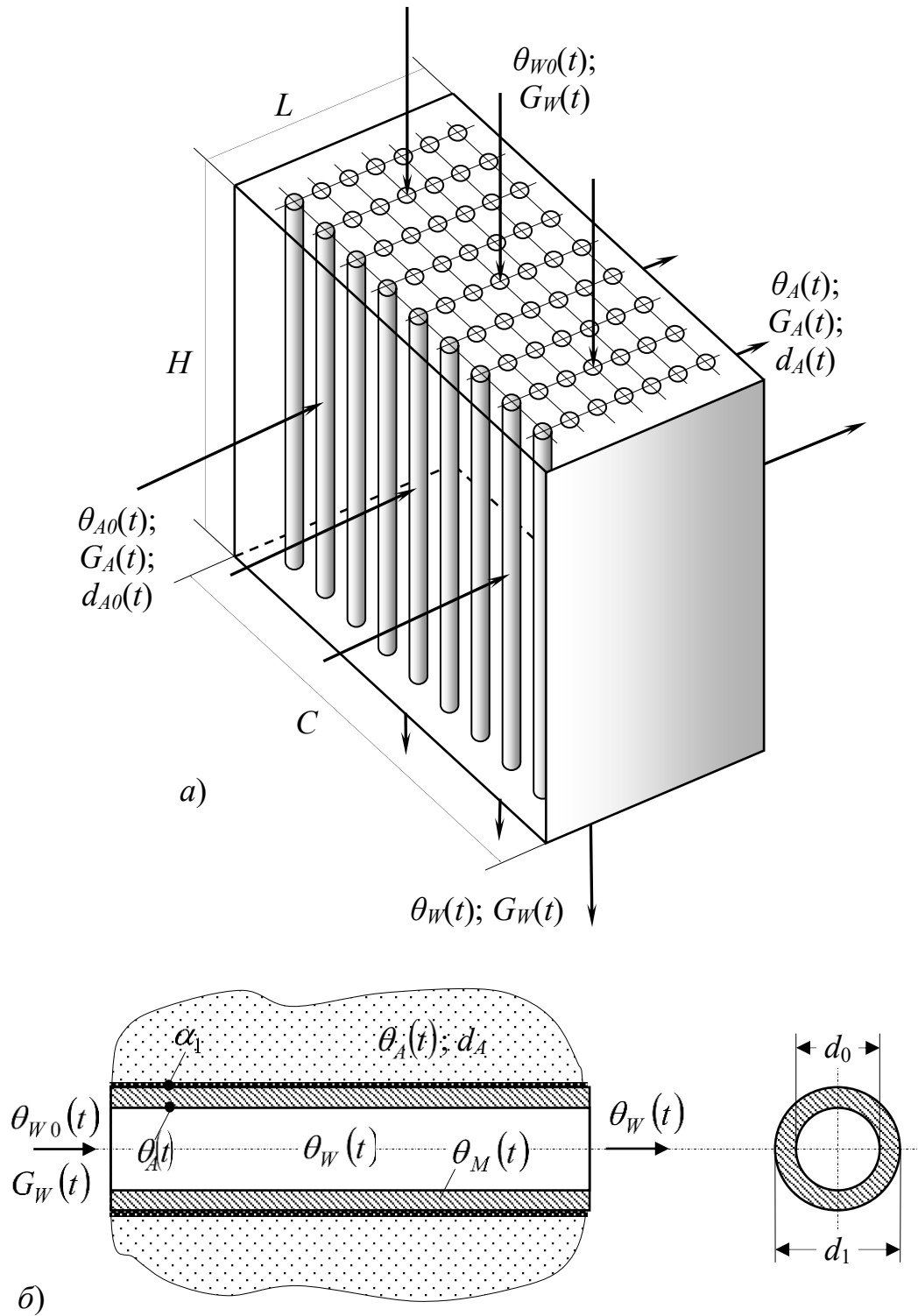


Рис. 3.5. Розрахункова схема охолоджувача

Теплообмін для холодоносія описується залежністю (3.17), а для теплообмінної поверхні – (3.19). Проведемо аналіз теплового та матеріального балансів для повітряної суміші охолоджувача, розрахункова схема зображена на рис. 3.5, б.

Тепловий баланс для вологого повітря із означеними припущеннями прийме вид

$$G_A \left[c_A (\theta_{A0} - \theta_A) + \frac{r}{1000} (d_{A0} - d_A) \right] - \alpha_1 F_1 (\theta_A - \theta_M) - \beta_1 F_1 \frac{r}{1000} (d_A - d_M) = c_A M_A \frac{d\theta_A}{dt}. \quad (3.33)$$

Тут, c_A – теплоємність повітряної суміші; r – теплота конденсації пари (теплота пароутворення); d_M – вологовміст повітря із насиченою парою ($\varphi = 100\%$), що контактує із теплообмінною поверхнею при температурі θ_M ; α_1 – коефіцієнт тепловіддачі між повітряною сумішшю та зовнішньою поверхнею труб; β_1 – коефіцієнт масовіддачі повітряної суміші, за припущенням масообмінні процеси протікають за законом Люїса $\beta c / \alpha = 1$; F_1 – площа зовнішньої поверхні теплообміну охолоджувача; M_A – маса повітря у охолоджувачі. Права частина рівняння (3.33) характеризує акумуляцію теплоти у повітряному просторі охолоджувача. У лівій частині перший член характеризує кількість теплоти, яка вноситься та виноситься вологим повітрям; другий – кількість явної теплоти, яка відводиться через поверхню теплообмінну; третій – кількість прихованої теплоти виділеної від сконденсованої пари, яка відводиться через поверхню теплообмінну.

Після лінеаризації та групування (3.33) із врахуванням (3.32) отримаємо:

$$T_A \frac{d\Delta\theta_A}{dt} + \Delta\theta_A = k_5 \Delta\theta_{A0} + k_6 \Delta\theta_M + k_7 \Delta G_A + k_8 \Delta d_{A0} + k_9 \Delta d_A, \quad (3.34)$$

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

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

Розглянемо матеріальний баланс для повітряного простору охолоджувача. Маса вологи, що акумулюється у повітряному просторі охолоджувача визначається як різниця масових витрат вхідної, вихідної пари та сконденсованої вологи

$$\frac{G_A}{1000}(d_{A0} - d_A) - \frac{\beta_1 F_1}{1000}(d_A - d_M) = V_A \frac{d\rho_A}{dt}. \quad (3.35)$$

Густина вологого повітря визначається за (3.6). Враховуючи (3.6) та (3.32) проведемо лінеаризацію (3.35)

$$T_d \frac{d \Delta d_A}{dt} + \Delta d_A = k_{10} \Delta d_{A0} + k_{11} \Delta G_A + k_{12} \Delta \theta_M, \quad (3.36)$$

$$\text{де } K_d = G_A + \frac{\alpha_1 F_1}{c_A}; T_d = \frac{\omega V_A}{K_d}; k_{10} = \frac{G_A}{K_d}; k_{11} = \frac{d_{A0} - d_A}{K_d}; k_{12} = \frac{\alpha_1 F_1 A}{c_A K_d}.$$

Диференційні рівняння (3.17), (3.19), (3.34) та (3.36) представляють нестационарну модель тепло- та масообміну для водяного охолоджувача, яку можна представити системою звичайних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} T_W \frac{d \Delta \theta_W}{dt} + \Delta \theta_W = k_0 \Delta \theta_{W0} + k_1 \Delta \theta_M + k_2 \Delta G_W; \\ T_M \frac{d \Delta \theta_M}{dt} + \Delta \theta_M = k_3 \Delta \theta_W + k_4 \Delta \theta_A; \\ T_A \frac{d \Delta \theta_A}{dt} + \Delta \theta_A = k_5 \Delta \theta_{A0} + k_6 \Delta \theta_M + k_7 \Delta G_A + k_8 \Delta d_{A0} + k_9 \Delta d_A; \\ T_d \frac{d \Delta d_A}{dt} + \Delta d_A = k_{10} \Delta d_{A0} + k_{11} \Delta G_A + k_{12} \Delta \theta_M. \end{cases} \quad (3.37)$$

Отримаємо матричний вигляд системи (3.37) у просторі станів:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}, \quad (3.38)$$

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

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} k_5/T_A & k_8/T_A & k_7/T_A & 0 & 0 \\ 0 & k_{10}/T_d & k_{11}/T_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_0/T_W & k_2/T_W \end{bmatrix}; \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_{A0} \\ \Delta d_{A0} \\ \Delta G_A \\ \Delta \theta_{W0} \\ \Delta G_W \end{bmatrix}.$$

Добуток **BU** (3.38) розкладено на збурюючу та керуючу складові:

$$\mathbf{BU} = \mathbf{B}_1 \mathbf{U}_1 + \mathbf{B}_2 \mathbf{F}_2 + \mathbf{B}_3 \mathbf{F}_3,$$

$$\text{де } \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ k_2/T_W \end{bmatrix}; \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} k_5/T_A & k_8/T_A \\ 0 & k_{10}/T_d \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} k_7/T_A \\ k_{11}/T_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{U}_1 = \Delta G_W;$$

$$\mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} \Delta \theta_{A0} \\ \Delta d_{A0} \end{bmatrix}; \mathbf{F}_3 = \Delta G_A.$$

Представимо систему диференційних рівнянь (3.34) алгебраїчними в області Лапласа.

$$\begin{cases} \Delta \theta_W (T_W p + 1) = k_0 \Delta \theta_{W0} + k_1 \Delta \theta_M + k_2 \Delta G_W; & (3.39) \\ \Delta \theta_M (T_M p + 1) = k_3 \Delta \theta_W + k_4 \Delta \theta_A; & (3.40) \\ \Delta \theta_A (T_A p + 1) = k_5 \Delta \theta_{A0} + k_6 \Delta \theta_M + k_7 \Delta G_A + k_8 \Delta d_{A0} + k_9 \Delta d_A; & (3.41) \\ \Delta d_A (T_d p + 1) = k_{10} \Delta d_{A0} + k_{11} \Delta G_A + k_{12} \Delta \theta_M. & (3.42) \end{cases}$$

Отримаємо розв'язок (3.39) – (3.42) відносно змінної $\Delta \theta_A(p)$. З (3.40) знаходимо $\Delta \theta_M(p)$, з (3.42) – $\Delta d_A(p)$. Знайденні залежності використовуємо у (3.41) для знаходження $\Delta \theta_A$, після групування подібних отримаємо:

$$\Delta \theta_A = \frac{1}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} \left[(b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0) \Delta \theta_{A0} + \right. \\ \left. + (b_7 p^3 + b_6 p^2 + b_5 p + b_4) \Delta d_{A0} + (b_{11} p^3 + b_{10} p^2 + b_9 p + b_8) \Delta G_A + \right. \\ \left. + (b_{13} p + b_{12}) \Delta \theta_{W0} + (b_{15} p + b_{14}) \Delta G_W \right], \quad (3.43)$$

$$\text{тут } a_1 = \frac{T_M + (1 - k_1 k_3) T_A + (1 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}) T_W + (1 - k_1 k_3 - k_4 k_6) T_d}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}};$$

$$a_2 = \frac{T_M T_A + T_W T_A + T_W T_M + T_M T_d + (1 - k_1 k_3) T_A T_d + (1 - k_4 k_6) T_W T_d}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}};$$

$$a_3 = \frac{T_M T_A T_d + T_W T_A T_d + T_W T_M T_d + T_M T_W T_A}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; a_4 = \frac{T_W T_M T_A T_d}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}};$$

$$b_0 = \frac{k_5 (1 - k_1 k_3)}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; b_1 = \frac{k_5 [T_M + T_W + (1 - k_1 k_3) T_d]}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}};$$

$$\begin{aligned}
b_2 &= \frac{k_5(T_M T_d + T_W T_d + T_W T_M)}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \quad b_3 = \frac{k_5 T_W T_M T_d}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \\
b_4 &= \frac{(1 - k_1 k_3)(k_8 + k_9 k_{10})}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \quad b_5 = \frac{k_8[T_M + T_W + (1 - k_1 k_3)T_d] + k_9 k_{10}(T_M + T_W)}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \\
b_6 &= \frac{k_8(T_M T_d + T_W T_d + T_W T_M) + k_9 k_{10} T_W T_M}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \quad b_7 = \frac{k_8 T_W T_M T_d}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \\
b_8 &= \frac{(1 - k_1 k_3)(k_7 + k_9 k_{11})}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \quad b_9 = \frac{k_7[T_M + T_W + (1 - k_1 k_3)T_d] + k_9 k_{11}(T_M + T_W)}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \\
b_{10} &= \frac{k_7(T_M T_d + T_W T_d + T_W T_M) + k_9 k_{11} T_W T_M}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \quad b_{11} = \frac{k_7 T_W T_M T_d}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \\
b_{12} &= \frac{k_0 k_3 (k_6 + k_9 k_{12})}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \quad b_{13} = \frac{k_0 k_3 k_6 T_d}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \\
b_{14} &= \frac{k_2 k_3 (k_6 + k_9 k_{12})}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \quad b_{15} = \frac{k_2 k_3 k_6 T_d}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}.
\end{aligned}$$

Аналогічно знаходимо розв'язок (3.39) – (3.42) відносно змінної Δd_A :

$$\begin{aligned}
\Delta d_A &= \frac{1}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} \left[(c_1 p + c_0) \Delta \theta_{A0} + \right. \\
&\quad + (c_5 p^3 + c_4 p^2 + c_3 p + c_2) \Delta d_{A0} + (c_9 p^3 + c_8 p^2 + c_7 p + c_6) \Delta G_A + \\
&\quad \left. + (c_{11} p + c_{10}) \Delta \theta_{W0} + (c_{13} p + c_{12}) \Delta G_W \right], \tag{3.44}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{де } c_0 &= \frac{k_4 k_5 k_{12}}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \quad c_1 = \frac{k_4 k_5 k_{12} T_W}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \\
c_2 &= \frac{k_{10}(1 - k_1 k_3 - k_4 k_6) + k_4 k_8 k_{12}}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \\
c_3 &= \frac{k_{10}[T_M + (1 - k_1 k_3)T_A + (1 - k_4 k_6)T_W] + k_4 k_8 k_{12} T_W}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \\
c_4 &= \frac{k_{10}(T_M T_A + T_W T_A + T_W T_M)}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \quad c_5 = \frac{k_{10} T_W T_M T_A}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \\
c_6 &= \frac{k_{11}(1 - k_1 k_3 - k_4 k_6) + k_4 k_7 k_{12}}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \\
c_7 &= \frac{k_{11}[T_M + (1 - k_1 k_3)T_A + (1 - k_4 k_6)T_W] + k_4 k_7 k_{12} T_W}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \\
c_8 &= \frac{k_{11}(T_M T_A + T_W T_A + T_W T_M)}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}}; \quad c_9 = \frac{k_{11} T_W T_M T_A}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}};
\end{aligned}$$

$$c_{10} = \frac{k_0 k_3 k_{12}}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}} ; c_{11} = \frac{k_0 k_3 k_{12} T_A}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}} ;$$

$$c_{12} = \frac{k_2 k_3 k_{12}}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}} ; c_{13} = \frac{k_2 k_3 k_{12} T_A}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6 - k_4 k_9 k_{12}} .$$

Залежності (3.43), (3.44) подамо багатовимірною моделлю у області Лапласа:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W} \mathbf{U} , \quad (3.45)$$

$$\text{де } \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_A \\ \Delta d_A \end{bmatrix} ; \mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} & W_{14} & W_{15} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} & W_{24} & W_{25} \end{bmatrix} ;$$

$$\mathbf{U} = [\Delta \theta_{A0} \Delta d_{A0} \Delta G_A \Delta \theta_{W0} \Delta G_W]^T ;$$

$$W_{11} = \frac{b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} ; W_{12} = \frac{b_7 p^3 + b_6 p^2 + b_5 p + b_4}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} ;$$

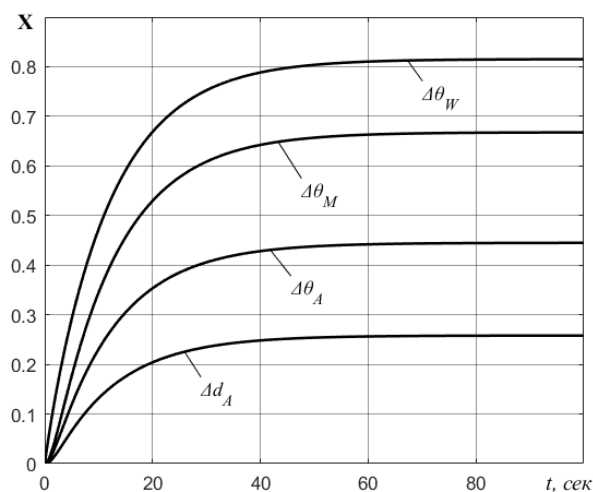
$$W_{13} = \frac{b_{11} p^3 + b_{10} p^2 + b_9 p + b_8}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} ; W_{14} = \frac{b_{13} p + b_{12}}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} ;$$

$$W_{15} = \frac{b_{15} p + b_{14}}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} ; W_{21} = \frac{c_1 p + c_0}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} ;$$

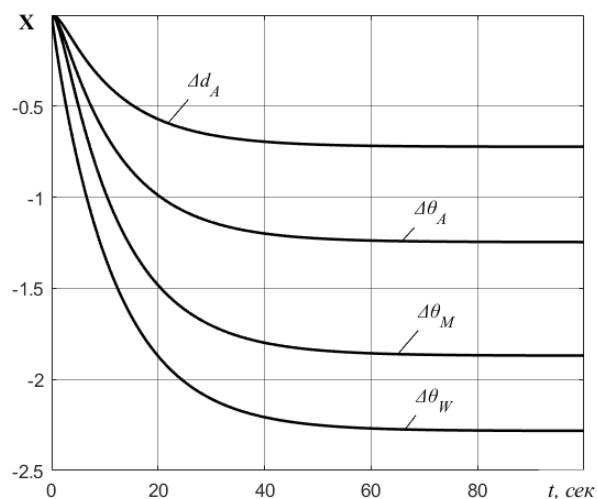
$$W_{22} = \frac{c_5 p^3 + c_4 p^2 + c_3 p + c_2}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} ; W_{23} = \frac{c_9 p^3 + c_8 p^2 + c_7 p + c_6}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} ;$$

$$W_{24} = \frac{c_{11} p + c_{10}}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} ; W_{25} = \frac{c_{13} p + c_{12}}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} .$$

Для охолоджувача CVP2-CW4 проведено моделювання перехідних процесів за каналами впливу. У Додатку Б.3 представлено таблицю теплофізичних величин охолоджувача CVP2-CW4, розрахунки коефіцієнтів моделі та експериментально отримані дані. На рис. 3.6 представлено результати моделювання та експериментальні дані за каналами регулювання, а на рис. 3.7 результати моделювання за каналами збурення. Отримані перехідні процеси мають аперіодичний характер. Інерційність каналу регулювання дещо більша за інерційність каналів збурення, що пояснюється наявністю теплообмінної поверхні охолоджувача із власною тепловою інерційністю.

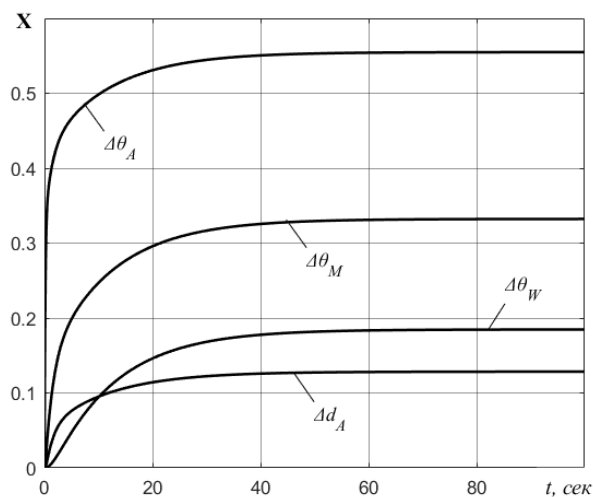


a)

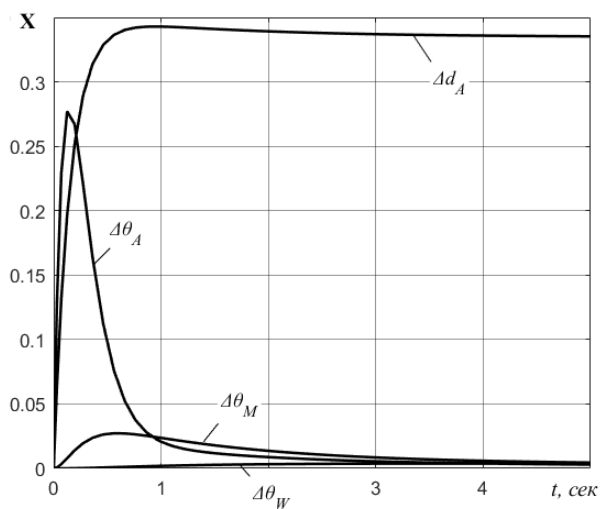


б)

Рис. 3.6. Перехідні процеси у охолоджувачі CVP2-CW4 за каналами регулювання: а) $\Delta\theta_{W0} \rightarrow X$, $\Delta\theta_{W0} = 1^\circ C$; б) $\Delta G_{W0} \rightarrow X$, $\Delta G_{W0} = 0.1 \text{ кг/сек}$



a)



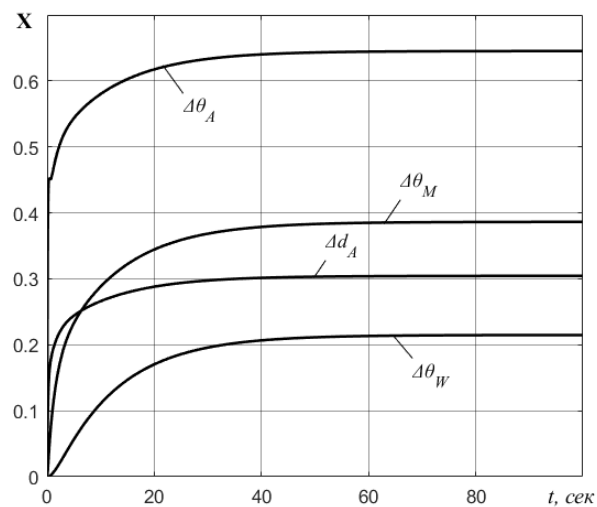
б)

Рис. 3.7. Перехідні процеси у охолоджувачі CVP2-CW4 за каналами збурення:

а) $\Delta\theta_{A0} \rightarrow X$, $\Delta\theta_{A0} = 1^\circ C$;

б) $\Delta d_{A0} \rightarrow X$, $\Delta d_{A0} = 1 \text{ г/кг}$;

в) $\Delta G_{A0} \rightarrow X$, $\Delta G_{A0} = 0.1 \text{ кг/сек}$



в)

3.2 Динамічні моделі камер зволоження

Кліматичне обладнання для зволоження повітря доволі різноманітне. Отримати динамічні моделі для всього спектру повітряних зволожувачів, що використовуються для промислових систем мікроклімату, досить складна та об'ємна задача. Враховуючи, що найбільше розповсюдження отримали адіабатні та ізотермічний методи зволоження (п. 1.4.2), у підрозділі розглядається математичне моделювання динамічних процесів тепло- та масообміну для камер форсуночного та парового зволоження “класичної” технічної реалізації.

3.2.1 Динамічна модель камери форсуночного зволоження

При розробці аналітичної моделі нестационарного тепло- та масообміну у камері форсуночного зволоження прийнято наступні спрощення [210 – 212]: теплообмін із навколишнім середовищем відсутній; модель містить два динамічні елементи (повітряний простір камери зволоження та піддон із водою) із зосередженими параметрами; коефіцієнти тепло- та масообміну усереднені та їх значення приведені до відповідних експериментально отриманих параметрів E – коефіцієнту ефективності адіабатного зволоження та μ – коефіцієнту зрошення повітря [24]; фізичні властивості матеріальних потоків приведені до усереднених значень робочого діапазону апарату.

Розрахункова схема камери форсуночного зволоження для моделювання зображена на рис. 3.8. Тут прийнято такі позначення. У повітряний простір камери зволоження об'ємом $V_A = H \times L \times C$ надходить повітря із температурою $\theta_{A0}(t)$ та вологовмістом $d_{A0}(t)$, витрата повітря $G_A(t)$. Через форсунки розпорошується вода із масовою витратою $G_W(t)$ та початковою температурою $\theta_W(t)$. Краплини води нагріваються до температури $\theta_{W1}(t)$, охолоджуючи та зволожуючи повітря до параметрів $\theta_A(t)$, $d_A(t)$. Частина краплин води випаровується та виноситься повітрям як пара. Масова витрата пари становить менше 1.5 % від масової витрати води $G_W(t)$, що перекачується форсуночним насосом.

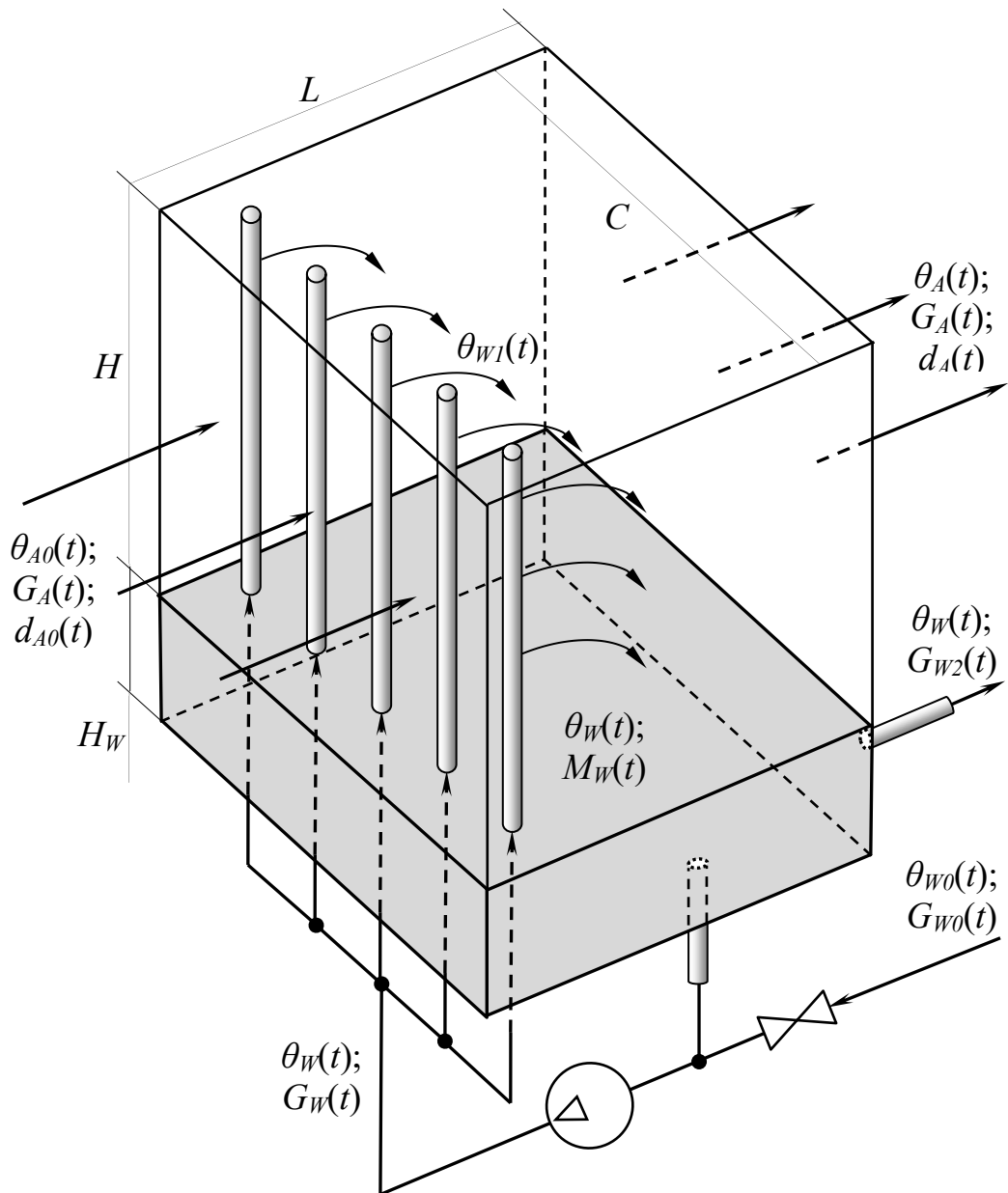


Рис. 3.8. Розрахункова схема камери форсуночного зволоження

Для спрощення моделювання приймемо, що масова витрата води на розбризкування та витрата краплин, що повертаються у піддон камери зволоження, рівні. У піддоні об'ємом $V_w = H_w \times L \times C$ знаходиться вода із середньою температурою $\theta_w(t)$, маса води у піддоні $M_w = \text{const}$, у піддоні влаштований переливний запобіжник. Якщо регулювання камерою зволоження здійснюється витратою $G_{w0}(t)$, або температурою живильної води $\theta_{w0}(t)$, відпрацьована вода через переливний запобіжник зливається у каналізацію. При цьому, нехтуючи витратою води на пароутворення маємо

$G_{W2}(t) \approx G_{W0}(t)$. Проаналізуємо теплові і матеріальний баланси для даної технологічної системи.

Тепловий баланс для вологого повітря камери зволоження із зазначеними вище припущеннями прийме вид:

$$G_A \left[c_A (\theta_{A0} - \theta_A) + \frac{r}{1000} (d_{A0} - d_A) \right] - G_W c_W (\theta_{W1} - \theta_W) = c_A M_A \frac{d\theta_A}{dt}. \quad (3.46)$$

тут c_A, c_W – теплоємність повітряної суміші та води на зрошення; r – теплота пароутворення; d_{W1} – вологовміст повітря із насиченою парою ($\varphi = 100\%$) при температурі насичення θ_{W1} ; M_A – маса повітря у об'ємі $H \times L \times C$ камері зрошення.

Права частина рівняння (3.46) характеризує акумуляцію теплоти у повітряному просторі форсуночного зволожувача. У лівій частині перший член характеризує кількість теплоти, яка віддається вологим повітрям при охолодженні у камері зволоження; другий – кількість теплоти, яка віддається водою у повітря. Температуру рециркуляційної води θ_{W1} наближено можна визначити знаючи коефіцієнт ефективності адіабатного зволоження $E \approx (\theta_{A0} - \theta_A) / (\theta_{A0} - \theta_{W1})$ [13]:

$$\theta_{W1} = \left(1 - \frac{1}{E} \right) \theta_{A0} + \frac{1}{E} \theta_A. \quad (3.47)$$

Врахувавши (3.47) у (3.46) маємо

$$G_A \left[c_A (\theta_{A0} - \theta_A) + \frac{r}{1000} (d_{A0} - d_A) \right] - G_W c_W \left[\left(1 - \frac{1}{E} \right) \theta_{A0} + \frac{1}{E} \theta_A - \theta_W \right] = c_A M_A \frac{d\theta_A}{dt}. \quad (3.48)$$

Після лінеаризації та групування подібних (3.48) отримаємо

$$T_A \frac{d\Delta\theta_A}{dt} + \Delta\theta_A = k_0 \Delta\theta_{A0} + k_1 \Delta G_A + k_2 \Delta\theta_W + k_3 \Delta d_{A0} + k_4 \Delta d_A, \quad (3.49)$$

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

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

Розглянемо матеріальний баланс для повітряного простору камери зволоження. Маса вологи, що акумулюється у повітряному просторі зволожувача, визначається як різниця масових витрат вхідної/вихідної пари та пари, що утворюється під час адіабатного зволоження повітря

$$\frac{G_A}{1000} (d_{A0} - d_A) + \frac{G_A}{1000} (d_{W1} - d_{A0}) = V_A \frac{d\rho_A}{dt}. \quad (3.50)$$

Густина вологого повітря визначається за залежністю (3.6), вологовміст d_{W1} за (3.32). Для визначення вологовмісту d_{W1} скористаємося залежністю (3.32) при температурі θ_{W1} . Врахувавши (3.6) та (3.32) у (3.50), після лінеаризації та групування подібних отримаємо

$$T_d \frac{d \Delta d_A}{dt} + \Delta d_A = k_5 \Delta G_A + k_6 \Delta \theta_{A0} + k_7 \Delta \theta_A, \quad (3.51)$$

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

Нехтуючи витратою води на пароутворення матеріальний баланс для піддону із водою зводимо до вигляду

$$G_{W0}(t) - G_{W2}(t) \approx 0. \quad (3.52)$$

Розглянемо тепловий баланс піддону камери зволоження із водою враховуючи (3.52)

$$G_{W0} c_W (\theta_{W0} - \theta_W) + G_W c_W (\theta_{W1} - \theta_W) = c_W M_W \frac{d\theta_W}{dt}, \quad (3.53)$$

тут c_W – теплоємність повітряної суміші та води на зрошення; M_W – маса води у піддоні об'ємом $H_W \times L \times C$ камери зрошення. Після лінеаризації та групування подібних у (3.53) із врахуванням (3.47) отримаємо

$$T_W \frac{d \Delta \theta_W}{dt} + \Delta \theta_W = k_8 \Delta \theta_{W0} + k_9 \Delta G_{W0} + k_{10} \Delta \theta_{A0} + k_{11} \Delta \theta_A, \quad (3.54)$$

$$\text{тут } K_W = G_{W0} + G_W; T_W = \frac{M_W}{K_W}; k_8 = \frac{G_{W0}}{K_W}; k_9 = \frac{\theta_{W0} - \theta_W}{K_W}; k_{10} = \left(1 - \frac{1}{E} \right) \frac{G_W}{K_W};$$

$$k_{11} = \frac{G_W}{E K_W}.$$

Диференційні рівняння (3.49), (3.51) та (3.54) представляють динамічну модель тепло- та масообміну для форсуночної камери зволоження:

$$\begin{cases} T_A \frac{d \Delta \theta_A}{dt} + \Delta \theta_A = k_0 \Delta \theta_{A0} + k_1 \Delta G_A + k_2 \Delta \theta_W + k_3 \Delta d_{A0} + k_4 \Delta d_A; \\ T_d \frac{d \Delta d_A}{dt} + \Delta d_A = k_5 \Delta G_A + k_6 \Delta \theta_{A0} + k_7 \Delta \theta_A; \\ T_W \frac{d \Delta \theta_W}{dt} + \Delta \theta_W = k_8 \Delta \theta_{W0} + k_9 \Delta G_{W0} + k_{10} \Delta \theta_{A0} + k_{11} \Delta \theta_A. \end{cases} \quad (3.55)$$

Подано систему рівнянь (3.55) у просторі станів:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}' &= \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}, \\ \text{де } \mathbf{X}' &= \begin{bmatrix} \Delta \theta'_A \\ \Delta d'_A \\ \Delta \theta'_W \end{bmatrix}; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1/T_A & k_4/T_A & k_2/T_A \\ k_7/T_d & -1/T_d & 0 \\ k_{11}/T_W & 0 & -1/T_W \end{bmatrix}; \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_A \\ \Delta d_A \\ \Delta \theta_W \end{bmatrix}; \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} k_0/T_A & k_3/T_A & k_1/T_A & 0 & 0 \\ k_6/T_d & 0 & k_5/T_d & 0 & 0 \\ k_{10}/T_W & 0 & 0 & k_8/T_W & k_9/T_W \end{bmatrix}; \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_{A0} \\ \Delta d_{A0} \\ \Delta G_A \\ \Delta \theta_{W0} \\ \Delta G_{W0} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.56)$$

Добуток $\mathbf{B}\mathbf{U}$ (3.56) розкладено на збудуючу та керуючу складові:

$$\mathbf{B}\mathbf{U} = \mathbf{B}_1 \mathbf{U}_1 + \mathbf{B}_2 \mathbf{F}_2 + \mathbf{B}_3 \mathbf{F}_3,$$

$$\text{де } \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_8/T_W \end{bmatrix}; \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} k_0/T_A & k_3/T_A \\ k_6/T_d & 0 \\ k_8/T_W & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} k_1/T_A & 0 \\ k_5/T_d & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{U}_1 = \Delta \theta_{W0};$$

$$\mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} \Delta \theta_{A0} \\ \Delta d_{A0} \end{bmatrix}; \mathbf{F}_3 = \Delta G_A. \text{ Для випадку керування за зміною витрати води на}$$

зрошення ΔG_{W0} – матриці керуючої складової приймуть вигляд:

$$\mathbf{B}_1^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & k_9/T_W \end{bmatrix}; \mathbf{U}_1 = \Delta G_{W0}.$$

Розглянемо (3.55) в області Лапласа.

$$\begin{cases} \Delta\theta_A(T_A p + 1) = k_0 \Delta\theta_{A0} + k_1 \Delta G_A + k_2 \Delta\theta_W + k_3 \Delta d_{A0} + k_4 \Delta d_A; & (3.57) \\ \Delta d_A(T_d p + 1) = k_5 \Delta G_A + k_6 \Delta\theta_{A0} + k_7 \Delta\theta_A; & (3.58) \\ \Delta\theta_W(T_W p + 1) = k_8 \Delta\theta_{W0} + k_9 \Delta G_{W0} + k_{10} \Delta\theta_{A0} + k_{11} \Delta\theta_A. & (3.59) \end{cases}$$

Отримаємо розв'язок (3.57) – (3.59) відносно змінної $\Delta\theta_A$. З (3.59) знаходимо $\Delta\theta_W(p)$, з (3.58) – $\Delta d_A(p)$. Знайденні залежності використовуємо у (3.57) для знаходження $\Delta\theta_A$. Після групування подібних отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_A = & \frac{1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} \left[(b_2 p^2 + b_1 p + b_0) \Delta\theta_{A0} + (b_5 p^2 + b_4 p + b_3) \Delta d_{A0} + \right. \\ & \left. + (b_8 p^2 + b_7 p + b_6) \Delta G_A + (b_{10} p + b_9) \Delta\theta_{W0} + (b_{12} p + b_{11}) \Delta G_{W0} \right], \quad (3.60) \\ \text{тут } a_1 = & \frac{T_A + (1 - k_4 k_7) T_W + (1 - k_2 k_{11}) T_d}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \quad a_2 = \frac{T_A T_d + T_A T_W + T_W T_d}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \\ a_3 = & \frac{T_A T_d T_W}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \quad b_0 = \frac{k_0 + k_2 k_{10} + k_4 k_6}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \quad b_1 = \frac{(k_0 + k_2 k_{10}) T_d + (k_0 + k_4 k_6) T_W}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \\ b_2 = & \frac{k_0 T_d T_W}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \quad b_3 = \frac{k_3}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \quad b_4 = \frac{k_3 (T_W + T_d)}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \\ b_5 = & \frac{k_3 T_W T_d}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \quad b_6 = \frac{k_1 + k_4 k_5}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \quad b_7 = \frac{(k_1 + k_4 k_5) T_W + k_1 T_d}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \\ b_8 = & \frac{k_1 T_d T_W}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \quad b_9 = \frac{k_2 k_8}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \quad b_{10} = \frac{k_2 k_8 T_d}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \\ b_{11} = & \frac{k_2 k_9}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \quad b_{12} = \frac{k_2 k_9 T_d}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}. \end{aligned}$$

Аналогічно знаходимо розв'язок (3.57) – (3.59) відносно змінної Δd_A :

$$\begin{aligned} \Delta d_A = & \frac{1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} \left[(c_2 p^2 + c_1 p + c_0) \Delta\theta_{A0} + (c_4 p + c_3) \Delta d_{A0} + \right. \\ & \left. + (c_7 p^2 + c_6 p + c_5) \Delta G_A + c_8 \Delta\theta_{W0} + c_9 \Delta G_{W0} \right], \quad (3.61) \\ \text{тут, } c_0 = & \frac{k_6 (1 - k_2 k_{11}) + k_7 (k_0 + k_2 k_{10})}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \quad c_1 = \frac{k_6 T_A + (k_6 + k_0 k_7) T_W}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \\ c_2 = & \frac{k_6 T_A T_W}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \quad c_3 = \frac{k_3 k_7}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \quad c_4 = \frac{k_3 k_7 T_W}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \\ c_5 = & \frac{k_1 k_7 + k_5 (k_1 - k_2 k_4)}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \quad c_6 = \frac{k_5 T_A + (k_5 + k_1 k_7) T_W}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \quad c_7 = \frac{k_6 T_A T_W}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \\ c_8 = & \frac{k_2 k_7 k_8}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}; \quad c_9 = \frac{k_2 k_7 k_9}{1 - k_2 k_{11} - k_4 k_7}. \end{aligned}$$

Залежності (3.60), (3.61) подамо багатовимірною моделлю у області Лапласа:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W} \mathbf{U}, \quad (3.62)$$

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

$$W_{11} = \frac{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}; W_{12} = \frac{b_5 p^2 + b_4 p + b_3}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}; W_{13} = \frac{b_8 p^2 + b_7 p + b_6}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1};$$

$$W_{14} = \frac{b_{10} p + b_9}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}; W_{15} = \frac{b_{12} p + b_{11}}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}; W_{21} = \frac{c_2 p^2 + c_1 p + c_0}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1};$$

$$; W_{22} = \frac{c_4 p + c_3}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}; W_{23} = \frac{c_7 p^2 + c_6 p + c_5}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1};$$

$$W_{24} = \frac{c_8}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1};$$

$$W_{25} = \frac{c_9}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}.$$

Отриману модель можна використовувати для моделювання адіабатного зволоження у сотових камерах при умові, що теплоємність матеріалу сотової насадки незначна по відношенню до води. Теплоаккумуляцію у сотах можна врахувати у правій частині (3.53), прийнявши припущення, що температура сотової насадки рівна температурі води на зволоження θ_W (насадка не являється джерелом теплоти).

Проведено моделювання перехідних процесів за основними каналами впливу для форсуночного зволожувача ПСЦК КЦКП-80 виробництва фірми ВЕЗА. У Додатку Б.4 представлено таблицю теплофізичних величин для форсуночного зволожувача та розрахунки коефіцієнтів моделі. На рис. 3.9 наведено результати моделювання за основними каналами впливу. Із аналізу графіків можна зробити висновок, що інерційність каналу регулювання (рис. 3.9, *г*) на два порядки вища за канали збурення (рис. 3.9, *а – в*), що пояснюється значною тепловою аккумуляцією води у піддоні порівняно із тепловою аккумуляцією повітряного простору зволожувача. З цих причин, при керуванні форсуночними зволожувачами відмовилися від регулюючих впливів за зміною температури та витрати води на зволоження. Найчастіше

використовують метод адіабатного зволоження, для чого повітря нагрівають або охолоджують теплообмінником, що знаходиться перед зволожувачем (див. рис. 1.1).

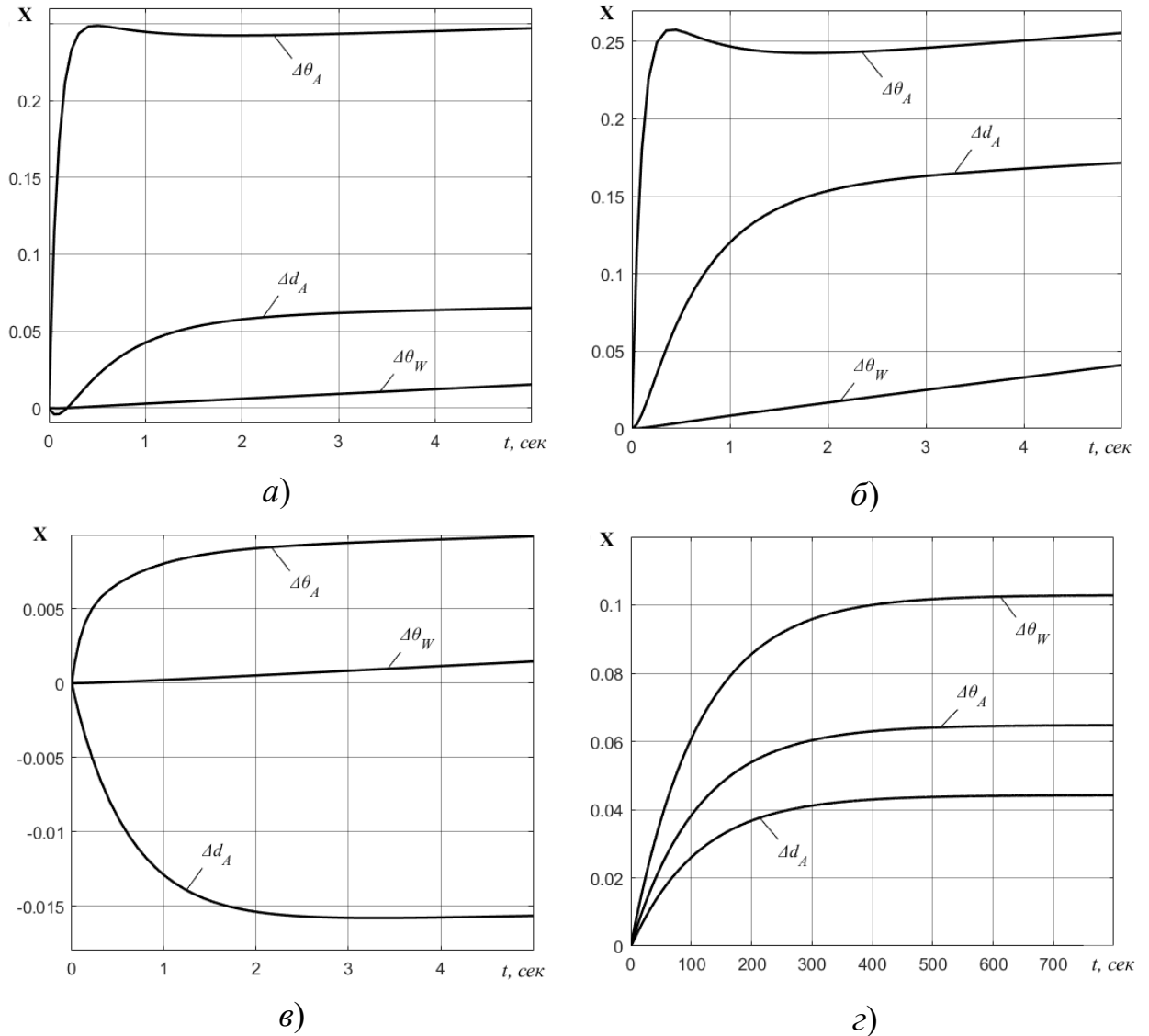


Рис. 3.9. Моделювання перехідних процесів у зволожувачі КІЦП-80:

а) $\Delta\theta_{A0} \rightarrow X$, $\Delta\theta_{A0} = 1^\circ C$; б) $\Delta d_{A0} \rightarrow X$, $\Delta d_{A0} = 1 \text{ г/кг}$;

в) $\Delta G_{A0} \rightarrow X$, $\Delta G_{A0} = 1 \text{ кг/сек}$; г) $\Delta\theta_{W0} \rightarrow X$, $\Delta\theta_{W0} = 1^\circ C$

На рис. 3.10, *a – в* показано завершені перехідні процеси для каналів впливу.

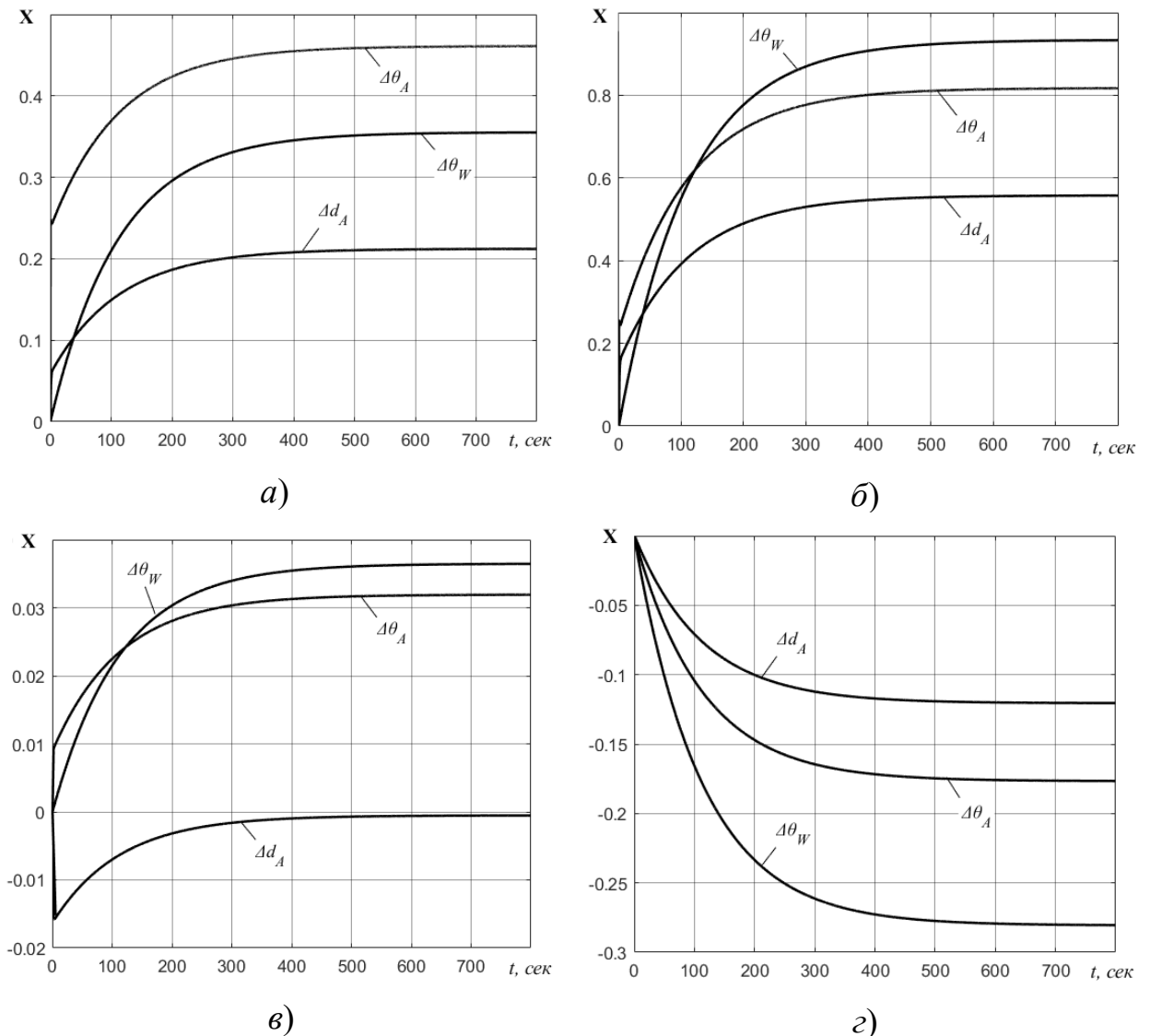


Рис. 3.10. Моделювання перехідних процесів у зволожувачі КЦКП-80:

- a)* $\Delta\theta_{A0} \rightarrow X$, $\Delta\theta_{A0} = 1^\circ\text{C}$; *б)* $\Delta d_{A0} \rightarrow X$, $\Delta d_{A0} = 1\text{г/кг}$;
в) $\Delta G_{A0} \rightarrow X$, $\Delta G_{A0} = 1\text{кг/сек}$; *г)* $\Delta G_{W0} \rightarrow X$, $\Delta G_{W0} = 1\text{кг/сек}$

Аналіз графіків рис 3.9, рис 3.10, *г* підтверджує неефективність регулюючих впливів для зволожувача. На рис. 3.9, *a – в* показано швидкодіючу частину перехідних процесів повітряного простору, що впливає на налаштування системи керування. Враховуючи теплоаккумуляцію води у піддоні, яка на два порядки вища за теплоаккумуляцію повітряного простору, перехідні процеси повітряного простору зволожувача продовжують проходити із швидкістю теплообміну у піддоні.

3.2.2 Динамічна модель камери парового зволоження

На відміну від камер форсуночного та сотового зволоження (процес адіабатного зволоження), при паровому зволоженні (процес ізотермічного зволоження) відсутня потреба додаткового нагрівання повітря після зволоження. Керування камерами парового зволоження простіша порівняно із камерами сотового та форсуночного зволоження [157]. При розробці математичної моделі парозволожувача за основу взято роботи автора [214 – 217]. Для моделі парозволожувача прийнято наступні спрощення: теплообмін із навколишнім середовищем відсутній; модель містить два динамічні елементи (повітряний простір камери зволоження та парогенератор із водою) із зосередженими параметрами; пара, що генерується парогенератором повністю асимілюється у повітрі; фізичні властивості матеріальних потоків приведені до усереднених значень робочого діапазону апарату.

Розрахункова схема парозволожувача зображена на рис. 3.11. У повітряний простір камери зволоження об'ємом $V_A = H \times L \times C$ надходить повітря із температурою $\theta_{A0}(t)$ та вологовмістом $d_{A0}(t)$, витрата повітря $G_A(t)$. Через паропровід у камеру зволоження подається пара із масовою витратою $G_P(t)$. Паропровід приєднаний до парогенератора. У парогенераторі міститься вода, рівень якої автоматично підтримується системою стабілізації рівня за допомогою живильної води із температурою $\theta_{w0}(t)$ та витратою $G_{w0}(t)$. У парогенераторі знаходяться електроди через які пропускають електричний струм потужністю $N_E(t)$, за рахунок чого генерується пара. Пара асимілюється у повітрі, зволожуючи його до вихідних параметрів повітряної суміші $\theta_A(t)$, $d_A(t)$. Розглянемо тепловий і матеріальний баланси для повітряної суміші камери зволоження та парогенератора.

Тепловий баланс для повітряної суміші камери зволоження із зазначеними вище припущеннями прийме вид:

$$G_A \left[c_A (\theta_{A0} - \theta_A) + \frac{r}{1000} (d_{A0} - d_A) \right] + r G_P = c_A M_A \frac{d\theta_A}{dt}, \quad (3.63)$$

тут c_A – теплоємність повітря; r – теплота пароутворення; M_A – маса вологого повітря у об’ємі V_A . Права частина (3.63) характеризує акумуляцію теплоти у повітряному просторі камери зволоження. У лівій частині перший член характеризує кількість теплоти, яка вноситься та виноситься вологим повітрям у камері зволоження; другий – кількість теплоти, яка вноситься паром при ізотермічному зрошуванні повітря.

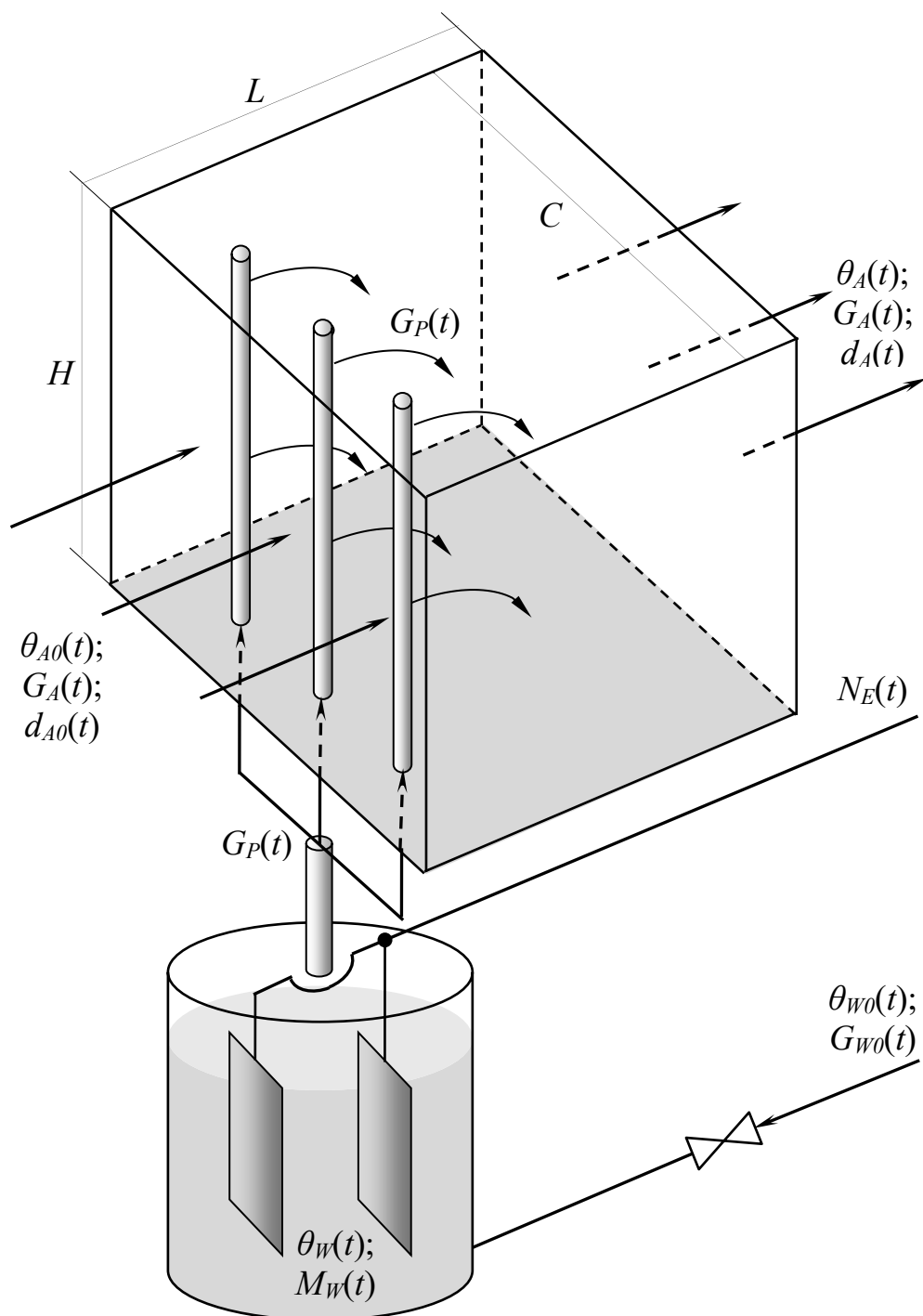


Рис. 3.11. Розрахункова схема камери парового зволоження

Розглянемо матеріальний баланс для повітряного простору камери зволоження. Маса вологи, що акумулюється у повітряному просторі зволожувача, визначається як різниця масових витрат вхідної/вихідної пари та пари, що подається з парогенератора

$$\frac{G_A}{1000}(d_{A0} - d_A) + G_P = V_A \frac{d\rho_A}{dt}. \quad (3.64)$$

Тепловий та матеріальний баланси для парогенератора представляються відповідними рівняннями:

$$G_W c_W \theta_{W0} + N_E - r G_P = c_W \frac{dM_W \theta_W}{dt}; \quad (3.65)$$

$$G_W - G_P = \frac{dM_W}{dt}, \quad (3.66)$$

де θ_{W0} – температура живильної води; θ_W – температура води в парогенераторі (у робочому $\theta_W = 100^\circ\text{C}$) G_P , G_W – масові витрати пари та води; c_W – теплоємність води; r – теплота пароутворення; N_E – потужність парогенератора; M_W – маса води в парогенераторі. Конструкція парогенератора включає систему стабілізації рівня води. З цих міркувань $M'_W \approx 0$, а диференційне рівняння (3.66) перетворюється у алгебраїчне $G_W - G_P \approx 0$. Також, прийmemo до уваги постійну температуру води у парогенераторі $\theta_W \approx 100^\circ\text{C}$, звідки для рівняння (3.65) $dM_W \theta_W / dt \approx 0$, із якого легко визначити G_P

$$G_P = \frac{1}{r - c_W \theta_{W0}} N_E. \quad (3.67)$$

Після лінеаризації та групування подібних (3.63), (3.64) із врахуванням (3.6) та (3.67) отримаємо динамічну модель парогенератора:

$$\begin{cases} T_A \frac{d\Delta\theta_A}{dt} + \Delta\theta_A = k_0 \Delta\theta_{A0} + k_1 \Delta G_A + k_2 \Delta N_E + k_3 \Delta d_{A0} + k_4 \Delta d_A; \\ T_d \frac{d\Delta d_A}{dt} + \Delta d_A = k_5 \Delta d_{A0} + k_6 \Delta G_A + k_7 \Delta N_E; \end{cases} \quad (3.68)$$

$$\text{де } T_A = \frac{M_A}{G_A}, \quad k_0 = 1, \quad k_1 = \frac{1}{G_A} \left[\theta_{A0} - \theta_A + \frac{r(d_{A0} - d_A)}{1000 c_A} \right], \quad k_2 = \frac{r}{c_A G_A (r - c_W \theta_{W0})};$$

$$k_3 = \frac{r}{1000 c_A}, \quad k_4 = -k_3; \quad T_d = \frac{\omega V_A}{G_A}, \quad k_5 = 1, \quad k_6 = \frac{d_{A0} - d_A}{G_A}, \quad k_7 = \frac{1000}{G_A (r - c_W \theta_{W0})}.$$

Представимо систему рівнянь (3.68) у просторі станів:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}, \quad (3.69)$$

де $\mathbf{X}' = \begin{bmatrix} \Delta\theta'_A \\ \Delta d'_A \end{bmatrix}$; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1/T_A & k_4/T_A \\ 0 & -1/T_d \end{bmatrix}$; $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta\theta_A \\ \Delta d_A \end{bmatrix}$;

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} k_0/T_A & k_3/T_A & k_1/T_A & k_2/T_A \\ 0 & k_5/T_d & k_6/T_d & k_7/T_d \end{bmatrix}; \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \Delta\theta_{A0} \\ \Delta d_{A0} \\ \Delta G_A \\ \Delta N_E \end{bmatrix}.$$

Добуток $\mathbf{B}\mathbf{U}$ (3.69) розкладено на збуджуючу та керуючу складові:

$$\mathbf{B}\mathbf{U} = \mathbf{B}_1\mathbf{U}_1 + \mathbf{B}_2\mathbf{F}_2 + \mathbf{B}_3\mathbf{F}_3,$$

$$\text{де } \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} k_2/T_A \\ k_7/T_d \end{bmatrix}; \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} k_0/T_A & k_3/T_A \\ 0 & k_5/T_d \end{bmatrix}; \mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} k_1/T_A \\ k_6/T_d \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{U}_1 = \Delta N_E; \mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} \Delta\theta_{A0} \\ \Delta d_{A0} \end{bmatrix}; \mathbf{F}_3 = \Delta G_A.$$

Представимо систему диференціальних рівнянь (3.68) системою алгебраїчних рівнянь в області Лапласа.

$$\begin{cases} \Delta\theta_A(T_A p + 1) = k_0 \Delta\theta_{A0} + k_1 \Delta G_A + k_2 \Delta N_E + k_3 \Delta d_{A0} + k_4 \Delta d_A; & (3.70) \\ \Delta d_A(T_d p + 1) = k_5 \Delta d_{A0} + k_6 \Delta G_A + k_7 \Delta N_E. & (3.71) \end{cases}$$

Із (3.71) отримаємо розв'язок відносно змінної Δd_A .

$$\Delta d_A = \frac{1}{T_d p + 1} [k_5 \Delta d_{A0} + k_6 \Delta G_A + k_7 \Delta N_E]. \quad (3.72)$$

З (3.70) знаходимо $\Delta\theta_A$, враховуючи (3.71) отримаємо:

$$\Delta\theta_A = \frac{1}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} [(b_1 p + b_0) \Delta\theta_{A0} + (b_3 p + b_2) \Delta d_{A0} + (b_5 p + b_4) \Delta G_A + (b_7 p + b_6) \Delta N_E], \quad (3.73)$$

тут $a_1 = T_A + T_d$; $a_2 = T_A T_d$; $b_0 = 1$; $b_1 = k_0 T_d$; $b_2 = k_3 + k_4 k_5$; $b_3 = k_3 T_d$;

$b_4 = k_1 + k_4 k_6$; $b_5 = k_1 T_d$; $b_6 = k_2 + k_4 k_7$; $b_7 = k_2 T_d$.

Залежності (3.72), (3.73) подамо багатовимірною моделлю у області Лапласа:

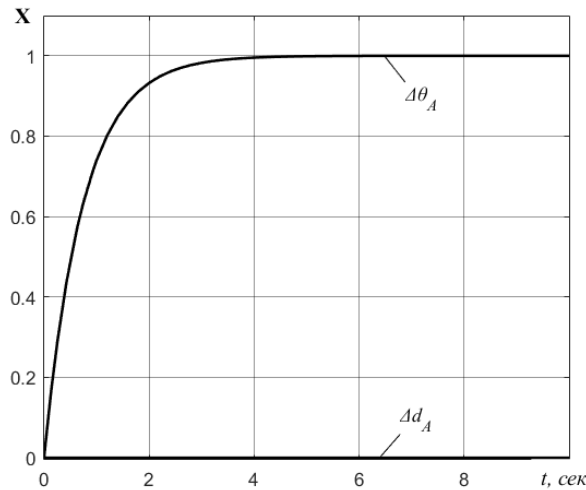
$$\mathbf{Y} = \mathbf{W} \mathbf{U}, \quad (3.74)$$

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

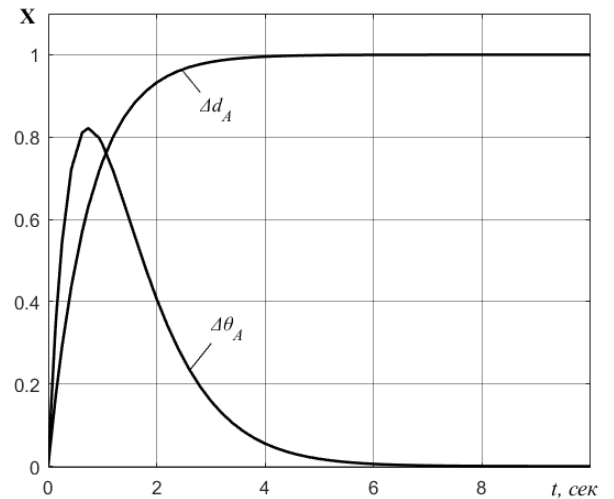
$$W_{11} = \frac{b_1 p + b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + 1}; W_{12} = \frac{b_3 p + b_2}{a_2 p^2 + a_1 p + 1}; W_{13} = \frac{b_5 p + b_4}{a_2 p^2 + a_1 p + 1};$$

$$W_{14} = \frac{b_7 p + b_6}{a_2 p^2 + a_1 p + 1}; W_{22} = \frac{k_5}{T_d p + 1}; W_{23} = \frac{k_6}{T_d p + 1}; W_{24} = \frac{k_7}{T_d p + 1}.$$

Проведемо моделювання перехідних процесів за основними каналами впливу для камери парового зволоження із парогенератором humiSteam UE005 фірми Carel. У Додатку Б.5 представлено таблицю теплофізичних величин, розрахунки коефіцієнтів моделі та дані отримані експериментально. На рис. 3.12 наведено результати дослідження для основних каналів впливу. Перехідні процеси за каналами впливу носять аперіодичний характер.



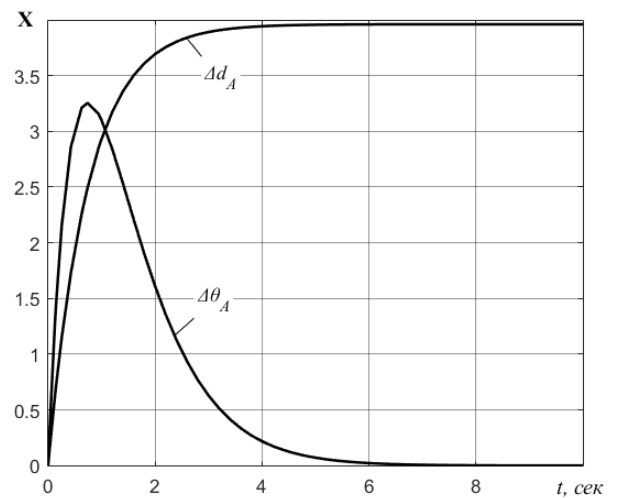
а)



б)

Рис. 3.12. Моделювання перехідних процесів у паровому зволожувачі:

- а) $\Delta\theta_{A0} \rightarrow \mathbf{X}$, $\Delta\theta_{A0} = 1^\circ\text{C}$;
 б) $\Delta d_{A0} \rightarrow \mathbf{X}$, $\Delta d_{A0} = 1\text{ г/кг}$;
 в) $\Delta N_E \rightarrow \mathbf{X}$, $\Delta N_E = 3700\text{ Вт}$



в)

3.3 Динамічна модель камери змішування повітря

Розрахункову схему камери змішування повітря зображено на рис. 3.13. Камера змішування розглядається як пропорційна ланка внаслідок миттєвого перемішування двох матеріальних потоків у обмеженому об'ємі.

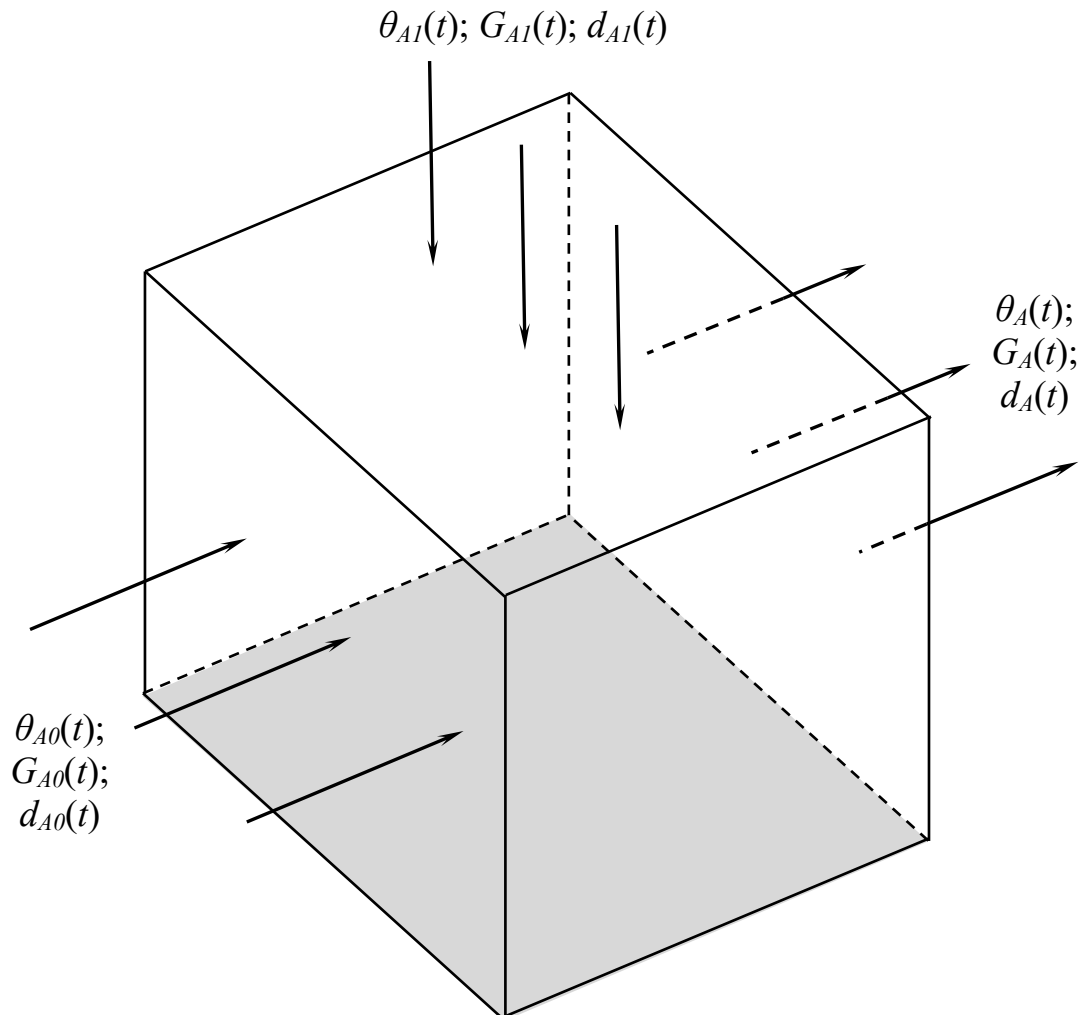


Рис. 3.13. Розрахункова схема камери змішування

У повітряний простір камери змішування надходить два матеріальних потоки із параметрами: температура $\theta_{A0}(t)$, вологовміст $d_{A0}(t)$ та витрата $G_{A0}(t)$ для першого матеріального потоку; температура $\theta_{A1}(t)$, вологовміст $d_{A1}(t)$ та витрата $G_{A1}(t)$ для другого потоку. В процесі перемішування матеріальних потоків утворюється повітряна суміш із вихідними параметрами: температура $\theta_A(t)$; вологовміст $d_A(t)$; витрата $G_A(t)$ ($G_A = G_{A0} + G_{A1}$).

Тепловий і матеріальний баланси повітряної суміші камери змішування розглянуто у п.1.3.3, див. систему рівнянь (1.5), для прийнятої системи позначень маємо:

$$\begin{cases} G_{A0} \left(c_A \theta_{A0} + \frac{r}{1000} d_{A0} \right) + G_{A1} \left(c_A \theta_{A1} + \frac{r}{1000} d_{A1} \right) = G_A \left(c_A \theta_A + \frac{r}{1000} d_A \right); \\ G_{A0} d_{A0} + G_{A1} d_{A1} = G_A d_A, \end{cases} \quad (3.75)$$

де c_A – теплоємність повітря; r – теплота пароутворення. Систему рівнянь (3.75) розв’язано відносно $\theta_A(t)$, $d_A(t)$. Після спрощення та групування маємо

$$\begin{cases} \theta_A = (1-K)\theta_{A0} + K\theta_{A1}; \\ d_A = (1-K)d_{A0} + Kd_{A1}, \end{cases}$$

тут $K = \frac{G_{A1}}{G_A} = \frac{G_{A1}}{G_{A0} + G_{A1}}$ – доля рециркуляційного повітря, яка може

змінюватися в процесі регулювання ($K=0\dots 1$; $K=0 \rightarrow G_{A1}=0$; $K=0.5 \rightarrow G_{A0}=G_{A1}$; $K=1 \rightarrow G_{A0}=0$). Лінеаризація проміжної системи рівнянь дасть

$$\begin{cases} \Delta\theta_A = k_0 \Delta\theta_{A0} + k_1 \Delta\theta_{A1} + k_2 \Delta K; \\ \Delta d_A = k_0 \Delta d_{A0} + k_1 \Delta d_{A1} + k_3 \Delta K, \end{cases} \quad (3.76)$$

де $k_0 = 1-K$; $k_1 = K$; $k_2 = \theta_{A1} - \theta_{A0}$; $k_3 = d_{A1} - d_{A0}$.

Представимо систему рівнянь (3.76) у просторі станів:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}, \quad (3.77)$$

$$\text{де } \mathbf{X}' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}; \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta\theta_A \\ \Delta d_A \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} k_0 & 0 & k_1 & 0 & k_2 \\ 0 & k_0 & 0 & k_1 & k_3 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{U}^T = [\Delta\theta_{A0} \Delta d_{A0} \Delta\theta_{A1} \Delta d_{A1} \Delta K].$$

Добуток $\mathbf{B}\mathbf{U}$ розкладено на керуючу та збурюючу складові:

$$\mathbf{B}\mathbf{U} = \mathbf{B}_1\mathbf{U}_1 + \mathbf{B}_2\mathbf{F}_2 + \mathbf{B}_3\mathbf{F}_3,$$

$$\text{де } \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} k_2 \\ k_3 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} k_0 & 0 \\ 0 & k_0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_1 \end{bmatrix}; \mathbf{U}_1 = \Delta K; \mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} \Delta\theta_{A0} \\ \Delta d_{A0} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{F}_3 = \begin{bmatrix} \Delta\theta_{A1} \\ \Delta d_{A1} \end{bmatrix}.$$

Систему (3.76) представимо математичною моделлю у області Лапласа:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W} \mathbf{U}, \quad (3.78)$$

$$\text{де } \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \Delta\theta_A \\ \Delta d_A \end{bmatrix}; \quad \mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_{11} & 0 & W_{13} & 0 & W_{15} \\ 0 & W_{22} & 0 & W_{24} & W_{25} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{U} = [\Delta\theta_{A0} \ \Delta d_{A0} \ \Delta\theta_{A1} \ \Delta d_{A1} \ \Delta K]^T; \quad W_{11} = W_{22} = k_0; \quad W_{13} = W_{24} = k_1; \quad W_{15} = k_2; \\ W_{25} = k_3.$$

3.4 Динамічна модель приміщення

При розробці систем прецизійного мікроклімату доводиться враховувати динамічні властивості приміщення. Розрахункова схема приміщення зображена на рис. 3.14. У повітряний простір приміщення об'ємом $V_A = H \times L \times C$ із ПСЦК надходить підготовлене повітря, температура якого $\theta_{A0}(t)$, вологовміст $d_{A0}(t)$, витрата $G_A(t)$. В процесі теплообміну між технологічним обладнанням (потужність обладнання N_E) та стінами (температура стіни θ_S) у приміщенні встановлюється температура повітря $\theta_A(t)$ із вологовмістом $d_A(t)$. Витяжна система кондиціонера забезпечує відвід повітря. Температура навколишнього повітря – $\theta_N(t)$. За основу моделі приміщення взято проточну ємність [122]. При моделюванні прийнято наступні спрощення [219, 220]: в приміщенні відсутні джерела вологовиділення; приведена теплова потужність технологічного та теплотехнічного обладнання $N_E(t)$ враховує тепловиділення обслуговуючого персоналу; модель містить два динамічні елементи із зосередженими параметрами (повітряний простір та стіни приміщення); фізичні властивості матеріальних потоків та поверхні теплообміну приведені до усереднених значень робочого діапазону. Використання зосередженої математичної моделі приміщення для моделювання процесів тепло- та масообміну обґрунтовано у п.1.5.3.

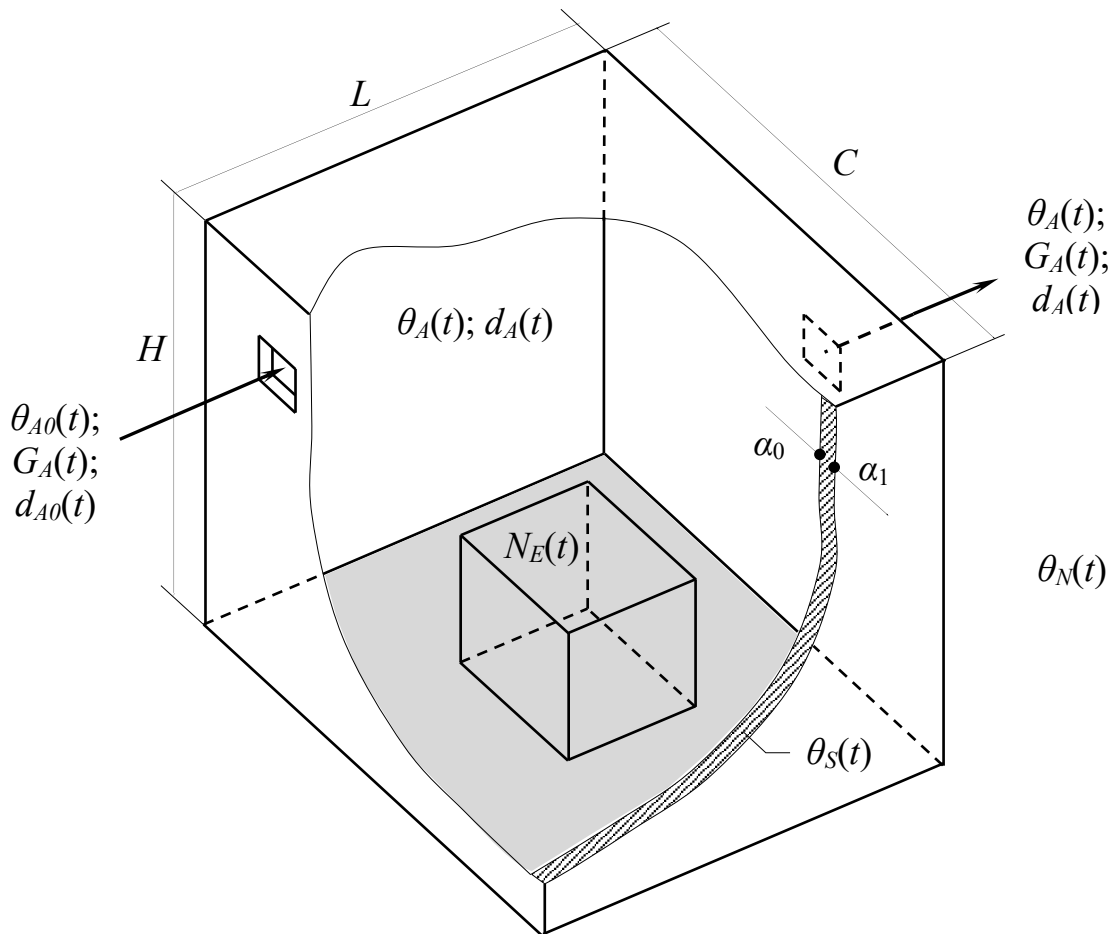


Рис. 3.14. Розрахункова схема приміщення

Теплові та матеріальний баланси для динамічних елементів моделі приміщення представлено системою диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} G_A c_A (\theta_{A0} - \theta_A) - \alpha_0 F_0 (\theta_A - \theta_s) + N_E = c_A M_A \frac{d\theta_A}{dt}; & (3.79) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \alpha_0 F_0 (\theta_A - \theta_s) - \alpha_1 F_1 (\theta_s - \theta_N) = c_s M_s \frac{d\theta_s}{dt}; & (3.80) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{G_A}{1000} (d_{A0} - d_A) = V_A \frac{d\rho_A}{dt}, & (3.81) \end{cases}$$

тут c_A , c_s – відповідно теплоємність повітря та матеріалу стіни; α_0 , α_1 – відповідно коефіцієнт тепловіддачі всередині приміщення (між повітрям та внутрішньою поверхнею стіни F_0) та ззовні (між зовнішньою поверхнею стіни F_1 та навколишнім повітрям із температурою θ_s); M_A – маса повітря в об’ємі V_A ; M_s – загальна маса матеріалу стін; ρ_A – густина повітря. Рівняння (3.79) та (3.80) описують теплові баланси для повітряного простору та

теплоізолюючої стіни приміщення, рівняння (3.81) відтворює матеріальний баланс для повітряної суміші.

Після групування подібних та лінеаризації (3.79) – (3.81) з врахуванням (3.6) маємо

$$\begin{cases} T_A \frac{d \Delta \theta_A}{dt} + \Delta \theta_A = k_0 \Delta \theta_{A0} + k_1 \Delta G_A + k_2 \Delta \theta_S + k_3 \Delta N_E; \\ T_S \frac{d \Delta \theta_S}{dt} + \Delta \theta_S = k_4 \Delta \theta_A + k_5 \Delta \theta_N; \\ T_d \frac{d \Delta d_A}{dt} + \Delta d_A = k_6 \Delta d_{A0} + k_7 \Delta G_A, \end{cases} \quad (3.82)$$

$$\begin{aligned} \text{де } K_A &= c_A G_A + \alpha_0 F_0; \quad K_S = \alpha_0 F_0 + \alpha_1 F_1; \quad T_A = \frac{c_A M_A}{K_A}; \quad T_S = \frac{c_S M_S}{K_S}; \quad T_d = \frac{\omega V_A}{G_A}; \\ k_0 &= \frac{c_A G_A}{K_A}; \quad k_1 = \frac{\theta_{A0} - \theta_A}{K_A}; \quad k_2 = \frac{\alpha_0 F_0}{K_A}; \quad k_3 = \frac{1}{K_A}; \quad k_4 = \frac{\alpha_0 F_0}{K_S}; \quad k_5 = 1 - k_4; \quad k_6 = 1; \\ k_7 &= \frac{d_{A0} - d_A}{G_A}. \end{aligned}$$

Представимо систему рівнянь (3.82) у просторі станів:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}' &= \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}, \\ \text{де } \mathbf{X}' &= \begin{bmatrix} \Delta \theta'_A \\ \Delta d'_A \\ \Delta \theta'_S \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1/T_A & 0 & k_2/T_A \\ 0 & -1/T_d & 0 \\ k_4/T_S & 0 & -1/T_S \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_A \\ \Delta d_A \\ \Delta \theta_S \end{bmatrix}; \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} k_0/T_A & 0 & k_1/T_A & k_3/T_A & 0 \\ 0 & k_6/T_d & k_7/T_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_5/T_S \end{bmatrix}; \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_{A0} \\ \Delta d_{A0} \\ \Delta G_A \\ \Delta N_E \\ \Delta \theta_N \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.83)$$

Добуток $\mathbf{B}\mathbf{U}$ (3.83) розкладено на збурюючу та керуючу складові:

$$\mathbf{B}\mathbf{U} = \mathbf{B}_1 \mathbf{F}_1 + \mathbf{B}_2 \mathbf{F}_2 + \mathbf{B}_3 \mathbf{F}_3,$$

$$\begin{aligned} \text{де } \mathbf{B}_1 &= \begin{bmatrix} k_3/T_A & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & k_5/T_S \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} k_0/T_A & 0 \\ 0 & k_6/T_d \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} k_1/T_A \\ k_7/T_d \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} \Delta N_E \\ \Delta \theta_N \end{bmatrix}; \\ \mathbf{F}_2 &= \begin{bmatrix} \Delta \theta_{A0} \\ \Delta d_{A0} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{F}_3 = \Delta G_A. \end{aligned}$$

Представимо систему диференційних рівнянь (3.82) системою алгебраїчних рівнянь в області Лапласа.

$$\begin{cases} \Delta\theta_A(T_A p + 1) = k_0 \Delta\theta_{A0} + k_1 \Delta G_A + k_2 \Delta\theta_S + k_3 \Delta N_E; \end{cases} \quad (3.84)$$

$$\begin{cases} \Delta\theta_S(T_S p + 1) = k_4 \Delta\theta_A + k_5 \Delta\theta_N; \end{cases} \quad (3.85)$$

$$\begin{cases} \Delta d_A(T_d p + 1) = k_6 \Delta d_{A0} + k_7 \Delta G_A. \end{cases} \quad (3.86)$$

Із (3.86) отримаємо розв'язок відносно змінної Δd_A .

$$\Delta d_A = \frac{1}{T_d p + 1} [k_6 \Delta d_{A0} + k_7 \Delta G_A]. \quad (3.87)$$

З (3.84) знаходимо $\Delta\theta_A$, враховуючи (3.85). Після групування маємо:

$$\Delta\theta_A = \frac{1}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} [(b_1 p + b_0) \Delta\theta_{A0} + (b_3 p + b_2) \Delta G_A + (b_5 p + b_4) \Delta N_E + b_6 \Delta\theta_N], \quad (3.88)$$

$$\text{тут } a_1 = \frac{T_A + T_S}{1 - k_2 k_4}; \quad a_2 = \frac{T_A T_S}{1 - k_2 k_4}; \quad b_0 = \frac{k_0}{1 - k_2 k_4}; \quad b_1 = \frac{k_0 T_S}{1 - k_2 k_4}; \quad b_2 = \frac{k_1}{1 - k_2 k_4};$$

$$b_3 = \frac{k_1 T_S}{1 - k_2 k_4}; \quad b_4 = \frac{k_3}{1 - k_2 k_4}; \quad b_5 = \frac{k_3 T_S}{1 - k_2 k_4}; \quad b_6 = \frac{k_2 k_5}{1 - k_2 k_4}.$$

Залежності (3.87) та (3.88) представимо матричною моделлю у області Лапласа:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W} \mathbf{U}, \quad (3.89)$$

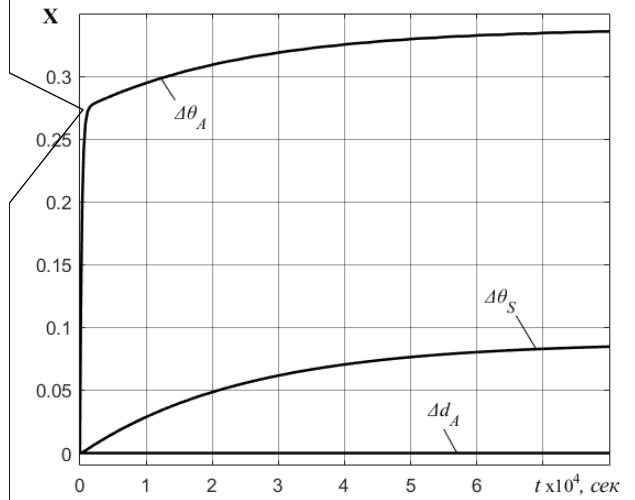
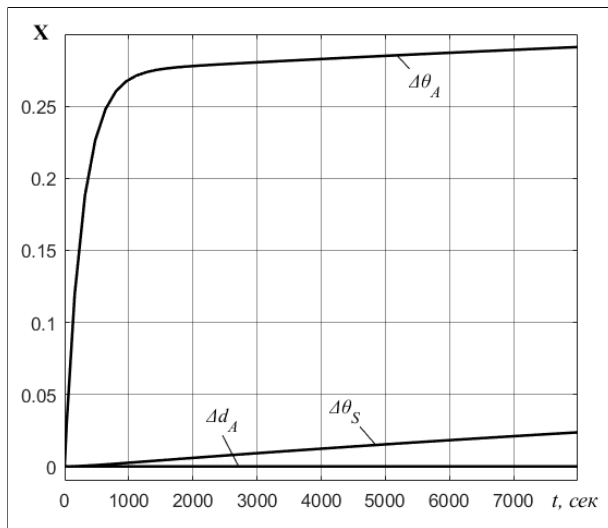
$$\text{де } \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \Delta\theta_A \\ \Delta d_A \end{bmatrix}; \quad \mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_{11} & 0 & W_{13} & W_{14} & W_{15} \\ 0 & W_{22} & W_{23} & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{U} = [\Delta\theta_{A0} \Delta d_{A0} \Delta G_A \Delta N_E \Delta\theta_N]^T;$$

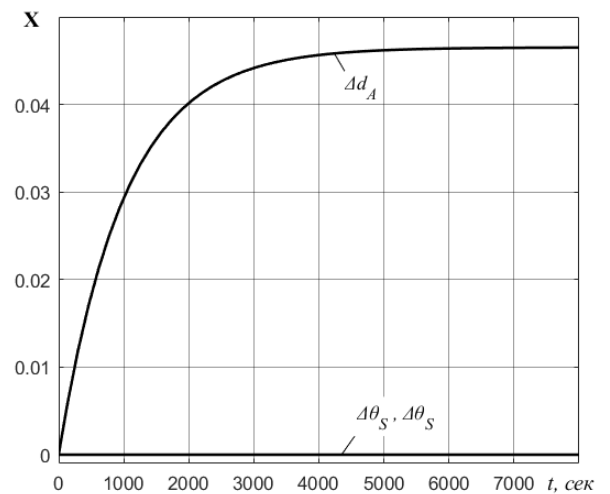
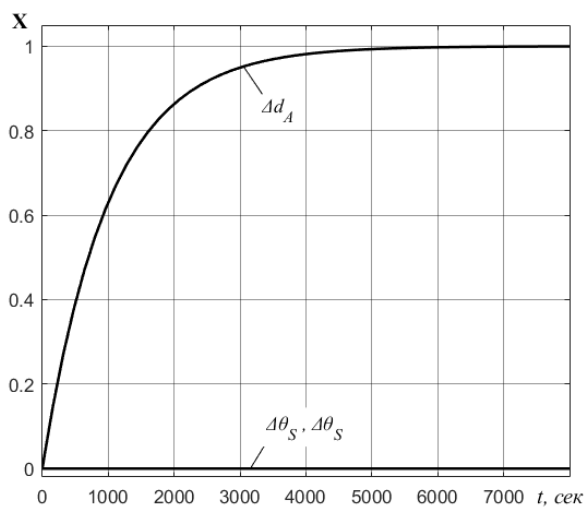
$$W_{11} = \frac{b_1 p + b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + 1}; \quad W_{13} = \frac{b_3 p + b_2}{a_2 p^2 + a_1 p + 1}; \quad W_{14} = \frac{b_5 p + b_4}{a_2 p^2 + a_1 p + 1};$$

$$W_{15} = \frac{b_6}{a_2 p^2 + a_1 p + 1}; \quad W_{22} = \frac{k_6}{T_d p + 1}; \quad W_{23} = \frac{k_7}{T_d p + 1}.$$

Проведено моделювання перехідних процесів за основними каналами впливу для промислового приміщення об'ємом $V_A = 3 \text{ м}^2 \times 120 \text{ м}^2$. У Додатку Б.6 представлено таблицю теплофізичних величин для математичної моделі приміщення, та розрахунки коефіцієнтів моделі. На рис. 3.15 зображено перехідні процеси у приміщенні за каналами впливу.

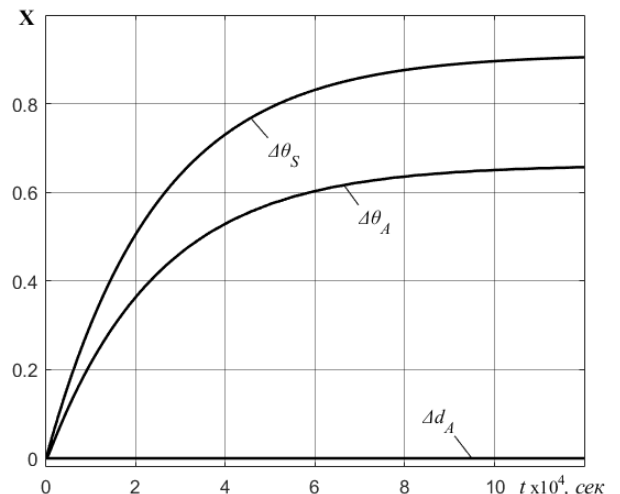
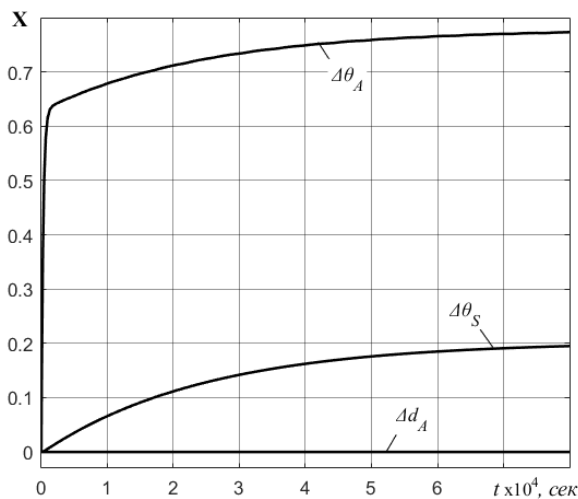


а)



б)

в)



г)

д)

Рис. 3.15. Перехідні процеси у приміщенні за каналами впливу:

а) $\Delta\theta_{A0} \rightarrow X$, $\Delta\theta_{A0} = 1^\circ\text{C}$;

б) $\Delta d_{A0} \rightarrow X$, $\Delta d_{A0} = 1 \text{ г/см}^3$;

в) $\Delta G_{A0} \rightarrow X$, $\Delta G_{A0} = 0.1 \text{ кг/сек}$;

г) $\Delta N_E \rightarrow X$, $\Delta N_E = 1000 \text{ Bm}$;

д) $\Delta\theta_N \rightarrow X$, $\Delta\theta_N = 1^\circ\text{C}$

Змодельована динамічна поведінка процесів тепло- та масообміну у приміщенні відповідає опису перехідних процесів у приміщенні, який розглянуто у п.1.4.3. Теплообмінні перехідні процеси в газовому просторі містять малоінерційну складову рис. 3.15 *a, з*, яка характеризує повітряний простір приміщення та інерційну складову, що характерно для теплообмінних процесів стін приміщення. Масообмінні перехідні процеси у приміщенні мають аперіодичний характер першого порядку, використання вологовмісту дозволило розділити взаємозв'язок між змінними температури та вологості для матеріального потоку повітря, що моделюється.

3.5 Аналіз структури математичних моделей кліматичного обладнання

Запропоновані динамічні моделі дозволяють провести кількісну оцінку перехідних процесів для того чи іншого кліматичного обладнання. У розділі не ставилося завдання ідентифікації розроблених аналітичних моделей кліматичного обладнання СКП. Завдання розділу – уніфікація та систематизація математичних моделей кліматичного обладнання кондиціонерів із їх подальшим використанням для КФС КІ. Методи ідентифікації розглядається у наступному розділі.

На рис. 3.16 наведена узагальнена структурна схема типового динамічного елементу обладнання кондиціонера. Будь-яку із динамічних моделей даного розділу можна розглядати як типовий динамічний елемент обладнання кондиціонера із п'ятьма входами $\mathbf{U}_w = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \ u_5]^T$ та двома виходами $\mathbf{Y} = [y_1 \ y_2]^T$. В залежності від призначення кліматичного обладнання наявна кількість керуючих та збурюючих входів різна. При цьому, якщо у запропонованих математичних моделях керуючий вплив на кліматичне обладнання може здійснюватися за двома керуючими змінними – на практиці використовується тільки один. Наприклад, керування водяним охолоджувачем може здійснюватися зміною витрати, або зміною температури холодоносія. На

практиці найчастіше керуючий вплив на охолоджувач здійснюють за рахунок зміни витрати холодоносія.

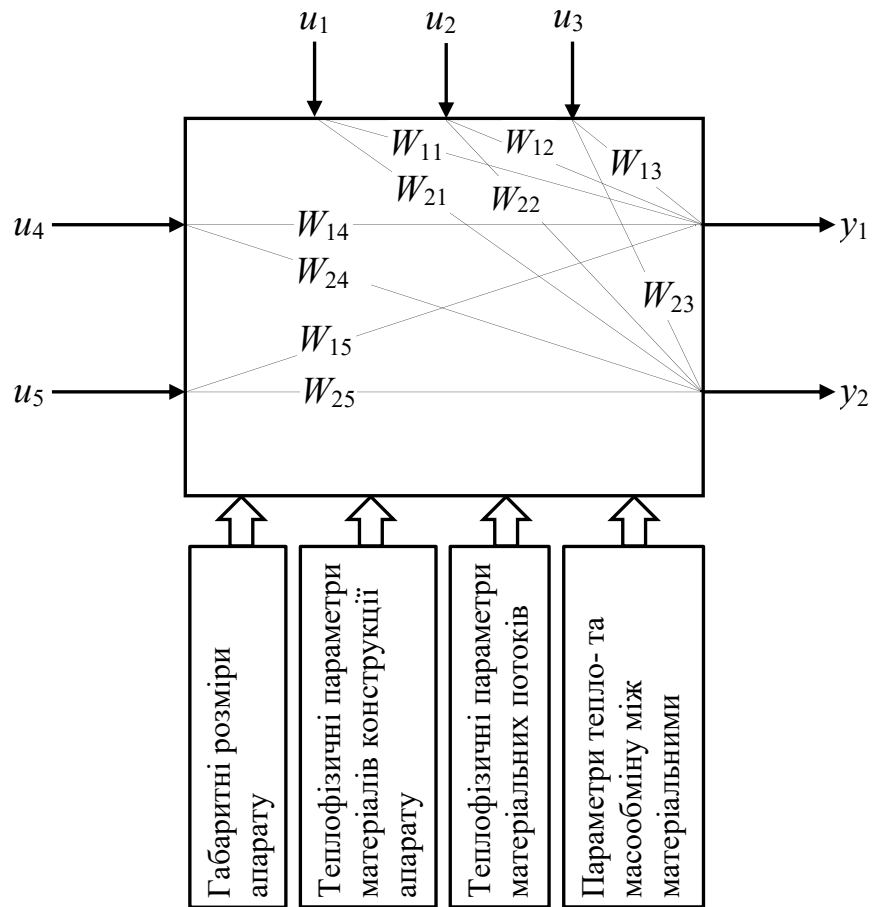


Рис. 3.16. Узагальнена параметрична схема кліматичного обладнання СКП

Для запропонованих аналітичних моделей у табл. 3.1 наведено наявні вхідні та вихідні змінні. Згідно аналізу табл. 3.1, для всіх моделей вхідними змінними u_1 та u_2 є початкова температура $\Delta\theta_{A0}$ та вологовміст Δd_{A0} повітря, що надходить на обладнання, вихідними y_1 та y_2 – кінцева температура $\Delta\theta_A$ та вологовміст Δd_A . Майже для всіх моделей (крім моделі камери змішування) збурюючим фактором v_3 є витрата повітря ΔG_A .

Таблиця 3.1. Аналітичні моделі кліматичного обладнання СКП

Кліматичне обладнання (підрозділ)	Модель обладнання		Входи, U					Виходи, Y	
	$X' = AX + BU$	$Y = WU$	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	y_1	y_2
Електричний калорифер, (п.3.1.1)	(3.9)	(3.15)	$\Delta\theta_{A0}$	Δd_{A0}	ΔG_A	ΔN_E	–	$\Delta\theta_A$	Δd_A
Водяний калорифер, (п.3.1.2)	(3.24)	(3.31)	$\Delta\theta_{A0}$	Δd_{A0}	ΔG_A	$\Delta\theta_{W0}$	ΔG_W	$\Delta\theta_A$	Δd_A
Водяний охолоджувач, (п.3.1.3)	(3.38)	(3.45)	$\Delta\theta_{A0}$	Δd_{A0}	ΔG_A	$\Delta\theta_{W0}$	ΔG_W	$\Delta\theta_A$	Δd_A
Форсуночний зволожувач, (п.3.2.1)	(3.56)	(3.62)	$\Delta\theta_{A0}$	Δd_{A0}	ΔG_A	$\Delta\theta_{W0}$	ΔG_{W0}	$\Delta\theta_A$	Δd_A
Паровий зволожувач, (п.3.2.2)	(3.69)	(3.74)	$\Delta\theta_{A0}$	Δd_{A0}	ΔG_A	ΔN_E	–	$\Delta\theta_A$	Δd_A
Камера змішування, (п.3.3)	(3.77)	(3.78)	$\Delta\theta_{A0}$	Δd_{A0}	$\Delta\theta_{A1}$	Δd_{A1}	ΔK	$\Delta\theta_A$	Δd_A
Приміщення, (п.3.4)	(3.83)	(3.89)	$\Delta\theta_{A0}$	Δd_{A0}	ΔG_A	ΔN_E	$\Delta\theta_N$	$\Delta\theta_A$	Δd_A

3.6 Висновки до третього розділу

1. У розділі запропоновано аналітичні моделі тепло- та масообміну для основного кліматичного обладнання. Моделі дозволяють проводити кількісний та якісний аналіз динамічних характеристик для наявного обладнання кондиціонера. Математичні моделі враховують вологовміст повітря у вигляді диференційного рівняння, що дозволяє проводити моделювання динамічних процесів тепло- та масообміну та вирізняє отримані моделі від існуючих.
2. Аналітичні моделі кліматичного обладнання доведено до програмної реалізації в середовищі MatLab. Для основного обладнання кондиціонера проведено імітаційне моделювання процесу обробки повітряної суміші.
3. Динамічні моделі кліматичного обладнання представлені рівноцінними залежностями:
 - у вигляді системи диференціальних рівнянь (3.8), (3.23), (3.37), (3.55), (3.68), (3.76), (3.82);
 - у просторі станів (3.9), (3.24), (3.38), (3.56), (3.69), (3.77), (3.83);
 - у вигляді матричних передатних функцій (3.15), (3.31), (3.45), (3.62), (3.74), (3.78), (3.89).

Вибір математичного представлення моделей кліматичного обладнання визначається методами, що планується використати для подальшого дослідження СКП.

4. Проведено структурний аналіз типового динамічного елементу для запропонованих моделей кліматичного обладнання.

РОЗДІЛ 4

ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛЕЙ КЛІМАТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНИХ МОДЕЛЕЙ КОНДИЦІОНЕРІВ

У четвертому розділі продовжується розглядання завдання другого етапу системного підходу, що запропоновано у роботі. Важливою властивістю процесів на виробництві є їх штучність. Для перетворення сировини на кінцеву продукцію виробничі процеси вдосконалюються протягом десятиліть. Як правило, сучасні ТП на виробництві є складними, але добре вивченими з аналітичною формалізацією математичного опису [221]. Практика використання аналітичних моделей свідчить, що адекватні моделі фізичних процесів трапляються рідко [118], оскільки такі моделі розробляються в умовах концептуальної невизначеності. Концептуальна невизначеність є комплексною, що поєднує невизначеності: цілей; функціонування процесу; структури системи, що моделюється; взаємодії елементів системи, або взаємодії з зовнішнім середовищем та інше [46]. СКП об'єднують в собі механічні, термодинамічні, електронні та інформаційні процеси для забезпечення необхідного мікроклімату об'єктів КІ, тому аналітичні моделі кліматичного обладнання ускладнюються наявністю інформаційної та методичної невизначеностей, а також іншими чинниками.

Проблема концептуальної невизначеності аналітичних моделей СКП включає: невизначеність деяких фізичних та теплових характеристик матеріальних потоків для функціонуючого обладнання кондиціонера, що впливає на: кількісні значення параметрів та вихідних змінних моделей кліматичного обладнання; спосіб агрегування моделей кліматичного обладнання у процес підготовки повітря; ситуаційну невизначеність ризиків у процесі експлуатації обладнання та інше. Така невизначеність відноситься до концептуальної [222], оскільки являє собою єдиний комплекс неоднозначності та суперечливості взаємозалежних елементів заданої сукупності політипових невизначеностей. Розглянемо способи розкриття концептуальної невизначеності для моделей кліматичного обладнання СКП.

4.1 Аналіз параметричної невизначеності аналітичних моделей кліматичного обладнання

Класифікацію параметрів аналітичних моделей кліматичного обладнання табл. 3.1 можна подати у вигляді блок-схеми, що зображена на рис. 4.1. Параметри аналітичних моделей, що отримані у третьому розділі умовно поділені на наступні групи:

- 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. 4.1. Узагальнена блок-схема параметрів, що використовуються у аналітичних моделях кліматичного обладнання

Для блоків 1 – 3 даної класифікації чисельні значення теплофізичних величин, що містяться у Додатках Б.1 – Додатках Б.6 визначено із достатньою

інженерною точністю із довідників [41, 201, 213, 218, 223 – 225]. Зауважимо, що коефіцієнти тепло- та масовіддачі (блок 4) залежні від багатьох факторів, а датчики для їх контролю відсутні.

Коефіцієнт тепловіддачі визначає інтенсивність передачі теплоти між стінкою і рухомим середовищем (газом чи рідиною) та залежить від:

- фізичних властивостей середовища (щільність, в'язкість, теплоємність, теплопровідність);
- типу теплообміну (конвекція, випромінювання, теплопровідність);
- режиму течії середовища (ламінальний або турбулентний);
- форми та розмірів поверхні (гладка чи шорстка, наявність ребер);
- градієнту температур між поверхнею та середовищем та інше;

Для оцінки коефіцієнта тепловіддачі сучасна теорія теплотехніки використовує теорію подібності із використанням критеріїв подібності (Nu , Pr , Re), які враховують вплив різних факторів [226 – 229]. Залежність для оцінки коефіцієнта тепловіддачі визначається рівнянням:

$$Nu = C Re^m Pr^n, \quad (4.1)$$

де Nu – число Нуссельта; Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля; C , m , n – коефіцієнти, які експериментально визначаються для різних режимів теплообміну.

Коефіцієнт масовіддачі визначає інтенсивність перенесення маси (наприклад, випаровування рідини або дифузії газів) і залежить від:

- дифузійних властивостей речовини (коефіцієнт дифузії);
- типу масообміну (конвекція, дифузія);
- швидкості потоку (при підвищенні турбулентності масовіддача зростає);
- геометрії поверхні (площа, наявність пористої структури) та інше.

Для оцінки коефіцієнта масовіддачі часто використовується емпірична залежність:

$$Sh = C Re^m Sc^n, \quad (4.2)$$

тут Sh – число Шервуда; Sc – число Шмідта. Залежності (4.1) та (4.2) дозволяють наближено оцінити числові значення коефіцієнтів тепло- та масовіддачі. Точне визначення цих коефіцієнтів можливе на основі експериментальних досліджень для конкретного фізичного процесу.

Таким чином, числові значення коефіцієнтів тепло- та масовіддачі для аналітичних моделей кліматичного обладнання 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 комплекс взаємозалежних величин, які мають неоднозначний та суперечливий вплив на динамічні властивості кліматичного обладнання.

4.2 Підхід до розкриття концептуальної невизначеності аналітичних моделей кліматичного обладнання

Експериментальне визначення коефіцієнтів тепло- та масообміну може здійснюватися на основі активного або пасивного експерименту [94]. Перспективним напрямком для даного дослідження є використання методу пасивної ідентифікації, оскільки в ході експерименту не потрібно витратити додаткові виробничі ресурси і такий підхід виправданий своєю економічністю. Для розроблених моделей пропонується проводити ідентифікацію параметричних невизначеностей на основі пасивного експерименту із застосуванням інструментарію цифрового двійника (ЦД).

ЦД як сучасна базова технологія КФС, використовується для розширеного системного моделювання, моніторингу та аналізу, що робить його ефективним рішенням для підвищення якості управління фізичними процесами [230, 231]. Впровадження хмарних платформ надає ЦД великі обчислювальні ресурси та значні можливості зберігання даних [232]. Однією

із фундаментальних робіт із стандартизації ЦД є еталонна модель IIRA (Industrial Internet Reference Architecture), яка запропонована промисловим консорціумом Інтернету речей (Industry IoT Consortium, або ІІС) [233]. У документі описано рекомендації щодо розробки систем, рішень та додатків з використанням Інтернету речей (IoT) в інфраструктурних рішеннях та промисловості. Виходячи з моделі IIRA, інформація ЦД включає комбінацію таких категорій (але не обмежується цим): фізична модель та дані; аналітична модель та дані; тимчасові архіви змінних; транзакційні дані; основні дані; візуальні моделі та розрахунки [234]. Основні компоненти ЦД зображено на рис. 4.2.

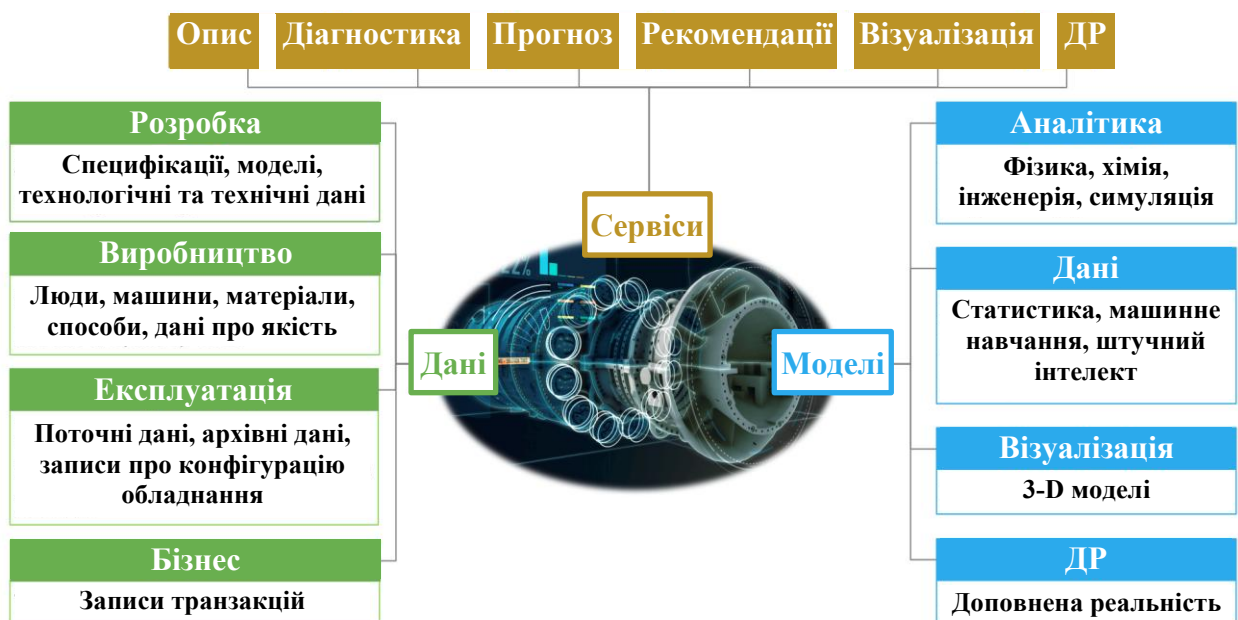


Рис. 4.2. Основні компоненти цифрового двійника

ЦД створюються для широкого застосування завдяки використанню баз даних, методів імітаційного моделювання, оптимізації та прогнозування. Він забезпечує раціональне управління фізичними процесами у режимі реального часу та підтримку прийняття стратегічних та оперативних рішень. ЦД дозволяє виявляти вузькі місця у функціонуванні систем, оптимізувати її структуру, підвищувати якість продукції, виявляти несправності обладнання та розв'язувати інші критично важливі завдання [235]. Завдяки своїм універсальним обчислювальним властивостям інструментарій ЦД ідеально

підходить для ідентифікації параметричної невизначеності аналітичних моделей кліматичного обладнання.

Для ідентифікації моделей кліматичного обладнання у просторі станів найчастіше застосовують фільтр Калмана, а для моделей із передатними функціями використовують метод найменших квадратів (МНК) та його модифікації [118]. Для нашого випадку застосуємо МНК з огляду на його універсальність.

У розділі 3 аналітичні моделі кліматичного обладнання отримано із використанням відомих законів тепломасообміну, тому їхня структура визначена і описується лінійними диференціальними рівняннями. Залучення інструментарію ЦД для пасивної ідентифікації передбачає використання історичних даних функціонування обладнання кондиціонера, які контролюються датчиками КФС. Математичний опис цього процесу складніший, оскільки необхідно враховувати концептуальну невизначеність процесу обробки повітря на кліматичному обладнанні, а також наявність зовнішніх збурень та похибок вимірювань датчиками. Враховуючи наявність невизначеності приймемо, що в загальному випадку математичний опис процесу підготовки повітря на кліматичному обладнанні доповнюється стохастичною складовою та має вигляд:

а) для простору станів

$$\mathbf{X}' = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{D}\mathbf{F}; \quad (4.3)$$

б) для опису передатними функціями

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}\mathbf{U} + \mathbf{D}\mathbf{F}; \quad (4.4)$$

де $\mathbf{D}$ – матриця визначає наявність датчиків для контролю змінних, $\mathbf{F}$ – вектор стохастичного впливу на вимірювання датчиків; для моделей (4.3) та (4.4) матриці $\mathbf{D}$, $\mathbf{F}$ мають різне наповнення, що визначається формалізацією математичного опису процесу обробки повітря на обладнанні кондиціонера.

Для моделей (4.3) або (4.4) необхідно ідентифікувати коефіцієнти тепло- та масообміну між матеріальними потоками повітря та тепло- або холодоносія. Вихідні змінні процесу $\mathbf{X}$ ($\mathbf{Y}$) та керуючий вплив $\mathbf{U}$ можна контролювати за

допомогою датчиків КФС на виробництві. Як критерій ідентифікації застосуємо середньоквадратичне відхилення, що мінімізує квадрат помилки виміряних значень змінних фізичного процесу кондиціювання повітря $\mathbf{X}$ ($\mathbf{Y}$) та оцінок вихідного вектора $\bar{\mathbf{X}}$ ($\bar{\mathbf{Y}}$) для аналітичної моделі, що ідентифікується при однаковому входному впливі $\mathbf{U}$. Для моделі (4.3) критерій якості має вигляд:

$$I = M \left\{ \int_{t_0}^{t_0+t_f} (\mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}})^T \mathbf{Q} (\mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}}) dt \right\} \rightarrow \min; \quad (4.5)$$

а для моделі (4.4)

$$I = M \left\{ \int_{t_0}^{t_0+t_f} (\mathbf{Y} - \bar{\mathbf{Y}})^T \mathbf{Q} (\mathbf{Y} - \bar{\mathbf{Y}}) dt \right\} \rightarrow \min; \quad (4.6)$$

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. Таким чином, застосовуючи МНК, узагальнену структурну схему ідентифікації для аналітичних моделей кліматичного обладнання показано на рис. 4.3.

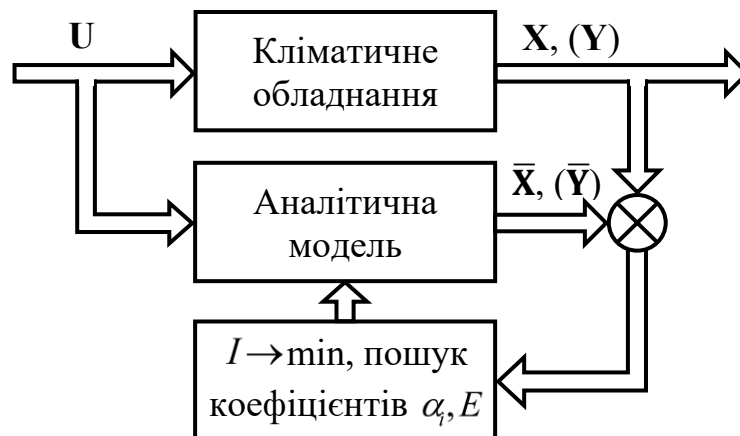


Рис. 4.3. Структурна схема для ідентифікації аналітичної моделі кліматичного обладнання

Коефіцієнти тепло- та масообміну входять до параметрів моделей (4.3) та (4.4) нелінійно (див. розділ 3), тому використання аналітичного МНК для мінімізації критеріїв (4.5) або (4.6) ускладнено. Для ідентифікації параметрів аналітичних моделей пропонується використати чисельні методи оптимізації

нульового порядку [236]. Відомо, що чисельні методи вимагають суттєвих обчислювальних ресурсів, тому алгоритм ідентифікації можна реалізувати як хмарний сервіс ЦД.

Алгоритм параметричної ідентифікації математичної моделі складається з наступних кроків:

- 1) датчики КФС в реальному часі контролюють вектор вхідного впливу U та вихідного стану X (Y) фізичного процесу, вихідні дані обробляються в КФС підприємства та формується база даних вхідних та вихідних станів для фізичного процесу;
- 2) за часовими трендами вхідного впливу U оцінюється вихідний стан $\bar{X}(\bar{Y})$ аналітичної моделі із початковими значеннями коефіцієнтів тепло- та масовіддачі;
- 3) визначається критерій ідентифікації (4.5) для моделі (4.3), або (4.6) для моделі (4.4), використовуючи змодельовані вихідні змінні $\bar{X}(\bar{Y})$ та виміряні значення змінних X (Y) для кліматичного обладнання;
- 4) використовуючи критерій (4.5) або (4.6) чисельно оптимізуються параметри коефіцієнтів тепло- та масовіддачі для моделі (4.3) або (4.4);
- 5) якщо знайдено мінімум критерію (4.3) або (4.4), то переходимо до проектування ЦД, інакше продовжуємо мінімізувати критерій ідентифікації та переходимо до кроку 2.

В процесі пошуку необхідно враховувати особливості чисельного методу для мінімізації критерію ідентифікації. Для якісної ідентифікації часові тренди t_f вхідного та вихідного станів повинні бути в декілька разів більшими за тривалість перехідного процесу кліматичного обладнання. Наближено цю величину рекомендується уточнити використовуючи аналітичні моделі третього розділу. Для усунення ефекту переповнення алгоритму чисельної мінімізації критерію ідентифікації необхідно встановити межі пошуку коефіцієнтів тепло- та масовіддачі, виходячи з фізичної реалізації математичної моделі.

4.3 Підхід до розробки цифрового двійника кліматичного обладнання

Архітектура ЦД, що розглядається у [233] є абстрактною і містить загальні визначення для різних зацікавлених сторін (Stakeholders), порядок декомпозиції системи, шаблони проектування та глосарій термінів. Архітектура ЦД за версією консорціуму ІІС зображена на рис. 4.4, вона визначає щонайменше чотири напрямки для зацікавлених сторін: бізнес; використання; функціонування; впровадження. Кожен напрямок фокусується на реалізації функціональної моделі ЦД, структурі, інтерфейсах та взаємодії між компонентами ЦД, а також на взаємодії системи моделей ЦД із зовнішніми елементами середовища для підтримки функціонування КФС.

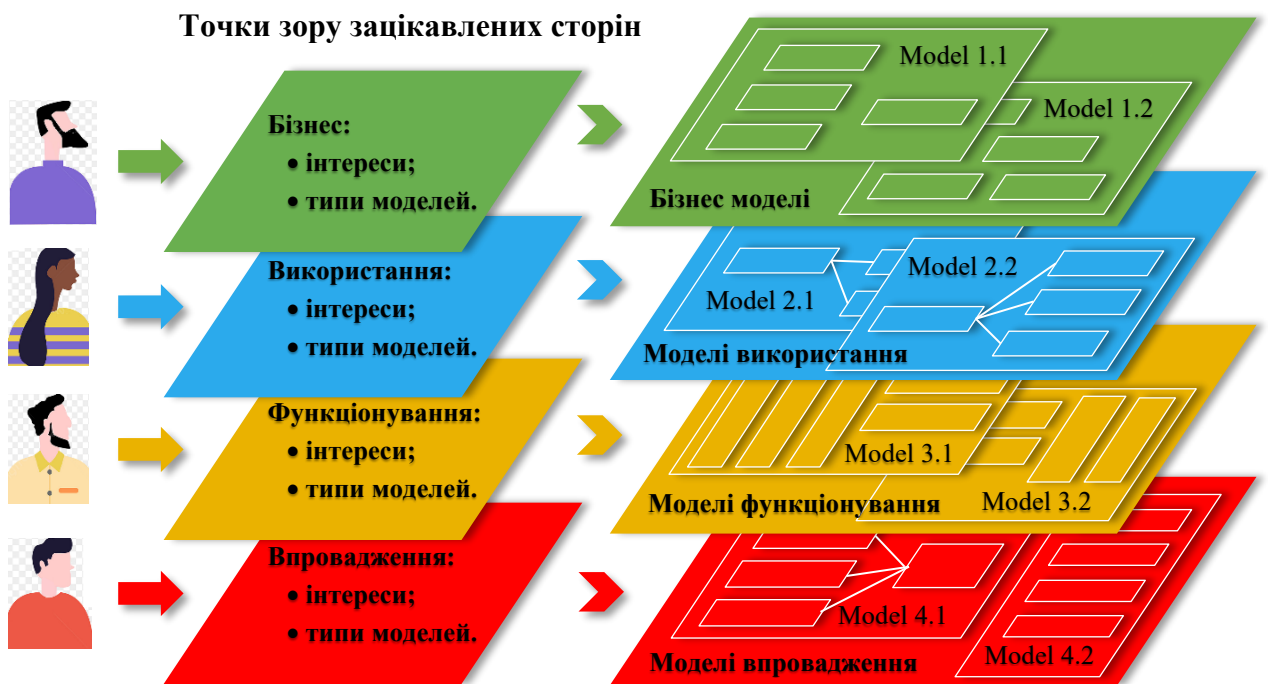


Рис. 4.4. Архітектура моделі цифрового двійника за версією ІІС

На основі тематичного аналізу у публікації [237] розглядаються характеристики ЦД, визначаються прогалини в знаннях та необхідні напрямки майбутніх досліджень. У роботі обговорено стан концепції ЦД, визначено ключову термінологію та пов'язані з нею процеси для створення 13 характеристик (фізичний об'єкт/двійник; віртуальний об'єкт/двійник; фізичне

середовище; віртуальне середовище; стан; реалізація; метрологія; двійництво; швидкість двійництва; фізико-віртуальний зв'язок/двійник; віртуальний-фізичний зв'язок/двійник; фізичні процеси; віртуальні процеси), а також розглянуто схеми ЦД та процес його функціонування.

У публікації [238] розглядається сучасний стан методології і методів, пов'язаних з розробкою ЦД, насамперед з точки зору моделювання. Також детально розглядаються поточні виклики та найкращі практики, а також рекомендації та міркування для різних зацікавлених сторін.

Термін "цифровий двійник" застосовується у найрізноманітніших значеннях. Деякі відмінності залежать від сектору використання, але визначення в межах одного сектору також можуть сильно відрізнятися. В інженерії стверджують про переваги використання ЦД для проектування, оптимізації, управління процесами, віртуального тестування, прогнозування технічного обслуговування та оцінки терміну служби. У багатьох випадках різниця між моделлю і ЦД не є чіткою.

У концепції проектування ЦД багато різноманітних напрямків і задач. Багато із цих напрямків стосуються функціонування хмарного середовища та імплементації ЦД. Відомі корпорації із світовим ім'ям створюють програмні платформи для функціонування ЦД. Ось невеликий перелік таких прикладів:

- Siemens Digital Twin – дозволяє створювати ЦД для обладнання та промислових процесів [239];
- ANSYS Twin Builder – дозволяє створювати ЦД для різних промислових систем, включаючи автомобільну, електронну та енергетичну галузі [240];
- Microsoft Azure Digital Twins – хмарне рішення, яке орієнтоване на створення ЦД для різних типів будівель і міського середовища [241];
- Predix Digital Twin – це рішення від General Electric, яке дозволяє створювати ЦД для обладнання та інфраструктури в енергетиці та транспорті [242].

Напрямків і актуальних завдань для реалізації функціонування ЦД дуже багато, оскільки у кожній прикладній області є свої особливості. У даній

роботі ставиться задача розробки математичного забезпечення ЦД для функціонування обладнання кондиціонерів різної технологічної реалізації. Із зазначених міркувань розробка ЦД функціонального рівня буде здійснюватися на основі аналітичних моделей (4.3) та (4.4). Вибір математичної моделі (4.3) або (4.4) залежить від методів управлінської стратегії, що застосовуються на виробництві. Для отримання адекватних розрахункових даних на першому етапі розробки ЦД необхідно провести ідентифікацію аналітичної моделі обладнання кондиціонера, використовуючи алгоритм пасивної ідентифікації розглянутий у п. 4.2. Також, дуже бажано зменшити обчислювальні ресурси розрахункової моделі ЦД. З теорії моделювання відомо, що обчислювальні ресурси на моделювання диференціальних рівнянь більші, ніж при використанні їх дискретних аналогів на основі різницевого рівнянь. Розглянемо дискретне представлення для неперервних моделей (4.3), (4.4) [243].

Математичну модель (4.3) можна представити в дискретному вигляді

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{X}_k + \mathbf{B}_d \mathbf{U}_k + \mathbf{D}_d \mathbf{F}_k, \quad (4.7)$$

де $\mathbf{A}_d = e^{\mathbf{A}T_{KV}}$, $\mathbf{B}_d = \int_0^{T_{KV}} e^{\mathbf{A}(T_{KV}-t)} \mathbf{B} dt$, $\mathbf{D}_d = \int_0^{T_{KV}} e^{\mathbf{A}(T_{KV}-t)} \mathbf{D} dt$, T_{KV} – період

квантування.

Для приведення моделі (4.4) до дискретного вигляду достатньо використати шлях формального переходу від неперервної моделі в області Лапласа до її дискретного аналога в z -області

$$\mathbf{Y}(z) = \mathbf{W}(z) \mathbf{U}(z) + \mathbf{D}(z) \mathbf{F}(z), \quad (4.8)$$

тут $\mathbf{W}(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{\mathbf{W}(p)}{p} \right\}$ – дискретна передавальна матриця багатовимірної

системи, в якій множник $\frac{z-1}{z}$ враховує математичний опис екстраполятора

нульового порядку з періодом квантування T_{KV} ; або використовувати білінійну

заміну, наприклад, $p \approx \frac{2}{T_{KV}} \left(\frac{z-1}{z+1} \right)$, що відповідає чисельній апроксимації

неперервної моделі методом трапецій. В даному випадку це не має

принципового значення, оскільки ці підходи вивчені і реалізовані у вигляді функцій MatLAB [98, 199, 200].

Таким чином, методика розробки математичного забезпечення, що забезпечує функціональний рівень ЦД для кліматичного обладнання кондиціонера складається із кроків:

- 1) ідентифікація невизначених параметрів для математичної моделі (4.3) або (4.4) за алгоритмом розглянутим у п. 4.2;
- 2) перехід від неперервної моделі (4.3) або (4.4) до дискретного аналогу (4.7) або (4.8) відповідно, яка є ЦД функціонування кліматичного обладнання;
- 3) якщо під час роботи точність ЦД погіршилася (через нестационарність процесу), то переходимо до кроку 1 для уточнення параметрів моделі.

Узагальнена структурна схема підходу до побудови моделі ЦД на основі аналітичної моделі зображена на рис. 4.5, [244]. Спочатку необхідно провести аналіз літератури в прикладній галузі дослідження фізичного процесу. Це допоможе визначити структуру моделі, існуючі переваги та недоліки.

Практика використання аналітичних моделей показує, що готові до використання моделі зустрічаються вкрай рідко. Навіть апробовані моделі потребують коригування параметрів з метою їх адаптації до конкретних умов використання. Таким чином, коли розробляється модель ЦД функціонального рівня, досліднику необхідно визначити "фізичні межі цього процесу" у вигляді числових значень параметрів математичної моделі. Для цього необхідно провести пасивну ідентифікацію параметрів математичної моделі. Дуже важливу роль на цьому етапі відіграє якість даних для ідентифікації моделі, тому при формуванні бази даних слід керуватися відомими вимогами інформативності, синхронності та коректності [118].

Наступним кроком є дискретизація ідентифікованої моделі. Тут необхідно правильно встановити час дискретизації аналітичної моделі. З одного боку, час дискретизації не повинен бути малим, щоб забезпечити розповсюдження інформації по мережі КФС. З іншого боку, великий час

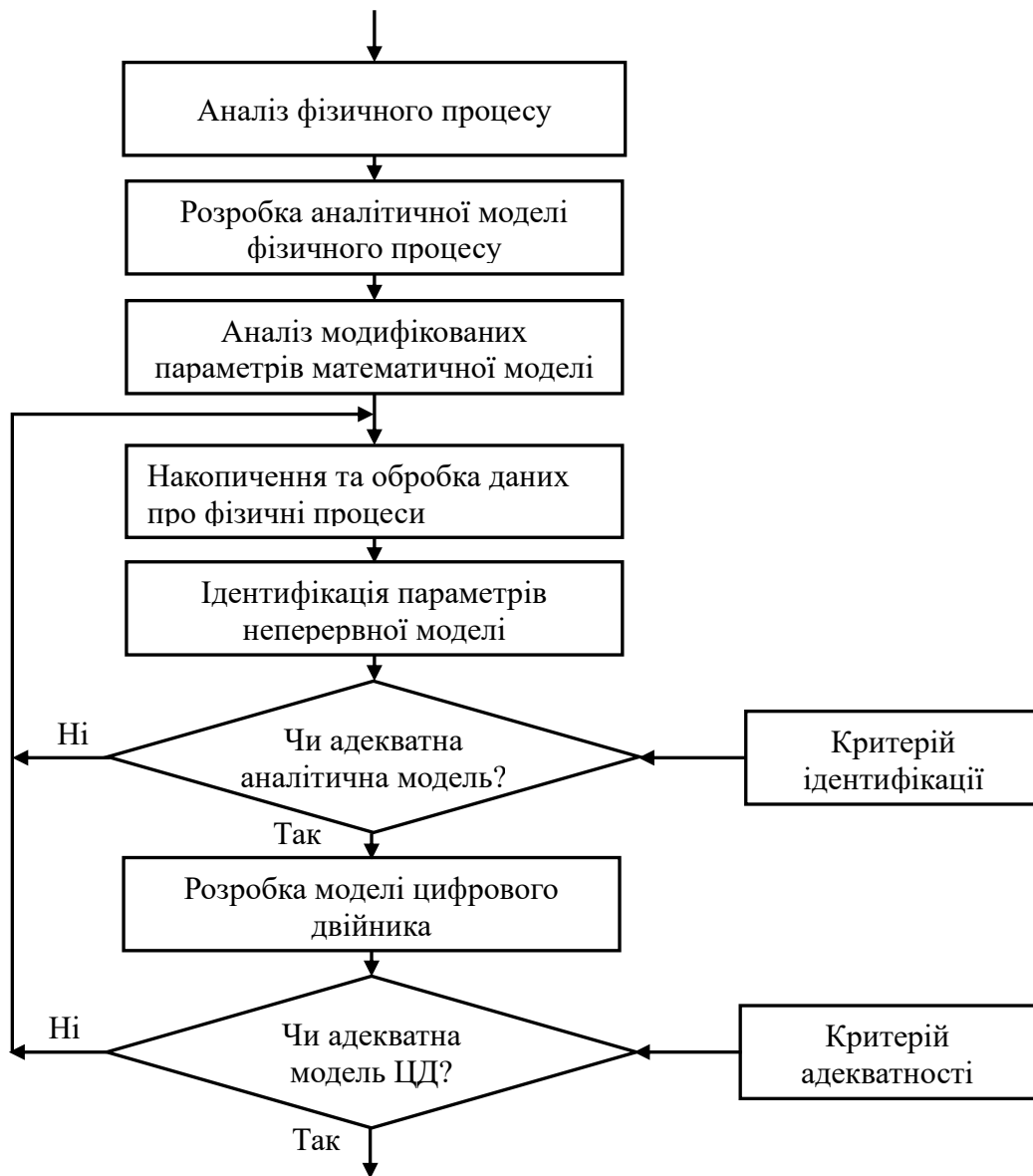


Рис. 4.5. Структурна схема процедури розробки ЦД

дискретизації призведе до втрати проміжної інформації для короткострокових прогнозів. Отримана чисельна модель, навіть достатньо високого ступеня адекватності, ще не гарантує високої якості прогнозних оцінок, якщо не враховані базові невизначеності фізичного процесу. Тому після побудови моделі ЦД необхідно перевірити можливість її використання для розв'язання поставлених задач функціонування.

4.3.1 Приклад розробки цифрового двійника для процесу нагрівання повітря електрокалорифером

Розглянемо процес нагрівання повітря на електрокалорифері, який в просторі станів описується залежністю (3.9), або матричним рівнянням (3.15) в області Лапласа. Параметричний аналіз моделі електрокалорифера дозволяє визначити шість змінних параметрів α_0 , G_A , θ_{A0} , θ_A , d_{A0} , d_A , від яких залежать всі коефіцієнти моделей (3.9), (3.15) [244 – 247]. Ці параметри пов'язані в єдиний комплекс взаємопов'язаних параметрів моделі електрокалорифера. Наприклад, збільшення витрати повітря G_A призводить до збільшення коефіцієнта тепловіддачі α_0 , точно такого ж ефекту можна досягти збільшенням вологості повітря d_{A0} . Одне і те ж числове значення α_0 має нескінченну кількість комбінацій розглянутих параметрів. Чисельне значення α_0 залежить від: температури нагрівального елементу θ_E ; температури θ_A , вологості d_A та витрати повітря G_A ; конструктивних особливостей поверхні теплообміну та інших факторів [227, 229]. Змінні G_A , θ_{A0} , θ_A , d_{A0} , d_A можна виміряти за допомогою датчиків КФС, але не існує датчика для вимірювання величини коефіцієнта тепловіддачі α_0 . Таким чином, для моделей (3.9), (3.15) необхідно розкрити невизначеність коефіцієнта тепловіддачі α_0 , що значно спрощує задачу пошуку. Масообміні процеси у електрокалорифері відсутні, оскільки нема джерел вологовиділення, а конденсація вологи неможлива внаслідок нагрівання повітря.

Приклад розробки ЦД у просторі станів. Запропонований у п. 4.2 алгоритм чисельної ідентифікації було досліджено за допомогою MatLAB. Еталонна модель з числовими значеннями матриць **A** і **B** із Додатку Б.1 використовувалася для формування часових трендів функціонуючого електронагрівача $X(t)$. Для імітації технологічних збурень до еталонних вихідних змінних вектора $X(t)$ підмішувався випадковий сигнал з амплітудою ± 0.2 , що імітує стохастичну похибку вимірювання датчиком температури.

Для ідентифікованої моделі (4.3) прийнято, що за рахунок зменшення витрати нагрітого повітря з $G_A = 0.43 \text{ кг/с}$ до $\bar{G}_A = 0.15 \text{ кг/с}$ (новий номінальний режим роботи повітрянагрівача за інших рівних умов) коефіцієнт тепловіддачі змінився з $\alpha_0 = 161 \text{ Вт/(м}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$ до $\bar{\alpha}_0 = 110 \text{ Вт/(м}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$. В ідентифікованій моделі початкові значення параметрів $\bar{\alpha}_0$, $\bar{G}_A$ суттєво відрізнялися від еталонних значень α_0 , G_A , при цьому суттєво змінилися числові значення матриць $\bar{\mathbf{A}}$ і $\bar{\mathbf{B}}$, це дослідження детально розглянуто у [244, 245]. Для чисельної ідентифікації $\bar{\alpha}_0$ та $\bar{G}_A$ використовувалася функція MatLAB `fminsearch(...)`, в якій застосовано симплексний метод оптимізації Нелдера-Міда. Основні результати чисельного дослідження представлено на рис. 4.6 та рис. 4.7.

На рис. 4.6 показано випадок, коли початкові умови еталонної моделі $\mathbf{X}(0) = [2 \ 1 \ 15]^T$ та ідентифікованої моделі $\bar{\mathbf{X}}(0) = [0 \ 0 \ 0]^T$ суттєво відрізняються. Також суттєво відрізняються параметри ідентифікації: $\alpha_0 = 161$, $G_A = 0.43$; $\bar{\alpha}_0 = 110$, $\bar{G}_A = 0.15$. При ступінчастому впливі вхідного вектора $\mathbf{U}(t) = [1 \ 1 \ -0.2 \ 1]^T$ отримані перехідні процеси, які зображено на рис. 4.4, а. Різниця між вихідними значеннями еталонної $\mathbf{X}(t)$ та ідентифікованої моделі $\bar{\mathbf{X}}(t)$ є досить суттєвою. На рис. 4.6, б показано поверхню ізоліній критерію (4.5) та траєкторію його мінімізації. Видно, що функціонал має один екстремум в області фізичної реалістичності моделі, тому в якості методу оптимізації може бути використаний будь-який метод чисельної оптимізації. За запропонованим алгоритмом ідентифікації визначено $\bar{\alpha}_0 = 160.54$, $\bar{G}_A = 0.41$. Знайдені значення параметрів є досить близькими до еталонних $\alpha_0 = 161$, $G_A = 0.43$, відносна похибка ідентифікації $< 5 \%$. На рис. 4.6 (в) наведено часові характеристики змінних стану еталонної $\mathbf{X}(t)$ та ідентифікованої $\bar{\mathbf{X}}(t)$ моделі після ідентифікації при вхідному впливі $\mathbf{U}(t) = [1 \ 1 \ -0.2 \ 1]^T$ на обидві моделі.

За результатами моделювання можна зробити висновок, що запропонований алгоритм пасивної ідентифікації електронагрівача має хорошу збіжність у випадку різних початкових умов та наявності випадкових збурень.

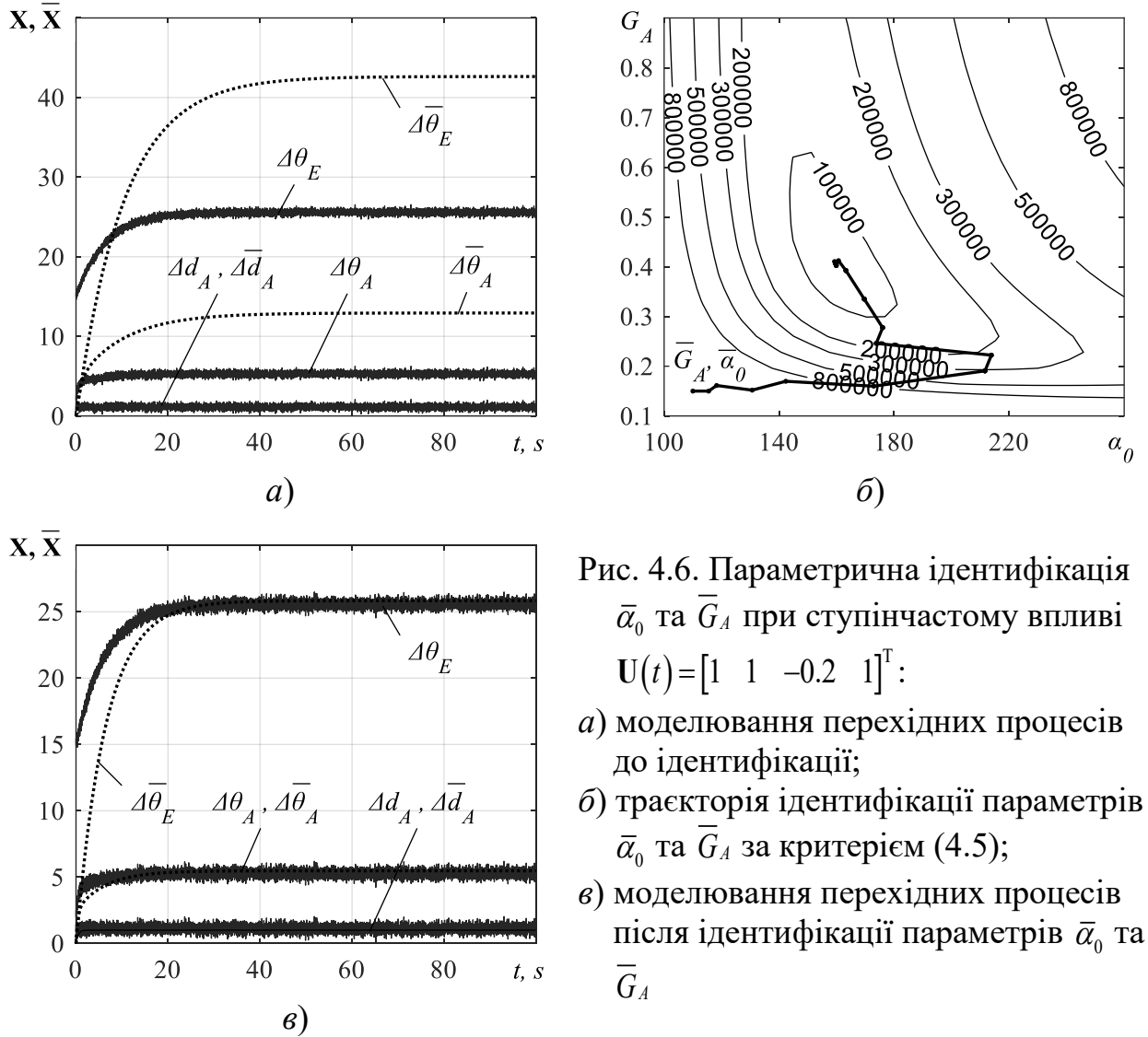


Рис. 4.6. Параметрична ідентифікація $\bar{\alpha}_0$ та $\bar{G}_A$ при ступінчастому впливі $U(t) = [1 \ 1 \ -0.2 \ 1]^T$:
 а) моделювання перехідних процесів до ідентифікації;
 б) траєкторія ідентифікації параметрів $\bar{\alpha}_0$ та $\bar{G}_A$ за критерієм (4.5);
 в) моделювання перехідних процесів після ідентифікації параметрів $\bar{\alpha}_0$ та $\bar{G}_A$

На рис. 4.7, а показано випадок, коли еталонна модель перебуває у стаціонарному стані $X(0) = [2.3 \ 0 \ 22.5]^T$ за наявності випадкових збурень. Цей стан забезпечується вхідним вектором впливу $U(t) = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$. Початкові умови моделі, що ідентифікується, дорівнюють нулю $\bar{X}(0) = [0 \ 0 \ 0]^T$. Згідно умови моделювання, параметри ідентифікованої моделі $\bar{\alpha}_0 = 250$, $\bar{G}_A = 0.8$ суттєво відрізняються від еталонної моделі $\alpha_0 = 161$,

$G_A=0.43$. На рис. 4.7, б показано ізолінії поверхні критерію (4.5) та траєкторію

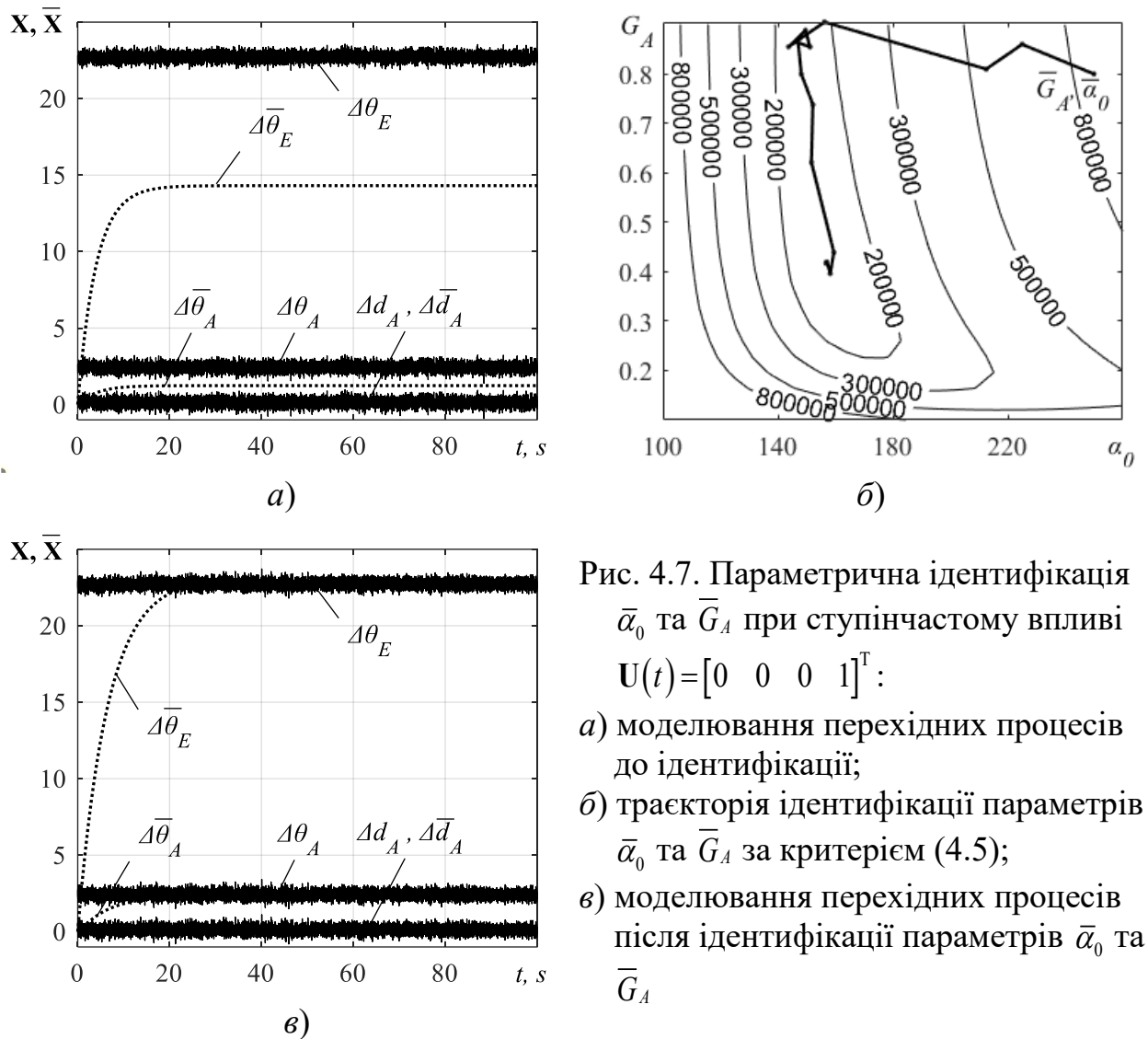


Рис. 4.7. Параметрична ідентифікація $\bar{\alpha}_0$ та $\bar{G}_A$ при ступінчастому впливі $U(t)=[0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$:
 а) моделювання перехідних процесів до ідентифікації;
 б) траєкторія ідентифікації параметрів $\bar{\alpha}_0$ та $\bar{G}_A$ за критерієм (4.5);
 в) моделювання перехідних процесів після ідентифікації параметрів $\bar{\alpha}_0$ та $\bar{G}_A$

його мінімізації. В процесі чисельної ідентифікації отримано значення параметрів $\bar{\alpha}_0=157.28$, $\bar{G}_A=0.42$. Як і в першому дослідженні, знайдені значення параметрів є досить близькими до еталонних, відносна похибка ідентифікації $< 3 \%$. На рис. 4.7, в зображено часові характеристики змінних стану еталонної $X(t)$ та ідентифікованої $\bar{X}(t)$ моделей після ідентифікації при входному впливі $U(t)=[0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$. За результатами моделювання можна зробити висновок, що запропонований алгоритм пасивної ідентифікації має хорошу збіжність у випадку стаціонарності об'єкта та наявності випадкових збурень.

Далі, розглянемо приклад розробки ЦД електрокалорифера НЕ 36/2 за методикою п. 4.3 при умові змінного вхідного впливу $U(t)$. Результати моделювання наведено на рис. 4.8.

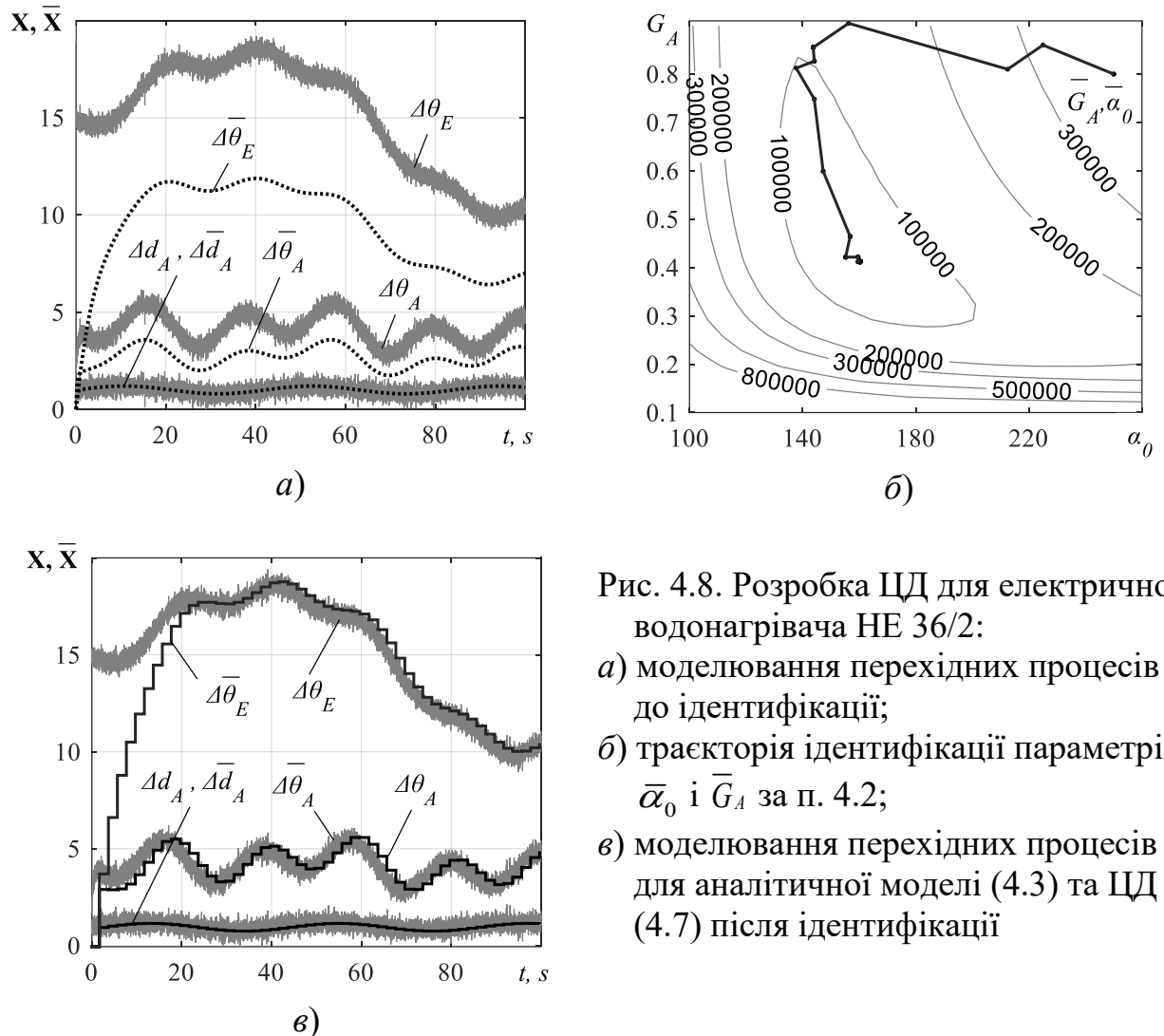


Рис. 4.8. Розробка ЦД для електричного водонагрівача НЕ 36/2:

- а) моделювання перехідних процесів до ідентифікації;
- б) траєкторія ідентифікації параметрів $\bar{\alpha}_0$ і $\bar{G}_A$ за п. 4.2;
- в) моделювання перехідних процесів для аналітичної моделі (4.3) та ЦД (4.7) після ідентифікації

На рис. 4.8, а зображено процес ідентифікації для аналітичної моделі електричного водонагрівача НЕ 36/2 із вхідним впливом $U(t) = [1 + 0.5 \sin(0.15t) \quad 1 + 0.2 \sin(0.15t) \quad -0.2 + 0.1 \sin(0.3t) \quad 0.5 + 0.2 \sin(0.05t)]^T$ і початковими умовами для фізичної моделі $X(0) = [2 \quad 1 \quad 15]^T$, $\alpha_0 = 161$, $G_A = 0.43$, та ідентифікованої моделі $\bar{X}_k(0) = [0 \quad 0 \quad 0]^T$, $\bar{\alpha}_0 = 250$, $\bar{G}_A = 0.8$.

На рис. 4.8, б показано поверхневі ізолінії критерію (4.5) та траєкторію мінімізації його параметрів $\bar{\alpha}_0$, $\bar{G}_A$, в результаті чого знайдено $\bar{\alpha}_0 = 160.3$, $\bar{G}_A = 0.41$.

Після ідентифікації моделі (4.3) за допомогою функції MatLAB c2d(...) розраховано числові значення матриць ЦД моделі (4.7) для періоду дискретизації $T_{KV} = 2$:

$$\bar{\mathbf{A}}_d = \begin{bmatrix} 0.0133 & 0 & 0.0829 \\ 0 & 0.0125 & 0 \\ 0.0552 & 0 & 0.7238 \end{bmatrix}; \bar{\mathbf{B}}_d = \begin{bmatrix} 0.9037 & 0 & -9.0374 & 0.547 \\ 0 & 0.9875 & 0 & 0 \\ 0.221 & 0 & -2.2097 & 6.1755 \end{bmatrix}.$$

На рис. 4.8, в показано часові характеристики змінних стану для еталонної моделі $\mathbf{X}$ та ЦД $\bar{\mathbf{X}}_k$ електронагрівача.

Приклад розробки ЦД для моделі в області Лапласа. Нижче наведено приклад ідентифікації параметрів для математичної моделі в області Лапласа. Для формування часових трендів $\mathbf{Y}(t)$ функціонуючого електронагрівача НЕ 36/2 використана еталонна модель (4.4) із передаточною матрицею

$$\mathbf{W}(p) = \begin{bmatrix} \frac{5.6p+1}{2.4p^2+6.7p+1} & 0 & -\frac{52.1p+9.3}{2.4p^2+6.7p+1} & \frac{0.002}{2.4p^2+6.7p+1} \\ 0 & \frac{1}{0.42p+1} & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для ідентифікованої моделі початкові значення параметрів $\bar{\alpha}_0$, $\bar{G}_A$ суттєво відрізнялися від еталонних значень α_0 , G_A , при цьому використовувалися числові значення передаточної матриці

$$\bar{\mathbf{W}}(p) = \begin{bmatrix} \frac{9p+1}{8.2p^2+11.3p+1} & 0 & -\frac{180.4p+20}{8.2p^2+11.3p+1} & \frac{0.005}{8.2p^2+11.3p+1} \\ 0 & \frac{1}{0.91p+1} & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

У прикладі вхідний сигнал $\mathbf{U}(t)$ має гармонійну складову $\mathbf{U}(t) = [1 \quad 1 + 0.2\sin(0.2t) \quad -0.2 + 0.1\sin(0.3t) \quad 0.5 + 0.5\sin(0.1t)]^T$.

На рис. 4.9, а зображено випадок моделювання, коли параметри ідентифікованої моделі $\bar{\alpha}_0 = 300$, $\bar{G}_A = 0.25$ суттєво відрізняються від еталонних $\alpha_0 = 161$, $G_A = 0.43$. На рис. 4.9, б показано ізолінії поверхні критерію (4.6) та траєкторію його мінімізації. В процесі ідентифікації оптимізуються значення

параметрів $\bar{\alpha}_0 = 161.9$, $\bar{G}_A = 0.426$. Знайдені числові значення параметрів ідентифікації досить близькі до еталонних, похибка ідентифікації $< 1\%$.

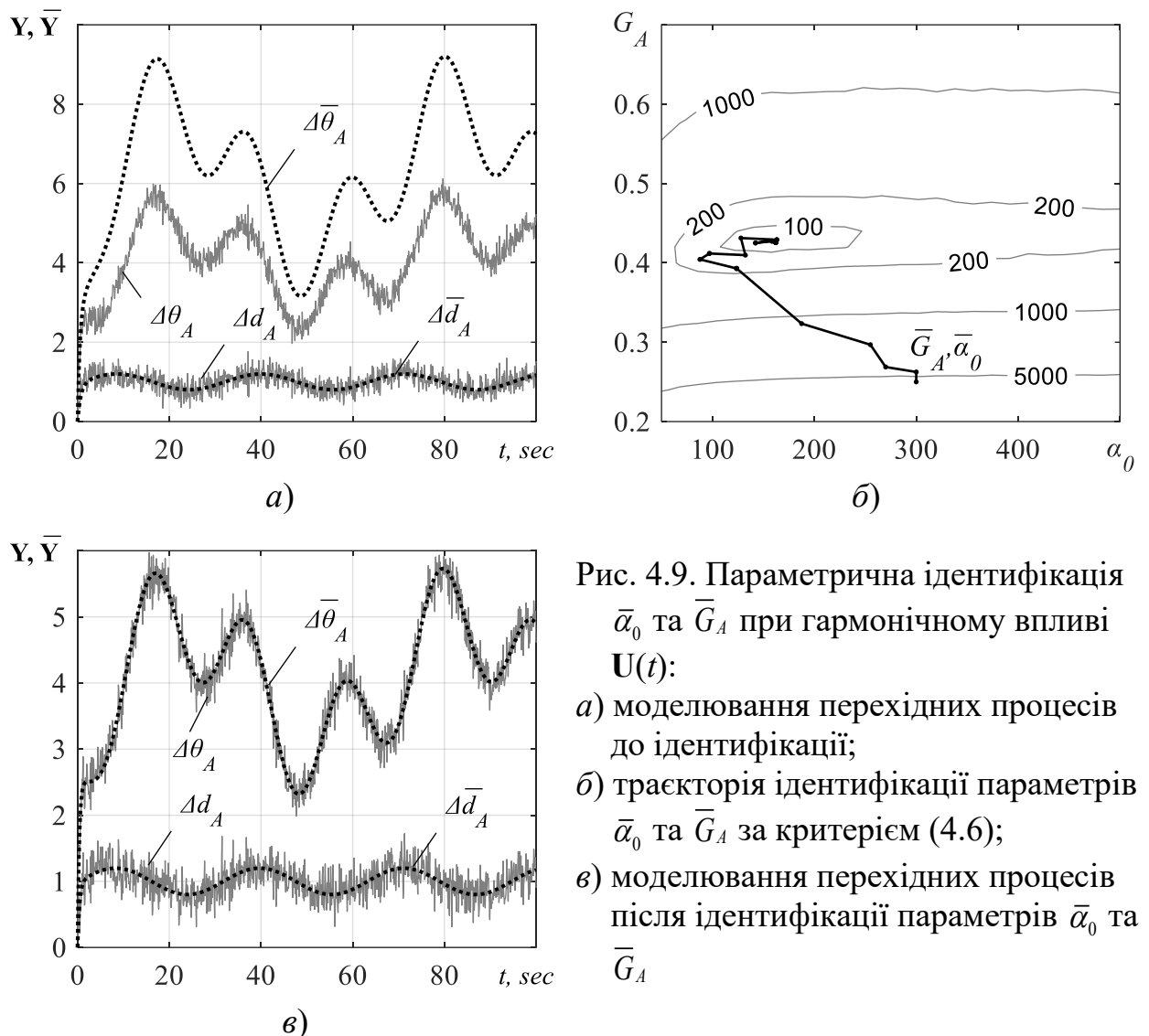


Рис. 4.9. Параметрична ідентифікація $\bar{\alpha}_0$ та $\bar{G}_A$ при гармонічному впливі $U(t)$:
 а) моделювання перехідних процесів до ідентифікації;
 б) траєкторія ідентифікації параметрів $\bar{\alpha}_0$ та $\bar{G}_A$ за критерієм (4.6);
 в) моделювання перехідних процесів після ідентифікації параметрів $\bar{\alpha}_0$ та $\bar{G}_A$

На рис. 4.9, в наведено часові характеристики змінних вектора виходу еталонної $Y(t)$ та ідентифікованої $\bar{Y}(t)$ моделей після ідентифікації при гармонійній зміні $U(t)$. За результатами моделювання можна зробити висновок, що запропонований алгоритм пасивної ідентифікації має хорошу збіжність за наявності гармонійної складової вектора $U(t)$ та випадкових збурень.

Наступний приклад демонструє розробку ЦД за допомогою аналітичної моделі (4.4). Результати моделювання показані на рис. 4.10.

На рис. 4.10, а зображено випадок із вхідним впливом $U(t) = [1 + 0.5\sin(0.15t), 1 + 0.2\sin(0.15t), -0.2 + 0.1\sin(0.3t), 0.2 + 0.8\sin(0.05t)]^T$, та початковими умовами для еталонної моделі $\alpha_0 = 161$, $G_A = 0.43$ та ідентифікованої моделі $\bar{\alpha}_0 = 120$, $\bar{G}_A = 0.22$. На рис. 4.10, б зображено ізолінії поверхні критерію (4.6) та траєкторію мінімізації параметрів $\bar{\alpha}_0$, $\bar{G}_A$, в результаті чого знайдено $\bar{\alpha}_0 = 154$, $\bar{G}_A = 0.428$. Отримано задовільну збіжність, похибка ідентифікації $< 5\%$.

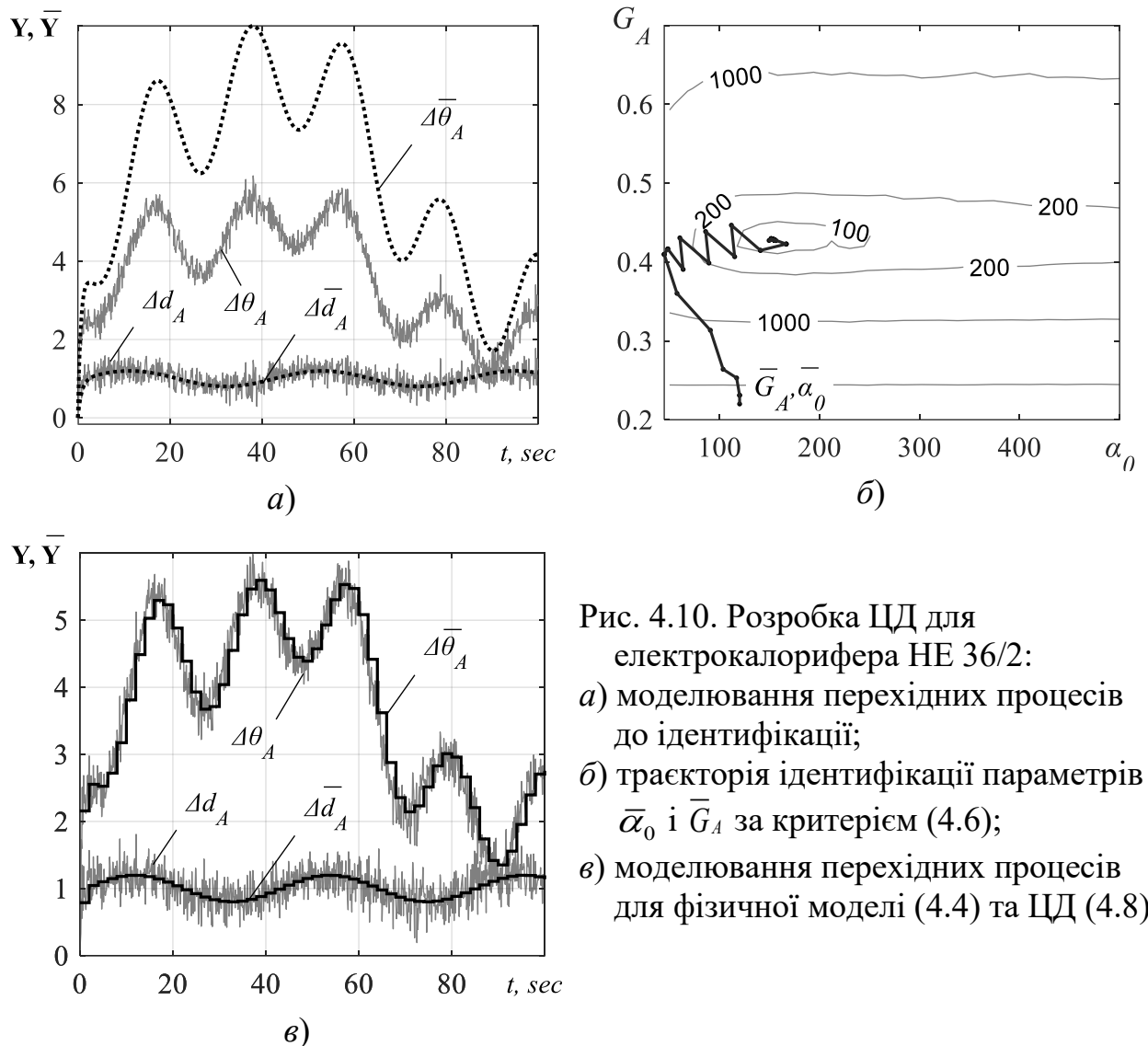


Рис. 4.10. Розробка ЦД для електрокалорифера НЕ 36/2:
а) моделювання перехідних процесів до ідентифікації;
б) траєкторія ідентифікації параметрів $\bar{\alpha}_0$ і $\bar{G}_A$ за критерієм (4.6);
в) моделювання перехідних процесів для фізичної моделі (4.4) та ЦД (4.8)

4.3.2 Приклад розробки цифрового двійника для нагрівання повітря водяним калорифером

Розглянемо приклад ідентифікації параметрів моделі для водяного калорифера, який в просторі станів описується аналітичною моделлю (3.24). Для даної моделі коефіцієнти тепловіддачі α_0 , α_1 залежить від багатьох факторів і можуть суттєво змінювати своє значення залежно від: температур матеріальних потоків θ_W , θ_A ; витрати матеріальних потоків G_W , G_A ; вологості повітря d_A ; конструктивних особливостей поверхні теплообміну та інших факторів [222]. Із зазначених міркувань коефіцієнти тепловіддачі α_0 , α_1 слід віднести до параметричної невизначеності моделі (3.24), які суттєво залежать від витрат матеріальних потоків G_W , G_A . Від коефіцієнтів тепловіддачі α_0 та α_1 залежать параметри T_W , T_M , T_A , $k_0 \dots k_7$ моделей (3.24) і (3.31), оскільки коефіцієнти тепловіддачі входять в розрахункові залежності цих параметрів. Формально для динамічної моделі (3.24) маємо вісім невизначених параметрів α_0 , α_1 , G_W , θ_{W0} , θ_W , G_A , θ_{A0} , θ_A . Прийнемо, що параметри θ_{W0} , θ_W , θ_{A0} , θ_A контролюються датчиками КФС. В такому випадку в процесі параметричної ідентифікації (3.24) необхідно визначити чотири параметри α_0 , α_1 , G_W , G_A .

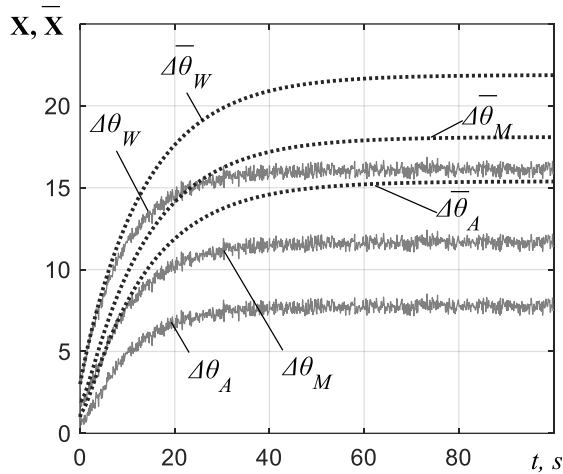
У порівнянні із попереднім прикладом ідентифікації моделі електричного калорифера п. 4.3.1, кількість невизначених параметрів ідентифікації збільшилася вдвічі, що ускладнило задачу. Якщо для електричного калорифера ідентифікувалися коефіцієнт тепловіддачі α_0 та витрата повітряного потоку G_A , то для водяного калорифера ідентифікації підлягають теплофізичні характеристики двох матеріальних потоків: водяного теплоносія (витрата води G_W та коефіцієнт тепловіддачі α_0); повітря, що нагрівається (витрата повітря G_A та коефіцієнт тепловіддачі α_1).

Для імітаційного моделювання часових трендів $U(t)$ та $X(t)$ робочого водяного калорифера (еталонна модель) використовувалася модель (3.24), де до векторів еталонних змінних підмішувався випадковий сигнал з амплітудою ± 0.2 , що відповідає імітації промислових завод у вимірювальних каналах

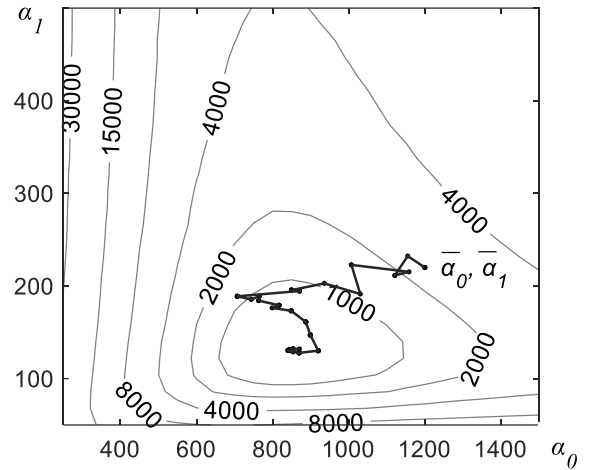
сенсорів. Для ідентифікованої моделі початкові значення невизначених параметрів $\bar{\alpha}_0, \bar{\alpha}_1, \bar{G}_W, \bar{G}_A$, суттєво відрізнялися від еталонних значень $\alpha_0, \alpha_1, G_W, G_A$. Для параметричної ідентифікації використано функцію MatLAB `fminsearch(...)`, в якій налаштовано реалізацію методу оптимізації Нелдера-Міда. Основні результати чисельної ідентифікації зображено на рис. 4.11.

На рис. 4.11 використовуються такі позначення: $\mathbf{X}$ вектор стану моделі (3.24) із еталонними значеннями параметрів $\alpha_0, \alpha_1, G_W, G_A$; вектор стану $\bar{\mathbf{X}}$ для моделі, що ідентифікується із значеннями коефіцієнтів $\bar{\alpha}_0, \bar{\alpha}_1, \bar{G}_W, \bar{G}_A$. Вектори стану $\mathbf{X}$ і $\bar{\mathbf{X}}$ включають змінні: $\Delta\theta_A$ і $\Delta\bar{\theta}_A$ – температура нагрітого повітря; $\Delta\theta_M$ і $\Delta\bar{\theta}_M$ – температура теплообмінної поверхні; $\Delta\theta_W$ і $\Delta\bar{\theta}_W$ – температура водяного теплоносія. При моделюванні використано теплофізичні характеристики водяного калорифера CVP2-HW2 (див. Додаток Б.2). Вектор керуючого впливу $\mathbf{U}$ математичної моделі містить змінні: $\Delta\theta_{A0}$ – вхідна температура повітря, ΔG_A – витрата повітря; $\Delta\theta_{W0}$ – вхідна температура теплоносія; ΔG_W – витрата водяного теплоносія.

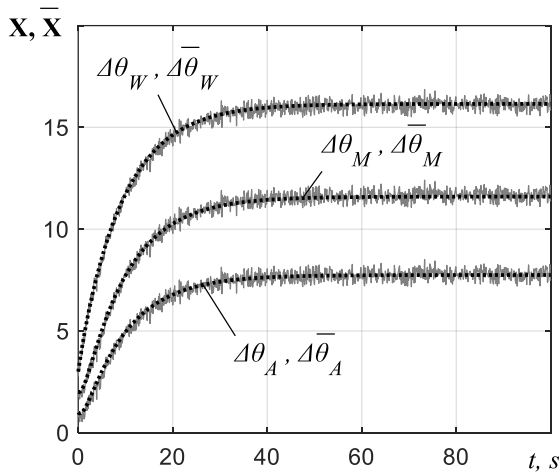
Для ідентифікації параметрів використано випадок, коли початкові умови векторів стану еталонної моделі та моделі, що ідентифікується, співпадають $\mathbf{X}(0) = \bar{\mathbf{X}}(0) = [1 \ 2 \ 3]^T$, оскільки змінні вектору стану вимірюються. Проте, у дослідженні суттєво відрізняються параметри ідентифікації $\bar{\alpha}_0 = 1200$, $\bar{G}_W = 0.1$, $\bar{\alpha}_1 = 220$, $\bar{G}_A = 0.2$ від еталонних значень $\alpha_0 = 800$, $G_W = 0.15$, $\alpha_1 = 120$, $G_A = 0.3$. При ступінчастій зміні вектора вхідного впливу $\mathbf{U}(t) = [1 \ 0.1 \ 1 \ 0.15]^T$, отримано часові характеристики для еталонної моделі $\mathbf{X}$ (графіки кривих із випадковою складовою) та ідентифікаційної моделі $\bar{\mathbf{X}}$ (графіки пунктирними кривими), що показані на рис. 4.11, а. Різниця між часовими характеристиками простору станів еталонної та ідентифікованої моделі значна.



а)



б)



в)

Рис. 4.11. Ідентифікація параметрів $\bar{\alpha}_0$ та $\bar{\alpha}_1$ при ступінчастому впливі $U(t) = [1 \ 0.1 \ 1 \ 0.15]^T$:

- а) моделювання часових характеристик до ідентифікації $\bar{\alpha}_0, \bar{\alpha}_1, \bar{G}_W, \bar{G}_A$;
- б) траєкторія оптимізації параметрів $\bar{\alpha}_0$ та $\bar{\alpha}_1$ для критерія (4.5);
- в) моделювання часових характеристик після ідентифікації $\bar{\alpha}_0, \bar{\alpha}_1, \bar{G}_W, \bar{G}_A$

На рис. 4.11, б показано ізолінії поверхні критерію (4.5) та траєкторія його мінімізації при умові, що значення параметрів $\bar{G}_W, \bar{G}_A$ уже ідентифіковано. Такий підхід застосовано, оскільки немає можливості графічно продемонструвати оптимізацію критерія (4.5) за чотирма параметрами. У роботі ідентифікувалися усі чотири невизначені параметри при різних початкових умовах. Чисельні дослідження підтвердили, що функціонал (4.5) має один екстремум в області фізичної реалістичності моделі, алгоритм чисельної ідентифікації має добру збіжність при різних початкових умовах та наявності випадкових збурень. На рис. 4.11, в наведено часові характеристики змінних стану еталонної моделі X та ідентифікованої моделі $\bar{X}$ після ідентифікації невизначених параметрів при входній дії $U(t)$ на обидві моделі.

Знайдені значення ідентифікованих параметрів є досить близькими до еталонних $\bar{\alpha}_0 = 777.7$, $\bar{G}_W = 0.15$, $\bar{\alpha}_1 = 117.7$, $\bar{G}_A = 0.31$. Отримано задовільну збіжність, похибка ідентифікації $< 3.3 \%$.

Далі, розглянемо імітаційне дослідження розробки та функціонування ЦД для водонагрівача CVP2-HW2. Моделювання виконано в MatLAB, за допомогою якого розраховано матриці аналітичної моделі (4.3) та ЦД (4.7). Результати моделювання показано на рис. 4.12.

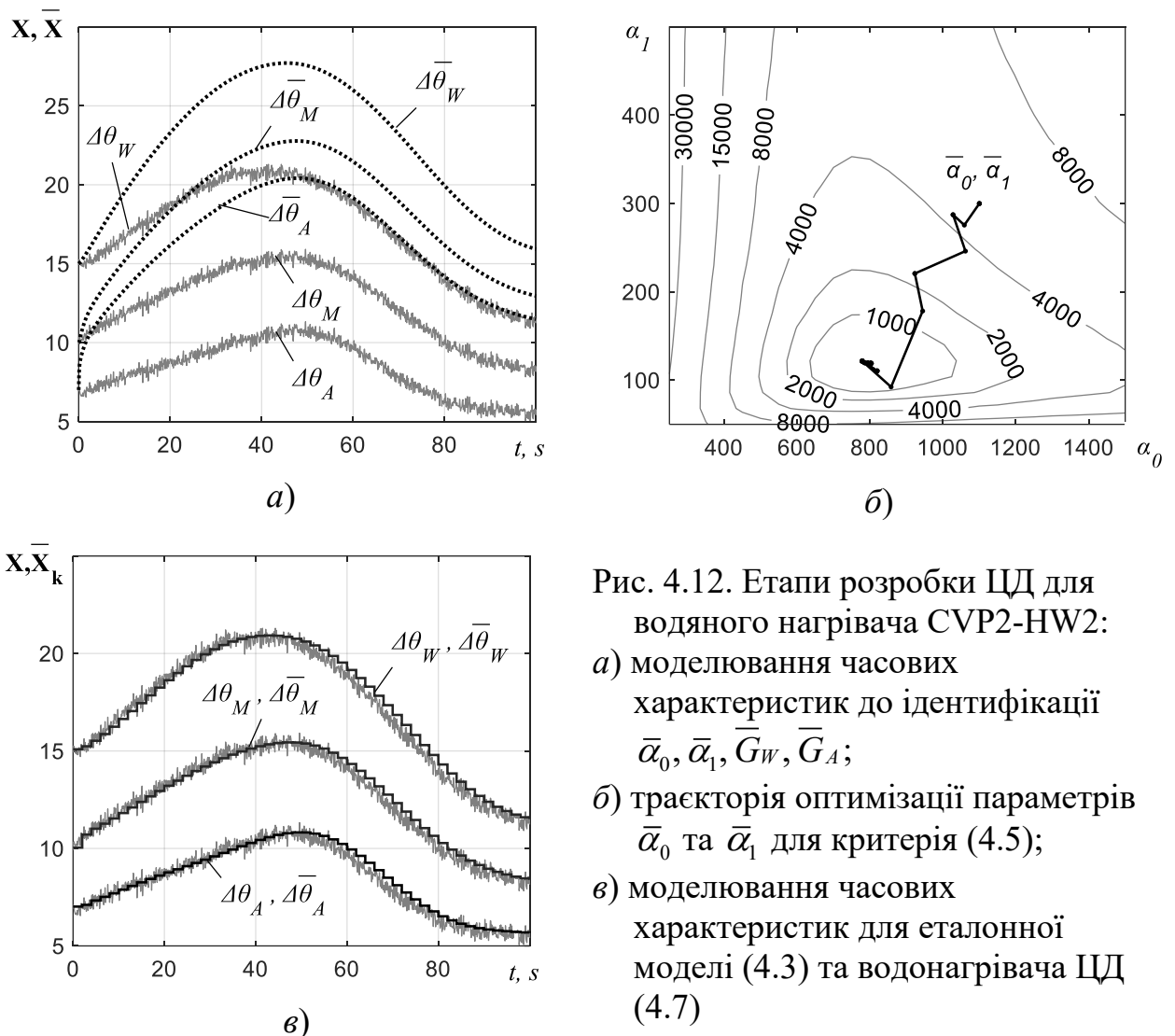


Рис. 4.12. Етапи розробки ЦД для водяного нагрівача CVP2-HW2:
а) моделювання часових характеристик до ідентифікації $\bar{\alpha}_0, \bar{\alpha}_1, \bar{G}_W, \bar{G}_A$;
б) траєкторія оптимізації параметрів $\bar{\alpha}_0$ та $\bar{\alpha}_1$ для критерія (4.5);
в) моделювання часових характеристик для еталонної моделі (4.3) та водонагрівача ЦД (4.7)

На рис. 4.12, а змодельований випадок для вхідного впливу $U(t) = \begin{bmatrix} 1 + 0.5\sin(0.15t) & 0.1 + 0.025\sin(0.1t) & 1 + 0.05\sin(0.3t) & 0.15 + 0.05\sin(0.05t) \end{bmatrix}^T$

та початкових умов для фізичної моделі $\mathbf{X}(0)=[7 \ 10 \ 15]^T$, $\alpha_0=800$, $G_W=0.15$, $\alpha_1=120$, $G_A=0.3$ та ідентифікованої моделі $\bar{\mathbf{X}}(0)=[7 \ 10 \ 15]^T$, $\bar{\alpha}_0=1100$, $\bar{G}_W=0.1$, $\bar{\alpha}_1=300$, $\bar{G}_A=0.2$. На рис. 4.12, б наведено поверхню ізоліній критерію (4.5) і траєкторію мінімізації в координатах параметрів α_0 і α_1 , в результаті чисельної ідентифікації знайдено $\bar{\alpha}_0=794.4$, $\bar{G}_W=0.152$, $\bar{\alpha}_1=118.9$, $\bar{G}_A=0.3$, похибка ідентифікації $< 1.3 \%$. Після параметричної ідентифікації моделі (4.3) були розраховані числові значення ЦД водяного калорифера (4.7) для періоду вибірки $T_{KV}=2$:

$$\bar{\mathbf{A}}_d = \begin{bmatrix} 0.0254 & 0.2215 & 0.3130 \\ 0.0323 & 0.2824 & 0.4518 \\ 0.0086 & 0.0852 & 0.7258 \end{bmatrix}; \bar{\mathbf{B}}_d = \begin{bmatrix} 0.4043 & -12.0798 & 0.0358 & 4.7011 \\ 0.1761 & -5.2620 & 0.0573 & 7.5293 \\ 0.0171 & -0.5105 & 0.1633 & 21.4392 \end{bmatrix}.$$

На рис. 4.12 в показані часові характеристики змінних стану для еталонної моделі $\mathbf{X}$ і ЦД водонагрівача $\bar{\mathbf{X}}_k$. На підставі результатів імітаційного моделювання можна зробити висновок, що підхід до розробки ЦД, може використовуватися для складних аналітичних моделей кліматичного обладнання у просторі станів.

4.4 Розробка комплексної моделі системи кондиціонування повітря у просторі станів

Представлення багатовимірних ОК в просторі станів (4.3) має ряд переваг порівняно із записом у вигляді передатних функцій (4.4). Наприклад, (4.3) дозволяє описати довільні внутрішні структури, некеровані та неспостережені параметри ОК за допомогою мінімального числа параметрів. Якщо математичний опис ОК складено із врахуванням присутності спільних змінних стану, то така модель містить мінімальне число змінних стану, а форма опису відповідає мінімальній реалізації ОК. Математичні моделі для кліматичного обладнання СКП у просторі станів розроблено із врахуванням

спільних змінних стану, що вказує наявність недиагональних елементів матриці стану $\mathbf{A}$ (4.3).

Додатковим аргументом на користь векторних моделей є велика кількість математичних пакетів для комп'ютерного аналізу технічних систем у просторі станів, які дозволяють із незначними часовими витратами проводити складні математичні дослідження.

4.4.1 Методика розробки комплексної моделі кондиціонера у просторі станів

Кількість технологічних схем СКП не обмежується розглянутими у п.1.4 (див. рис. 1.10, рис. 1.12, рис. 1.13, рис. 1.16). В деяких випадках розробнику СКП знадобиться самостійно отримати комплексну модель кондиціонера у просторі станів. Для розробки комплексної динамічної моделі кондиціонера в просторі станів необхідно дотримуватися такої послідовності дій.

1. Визначити кількісний склад кліматичного обладнання N для конкретного кондиціонера, де N – кількість одиниць обладнання.
2. Для наявного обладнання за табл. 3.1 вибрати необхідні моделі кліматичного обладнання у просторі станів.
3. Визначити збудуючі 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 із розділу 3.
4. Для комплексної моделі СКП сформувати вектор керування $\mathbf{U}$ та збурення $\mathbf{F}$ із наявних впливів $\mathbf{U}_1^i$ та $\mathbf{F}_2^i$ на кліматичне обладнання.
5. Сформувати матрицю стану $\mathbf{A}$ комплексної моделі кондиціонера, діагональними елементами якої є матриці стану $\mathbf{A}^i$ наявного кліматичного обладнання.
6. Сформувати матриці $\mathbf{C}^i$ із відповідних матриць $\mathbf{B}_2^i$, які забезпечують передачу вектору вихідних змінних стану попередньої моделі $\mathbf{X}^{i-1}$ на відповідні змінні стану поточної моделі $\mathbf{X}^i$ обладнання кондиціонера.

7. Сформувати матриці **B** та **D** із відповідних матриць $\mathbf{B}_1^i$ та $\mathbf{B}_2^i$.

При розробці комплексної моделі необхідно враховувати порядок динамічних моделей кліматичного обладнання. У наступних підпунктах розглянуто комплексні моделі для СКП, які отримали широке використання для підготовки повітря об'єктів КІ. Для спрощення інтерпретації математичних моделей у подальшому верхній індекс матриць i у просторі станів буде замінено на аббревіатуру обладнання кондиціонера.

4.4.2 Модель кондиціонера із форсуночним зволожувачем

Розглянемо технологічну схему ПСЦК рис. 2.1, в [248]. Тут застосовується наступне кліматичне обладнання: водяний калорифер першого підігріву K_1 ; водяний охолоджувач O ; сотовий зволожувач C_3 (може використовуватися форсуночний зволожувач Φ_3); водяний калорифер другого підігріву K_2 . Використавши узагальнену структурну схему кліматичного обладнання кондиціонера (див. рис. 3.16), отримано параметричну схему кондиціонера із форсуночним зволожувачем, яка зображена на рис. 4.13. Зліва схеми показано збурюючі чинники, із низу – керуючі, витрата припливного повітря ΔG_A є збурюючим впливом, проте для більшості СКП цей параметр є незмінним, тобто не впливає на роботу ПСЦК. Верхній індекс у позначенні змінних вказує на обладнання. Канали впливу для кліматичного обладнання визначаються із табл. 3.1. Пунктирними стрілками на схемі показано канали впливу, які не приймають участь у керуванні за методом “точки роси”. Промисловий кондиціонер має 6 змінних збурення: $\Delta\theta_{A0}^{K1}$, Δd_{A0}^{K1} , ΔG_W^{K1} , $\Delta\theta_{W0}^O$, $\Delta\theta_{W0}^{C3}$, ΔG_W^{K2} та 3 змінні керуючого впливу: $\Delta\theta_{W0}^{K1}$, ΔG_{W0}^O , $\Delta\theta_{W0}^{K2}$. Для параметричної схеми рис. 4.13 необхідно отримати математичну модель кондиціонера у просторі станів.

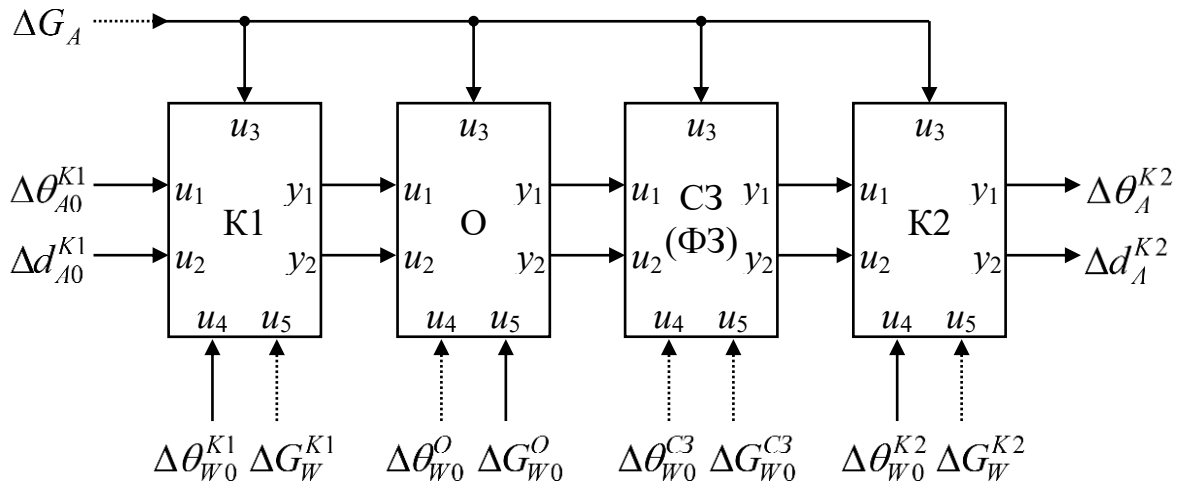


Рис. 4.13. Параметрична схема промислового кондиціонера, що реалізує керування за методом “точки роси”

При розробці математичної моделі прийнято, що форсуночний (сотовий) зволожувач участь у регулюванні не приймає, його функції виконує охолоджувач. За методикою описаною у п.4.4.1 розроблено комплексну модель промислового кондиціонера, яка відповідає параметричній схемі рис. 4.13:

$$\begin{cases} \mathbf{X}' = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{D}\mathbf{F}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X}, \end{cases} \quad (4.9)$$

$$\text{тут } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{K1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{A}^O & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_2 & \mathbf{A}^{\Phi 3} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_3 & \mathbf{A}^{K2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{K1} \\ \mathbf{X}^O \\ \mathbf{X}^{C3} \\ \mathbf{X}^{K2} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1^{K1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^O & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{K2} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1^{K1} \\ \mathbf{U}_1^O \\ \mathbf{U}_1^{K2} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_2^{K1} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \mathbf{F}_2^{K1}; \quad \mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2^O & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2^{\Phi 3} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2^{K2} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Розмірність матриць моделі (4.9): $\mathbf{A}$ – $[15 \times 15]$, $\mathbf{B}$ – $[15 \times 3]$. Якщо у СКП використовується електричний калорифер другого підігріву K2, математична

модель якого має третій порядок, загальна розмірність моделі (4.9) зменшиться на 1.

Якщо проектується прецизійна СКП, або у кондиціонері використовується рециркуляція повітря – необхідно враховувати динамічні процеси приміщення [249]. Параметрична схема такої СКП представлена на рис. 4.14. У якості параметричного елемента ПСЦК 1 використовуватися параметрична схема ПСЦК, яку розглянуто на рис. 4.13. Порівняно із рис. 4.13, дана параметрична схема додатково доповнена динамічними елементами: КЗ – камера змішування; П – приміщення.

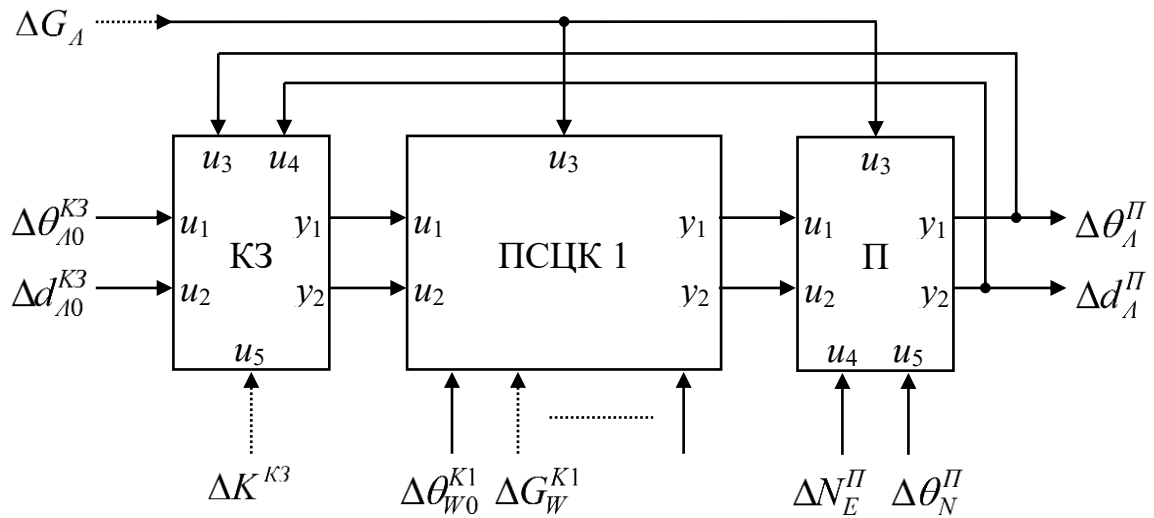


Рис. 4.14. Параметрична схема прецизійного кондиціонера, що реалізує керування за методом “точки роси”

За параметричною схемою рис. 4.14 ОК має 8 змінних збурення: $\Delta\theta_{A0}^{K1}$, Δd_{A0}^{K1} , ΔG_W^{K1} , $\Delta\theta_{W0}^O$, $\Delta\theta_{A0}^{K1}$, Δd_{A0}^{K1} , $\Delta N_E^П$, $\Delta\theta_N^П$ та 4 змінні керуючого впливу: ΔG_W^{K1} , $\Delta\theta_{W0}^O$, $\Delta\theta_{A0}^{K1}$, ΔK^{K3} . Для оптимізації енерговитрат у процесі підготовки повітря необхідно передбачити зміну коефіцієнта рециркуляції ΔK^{K3} на рівні КФС критичної інфраструктури.

За методикою п.4.4.1 отримано комплексну модель прецизійного кондиціонера, яка відповідає параметричній схемі на рис. 4.14:

$$\begin{cases} \mathbf{X}' = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{D}\mathbf{F}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X}, \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\text{де } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{K3} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_6 \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{A}^{K1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_2 & \mathbf{A}^O & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_3 & \mathbf{A}^{\Phi3} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_4 & \mathbf{A}^{K2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_5 & \mathbf{A}^\Pi \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{K3} \\ \mathbf{X}^{K1} \\ \mathbf{X}^O \\ \mathbf{X}^{C3} \\ \mathbf{X}^{K2} \\ \mathbf{X}^\Pi \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_1^{K1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^O & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{K2} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1^{K1} \\ \mathbf{U}_1^O \\ \mathbf{U}_1^{K2} \end{bmatrix}; \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_2^{K3} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \mathbf{F}_2^{K3}; \mathbf{C}_1 = \mathbf{B}_2^{K1},$$

$$\mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2^O & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2^{\Phi3} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_4 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2^{K2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_5 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2^\Pi & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_6 = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_3^{K3} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Комплексна модель прецизійного кондиціонера (4.10) містить динамічні моделі кліматичного обладнання: камери змішування КЗ другого порядку; водяних калориферів К1, К2 та охолоджувача О четвертого порядку; форсуночного зволожувача ФЗ та приміщення третього порядку. Вказані особливості комплексної моделі відображено у матрицях $\mathbf{C}_1 - \mathbf{C}_6$. Отримана математична модель прецизійного кондиціонера (4.10) має двадцятий порядок, розмірність матриць: $\mathbf{A} - [20 \times 20]$, $\mathbf{B} - [20 \times 3]$.

4.4.3 Модель кондиціонера із паровим зволожувачем

Розглянемо технологічну схему ПСЦК рис. 2.1, з [250]. Керування обладнанням кондиціонера із паровим зволожувачем проводиться використовуючи метод “оптимального режиму”. На рис. 4.15. представлена параметрична схема припливної системи кондиціонера, яку отримано із

використанням загальної структури обладнання (рис. 3.16). Верхній індекс у позначенні змінних вказує на обладнання: К1, К2 – калорифери першого та другого підігріву; О – охолоджувач; ПЗ – паровий зволожувач. Пунктирними стрілками на схемі показано канали впливу для змінних, які не приймають участі у керуванні за методом “оптимального режиму”. Виходячи із рис. 4.15 СКП має 5 змінних збурення: $\Delta\theta_{A0}^{K1}$, Δd_{A0}^{K1} , ΔG_W^{K1} , $\Delta\theta_{W0}^O$, ΔG_{W0}^{K2} та 4 змінні керуючого впливу: ΔG_W^{K1} , ΔG_{W0}^O , Δd_{A0}^{K1} , $\Delta N_E^{ПЗ}$.

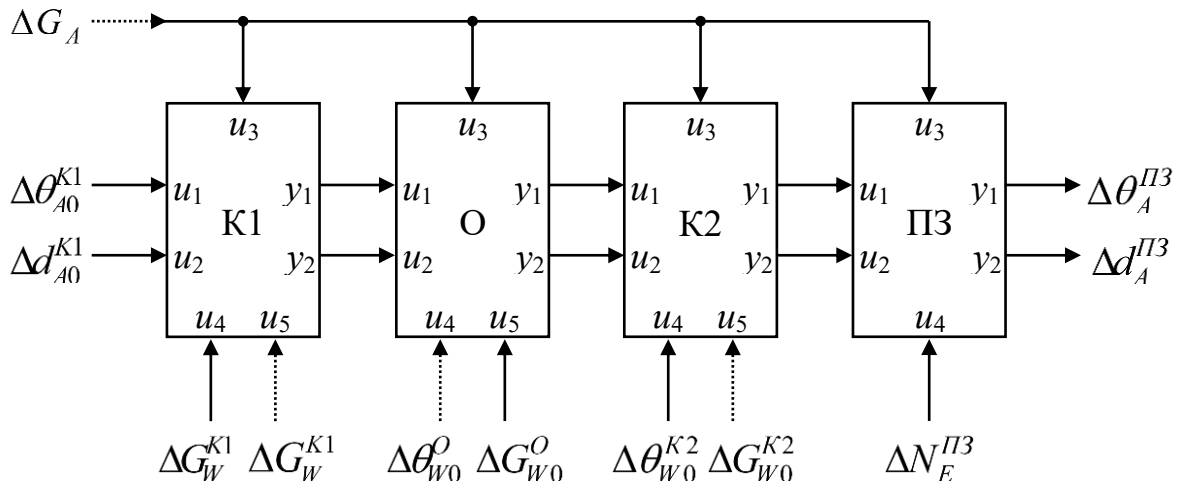


Рис. 4.15. Параметрична схема промислового кондиціонера, що реалізує керування за методом “оптимального режиму”

Використовуючи методику п.4.4.1, отримано комплексну модель промислового кондиціонера, яка відповідає параметричній схемі на рис. 4.15:

$$\begin{cases} \mathbf{X}' = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{D}\mathbf{F}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X}, \end{cases} \quad (4.11)$$

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

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

$$\mathbf{C}_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_2^{ПЗ} & 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Комплексна модель кондиціонера (4.11) містить динамічні моделі обладнання: водяних калориферів К1, К2 та охолоджувача О четвертого порядку; парового зволожувача ПЗ другого порядку, відповідно модель має чотирнадцятий порядок, розмірність матриць: $\mathbf{A}$ – $[14 \times 14]$, $\mathbf{B}$ – $[14 \times 4]$.

У випадку розробки прецизійної СКП із рециркуляцією повітря – необхідно враховувати динамічні процеси приміщення [251]. Параметрична схема такої системи мікроклімату із паровим зволожувачем представлена на рис. 4.16. Дана параметрична схема ідентична рис. 4.14, проте, для даного випадку, у якості структури ПСЦК 2 використовуватися структура ПСЦК рис. 4.15.

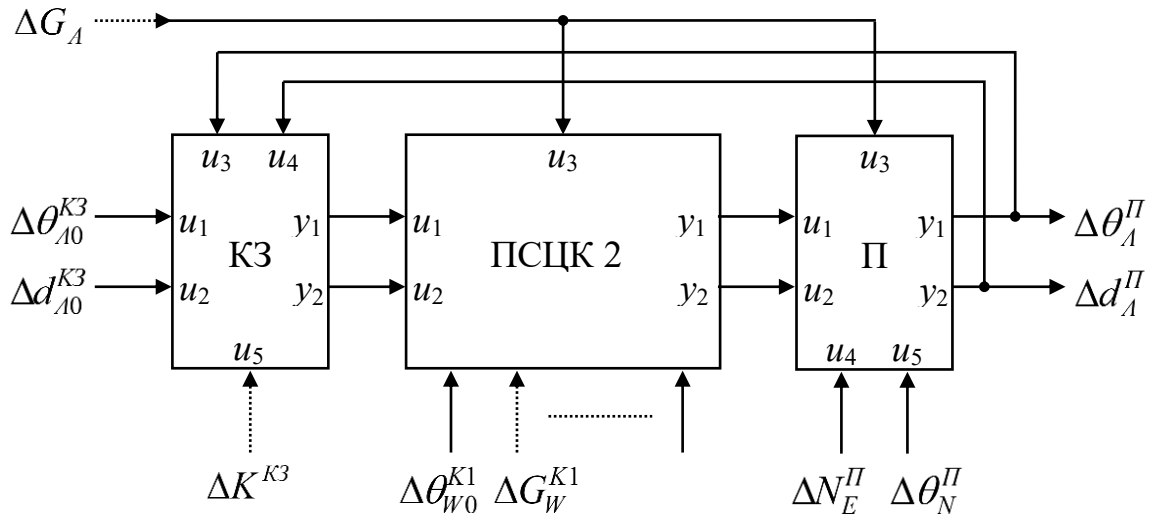


Рис. 4.16. Параметрична схема прецизійного кондиціонера, що реалізує керування за методом “оптимального режиму”

Виходячи із структури рис. 4.16 ОК має 7 змінних збурення: $\Delta\theta_{A0}^{K1}$, Δd_{A0}^{K1} , ΔG_W^{K1} , $\Delta\theta_{W0}^O$, ΔG_{W0}^{K2} , $\Delta N_E^П$, $\Delta\theta_N^П$ та 5 змінних керуючого впливу: ΔK^{K3} , $\Delta\theta_{W0}^{K1}$, ΔG_{W0}^O , $\Delta\theta_{W0}^{K2}$, $\Delta N_E^{ПЗ}$. Для оптимізації енерговитрат у процесі підготовки повітря необхідно передбачити зміну коефіцієнта рециркуляції ΔK^{K3} на рівні КФС критичної інфраструктури.

За методикою п.4.4.1 отримано комплексну модель прецизійного кондиціонера, яка відповідає параметричній схемі на рис. 4.16:

$$\begin{cases} \mathbf{X}' = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{D}\mathbf{F}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X}, \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\text{де } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{K3} & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{C}_6 \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{A}^{K1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_2 & \mathbf{A}^O & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{C}_3 & \mathbf{A}^{K2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{C}_4 & \mathbf{A}^{П3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{C}_5 & \mathbf{A}^\Pi \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{K3} \\ \mathbf{X}^{K1} \\ \mathbf{X}^O \\ \mathbf{X}^{K2} \\ \mathbf{X}^{П3} \\ \mathbf{X}^\Pi \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{B}_1^{K1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_1^O & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{B}_1^{K2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_1^{П3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1^{K1} \\ \mathbf{U}_1^O \\ \mathbf{U}_1^{K2} \\ \mathbf{U}_1^{П3} \end{bmatrix}; \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_2^{K3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \mathbf{F}_2^{K3}; \mathbf{C}_1 = \mathbf{B}_2^{K1}, \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \mathbf{B}_2^{K2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_4 = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_2^{П3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_5 = \mathbf{B}_2^\Pi, \mathbf{C}_6 = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_3^{K3} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Комплексна модель прецизійного кондиціонера (4.12) містить динамічні моделі кліматичного обладнання: камери змішування КЗ другого порядку; водяних калориферів К1, К2 та охолоджувача О четвертого порядку; парового зволожувача ФЗ другого порядку; приміщення П третього порядку. Математична модель прецизійного кондиціонера (4.12) має дев'ятнадцятий порядок, розмірність матриць: $\mathbf{A}$ – [19×19], $\mathbf{B}$ – [19×4].

4.5 Висновки до четвертого розділу

1. Виконано класифікацію параметрів аналітичних моделей кліматичного обладнання, отриманих у третьому розділі та обґрунтовано їх параметричні невизначеності. Показано, що числові значення коефіцієнтів тепло- та масовіддачі залежить від низки факторів. Параметри тепло- та масообміну відносяться до концептуальної невизначеності аналітичних моделей кліматичного обладнання, оскільки мають неоднозначний вплив на динамічні властивості кліматичного обладнання.
2. Для розкриття концептуальної невизначеності аналітичних моделей кліматичного обладнання запропоновано алгоритм пасивної ідентифікації, який реалізується інструментами ЦД. Запропоновано підхід до розробки ЦД кліматичного обладнання кондиціонера. На основі запропонованого підходу наведено приклади імітаційного моделювання ЦД електричного та водяного калорифера. Під час симуляції відносна похибка пошуку невизначених параметрів не перевищила 5%.
3. Вперше для системи кондиціонування повітря запропоновано методику розробки комплексної математичної моделі як багатовимірного ОК. Методика дозволяє розробити комплексну модель системи кондиціонування повітря у просторі станів для відомих технологічних схем кондиціонування повітря, що дозволяє застосовувати сучасну теорію керування в просторі станів та проводити синтез багатовимірних АСК для управління кондиціонерами різних модифікацій.
4. За розробленою методикою для центральних кондиціонерів, які широко використовуються у промисловості та на об'єктах КІ, отримано 4 комплексні моделі СКП у просторі станів: (4.9) – (4.12). Запропоновані динамічні моделі відрізняються від існуючих врахуванням технологічних взаємозв'язків при послідовній обробці припливного повітря на кліматичному обладнанні та використанням параметру вологовмісту для моделювання масообміну у процесі підготовки повітряної суміші.

РОЗДІЛ 5

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ШТУЧНОГО МІКРОКЛІМАТУ КІБЕРФІЗИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Управління об'єктами КІ є надзвичайно складним процесом, що обумовлено техніко-технологічними, організаційно-правовими та соціально-економічними факторами. Варто зазначити, що КІ охоплює підприємства та установи різних галузей промисловості, енергетики, транспорту, зв'язку, водопостачання, охорони здоров'я, державного управління та фінансів (див. п.1.1). Відповідно, структура управління такими об'єктами є багаторівневою. На нижньому (операційному) рівні управління здійснюється через галузеві, корпоративні або муніципальні органи, які відповідають за безпосереднє функціонування об'єктів КІ. Водночас, на верхньому рівні функціонують державні органи управління (секторальні органи), які координують політику держави у відповідній сфері (наприклад, Міненерго, Мінцифра, МОЗ, Мінінфраструктури, тощо).

Такий “секторально-ієрархічний” характер управління значно ускладнює координацію дій між різними суб'єктами КІ в умовах кризових ситуацій або загроз. Багатогалузовість КІ створює додаткові виклики для уніфікації підходів до безпеки, управління ризиками, стандартизації технічних рішень та впровадження інформаційних систем контролю. Зокрема, однакові технічні вимоги щодо мікроклімату можуть по-різному реалізовуватись у медичних закладах, дата-центрах або транспортних вузлах. Класична ієрархічна модель управління підприємством не в змозі повною мірою забезпечити ефективне вирішення багатогранних задач управління об'єктами КІ. Зазначені задачі можуть бути реалізовані в межах децентралізованих автоматизованих сервісів із використанням концепції КФС, що прийшла на зміну традиційній управлінській парадигмі. Підходи і принципи управління СКП в рамках класичної ієрархії управління розглянуто у роботах [252, 253].

Однією з найбільших проблем у розробці КФС є її внутрішня складність, неоднорідність та мультидисциплінарний характер. Розподілені КФС

інтегрують широкий спектр різнорідних аспектів, таких як аналіз та моделювання ТП, прогнозування перебігу фізичного процесу на визначений відрізок часу, управління ТП в умовах наявних невизначеностей та ризиків функціонування, машинне навчання, обробка можливих позаштатних ситуацій та інше. Компоненти КФС часто розподіляються між різними географічними локаціями, апаратними платформами та мережами зв'язку. Сьогодні КФС вимагають розробки нових математичних методів обчислень типу квазіпаралельних обчислень. Ефективність застосування КФС можна порівняти з ефективністю застосування паралельних обчислювальних систем, які ефективні для великих обсягів інформації із можливістю розпаралелювання інформаційних потоків [254].

У п'ятому розділі розглядається заключний, третій етап системного підходу до управління штучним мікрокліматом об'єктів КІ на основі запропонованого у попередніх розділах математичного забезпечення. На цьому етапі вирішується завдання інтегрування СКП у КФО КІ. У розділі розглянуто структуру інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (ІСППР), окреслено коло завдань із оперативного управління мікрокліматом об'єктів КІ за прийнятими критеріями, запропоновано методи локального керування СКП із адаптацією до особливостей процесу підготовки повітря та проведено імітаційне моделювання для оцінки функціональності запропонованих методів.

5.1 Інформаційна система управління мікрокліматом підприємства критичної інфраструктури

Одним з основних напрямків модернізації виробничих процесів КІ є розробка КФО КІ, де гармонійно узгоджується функціонування фізичних та інформаційних процесів в рамках єдиної системи. Уряди багатьох зарубіжних країн включили КФС у пріоритетний напрямок розвитку своїх національних інтересів [255]. За визначенням Національного інституту стандартів і технологій (США), КФС можуть бути описані як розумні системи, які

включають обчислювальні і фізичні компоненти, інтегровані та щільно взаємодіючі між собою, щоб відображати змінний стан реального світу. Компоненти КФС взаємодіють на різних часових та просторових рівнях та можуть мати різні, відмінні одна від одної моделі поведінки та взаємодіяти одна з одною різними шляхами, які можуть змінюватися в залежності від контексту [256]. Сьогодні КФС існують всюди в різних розмірах, з різними функціями та можливостями [257]. Такі системи часто підтримують критичні рішення, що мають суттєве економічне та суспільне значення.

КФС має розподілену архітектуру, що містить інтелектуальні вимірювально-обчислювальні вузли, які об'єднані мережевим середовищем із високопродуктивними центрами збору та обробки інформації [258]. В якості комунікаційного середовища використовуються Інтернет-мережа. Стандартні протоколи Інтернету неоптимальні для функціонування IoT-пристроїв. Фахівці відзначають [259], що найбільші складності для інтегрування IoT-пристроїв у КФС викликає:

- енергоспоживання мобільних IoT-пристроїв;
- частий обмін даними по мережі із втратою інформаційних пакетів;
- дисбаланс між величезною кількістю IoT-пристроїв, що генерують дані з великою швидкістю та хмарних серверів, які зберігають величезні обсяги даних при відносно низькій швидкості оновлення даних.

Важливим інструментарієм для функціонування КФС є цифровий ЦД, який функціонує у хмарному середовищі. Рівень хмарних платформ надає ЦД значні обчислювальні ресурси та можливості зберігання даних [232]. Технологія ЦД дозволяє трансформувати великий об'єм історичних даних у математичні залежності прогностичних моделей та забезпечує функції моніторингу, моделювання і аналізу рішень для підвищення якості управління процесами на підприємстві [260, 261]. Інструментарій ЦД для КФС забезпечує ефективну та надійну роботу технологічної системи протягом усього її життєвого циклу. ЦД використовується для прийняття стратегії управління технологічними процесами, дозволяє адекватно відображати динаміку

виробничого процесу, прогнозувати його поведінку і виявляти несправності технологічної системи в онлайн режимі, оптимізувати структуру технологічної системи та багато іншого [262].

На основі узагальненого аналізу архітектури КФС розглянемо підхід до розробки інформаційної системи підтримки прийняття рішень (ІСППР) для управління СКП КФО КІ. На рис. 5.1 зображена архітектура ІСППР, що входить до КФО КІ. Запропонована схема запроєктована та реалізована із використанням наступних принципів системного аналізу: ієрархічності, оптимальності рішень, адаптивності математичних моделей, ідентифікації та мінімізації впливу невизначеностей, що впливають на функціонування СКП; принципі функціональної ортогональності, який забезпечує раціональну реалізацію всіх основних функцій системи управління та виключення їх дублювання. Таким чином, використання принципів системного аналізу при проектуванні КФО КІ дає змогу підвищити якість результатів проміжних обчислень та якість управління загалом.

Архітектура ІСППР для управління СКП побудована за ієрархічним принципом, що передбачає наявність кількох рівнів управління, об'єднаних мережевими зв'язками. ІСППР має три рівня. На нижньому рівні реалізується класична автоматична система керування (АСК) кліматичним обладнанням СКП (для КФС це рівень граничних пристроїв). АСК виконує циклічний контроль всіх змінних СКП, включаючи мікроклімат у приміщень та здійснює локальне керування кліматичним обладнанням СКП.

На середньому рівні функціонують хмарні сервіси КФО КІ. В загальному випадку 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;

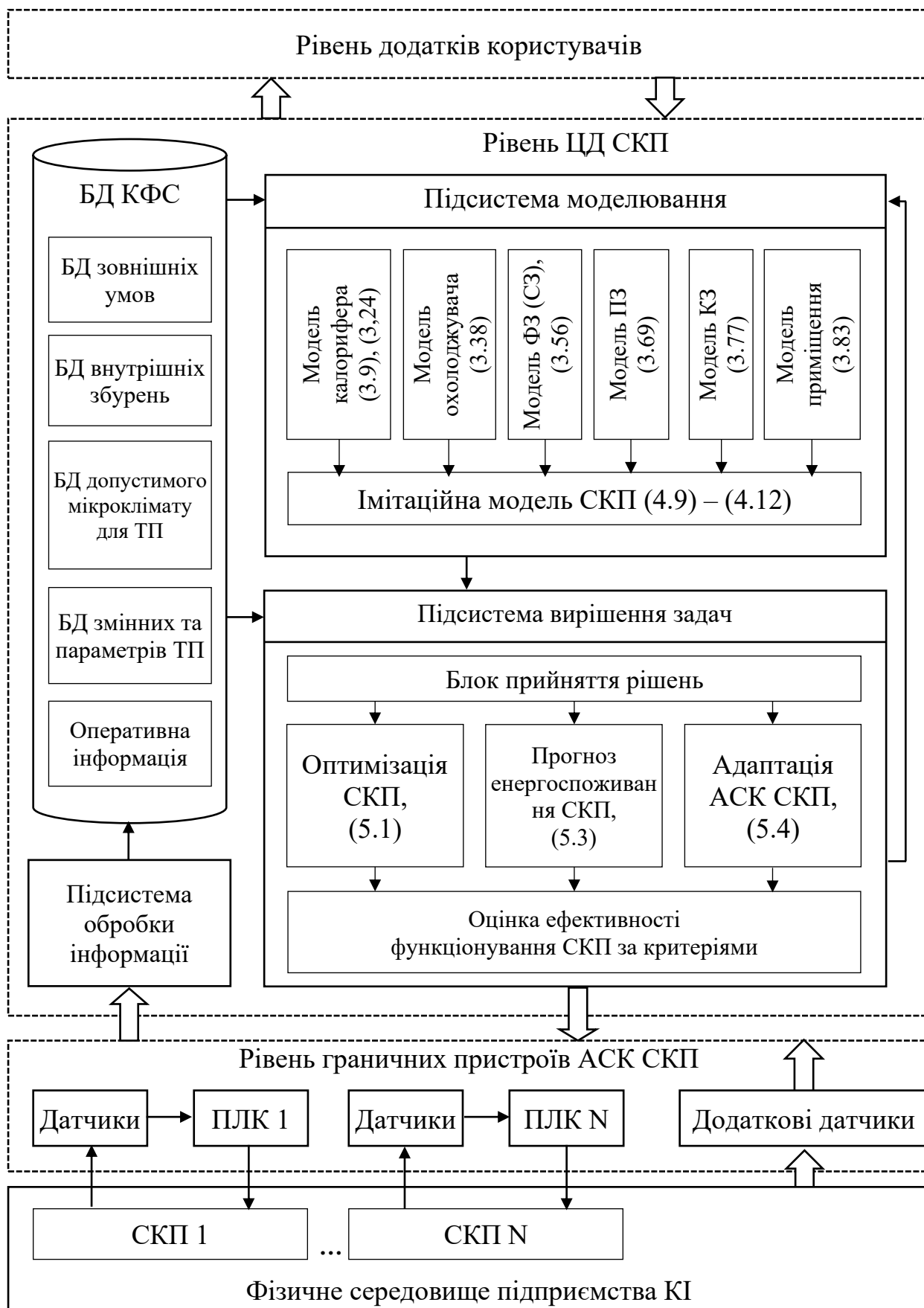


Рис. 5.1. Архітектура ІСППР для управління СКП

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. ЦД СКП містить дві підсистеми: підсистему моделювання та підсистему вирішення задач.

Підсистема моделювання забезпечує мінімізацію стохастичних зовнішніх збурень та помилок вимірювань за допомогою методів Калманівської оптимальної фільтрації вимірювань на етапі підготовки даних для моделювання [263]. Існуюча параметрична невизначеність аналітичних моделей кліматичного обладнання мінімізується шляхом використання наявних історичних даних та методів пасивної ідентифікації моделей кліматичного обладнання (див. п. 4.2), чим досягається їх високий рівень адекватності процесу кондиціонування повітря. Для наявних на підприємстві КІ кондиціонерів проектується імітаційні моделі із використанням методики розробки комплексної моделі СКП у просторі станів (див. п. 4.4.1).

Підсистема вирішення задач забезпечує: оптимізацію допустимих меж температури і вологості у приміщеннях об'єкту КІ; оптимізацію коефіцієнта рециркуляції СКП для економного використання енергетичних ресурсів системою мікроклімату; прогнозування витрат енергетичних ресурсів для забезпечення необхідного мікроклімату на підприємстві КІ; адаптацію АСК кондиціонера до зовнішніх збурень на систему штучного мікроклімату. Ефективність оперативного управління мікрокліматом підприємства КІ оцінюється за відповідними критеріями. Далі, інформація надається на застосунки відповідальних осіб для ухвалення управлінських рішень.

5.1.1 Оперативне управління з оптимізації системи кондиціонування повітря

Завдання оперативного управління з оптимізації СКП необхідне для визначення допустимих меж температури і вологості у приміщенні об'єкта КІ, а також для визначення коефіцієнта рециркуляції (для СКП із рециркуляцією), що впливає економне використання енергетичних ресурсів. Штучний мікроклімат фізичного середовища залежить від завдань, які виконує підприємство 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. Розглянемо обидва варіанти оптимізації СКП із форсуночним зволожувачем (ФЗ) та рециркуляцією.

Для математичної моделі (4.10) СКП на рис. 5.2 зображена $h - d$ діаграма підготовки зовнішнього повітря з вхідною температурою $\theta_{A0}^{\min} - \theta_{A0}^{\max}$ та вологовмістом $d_{A0}^{\min} - d_{A0}^{\max}$.

Область IV характеризує припустимий мікроклімат у приміщенні з діапазоном заданої температури $\theta_R^{\min} - \theta_R^{\max}$ та вологовмісту $d_R^{\min} - d_R^{\max}$. Що менше площа області IV – то вище вимоги до мікроклімату приміщення.

При обробці зовнішнього повітря (точка A, A^*) до заданого значення (точка D, D^*) мінімальна витрата енергоресурсів кондиціонера буде на ребрах межі області IV. Тому чим більше площа області IV, тим менше енергоносіїв необхідно на підготовку зовнішнього повітря. З іншого боку, область IV обмежена вимогами технологічного процесу виробництва до мікроклімату у промисловому приміщенні. Для оптимізації області допустимого мікроклімату БД КФС містить інформацію про допустимі параметри мікроклімату для всіх технологічних процесів на підприємстві.

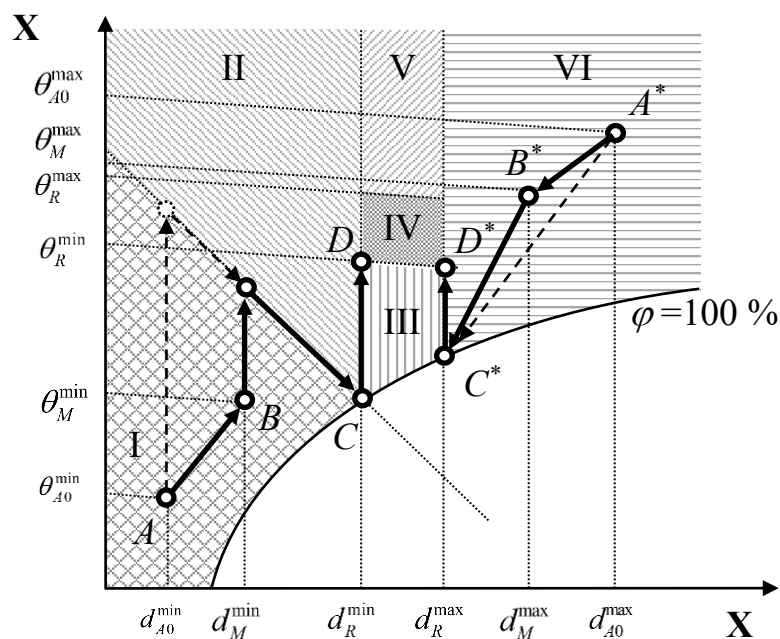


Рис. 5.2. $h-d$ діаграма підготовки повітря для кондиціонера із ФЗ

Для промислових об'єктів КІ оптимізація допустимого мікроклімату в приміщеннях виробництва здійснюється при переході технологічної лінії на виготовлення нової продукції і складається з наступних етапів:

- 1) підсистема вирішення задач ініціює діалог із оператором та пропонує допустимі межі мікроклімату у приміщенні для виготовлення нової продукції;
- 2) формується імітаційна модель СКП за методикою п. 4.1.1 із допустимими межами мікроклімату у приміщенні;
- 3) підсистема моделювання проводить імітаційні розрахунки підготовки навколишнього повітря - перехід із точки $A(A^*)$ до точки $D(D^*)$;
- 4) далі, проводиться оцінка ефективності функціонування промислового кондиціонера на основі критерію мінімізації енергоспоживання

$$\sum_i^N Q_i \rightarrow \min, \quad (5.1)$$

де Q_i – енергоспоживання i -го апарату кондиціонера, для водяного теплоносія

$$Q_i = G_i c_i (\theta_{i0} - \theta_i), \quad (5.2)$$

G_i, c_i – відповідно витрата та теплоємність теплоносія; θ_{i0}, θ_i – температура теплоносія на вході та виході апарату;

- 5) лабораторний відділ підприємства аналізує вплив мікроклімату промислового приміщення на якість продукції;
- 6) оператор аналізує накопичену статистичну інформацію та приймає рішення про зміну заданої еталонної зони мікроклімату;
- 7) при необхідності діапазон допустимих меж IV області змінюється оператором відповідно до кроків 1 – 6.

Для об'єктів КІ соціального типу потрібно забезпечити комфортні умови мікроклімату для перебування людей у приміщенні. Для цього випадку оптимізацію функціонування СКП виконують згідно міжнародного стандарту EN ISO 7730 [264], де застосовується метод PMV (Predicted Mean Vote) – прогноз середньої голосової оцінки теплового відчуття на шкалі від -3 (дуже холодно) до $+3$ (дуже жарко). Комфортний стан людини знаходиться в діапазоні температур $18 - 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ та відносної вологості $40 - 70\%$ оточуючого повітря [265] в залежності від різних факторів. Метод PMV базується на енергетичному балансі людини. Повний аналітичний вираз PMV досить громіздкий. Практично PMV обчислюють за стандартними алгоритмами або наявними програмними сервісами [266, 267]. За методом PMV комфортний стан людини залежить від наступних основних чинників:

$$PMV = f(M, I_{cl}, T_a, T_r, v_a, RH),$$

де M – метаболізм людини за типом її активності, $\text{Вт}/\text{м}^2$; I_{cl} – теплоізоляція одягу, $\text{м}^2\text{ }^{\circ}\text{K}/\text{Вт}$; T_a – температура повітря, $^{\circ}\text{C}$; T_r – середня температура випромінювання від поверхонь, $^{\circ}\text{C}$; v_a – швидкість руху повітря, $\text{м}/\text{с}$; RH – відносна вологість повітря, $\%$. Розрахунок метаболізму людини (M) та теплової ізоляції одягу (I_{cl}) виконується за табличними рекомендаціями стандарту EN ISO 7730, де за типовими видами рухливої активності визначається метаболізм людини, а термічний опір її одягу розраховується безпосередньо з даних таблиці типових комбінацій одягу.

Оптимізація СКП для забезпечення комфортних умов перебування людини містить наступні кроки:

- 1) підсистема вирішення задач ініціює діалог із оператором та пропонує задати допустимі межі критерію PMV ; зазвичай рекомендований діапазон – $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$ – це межа прийнятної зони комфортності (близько 10% людей можуть бути незадоволеними мікрокліматом у приміщенні) [264];
- 2) за рекомендаціями EN ISO 7730 [264] визначається метаболізм M та теплоізоляція одягу I_{cl} для типової активності працівників підприємства КІ;
- 3) за рекомендаціями ДБН В.2.5-67 [154] задається діапазон швидкості руху повітря у приміщенні $v_a^{\min} - v_a^{\max}$;
- 4) для заданої швидкості руху повітря у приміщенні v_a за методикою EN ISO 7730 ітеративним способом знаходиться діапазон температур $\theta_R^{\min} - \theta_R^{\max}$ та вологості повітря $d_R^{\min} - d_R^{\max}$, що забезпечує прийнятний діапазон PMV
- 5) формується імітаційна модель СКП (див. п. 4.1.1) із допустимими межами мікроклімату $(\theta_R^{\min} - \theta_R^{\max}, d_R^{\min} - d_R^{\max})$ у приміщенні;
- 6) підсистема моделювання проводить імітаційні розрахунки підготовки навколишнього повітря - перехід із точки $A(A^*)$ до точки $D(D^*)$;
- 7) далі, проводиться оцінка ефективності функціонування СКП на основі критерію мінімізації енергоспоживання (5.1), якщо значення критерію не задовольняють – задається нове значення v_a в діапазоні $v_a^{\min} - v_a^{\max}$ та проводиться повторне обчислення кроків 4 – 7;
- 8) оператор аналізує накопичену статистичну інформацію, а при необхідності приймає рішення про зміну значення критерія PMV .

Таким чином, збирається статистична інформація, яка дозволяє оптимізувати енергоспоживання кондиціонера за рахунок допустимого діапазону параметрів мікроклімату у приміщеннях об'єктів КІ.

Значне зменшення енергоспоживання кондиціонером можливе за рахунок використання рециркуляції витяжного повітря. Утилізація теплоти

втяжного повітря дозволяє привести параметри мікроклімату навколишнього повітря з точки A в точку B для зимової пори року, і з точки A^* в точку B^* для літньої пори року (див. рис. 5.2), при цьому витрати енергоносіїв на обробку повітря значно зменшуються. При 100% рециркуляції енергоефективність кондиціонера максимальна. Однак, за санітарними нормами та правилами існують нормативи повітрообміну із зовнішнім середовищем, які необхідно витримувати у приміщеннях за наявності працівників [154]. Для оптимізації коефіцієнта рециркуляції кондиціонера БД КФС має містити нормативну інформацію щодо повітрообміну для приміщень із кількістю працівників.

Оптимізація коефіцієнта рециркуляції кондиціонера здійснюється при зміні кількості працівників у приміщенні, а також переході СКП із зимового режиму роботи на літній та навпаки. Алгоритм оптимізації коефіцієнта рециркуляції аналогічний оптимізації СКП для промислових об'єктів КІ. Відмінність міститься у 2 кроці, де оператор змінює числове значення коефіцієнту рециркуляції для моделі СКП, при цьому допустимі межі мікроклімату приміщення $(\theta_R^{\min} - \theta_R^{\max}, d_R^{\min} - d_R^{\max})$ не змінюються.

5.1.2 Оперативне управління з прогнозування енергоспоживання

Важливою функцією планування є прогнозування енергоспоживання для забезпечення мікроклімату об'єктів КІ. Ця функція забезпечується ЦД СКП враховуючи, що ЦД дозволяє проводити моделювання процесу кондиціонування повітря у динаміці із врахуванням збурень та необхідної спожитої енергії (5.2) для забезпечення заданого мікроклімату. Адекватність прогнозних розрахунків забезпечується пасивною ідентифікацією моделей СКП відповідно до функціонування діючих кондиціонерів (див. п. 4.2, п. 4.3).

Імітаційна модель СКП враховує зовнішні і внутрішні збурення. До зовнішніх збурень СКП відноситься зміна температури і вологості навколишнього середовища. Погодинний прогноз зовнішніх збурень із глибиною до 30 днів можна отримати через компетентні сервіси прогнозу погоди, наприклад [191]. До внутрішніх збурень СКП відносяться теплові

збурення від функціонування промислового обладнання та зміна характеристик тепло- та холодоносія. Прогностичні моделі цих збурень можна отримати в класі авторегресійних моделей [118] на основі історичних даних функціонування промислового обладнання.

Оперативне управління із прогнозування енергоспоживання складається з наступних етапів:

- 1) підсистема вирішення задач ініціює діалог із оператором та пропонує задати глибину прогнозу функціонування СКП;
- 2) визначається прогнозний вектор зовнішніх і внутрішніх збурень, який входить до вектору U математичної моделі (4.10);
- 3) формується математична модель СКП (4.10);
- 4) підсистема моделювання проводить імітаційні розрахунки стабілізації мікроклімату у приміщенні на глибину прогнозу і врахуванням зовнішніх та внутрішніх збурень;
- 5) для математичної моделі (4.10) інтегруються витрати енергоспоживання кліматичного обладнання СКП для стабілізації мікроклімату кожного приміщення KI

$$E = \sum_i^N Q_i, \quad (5.3)$$

де Q_i – енергоспоживання i -го апарату кондиціонера, див. (5.2);

- 6) інженер із енергозабезпечення приймає до відома отриману інформацію для планування функціонування СКП.

Таким чином, накопичується статистична інформація, яка дозволяє оптимізувати роботу підприємства на майбутнє.

5.1.3 Оперативне управління з адаптації АСК кондиціонером

Адаптація АСК кондиціонера здійснюється при переході СКП із зимового режиму роботи на літній або навпаки, оскільки в підготовці повітряної суміші використовується інше кліматичне обладнання. Завдання оперативного управління із адаптації АСК кондиціонера необхідно для

коригування налаштувань системи керування нижнього рівня за зміни динамічних властивостей кондиціонера. Адаптивна система має два рівні: нижній – рівень граничних пристроїв, який реалізований на ПЛК для управління СКП; рівень ЦД СКП для оцінки параметрів математичної моделі кондиціонера та адаптації АСК (див. рис. 5.1).

В загальному випадку, алгоритм оперативного управління із адаптації АСК кондиціонером складається з наступних етапів:

- 1) підсистема вирішення задач ініціює діалог з оператором та пропонує оцінити параметри математичних моделей кліматичного обладнання; для моделей оцінюються коефіцієнти тепловіддачі та масопереносу за алгоритмом пасивної ідентифікації (рис. 4.3); для ідентифікації використовується накопичені історичні дані СКП, які містяться в БД КФС;
- 2) формується імітаційна модель СКП;
- 3) розраховуються параметри АСК кондиціонера використовуючи одномірні, або багатовимірні методи налаштування (запропоновані одно- та багатовимірні методи розглядаються нижче);
- 4) проводиться оцінка ефективності функціонування АСК кондиціонера за квадратичним критерієм якості

$$I = M \left\{ \int_{t_0}^{t_0+t_f} (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U}) dt \right\} \rightarrow \min, \quad (5.4)$$

де $\mathbf{Q}$, $\mathbf{R}$ вагові матриці для векторів стану $\mathbf{X}$ та управління $\mathbf{U}$ СКП;

- 5) оператор змінює параметри налаштування АСК кондиціонера, якщо ефективність АСК із оптимізованими параметрами вища за існуючі;
- 6) етапи 1°–°5 із адаптації АСК кондиціонера повторюються при зміні режиму роботи СКП (літній, зимовий, перехідний режими роботи).

АСК кондиціонера може бути реалізована із використанням одномірних та багатовимірних методів керування. Якщо модернізується існуюча на підприємстві система керування штучним мікрокліматом із традиційними контурами регулювання, то для маловитратної модернізації АСК рекомендується використовувати одномірні методи оптимізації системи

керування. У випадку інсталяції нової СКП, перспективним підходом буде синтез та оптимізація багатовимірної АСК нижнього рівня.

5.2 Адаптація традиційних систем керування для комплексів штучного мікроклімату

Переважає більшість існуючих систем керування кондиціонерами реалізовується із використанням одноконтурних АСК. Як правило, такі системи реалізують процес керування кондиціонером за методом “точки роси” із використанням модифікацій ПІД-закону керування (див. п.1.6). В цьому випадку виникає завдання синтезу та оптимізації одноконтурної АСК. В даному підрозділі розглядається розроблений чисельний метод оптимізації АСК із цифровим регулятором (ЦР).

5.2.1 Аналіз цифрової системи регулювання у часовій області

Для оптимізації та моделювання одноконтурних АСК виникає потреба в ідентифікації динамічних властивостей ОК. Традиційно ідентифікація зводиться до визначення передатної функції каналу регулювання. А власне, чи треба, зациклюватися на необхідності отримання передаточної функції? Сьогодні характеристики комп’ютерної техніки відкривають принципово нові можливості для аналізу динамічної поведінки АСК. Зокрема, в якості базової моделі можна використати перехідну або імпульсну характеристику ОК у вигляді масиву її ординат, яку можна отримати безпосередньо із БД КФС. Єдина умова – цей масив повинен бути достатньо детальним, щоб відобразити особливості динамічної поведінки ОК. Чисельно перехідна характеристика легко перераховується у імпульсну та навпаки.

Розглянемо структурну схему традиційної цифрової АСК рис. 5.3, яка включає цифрову модель ОК, суматор та ЦР. На схемі прийнято z_s – сигнал завдання, e_s – сигнал розбалансу, u_s – вихідний сигнал ЦР, y_s – вихідний сигнал ОК. Аналіз цифрової АСК передбачає вибір чисельних методів моделювання реакції ЦР та ОК на відповідні вхідні сигнали довільної форми.

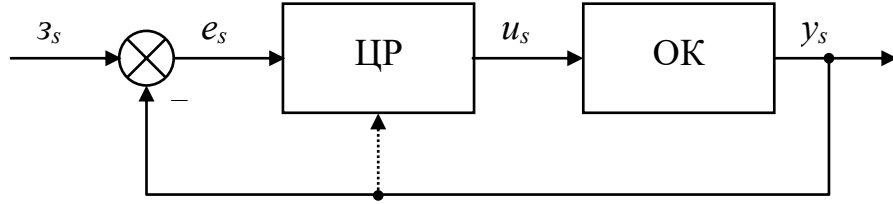


Рис. 5.3. Структурна схема цифрової АСК

Математична реалізація ПІ-Д- та І-ПІД-регуляторів дещо відрізняється від ПІД-регулятора. Відповідні рівняння для ПІ-Д-, І-ПІД- та ПІД-регуляторів в операторній формі мають вигляд [268]:

$$u(p) = K_R \left(1 + \frac{1}{T_I p} \right) e(p) - K_R \frac{T_D p}{\frac{T_D}{K_F} p + 1} y(p); \quad (5.5)$$

$$u(p) = K_R \frac{1}{T_I p} e(p) - K_R \left(1 + \frac{T_D p}{\frac{T_D}{K_F} p + 1} \right) y(p); \quad (5.6)$$

$$u(p) = K_R \left(1 + \frac{1}{T_I p} + \frac{T_D p}{\frac{T_D}{K_F} p + 1} \right) e(p), \quad (5.7)$$

де K_R , T_I , T_D – параметри налаштування регулятора; K_F – коефіцієнт, що визначає граничну частоту фільтра Д-складової регулятора ($K_F = 2..20$)

[170], $\frac{T_D}{K_F}$ – стала часу фільтра; p – оператор Лапласа. Для (5.5) – (5.7)

отримаємо їх дискретні аналоги, застосовуючи метод скінченних різниць. Таким чином, в загальному випадку отримаємо рекурентні залежності ЦР для модифікацій ПІД-закону керування:

$$u_s = K_R \left(e_s + \frac{T_{KV}}{T_I} \sum_{j=0}^{s-1} e_j \right) - K_R (a_d u_{d,s-1} + b_d (y_s - y_{s-1})); \quad (5.8)$$

$$u_s = K_R \frac{T_{KV}}{T_I} \sum_{j=0}^{s-1} e_j - K_R (y_s + a_d u_{d,s-1} + b_d (y_s - y_{s-1})); \quad (5.9)$$

$$u_s = K_R \left(e_s + \frac{T_{KV}}{T_I} \sum_{j=0}^{s-1} e_j + a_d u_{d,s-1} + b_d (e_s - e_{s-1}) \right), \quad (5.10)$$

де T_{KV} – час квантування; $a_d = \frac{T_D}{T_D + K_F T_{KV}}$; $b_d = a_d K_F$. Реалізація ПІ-Д– або І-ПІД–закону керування на структурній схемі (див. рис. 5.3) враховано пунктирною лінією зв'язку.

Математичну модель ОК будемо визначати на основі суми дискретної згортки, що є дискретним аналогом інтеграла Дюамеля [269]

$$y_s = \sum_{j=0}^s u_j g_{s-j}, \quad (5.11)$$

тут g_s – імпульсна (вагова) послідовність, яка характеризує динамічні властивості ОК.

Розглянемо особливості чисельного визначення g_s за перехідною характеристикою $h(t)$ неперервного ОК [268]. Дискретну математичну модель ОК можна представити у вигляді системи послідовно з'єднаних динамічних ланок: фіксатора нульового порядку (ФНП); неперервного ОК, для якого існує передатна функція $W_{OK}(p)$; квантувачів S_1, S_2 , які працюють синхронно із періодом дискретизації T_{KV} . Структурна схема для такої системи зображена на рис. 5.4.

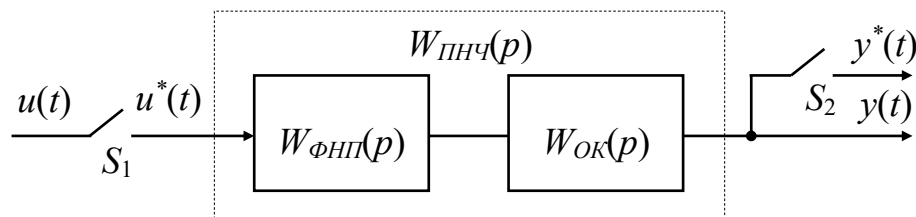


Рис. 5.4. Структурна схема послідовного з'єднання елементів дискретної моделі ОК

В області Лапласа ФНП має передатну функцію

$$W_{ФНП}(p) = (1 - e^{pT_{KV}}) / p. \quad (5.12)$$

Припустимо, що динамічні властивості ОК визначаються перехідною характеристикою $h(t)$. ФНП у часовій області можна представити як різницю

одиничних сигналів, які зсунуті на період квантування T_{KV}
 $W_{ФНП}(p) = L\{1(t) - 1(t - T_{KV})\}$, графічна інтерпретація зображена на рис. 5.5, а.

Реакцію приведеної неперервної частини (ПНЧ) системи із ФНП та неперервним ОК на одиничний імпульс $u^*(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } t \neq 0 \\ 1, & \text{якщо } t = 0 \end{cases}$

у часовій області можна представити як (див. рис. 5.5, б)

$$W_{ПНЧ}(p) = W_{ФНП}(p) \cdot W_{ОК}(p) = L\{h(t) - h(t - T_{KV})\} = L\{g(t)\},$$

де $g(t)$ – реакція ПНЧ на імпульс одиничної величини тривалістю T_{KV} .

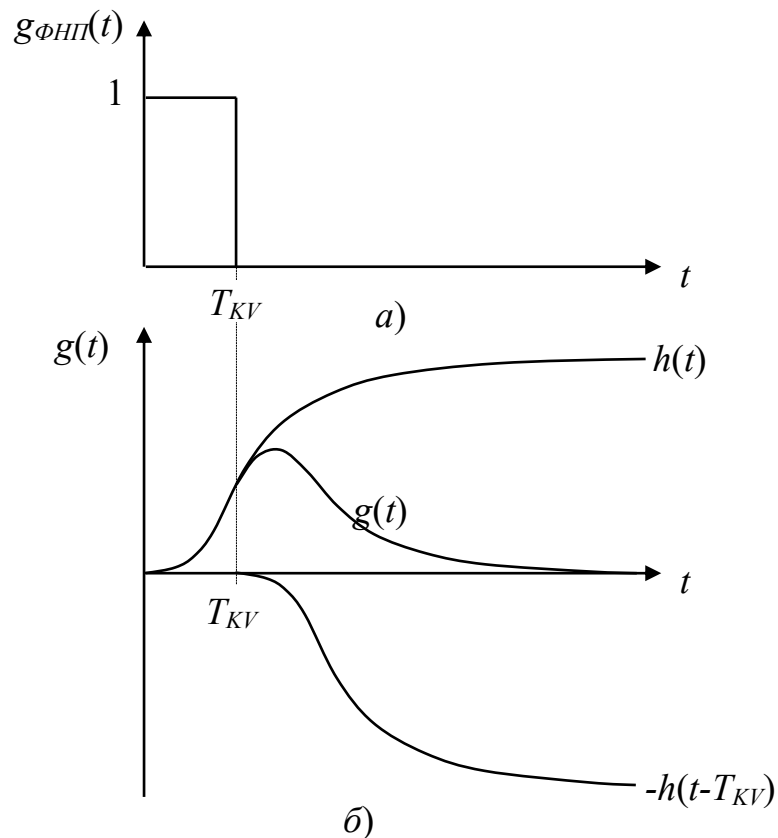


Рис. 5.5. Графічна інтерпретація формування реакції неперервного ОК на імпульс одиничної величини тривалістю T_{KV}

Якщо на вхід ПНЧ надходить послідовність імпульсів $u^*(t)$, тоді вихідний сигнал можна записати як

$$y(t) = u(0)g(t) + u(T_{KV})g(t - T_{KV}) + u(2T_{KV})g(t - 2T_{KV}) + \dots,$$

або для $t = s T_{KV}$ ($s = 0, 1, 2, \dots$) остання залежність прийме вигляд

$$y_s = u_0 g_s + u_1 g_{s-1} + \dots + u_s g_0 = \sum_{j=0}^s u_j g_{s-j}, \quad (5.13)$$

яка дозволяє визначити реакцію цифрового ОК y_s як суму реакцій g_s на послідовність вхідних імпульсів u_s . Отже, залежності (5.11) та (5.13) тотожні.

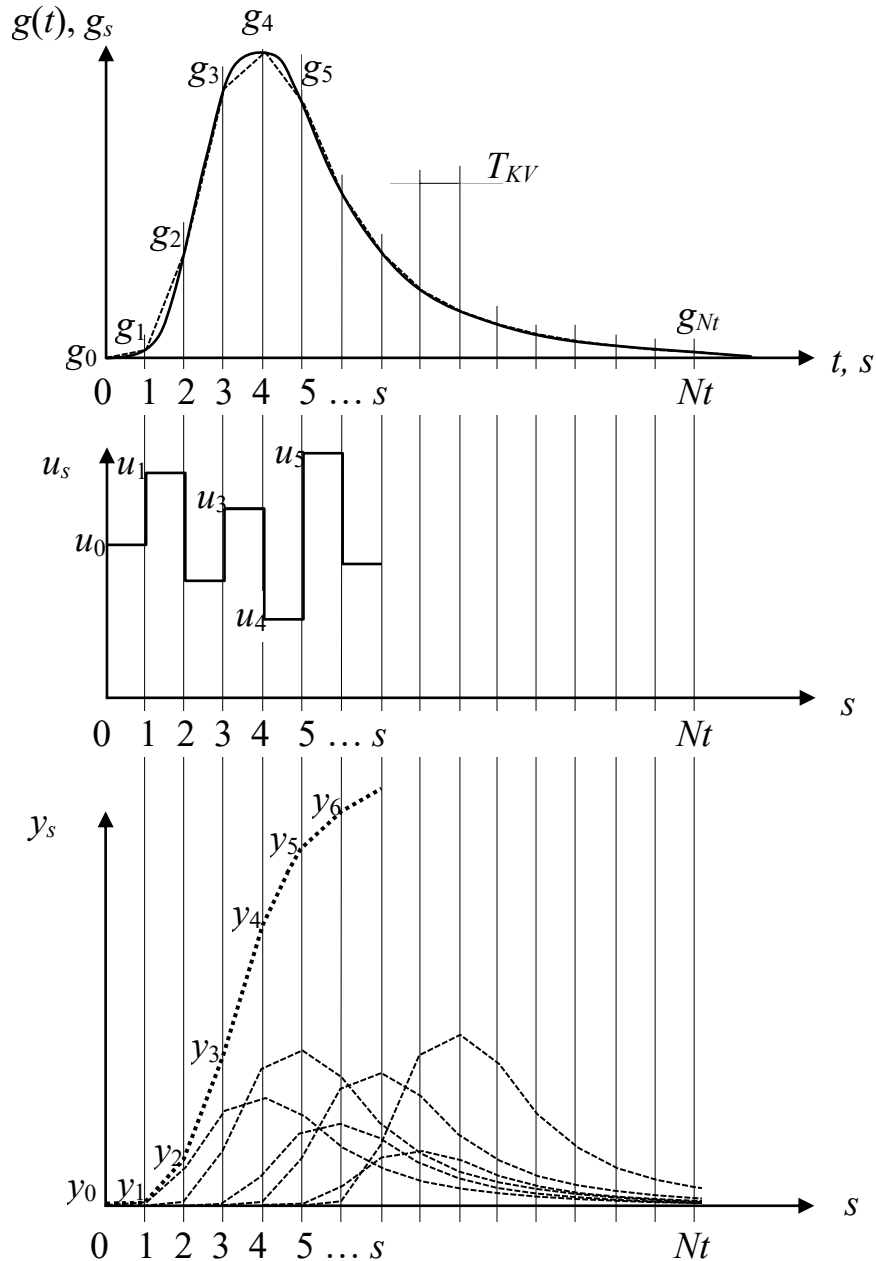


Рис. 5.6. Схема формування масиву ординат реакції y_s цифрового ОК

Таким чином, за $h(t)$ чисельно визначається $g(t)$ ОК (див. рис. 5.5, б), далі, щоб отримати імпульсну послідовність g_s – необхідно “оцифрувати” $g(t)$ із періодом дискретизації T_{KV} . Графічна інтерпретація “оцифровки” $g(t)$ та

формування масиву ординат реакції y_s ОК представлена на рис. 5.6. Для наочності значення імпульсної послідовності g_s між вузлами лінійно інтерпольовано пунктирною лінією, хоча g_s визначена тільки у вузлах квантування. Чисельний метод визначення реакції y_s ОК на вхідний сигнал довільної форми u_s (за часовою характеристикою ОК) детально розглянутий у [122]. Метод реалізований у програмному модулі OptHtd підпрограмою FormHtsD.

5.2.2 Аналіз критеріїв оптимізації та постановка задачі оптимізації

Теорія оптимізації динамічних систем для синтезу АСК пропонує використовувати критерій (5.4), оскільки така задача оптимізації має загальний аналітичний розв'язок [98, 189, 270]. Для одноконтурної АСК, що зображена на рис. 5.3 дискретний аналог критерію якості (5.4) має вигляд:

$$I = T_{KV} \sum_{s=0}^{Nt-1} (q e_s^2 + r u_s^2), \text{ якщо } e_s|_{s \geq Nt} = 0, \quad (5.14)$$

де, q та r – вагові коефіцієнти, Nt – загальна кількість точок спостереження перехідного процесу із кроком дискретизації T_{KV} ($t_f = Nt \cdot T_{KV}$), s – поточний індекс дискретного часу.

Проведемо аналіз критерію (5.14). Будемо розглядати ОК із позитивним самовирівнюванням, оскільки більшість технологічних процесів, в тому числі і ПКШМ мають таку властивість. Припустимо, що АСК стійка та настройки ЦР при зміні завдання забезпечують виконання умови $e_s|_{s \geq Nt} = 0$ ($e_s = z_s - y_s$). Таким, чином сума першого доданку критерію (5.14) з плином часу набуде сталого значення, оскільки $e_s|_{s \geq Nt} = 0$ за умовою. Для компенсації розбалансу у кінцевий момент часу ЦР повинен перевести сигнал керування із початкового стану $u_s|_{s=0} = 0$ (нульові початкові умови) у кінцеве $u_s|_{s=Nt} \neq 0$. Графічна інтерпретація доданків критерію (5.14) зображена на рис. 5.7, а. Якщо $Nt \rightarrow \infty$ та $r \neq 0$, тоді $\sum_{s=0}^{Nt-1} r u_s^2 \rightarrow \infty$, а критерій якості (5.14) втрачає сенс.

Іншим недоліком критерію (5.14) є інтегрування величин e_s та u_s у одне

числові значення, які різні за фізичною суттю. Навіть, якщо нормувати сигнали e_s та u_s до одиничного значення, враховуючи вагові коефіцієнти q та r , вага одиниці сигналу e_s та u_s буде різною.

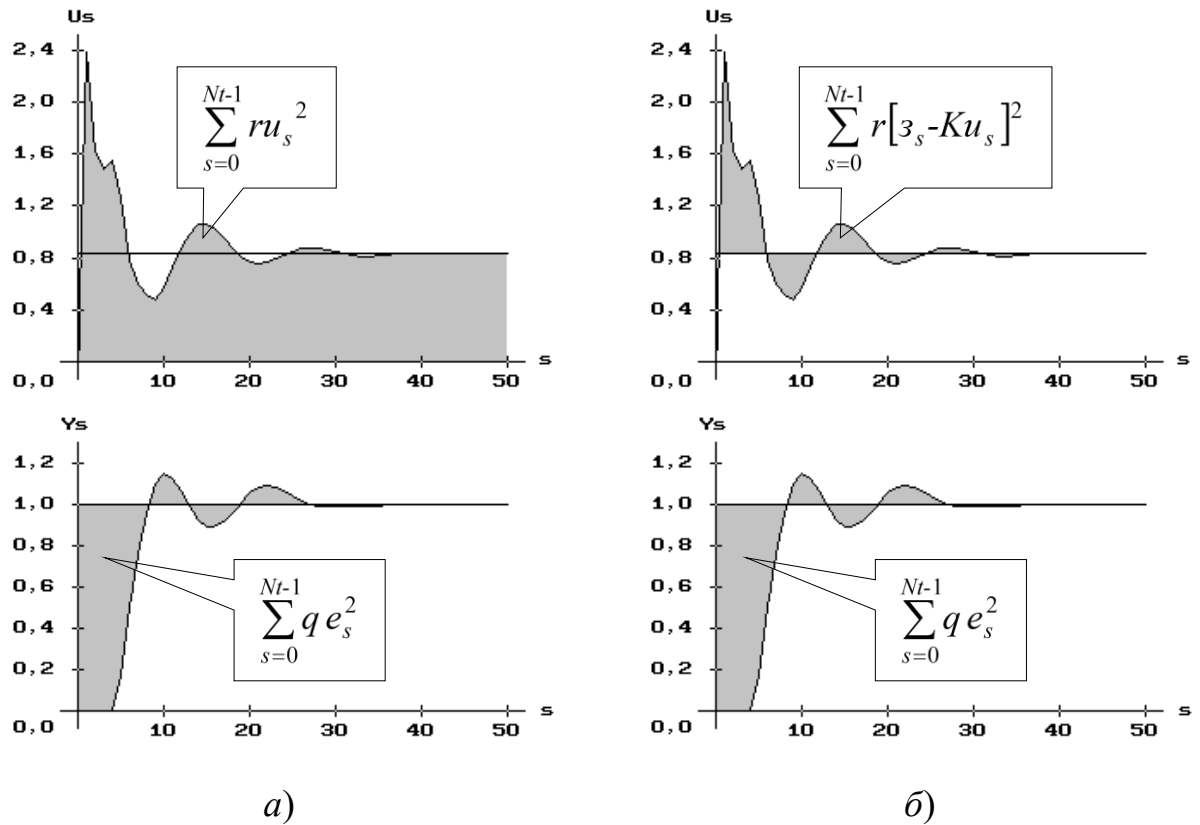


Рис. 5.7. Графічна інтерпретація доданків для критерію: a – (5.14); b – (5.15)

Щоб усунути перелічені недоліки критерію (5.14) пропонується розглянути наступну квадратичну форму [122, 271 – 273]

$$I = T_{KV} \sum_{s=0}^{Nt-1} \left(q e_s^2 + r [z_s - K u_s]^2 \right). \quad (5.15)$$

Тут, K – коефіцієнт передачі ОК, $K = \frac{y_s}{u_s} \Big|_{s \geq Nt}$. У сумі із другим доданком

функціоналу (5.15) присутній сигнал керування u_s , але цей сигнал “масштабується до розмірності” сигналу e_s . Для критерію (5.15), якщо $Nt \rightarrow \infty$

та $r \neq 0$ сума другого доданку $\left(\sum_{s=0}^{Nt-1} r [z_s - K u_s]^2 \right)$ набуває сталого значення,

оскільки $y_s|_{s \geq Nt} = K u_s|_{s \geq Nt}$, а $e_s|_{s \geq Nt} = (z_s - y_s)|_{s \geq Nt} = 0$ за умовою. При цьому

змінюється фізична суть доданку. Доданок ru_s^2 критерію (5.14) мінімізує значення сигналу керування із вагою r . Доданок $\sum_{s=0}^{N_t-1} r[z_s - Ku_s]^2$ критерію (5.15) мінімізує відхилення сигналу керування u_s від технологічно заданого значення із вагою r . Графічну інтерпретацію доданків критерію (5.15) зображено на рис. 5.7, б.

Як правило, АСК виконують стабілізуючі функції. Врахуємо у критерії оптимального керування вплив каналу збурення. Для цього розглянемо структурну схему одноконтурної АСК, що зображена на рис. 5.8.

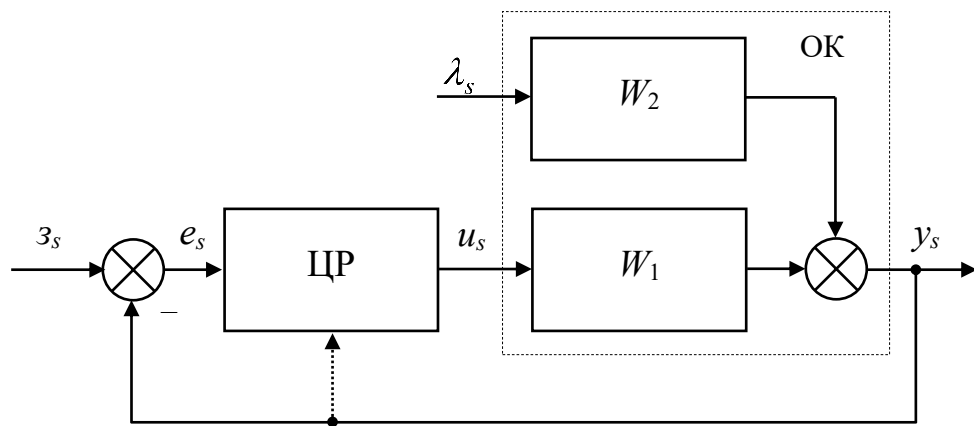


Рис. 5.8. Структура схема цифрової АСК: W_1 – канал регулювання ОК;
 W_2 – канал збурення ОК

Від структурної схеми рис. 5.3 остання відрізняється наявністю додаткового каналу впливу – каналу збурення W_2 . Використовуючи міркування розглянуті у підрозділі щодо критеріїв (5.14) та (5.15) можна запропонувати критерій, у якому враховано властивості каналу збурення

$$I = T_{KV} \sum_{s=0}^{N_t-1} \left(q e_s^2 + r [z_s - K_1 u_s - K_2 \lambda_s]^2 \right),$$

тут K_1 – коефіцієнт передачі каналу регулювання, $K_1 = \left. \frac{y_s}{u_s} \right|_{s \geq N_t}$; K_2 – коефіцієнт

передачі каналу збурення, $K_2 = \left. \frac{y_s}{\lambda_s} \right|_{s \geq N_t}$. Для оптимізації АСК окрім

квадратичних критеріїв використовуються модульні, врахуємо це та отримаємо:

$$I = \begin{cases} T_{KV} \sum_{s=0}^{Nt-1} [q|e_s| + (1-q)|z_s - K_1 u_s - K_2 \lambda_s|], & \text{при } Nvr = 1; \\ T_{KV} \sum_{s=0}^{Nt-1} [q e_s^2 + (1-q)(z_s - K_1 u_s - K_2 \lambda_s)^2], & \text{при } Nvr = 2, \end{cases} \quad (5.16)$$

тут Nvr – номер критерію якості ($Nvr = 1$ – модульний критерій, $Nvr = 2$ – квадратичний критерій); q – ваговий коефіцієнт, $0 \leq q \leq 1$.

Таким чином, для оптимізації одноконтурних цифрових АСК пропонується використовувати функціонал (5.16). Критерій містить два параметри: Nvr – варіант (номер) критерію; q – ваговий коефіцієнт, що дозволяє перерозподілити долі між сигналами розбалансу та керування. Запропонований критерій якості на відміну від існуючих коректно враховує сигнал керування, що дозволяє мінімізувати витрату матеріальних або енергетичних потоків в динамічних режимах для одноконтурних АСК.

Постановка задачі оптимізації. Нехай, для одноконтурної АСК (рис. 5.8) динамічні властивості каналів впливу W_1 та W_2 ОК задаються у вигляді таблиць масивів перехідних (або імпульсних) характеристик. За умовою задачі також задається період дискретизації T_{KV} та одна із модифікацій ЦР (5.8) – (5.10). Необхідно оптимізувати параметри налаштувань ЦР, що мінімізує критерій якості (5.16). Параметричну оптимізацію доцільно проводити чисельно, використовуючи метод сканування та метод Хука-Дживса [274].

5.2.3 Процедура чисельної оптимізації одноконтурної АСК

Параметрична оптимізація налаштування ЦР для АСК проводиться чисельно із використанням розробленого програмного пакету DemOptHd. Опис основних модулів програми та її лістинг представлено у [122]. Для своєї роботи програма використовує програмний модуль OptHtd, який реалізує

чисельний метод аналізу перехідних процесів цифрової АСК (див. п. 5.2.1) та сервісні модулі розширення Groms, Serv, реалізацію розглянуто у [275, 276].

Розглянемо процедуру параметричної оптимізації ЦР методом сканування зі змінним кроком. Мінімізація показника (5.16) проводиться в межах прямокутного паралелепіпеда налаштувань ЦР, що подано на рис. 5.9.

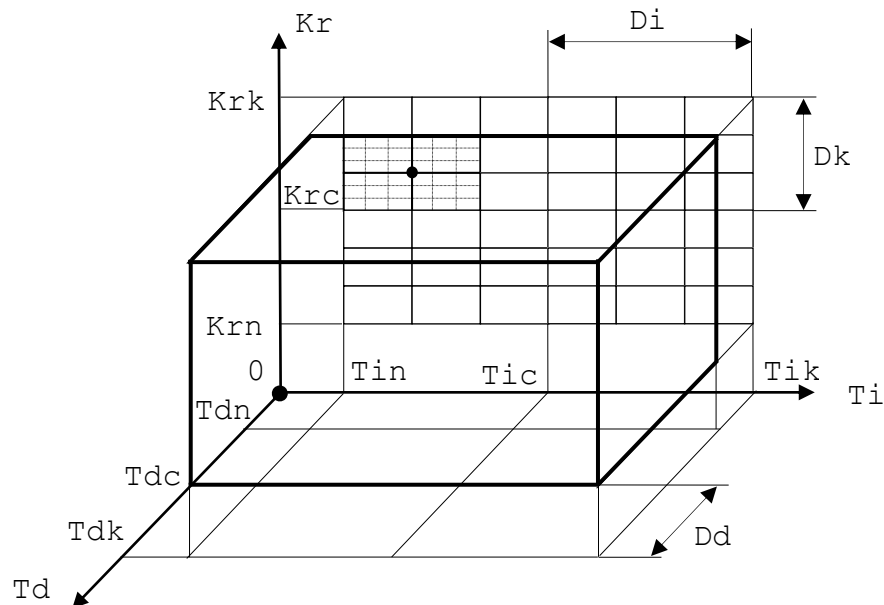


Рис. 5.9. Схема пошуку оптимуму методом сканування із змінним кроком

Кроки процедури пошуку наступні.

1. Задається робоча область пошуку оптимальних налаштувань ЦР: K_{rn} , K_{rk} – мінімальне та максимальне значення коефіцієнта пропорційності; T_{in} , T_{ik} – мінімальне та максимальне значення часу інтегрування; T_{dn} , T_{dk} – мінімальне та максимальне значення часу диференціювання; K_f – коефіцієнт диференційного фільтра. Також вводяться: перехідна характеристика ОК за каналами регулювання $h_1(t)$ та збурення $h_2(t)$; параметри q , N_{vr} для критерію (5.16); k – константа зменшення кроку сканування параметрів ЦР; крок дискретизації N_k для вибору періоду дискретизації T_{kv} для цифрової АСК ($T_{kv} := N_k \cdot dt$); тип закону керування N_{zr} ($N_{zr}=1$ ПД-регулятор, $N_{zr}=2$ ПІ-Д-регулятор, $N_{zr}=3$ І-ПД-регулятор).

2. В робочій області визначається її центр (K_{rc} , T_{ic} , T_{dc}) та початкові значення кроків сканування (D_i , D_k , D_d) за якими формується сітка сканування. Центр області для початку приймається за початок положення оптимуму.
3. Отримана сітка сканується вузол за вузлом на предмет визначення вузла із мінімальним значенням показника якості (5.16). Підпрограмою `FormHtsD`, використовуючи (5.11) та (5.8) – (5.10) в залежності від вибраного закону керування, чисельно розраховується перехідний процес у АСК. Для отриманої перехідної характеристики АСК визначається значення критерію якості I за залежністю (5.16).
4. Після того, як такий вузол знайдено, він приймається як черговий претендент на положення оптимуму. Кроки сканування зменшуються в k разів і процес повторюється доти, поки при кроці $D_k \leq E_{psk}$ не буде знайдено вузол з мінімальним показником якості, який і приймається за положення шуканого оптимуму. Мала величина E_{psk} визначається як $E_{psk} := E_k * K_{rk}$, де E_k – задається користувачем, наприклад, $E_k := 0.001$.
5. Знайдені оптимальні значення K_{ro} , T_{io} , T_{do} та I записуються в однойменні ідентифікатори (глобальні змінні типу `real`) і виводяться в інформаційному рядку підпрограми `DemSc`.

Програмна реалізація процедури параметричної оптимізації ЦР методом сканування із змінним кроком має обмеження на діапазон пошуку (для області обмеженої $K_{rn} .. K_{rk}$, $T_{in} .. T_{ik}$, $T_{dn} .. T_{dk}$), який повинен містити хоча б один вузол, де система була стійкою, інакше процес пошуку не почнеться.

Процедуру пошуку, що позбавлена даного обмеження, розглянуто нижче. Дана процедура оптимізації налаштувань ЦР використовує метод Хука-Дживса. Основою процедури є залежності (5.8) – (5.10), (5.11) та (5.16). Коротко прокоментуємо процедуру оптимізації ЦР АСК.

1. Задається перехідна характеристика ОК за каналами регулювання та збурення: $h_1(t)$, $h_2(t)$. Задаються: параметри критерію (5.16); крок

дискретизації N_k для вибору періоду дискретизації T_{kv} для цифрової АСК ($T_{kv} := N_k \cdot dt$); тип закону керування N_{zr} ; початкові значення параметрів регулятора K_r , T_i , T_d та величина кроку їх зміни D_k , D_i , D_d ; K_f – коефіцієнт диференційного фільтра; Ovr – максимальне значення вихідного сигналу, що обмежує область пошуку параметрів налагодження регулятора в межах стійкої АСК.

2. Підпрограмою `FormHtsD`, використовуючи (5.11) та (5.8) – (5.10) в залежності від вибраного закону керування, чисельно розраховується перехідний процес у АСК. Для отриманої перехідної характеристики АСК визначається значення критерію якості I за залежністю (5.16). Не виключено, що під час чисельної оптимізації АСК може виявитись нестійкою. Умова `abs(hts[z]) > Ovr` під час розрахунків дозволяє перевірити стійкість системи керування із заданими параметрами регулятора. У випадку нестійкої АСК показник якості не обчислюється.
3. Змінюючи приріст параметрів налагодження регулятора $K_r \pm D_k$, $T_i \pm D_i$, $T_d \pm D_d$ визначається напрям уздовж якого функціонал цілі I найбільше зменшується. Для знайденого напрямку продовжуємо виконувати кроки пошуку, доки не буде отримано мінімальне значення I для даного напрямку. Якщо за знайденим напрямком критерій (5.16) мінімізований, переходять до пошуку нового напрямку уздовж якого функціонал цілі I зменшується найбільше (метод Хука-Дживса).
4. У випадку, якщо пошук нового напрямку не дав позитивного результату – робота завершується.

Мінімізація критерію (5.16) із використанням методу сканування або Хука-Дживса реалізовано підпрограмою `OptSp`. Процедура параметричної оптимізації, що використовує метод Хука-Дживса характеризується більшою швидкістю пошуку налаштувань регулятора.

Вибір чисельного методу оптимізації визначається кількістю локальних оптимумів (метод сканування чи Хука-Дживса). Для аналітичних методів

оптимізації динамічних систем існують теореми що визначають необхідні та достатні умови існування локального мінімуму функціоналу (5.4), що припускає наявність декількох локальних оптимумів. Якщо оптимізується АСК за критерієм якості (5.16), що має декілька локальних екстремумів – знайти чисельно мінімальне значення критерію можливо тільки методом сканування у заданій області параметрів регулятора. Інакше, результат оптимізації буде залежати від алгоритму пошуку екстремуму.

Узагальнені результати використання чисельної процедури оптимізації ЦР представлено у роботах [122, 268, 271, 277–281]. За результатами досліджень можна стверджувати, що маємо справу із однокстремальним функціоналом (5.16). Тому, процедуру параметричної оптимізації ЦР АСК рекомендується виконувати за методом Хука-Дживса. Такий підхід потребує менших ресурсів на обчислення та скорочується час пошуку. У роботах [122, 280] автором запропоновано використовувати розглянуту процедуру оптимізації для пошуку налаштувань ПД-регулятора із компенсатором збурення. У роботі [122] даний підхід також поширено для оптимізації каскадних АСК. Дослідження підтвердили ефективність запропонованого чисельної процедури параметричної оптимізації налаштувань ЦР АСК.

Відмінність запропонованої процедури чисельного пошуку оптимальних налаштувань ЦР від існуючих полягає у використанні перехідної характеристики ОК в якості її динамічної моделі. Використання часової характеристики ОК (без етапу апроксимації наближеною моделлю) дозволяє зменшити похибку моделювання АСК, що впливає на точність результату визначення оптимальних налаштувань ЦР.

5.2.4 Структурні схеми керування кондиціонером для стабілізації температури та вологовмісту повітря за методом “точки роси”

Для побудови структурної схеми АСК за основу взято технологічну схему кондиціонера, що зображена на рис. 2.3 (в). Теплова потужність

калориферів $K1$ та $K2$ регулюється зміною температури теплоносія, а температура “точки роси” у літню пору року – зміною витрати холодоносія на охолоджувачі. Продуктивність СКП – постійна. Коефіцієнт рециркуляції повітря змінюється оператором дистанційно.

Якщо вважати продуктивність СКП постійною – основними збурюючими факторами є температура та вологість повітря, що проходить обробку на кліматичному обладнанні [282]. Для даного методу керування вологість повітря стабілізується за непрямим показником – температурою “точки роси” після зволожувача. Незалежно від початкової вологості повітря, вологість за зволожувачем становить біля 97 %. Таким чином, в загальному випадку обладнання кондиціонера можна представити у вигляді спрощеної структурної схеми із двома каналами впливу рис. 5.10. Для калориферів вихідна температура повітря $\Delta\theta_A$ залежить від температури теплоносія $\Delta\theta_{W0}$ та температури вхідного повітря $\Delta\theta_{A0}$. Для охолоджувача та зволожувача – від витрати холодоносія ΔG_W та температури вхідного повітря $\Delta\theta_{A0}$.

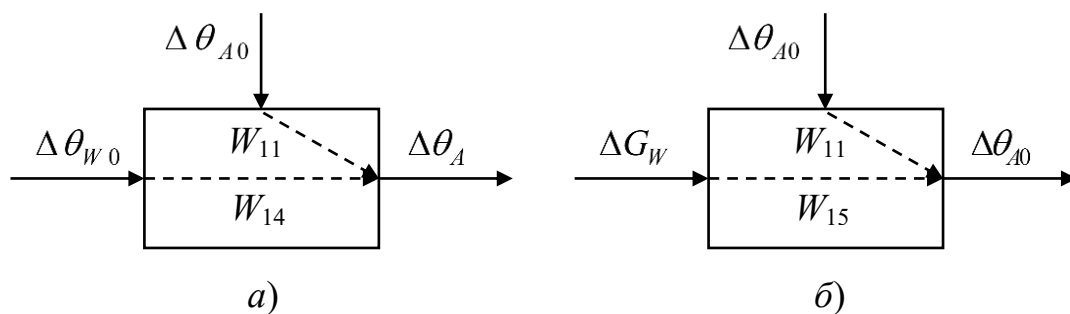


Рис. 5.10. Спрощена структурна схема кліматичного обладнання:

a – калорифери $K1, K2$; $б$ – охолоджувач O , зволожувач $З$

Враховуючи спрощені структури обладнання отримано розгорнуту структурну схему АСК, яка зображена на рис. 5.11. Тут прийнято такі позначення: K – коефіцієнт рециркуляції; $\Delta\theta_{A0}$, $\Delta\theta_A$ – відповідно температура припливного та рециркуляційного повітря; $\Delta\theta_A^3$ – температура “точки роси”; $\Delta\theta_A^{K2}$ – температура повітря на виході кондиціонера; ΔG_W^3 – витрата

холодоносія для камери зволоження; θ_{31} – завдання температури “точки роси”; θ_{32} – завдання температури повітря на виході кондиціонера; P1 – стабілізуючий регулятор температури “точки роси”; P2 – стабілізуючий регулятор температури повітря на виході кондиціонера; S_1 – комутатор АСК. Для каналів регулювання W_{14} (W_{15}) та збурення W_{11} прийнято позначення верхніх індексів обладнання: $K1$, $K2$ – калорифери першого та другого підігріву; O – охолоджувач; 3 – зволожувач. Витрата холодоносія ΔG_W^3 для зволожувача не враховується, оскільки витрата ΔG_W^3 становить $\leq 1.5\%$ витрати циркуляційної води у зволожувачі, що дозволяє знехтувати даним каналом впливу (W_{15}^3).

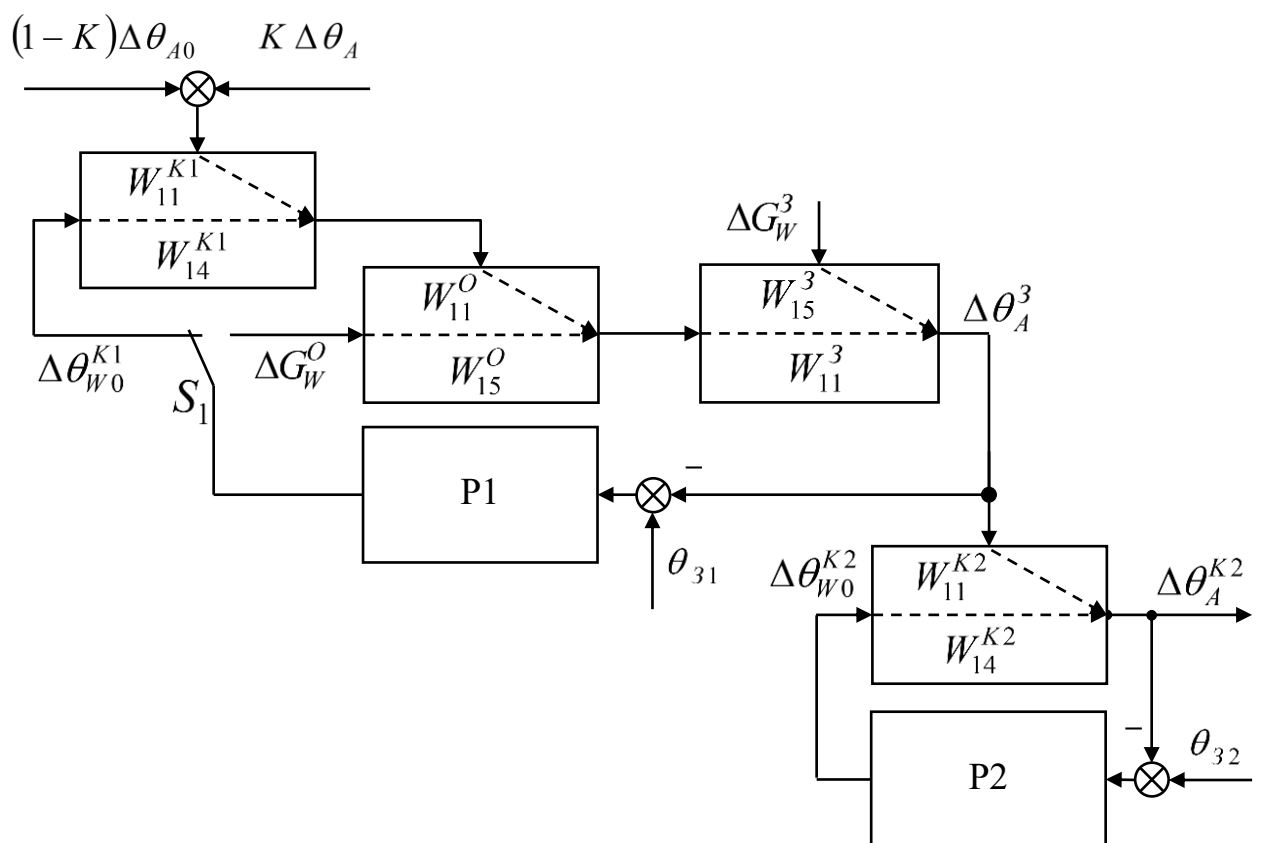


Рис. 5.11. Розгорнута структурна схема АСК кондиціонера

Виконавши відповідні перетворення над розгорнутою структурною схемою, отримаємо остаточний варіант структурної схеми АСК для промислової СКП, яку зображено рис. 5.12. Тут прийнято наступні позначення

каналів збурення та регулювання: $W_1 = W_{11}^{K1} W_{11}^O W_{11}^3$; $W_2 = W_{14}^{K1} W_{11}^O W_{11}^3$;
 $W_3 = W_{15}^O W_{11}^3$, $W_4 = W_1 W_{11}^{K2}$; $W_5 = W_2 W_{11}^{K2}$; $W_6 = W_3 W_{11}^{K2}$.

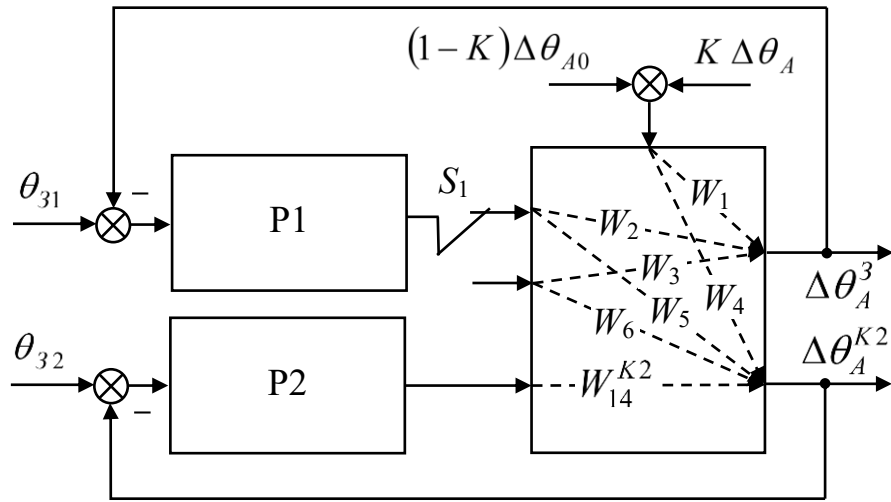


Рис. 5.12. Структурна схема АСК кондиціонера

Дану структурну схему слід класифікувати як АСК із змінною структурою та перехресним зв'язком впливу на контур стабілізації температури повітря калорифера $K2$ (канали впливу W_6 , W_5). Для даної структури основним збурюючим фактором, що впливає на роботу АСК є температура навколишнього повітря ($\Delta\theta_{A0}$), канали впливу: W_1 , W_4 . Враховуючи наявність тільки одного перехресного зв'язку та стабілізуючу функцію АСК промислового кондиціонера, налаштування регуляторів $P1$ та $P2$ можна проводити методами розрахунку одноконтурних АСР. Для цього потрібно провести декомпозицію АСК на дві АСР, як зображено на рис. 5.13. Регулятори $P1$ та $P2$ виконують стабілізуючі функції, з цих причин оптимізація параметрів налаштування регуляторів повинна проводитись за каналами збурення. Для регулятора $P1$ – канал збурення W_1 , для АСР необхідно передбачити змінні налаштування $P1$, так як динамічні властивості каналів регулювання W_2 та W_3 різні. Структура та параметри налаштування регулятора $P2$ можуть залишатися незмінними (структура та динамічні властивості каналу регулювання W_{14}^{K2} незмінні). Оптимізацію налаштувань регулятора $P2$

необхідно проводити за каналом збурення W_4 . Збурення за каналами W_6 та W_5 буде несуттєвим, враховуючи стабілізуючий контур із регулятором P1 [282].

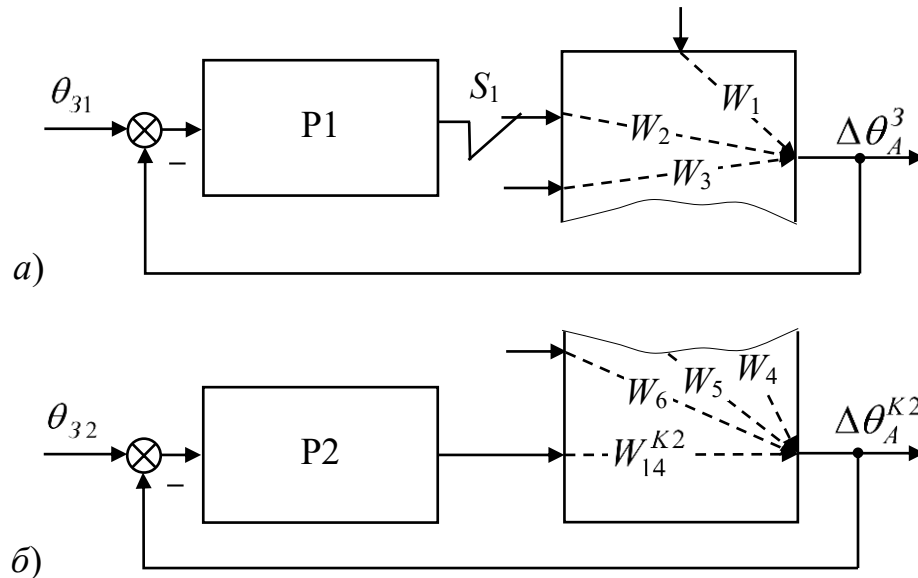


Рис. 5.13. Структурна схема одноконтурної АСК для оптимізації:
а) – регулятора P1; б) – регулятора P2

Керування прецизійними СКП передбачає використання каскадних систем стабілізації температури та вологості у приміщенні. Використовуючи розглянутий у даному пункті підхід побудови структурних схем, отримано структурну схему АСК для прецизійного кондиціонера, яка зображена на рис. 5.14. На схемі враховано динамічні властивості приміщення. Для позначення динамічних каналів приміщення прийнято верхній індекс Π , цифри нижнього індексу характеризують канали впливу (регулювання або збурення, див. п.3.5). Динамічні властивості каналів впливу для ПСЦК аналогічні рис. 5.12. Регулятор P3 служить для формування завдання регулятору P1; регулятор P4 – визначає завдання для регулятора P2.

Вологовміст повітряної суміші Δd_{A0}^{Π} , що надходить у приміщення можна визначити за температурою “точки роси”, використовуючи залежність (2.1) та враховуючи, що відносна вологість за зволожувачем становить $\varphi_A^3 \approx 0.97$.

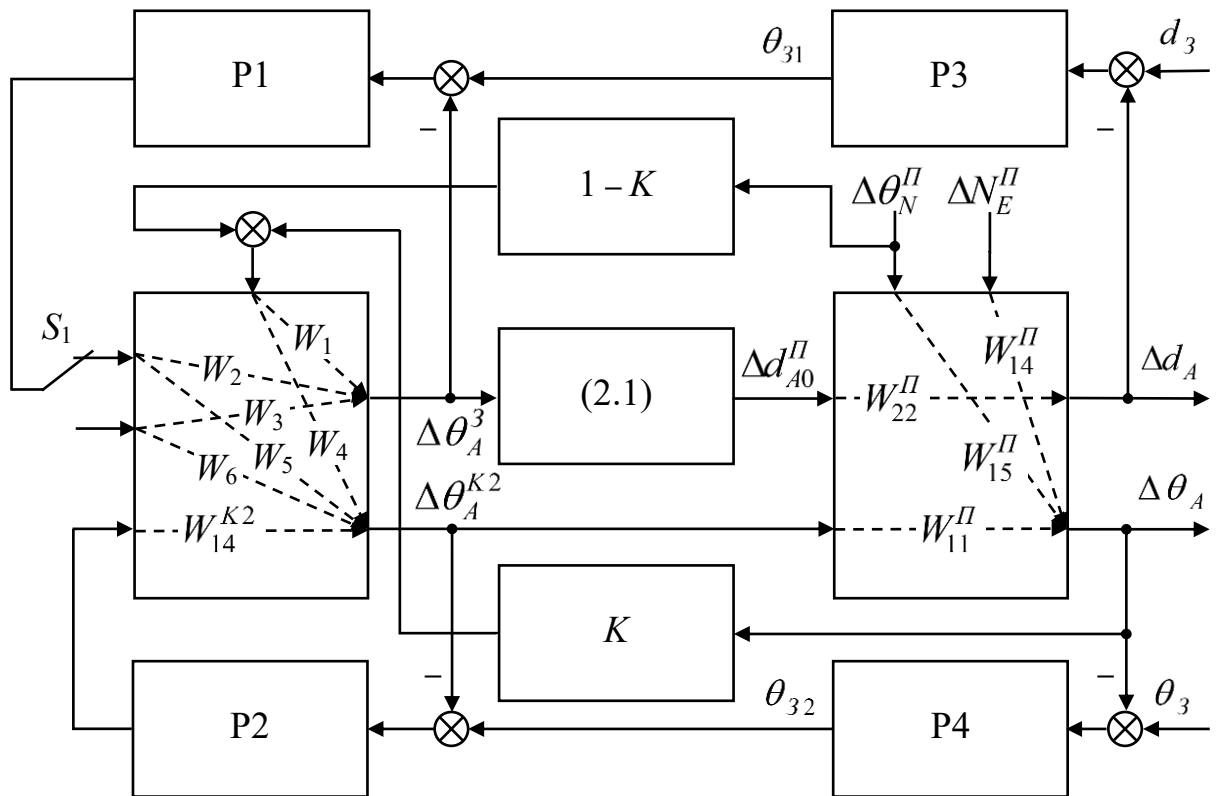


Рис. 5.14. Структурна схема АСК для прецизійного кондиціонера

Динамічні властивості каналів впливу для приміщення визначаються за (3.89), див. п.3.4. Аналітичне моделювання масообміну у приміщенні проводиться у величинах вологовмісту. Такий підхід дозволив уникнути перехресних зв'язків у структурній схемі приміщення та вирізняє отриману модель від існуючих. Висновки зроблені за структурною схемою рис. 5.12 щодо реалізації регуляторів P1 та P2 поширюються на структурну схему рис. 5.14. Для налаштування регуляторів P3 та P4 можна використовувати методи синтезу каскадних систем керування. Єдиною умовою для реалізації розглянутої каскадної АСК є контроль вологовмісту у приміщенні. Визначення вологовмісту повітря у приміщенні можна проводити програмним шляхом на керуючому контролері, використовуючи залежність (2.1) за вимірними значеннями температури та відносної вологості приміщення.

5.2.5 Структурні схеми керування кондиціонером для стабілізації температури та вологовмісту повітря за методом “оптимального режиму”

Для побудови структурних схем АСК кондиціонера із використанням алгоритму керування за “оптимальним режимом” за основу технологічну схему кондиціонера, що зображені на рис. 2.3 (з). Тут теплова потужність калориферів $K1$ та $K2$ регулюється зміною температури теплоносія, а теплова потужність охолоджувача O – зміною витрати холодоносія на охолоджувачі. Електрична потужність регулює продуктивність парозволожувача $ПЗ$. Продуктивність СКП постійна. Коефіцієнт рециркуляції повітря змінюється оператором дистанційно.

Якщо прийняти за постійну продуктивність СКП та стабільну температуру холодоносія – основними збурюючими факторами залишаться температура $\Delta\theta_{A0}$ та вологовміст Δd_{A0} повітря навколишнього середовища, що проходить обробку на обладнанні кондиціонера. Розглянемо структурні схеми для керування кліматичним обладнанням, враховуючи особливості тепломасообмінних процесів обладнання промислового кондиціонера [157, 158].

Структурні схеми для калориферів $K1$, $K2$ розглянуто у п.5.2.4 (температура повітря, що нагрівається не впливає на його вологовміст), див. рис. 5.10, а. Спрощена структурна схема охолоджувача O показана на рис. 5.15. За каналом регулювання охолоджувач впливає на температуру вихідного повітря та на вологість (якщо температура повітря стає меншою температури “точки роси” починається процес конденсації вологості). Відповідно, охолоджувач містить п’ять каналів впливу, позначення каналів прийнято у п.3.5. Для структурної схеми охолоджувача вихідна температура $\Delta\theta_A$ та вологовміст Δd_A повітря залежить від витрати холодоносія ΔG_W , температури $\Delta\theta_{A0}$ та вологості Δd_{A0} повітря, що надходить на охолоджувач.

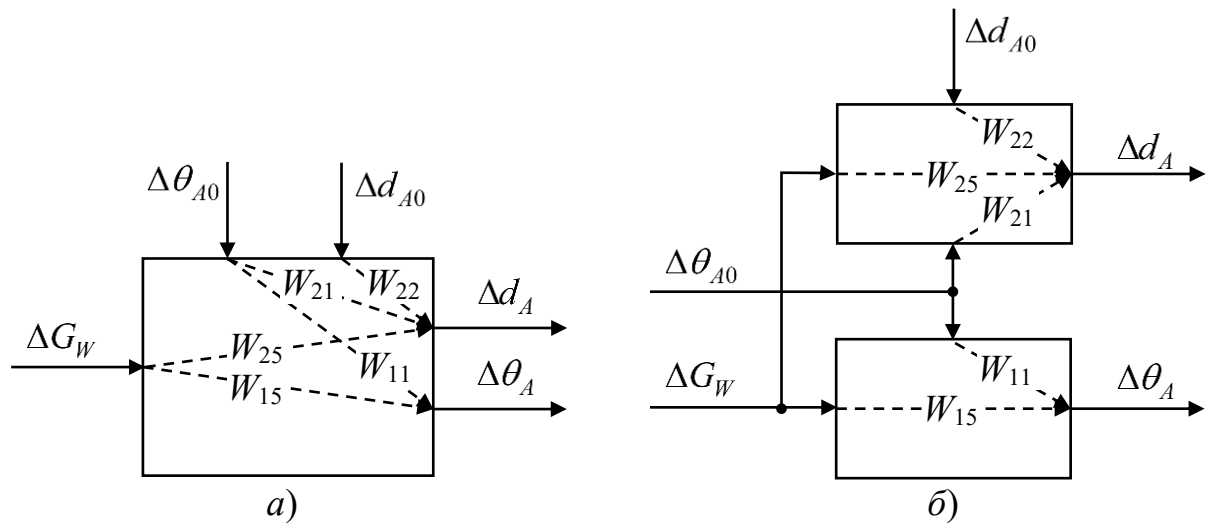


Рис. 5.15. Структурна схема охолоджувача: а – загальна; б – розгорнута

На рис. 5.16 показано структурну схему парового зволожувача. Обробка паром практично не впливає на температурні параметри повітря (п.1.3.2), тому спрощена структурна схема містить два канали впливу. Вологовміст на виході парозволожувача Δd_A залежить від вхідної вологості Δd_{A0} та потужності електроенергії ΔN_E , що надходить на парогенератор зволожувача.

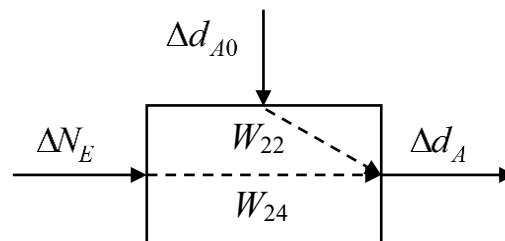


Рис. 5.16. Структурна схема парозволожувача

Для технологічної схеми СКП (див. рис. 2.3, з) отримано розгорнуту структурну схему АСК, яка представлена на рис. 5.17 із урахуванням спрощених структур кліматичного обладнання (див. рис. 5.10, а; рис. 5.15, б; рис. 5.16). Тут прийнято такі позначення: K – коефіцієнт рециркуляції; $\Delta\theta_{A0}$, $\Delta\theta_A$ – відповідно температура припливного та рециркуляційного повітря; Δd_{A0} , Δd_A – вологовміст припливного та рециркуляційного повітря; Δd_A^3 , $\Delta\theta_A^{K2}$ – вологовміст та температура повітря на виході із кондиціонера; d_{31} , θ_{31} – завдання вологості та температури повітря для регуляторів; $P1$ –

регулятор вологості (поз. 2–2, рис. 1.18); P2 – регулятор температури повітря на виході кондиціонера (поз. 1–2, рис. 1.18); S_1 , S_2 – комутатори АСК. Для каналів регулювання та збурення прийнято позначення верхніх індексів обладнання: K1, K2 – калорифери першого та другого підігріву; О – охолоджувач; З – паровий зволожувач.

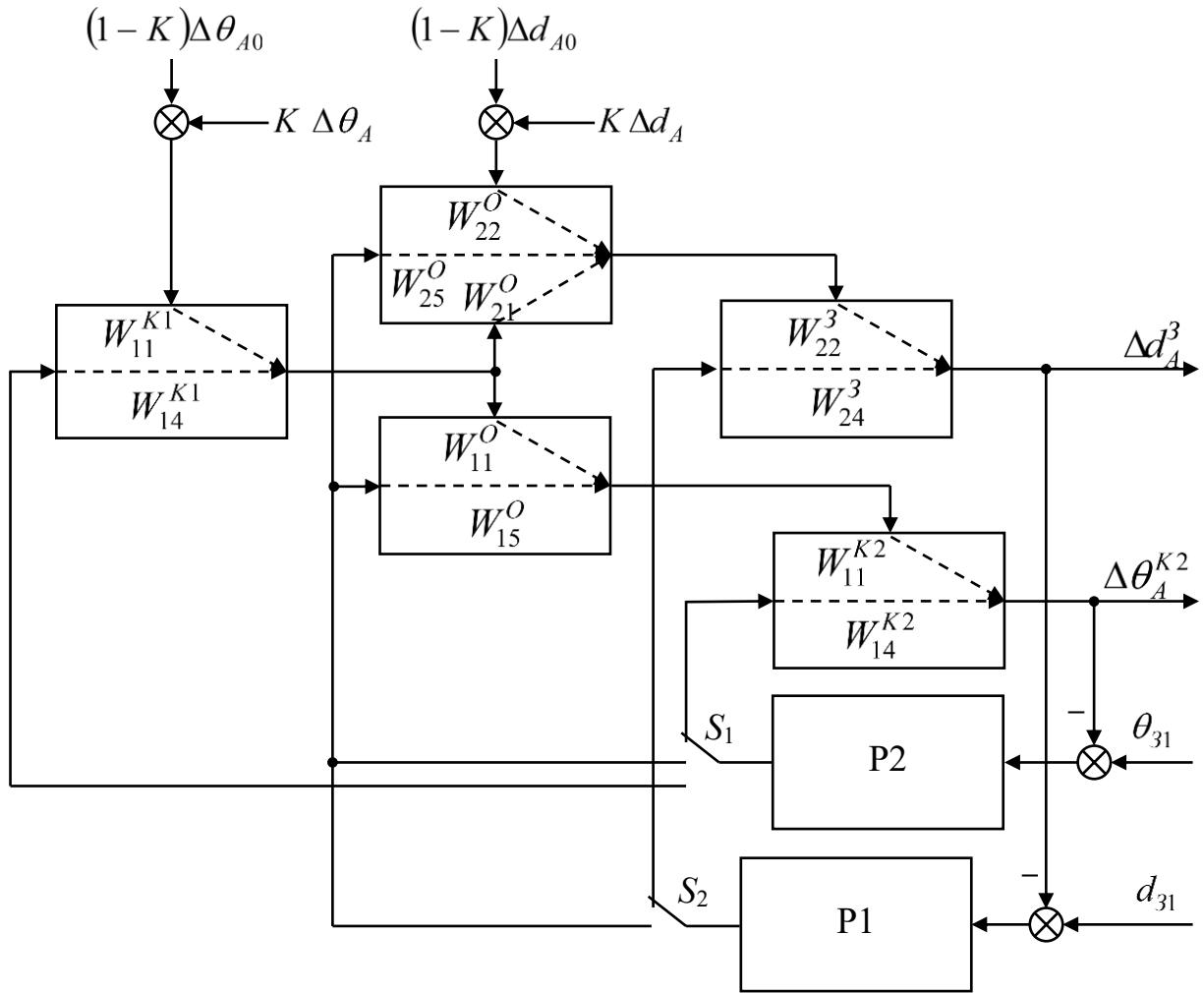


Рис. 5.17. Розгорнута структурна схема АСК кондиціонера

Виконавши відповідні перетворення над розгорнутою структурною схемою рис. 5.17 отримаємо остаточний варіант структурної схеми СКП із парозволожувачем, яка представлено рис. 5.18. У схемі прийнято наступні позначення каналів регулювання та збурення: $W_1 = W_{14}^{K2}$; $W_2 = W_{15}^O W_{11}^{K2}$; $W_3 = W_{14}^{K1} W_{11}^O W_{11}^{K2}$; $W_4 = W_{24}^3$; $W_5 = W_{25}^O W_{22}^3$; $W_6 = W_{11}^{K1} W_{11}^O W_{11}^{K2}$; $W_7 = W_{22}^O W_{22}^3$; $W_8 = W_{11}^{K1} W_{21}^O W_{22}^3$; $W_9 = W_{25}^O W_{22}^3$; $W_{10} = W_{14}^{K1} W_{21}^O W_{22}^3$, $W_{11} = W_{15}^O W_{11}^{K2}$.

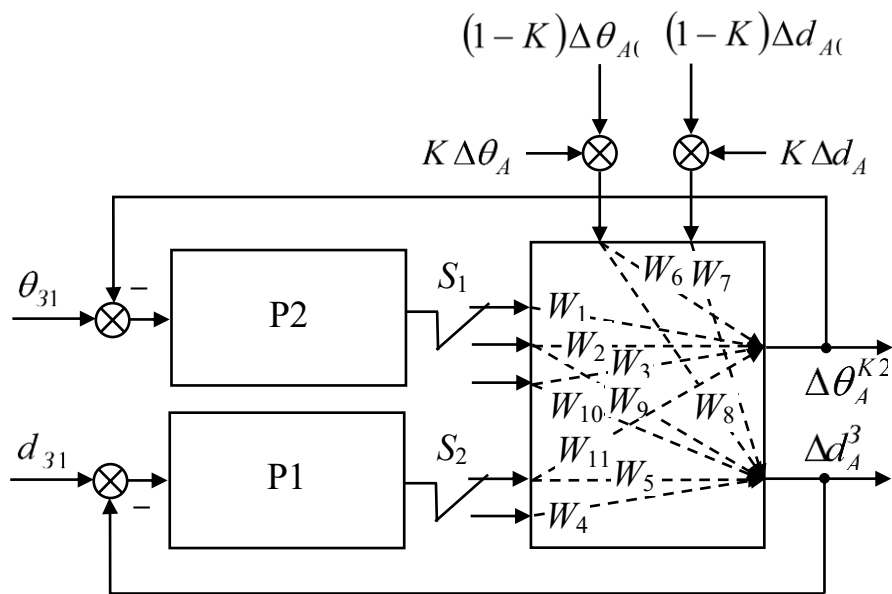


Рис. 5.18. Структурна схема АСК кондиціонера

Отримана структурна схема із змінною структурою та перехресним зв'язком впливу на контур стабілізації вологості на виході із кондиціонера, канали впливу: W_9, W_{10} . Основними збурюючими чинниками на роботу АСК є температура ($\Delta\theta_{A0}$) та вологість (Δd_{A0}) навколишнього повітря, канали впливу: W_6, W_7, W_8 . Враховуючи наявність тільки одного перехресного зв'язку та стабілізуючу функцію АСК промислового кондиціонера, налаштування регуляторів P1 та P2 можна проводити методами розрахунку одноконтурних АСР. Так як динамічні властивості ОК змінюється за обома каналами стабілізації, для регуляторів P1 та P2 необхідно передбачити змінні налаштування, в залежності від каналу регулювання.

Управління прецизійними СКП за методом “оптимального керування” реалізується використовуючи каскадні системи стабілізації температури та вологості у приміщенні. На рис. 5.19 зображена структурна схема АСК прецизійного кондиціонера, де враховано динамічні властивості приміщення. Динамічні властивості каналів впливу ПСЦК аналогічні рис. 5.18. Регулятор P3 служить для формування завдання регулятору P1; регулятор P4 – визначає завдання для регулятора P2. Висновки зроблені за структурною схемою рис. 5.18 щодо реалізації регуляторів P1 та P2 поширюються на структурну схему

рис. 5.19. Для налаштування регуляторів P3 та P4 можна використовувати існуючі методи синтезу каскадних систем керування. Визначення вологовмісту повітря у приміщенні та на виході ПСЦК можна проводити програмним шляхом за залежністю (2.1).

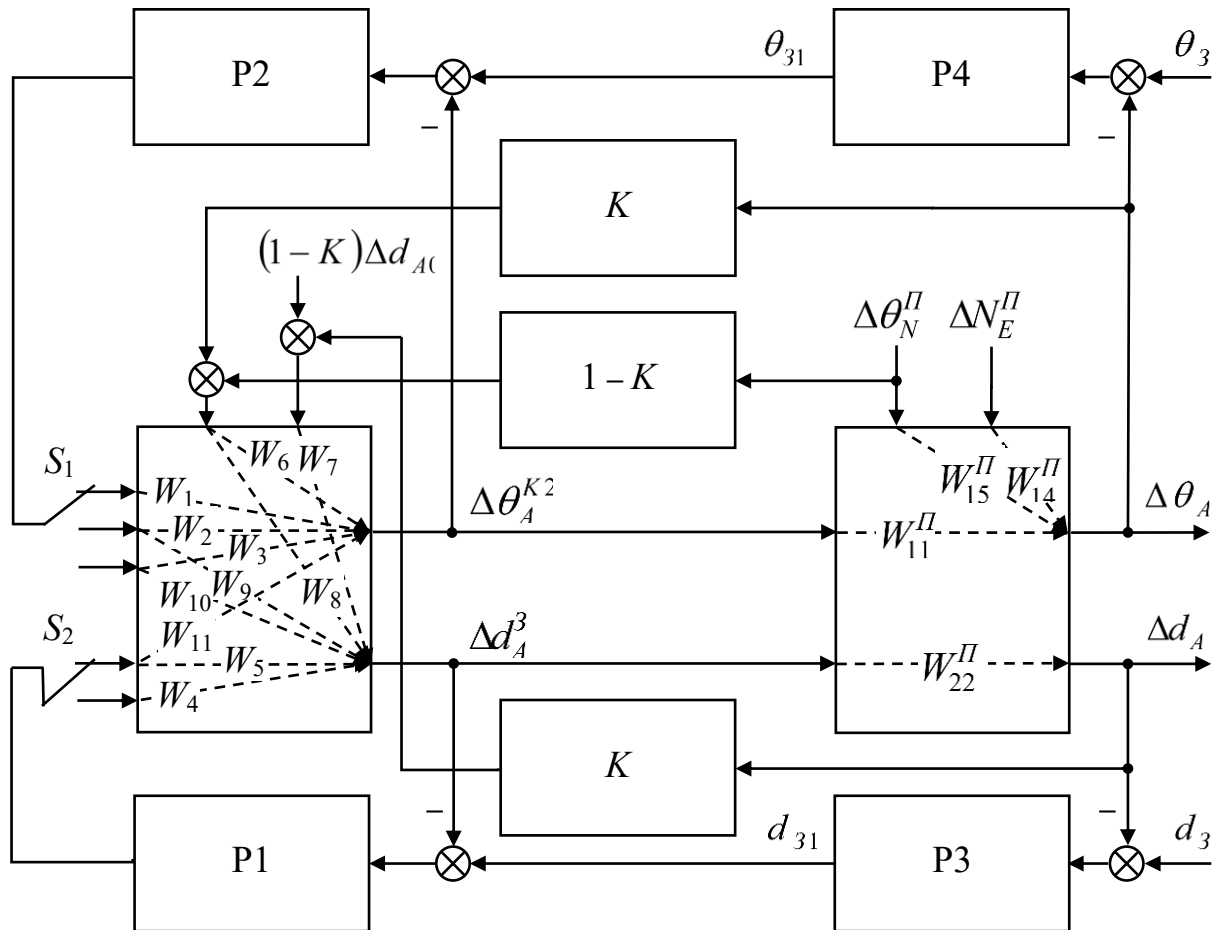


Рис. 5.19. Структурна схема АСК для прецизійного кондиціонера

Приклади імітаційного моделювання адаптації традиційної АСК кондиціонером із використанням запропонованої процедури оптимізації (п. 5.2.3) та розроблених структурних схем наведено у п.5.4. Такий підхід дозволить порівняти ефективність функціонування традиційних та багатовимірних АСК. У наступному підрозділі розглянемо особливості адаптації багатовимірних АСК.

5.3 Адаптація багатовимірних систем керування для комплексів штучного мікроклімату

У п.5.2.2 для оптимізації одновимірних систем керування запропоновано критерій (5.16). Використання цього критерію для оптимізації багатовимірних систем керування у просторі станів приводить до ряду математичних ускладнень. По-перше, у критерії (5.16) враховуються коефіцієнти передачі ОК за каналами регулювання та збурення. Для математичних моделей ОК у просторі станів коефіцієнти передачі за каналами впливу визначаються матрицею **B** та входять до неї неявно (коефіцієнт передачі ділиться на інерційність динамічного елементу каналу впливу ОК, див. моделі ОК за табл. 3.1). Враховуючи велику розмірність комплексних моделей (4.9) – (4.12), визначення коефіцієнтів передачі за каналами впливу ОК є нетривіальною задачею. По-друге, інтегральний критерій (5.16) є складовий, що містить модульний ($Nvr=1$) та квадратичний ($Nvr=2$) критерій якості. Якщо пошук оптимуму для складних динамічних систем за квадратичним критерієм має аналітичний розв’язок, то оптимізація динамічних систем за модульними критеріями ведеться чисельно [283 – 285].

5.3.1 Аналіз критерію якості, умови керованості, спостережуваності та постановка задачі оптимізації для багатовимірних систем штучного мікроклімату

Враховуючи міркування п. 5.3, для оптимізації багатовимірної системи керування із комплексними моделями СКП (4.9) – (4.12) пропонується використати дискретний аналог критерію (5.4):

$$I = \mathbf{X}_N^T \mathbf{S} \mathbf{X}_N + \sum_{s=0}^{N-1} [\mathbf{x}_s^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_s + \mathbf{u}_s^T \mathbf{R} \mathbf{u}_s], \quad (5.17)$$

де, **S**, **Q** – вагові додатні напіввизначені матриці; **R** – вагова симетрична додатна матриця; **X_s**, **U_s** – відповідно вектор стану та вектор керування об’єкта на *s*-му кроці дискретизації із періодом T_{KV} , *N* – кількість кроків спостереження.

Проведемо аналіз критерію якості (5.17). Квадратичне зважування змінних стану $\mathbf{X}_s$ (за рахунок $\mathbf{S}$ та $\mathbf{Q}$) дозволяє досягти бажаної якості керування, але квадратичне зважування сигналу керування $\mathbf{U}_s$ (за рахунок $\mathbf{R}$) не досить обґрунтовано, особливо якщо вартість ресурсів керування не велика. У деяких випадках квадратичне зважування заміняє собою явні обмеження на величину сигналів керування і дозволяє одержати оптимальний закон зворотного зв'язку у аналітичному вигляді. Проте, для такого випадку не зовсім зрозумілий фізичний зміст оптимальності для критерію (5.17), так як у одне значення інтегруються змінні стану $\mathbf{X}_s$ та сигнали управління $\mathbf{U}_s$. Окрім того, у [286] автор стверджує, що завдання занадто великих вагових матриць $\mathbf{R}$ викликає відхилення фактичного кінцевого стану від заданого (призводить до статичної похибки керування), а занадто малих – викликає значні форсуючі значення $\mathbf{U}$ (призводить до коливних перехідних процесів). Основними обмеженнями (5.17) є вимога позитивної визначеності матриці $\mathbf{R}$ та неможливість завдання явних обмежень на $\mathbf{X}$, $\mathbf{U}$. Позитивною стороною критерію (5.17) є можливість аналітичного синтезу оптимального регулятора стану за даним критерієм.

В загальному випадку неперервну модель СКП в просторі станів можна подати як [159, 184, 249]

$$\begin{cases} \mathbf{X}' = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X}. \end{cases} \quad (5.18)$$

Система (5.18) є повністю керованою, якщо існує керуючий вплив $\mathbf{U}(t)$, який дозволяє перевести систему із початкового стану $\mathbf{X}(t_0)$ в кінцевий стан $\mathbf{X}(t_1)$ за кінцевий час $t_1 - t_0$, або згідно критерію керованості [287], коли ранг матриці керованості $\mathbf{L}$ дорівнює n , де n – розмірність лінійного простору

$$\text{rank } \mathbf{L} = \text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{A}\mathbf{B} & \dots & \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B} \end{bmatrix} = n = \dim \mathbf{X}. \quad (5.19)$$

Неперервна система (5.18) є спостережуваною, якщо вектор стану $\mathbf{X}(t_0)$ можна визначити за $\mathbf{Y}(t)$ на деякому інтервалі часу $t \in (t_0, t_1)$. Якщо це справедливо для будь-якого t_0 , то система називається повністю

спостережуваною. За критерієм спостережливості система (5.18) спостережлива, коли ранг матриці спостережливості $\mathbf{H}$ дорівнює n

$$\text{rank } \mathbf{H} = \text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{C}^T & \mathbf{A}^T \mathbf{C}^T & \dots & (\mathbf{A}^T)^{n-1} \mathbf{C}^T \end{bmatrix} = n = \dim \mathbf{X} \quad (5.20)$$

Комплексна модель СКП (5.18) формується як послідовне (паралельне або кільцеве) з'єднання підсистем із кліматичного обладнання кондиціонера. В залежності від технології кондиціонування повітря кількість інтегрованих підсистем різниться. У п. 4.4.2, п. 4.4.3 отримано динамічні моделі СКП у просторі станів де інтегрована система (5.18) містить 4 або 6 підсистем для промислового або прецизійного кондиціонера відповідно. При проектуванні комплексної моделі СКП (5.18) виходи попередньої підсистеми мають впливати на входи наступної. Матриці комутаційних зв'язків $\mathbf{C}_i$ є компонентами матриці стану $\mathbf{A}$ математичних моделей СКП (4.9) – (4.12) та однозначно “трансляють” вихідні змінні стану попередньої підсистеми на входи наступної без втрат зв'язків комутації, тому керованість та спостережливість комплексної системи (5.18) обумовлюється відповідними властивостями математичних моделей кліматичного обладнання (3.9), (3.24), (3.38), (3.56), (3.69), (3.77), (3.83).

В загальному випадку керованість та спостережливість для системи (5.18) визначається за (5.19) та (5.20) використовуючи чисельні значення матриць рівнянь простору станів $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ та $\mathbf{C}$, які шукаються за (4.9) – (4.12) в залежності від технології кондиціонування повітря.

Постановка задачі оптимізації. Задачу синтезу оптимального лінійно-квадратичного цифрового регулятора (ЛКЦР) для СКП можна сформулювати наступним чином [288, 289]. Нехай, модель СКП у просторі станів задано (5.18). Потрібно синтезувати матрицю зворотного зв'язку $\mathbf{K}_d$ ЛКЦР, яка за параметрами стану ОК визначить траєкторію вектору оптимального впливу $\mathbf{U}_s^o$ для $s = 1, 2, \dots, N-1$, що мінімізує квадратичний критерій якості (5.17). Постановка задачі оптимізації є загальною та стосується п.5.3.2 – п.5.3.4.

5.3.2 Синтез лінійно-квадратичного цифрового регулятора для технологічних комплексів штучного мікроклімату

На сьогодні теорія оптимізації динамічних систем накопичила багато підходів до синтезу оптимальних регуляторів для систем керування, які мають розв'язок у вигляді пропорційних матриць зворотного зв'язку [189, 287]. Як відомо, із класичної теорії керування, пропорційні регулятори не забезпечують точного відслідковування завдання та не повністю компенсують зовнішні збурення у системі керування [172, 178]. З цих причин необхідно переформулювати постановку завдання синтезу регулятора стану таким чином, щоб у керуванні з'явилася інтегральна складова, яка компенсує статичний небаланс регулювання. Це можна зробити декількома способами [286, 290].

Один з них [290] – розширення простору станів (5.18) шляхом доповнення n -мірного вектору $\mathbf{X}$ станів p -мірним вектором за яким необхідно мати інтегруючий вплив на ОК

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{C} \mathbf{X}. \quad (5.21)$$

В результаті зростає розмірність вектору станів на p (на кількість нових змінних), простір станів опишеться $(p + n)$ -мірним вектором, а розширена модель ОК в просторі станів прийме вигляд

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}' \\ \mathbf{Z}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{U}. \quad (5.22)$$

Для розширеного простору станів неперервної моделі (5.22) лінійно-квадратичний регулятор формує ПІ-закон керування

$$\mathbf{U} = -\mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} = -\mathbf{K}_p \mathbf{X} - \mathbf{K}_i \mathbf{Z} = -\mathbf{K}_p \mathbf{X} - \mathbf{K}_i \mathbf{C} \int_0^{t_f} \mathbf{X} dt, \quad (5.23)$$

тут $\mathbf{K}$ – матриця багатовимірного регулятора, що складається із пропорційної $\mathbf{K}_p$ та інтегральної $\mathbf{K}_i$ частин. Необхідною умовою існування такого регулятора є виконання нерівності $p < m$, тобто число змінних стану для яких вводиться інтегральний вплив не може бути більшим числа змінних керування.

Перед усім, неперервну модель ОК (5.18) необхідно розширити на змінні стану (5.21) за якими необхідно мати інтегральну складову у законі керування та отримати розширену модель ОК у просторі станів (5.22). Далі, розширену неперервну модель ОК потрібно привести до дискретного виду

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{s+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{X}_s + \mathbf{B}_d \mathbf{U}_s ; \\ \mathbf{Y}_s = \mathbf{C}_d \mathbf{X}_s , \end{cases} \quad (5.24)$$

де $\mathbf{A}_d = e^{\mathbf{A}T_{KV}}$, $\mathbf{B}_d = \int_0^{T_{KV}} e^{\mathbf{A}(T_{KV}-\tau)} \mathbf{B} d\tau$. Структурна схема дискретної моделі ОК (5.24) зображена на рис. 5.20.

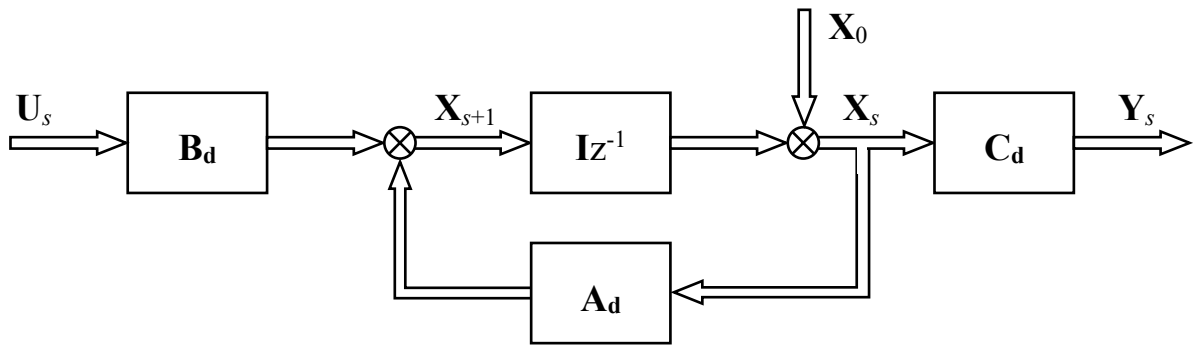


Рис. 5.20. Структурна схема дискретної моделі ОК

Оптимальний ЛКЦР представляється залежністю [189, 287]

$$\mathbf{U}_s = -\mathbf{K}_d \mathbf{X}_s . \quad (5.25)$$

Регулятор формує зворотний зв'язок за станом змінних ОК, використовуючи матрицю коефіцієнтів передачі $\mathbf{K}$.

Матриця зворотного зв'язку визначається залежністю

$$\mathbf{K}_d = (\mathbf{R} + \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d)^{-1} \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{A}_d . \quad (5.26)$$

Параметри такого регулятора визначаються в результаті рішення рівняння Ріккати. При $\mathbf{P} = \mathbf{P}_0$ проводиться розв'язок стаціонарного матричного рівняння Ріккати

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q} + \mathbf{A}_d^T \mathbf{P} \left[\mathbf{I} - \mathbf{B}_d (\mathbf{R} + \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d)^{-1} \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \right] \mathbf{A}_d . \quad (5.27)$$

Процедура синтезу ЛКЦР зводиться до наступної послідовності дій:

- 1) задаються параметри критерію (5.17) відповідно до технологічних вимог виробництва;
- 2) формується розширена неперервна модель ОК (5.22);
- 3) на основі (5.22) визначається дискретна модель ОК (5.24);
- 4) шукається розв'язок рівняння Рікатті (5.27);
- 5) за залежністю (5.26) визначаються ЛКЦР.

Структурна схема АСК із оптимальним ЛКЦР представлена на рис. 5.21.

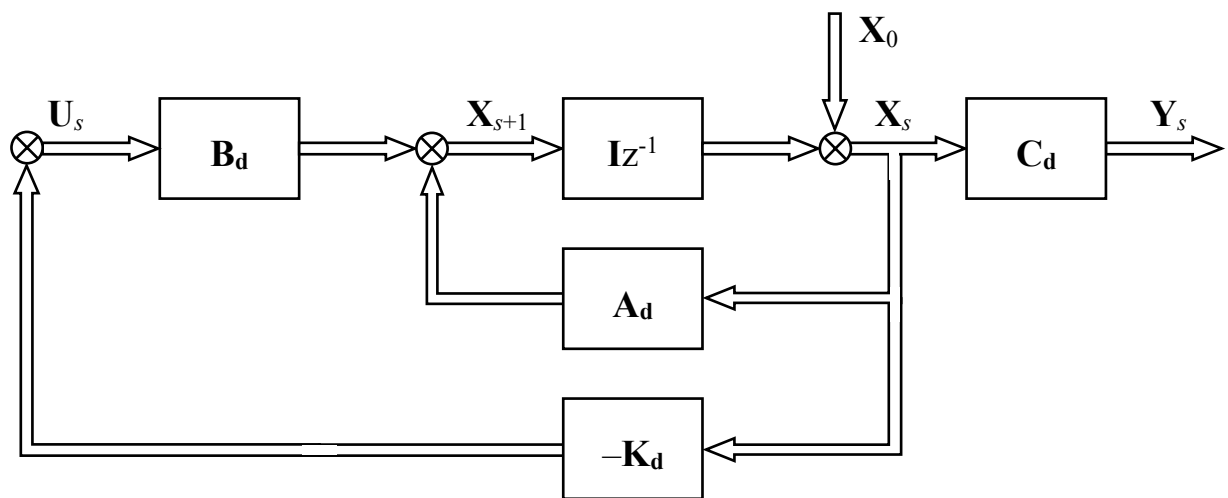


Рис. 5.21. Структурна схема цифрової АСК

Для стабілізації температури та вологості на виході кондиціонера (або у приміщенні) використовується від 3-ох до 5-ти одиниць кліматичного обладнання (в залежності від технології кондиціювання, див. п.2.3, п.2.4). При цьому, у керуванні приймає участь не більше 2-х апаратів, так як регулюється два параметри – температура та вологість повітря. Із теорії керування відомо, що кількість параметрів регулювання повинна дорівнювати кількості керуючих впливів на ОК. У даному випадку кількість регулюючих каналів більша за кількість параметрів стабілізації. З цих причин виникає задача коректного логічного вибору обладнання для здійснення керуючих впливів. Дана особливість накладає обмеження на використання класичної процедури синтезу оптимального ЛКЦР. Враховуючи наявність логічних перемикачів між обладнанням кондиціонера задачу синтезу необхідно поділити на окремі

підзадачі, що дозволить врахувати наявність логічного керування [249, 251]. Синтез ЛКЦР для СКП із елементами логічного керування розглянуто у подальших підрозділах.

5.3.3 Адаптація цифрового регулятора для кондиціонера з форсуночним зволожувачем

Кондиціонер із форсуночним зволожувачем орієнтований на застосування алгоритму керування за методом “точки роси”, (п. 1.5). Характерним для даного методу керування є: стабілізація температури “точки роси”, шляхом зміни температури теплоносія калорифера $K1$ у зимову пору року, або зміни витрати холодоносія охолоджувача O у літню пору року; стабілізація температури повітря на виході ПСЦК, шляхом зміни температури теплоносія калорифера $K2$; сотовий (або форсуночний) зволожувач $C3$ ($\Phi3$) адіабатно зволожує припливне повітря, у піддоні постійно підтримується необхідний рівень води на зрошення, але безпосередньої участі у процесі керування зволожувач не приймає (рис. 2.3, в).

На рис. 5.22 представлено $h - d$ діаграму процесу кондиціонування повітря за методом “точки роси” в координатах математичної моделі (4.9) де на осях абсцис та ординат відкладено змінні простору станів [291]. Вертикальну вісь відкладено у температурних параметрах, а горизонтальну – у параметрах вологовмісту. Для моделі (4.9) температура повітря на вході кондиціонера може змінюватися в діапазоні $\theta_{A0}^{\min} - \theta_{A0}^{\max}$, а вологовміст – $d_0^{\min} - d_0^{\max}$. На діаграмі зображено 6 областей.

Область IV має форму паралелограма, в рамках якої знаходяться задане значення температури та вологовмісту на виході припливної установки кондиціонера. Відповідно до $h - d$ діаграми, АСК повинна забезпечити стабілізацію мікроклімату на виході ПСЦК в діапазоні допустимої зони розбалансу для температури ($x_{12}^{\min} - x_{12}^{\max}$) та вологовмісту ($x_{13}^{\min} - x_{13}^{\max}$) повітря. Щоб підтримувати необхідний вологовміст повітря за методом “точки роси”,

АСК кондиціонера забезпечує стабілізацію температури “точки роси” за зволожувачем в діапазоні $x_9^{\min} - x_9^{\max}$.

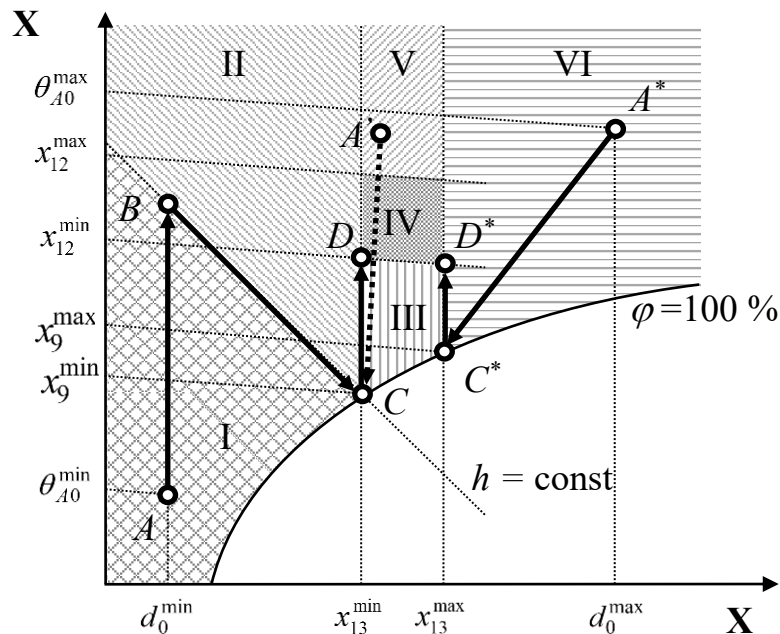


Рис. 5.22. $h - d$ діаграма в координатах математичної моделі (4.9)

У кондиціонерах де реалізується алгоритм керування за методом “точки роси” система керування завжди підтримує після зволожувача температуру повітря рівною “точці роси”. При цьому, якщо параметри мікроклімату знаходяться у зонах III, IV або V то спочатку повітря охолоджується до температури “точки роси”, а далі, повторно нагрівається калорифером K_2 до температури завдання. На рис. 5.22 представлено приклад процесу кондиціювання прямими $A'C$ та CD . При цьому проходить невиправдане переохолодження повітря із подальшим його нагрівом. Для даного випадку достатньо тільки охолодити повітря, щоб перейти із області V в область IV. Для зменшення енерговитрат на процес кондиціювання за методом “точки роси” можна запропонувати оптимально-логічно-неперервне керування кліматичним обладнанням, що збільшує енергетичну ефективність кондиціонера.

Аналіз областей $h - d$ діаграми (рис. 5.22) дозволяє дати рекомендації щодо логічної роботи кліматичного обладнання для модифікованого алгоритму керування АСК кондиціонера за методом “точки роси”.

Область I. АСК стабілізує:

- температуру “точки роси” впливом на калорифер $K1$;
- температуру повітря на виході ПСЦК впливом на калорифер $K2$.

Область II. АСК стабілізує:

- температуру “точки роси” впливом на охолоджувач O ;
- температуру повітря на виході ПСЦК впливом на калорифер $K2$.

Область III. АСК стабілізує:

- температуру повітря на виході ПСЦК впливом на калорифер $K2$, інше кліматичне обладнання участі у регулюванні не приймає, вологовміст повітря знаходиться у допустимих межах.

Область IV. Параметри мікроклімату знаходяться у допустимих межах, регулюючі клапани обладнання у закритому положенні.

Область V. АСК стабілізує:

- температуру повітря на виході ПСЦК впливом на охолоджувач O , інше кліматичне обладнання участі у регулювання не приймає, вологовміст повітря знаходиться у допустимих межах.

Область VI. АСК стабілізує:

- температуру “точки роси” впливом на охолоджувач O ;
- температуру повітря на виході ПСЦК впливом на калорифер $K2$.

Для синтезу оптимального ЛКЦР, що реалізує ПІ-закон регулювання розширимо математичну модель (4.9) змінними стану за якими необхідно мати інтегральний закон керування. У даному випадку стабілізується температура “точки роси” за зволожувачем та температура на виході ПСЦК, вибір яких здійснюється матрицею C моделі (4.9). Із урахуванням вказаних міркувань, розширена неперервна модель ОК для промислового кондиціонера прийме вигляд

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{X}' \\ \mathbf{Z}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{I..VI} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{U}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C} \mathbf{X}, \end{cases} \quad (5.28)$$

$$\text{де } \mathbf{B}_I = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1^{K1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{K2} \end{bmatrix}; \mathbf{B}_{II} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^O & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{K2} \end{bmatrix}; \mathbf{B}_{III} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{K2} \end{bmatrix};$$

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

Наповнення матриці керування $\mathbf{B}_{I..VI}$ для шести областей $h-d$ діаграми різне, що дозволяє організувати логіку перемикання кліматичного обладнання в залежності від параметрів мікроклімату навколишнього середовища для промислового кондиціонера із форсуночним зволожувачем за модифікованим методом “точки роси”.

Таким чином, враховуючи що матриця керування $\mathbf{B}_{I..VI}$ для кожної із шести областей $h-d$ діаграми індивідуальна, необхідно синтезувати матрицю зворотного зв'язку $\mathbf{K}_{dI..VI}$ за залежністю (5.26) для усіх областей. Для синтезу ЛКЦР слід використовувати стандартну процедуру синтезу, яку розглянуто в п.5.3.2 Область II та V $h-d$ діаграми для кліматичних умов України не актуальна, тому синтез $\mathbf{K}_{dII}$ та $\mathbf{K}_{dV}$ скоріше формальний ніж необхідний. У алгоритмі керування системою кондиціонування за модифікованим методом “точки роси” необхідно передбачити контроль параметрів мікроклімату навколишнього середовища і перемикання між матрицями зворотного зв'язку $\mathbf{K}_{dI..VI}$ за виміряними параметрами мікроклімату навколишнього середовища. Вологовміст повітря пропонується визначати програмним способом за моделлю (2.1) (або аналогічною емпіричною залежністю) та виміряними значеннями температури та відносної вологості повітря.

Розглянемо прецизійний кондиціонер із форсуночним зволожувачем орієнтований на використання алгоритму керування за методом “точки роси” [249 – 251]. Процедура адаптації ЛКЦР аналогічна попередній із деякими особливостями. Зупинимося на особливостях, опускаючи розглянутий матеріал.

На рис. 5.23 представлено $h - d$ діаграму процесу кондиціювання повітря за методом “точки роси” в координатах математичної моделі (4.10). На прецизійний кондиціонер надходить зовнішнє повітря температура якого може змінюватися в діапазоні $\theta_{A0}^{\min} - \theta_{A0}^{\max}$, а вологовміст – $d_0^{\min} - d_0^{\max}$. Припливне повітря змішується із рециркуляційним у камері змішування $K3$ (температура рециркуляційного повітря x_{21} , вологовміст – x_{22}). Після змішування припливного та рециркуляційного повітря повітряна суміш із параметрами температури x_1 та вологовмісту – x_2 надходить на калорифер $K1$. Під дією збурень параметри навколишнього та рециркуляційного повітря можуть змінюватися. З цих міркувань узагальненими змінними збурення виступають температура та вологовміст повітря після камери змішування $K3$, які можуть змінюватися для температури в діапазоні $x_1^{\min} - x_1^{\max}$ та вологовмісту – $x_2^{\min} - x_2^{\max}$. На діаграмі 6 областей, де зображено процес обробки повітря із врахуванням тепло- та масообмінних процесів у камері змішування.

Область IV задовольняє необхідне значення мікроклімату для приміщення у діапазоні температур $x_{18}^{\min} - x_{18}^{\max}$ та вологовмісту – $x_{19}^{\min} - x_{19}^{\max}$. Щоб підтримувати необхідний вологовміст повітря у приміщенні за методом “точки роси”, АСК кондиціонера повинна забезпечити стабілізацію температури “точки роси” за зволожувачем у діапазоні $x_{11}^{\min} - x_{11}^{\max}$.

Алгоритм логічного перемикання між кліматичним обладнанням аналогічний розглянутому у даному підрозділі. Для ідентифікації областей перемикання обладнання пропонується використовувати параметри

мікроклімату після камери змішування $[x_1, x_2]$, які характеризують узагальнене збурення як зі сторони навколишнього середовища, так і зі сторони приміщення Π .

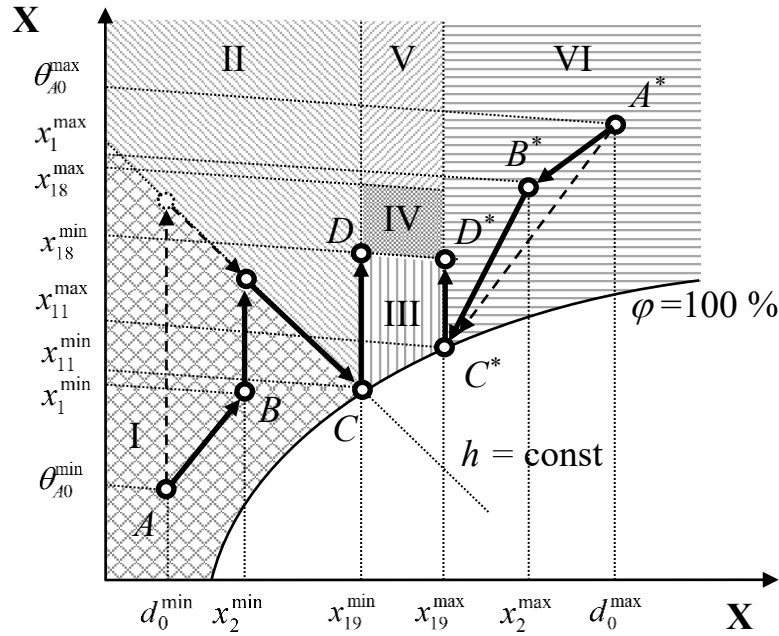


Рис. 5.23. $H-d$ діаграма в координатах математичної моделі (4.10)

Для синтезу оптимального ЛКЦР розширимо математичну модель (4.10) параметрами станів за якими необхідно мати інтегральний закон керування. Розширена неперервна модель ОК для прецизійного кондиціонера із форсуночним зволожувачем прийме вигляд

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{X}' \\ \mathbf{Z}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{I..VI} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{U}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C} \mathbf{X}, \end{cases} \quad (5.29)$$

$$\text{де } \mathbf{B}_I = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_1^{K1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{K2} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_{II} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^O & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{K2} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_{III} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{K2} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix};$$

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

Наповнення матриці керування $\mathbf{B}_{I...VI}$ для шести областей $h-d$ діаграми рис. 5.23. різне, що дозволяє організувати логіку перемикання кліматичного обладнання в залежності від параметрів мікроклімату у камері змішування $K3$.

Як і в попередньому підрозділі, матриця керування $\mathbf{B}_{I...VI}$ для шести областей $h-d$ діаграми індивідуальна, що викликає необхідність синтезу матриці зворотного зв'язку $\mathbf{K}_{dI-VI}$ за залежністю (5.26) для кожної області. Адаптація ЛКЦР для прецизійного кондиціонера із форсуночним зволожувачем не передбачає керування камерою змішування $K3$. Для оптимізації енерговитрат у процесі підготовки повітря зміну коефіцієнта рециркуляції необхідно передбачити на рівні ЦД СКП КФС.

5.3.4 Адаптація цифрового регулятора для кондиціонера з паровим зволожувачем

Кондиціонер із паровим зволожувачем орієнтований на застосування алгоритму керування за методом “оптимального режиму”, див. п.1.5. Для даного методу керування АСК стабілізує температуру та вологість на виході ПСЦК (рис. 2.3, з), шляхом регулюючих впливів на кліматичне обладнання, при цьому безпосередню участь у регулюванні приймає тільки два технологічні апарати із чотирьох можливих [292].

Розглянемо процес кондиціювання повітря за методом “оптимального режиму” в координатах математичної моделі (4.11). На рис. 5.24 представлено $h-d$ діаграму процесу кондиціювання повітря. Для моделі (4.11) температура повітря на вході кондиціонера може змінюватися в діапазоні $\theta_{A0}^{\min} - \theta_{A0}^{\max}$, а

вологівміст – $d_0^{\min} - d_0^{\max}$. На діаграмі представлено 7 областей. Область V задовольняє необхідні параметри мікроклімату на виході ПСЦК в діапазоні допустимої зони розбалансу для температури – $x_{13}^{\min} - x_{13}^{\max}$ та вологовмісту – $x_{14}^{\min} - x_{14}^{\max}$ повітря. Області III та VI практичного інтересу для кліматичної зони України не представляють і для синтезу ЛКЦР будуть розглядатися формально.

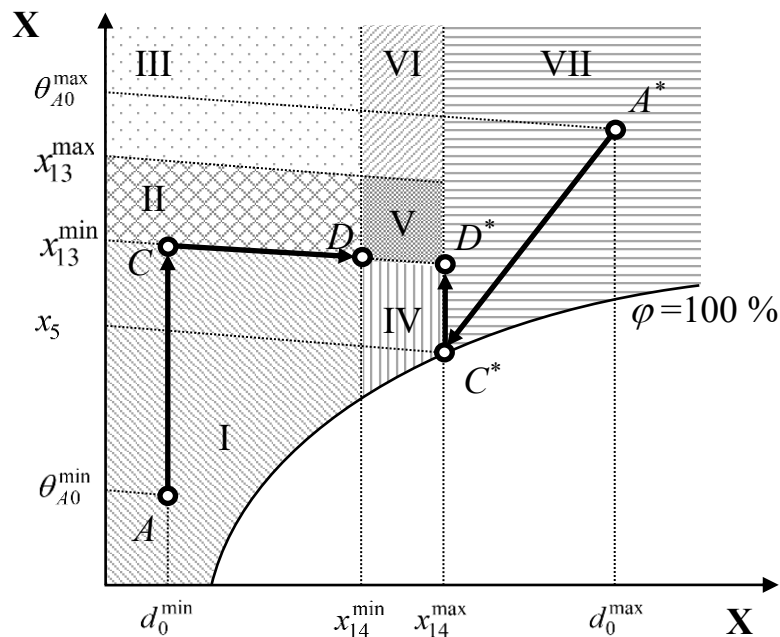


Рис. 5.24. $h-d$ діаграма в координатах математичної моделі (4.11)

Зупинимося на відмінностях у керуванні для модифікованого методу “оптимального режиму”. Основна відмінність пов’язана із розмежуванням взаємодії каналів впливу. Для модифікованого методу “оптимального режиму” в якості параметрів стабілізації АСК запропоновано використовувати температуру та вологовміст повітря на виході ПСЦК. Температура впливає на відносну вологість повітря, тому температурні збурення впливають на відносну вологість. При збільшенні температури повітря вологовміст не змінюється, що виключає вказаний вплив. На $h-d$ діаграмі межі області стабілізації параметрів мікроклімату мають правильну форму (рис. 5.24) у порівнянні із областю для класичного методу (рис. 1.20) “оптимального режиму”, що спрощує алгоритм логічного вибору обладнання. Як і для

попередніх випадків, вологовміст повітря пропонується визнавати програмним чином, використовуючи залежність (2.1) або аналогічну їй.

Аналіз областей $h-d$ діаграми на рис. 5.24 дозволяє дати наступні рекомендації щодо логічного керування обладнанням кондиціонера за модифікованим методом “оптимального режиму”.

Область I. АСК стабілізує:

- температуру повітря на виході ПСЦК впливом на калорифер $K1$;
- вологовміст повітря на виході ПСЦК впливом на $ПЗ$ кондиціонера.

Область II. АСК стабілізує:

- вологовміст повітря на виході ПСЦК впливом на $ПЗ$ кондиціонера, інше кліматичне обладнання участі у регулюванні не приймає, температура повітря знаходиться у допустимих межах.

Область III. АСК стабілізує:

- температуру повітря на виході ПСЦК впливом на охолоджувач O ;
- вологовміст повітря на виході ПСЦК впливом на $ПЗ$ кондиціонера.

Область IV. АСК стабілізує:

- температуру повітря на виході ПСЦК впливом на калорифер $K2$, інше кліматичне обладнання участі у регулювання не приймає.

Область V. Параметри мікроклімату знаходяться у допустимих межах, регулюючі клапани кліматичного обладнання у закритому положенні.

Область VI. АСК стабілізує:

- температуру повітря на виході ПСЦК впливом на охолоджувач O , інше кліматичне обладнання участі у регулювання не приймає, вологовміст повітря знаходиться у допустимих межах.

Область VII. АСК стабілізує:

- температуру повітря на виході ПСЦК впливом на калорифер $K2$;
- вологовміст повітря на виході ПСЦК впливом на охолоджувач O . При конденсації надмірної вологи, зменшується температура повітря за охолоджувачем до x_5 , після чого необхідно додатково нагріти повітря на калорифері $K2$ (пряма C^*D^*).

Для адаптації ЛКЦР, що реалізує ПІ-закон регулювання розширимо математичну модель (4.11) змінними стану за якими необхідно мати інтегральний закон керування. У даному випадку стабілізується температура та вологовміст на виході ПСЦК, вибір яких здійснюється матрицею $\mathbf{C}$ моделі (4.11). Із урахуванням вказаних міркувань, розширена неперервна модель ОК для промислового кондиціонера із паровим зволожувачем прийме вигляд

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{X}' \\ \mathbf{Z}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{I...VII} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{U}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C} \mathbf{X}, \end{cases} \quad (5.30)$$

$$\begin{aligned} \text{де } \mathbf{B}_I &= \begin{bmatrix} \mathbf{B}_I^{K1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_I^{ПЗ} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_{II} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_I^{ПЗ} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_{III} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_I^O & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_I^{ПЗ} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{B}_{IV} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{B}_I^{K2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_V = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_{VI} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_I^O & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{B}_{VII} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_I^O & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{B}_I^{K2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Наповнення матриці керування $\mathbf{B}_{I...VII}$ для областей $h-d$ діаграми різне, що дозволяє організувати логіку перемикання кліматичного обладнання в залежності від параметрів мікроклімату навколишнього середовища за модифікованим методом “оптимального режиму”.

Враховуючи що матриця керування $\mathbf{B}_{I...VII}$ для кожної із області $h-d$ діаграми індивідуальна, необхідно синтезувати матрицю зворотного зв'язку $\mathbf{K}_{dI...VII}$ за залежністю (5.26) для кожної області за процедурою синтезу п.5.3.2. У алгоритмі керування системою кондиціонування за модифікованим методом

“оптимального режиму” необхідно передбачити контроль параметрів мікроклімату навколишнього середовища і перемикання між матрицями зворотного зв’язку $K_{d\text{I-VII}}$ за вимірними параметрами мікроклімату навколишнього середовища.

Розглянемо прецизійний кондиціонер із паровим зволожувачем, який орієнтовано на застосування алгоритму керування за методом “оптимального режиму” [251]. Процедура адаптації ЛКЦР для прецизійного кондиціонера із паровим зволожувачем аналогічна вище розглянутій із такими особливостями. Зупинимося на особливостях процедури адаптації. На рис. 5.25 представлено $h-d$ діаграму процесу кондиціювання повітря за методом “оптимального режиму” в координатах математичної моделі (4.12). На прецизійний кондиціонер надходить зовнішнє повітря температура якого може змінюватися в діапазоні $\theta_{A0}^{\min} - \theta_{A0}^{\max}$, а вологовміст $- d_0^{\min} - d_0^{\max}$. Припливне повітря змішується із рециркуляційним у камері змішування $K3$ (температура рециркуляційного повітря x_{17} , вологовміст $- x_{18}$). Після змішування припливного та рециркуляційного повітря повітряна суміш із параметрами температури x_1 та вологовмісту $- x_2$ надходить на калорифер $K1$. Під дією збурень параметри навколишнього та рециркуляційного повітря можуть змінюватися. З цих міркувань узагальненими параметрами збурення для прецизійного кондиціонера виступають температура та вологовміст повітря за камерою змішування $K3$, які можуть змінюватися для температури в діапазоні $x_1^{\min} - x_1^{\max}$ та вологовмісту $- x_2^{\min} - x_2^{\max}$.

На діаграмі 7 областей, де зображено процес обробки повітря із врахуванням тепло- та масообмінних процесів у камері змішування. Область V задовольняє необхідне значення мікроклімату у приміщенні у діапазоні температур $x_{17}^{\min} - x_{17}^{\max}$ та вологовмісту $- x_{18}^{\min} - x_{18}^{\max}$. Алгоритм логічного перемикання між кліматичним обладнанням аналогічний розглянутому вище у підрозділі. Для ідентифікації областей перемикання обладнання пропонується використовувати параметри мікроклімату після камери

змішування $KЗ [x_1, x_2]$, які характеризують узагальнене збурення як зі сторони навколишнього середовища, так і зі сторони приміщення Π .

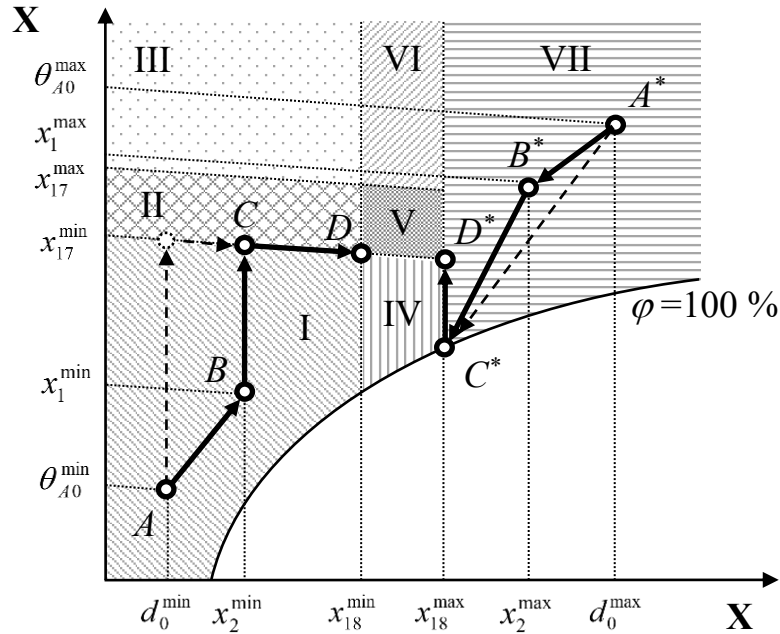


Рис. 5.25. $H-d$ діаграма в координатах математичної моделі (4.12)

Для синтезу оптимального ЛКЦР розширимо математичну модель (4.12) змінними стану за якими необхідно мати інтегральний закон керування. Розширена неперервна модель ОК для прецизійного кондиціонера має вигляд

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{X}' \\ \mathbf{Z}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{I...VII} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{U}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C} \mathbf{X}, \end{cases} \quad (5.31)$$

$$\text{де } \mathbf{B}_I = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{B}_1^{K1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_1^{\Pi 3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_{II} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_1^{\Pi 3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_{III} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_1^O & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_1^{\Pi 3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

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

Наповнення матриці керування $\mathbf{B}_{I-VII}$ дозволяє організувати логіку перемикання кліматичного обладнання в залежності від параметрів мікроклімату навколишнього середовища для прецизійного кондиціонера за модифікованим методом “оптимального режиму”.

Матриця керування $\mathbf{B}_{I-VII}$ для кожної із семи областей $h-d$ діаграми індивідуальна, що викликає необхідність синтезу матриці зворотного зв'язку $\mathbf{K}_{dI-VII}$ за залежністю (5.26) для кожної області. Адаптація ЛКЦР для прецизійного кондиціонера із парозволожувачем не передбачає керування камерою змішування $K3$. Для оптимізації енерговитрат у процесі підготовки повітря зміну коефіцієнта рециркуляції необхідно передбачити на рівні ЦД СКП КФС.

5.4 Приклади адаптації традиційної та багатовимірної системи керування кондиціонером

Методи адаптації АСК кондиціонерами, що розглянуті у п.5.2 та п.5.3, ґрунтуються на використанні інтегральних критеріїв якості. На відміну від традиційної структури АСК кондиціонером, яка передбачає використання двох ЦР для стабілізації температури та вологості, багатовимірна система із ЛКЦР формує керуючий вплив на основі інтегральної інформації про ОК, використовуючи змінні стану комплексної моделі (5.18) СКП. У даному підрозділі здійснюється порівняльна оцінка ефективності адаптації традиційної та багатовимірної реалізацій АСК кондиціонера за однакових умов функціонування. Імітаційне моделювання проводиться на прикладі

стельового кондиціонера моделі CV-P 2L N-63B/F-N виробництва компанії VTS CLIMA [198].

5.4.1 Адаптація традиційної системи керування кондиціонером

Розглянемо приклад адаптації системи керування кондиціонером CV-P 2L N-63B/F-N, де в контурі регулювання вологості використовується відносна вологість та вологовміст повітря [159]. Для АСК кондиціонером відповідає структурна схема, що зображена на рис. 5.18. У структурній схемі присутні електронні комутатори S_1 та S_2 , які визначають кліматичне обладнання, що приймає участь у керуванні мікрокліматом в залежності від зовнішніх параметрів навколишнього повітря (див. п. 1.6.2, вибір обладнання визначається за $h = d$ діаграмою). Для узагальнення висновків розглянемо літню пору року, комутатори S_1 та S_2 знаходяться у положенні зображеному на рис. 5.18. При цьому, у регулюванні приймає участь охолоджувач O (для конденсації надмірної вологи) та калорифер другого підігріву K_2 (для нагріву осушеного повітря). Дана технологія кондиціювання повітря притаманна практично усім промисловим кондиціонерам для літньої пори року, що дозволяє узагальнити отримані висновки. На основі розглянутих вище міркувань, структурна схема АСК при регулюванні вологовмісту для літнього режиму роботи кондиціонера прийме вигляд, що зображений на рис. 5.26.

Для розрахунку відносної вологості повітря на виході кондиціонера використано (2.2), звідки приріст відносної вологості визначено як

$$\Delta\varphi = \varphi(d_0 + \Delta d, \theta_0 + \Delta\theta, P_\delta) - \varphi(d_0, \theta_0, P_\delta), \quad (5.32)$$

припустивши незмінність барометричного тиску P_δ на час тривалості перехідних процесів у АСК. При моделюванні прийнято наступні значення початкових умов для літнього режиму роботи кондиціонера: $P_\delta = 99000 \text{ Па}$; $\theta_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $d_0 = 8.82 \text{ г/кг}$.

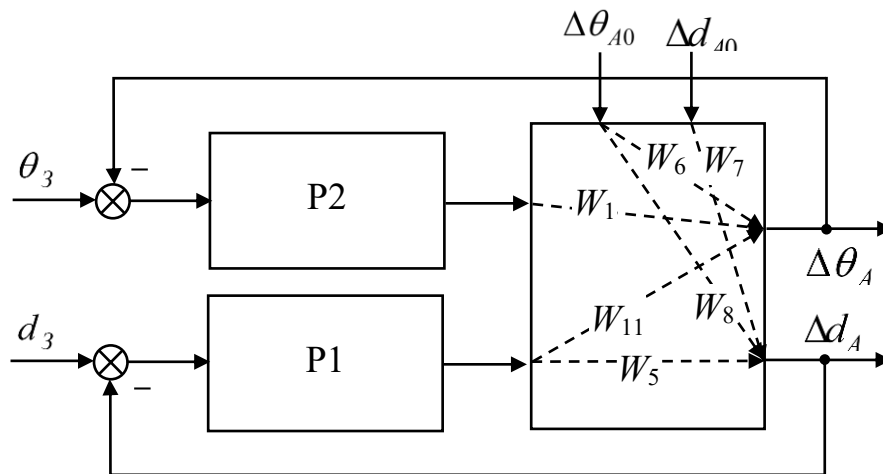


Рис. 5.26. Структурна схема системи керування кондиціонером для літнього режиму роботи

Структурна схема системи керування у середовищі Simulink MatLAB для стабілізації вологовмісту повітря зображена на рис. 5.27. На схемі функціональний блок $dF(dT, dd)$ реалізує залежність (5.32). Результати розрахунків передатних функцій каналів W_1 , W_5 , W_6 , W_7 , W_8 та W_{11} представлено у Додатку В.1.

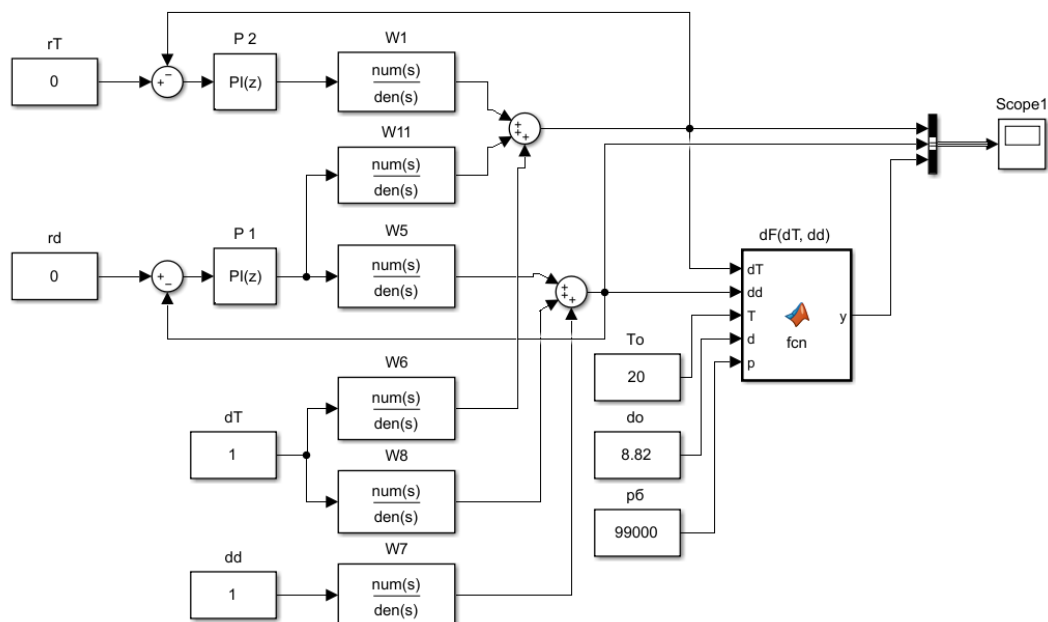


Рис. 5.27. Структурна схема АСК для моделювання перехідних процесів у середовищі Simulink MatLAB за вологовмістом повітря

Параметрична оптимізація ЦР Р1 та Р2 проводилася із використанням чисельної процедури оптимізації п. 5.2.3. Враховуючи малу інерційність ОК, для регуляторів Р1 та Р2 використано цифровий ПІ-закон регулювання. Налаштування регуляторів Р1 та Р2 оптимізувалися за критерієм (5.16) із параметрами $Nvr=1, q=1$. Чисельно розраховано налаштування ЦР Р1 та Р2 для АСК кондиціонера (див. Додаток В.1): $K_{R1} = -0.515 \text{ кг}^2/(\text{сек} \cdot \text{г})$, $T_{I1} = 13.9 \text{ сек}$, $T_{KV1} = 1 \text{ сек}$; $K_{R2} = 3.84 \text{ кВт/}^\circ\text{C}$, $T_{I2} = 11.5 \text{ сек}$, $T_{KV2} = 1 \text{ сек}$.

Результати імітаційного моделювання перехідних процесів двовимірної АСК при ступінчатому збуренні за температурою $\Delta\theta_{A0} = 1^\circ\text{C}$ та вологовмістом $\Delta d_{A0} = 1 \text{ г/кг}$ навколишнього повітря представлено на рис. 5.29, а. Можна констатувати, що синтезована АСК добре відпрацьовує температурні та вологові збурення зовнішнього повітря.

Аналогічно, проведено імітаційне моделювання АСК кондиціонера при регулюванні відносної вологості. Структурна схема АСК для моделювання перехідних процесів при регулюванні відносної вологості повітря зображено на рис. 5.28.

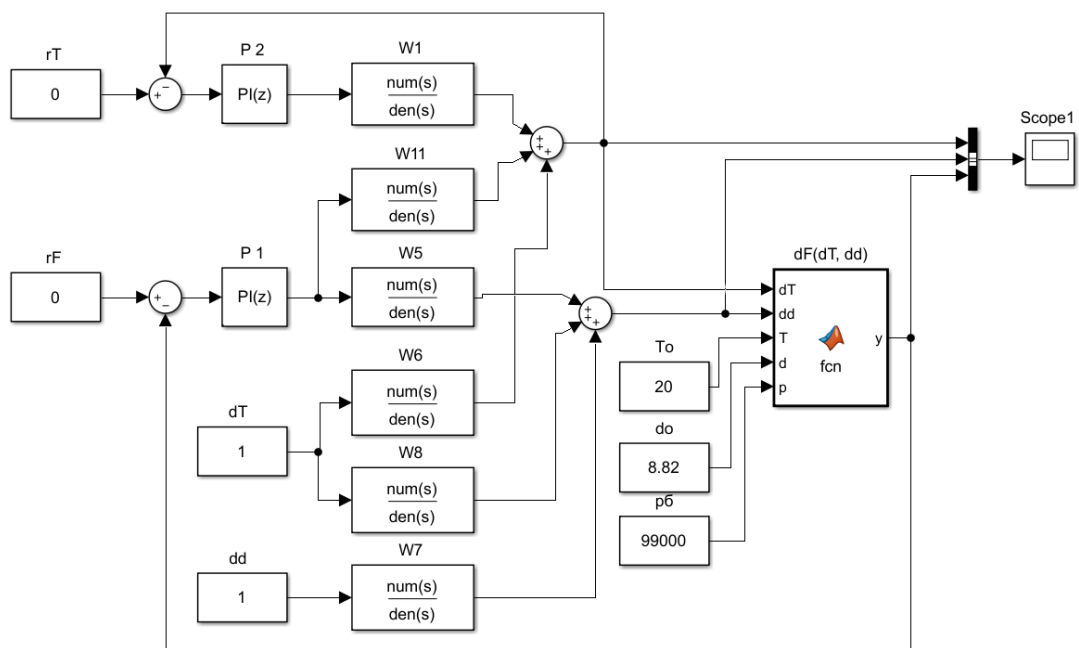


Рис. 5.28. Структурна схема АСК для моделювання перехідних процесів у середовищі Simulink MatLAB за відотною вологістю повітря

Процедура синтезу ЦР Р1 та Р2 та параметри критерію оптимізації (5.16) при регулюванні відносної вологості залишилися попередніми. У Додатку В.1 чисельно отримано налаштування ЦР Р1 та Р2 АСК при стабілізації відносної вологості повітря: $K_{R1} = -0.085 \text{ кг}/(\text{сек} \cdot \%)$, $T_{I1} = 13.9 \text{ сек}$, $T_{KV1} = 1 \text{ сек}$; $K_{R2} = 3.84 \text{ кВт}/^\circ\text{C}$, $T_{I2} = 11.5 \text{ сек}$, $T_{KV2} = 1 \text{ сек}$. Результати імітаційного моделювання перехідних процесів для АСК кондиціонера при регулюванні відносної вологості представлено на рис. 5.29, б. На графіках спостерігається підвищена коливність перехідних процесів для АСК, що пояснюється наявністю двох перехресних зв'язків між контурами регулювання температури та відносної вологості. За результатами імітаційного моделювання (рис. 5.29) у табл. 5.1 зведено інтегральні показники якості перехідних процесів АСК кондиціонером.

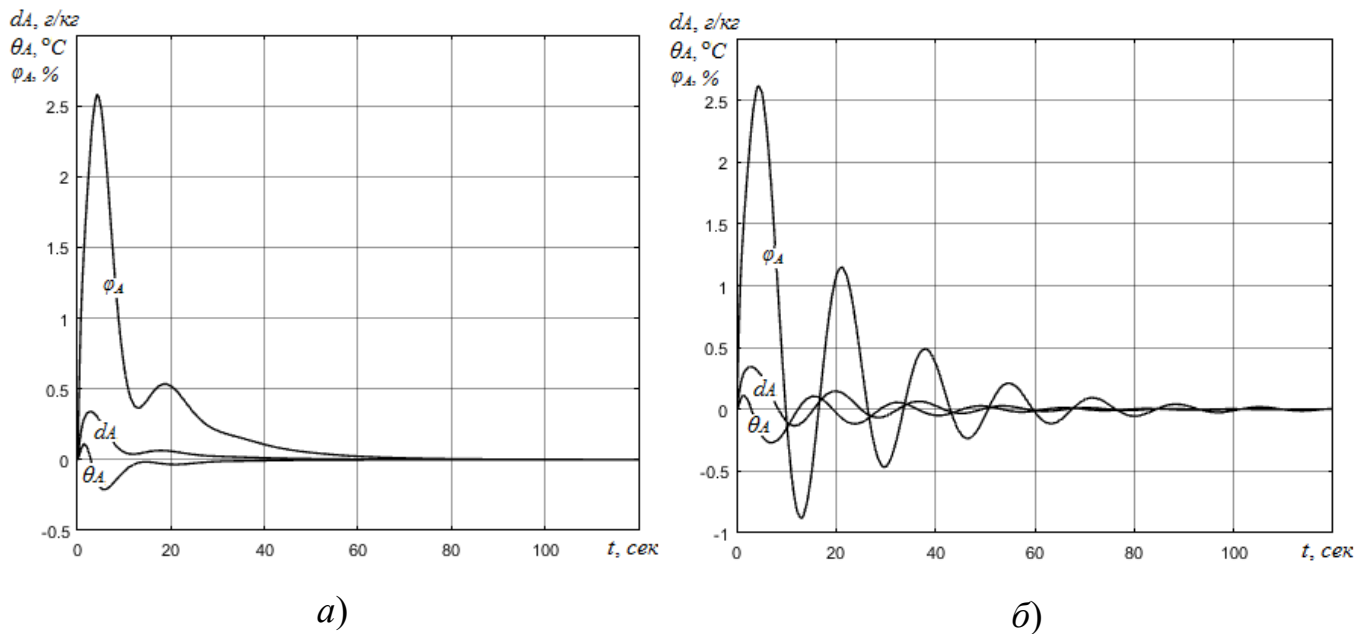


Рис. 5.29. Дослідження перехідних процесів у системі керування кондиціонером за каналами збурення при регулюванні: а) вологовмісту повітря; б) відносної вологості повітря

Таблиця 5.1. Показники якості перехідних процесів у АСК кондиціонера

АСК	$\int \Delta \theta_A dt$	$\int \Delta d_A dt$	$\int \Delta \varphi_A dt$	$Max \Delta \theta_A $	$Max \Delta d_A $	$Max \Delta \varphi_A $
стабілізація вологовміст у 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

За дослідженням підрозділу можна зробити висновки: 1) використання вологовмісту замість відносної вологості повітря в контурі регулювання вологості дозволяє розмежувати взаємний вплив між контурами регулювання температури та вологості; 2) якщо у АСК кондиціонера в контурі регулювання вологості використовується вологовміст, інтегральні показники якості покращуються у 1.5 – 2 рази, також зменшується коливність та тривалість перехідних процесів.

5.4.2 Адаптація багатовимірної системи керування кондиціонером

Розглянемо приклад чисельної адаптації багатовимірної системи керування із ЛКЦР для стельового кондиціонера CV-P 2L N-63B/F-N. Динамічні моделі кліматичного обладнання для даного кондиціонера запропоновано у третьому розділі. Технологічному обладнанню стельового кондиціонера відповідає параметрична схема зображена рис. 4.15, для якої отримано комплексну модель (4.11), де в якості калорифера другого підігріву використано водяний калорифер. У стельовому кондиціонері CV-P 2L N-63B/F-N фізично використовується електрокалорифер, тому комплексну модель (4.11) для даного випадку застосовувати некоректно. Використовуючи методику п.4.4.1, отримано комплексну модель для кондиціонера CV-P 2L N-63B/F, яка є доповненням запропонованих моделей (4.9) – (4.12):

$$\begin{cases} \mathbf{X}' = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{D}\mathbf{F}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X}, \end{cases} \quad (5.33)$$

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

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

$$\mathbf{C}_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_2^{ПЗ} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Модель (5.33) має тринадцятий порядок, розмірність матриць: $\mathbf{A}$ – $[13 \times 13]$, $\mathbf{B}$ – $[13 \times 4]$.

Адаптація ЛКЦР для роботи системи керування стельового кондиціонера CV-P 2L N-63B/F-N виконано у середовищі MatLAB із використанням програми `coef_CVP2L`. Для оптимізації використано критерій якості (5.17) із параметрами $\mathbf{S} = \mathbf{0}$; $\mathbf{Q} = \mathbf{I}$; $\mathbf{R} \approx \mathbf{0}$. Програму та результати розрахунків представлено у Додатку В.2. За динамічними моделями обладнання кондиціонера CV-P 2L N-63B/F-N програма `coef_CVP2L` визначає числові значення матриць комплексних моделей (5.33), (5.30), (5.24) та параметри матриці зворотного зв'язку $\mathbf{K}_d$ ЛКЦР (5.25) на основі розв'язку рівняння Ріккати (5.27). У Додатку В.2 перевірено керованість та спостережуваність системи. Для зручності моделювання, зміну електричної потужності керуючих впливів для моделей електрокалорифера HE36/2 та парогенератора UE005 представлено у kWt , так як Wt мала величина керуючого впливу. Числові параметри моделі (5.33) розраховано для І області $h-d$ діаграми (див. рис. 5.24, зимовий режим роботи кондиціонера). Матриця керування $\mathbf{B}$ розглядається як $\mathbf{B}_I$, у керуванні приймає участь тільки калорифер $K1$ та парозволожувач $ПЗ$.

Моделювання перехідних процесів АСК із ЛКЦР проводилося у середовищі Simulink MatLAB, структурна схема для моделювання зображена

рис 5.30. Для моделювання АСК кондиціонера із ЛКЦР засобами Simulink, матрицю C_d розширено до порядку моделі (5.24), також розширено матрицю B_d для вводу збурення за температурою $\Delta\theta_{A0}^{K1}$ та вологовмістом Δd_{A0}^{K1} повітря, яке надходить із навколишнього середовища на калорифер першого підігріву K1. Перехідні процеси у АСК із ЛКЦР представлено на рис. 5.31.

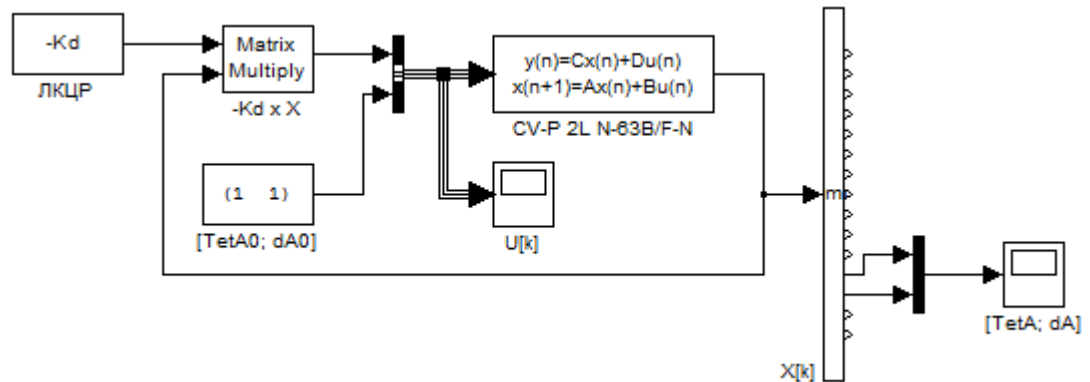


Рис. 5.30. Структурна схема АСК із ЛКЦР для моделювання у середовищі Simulink

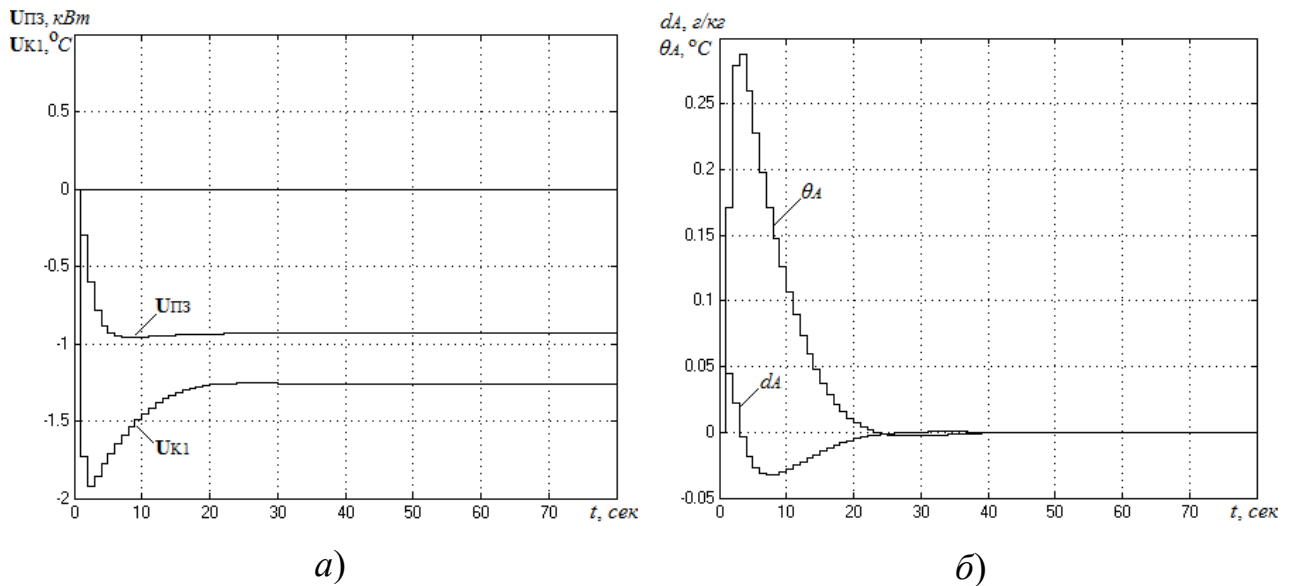


Рис. 5.31. Дослідження перехідних процесів у АСК із ЛКЦР при одночасному збуренні $\Delta\theta_{A0}^{K1} = 1(t)$, $\Delta d_{A0}^{K1} = 1(t)$: а) – керуючий вплив ЛКЦР; б) – перехідні процеси стабілізації параметрів $\Delta\theta_A^{ПЗ}(t)$, $\Delta d_{A0}^{ПЗ}(t)$

Для комплексної моделі (5.33) проведено адаптацію АСК кондиціонера із цифровими ПІ-регуляторами температури та вологості. ЦР оптимізувалися за критерієм (5.16) ($Nvr=2$, $q=1$, $T_{KI}=1$). Використовуючи процедуру чисельної оптимізації для одноконтурних АСР (див. п.5.2.3) знайдено оптимальні

налаштування ЦР температури та вологості. Оптимізація ЦР проводилася за часовими характеристиками комплексної моделі (5.33), контури регулювання температури та вологості розглядалися як незалежні один від одного (див. п.5.2.5). Отримано наступні параметри налаштування для ЦР: температури $K_R=10.1$, $T_I=22.4$ сек, $T_{KV}=1$ сек; вологості $K_R=1.5$ (кВт к2)/гр, $T_I=1.6$ сек, $T_{KV}=1$ сек. Комплексна модель кондиціонера залишилася із попереднього дослідження. Структурна схема АСК із ЦР для моделювання у середовищі Simulink зображена рис 5.32. Перехідні процеси у АСК із ЦР представлено на рис. 5.33.

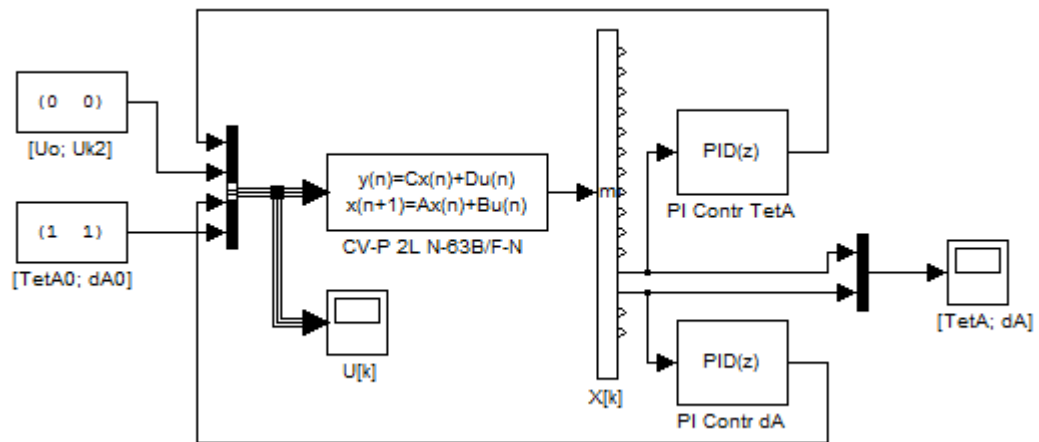


Рис. 5.32. Структурна схема АСК із ПІ-регуляторами для моделювання у середовищі Simulink

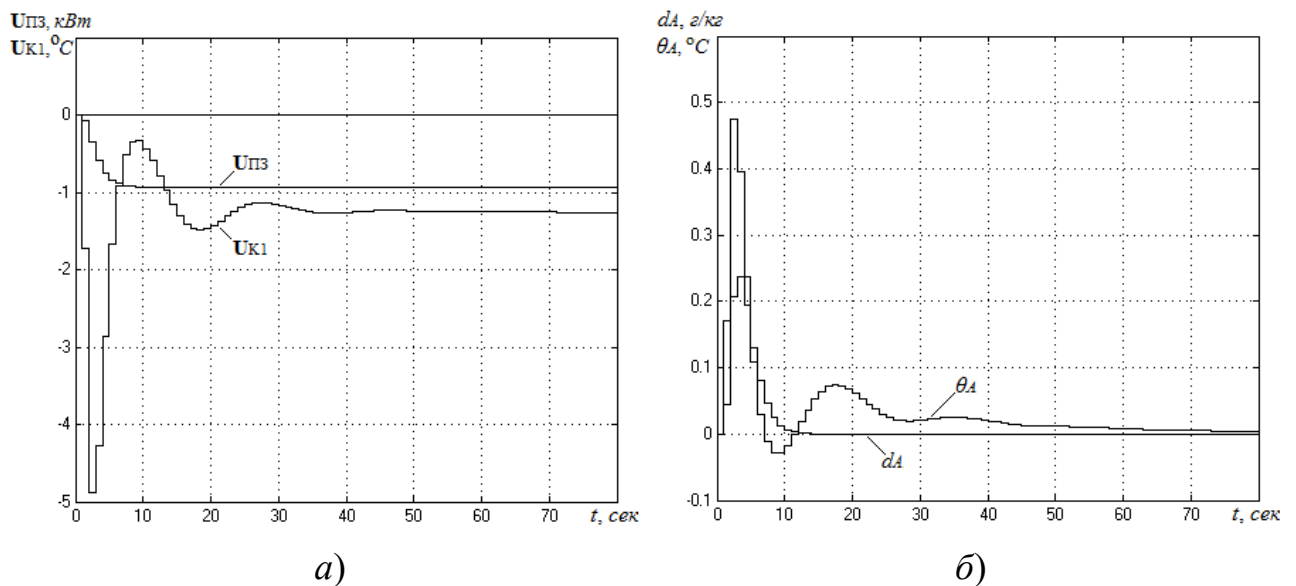


Рис. 5.33. Дослідження перехідних процесів у АСК із ЦР при одночасному збуренні $\Delta\theta_{A0}^{K1}=1(t)$, $\Delta d_{A0}^{K1}=1(t)$: а) – керуючий вплив ЦР; б) – перехідні процеси стабілізації параметрів $\Delta\theta_A^{\Pi3}(t)$, $\Delta d_{A0}^{\Pi3}(t)$.

Порівнювати якість перехідних процесів у АСК із ЛКЦР та АСК із ЦР за критеріями (5.17) та (5.16) некоректно, оскільки критерії мають різну кількість змінних оптимізації. У табл. 5.2 представлено деякі кількісні показники якості перехідних процесів для АСК із ЛКЦР та АСК із одновимірними ЦР температури та вологості.

Таблиця 5.2. Показники якості перехідних процесів у АСК із ЛКЦР та ЦР

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

За показниками якості табл. 5.2 та порівнюючи перехідні процеси рис. 5.31 та рис. 5.33, видно що АСК із ЛКЦР забезпечує менше перерегулювання та тривалість перехідних процесів, що пояснюється більшим числом змінних за якими проводиться стабілізація вихідних параметрів. За аналізом табл. 5.2 можна зробити висновок, що використання АСК із ЛКЦР покращує інтегральні показники якості у 1.2 – 2.3 рази у порівнянні із АСК де використано два одновимірні ЦР, також зменшується коливність та тривалість перехідних процесів.

5.5 Висновки до п'ятого розділу

1. Запропоновано архітектуру та математичне забезпечення для інформаційної системи управління мікрокліматом підприємств КІ, яка забезпечує інтеграцію функціонуючих СКП у КФО КІ. Застосування запропонованих критеріїв для оперативного управління СКП спрямовано на підвищення ефективності управлінських рішень та оптимізації експлуатаційних характеристик кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури.
2. Для оптимізації традиційних одноконтурних АСК запропоновано модифікований критерій якості (5.16) із мінімізацією сигналу керування, де враховуються коефіцієнт передачі ОК за каналами впливу, що дозволяє мінімізувати витрату матеріальних або енергетичних потоків враховуючи технологічні особливості обладнання. На відміну від існуючих, критерій якості (5.16) враховує особливості оптимізації одноконтурних АСК за каналами регулювання і збурення.
3. Використовуючи запропонований критерій якості (5.16), розроблено чисельну процедуру параметричної оптимізації АСК із І-ПД-, ПІ-Д- або ПІД-регуляторами, де вхідною інформацією про динамічні властивості ОК є імпульсна або перехідна характеристика об'єкта, що відкриває можливість оптимізації неперервних та цифрових регуляторів без етапу апроксимації динамічних властивостей ОК. Такий підхід дозволяє зменшити похибку моделювання системи керування за рахунок виключення етапу апроксимації ОК. Процедуру параметричної оптимізації АСК доведено до програмної реалізації на персональному комп'ютері.
4. Вперше для стабілізації вологості запропоновано використовувати змінну вологовмісту повітря (d) замість відносної вологості (φ). Такий підхід до управління СКП дозволяє уникнути взаємних перехресних зв'язків між контурами стабілізації температури та вологості. Вологовміст повітря пропонується розраховувати програмно на керуючому контролері за залежністю (2.1), вимірюючи температуру та відносну вологість повітряної суміші.
5. У порівнянні із класичним керуванням СКП, за рахунок використання вологовмісту повітря в контурі стабілізації вологості, покращуються

інтегральні показники якості системи керування у 1.5 – 2 рази, зменшується коливність та тривалість перехідних процесів.

6. У розділі продемонстровано, що АСК кондиціонера класифікуються як багатовимірна система із змінною структурою каналів регулювання. З цих причин для забезпечення якісної стабілізації параметрів мікроклімату налаштування регуляторів необхідно адаптувати до робочого режиму обладнання.
7. Для комплексних моделей СКП запропоновано процедуру оптимізації багатовимірного ЛКЦР, яка враховує логічні перемикання у роботі кліматичного обладнання для модифікованих методів “точки роси” та “оптимального режиму”. Використання багатовимірного ЛКЦР покращує інтегральні показники якості у 1.2 – 2.3 рази у порівнянні із АСК де використовуються одновимірні ЦР, також зменшується коливність та тривалість перехідних процесів.

РОЗДІЛ 6

ЕКСПРЕС-МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАДИЦІЙНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

У розділі розглянуто методи оптимізації традиційних АСК, де динамічні властивості ОК описуються наближеною моделлю

$$W_{OK}(p) = \frac{K}{Tp + 1} e^{-p\tau}, \quad (6.1)$$

другого порядку із запізнюванням. Аналіз методів зібраних у довіднику [171] підтверджує актуальність синтезу АСК де ОК представляється аперіодичною ланкою із запізнюванням. Існуючі функціональні залежності для налаштування регуляторів громіздкі, придатні на вузькому діапазоні застосування і в багатьох випадках точність налаштування.

Запропоновані експрес-методи розроблялися для широкого діапазону динамічних властивостей ОК за каналами регулювання та збурення, що дозволяє їх використовувати для оптимізації систем керування ТП різних галузей промисловості. Особливістю СКП є їх мала інерційність та практична відсутність транспортного запізнювання ОК за каналами впливу. З цих причин для АСК кондиціонерів розробники найчастіше використовують ПІ-закон керування. З огляду на оптимізацію систем керування кондиціонерами у п. 6.1 розглянуто залежності для ПІ-регуляторів. У статтях [283–285] результати досліджень узагальнено для модифікацій ПІД-закону керування.

6.1 Оптимізація неперервної АСК за каналом регулювання

Розглянемо неперервну одноконтурну АСК, яку зображено на рис. 6.1. АСК складається із ОК, суматора та регулятора (Р), де $z(t)$ – сигнал завдання, $e(t)$ – сигнал розбалансу, $u(t)$ – сигнал керування, $y(t)$ – вихідний сигнал ОК.

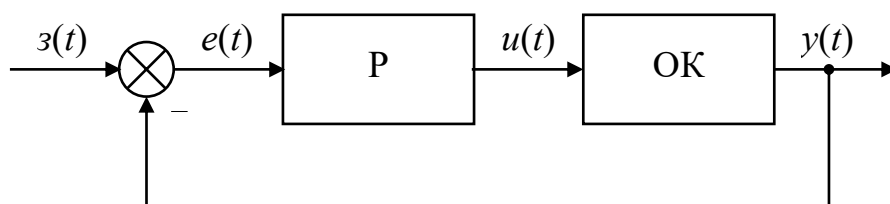


Рис. 6.1. Структурна схема АСК

Розглянемо випадок коли АСК складається ОК (6.1), а регулятор реалізує неперервний ПІ–закон керування

$$W_P(p) = K_R \left(1 + \frac{1}{T_I p} \right), \quad (6.2)$$

де K_R – коефіцієнт передачі, T_I – час інтегрування регулятора.

Для оптимізації АСК використаємо критерій якості (5.15), який для аналогової АСК без каналу збурення прийме вигляд:

$$I = \begin{cases} \int_0^{t_f} [q|e| + (1-q)|z - Ku|] dt, & \text{при } Nvr = 1; \\ \int_0^{t_f} [q e^2 + (1-q)(z - Ku)^2] dt, & \text{при } Nvr = 2. \end{cases} \quad (6.3)$$

Якщо оптимізувати систему керування за каналом $z \rightarrow y$, то її динамічні властивості однозначно визначаються передатною функцією розімкнутої системи (РС) [274]. За умови, коли в якості “одиниці часу” приймається постійна часу ОК – передатна функція РС прийме вигляд:

$$W_{PC}(p) = K_R^* \left(1 + \frac{1}{T_I^* p} \right) \frac{e^{-p\tau^*}}{p+1},$$

де $\tau^* = \frac{\tau}{T}, T_I^* = \frac{T_I}{T}, K_R^* = K \cdot K_R.$ (6.4)

Тут і далі у підрозділах індексом $*$ позначаються змінні АСК в масштабі постійної часу ОК. Виходячи із викладеного, будемо оптимізувати динамічні властивості АСК, у якій ОК представляється передатною функцією:

$$W_{OK}^*(p) = \frac{e^{-p\tau^*}}{p+1}. \quad (6.5)$$

Для моделі (6.5) динамічні властивості ОК визначаються тільки відносним запізнюванням τ^* , а розрахунковий регулятор характеризується безрозмірними параметрами K_R^*, T_I^* . Використовуючи залежності перерахунку (6.4) можна визначити K_R і T_I для АСК з ОК (6.1) та регулятором (6.2). Для “безрозмірного часу” ($t^* = t/T$) функціонал (6.3) прийме вигляд:

$$I^* = \begin{cases} \int_0^{t_f^*} (q|e^*| + (1-q)|z-u^*|) dt^*, & Nvr = 1; \\ \int_0^{t_f^*} (q(e^*)^2 + (1-q)(z-u^*)^2) dt^*, & Nvr = 2. \end{cases} \quad (6.6)$$

Параметрична оптимізація регулятора за критерієм (6.6) із ОК (6.5) проводилася чисельно. Для оптимізації АСК використовувався алгоритм пошуку оптимуму методом Хука-Дживса [274]. Програмну реалізацію чисельної оптимізації аналогового АСК представлено у Додатку Д (див. програму OptTauT). Розглянемо результати чисельного дослідження. На рис. 6.2 визначена залежність оптимальних налаштувань ПІ-регулятора від відносного запізнювання τ^* ОК за критерієм (6.6).

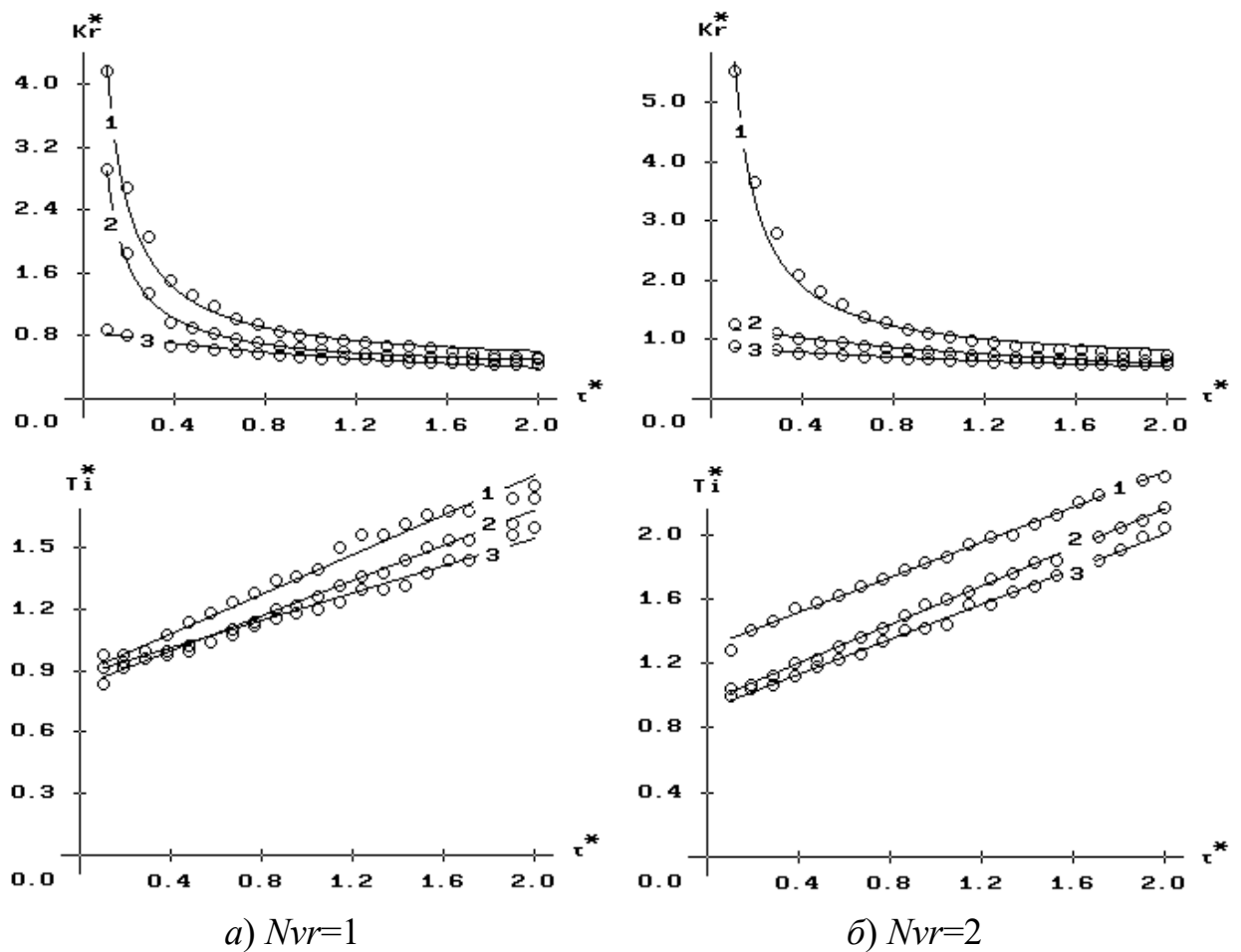


Рис. 6.2. Залежність оптимальних налаштувань АСК з ПІ-регулятором за критерієм (6.6): 1 – $q=1$; 2 – $q=0.5$; 3 – $q=0$

На графіках рис. 6.2 кружки показують розрахункові точки чисельного пошуку параметра, а криві 1, 2, 3 представляють апроксимуючі залежності знайдені методом найменших квадратів за критерієм:

$$E^* = \sum_{s=0}^{m-1} [y_s^* - f_a(\tau_s^*)]^2 \rightarrow \min, \quad (6.7)$$

тут y_s^* – розрахункова точка параметра регулятора для τ_s^* знайдена методом Хука-Дживса, $f_a(\tau^*)$ – апроксимуюча функція.

Пошук параметрів регулятора проводився в області $\tau^* \in [0.1 \dots 2]$, $m = 20$. Відрізок $\tau^* \in [0 \dots 0.1]$ не розглядався (для АСК з аперіодичним об'єктом без запізнювання оптимальним є П–регулятор із $K_r^* \rightarrow \infty$). Для забезпечення умови (6.7) у якості $f_a(\tau^*)$ застосовувалася одна із функцій: $f_1(\tau^*) = a_0 + a_1 \tau^*$; $f_2(\tau^*) = a_0 + a_1 / \tau^*$; $f_3(\tau^*) = a_0 / (a_1 + \tau^*)$.

Зворотне перерахування параметрів регулятора до “дійсного” масштабу часу, де АСК складається із ОК (6.1) і регулятора (6.2), проводився у такий спосіб. Наприклад, $T_I^* = a_0 + a_1 \tau^*$, враховуючи (6.4) можна записати $\frac{T_I}{T} = a_0 + a_1 \frac{\tau}{T}$, звідки визначається $T_I = a_0 T + a_1 \tau$. Результати апроксимації оптимальних настройок ПІ–регулятора з урахуванням формул перерахунку (6.4) містяться у табл. 6.1.

Таблиця 6.1. Залежності оптимальних налаштувань регулятора

Регулятор		Параметри критерію (6.3), $0.1 < \tau/T < 2$		
		$q=1$	$q=0.5$	$q=0$
ПІ–регулятор, ($Nvr=1$)	K_R	$\frac{1}{K} \left(0.41 + 0.398 \frac{T}{\tau} \right),$ $E^* = 0.226$	$\frac{1}{K} \left(0.367 + 0.262 \frac{T}{\tau} \right),$ $E^* = 0.036$	$\frac{1.471}{K(1.681 + \tau/T)},$ $E^* = 0.013$
	T_I	$0.887T + 0.483\tau,$ $E^* = 0.043$	$0.825T + 0.429\tau,$ $E^* = 0.012$	$0.879T + 0.334\tau,$ $E^* = 0.018$
ПІ–регулятор, ($Nvr=2$)	K_R	$\frac{1}{K} \left(0.567 + 0.531 \frac{T}{\tau} \right),$ $E^* = 0.515$	$\frac{2.296}{K(1.831 + \tau/T)},$ $E^* = 0.016$	$\frac{2.759}{K(3.102 + \tau/T)},$ $E^* = 0.008$
	T_I	$1.298T + 0.544\tau,$ $E^* = 0.01$	$0.962T + 0.598\tau,$ $E^* = 0.006$	$0.914T + 0.543\tau,$ $E^* = 0.01$

Як приклад, розглянемо контур регулювання температури у приміщенні, де ОК складається із калорифера другого підігріву та приміщення. Динамічні властивості ОК отримано експериментально [124] та апроксимовано (6.1)

$$W_{OK}(p) = \frac{7.54}{9.9p + 1} e^{-3p}, \quad (6.8)$$

За табл. 6.1, знайдено оптимальні налаштування регулятора. Чисельні значення зведено у табл. 6.2. На рис. 6.3 подано перехідні процеси у АСК.

Таблиця 6.2. Оптимальні настроювання ПІ-регулятора

Регулятор		Параметри критерію (6.3)		
		$q=1$	$q=0.5$	$q=0$
ПІ ($Nvr=1$)	$K_R, \text{м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$	0.23	0.16	0.1
	$T_I, \text{хв}$	10.2	9.5	9.7
ПІ ($Nvr=2$)	$K_R, \text{м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$	0.31	0.14	0.11
	$T_I, \text{хв}$	14.5	11.3	10.7

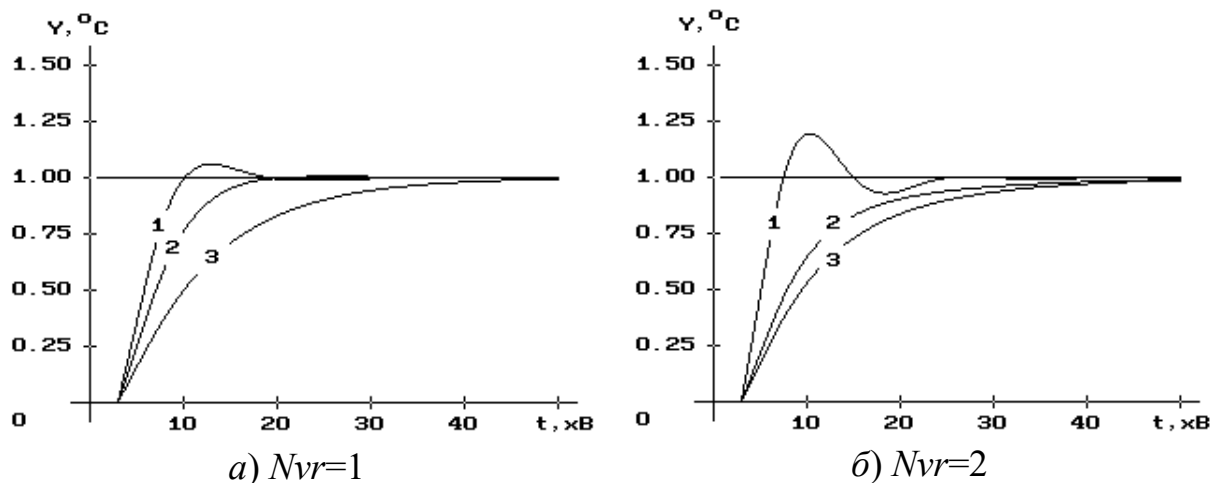


Рис. 6.3. Оптимізація АСК за критерієм (6.3) із ПІ-регулятором:
1 – $q=1$; 2 – $q=0.5$; 3 – $q=0$

Аналіз результатів моделювання (рис. 6.3) вказує, що розрахунки оптимальної АСК за модульним критерієм якості ($Nvr=1$) має ряд переваг. По-перше, (як не раз відзначалося в літературі) перехідні процеси в АСК, розраховані за середньоквадратичним критерієм, мають підвищену схильність до коливності (рис. 6.3 б, графік 1). По-друге, тривалість перехідних процесів у АСК, розрахованих за модульним критерієм, менше (рис. 6.3 а). Також, слід відмітити, що оптимізація АСК за критерієм з мінімізацією сигналу керування ($q<1$) зменшує коливність перехідних процесів у системі керування та

зменшує витрату матеріальних та/або енергетичних потоків на керування ТП у перехідних режимах (рис. 6.3 а, б, графік 2). У випадку оптимізації АСК тільки із мінімізацією керуючого впливу ($q=0$) – тривалість перехідних процесів затягується (рис. 6.3 а, б, графік 3), однак запас стійкості системи збільшується, що корисно для робастних АСК.

За останнє сторіччя науковцями запропоновано значну кількість формул для настроювання промислових регуляторів за інтегральними критеріями. У довіднику [167] представлені методики розрахунку АСК з модифікаціями ПД-регуляторів. Деякі з розрахункових формул подано у табл. 6.3.

Таблиця 6.3. Розрахункові формули для АСК з ПД-регулятором та ОК (6.1)

Автор(и)	Критерій оптимізації	Розрахункові формули
Rovira и др. (1969)	$\int e dt \rightarrow \min$	$K_R = \frac{0.758}{K} \left(\frac{T}{\tau}\right)^{0.861}$; $T_I = \frac{T}{1.02 - 0.323\tau/T}$; $0.1 \leq \tau/T \leq 1$. (Ro)
Edgar (1994)	$\int e dt \rightarrow \min$	$K_R = \frac{0.67T}{K\tau}$; $T_I = 3.5\tau$. (Ed)
Murrill (1967)	$\int e^2 dt \rightarrow \min$	$K_R = \frac{1.305}{K} \left(\frac{T}{\tau}\right)^{0.959}$; $T_I = \frac{T}{0.492} \left(\frac{\tau}{T}\right)^{0.739}$; $0.1 \leq \tau/T \leq 1$. (Mu)
Zhuang, Atherton (1993)	$\int e^2 dt \rightarrow \min$	$K_R = \frac{1.279}{K} \left(\frac{T}{\tau}\right)^{0.945}$; $T_I = \frac{T}{0.535} \left(\frac{\tau}{T}\right)^{0.586}$; $0.1 \leq \tau/T \leq 1$. (Zh)

Для залежностей табл. 6.3 отримано чисельні значення налаштувань параметрів ПД-регулятора для АСК із ОК (6.8). Значення параметрів зведено у табл. 6.4.

Таблиця 6.4. Оптимальні налаштування ПД-регулятора

Розрахункові формули	Критерій оптимізації	Значення параметрів
табл. 6.1	(6.3), $Nvr=1, q=1$	$K_R=0.23 \text{ м}^3/(\text{хв}^\circ\text{C})$, $T_I=10.2 \text{ хв}$
(Ro)	$\int e dt \rightarrow \min$	$K_R=0.28 \text{ м}^3/(\text{хв}^\circ\text{C})$, $T_I=10.7 \text{ хв}$
(Ed)	$\int e dt \rightarrow \min$	$K_R=0.29 \text{ м}^3/(\text{хв}^\circ\text{C})$, $T_I=10.5 \text{ хв}$
табл. 6.1	(6.3), $Nvr=2, q=1$	$K_R=0.31 \text{ м}^3/(\text{хв}^\circ\text{C})$, $T_I=14.5 \text{ хв}$
(Mu)	$\int e^2 dt \rightarrow \min$	$K_R=0.54 \text{ м}^3/(\text{хв}^\circ\text{C})$, $T_I=8.3 \text{ хв}$
(Zh)	$\int e^2 dt \rightarrow \min$	$K_R=0.52 \text{ м}^3/(\text{хв}^\circ\text{C})$, $T_I=9.2 \text{ хв}$

На рис. 6.4 подано перехідні процеси у АСК із налаштуваннями ПІ-регулятора із табл. 6.4. За аналізом графіків можна зробити висновок, що запропоновані розрахункові формули забезпечують найкраще значення критерію якості, якість перехідних процесів АСК за модульним критерієм покращилася в середньому на 2%, а за квадратичним – на 50 %.

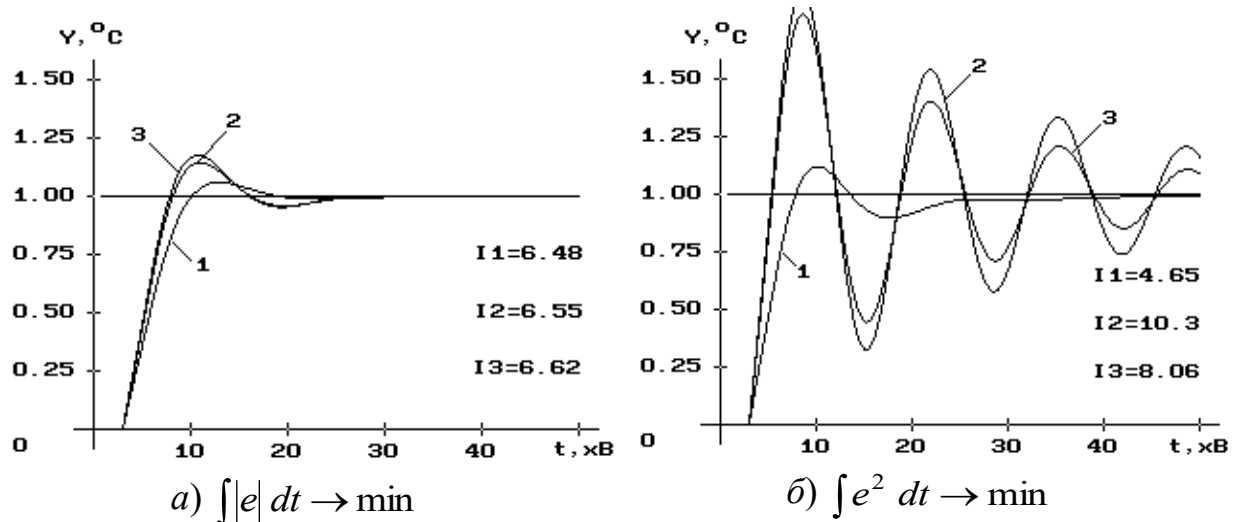


Рис. 6.4. Перехідні процеси в АСК з ПІ-регулятором: а) 1 – (табл. 6.1), 2 – (Ro); 3 – (Ed); б) 1 – (табл. 6.1), 2 – (Mu), 3 – (Zh)

Таким чином, у підрозділі для оптимізації традиційної АСК запропоновано критерій якості (6.3) з мінімізацією керуючого впливу. Для даного критерію отримано інженерні формули оптимального налаштування ПІ-регулятора із моделлю ОК (6.1). Розрахункові формули мають просту структуру та високу точність. Використання запропонованих формул дозволяє до двох раз зменшити значення критерію якості у порівнянні із існуючими залежностями (див. рис. 6.4).

6.2 Оптимізація цифрової АСК за каналом регулювання

Повернемось до структурної схеми цифрової АСК (див. рис. 5.3). Нехай, динамічні властивості ОК визначаються за (6.1), у регуляторі використовується цифровий ПІ-закон керування. Для оптимізації АСК будемо використовувати критерій якості (5.16), який для цифрової АСК без каналу збурення прийме вигляд:

$$I = \begin{cases} T_{KV} \sum_{s=0}^{Nt-1} [q|e_s| + (1-q)|z_s - Ku_s|], & \text{при } Nvr = 1; \\ T_{KV} \sum_{s=0}^{Nt-1} [qe_s^2 + (1-q)(z_s - Ku_s)^2], & \text{при } Nvr = 2. \end{cases} \quad (6.9)$$

Динамічні властивості аналогової АСК визначаються передатною функцією РС (див. п.6.1.1). За умови, якщо в якості “одиниці часу” використовується постійна часу ОК – передатна функція РС для цифрової АСК із врахуванням цифрового квантувача та фіксатора нульового порядку в “безрозмірній формі” прийме вигляд [284]:

$$W_{PC}(z) = Z \left\{ \frac{1 - e^{-T_{KV}^* p}}{p} K_R^* \left(1 + \frac{1}{T_I^* p} \right) \frac{e^{-p\tau^*}}{p+1} \right\}, \quad (6.10)$$

де
$$T_{KV}^* = \frac{T_{KV}}{T}, \tau^* = \frac{\tau}{T}, T_I^* = \frac{T_I}{T}, K_R^* = K \cdot K_R. \quad (6.11)$$

Враховуючи (6.10), розглянемо АСК із ОК передатною функцією

$$W_{OK}^*(z) = Z \left\{ \frac{1 - e^{-T_{KV}^* p}}{p} \cdot \frac{e^{-p\tau^*}}{p+1} \right\}. \quad (6.12)$$

Для моделі ОК (6.12) динамічні властивості визначаються відносним запізнюванням τ^* та періодом дискретизації T_{KV}^* , при цьому “розрахунковий” регулятор характеризується безрозмірними параметрами K_R^*, T_I^* .

Для “безрозмірного масштабу часу” критерій (6.9) прикмет вид:

$$I^* = \begin{cases} T_{KV}^* \sum_{s=0}^{Nt^*-1} (q|e_s^*| + (1-q)|z_s^* - u_s^*|), & Nvr = 1; \\ T_{KV}^* \sum_{s=0}^{Nt^*-1} (q(e_s^*)^2 + (1-q)(z_s^* - u_s^*)^2), & Nvr = 2. \end{cases} \quad (6.13)$$

Пошук оптимальних налаштувань ЦР АСК із ОК (6.1) за критерієм (6.13) проводився чисельно методом Хука-Дживса. Аналогічно п.6.1, результати чисельного пошуку налаштувань ЦР апроксимувалися методом найменших квадратів

$$\varepsilon^* = \sum_{s=0}^{m-1} \sum_{z=0}^{n-1} [y_{s,z}^* - f_a(\tau_s^*, T_{KV,z}^*)]^2 \rightarrow \min, \quad (6.14)$$

тут, $y_{s,z}^*$ – чисельно знайдене значення параметра ЦР; $f_a(\tau_s^*, T_{KV,z}^*)$ – апроксимуюча функція; $m \times n$ – кількість чисельно знайдених розв'язків для параметра ЦР в області пошуку. Пошук параметрів ЦР проводився в області: $\tau^* \in [0.1 \dots 2]$, $m=10$; $T_{KV}^* \in [0.05 \dots 0.3]$, $n=10$ для ПІ-регулятора.

Зворотний перерахунок параметрів ЦР до “дійсного” масштабу часу проводиться із врахуванням (6.11). Результати подано у табл. 6.5. Якість апроксимації оцінювалася середньою відносною похибкою

$$E^* = \frac{1}{(m+n)} \sum_{s=0}^{m-1} \sum_{z=0}^{n-1} \frac{\sum_{k=0}^{Nt-1} |h_k - h_k^a|}{\sum_{k=0}^{Nt} |h_k|} \cdot 100,$$

де, h_k і h_k^a – відповідно оптимальні перехідні процеси у цифровий АСК отримані чисельно та за допомогою апроксимуючих залежностей табл. 6.5. Отримана похибка апроксимації цілком припустима для інженерних задач.

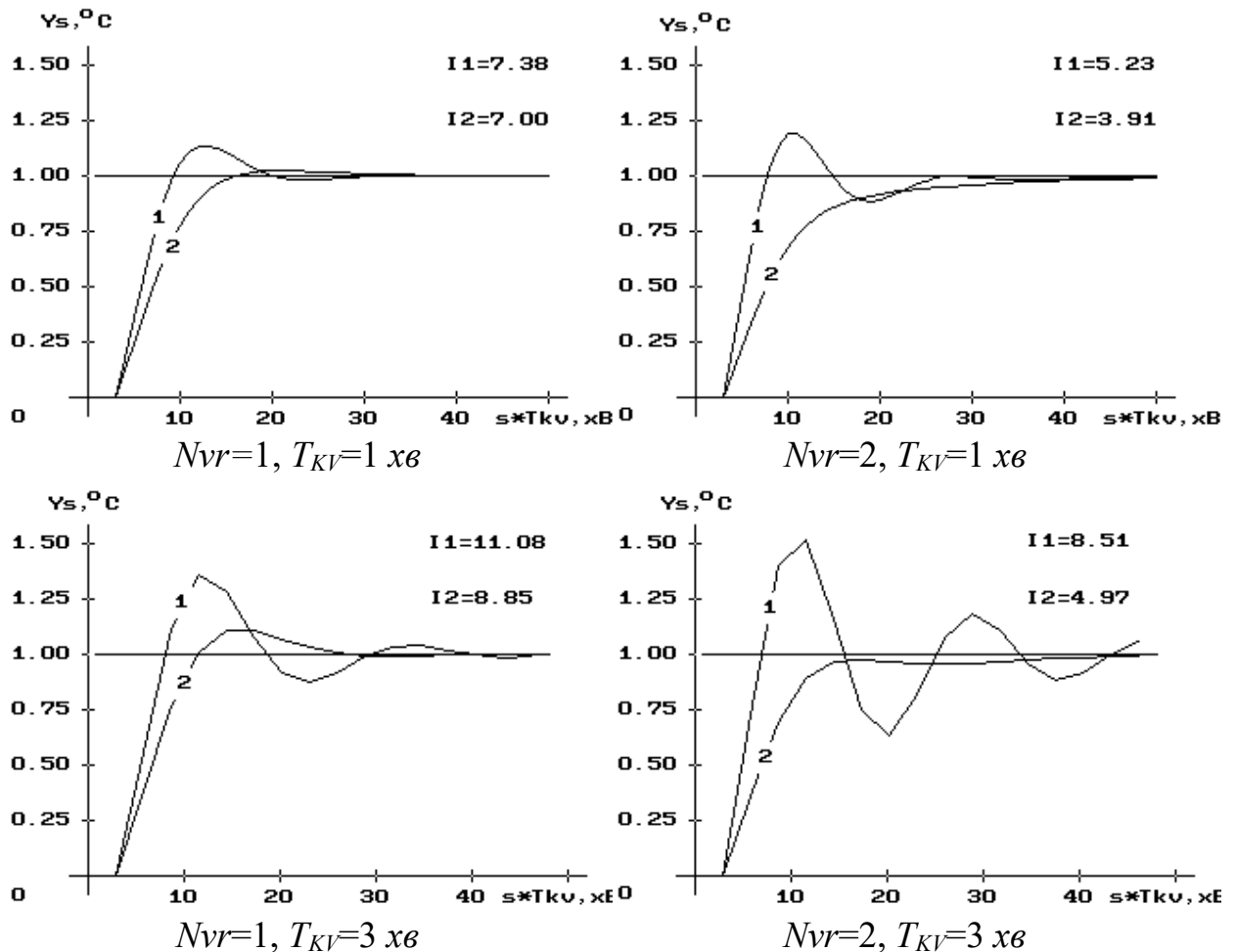
Таблиця 6.5. Залежності оптимальних налаштувань ЦР

ЦР	Параметри критерію (6.9)	
	$q=1$	$q=0.5$
ПІ-регулятор, ($N_{vr}=1$)	$K_R = \frac{1}{K} \left[0.232 + 0.57 \left(\frac{T}{\tau} \right)^{0.77} - 0.173 \frac{T_{KV}}{T} \right],$ $T_I = 0.804 T + 0.562 \tau - 0.303 T_{KV},$ $E^* = 1.86 \%$	$K_R = \frac{1}{K} \left[0.434 + 0.214 \frac{T}{\tau} - 0.237 \frac{T_{KV}}{T} \right],$ $T_I = 0.775 T + 0.502 \tau - 0.386 T_{KV},$ $E^* = 0.52 \%$
ПІ-регулятор, ($N_{vr}=2$)	$K_R = \frac{1}{K} \left[0.329 + 0.751 \left(\frac{T}{\tau} \right)^{0.783} - 0.257 \frac{T_{KV}}{T} \right],$ $T_I = 1.186 T + 0.652 \tau - 0.587 T_{KV},$ $E^* = 0.78 \%$	$K_R = \frac{1}{K} \left[0.096 + 0.688 \left(\frac{T}{\tau} \right)^{0.318} - 0.097 \frac{T_{KV}}{T} \right],$ $T_I = 0.985 T + 0.587 \tau - 0.217 T_{KV},$ $E^* = 0.38 \%$

Розглянемо приклад оптимізації ЦР АСК із ОК (6.8). Використовуючи формули табл. 6.5, розраховано настроювання ЦР для критерію (6.9), чисельні значення зведено в табл. 6.6. На рис. 6.5 представлені результати моделювання. Аналіз графіків дозволяє зробити висновки аналогічні п.6.1.

Таблиця 6.6. Оптимальні налаштування ПІ-регулятора

Цифровий ПІ-регулятор		Параметри критерію (6.9)	
		$q=1$	$q=0.5$
$T_{KV}=1 \text{ хв}$	$Nvr=1$	$K_R=0.22 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C}), T_I=9.3 \text{ хв}$	$K_R=0.15 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C}), T_I=8.8 \text{ хв}$
	$Nvr=2$	$K_R=0.29 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C}), T_I=13.1 \text{ хв}$	$K_R=0.14 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C}), T_I=11.3 \text{ хв}$
$T_{KV}=3 \text{ хв}$	$Nvr=1$	$K_R=0.21 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C}), T_I=8.7 \text{ хв}$	$K_R=0.14 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C}), T_I=8 \text{ хв}$
	$Nvr=2$	$K_R=0.29 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C}), T_I=11.9 \text{ хв}$	$K_R=0.14 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C}), T_I=10.9 \text{ хв}$

Рис. 6.5. Перехідні процеси у АСК з ПІ-регулятором оптимізовані за критерієм (6.9): 1 – $q=1$; 2 – $q=0.5$

Дослідимо якість перехідних процесів у АСК за отриманими та існуючими залежностями. Літературний огляд не виявив аналогічних залежностей для цифрових АСК. Для інженерних розрахунків ЦР дослідники пропонують використовувати номограми [287]. Тому для порівняння використано залежності для аналогових АСК із табл. 6.3 та отримані залежності із табл. 6.5 при $T_{KV}=0$. Розрахунки оптимальних налаштувань ПІ-регулятора за формулами табл. 6.3 та 6.5 для ОК (6.8) представлено у табл. 6.7. На рис. 6.6 представлено результати імітаційного моделювання.

Таблиця 6.7. Оптимальні настроювання ПІ-регулятора

Розрахункові формули	Критерій оптимізації	Значення параметрів
табл. 6.5, ($T_{KV}=0$)	(6.9), $Nvr=1, q=1$	$K_R=0.22 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=9.7 \text{ хв}$
(Ro)	$\int e dt \rightarrow \min$	$K_R=0.28 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=10.7 \text{ хв}$
(Ed)	$\int e dt \rightarrow \min$	$K_R=0.29 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=10.5 \text{ хв}$
табл. 6.5, ($T_{KV}=0$)	(6.9), $Nvr=2, q=1$	$K_R=0.3 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=13.7 \text{ хв}$
(Mu)	$\int e^2 dt \rightarrow \min$	$K_R=0.54 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=8.3 \text{ хв}$
(Zh)	$\int e^2 dt \rightarrow \min$	$K_R=0.52 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=9.2 \text{ хв}$

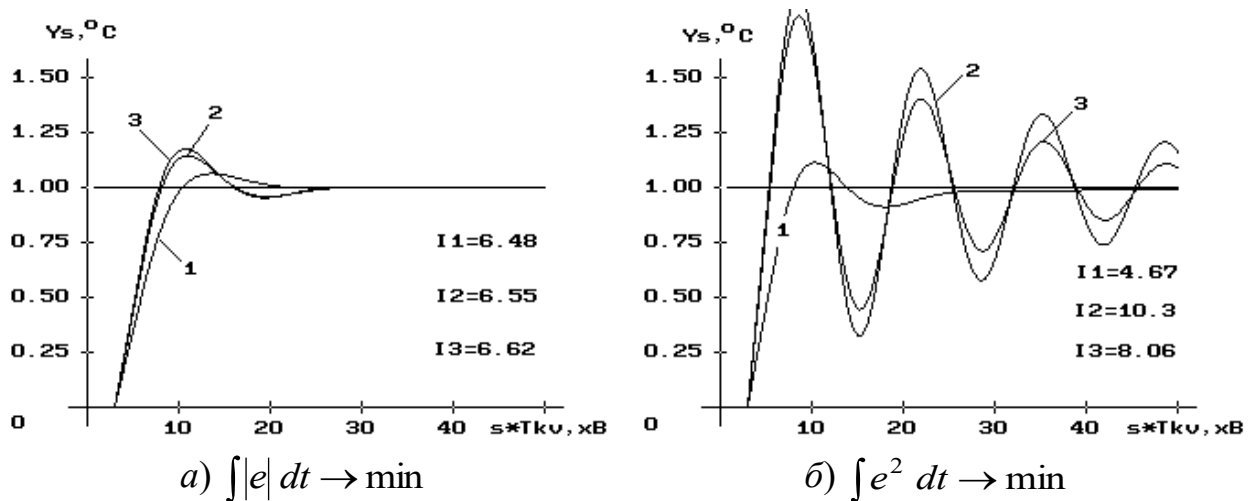


Рис. 6.6. Перехідні процеси в АСК з ПІ-регулятором:

а) 1 – (табл. 4.5), 2 – (Ro); 3 – (Ed);

б) 1 – (табл. 4.5); 2 – (Mu); 3 – (Zh)

Аналізуючи перехідні процеси (рис. 6.6) видно, що запропоновані розрахункові формули забезпечують найкраще значення критерію якості для АСК, якість перехідних процесів за модульним критерієм покращилася в середньому на 2%, а за квадратичним – на 50 %. За аналізом перехідних процесів рис 6.6 можна стверджувати про ефективність запропонованих інженерних формул для цифрових АСК.

Отже, вперше для оптимізації цифрових АСК запропоновано інженерні формули. Залежності можуть застосовуватися для налаштування аналогових і цифрових АСК в широкому діапазоні параметрів $0.1 \leq \tau/T \leq 2$ та $0 \leq T_{KV}/T \leq 0.3$ без застосування теорії Z-перетворення. Ця особливість

методу істотна для інженерно-обслуговуючого персоналу підприємств, які не знайомі із теорією цифрових систем керування.

6.3 Оптимізація АСК для об'єкту другого порядку із запізненням

Розглянемо неперервну АСК, для якої структурна схема зображена на рис. 6.1. Розглянемо випадок коли динамічні властивості ОК визначаються аперіодичною ланкою другого порядку із запізнюванням:

$$W_{OK}(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} e^{-p\tau}, \quad (6.15)$$

де, K – коефіцієнт передачі, T_1 і T_2 – постійні часу, τ – запізнювання ОК.

Для керування будемо застосовувати ПІ-закон регулювання (6.2). В якості критерію оптимізації використаємо (6.3). Для синтезу оптимального регулятора за каналом $z \rightarrow y$ АСК застосуємо підхід розглянутий у п.6.1. При умові $T_1 \geq T_2$, у якості “одиниці часу” використаємо постійну часу T_1 . Тоді передатна функція РС прийме вигляд [285]:

$$W_{PC}(p) = K_R^* \left(1 + \frac{1}{T_I^* p} \right) \frac{e^{-p\tau^*}}{(p+1)(T^* p + 1)}, \quad (6.16)$$

тут,
$$\tau^* = \frac{\tau}{T_1}, \quad T^* = \frac{T_2}{T_1}, \quad T_I^* = \frac{T_I}{T_1}, \quad K_R^* = K \cdot K_R. \quad (6.17)$$

Індексом $*$ позначаються змінні динамічної моделі АСК в масштабі постійної часу T_1 ОК.

Враховуючи (6.17), можна розглядати АСК, у якій ОК визначається передатною функцією:

$$W_{OK}^*(p) = \frac{e^{-p\tau^*}}{(p+1)(T^* p + 1)}. \quad (6.18)$$

Динамічні властивості ОК однозначно визначаються відносним запізнюванням τ^* та постійною часу T^* (за умови $0 \leq T^* \leq 1$), ПІ-регулятор характеризується відносними параметрами K_R^* , T_I^* . Для “безрозмірного масштабу часу” критерій (6.3) прийме вигляд (6.6).

Пошук оптимальних настроювань регулятора (K_R^* , T_I^*) для ОК (6.18) за критерієм (6.6) проводився чисельно за методом Хука-Дживса. Результати чисельного пошуку оптимальних настроювань регулятора апроксимувалися із використанням методу найменших квадратів:

$$\varepsilon^* = \sum_{s=0}^{m-1} \sum_{z=0}^{n-1} \left[y_{s,z}^* - f_a(\tau_s^*, T_z^*) \right]^2 \rightarrow \min, \quad (6.19)$$

тут, $y_{s,z}^*$ – чисельно знайдене значення параметра регулятора; $f_a(\tau_s^*, T_z^*)$ – апроксимуюча функція; $m \times n$ – кількість чисельно знайдених розв'язків для параметра регулятора в області пошуку. Для забезпечення умови (6.19) використовувалися апроксимуючі залежності:

$$1) f_a(\tau^*, T^*) = a_0 + a_1 \left(\frac{1}{\tau^*} \right)^{a_2} + a_3 \left(\frac{1}{\tau^* + T^*} \right)^{a_4} - \text{для } K_R^* \text{ регулятора;}$$

$$2) f_a(\tau^*, T^*) = a_0 + a_1 (\tau^*)^{a_2} + a_3 (\tau^* + T^*)^{a_4} - \text{для } T_I^* \text{ регулятора.}$$

Зворотне перерахування параметрів регулятора до “дійсного” масштабу часу виконано за (6.17). Результати апроксимації налаштування ПІ-регулятора наведено в табл. 6.8. Якість апроксимації оцінювалася середньою відносною похибкою

$$E^* = \frac{1}{(m+n)} \sum_{s=0}^{m-1} \sum_{z=0}^{n-1} \frac{\int_0^{t_f} |h(t) - h^a(t)| dt}{\int_0^{t_f} |h(t)| dt} \cdot 100, \quad (6.20)$$

де, $h(t)$ і $h^a(t)$ – оптимальні перехідні процеси в АСК отримані чисельно та за допомогою залежностей табл. 6.8. Отримана похибка апроксимації припустима для інженерних задач.

Розглянемо приклад синтезу оптимальної системи керування температурою для кондиціонера за каналом регулювання. В якості моделі ОК використано передатну функцію $W_{OK}(p) = \frac{6.74}{43.12p^2 + 15.13p + 1} e^{-2.5p}$, яку отримано експериментальним шляхом у роботі [134].

Таблиця 6.8. Залежності для оптимізації АСК із ПІ-регулятором

Параметри критерію (6.3)	Розрахункові формули, $0.1 \leq \frac{\tau}{T_1} \leq 2$, $T_1 \geq T_2$
$Nvr=1, q=1$, $E^* = 2.09\%$	$K_R = \frac{1}{K} \left[0.055 + 0.691 \left(\frac{T_1}{\tau} \right)^{0.579} + 0.043 \left(\frac{T_1}{\tau + T_2} \right)^{1.614} \right],$ $T_I = T_1 \left[0.892 - 1.447 \left(\frac{\tau}{T_1} \right)^{0.495} + 1.817 \left(\frac{\tau + T_2}{T_1} \right)^{0.65} \right].$
$Nvr=1, q=0.5$, $E^* = 2.39\%$	$K_R = \frac{1}{K} \left[-0.152 + 0.694 \left(\frac{T_1}{\tau} \right)^{0.16} + 0.091 \left(\frac{T_1}{\tau + T_2} \right)^{1.399} \right],$ $T_I = 0.78 T_1 - 0.311 \tau + 0.732 (\tau + T_2).$
$Nvr=2, q=1$, $E^* = 0.91\%$	$K_R = \frac{1}{K} \left[0.622 + 1.266 \left(\frac{T_1}{\tau} \right)^{0.605} - 0.892 \left(\frac{T_1}{\tau + T_2} \right)^{0.249} \right],$ $T_I = T_1 \left[3.431 - 5.25 \left(\frac{\tau}{T_1} \right)^{0.242} + 3.447 \left(\frac{\tau + T_2}{T_1} \right)^{0.531} \right].$
$Nvr=2, q=0.5$, $E^* = 1.35\%$	$K_R = \frac{1}{K} \left[-0.72 + 1.438 \left(\frac{T_1}{\tau} \right)^{0.112} + 0.061 \left(\frac{T_1}{\tau + T_2} \right)^{0.324} \right],$ $T_I = 0.963 T_1 - 0.354 \tau + 0.923 (\tau + T_2).$

ОК складається із калорифера другого підігріву та приміщення. Передатну функцією ОК приведено до форми (6.15)

$$W_{OK}(p) = \frac{6.74}{(11.32p + 1)(3.81p + 1)} e^{-2.5p}. \quad (6.21)$$

Використовуючи залежності табл. 6.8 розраховані настроювання ПІ-регулятора для можливих варіантів критерію (6.3). Отримані чисельні значення оптимальних налаштувань регулятора зведено в табл. 6.9. На рис. 6.7 представлено результати імітаційного моделювання.

Таблиця 6.9. Оптимальні настроювання регулятора за каналом $z \rightarrow y$

Параметри критерію (4.35)	Розрахункові значення параметрів ПІ-регулятора
$Nvr=1, q=1$	$K_R=0.27 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=16.4 \text{ хв}$
$Nvr=1, q=0.5$	$K_R=0.14 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=12.7 \text{ хв}$
$Nvr=2, q=1$	$K_R=0.41 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=26.2 \text{ хв}$
$Nvr=2, q=0.5$	$K_R=0.16 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=15.8 \text{ хв}$

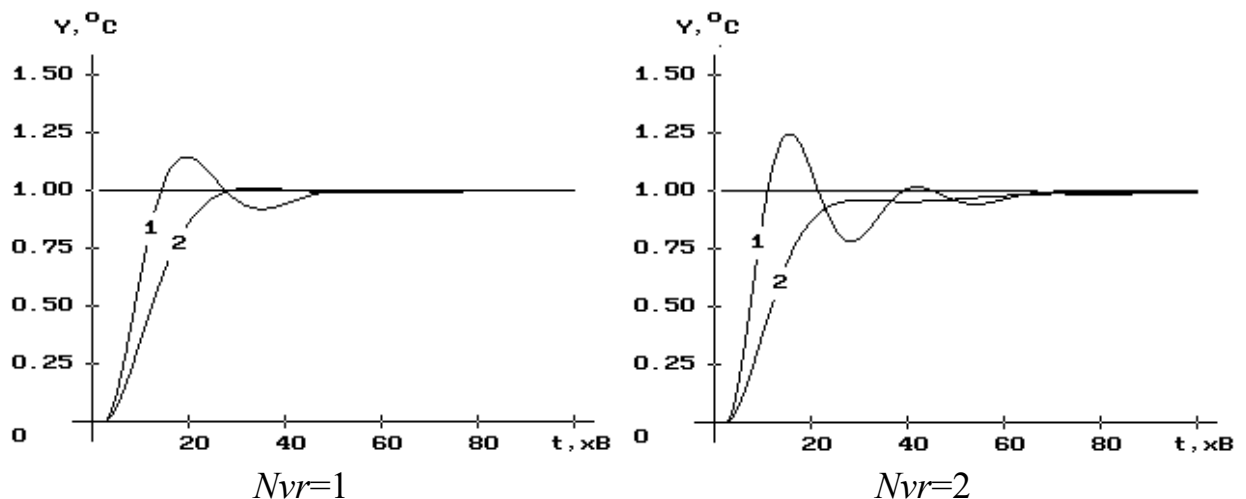


Рис. 6.7. Перехідні процеси в АСК з ПІ-регулятором оптимізовані за критерієм (6.3): 1 – $q=1$; 2 – $q=0.5$

Аналіз перехідних процесів оптимальної АСК для об'єкту другого порядку із запізнюванням дозволяє зробити висновки аналогічні п.6.1. Використовуючи математичне забезпечення підрозділу, у статті [285] запропоновано функціональні залежності для оптимізації АСК із ПІД-регулятором та ОК другого порядку із запізненням. У статті порівняна ефективність оптимізації ПІД-регулятора за отриманими залежностями та існуючими із довідника [171].

За підрозділом можна зробити висновки. Для критерію оптимізації (6.3) отримано функціональні залежності налаштування ПІ-регулятора за динамічними властивостями ОК другого порядку із запізненням. Розрахункові формули відрізняються від існуючих простою структурою, високою точністю та відсутністю в методі графічних номограм. Запропоновані залежності можуть застосовуватися для настроювання АСК в широкому діапазоні динамічних властивостей ОК: $0.1 \leq \tau/T_1 \leq 2$, $T_1 \geq T_2$.

6.4 Оптимізація АСК за каналом збурення

У більшості випадків експрес-методи орієнтовані на оптимізацію АСК за каналом завдання – вихід [171]. Проте, для багатьох неперервних ТП основним завданням регуляторів є стабілізація вихідних змінних на заданих

значеннях при дії технологічних збурень. Використовуючи підхід розглянутий у п.6.1 – п.6.3 у роботах [294, 295] автором отримано розрахункові залежності для оптимізації АСК за каналом збурення, які представлено нижче. В якості моделі ОК використовуються аперіодичні ланки першого та другого порядків із запізненням.

1. Синтез АСК для ОК першого порядку із запізненням. Структурна схема АСК має вигляд зображений на рис. 6.8.

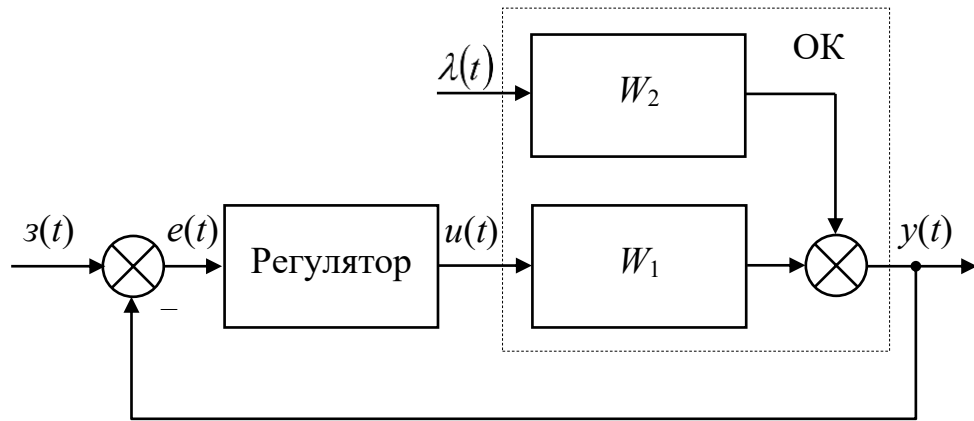


Рис. 6.8. Структура схема АСК: W_1 , W_2 – канали регулювання та збурення ОК; $z(t)$ – сигнал завдання, $e(t)$ – помилка регулювання, $u(t)$ – сигнал керування, $\lambda(t)$ – зовнішнє збурення, $y(t)$ – вихідний сигнал ОК

Модель ОК задано передатними функціями:

$$W_1(p) = \frac{K_1}{T_1 p + 1} e^{-p\tau_1}; \quad W_2(p) = \frac{K_2}{T_2 p + 1} e^{-p\tau_2}, \quad (6.22)$$

де, відповідно, K_1 , K_2 – коефіцієнти передачі, T_1 і T_2 – постійні часу, τ_1 і τ_2 – запізнювання ОК за каналами регулювання та збурення. Для оптимізації застосовано ПІ–закон (6.2). В якості критерію оптимізації використано (5.16), який для неперервної АСК має вигляд

$$I = \begin{cases} \int_0^{t_f} (q|e| + (1-q)|z - K_1 u - K_2 \lambda|) dt, & Nvr = 1; \\ \int_0^{t_f} (q e^2 + (1-q)(z - K_1 u - K_2 \lambda)^2) dt, & Nvr = 2. \end{cases} \quad (6.23)$$

У табл. 6.10 зведено чисельно отримані залежності для оптимізації АСК за критерієм (6.23). Похибка апроксимації E^* оцінювалася за (6.20).

Таблиця 6.10. Залежності для оптимізації параметрів
ПІ-регулятора за каналом $\lambda \rightarrow y$ АСК

Параметри критерію (6.23)	Розрахункові формули, $0.1 \leq \tau_1/T_1 \leq 2$, $2T_1 \geq T_2$
$Nvr=1, q=1,$ $E^* = 1.06\%$	$K_R = \frac{1}{K_1} \left[0.257 + 1.064 \left(\frac{T_1}{\tau_1} \right)^{0.821} - 0.541 \left(\frac{T_1}{T_2 + \tau_1} \right)^{0.735} \right],$ $T_I = T_1 \left[0.61 + 1.6 \left(\frac{\tau_1}{T_1} \right)^{0.484} - 0.651 \left(\frac{T_2 + \tau_1}{T_1} \right)^{0.341} \right].$
$Nvr=1, q=0.5,$ $E^* = 2.83\%$	$K_R = \frac{1}{K_1} \left[0.253 + 0.89 \left(\frac{T_1}{\tau_1} \right)^{0.826} - 0.525 \frac{T_1}{T_2 + \tau_1} \right],$ $T_I = T_1 \left[1.181 + 0.885 \left(\frac{\tau_1}{T_1} \right)^{0.756} - 0.686 \left(\frac{T_2 + \tau_1}{T_1} \right)^{0.19} \right].$
$Nvr=2, q=1,$ $E^* = 0.75\%$	$K_R = \frac{1}{K_1} \left[0.312 + 1.357 \left(\frac{T_1}{\tau_1} \right)^{0.792} - 0.567 \left(\frac{T_1}{T_2 + \tau_1} \right)^{0.712} \right],$ $T_I = T_1 \left[1.156 + 1.972 \left(\frac{\tau_1}{T_1} \right)^{0.548} - 1.081 \left(\frac{T_2 + \tau_1}{T_1} \right)^{0.362} \right].$
$Nvr=2, q=0.5,$ $E^* = 4.35\%$	$K_R = \frac{1}{K_1} \left[0.52 + 1.311 \left(\frac{T_1}{\tau_1} \right)^{0.693} - 1.149 \left(\frac{T_1}{T_2 + \tau_1} \right)^{0.702} \right],$ $T_I = 1.127 T_1 + 0.678 \tau_1 - 0.154 T_2.$

2. Синтез АСК для ОК другого порядку із запізненням. Структурна схема АСК відповідає рис. 6.8. Модель ОК описується передатними функціями:

$$W_1(p) = W_2(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} e^{-p\tau}, \quad (6.24)$$

де, K – коефіцієнт передачі, T_1 і T_2 – постійні часу, τ – запізнювання ОК. Для регулювання застосовано ПІ-закон (6.2). В якості критерію оптимізації використано (5.16), який для неперервної АСК має вигляд

$$I = \begin{cases} \int_0^{t_f} (q|e| + (1-q)|z - Ku - K\lambda|) dt, & Nvr = 1; \\ \int_0^{t_f} (q e^2 + (1-q)(z - Ku - K\lambda)^2) dt, & Nvr = 2. \end{cases} \quad (6.25)$$

У табл. 6.11 зведено отримані функціональні залежності для оптимізації АСК за критерієм (6.25). Похибка апроксимації E^* оцінювалася за (6.20).

Таблиця 6.11. Залежності для оптимізації параметрів ПІ–регулятора за каналом $\lambda \rightarrow y$ АСК

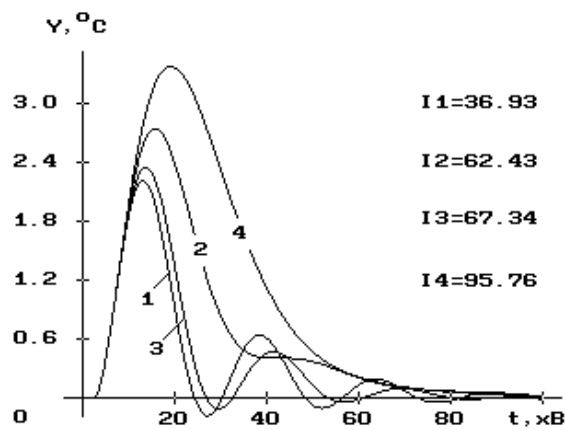
Параметри критерію (6.25)	Розрахункові формули, $0.1 \leq \tau/T_1 \leq 2$, $T_1 \geq T_2$
1	2
$Nvr=1, q=1,$ $E^* = 1.4 \%$	$K_R = \frac{1}{K} \left[1.048 + 1.152 \left(\frac{T_1}{\tau} \right)^{0.778} - 1.306 \left(\frac{T_1}{\tau + T_2} \right)^{0.281} \right],$ $T_I = T_1 \left[0.206 - 1.331 \left(\frac{\tau}{T_1} \right)^{0.663} + 2.467 \left(\frac{\tau + T_2}{T_1} \right)^{0.619} \right].$
$Nvr=1, q=0.5,$ $E^* = 2.54 \%$	$K_R = \frac{1}{K} \left[0.162 + 0.678 \left(\frac{T_1}{\tau} \right)^{0.684} + 0.03 \left(\frac{T_1}{\tau + T_2} \right)^{1.787} \right],$ $T_I = T_1 \left[0.617 - 0.913 \left(\frac{\tau}{T_1} \right)^{0.672} + 1.572 \left(\frac{\tau + T_2}{T_1} \right)^{0.753} \right].$
$Nvr=2, q=1,$ $E^* = 3.24 \%$	$K_R = \frac{1}{K} \left[0.856 + 1.46 \left(\frac{T_1}{\tau} \right)^{0.797} - 1.117 \left(\frac{T_1}{\tau + T_2} \right)^{0.435} \right],$ $T_I = T_1 \left[0.077 - 1.451 \left(\frac{\tau}{T_1} \right)^{0.716} + 3.075 \left(\frac{\tau + T_2}{T_1} \right)^{0.613} \right].$
$Nvr=2, q=0.5,$ $E^* = 2.45 \%$	$K_R = \frac{1}{K} \left[0.305 + 0.83 \left(\frac{T_1}{\tau} \right)^{0.736} + 0.031 \left(\frac{T_1}{\tau + T_2} \right)^{1.577} \right],$ $T_I = T_1 \left[1.96 - 3.13 \left(\frac{\tau}{T_1} \right)^{0.358} + 2.818 \left(\frac{\tau + T_2}{T_1} \right)^{0.624} \right].$

Розглянемо приклад оптимізації АСК кондиціонера за каналом $\lambda \rightarrow y$. ОК складається із калорифера другого підігріву та приміщення, модель якого вже використовувалася (6.21). Використовуючи табл. 6.11 та модель (6.21), розраховано настроювання ПІ–регулятора для можливих варіантів критерію (6.25), чисельні значення розрахунків зведено в табл. 6.12. Також, у табл. 6.12 представлені оптимальні настроювання ПІ–регулятора для каналу $z \rightarrow y$, які

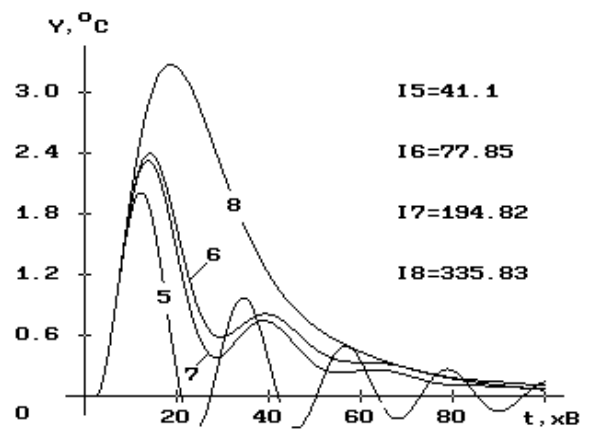
отримано чисельно у п.6.3. На рис. 6.8 і 6.9 представлені результати моделювання перехідних процесів у АСК для каналів $\lambda \rightarrow y$ та $z \rightarrow y$.

Таблиця 6.12. Оптимальні настроювання ПІ-регулятора

Параметри критерію (6.25)	Значення параметрів ПІ-регулятора	
	$\lambda \rightarrow y$; (номер графіка)	$z \rightarrow y$; (номер графіка)
$Nvr=1, q=1$	$K_R=0.48 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=16.3 \text{ хв}$; (графік 1)	$K_R=0.26 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=16.4 \text{ хв}$; (графік 2)
$Nvr=1, q=0.5$	$K_R=0.4 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=14.7 \text{ хв}$; (графік 3)	$K_R=0.13 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=12.5 \text{ хв}$; (графік 4)
$Nvr=2, q=1$	$K_R=0.64 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=19.6 \text{ хв}$; (графік 5)	$K_R=0.4 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=26.4 \text{ хв}$; (графік 6)
$Nvr=2, q=0.5$	$K_R=0.43 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=23.7 \text{ хв}$; (графік 7)	$K_R=0.15 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_I=15.6 \text{ хв}$; (графік 8)

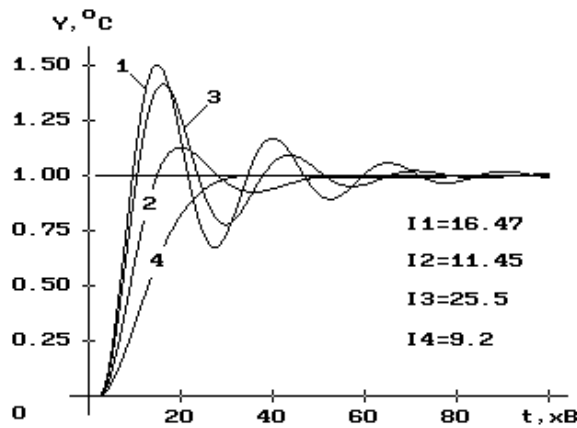


$Nvr=1$

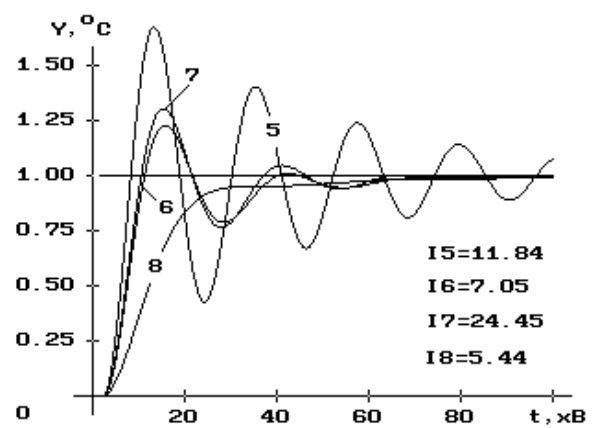


$Nvr=2$

Рис. 6.8. Перехідні процеси у АСК за каналом $\lambda \rightarrow y$



$Nvr=1$



$Nvr=2$

Рис. 6.9. Перехідні процеси у АСК за каналом $z \rightarrow y$

Аналізуючи пари графіки 1 і 2, 3 і 4, 5 і 6, 7 і 8 видно, що значення критерію менше для перехідних процесів, які оптимізовані для необхідного каналу впливу. Таким чином, параметрична оптимізація ПІ-регулятора за каналом $\lambda \rightarrow y$ не є оптимальною для каналу $z \rightarrow y$ АСР та навпаки.

Таким чином, за підрозділом можна зробити висновки. Отримано функціональні залежності, що дозволяють проводити оптимальне налаштування регулятора за каналом збурення. Розрахункові формули зручні для практичного використання, тут відсутні графічні номограми, що вирізняє отримані формули від існуючих та виключає суб'єктивність дослідника при визначенні параметрів регулятора. Отримані залежності можуть застосовуватися для настроювання АСР в широкому діапазоні динамічних властивостей ОК: $0.1 \leq \tau/T_1 \leq 2$, $T_1 \geq T_2$.

6.5 Застосування експрес-методів для оптимізації цифрових АСК

Функціональні залежності п.6.1 (окрім п.6.2) справедливі для оптимізації неперервних АСК. У випадку оптимізації цифрових АСК, необхідно враховувати дискретну роботу регулятора. З теорії цифрових систем відомо, що період квантування T_{KV} вносить запізнювання в роботу системи керування. Фіксацію вихідного сигналу ЦР на період квантування T_{KV} виконує ФНП, передатна функція якого (5.12). При підстановці $p = j\omega$ отримаємо частотну характеристику ФНП [178]:

$$W_{\text{ФНП}}(j\omega) = \frac{1 - e^{-j\omega T_{KV}}}{j\omega} = T_{KV} \frac{e^{-j\frac{\omega T_{KV}}{2}}}{\frac{\omega T_{KV}}{2}} \left(\frac{e^{j\frac{\omega T_{KV}}{2}} - e^{-j\frac{\omega T_{KV}}{2}}}{2j} \right) = T_{KV} \left| \frac{\sin\left(\frac{\omega T_{KV}}{2}\right)}{\frac{\omega T_{KV}}{2}} \right| e^{-j\frac{\omega T_{KV}}{2}}.$$

Із останнього співвідношення випливає, що ФНП вносить запізнення у цифрову АСК, яке дорівнює $\frac{T_{KV}}{2}$.

Динамічні властивості ФНП можна розглядати як частину динамічних властивостей ОК. Тоді передатну функцію ОК можна представити у вигляді

еквівалентної передатної функції ОК: $W_{EOK}(p) = W_{OK}(p)W_{ФНП}(p)$, а регулятор розраховувати за запропонованими залежностями. Проте, для такого випадку, добуток $W_{OK}(p)W_{ФНП}(p)$ неможливо буде подати спрощеною моделлю ОК у вигляді аперіодичної ланки першого або другого порядку із запізненням.

Щоб представити динамічні властивості еквівалентного ОК спрощеною моделлю ОК (у вигляді аперіодичної ланки першого або другого порядку із запізненням) та розрахувати оптимальні налаштування ЦР АСК за запропонованими у п.6.1 формулами необхідно:

- 1) задатися періодом квантування ЦР T_{KV} ;
- 2) визначити еквівалентне запізнювання ОК в цифрові АСК як суму:

$$\tau_e = \tau + \frac{T_{KV}}{2}, \text{ де } \tau - \text{запізнювання ОК (за каналом регулювання) для моделі}$$

ОК першого порядку (6.1) або другого порядку (6.15) із запізненням;

- 3) для параметричної оптимізації ЦР за експрес-залежностями п.6.1 необхідно використовувати передатну функцію еквівалентного ОК із врахуванням еквівалентного запізнювання τ_e , (див. крок 2).

Розглянемо приклад оптимізації цифрової АСК за каналом збурення для ОК другого порядку із запізненням. Для моделювання використаємо властивості ОК із п.6.3 (6.21). Для цифрової АСК приймемо періоди квантування $T_{KV} = 2$ та $T_{KV} = 4$. Еквівалентні передатні функції ОК приймуть

$$\text{вигляд: } W_{EOK} = \frac{6.74}{(11.32p + 1)(3.81p + 1)} e^{-3.5p} \text{ для цифрової АСК із } T_{KV} = 2;$$

$$W_{EOK} = \frac{6.74}{(11.32p + 1)(3.81p + 1)} e^{-4.5p} \text{ для цифрової АСК із } T_{KV} = 4.$$

Результати розрахунків ЦР для $W_{EOK}(p)$ за табл. 6.11 зведено у табл. 6.13. Також, у табл. 6.13 представлені результати чисельної оптимізації ЦР АСК за п.5.2. Результати моделювання цифрової АСК зображені на рис. 6.10. З урахуванням

похибки заявленої у табл. 6.11, результати моделювання підтверджують правомірність використання запропонованих формул для оптимізації ЦР.

Таблиця 6.13. Оптимальні настроювання ЦР за критерієм (6.25)

Параметри критерію (6.25)	Оптимальні параметри цифрового ПІ-регулятора за каналом $\lambda \rightarrow y$ АСК	
	$T_{KV} = 2$ хв; (номер графіка)	$T_{KV} = 4$ хв; (номер графіка)
$N_{vr}=1, q=1$	$K_R=0.36 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_F=16.7$ хв; (графік 1, розрахунки за табл. 4.11)	$K_R=0.29 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_F=17.2$ хв; (графік 3, розрахунки за табл. 4.11)
$N_{vr}=1, q=1$	$K_R=0.38 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_F=16.3$ хв; (графік 2, чисельна оптимізація)	$K_R=0.32 \text{ м}^3/(\text{хв} \cdot ^\circ\text{C})$, $T_F=18.9$ хв; (графік 4, чисельна оптимізація)

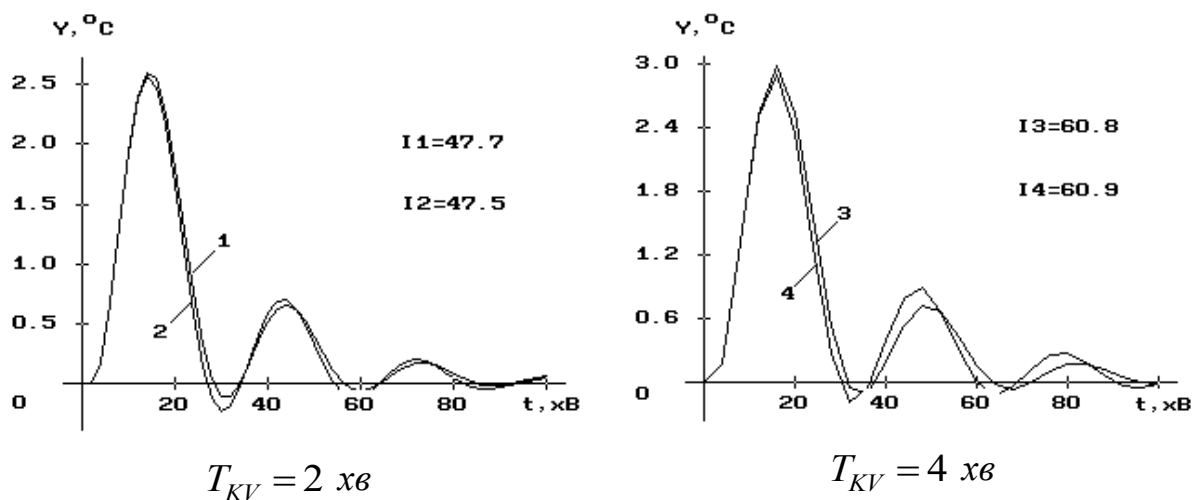


Рис. 6.10. Перехідні процеси в цифровій АСК за каналом $\lambda \rightarrow y$

Аналізуючи перехідні процеси (рис. 6.10), можна стверджувати, що запропонована методика використання експрес-методів для оптимізації цифрових АСК за інтегральними показниками якості має відносну похибку

$$\text{менше } 1\%, \text{ для } T_{KV} = 2 \text{ хв.} - \Delta I_{A1} = \left| \frac{I_2 - I_1}{I_2} \right| \cdot 100 = \left| \frac{47.5 - 47.7}{47.5} \right| \cdot 100 = 0.42 \%,$$

$$\text{для } T_{KV} = 4 \text{ хв.} - \Delta I_{A2} = \left| \frac{I_4 - I_3}{I_4} \right| \cdot 100 = \left| \frac{60.9 - 60.8}{60.9} \right| \cdot 100 = 0.16 \%.$$

6.6 Оптимізація цифрової АСК у стохастичному середовищі

При експлуатації АСК на корисні сигнали накладаються промислові перешкоди, що є випадковими збуреннями. З цих причин вихідні координати системи керування практично завжди представляють випадкові функції часу.

Опис таких систем за допомогою детермінованих підходів не завжди виправдано, що змушує переходити від традиційних детермінованих математичних моделей системи керування до стохастичних.

Загальним статистичним критерієм функціонування АСК є середньоквадратична помилка відтворення (СКПВ) корисного сигналу в умовах впливу випадкових завад на ОК [178, 296]. Мінімальне значення СКПВ відповідає оптимальним умовам функціонування стохастичної АСК. Недоліком використання СКПВ в якості критерію оптимізації для реальної АСК є те, що окрім мінімізації дисперсії керованої величини на технологічний процес накладаються обмеження із мінімізації керуючого впливу та точності стабілізації завдання, які не враховуються. Таким чином, виникає необхідність адаптації методів теорії стохастичного керування до практичних потреб систем керування, що дозволяє максимально наблизити формалізовані задачі синтезу ЦР до реальних умов функціонування АСК.

Розглянемо ОК із одним входом u та одним виходом y , модель якого представимо у вигляді z -перетворення [178]

$$y(z) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(z), \quad (6.26)$$

де $B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}$ та $A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m}$.

Припустимо, що на ОК впливають стохастичні збурення. Так як ОК лінійний, можна використати принцип суперпозиції та подати усі збурення у вигляді одного збурення, яке діє на виході. Окрім цього, вважатимемо, що збурення представляють стаціонарний гаусовий процес із дробово-раціональною спектральною щільністю. Отже, в загальному випадку модель взаємодії ОК із збурюючим середовищем можна подати рівнянням [296]

$$y(z) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(z) + \lambda \frac{D(z^{-1})}{C(z^{-1})} \gamma(z), \quad (6.27)$$

де $D(z^{-1}) = 1 + d_1 z^{-1} + \dots + d_m z^{-m}$; $C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_m z^{-m}$; $\gamma(z)$ – некорельований випадковий сигнал, причому $M\{\gamma(t)\} = \bar{\gamma}(t) = 0$,

$$M\{\gamma(t)\gamma(t+\tau)\} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \tau = 0, \\ 0, & \text{якщо } \tau \neq 0; \end{cases} \quad M - \text{оператор математичного сподівання.}$$

Для узагальнення, у моделі (6.27) усі поліноми m -го порядку, так як коефіцієнти вищих степенів завжди можна вважати рівними нулю.

Для АСК кондиціонера важливо мінімізувати відхилення вихідного сигналу ОК в робочій точці завдання, при цьому необхідно обмежувати витрату матеріальних ресурсів на досягнення цілі керування. З цих міркувань для аналітичної оптимізації стохастичної АСК використаємо квадратичну форму критерію (5.16). Таким чином, розглянемо синтез оптимальної структури ЦР, який забезпечує мінімум квадратичного критерію оптимальності [295, 297]:

$$J_{t+1} = M\left\{q(w_t - y_{t+1})^2 + (1-q)(w_t - K u_t)^2\right\}, \quad (6.28)$$

де w_t – завдання ЦР при $[nT_0] \leq t < [(n+1)T_0]$, T_0 – період дискретизації, $n = 0, 1, 2, \dots$; q – ваговий коефіцієнт, який враховує у критерії якості співвідношення впливу сигналів розбалансу $(w_t - y_{t+1})$ та приведенного відхилення керуючого впливу $(w_t - K u_t)$, $q \in [0 \dots 1]$; K – коефіцієнт передачі

ОК за каналом регулювання, для статичного ОК $K = \sum_{i=0}^m b_i / \sum_{i=0}^m a_i$.

У критерії якості (6.28) використовується змінна y_{t+1} , а не y_t , оскільки у вихідній моделі (6.27) $b_0 = 0$ (керуючий сигнал u_t не впливає на зміну вихідної величини y_t). Визначимо y_{t+1} як функцію відомих змінних $y_t, y_{t-1}, \dots; u_t, u_{t-1}, \dots$. Відповідно до рівняння (6.27), прогнозує значення y_{t+1} можна отримати із залежності

$$zy(z) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} zu(z) + \lambda \frac{D(z^{-1})}{C(z^{-1})} z\gamma(z), \quad (6.29)$$

звідки, $A(z^{-1})C(z^{-1})zy(z) = B(z^{-1})C(z^{-1})zu(z) + \lambda A(z^{-1})D(z^{-1})z\gamma(z)$.

Останнє рівняння запишемо у розгорнутій формі

$$\begin{aligned} (1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m})(1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_m z^{-m})zy(z) = \\ = (b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m})(1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_m z^{-m})zu(z) + \\ + \lambda (1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m})(1 + d_1 z^{-1} + \dots + d_m z^{-m})z\gamma(z). \end{aligned}$$

Виконавши множення поліномів та повертаючись у часову область, маємо

$$\begin{aligned} y_{t+1} + (a_1 + c_1)y_t + \dots + a_m c_m y_{t-2m+1} = \\ = b_1 u_t + (b_2 + b_1 c_1)u_{t-1} + \dots + b_m c_m u_{t-2m+1} + \\ + \lambda [\gamma_{t+1} + (a_1 + d_1)\gamma_t + \dots + a_m d_m \gamma_{t-2m+1}]. \end{aligned} \quad (6.30)$$

Із (6.30) визначимо y_{t+1} та використаємо його у критерії (6.28)

$$\begin{aligned} J_{t+1} = M \left\{ q \left(w_t + (a_1 + c_1)y_t + \dots + a_m c_m y_{t-2m+1} - b_1 u_t - \dots - b_m c_m u_{t-2m+1} - \right. \right. \\ \left. \left. - \lambda [(a_1 + d_1)\gamma_t + \dots + a_m d_m \gamma_{t-2m+1}] - \lambda \gamma_{t+1} \right)^2 + (1 - q)(w_t - K u_t)^2 \right\} \end{aligned} \quad (6.31)$$

В момент часу t усі змінні, що входять у (6.31) відомі за виключенням u_t та γ_{t+1} . Виконаємо операцію математичного сподівання для (6.31) враховуючи, що γ_{t+1} не залежить від інших змінних:

$$\begin{aligned} J_{t+1} = q \left[\left(w_t + (a_1 + c_1)y_t + \dots + a_m c_m y_{t-2m+1} - b_1 u_t - \dots - b_m c_m u_{t-2m+1} - \right. \right. \\ \left. \left. - \lambda [(a_1 + d_1)\gamma_t + \dots + a_m d_m \gamma_{t-2m+1}] \right)^2 + \lambda^2 M \{ \gamma_{t+1}^2 \} - \right. \\ \left. - 2\lambda \left(w_t + (a_1 + b_1)y_t + \dots + a_m b_m y_{t-2m+1} - b_1 u_t - \dots - b_m c_m u_{t-2m+1} - \right. \right. \\ \left. \left. - \lambda [(a_1 + d_1)\gamma_t + \dots + a_m d_m \gamma_{t-2m+1}] \right) M \{ \gamma_{t+1} \} \right] + (1 - q)(w_t - K u_t)^2. \end{aligned}$$

Оптимальне значення сигналу керування u_t визначимо із умови

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_{t+1}}{\partial u_t} = q \left(w_t + (a_1 + c_1)y_t + \dots + a_m c_m y_{t-2m+1} - b_1 u_t - \dots - b_m c_m u_{t-2m+1} - \right. \\ \left. - \lambda [(a_1 + d_1)\gamma_t + \dots + a_m d_m \gamma_{t-2m+1}] \right) b_1 + K(1 - q)(w_t - K u_t) = 0. \end{aligned} \quad (6.32)$$

Із (6.30) знайдемо

$$\begin{aligned} y_{t+1} - \lambda \gamma_{t+1} = -(a_1 + c_1)y_t - \dots - a_m c_m y_{t-2m+1} + b_1 u_t + \dots + b_m c_m u_{t-2m+1} + \\ + \lambda [(a_1 + d_1)\gamma_t + \dots + a_m d_m \gamma_{t-2m+1}]. \end{aligned} \quad (6.33)$$

Враховавши (6.33) у (6.32) маємо

$$\frac{\partial J_{t+1}}{\partial u_t} = q(w_t - y_{t+1} + \lambda \gamma_{t+1})b_1 + K(1-q)(w_t - Ku_t) = 0. \quad (6.34)$$

Різницеве рівняння (6.34) представимо у вигляді z -перетворення

$$q(w(z) - zy(z) + \lambda z\gamma(z))b_1 + K(1-q)(w(z) - Ku(z)) = 0. \quad (6.35)$$

Із (6.29) знайдемо $\lambda z\gamma(z) = \frac{C(z^{-1})}{D(z^{-1})}zy(z) - \frac{B(z^{-1})C(z^{-1})}{A(z^{-1})D(z^{-1})}zu(z)$, використаємо

його у (6.35) та отримаємо

$$q\left(w(z) - zy(z) + \frac{C(z^{-1})}{D(z^{-1})}zy(z) - \frac{B(z^{-1})C(z^{-1})}{A(z^{-1})D(z^{-1})}zu(z)\right)b_1 + K(1-q)(w(z) - Ku(z)) = 0.$$

Для останнього виразу виконаємо математичні перетворення та отримаємо рівняння оптимального ЦР із мінімальною дисперсією:

$$u(z) = L(z^{-1})\left[H(z^{-1})w(z) - F(z^{-1})y(z)\right], \quad (6.36)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Структурну схему оптимальної АСК, що включає ОК (6.27) та ЦР (6.36), зображено на рис. 6.11. Отримана структура оптимального ЦР для стохастичного одновірного об'єкта відповідає узагальненій структурі лінійного ЦР.

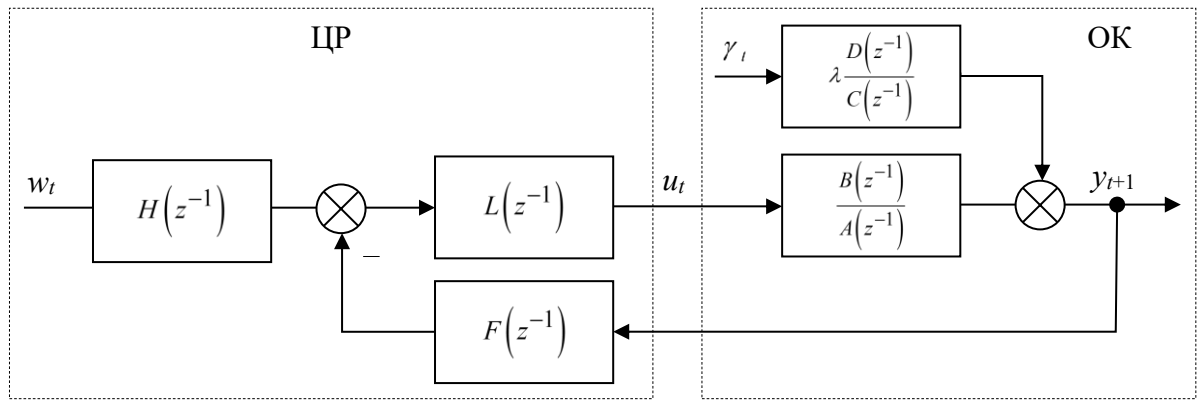


Рис. 6.11. Структурна схема стохастичної АСК

Закон оптимального керування (6.36) визначає керуючий вплив та встановлює узагальнену функцію якості у робочу точку завдання w_t АСК на кожному періоді квантування. В результаті з плином часу мінімізується дисперсія узагальненої функції якості (6.28).

Розглянемо приклад синтезу ЦР для стабілізації температурного режиму на виході стельового кондиціонера CV-P 2L N-63B/F-N виробництва фірми VTS CLIMA [198]. При цьому з достатньою точністю можна вважати, що короточасні температурні збурення навколишнього середовища представляють собою некорельовані випадкові збурення із нульовим математичним сподіванням. Для регулювання температурного режиму на виході кондиціонера CV-P 2L N-63B/F-N використовується водяний калорифер CVP2-HW2. Для даного калорифера (див. п.3.1.2 та Додаток Б.2) визначено параметри математичної моделі за каналами регулювання

$$W_1(p) = \frac{0.44}{0.6p^3 + 6.4p^2 + 6.9p + 1} \text{ та збурення } W_2(p) = \frac{1.4p^2 + 2.8p + 0.56}{0.6p^3 + 6.4p^2 + 6.9p + 1}.$$

Квадратичний критерій якості (6.28), який необхідно мінімізувати для оптимізації ЦР має вигляд

$$J_{t+1} = M \left\{ 0.999(w_t - y_{t+1})^2 + 0.001(w_t - 0.44u_t)^2 \right\}. \quad (6.37)$$

При синтезі ЦР врахуємо інерційність виконавчого механізму

$$W_{BM}(p) = \frac{1}{10p + 1} \text{ та датчика температури } W_D(p) = \frac{1}{14p + 1}, \text{ тобто}$$

$W_{OK}^{w \rightarrow y}(p) = W_{BM}(p) W_1(p) W_D(p)$; $W_{OK}^{\gamma \rightarrow y}(p) = W_2(p) W_D(p)$. Таким чином, отримаємо розширену модель ОК за каналами:

регулювання $W_{OK}^{w \rightarrow y} = \frac{0.44}{84p^5 + 910p^4 + 1120p^3 + 312p^2 + 31p + 1}$; (6.38)

збурення $W_{OK}^{\gamma \rightarrow y} = \frac{1.4p^2 + 2.8p + 0.55}{8.4p^4 + 90p^3 + 103p^2 + 21p + 1}$. (6.39)

Динаміку водяного калорифера, що описується передатними функціями (6.38) та (6.39) представимо за допомогою дискретної моделі (6.27) із періодом дискретизації $T_0 = 2$:

$$y(z) = \frac{0.00017z^{-1} + 0.00148z^{-2} + 0.00121z^{-3}}{1 - 2.434z^{-1} + 1.975z^{-2} - 0.535z^{-3}} u(z) + 0.0465 \frac{1 - 0.4769z^{-1} - 0.1022z^{-2}}{1 - 1.674z^{-1} + 0.772z^{-2} - 0.063z^{-3}} \gamma(z). \quad (6.40)$$

Для визначення поліномів ЦР (6.36) використаємо (6.40):

$$\begin{aligned} L(z^{-1}) &= \frac{1 - 2.434z^{-1} + 1.975z^{-2} - 0.535z^{-3}}{0.1936 - 0.5633z^{-1} + 0.5872z^{-2} - 0.238z^{-3} + 0.0105z^{-4} + 0.0106z^{-5}}; \\ H(z^{-1}) &= 0.6098 - 0.2908z^{-1} - 0.0623z^{-2}; \\ F(z^{-1}) &= 0.2033 - 0.1485z^{-1} + 0.0107z^{-2}. \end{aligned} \quad (6.41)$$

За допомогою програмного пакету MatLAB Simulink проведемо імітаційне моделювання оптимізованої АСК. Структурну схему системи керування, що моделювалася зображено на рис. 6.12.

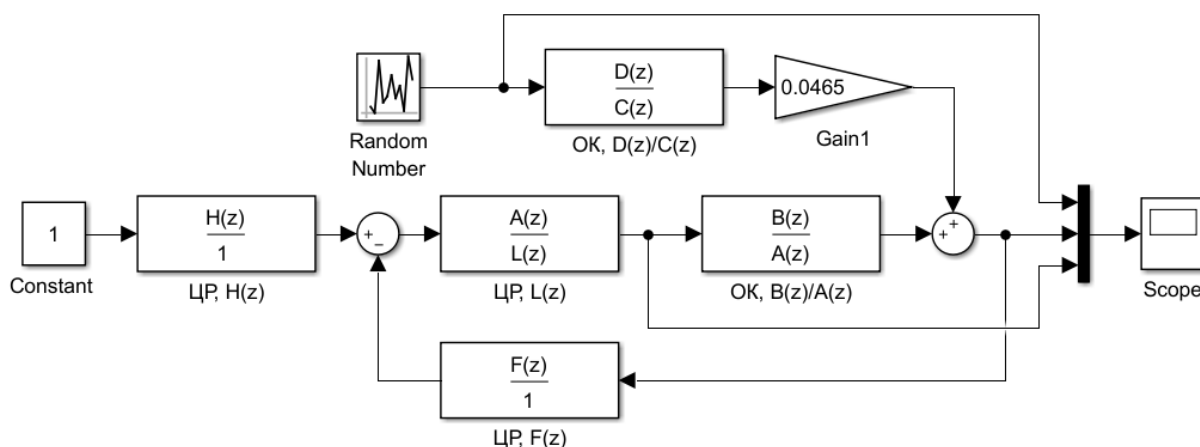


Рис. 6.12. Структурна схема АСК для моделювання в Simulink

На рис. 6.13 представлено перехідні процеси стохастичної АСК, яка мінімізує дисперсію відхилення температури повітря на виході кондиціонера CV-P 2L N-63B/F-N для зимового режиму роботи системи керування. Випадковий процес γ_t моделювався послідовністю нормальних випадкових величин із параметрами $(-0.5, 0.5)$. Як видно із рис. 6.13 ЦР АСК добре компенсує випадковий шум γ_t із параметрами $(-0.5, 0.5)$. Незважаючи на значну амплітуду випадкового сигналу, ЦР системи керування стабілізує вихідну величину y_t із незначним дрейфом навколо завдання w_t , результати досліджень опубліковано у [297, 298].

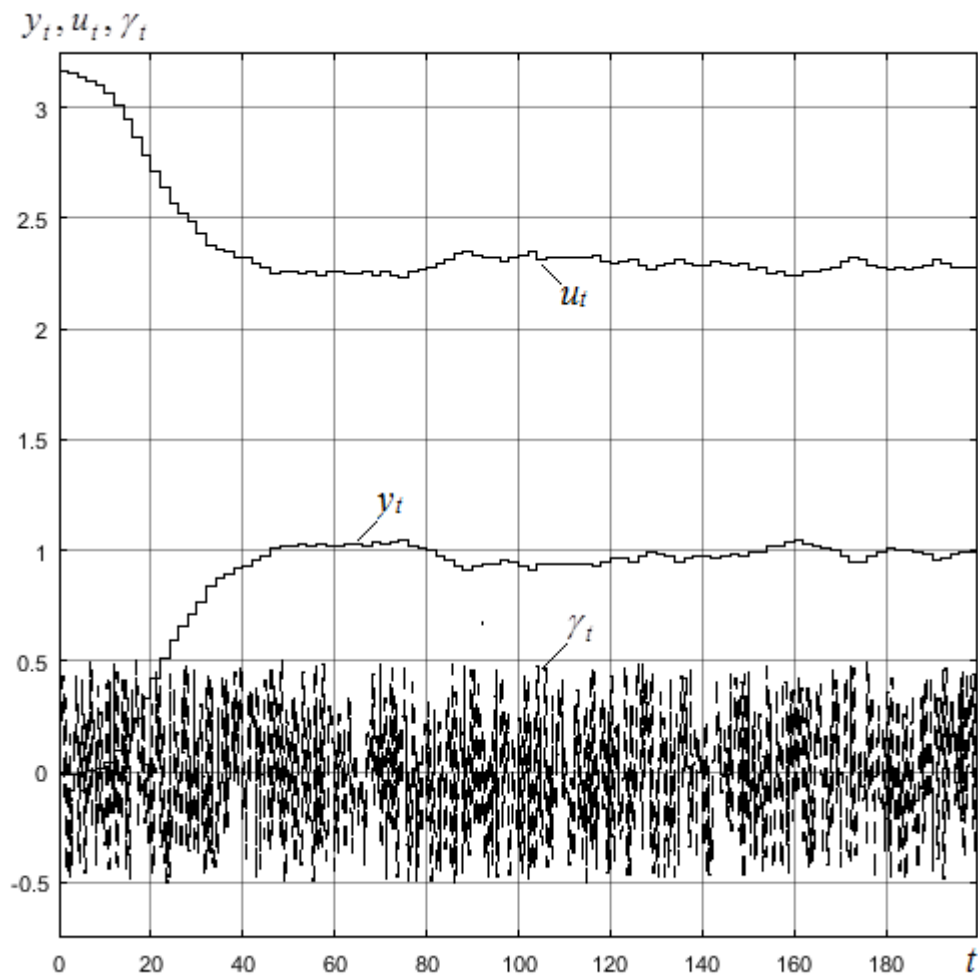


Рис. 6.13. Перехідні процеси стохастичної АСК

Таким чином, у підрозділі розглянуто синтез оптимальної стохастичної цифрової АСК. Критерій якості (6.28) адаптовано до задач керування реальними процесами, що дозволяє мінімізувати дисперсію відхилення

вихідного сигналу ОК від завдання АСК. Проведено аналіз структури ЦР в залежності від параметра q критерію якості (6.28) та математичного опису ОК (6.27). Приклад оптимізації параметрів ЦР для АСК температурою повітря на виході стельового кондиціонера CV-P 2L N-63B/F-N показав ефективність роботи ЦР при компенсації стохастичних збурень для СКП.

6.7 Висновки шостого розділу

1. Запропоновано експрес-методи оптимізації неперервної АСК за каналами регулювання та збурення. Отримані залежності забезпечують високу точність розрахунків в широкому діапазоні зміни динамічних властивостей ОК, зручні для програмної реалізації та можуть використовуватися при налагоджуванні систем керування, або для адаптації АСК в режимі експлуатації. У порівнянні із існуючими, отримані розрахункові формулами покращують якість перехідних процесів у АСК в середньому на 2 % за модульними критеріями та на 50 % за квадратичними критеріями якості.
2. Запропоновано методика використання неперервних експрес-методів для оптимізації цифрових систем керування, яка за інтегральними показниками якості складає похибку до 1 %. Методика проста у використанні та не потребує застосування теорії Z–перетворення цифрових систем.
3. Отримано рівняння ЦР (6.36) із мінімізацією впливу випадкових завад. На відміну від існуючих стохастичних регуляторів, запропонований ЦР окрім мінімізації дисперсії вихідної величини мінімізує сигнал керування та враховує завдання АСК. Математичне моделювання підтвердило ефективність використання запропонованого стохастичного регулятора для АСК кондиціонером із компенсацією стохастичних збурень.

РОЗДІЛ 7

ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧИХ СИСТЕМ

7.1 Інформаційно-керуюча система штучного мікроклімату друкарського цеху Банкотно-монетного двору Національного банку України

Для забезпечення необхідних параметрів мікроклімату у промисловому приміщенні друкарського цеху Банкотно-монетного двору (БМД) Національного банку України (НБУ) ТОВ “Теплоінформ” проводило реконструкцію системи кондиціонування друкарського цеху. Реконструкція існуючої системи кондиціонування здійснювалася у зв’язку з неефективністю та економічною недоцільністю роботи існуючої системи кондиціонування: повітропроводи прокладені за межами підшивної стелі та неізольовані, що викликає додаткові втрати теплоти; велика протяжність повітропроводів призводить до додаткових втрат теплоти та тиску; обладнання кондиціонера старе та зношене. Існуюча система штучного мікроклімату забезпечувала стабілізацію температури 20 ± 3 °C та вологості $52,5 \pm 5$ %, що не задовольняє технологічним вимогам друкарського цеху.

У відповідності до проекту 412-АОВ існуючий кондиціонер К6 замінено на центральний кондиціонер модульної конструкції NCT 22 виробництва фірми AERMEC. За паспортними даними продуктивність ПСЦК AERMEC NCT 22 становить 75450 м³/год. Для мінімізації витрат на транспортування підготовленого повітря та зменшення інерційності АСК, обладнання кондиціонера розташовано безпосередньо біля приміщення, що обслуговується. В залежності від наявності обслуговуючого персоналу в робочій зоні, проект передбачає рециркуляцію повітря 60-80%. Тепло- та холодопостачання здійснюється від існуючих мереж. На рис. 7.1 наведено структурну схему інформаційно-керуючої системи штучним мікрокліматом промислового приміщення друкарського цеху БМД НБУ.

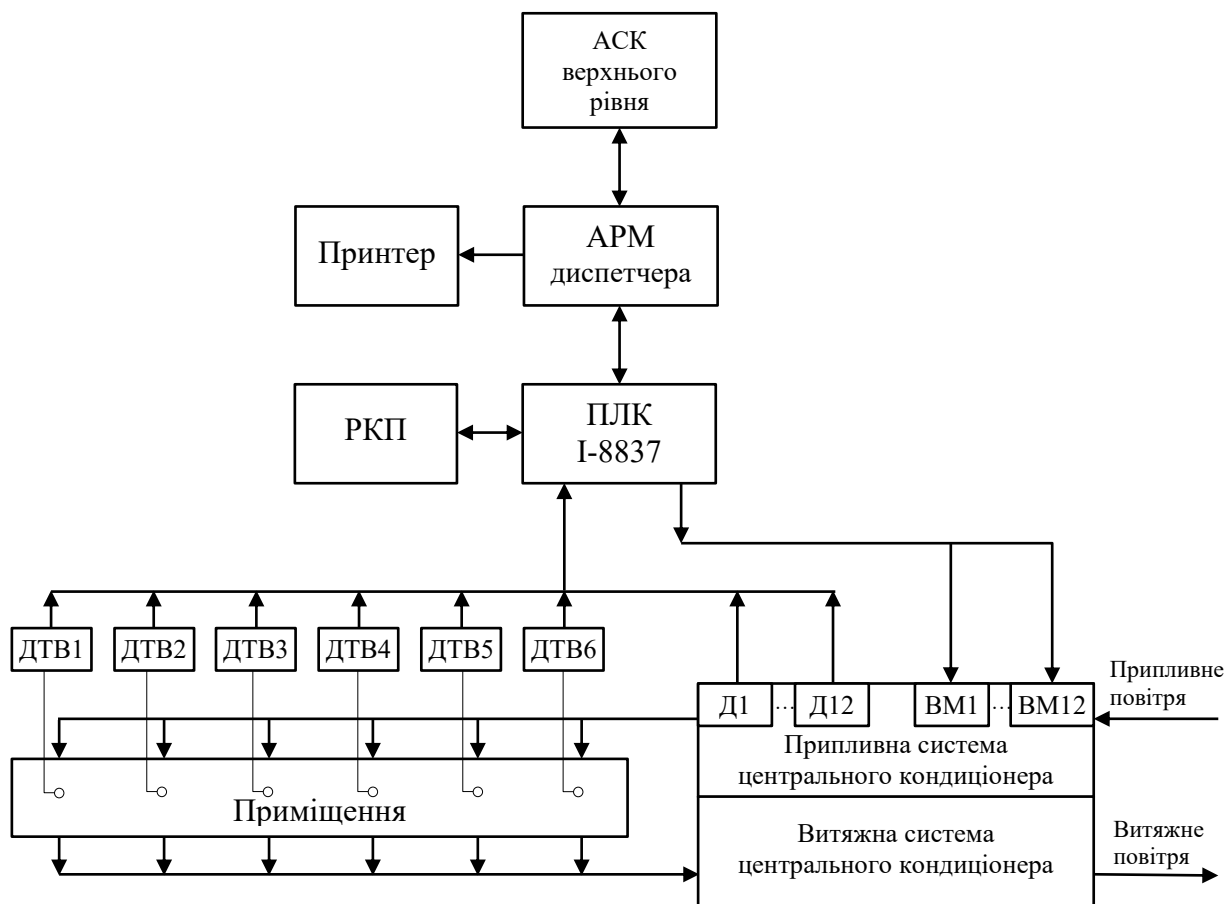


Рис. 7.1. Структурна схема інформаційно-керуючої системи штучного мікроклімату промислового приміщення БМД НБУ

Нижній рівень керування реалізований на ПЛК I-8837 компанії ICP DAS. До підсистеми вводу/виводу контролера підключено 6 сумісних датчиків температури та вологості ДТВ1 – ДТВ6, які контролюють мікроклімат у 6-ти зонах промислового приміщення. Для керування мікрокліматом у приміщенні припливно-витяжна система кондиціонера обладнана датчиками Д1 – Д12 та виконавчими механізмами ВМ1 – ВМ12, які також під'єднані до підсистеми вводу/виводу ПЛК. Узагальнена інформація про мікроклімат приміщення формується на основі осереднення вимірних значень датчиків ДТВ1 – ДТВ6. У контролері реалізовано каскадну систему керування, структурна схема якої розглянута у п.5.2.4 та зображена на рис. 5.14.

Оперативне керування мікрокліматом у приміщенні може здійснюватися безпосередньо із щита керування К6-ЩА за допомогою рідинно-кристалічної панелі (РКП), яка складається із символного рідинно-

кристалічного індикатора та 20-ти кнопкової клавіатури. Загальний вигляд щита керування К6-ЩА представлено на рис. 7.2.

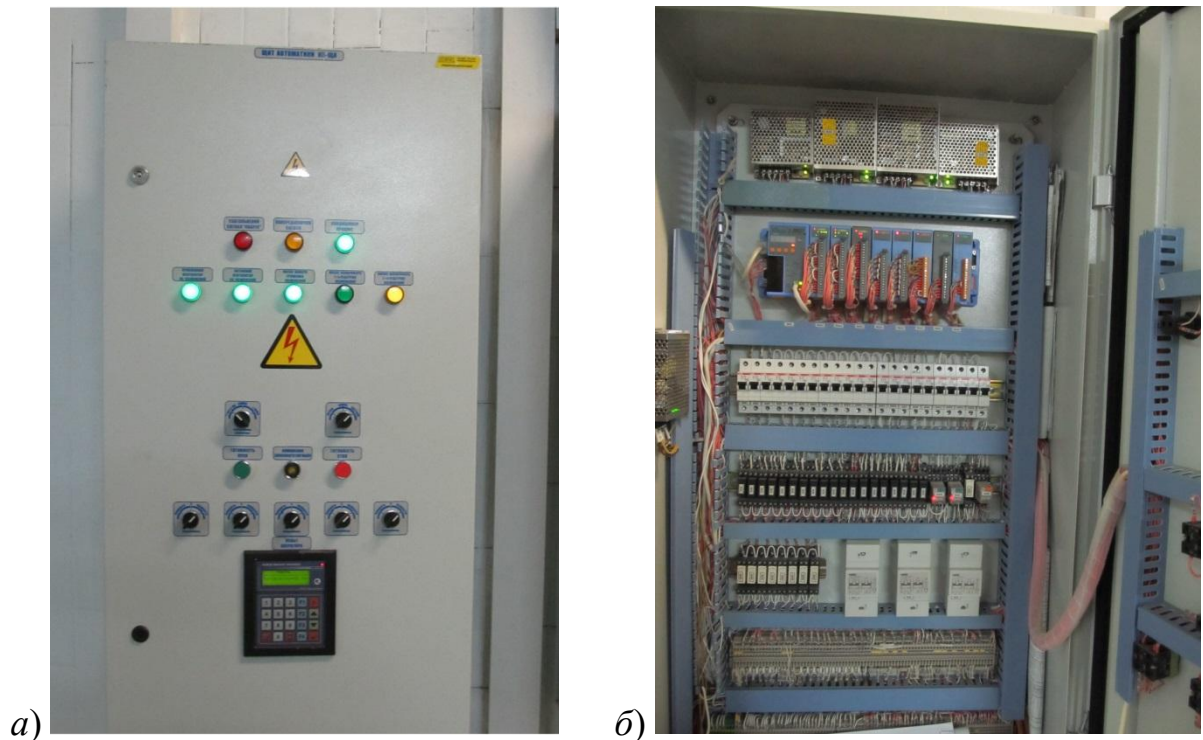


Рис. 7.2. Щит керування К6-ЩА: *а* – загальний вигляд; *б* – технічні засоби керування у щиті

Середній рівень інформаційно-керуючої системи реалізований на промисловому комп'ютері. Для обміну інформацією між нижнім та середнім рівнем АСК використовується локальна мережа Ethernet де застосовано Modbus TCP протокол обміну. На промисловому комп'ютері організовано автоматизоване робоче місце (АРМ) диспетчера де інстальована SCADA-система NewLogic, розробником якої є ТОВ “ЕСТА”. SCADA-система реалізує виконання таких задач: відображення на мнемосхемі змінних СКП, вигляд мнемосхеми зображено на рис. 7.3; вибір режиму роботи СКП (Пуск/Стоп); опції налаштування параметрів АСК кондиціонера К6, серед яких завдання мікроклімату та коефіцієнт рециркуляції повітря; виведення діаграм трендів процесу (див. рис. 7.4 – рис. 7.6); аварійні та технологічні повідомлення із візуальною та звуковою сигналізацією; генерація аварійних та технологічних звітів.

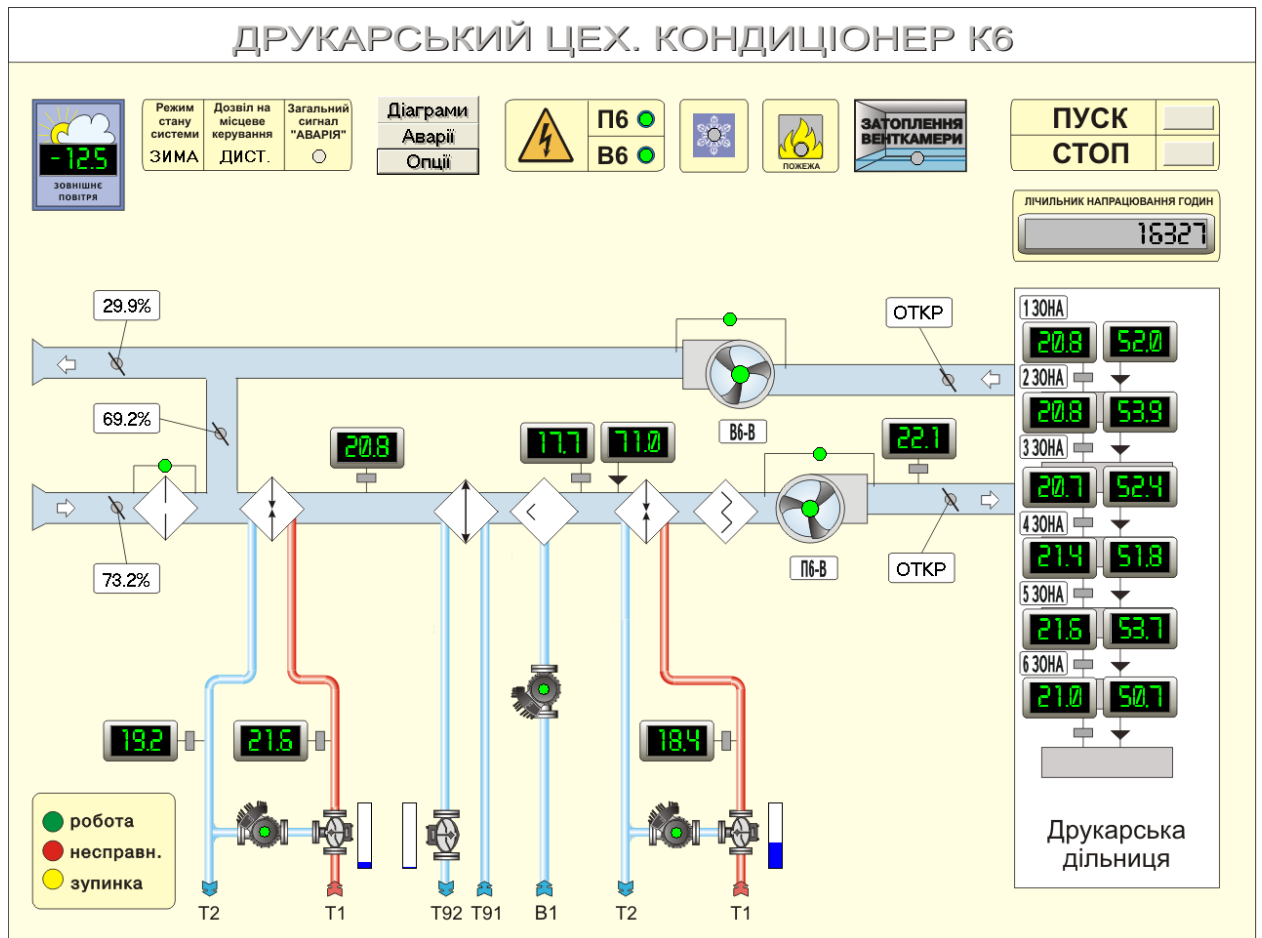


Рис. 7.3. Загальний вигляд мнемосхеми СКП друкарського цеху БМД НБУ

Верхній рівень інформаційно-керуючої системи представляє собою мережу диспетчерських АРМ-ів виробництва, які можуть приймати або передавати необхідну інформацію за допомогою місцевої мережі Ethernet. Для обміну інформацією між середнім та верхнім рівнем АСК використовується промисловий протокол обміну Modbus TCP.

У Додатку Г представлена функціональна схема керування кондиціонером AERMEC NCT 22. Особливістю даного кондиціонера є: сотовий зволожувач, який за своїми технічними характеристиками не може здійснити адіабатне зволоження до температури “точки роси” (див. рис. 1.7); наявність водяного та електричного калориферів для другого підігріву.

Регулювання вологості у приміщенні проводиться за вологовмістом, що визначається за залежністю (2.1), контролюючи відносну вологість та

температуру спареним датчиком (поз. К6-1В, Додаток Г). У зимову пору року та перехідний період (якщо вологовміст менше заданого) керуючий вплив здійснюється на регулюючий клапан (поз. К6-А5) калорифера першого підігріву. У літню пору року та перехідний період (якщо вологовміст більше заданого) керуючий вплив здійснюється на регулюючий клапан (поз. К6-А6) охолоджувача. Таким чином, незалежно від пори року стабілізується необхідне значення вологовмісту після охолоджувача. Для стабілізації вологості використано цифровий ПІ-регулятор, параметри налаштування якого змінюються програмним чином в залежності від вибраного обладнання кондиціонера за $h-d$ діаграмою. Налаштування контурів керування проводилося за процедурою оптимізації п.5.2.3 де в якості динамічних властивостей ОК використовувалися експериментально отримані перехідні характеристики.

Контроль температури на виході кондиціонера проводиться датчиком (поз. К6-1Д). За виміряною температурою цифровий ПІ-регулятор впливає на регулюючий клапан (поз. К6-А7) калорифера другого підігріву. Налаштування регулятора проводилося за описаною вище методикою. Якщо потужності водяного калорифера не вистачає у алгоритмі керування передбачено трьохступінчасту зміну потужності електрокалорифера, проте, електрокалорифер практично не використовується.

Промислове приміщення друкарського цеху умовно поділено на шість рівноцінних робочих зон. Підготовлене повітря по системі розподілених повітроводів надходить у кожну зону промислового приміщення. Мікроклімат у зонах контролюється сумісними датчиками температури та вологості (поз. К6-1Е, К6-1И, К6-1Ж, К6-11Е, К6-11И, К6-11Ж, Додаток Г). Результати вимірювань за температурою та вологістю осереднюються та надходять на цифрові ПІ-регулятори температури та вологості у приміщенні, які в свою чергу змінюють завдання для контурів стабілізації температури та вологості на виході кондиціонера.

Розробка алгоритмів керування та програмного забезпечення контролера для кондиціонера К6 БМД НБУ виконано на основі запропонованої концепції управління СКП. У АСК реалізовано каскадну систему керування мікрокліматом приміщення (див. рис. 5.14). Для зимового режиму роботи кондиціонера передбачено алгоритми:

- відпрацювання загрози заморожування калорифера першого підігріву за сигналами датчиків температури (поз. К6-1К, Д6-1А);
- стабілізації температури зворотного теплоносія у режимі “Чергування” для водяних калориферів першого та другого підігріву за датчиками температури (поз. Д6-1А, Д6-1Б);
- прогріву калорифера першого підігріву при переході із режиму “Чергування” на режим “Кондиціювання”.

На протязі року система керування кондиціонером К6 проходила експериментальну експлуатацію, що обумовлено високими вимогами до штучного мікроклімату приміщення друкарського цеху. Під час випробовувань продуктивність СКП збільшувалася до 110000 м³/год (номінальне значення становить 75450 м³/год) за рахунок використання частотних регуляторів проточного (поз. П6-А1) та витяжного (поз. В6-А1) вентиляторів. На рис. 7.4 та рис. 7.5 представлено тренди температури та відносної вологості у шести зонах промислового приміщення, які отримано з липня 2009 року по травень 2010 року.

Для однієї доби роботи АСК кондиціонера перевірено стабільність процесу керування. На рис. 7.6 представлено тренди температури та вологості у приміщенні, над якими застосовано статистичні методи контролю якості. Перевірка стабільності процесу керування мікрокліматом у промисловому приміщенні проводилася із використанням контрольних карт Шухарта (ККШ) [299]. Для аналізу використовувалися $(\bar{X} - R)$ – карти Шухарта. За трендами рис. 7.6 у табл. 7.1 та табл. 7.2 визначено середні значення температури та відносної вологості для шести зон промислового приміщення друкарського

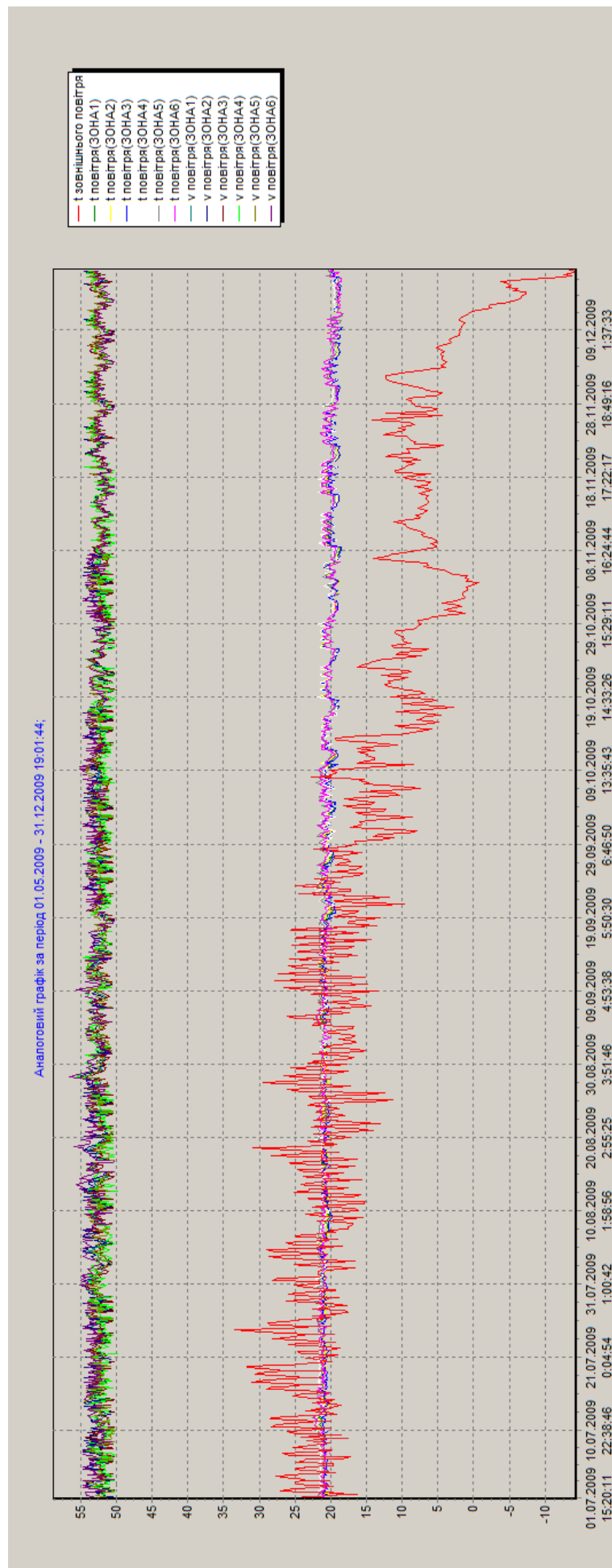


Рис. 7.4. Тренди температури та відносної вологості у приміщенні друкарського цеху
з липня по грудень 2009 року

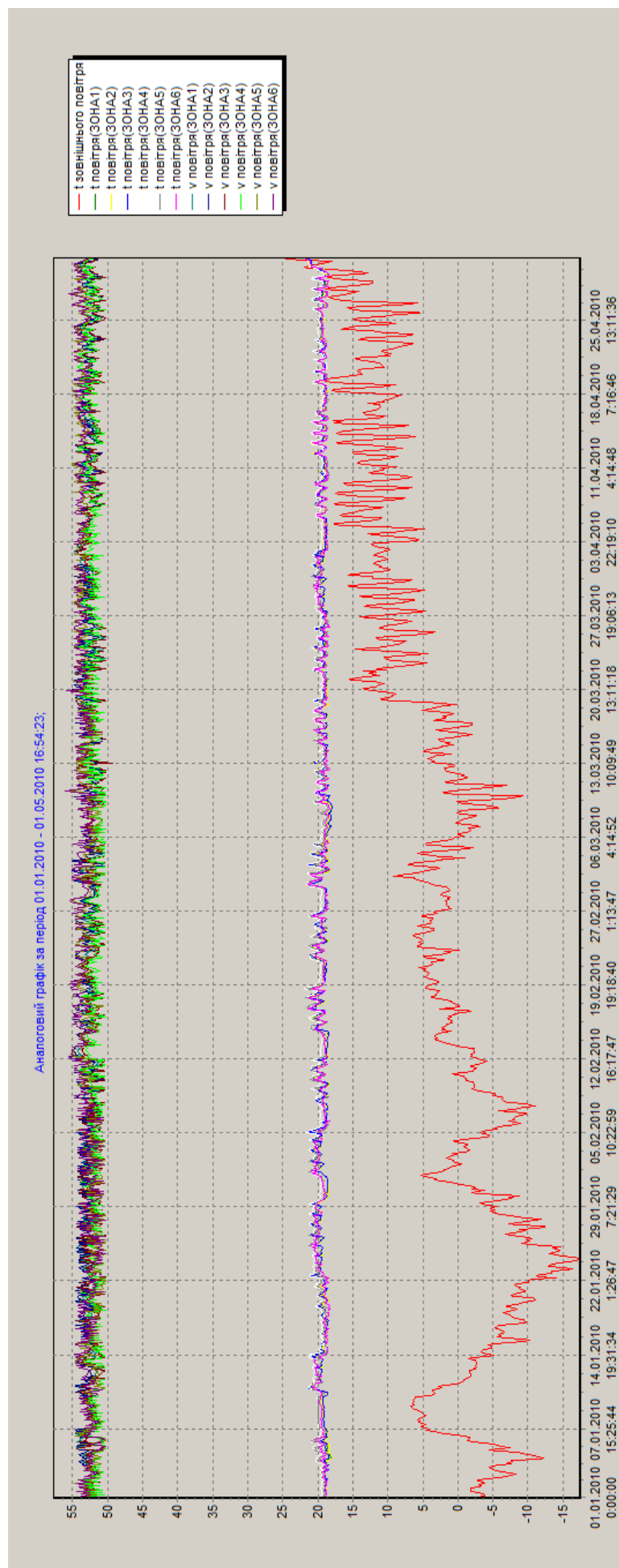


Рис. 7.5. Тренди температури та відносної вологості у приміщенні друкарського цеху з січня по травень 2010 року

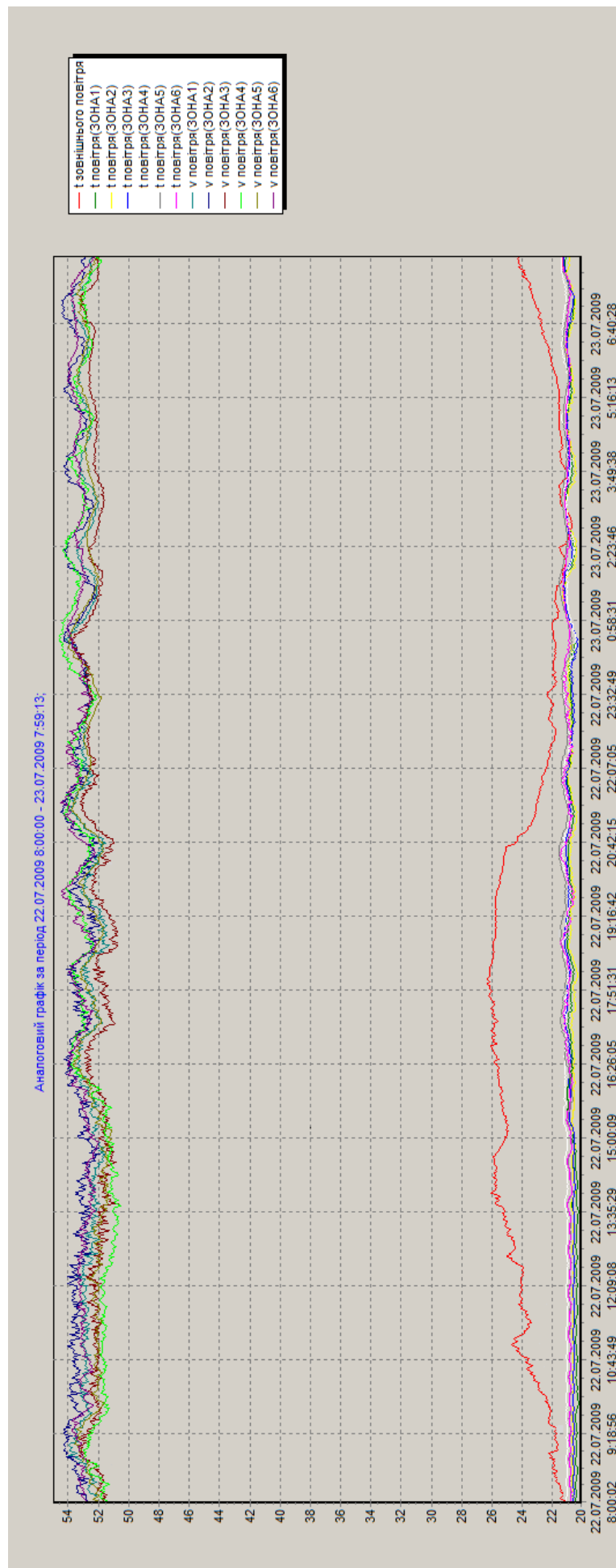


Рис. 7.6. Тренди температури та відносної вологості у приміщенні друкарського цеху на протязі доби

цеху. У таблицях кожна підгрупа даних формувалася для шести зон приміщення. При обробці статистичних даних використано 24 підгрупи, які характеризують роботу АСК кондиціонером на протязі 24 год. Середнє значення параметра для кожної із підгруп формувалося при об'ємі даних $n=12$. Статистичні дані мікроклімату у приміщенні цеху контролювалися через інтервал часу 30 хв.

Перевірка даних на нормальність розподілу проводилася за критерієм Жака-Бера: $JB = \frac{N}{6} \left[Sk^2 + \frac{(K-3)^2}{4} \right]$; де N – кількість спостережень; Sk – коефіцієнт асиметрії; K – ексцес [300]. Якщо $JB < 5.991$ – розподілення являється нормальним, значення 5.991 визначено із таблиць критичних значень Пірсона на рівні значущості 0.05 при числі ступіней свободи 2. Коефіцієнт асиметрії та ексцес визначався функціями пакету Microsoft Excel. Для даних табл. 7.1, табл. 7.2 визначено значення критерію Жака-Бера $JB_\theta = 5.459$, $JB_\varphi = 1.209$. Оскільки, $JB_\theta < 5.991$ та $JB_\varphi < 5.991$ – розподілення статистичних даних табл. 7.1 та табл. 7.2 являється нормальним.

Для побудови ККШ за даними табл. 7.1 та табл. 7.2 визначено:

- загальне середнє значення температури та вологості $\bar{\bar{X}}_\theta = 20.97$, $\bar{\bar{X}}_\varphi = 52.82$, які представляють середню лінію $\bar{X}$ – карт;
- середній розмах отриманих даних $\bar{R}_\theta = 0.8083$, $\bar{R}_\varphi = 1.9621$, які представляють середню лінію R – карт;
- верхню контрольну межу для $\bar{X}$ – карт $UCL_\theta = 21.1807$, $UCL_\varphi = 53.3372$;
- нижню контрольну межу для $\bar{X}$ – карт $LCL_\theta = 20.7506$, $LCL_\varphi = 52.2934$;
- верхню контрольну межу для R – карт $UCL_\theta = 1.3879$, $UCL_\varphi = 3.3689$;
- нижню контрольну межу для R – карт $LCL_\theta = 0.2288$, $LCL_\varphi = 0.5553$.

Коефіцієнти для обчислення ліній верхньої (UCL) та нижньої (LCL) межі контрольних карт визначалися за ДСТУ ISO 8258–2001 [83, табл. 2] із об'ємом даних у підгрупі $n=12$.

Таблиця 7.1. Технологічні дані вимірюної температури у приміщенні

Дата	№ під-групи	Значення температури для зон приміщення, °C						Середнє, °C	Розмах, °C
		θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6		
Період з 08:00 по 23:59 22.07.2009	1	20.74	20.67	20.76	21.18	21.25	21.02	20.92	0.65
		20.75	20.6	20.87	21.13	21.1	20.97		
	2	20.93	20.47	21.17	21.1	21.4	21.23	21.02	0.93
		20.83	20.82	21.0	21.09	21.18	21		
	3	20.71	20.55	20.89	20.9	21.15	20.95	21.03	0.83
		21.05	20.94	21.17	21.31	21.35	21.38		
	4	20.94	20.77	21.1	21.05	21.4	20.82	20.93	0.81
		20.76	20.59	20.91	20.79	21.16	20.81		
	5	20.94	20.81	21.08	21.31	21.5	21.33	21.15	0.69
		20.97	20.85	21.1	21.31	21.48	21.08		
	6	20.63	20.5	20.8	20.97	20.97	20.85	20.98	0.86
		21.05	20.95	21.1	21.33	21.36	21.29		
	7	20.87	20.83	20.92	20.22	21.37	21.04	20.86	1.15
		20.77	20.83	20.71	20.94	21.0	20.8		
	8	20.72	20.81	20.61	21.1	21.17	21.1	20.97	0.73
		20.8	20.9	20.7	21.25	21.34	21.17		
	9	20.68	20.53	20.78	21.5	21.33	21.03	20.94	0.97
		20.67	20.56	20.82	21.18	21.18	20.99		
	10	20.85	20.48	21.01	21.08	21.25	21.09	21.00	0.87
		20.77	20.67	21.03	21.17	21.35	21.2		
	11	20.72	20.48	20.96	21.02	21.1	20.87	20.95	0.86
		20.82	20.75	21.0	21.2	21.34	21.14		
	12	20.95	20.7	21.2	21.07	21.53	21.08	20.95	0.93
		20.76	20.6	20.92	20.8	21.14	20.65		
	13	20.84	20.7	20.99	21.05	21.21	21	21.08	0.82
		20.95	20.8	21.07	21.36	21.52	21.48		
	14	20.71	20.05	20.93	21.0	21.15	20.87	20.85	1.1
		20.82	20.65	20.9	21.07	21.15	20.88		
	15	21.05	21.05	21.05	21.3	21.42	21.03	20.99	0.7
		20.75	20.72	20.78	20.84	21.1	20.8		
	16	20.61	20.73	20.5	20.97	21.07	21	20.91	0.8
		20.8	20.9	20.72	21.26	21.3	21.1		
Період з 00:00 по 07:59 23.07.2009	17	20.87	20.95	20.79	20.95	21.27	21.19	20.84	0.87
		20.58	20.76	20.4	20.55	20.77	20.94		
	18	20.9	20.91	20.9	20.78	21.06	21.03	21.10	0.69
		21.27	21.34	21.21	21.06	21.47	21.29		
	19	20.75	20.55	20.95	20.85	21.35	21.12	20.83	0.9
		20.64	20.45	20.83	20.56	21.05	20.87		
	20	21.07	21.07	21.07	21.04	21.27	21.07	21.11	0.43
		21.03	20.9	21.15	21.24	21.33	21.09		
	21	20.71	20.51	20.9	20.8	21.07	20.95	20.92	0.63
		21.01	21.0	21.02	20.93	21.14	21.01		
	22	20.92	20.86	21.04	21.12	21.29	21.12	20.96	0.58
		20.8	20.71	20.89	20.94	20.98	20.89		
	23	20.95	20.92	20.97	21.22	21.13	20.91	21.06	0.52
		20.95	20.83	21.07	21.35	21.35	21.08		
	24	20.61	20.57	20.65	20.17	21.01	20.95	20.83	1.08
		20.96	20.89	21.03	21.25	20.99	20.91		

Таблиця 7.2. Технологічні дані вимірної вологості у приміщенні

Дата	№ під-групи	Значення вологості для зон приміщення, %						Середнє, %	Розмах, %
		φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5	φ_6		
Період з 08:00 по 23:59 22.07.2009	1	52.55	52.64	51.76	51.5	51.5	52.66	52.37	1.93
		52.72	53.43	52.02	52.54	52.55	52.59		
	2	53.9	54.65	53.15	52.96	53.08	53.28	53.26	2.58
		53.11	54.04	52.28	52.07	53.02	53.59		
	3	52.98	53.65	52.3	51.39	52.05	52.95	52.50	2.26
		52.82	53.25	52.3	51.62	51.77	52.95		
	4	53.15	53.95	52.54	52.34	52.07	53.16	52.79	1.88
		52.95	53.65	52.37	52.23	52.25	52.85		
	5	53.02	53.49	52.55	51.6	52.3	53.2	52.67	2.22
		52.97	53.71	52.24	51.49	52.07	53.34		
	6	52.33	53.09	52.47	51.87	51.95	53.02	52.38	1.82
		52.58	52.59	51.96	51.27	52.59	52.86		
	7	52.19	52.87	52.09	51.87	51.95	52.41	52.33	1.2
		52.48	53.07	51.89	52.35	52.04	52.79		
	8	53.57	53.15	51.98	51.32	51.38	52.43	52.38	2.25
		52.57	53.28	51.86	52.45	51.8	52.82		
	9	53.11	53.88	52.35	52.3	52.54	52.35	53.14	1.91
		53.38	54.21	52.55	53.65	53.45	53.86		
	10	52.8	53.42	52.15	53.44	52.66	52.21	52.66	1.94
		52.37	53.25	51.5	53.01	52.3	52.82		
	11	52.7	53.9	51.58	53.56	52.77	53.47	52.80	2.32
		52.45	52.85	52.04	53.02	52.25	53.01		
	12	52.02	52.96	51.07	52.94	51.64	53.05	52.62	2.92
		52.5	53.0	52.0	53.7	52.61	53.99		
	13	52.73	52.77	52.2	53.35	52.86	53.36	52.49	1.85
		52.03	52.54	51.51	52.51	51.78	52.19		
	14	52.99	53.77	52.2	53.27	52.88	53.21	53.26	1.64
		53.77	53.84	53.12	53.41	53.55	53.05		
	15	52.38	52.76	52.01	53.15	52.78	53.26	52.93	1.74
		52.89	53.2	52.57	53.65	52.8	53.75		
	16	53.07	53.2	52.95	53.05	52.57	53.13	52.66	1.35
		52.4	52.4	52.4	52.27	51.85	52.57		
Період з 00:00 по 07:59 23.07.2009	17	52.89	52.99	52.8	53.57	52.64	53.08	53.41	1.91
		53.6	53.5	53.71	54.55	53.86	53.7		
	18	52.94	53.29	52.6	54.25	53.46	53.81	52.98	2.26
		52.16	52.32	51.99	53.45	52.3	53.13		
	19	52.98	53.93	52.23	53.64	52.26	53.04	53.17	1.96
		53.2	54.12	52.26	54.19	52.74	53.49		
	20	52.24	52.61	51.86	53.0	52.4	53.02	52.51	1.45
		52.32	52.97	51.66	52.69	52.25	53.11		
	21	53.18	54.11	52.25	53.7	52.67	53.3	53.01	2.28
		52.56	52.98	51.83	53.49	52.69	53.37		
	22	52.67	53.25	52.1	52.71	52.56	53.3	53.08	1.8
		53.24	53.9	52.58	53.48	53.3	53.83		
	23	53	53.43	52.57	52.87	53.05	53.78	53.00	1.56
		52.91	53.55	52.22	52.62	52.67	53.36		
	24	53.66	54.26	53.05	52.88	53.18	53.58	53.17	2.06
		52.73	53.25	52.2	52.69	53.01	53.55		

За результатами статистичного дослідження на рис. 7.7 та рис. 7.8 побудовано ККШ для температури та відносної вологості повітря у промисловому приміщенні. Карти, зображені на рис. 7.7, показують, що процес стабілізації температури у приміщенні знаходиться в статистично керованому стані на необхідному рівні.

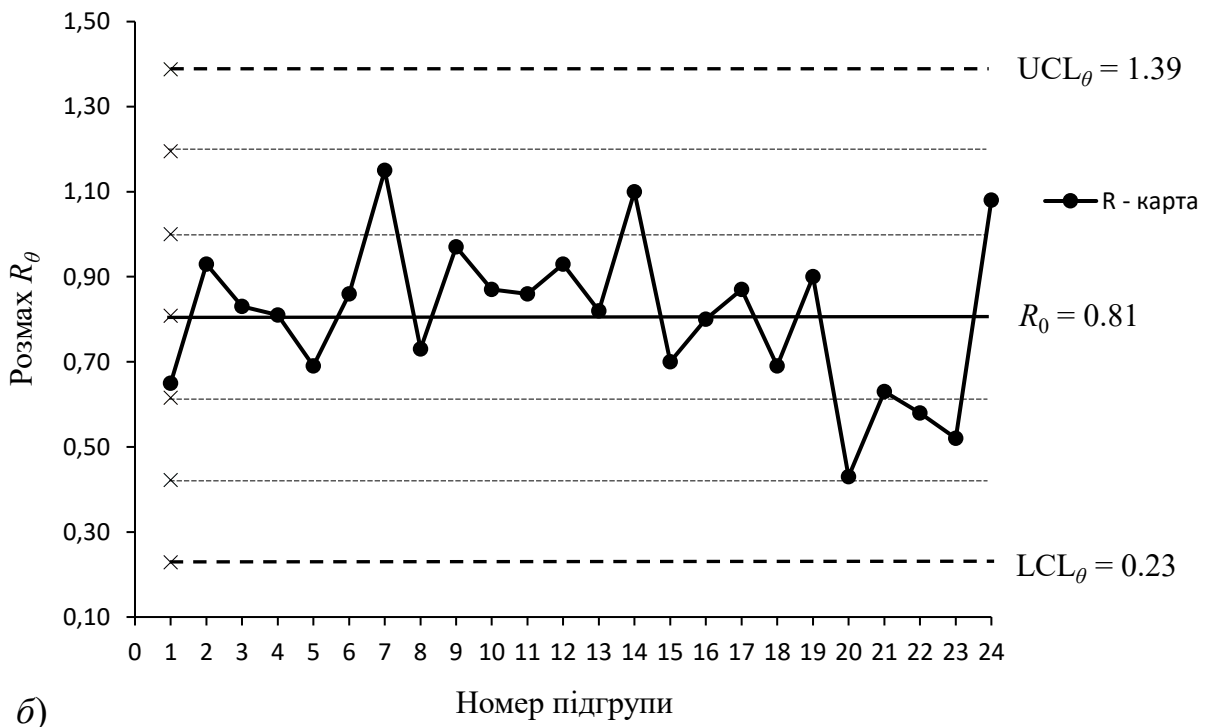
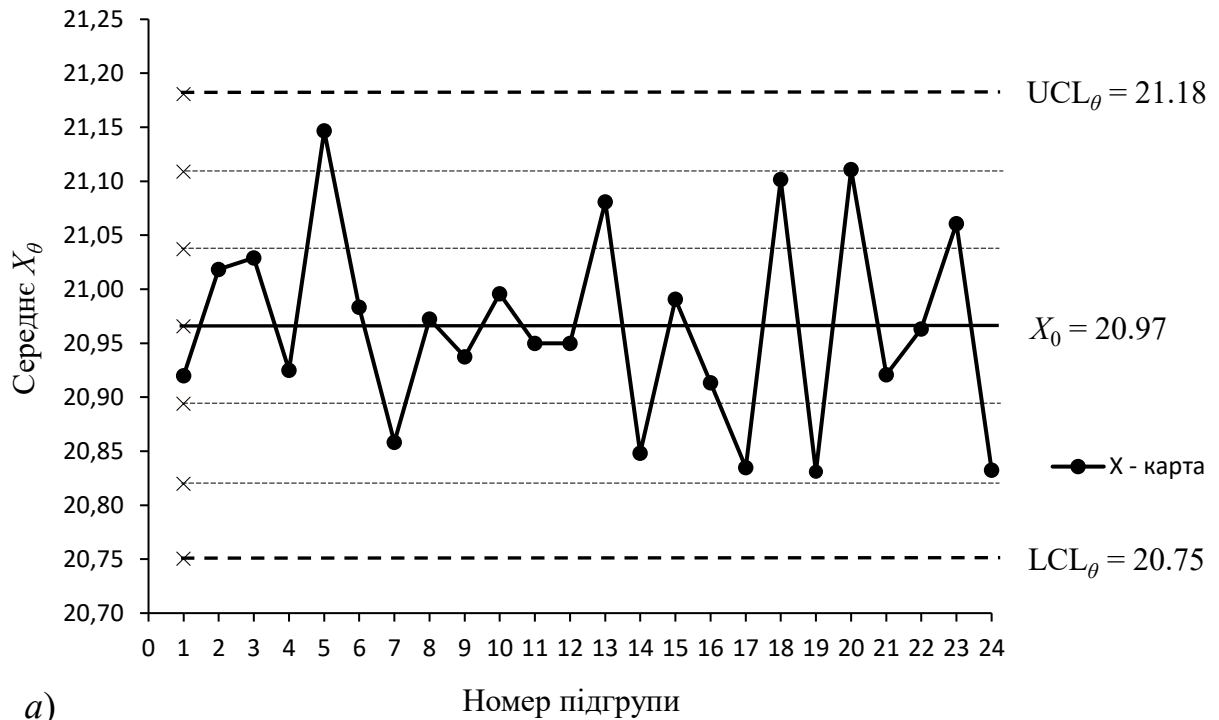


Рис. 7.7. Карти середніх (а) та розмахів (б) для температури промислового приміщення за даними табл. 7.1

Аналіз контрольних карт, які зображені на рис. 7.8 вказує, що процес стабілізації відносної вологості у друкарському цеху не знаходиться в статистично керованому стані на належному рівні. Для $\bar{X}$ – карти відносної вологості присутня: 1) послідовність двох точок, які знаходяться на чотири стандартних відхилення; 2) послідовність трьох точок, які виходять за

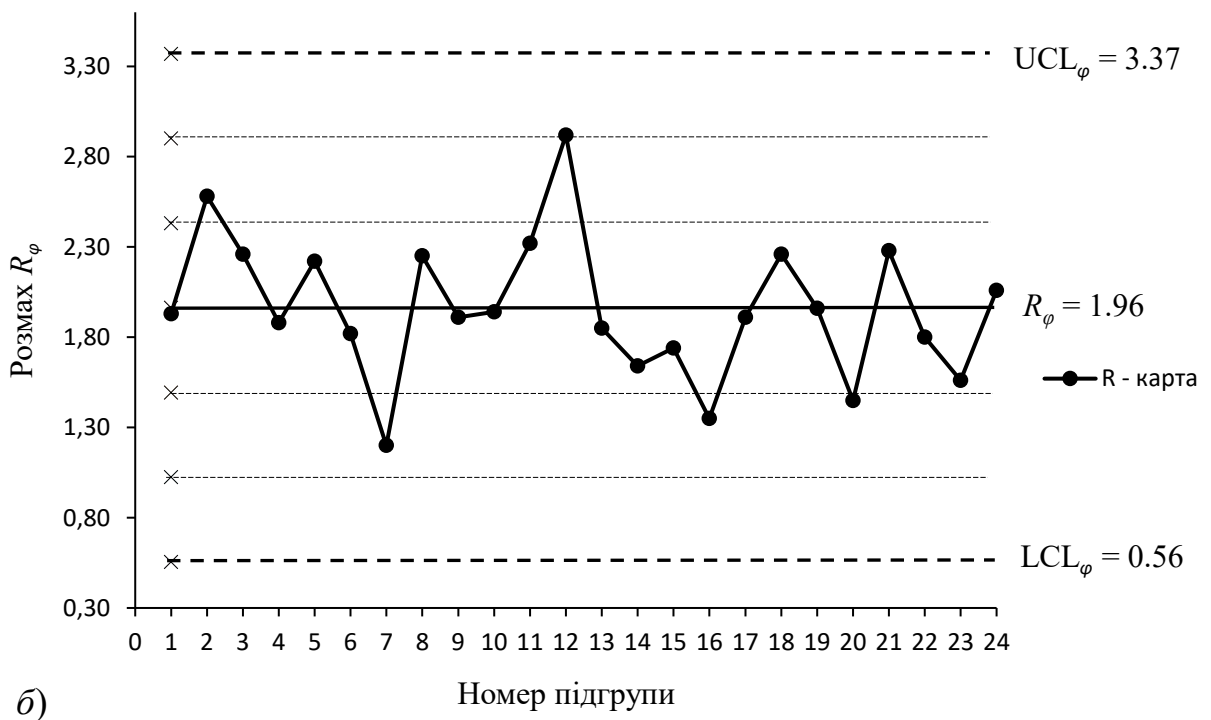
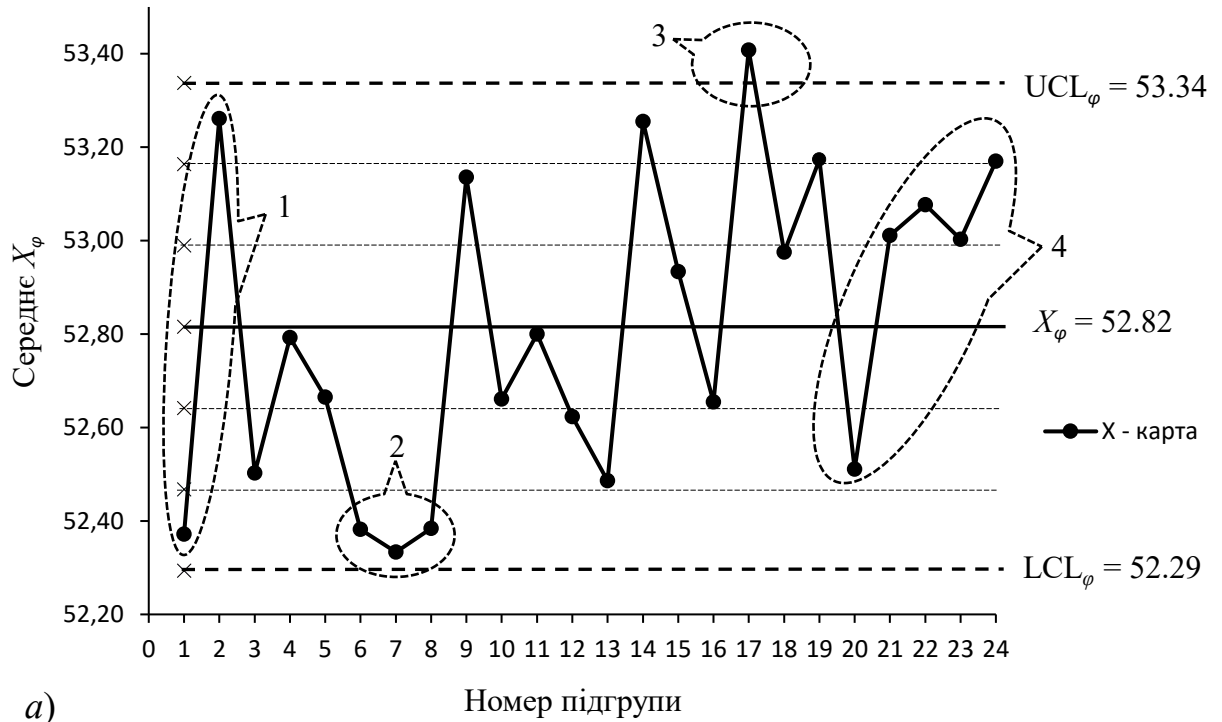


Рис. 7.8. Карті середніх (а) та розмахів (б) для відносної вологості промислового приміщення за даними табл. 7.2

2-сигмові границі; 3) точка, яка виходить за верхню контрольну межу UCL_{ϕ} ; 4) послідовність чотирьох із п'яти точок виходять за 1-сигмові границі. Вказані особливі послідовності точок відмічено на $\bar{X}$ – карті пунктирними областями 1–4 (див. рис. 7.8, а).

Причина виникнення особливої послідовності точок для області 1 обумовлена вмиканням друкарського обладнання (початок робочої зміни №1). Виникнення особливої послідовності точок для області 2 співпадає із максимальною температурою навколишнього повітря 26°C з 14^{00} до 16^{00} , яка впливає на відносну вологість повітря. За інтервалом часу область 3 припадає на закінчення роботи робочої зміни №2 та вимкненням друкарського обладнання. Особлива послідовність точок області 4 обумовлена зменшенням температури навколишнього середовища до мінімального за добу $\sim 21^{\circ}\text{C}$ та роботою СКП в економному режимі у нічний час (друкарське обладнання не працює).

У розглянуті періоди АСК кондиціонера відпрацьовувала суттєві зовнішні та внутрішні збурення, що вплинуло на квазістатичний режим СКП та відображається на ККШ рис. 6.21, а. Запропонована система керування забезпечила стабілізацію температури $20 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ та відносної вологості $52.5 \pm 2\%$ у приміщенні друкарського цеху незалежно пори року та температурних збурень друкарського обладнання (див. рис. 7.4, рис. 7.5). У порівнянні із роботою СКП до модернізації точність стабілізації температури у приміщенні зросла на $1,5^{\circ}\text{C}$, а вологості на 3% . Акт чергового промислового випробовування представлено у Додатку Д. Розроблена АСК задовольняє усі вимоги, що регламентуються у нормативному документі ДБН В.2.5-67:2013 [154].

7.2 Учбово-тренажерний комплекс системи кондиціювання повітря

За результатами досліджень роботи розроблено учбово-тренажерний комплекс (УТК) СКП. Моделювання роботи СКП проводилося із використанням програмного пакету MASSM [301] на базі запропонованих у

дисертації математичних моделей. Робота із моделюючим пакетом MASSM нагадує прикладний програмний пакет MatLAB або LabVIEW [199, 200, 302]. Як і у MatLAB-і можна створювати моделюючі блоки на основі базових динамічних блоків, також можна проводити візуалізацію програмних компонентів, що властиво для LabVIEW.

Структурну схему УТК СКП представлено на рис. 7.9. В якості математичних моделей обладнання кондиціонера використано матричні передатні функції із третього розділу. Окрім п'яти входів та двох виходів, що властиво для структурних схем кліматичного обладнання (див. табл. 3.1) тут

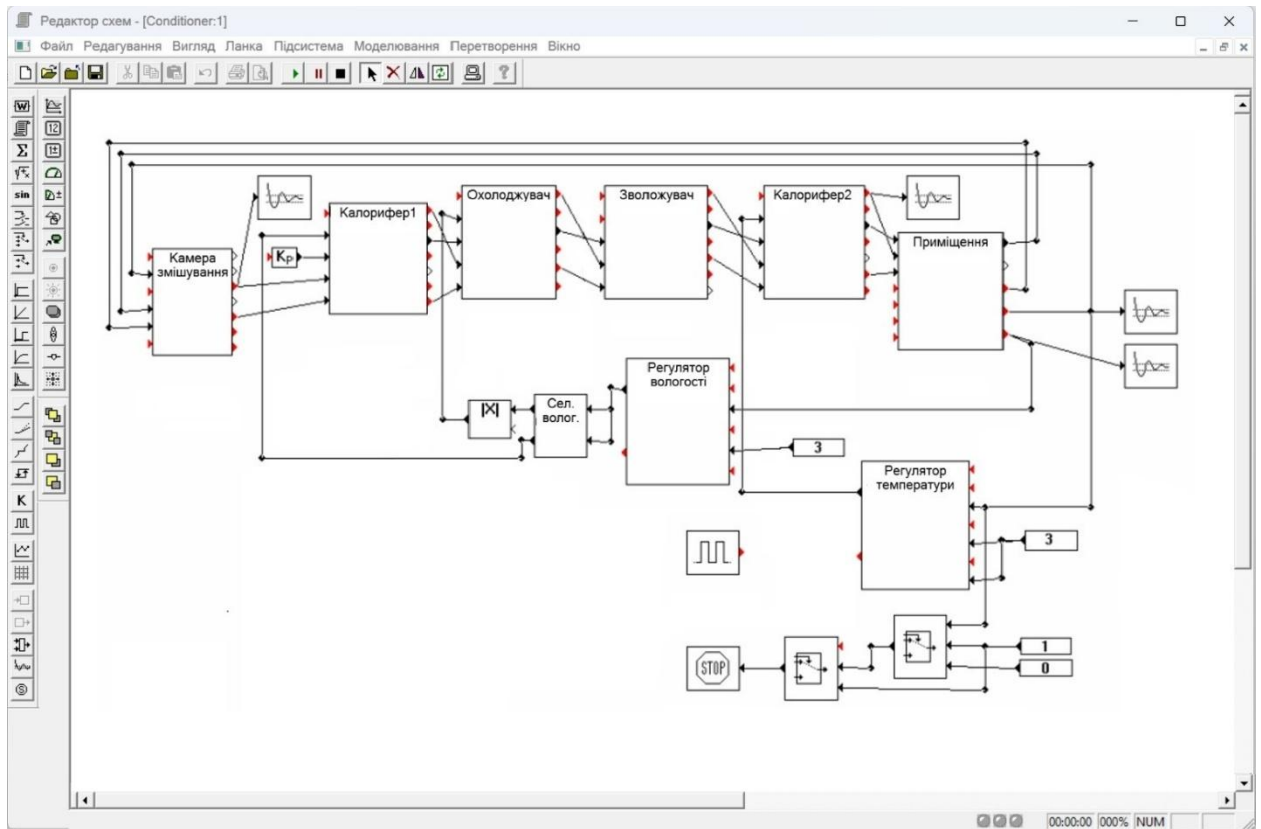


Рис. 7.9. Структурна схема УТК СКП

присутні додаткові входи і виходи відповідальні за анімацію тренажерного комплексу. Тренажерний комплекс реалізує модифікований метод керування за температурою “точки роси”. Регулятор вологості за ПІ-законом керування впливає на калорифер першого підігріву, якщо вологовміст менше заданого, або на охолоджувач – у випадку якщо потрібно сконденсувати надмірну

Після завантаження УТК на екрані монітора користувач бачить зображення загального вигляду СКП. Загальний вигляд СКП дає загальне уявлення про кількісний склад устаткування кондиціонера та напрям руху матеріальних потоків повітря рис. 7.10. На мнемосхемі зображені цифрові значення технологічних параметрів СКП, а саме: t – температура; G – витрата; φ – відносна вологість, d – вологовміст повітря та інші параметри матеріальних потоків. Параметри, числові значення яких виділені синім кольором, користувач може редагувати, вносячи керуючі та/або збурюючі впливи на систему. Параметри виділені зеленим кольором є інформаційними. У нижньому лівому куті мнемосхеми представлена $h - d$ діаграма, яка графічно відображає процес підготовки повітря кондиціонером. Кожна точка $h - d$



діаграми відображається “індивідуальним” кольором та характеризує стан повітряної суміші після впливу технологічного обладнання кондиціонера.

Запущений на виконання УТК СКП на початку перебуває в ручному режимі керування. Користувач має можливість впливати на процес кондиціонування, змінюючи витрату матеріальних потоків обладнання та вивчати їх вплив на процес підготовки повітряної суміші. Після завершення перехідних процесів можна спостерігати за параметрами мікроклімату у приміщенні. Щоб перевести УТК СКП у автоматичний режим керування необхідно перейти на закладку РЕГУЛЯТОР і перевести роботу віртуального регулятора в АВТОМАТИЧНИЙ режим. На сторінці РЕГУЛЯТОР є можливість зміни завдання температури та вологості у приміщенні, а також налаштування параметрів ПП-регуляторів. У пакеті моделювання передбачена можливість перегляду графічних трендів перехідних процесів. Для цього користувач повинен вибрати необхідну групу графіків і клацнути мишкою на відповідній закладці для перегляду графіків. Активація контекстної довідки проводиться натисканням клавіші F1 на виділеному компоненті пакету моделювання. У програмі передбачена можливість збереження результатів моделювання та наступного перегляду в MS Office.

УТК СКП використовується співробітниками БМД НБУ для засвоєння принципів роботи та керування процесами штучного мікроклімату. У Додатку Д представлено акт впровадження.

7.3 Інші впроваджені системи керування

Алгоритми та методи розроблені у роботі доведені до програмної реалізації і можуть використовуватися для проектування та налагодження АСК у різних галузях промисловості. Враховуючи, що розроблені алгоритми та методи мають універсальний характер, окрім імітаційного моделювання, запропоновані у дисертації рішення пройшли промислові випробовування при налагодженні АСК теплових пунктів промислових будівель.

Зокрема, при модернізації систем регулювання опалюванням, гарячим водопостачанням та вентиляцією п'ятиповерхової промислової будівлі проведено налаштування цифрових ПІ– та І-П–регуляторів для стабілізації температури: зворотного теплоносія; гарячої води; припливного повітря. Для керування у системі використано ПЛК КонтрАС-500 [303]. Налагодження АСК проведено із використанням процедури оптимального налаштування модифікацій ПІД-регуляторів за часовими характеристиками ОК, що розглянуто у п.5.2.3. Відмічено, що під час випробовувань АСК теплопункту забезпечила стабілізацію температури зворотного теплоносія за мережевим графіком із точністю ± 1.5 °С, подачу водорозбору гарячої води 55 ± 1.2 °С, подачу припливного повітря для приміщень будівлі в діапазоні 17–19 °С. Перехідні процеси регульованих параметрів мають аперіодичний характер із мінімальною тривалістю. У нічний час та святкові дні температура мережевого графіку зворотного теплоносія знижувалася, підтримуючи температуру у промислових приміщеннях на рівні 14 °С, що дозволило у порівнянні із опалювальним сезоном попереднього року зменшити теплоспоживання будівлі на 47.2 Гкал., що складає економію 17.3 %. Акт впровадження представлено у Додатку Д.

Наступна модернізація АСК інженерного обладнання промислової будівлі реалізована за Договором № 10/07. Акт впровадження представлено у Додатку Д. Система керування реалізована на ПЛК S7386-50D [304]. Проведено модернізацію систем опалювання та гарячого водопостачання. Налагодження АСК виконано експрес-методом налаштування регуляторів, який розглянуто у п.6.1. Під час випробовування ПЛК S7386-50D забезпечив стабілізацію температури зворотного теплоносія за мережевим графіком із точністю $\pm 1,4$ °С та подачу водорозбору гарячої води $60 \pm 1,3$ °С. У нічний час та святкові дні температура мережевого графіку знижувалася, підтримуючи температуру промислових приміщень 13 °С. У порівнянні із опалювальним сезоном 2009 – 2010 року теплоспоживання зменшилося на 52,7 Гкал., що

складає 15,7 % до модернізації. Економічний ефект від модернізації в середньому становить 35 тис. грн. на рік.

Наукові дослідження за темою дисертації виконувалась згідно з планами наукових досліджень НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського” та Міністерства освіти і науки у рамках держбюджетних тем [305 – 308].

7.4 Висновки до сьомого розділу

1. Запропоновано інформаційно-керуючу систему штучного мікроклімату друкарського приміщення БМД НБУ. Впровадження методів оптимального керування кондиціонером AERMEC NCT 22 забезпечило стабілізацію температури $20 \pm 1,5$ °C та вологості $52,5 \pm 2$ % у приміщенні цеху незалежно від пори року та температурних збурень друкарського обладнання. У порівнянні із роботою системи мікроклімату до модернізації точність стабілізації температури у приміщенні зросла на 1,5 °C, а вологості на 3 %.
2. За результатами досліджень роботи розроблено учбово-тренажерний комплекс для вивчення СКП. Учбово-тренажерний комплекс використовуються інженерно-технічними співробітниками БМД НБУ для вивчення принципів роботи та керування СКП.
3. Впровадження експрес-методів оптимізації налаштувань регуляторів для системи керування інженерним обладнанням тепlopункту промислової будівлі забезпечило стабілізацію температури зворотного теплоносія за мережевим графіком із точністю $\pm 1,4$ °C та подачу гарячої води $60 \pm 1,3$ °C. У порівнянні із опалювальним сезоном 2009 – 2010 року теплоспоживання будівлі зменшилося на 52,7 Гкал., що складає 15,7 % до модернізації;
4. Впровадження процедури оптимізації системи керування за часовою характеристикою ОК для інженерного обладнання тепlopункту промислової будівлі НВП “ІКМ” забезпечило стабілізацію температури зворотного теплоносія за мережевим графіком із точністю $\pm 1,5$ °C. У порівнянні із опалювальним сезоном до модернізації теплоспоживання зменшилося на 47,2 Гкал., що складає економію 17,3 % теплоспоживання.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних та експериментальних досліджень розв'язано актуальну науково-прикладну проблему розробки єдиного математичного апарату для опису, аналізу, ідентифікації та оптимізації штучного мікроклімату кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури, що спрямовано на підвищення якості функціонування систем кондиціонування повітря різної інженерної реалізації в умовах параметричної, структурної та стохастичної невизначеності.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи полягають у наступному.

1. Розроблено системний підхід до оптимізації систем штучного мікрокліматом об'єктів критичної інфраструктури, що ґрунтується на побудові багатовимірних математичних моделей кліматичного обладнання у просторі станів, розробці обчислювальних методів параметричної ідентифікації та чисельної оптимізації систем управління штучним мікрокліматом КФО КІ.
2. Запропоновано нову концепцію управління СКП, яка ґрунтується на оптимізації багатовимірних систем керування кондиціонерами в координатах температури та вологовмісту повітря із урахуванням концептуальної невизначеності експлуатаційних умов об'єктів критичної інфраструктури.
3. Для найпоширеніших технологій промислового та прецизійного кондиціонування повітря побудовано нові багатовимірні математичні моделі у просторі станів, що забезпечують математичний опис нестационарної динаміки технологічних процесів підготовки повітряної суміші з урахуванням багатовимірного характеру взаємодії кліматичного обладнання.
4. Запропоновано 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.

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.
6. Для наявного 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 моделей, запропоновані математичні 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. Алгоритм забезпечує адаптивність математичних моделей до реального процесу кондиціонування повітря з відносною похибкою ідентифікації невизначених параметрів не більше 5% за результатами обчислювального експерименту.
8. Запропоновано нову 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 СКП у формі, придатній для застосування сучасних методів оптимізації динамічних систем.
9. Запропоновано систему підтримки прийняття рішень для управління штучним мікрокліматом КФО КІ з ієрархічною організацією, 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 систем керування у часовій області, де вхідною інформацією про динамічні властивості об'єкта керування є його часова перехідна характеристика. Запропонована обчислювальна процедура дозволяє виконувати синтез цифрового регулятора без етапу апроксимації динамічних властивостей об'єкта керування передатною функцією, що підвищує точність обчислень та зменшує методичну похибку налаштування параметрів регуляторів.
11. Побудовано чисельну процедуру оптимізації багатовимірної ЛКЦР для систем кондиціонування повітря, який включає логіку вибору керуючого обладнання кондиціонера для реалізації оптимального керування залежно від поточного стану системи. Використання багатовимірних цифрових регуляторів забезпечує покращення інтегральних показників якості у 1.2–2.3 рази порівняно з одновимірними цифровими регуляторами (за результатами обчислювального моделювання).
12. Проведено системний аналіз та синтез багатовимірних систем керування штучним мікрокліматом у координатах температури та вологовмісту повітря, що дозволило на основі математичного моделювання розмежувати взаємний вплив контурів регулювання температури та вологості для матеріального потоку повітряної суміші. Результати обчислювального експерименту показали покращення інтегральних показників якості у 1.5–2 рази, зменшення коливності та тривалості перехідних процесів порівняно з традиційним підходом до управління системами кондиціонування повітря.
13. Для традиційних систем керування удосконалено експрес-методи оптимізації параметрів регуляторів за каналами регулювання та збурення. Отримані 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 обчислювальні формули покращують якість

перехідних процесів у середньому на 2% за модульними критеріями та на 50% за квадратичними критеріями якості.

14. У результаті проведених досліджень створено багатофункціональне математичне та алгоритмічне забезпечення для систем штучного мікроклімату КФО КІ. Запропоновані математичні моделі, обчислювальні методи параметричної ідентифікації та алгоритми чисельної оптимізації систем керування кондиціонерами доведено до рівня програмної реалізації та експериментально верифіковано на промислових об'єктах.
15. Здійснено розвиток математичного апарату для аналізу і синтезу складних кіберфізичних систем шляхом формалізації процесів управління штучним мікрокліматом об'єктів критичної інфраструктури. У межах теорії оптимальних рішень удосконалено методи синтезу, ідентифікації та оптимізації багатовимірного керування СКП, що забезпечує підвищення адаптивності та якості функціонування систем керування в умовах концептуальної невизначеності.

Таким чином, 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, що функціонують в умовах концептуальної невизначеності. Запропонований системний підхід та ІСППР є універсальними інформаційними інструментами, придатними для застосування до широкого класу складних технічних систем, математичні моделі яких формалізуються в просторі станів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. DIRECTIVE (EU) 2022/2557 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 14 December 2022 on the resilience of critical entities and repealing Council Directive 2008/114/EC. – Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2557/oj/eng>
2. Лівіцька А., Об'єкти критичної інфраструктури: як визначити? // Радник у сфері публічних закупівель. – 2022. – Режим доступу: <https://radnuk.com.ua/voienyj-stan/ob-iekty-krytychnoi-infrastruktury-iak-vyznachyty>
3. Про критичну інфраструктуру: Закон України від 16.11.2021 № 1882-IX. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>
4. Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури: постанова Кабінету Міністрів України від 09.10.2020 № 1109. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-%D0%BF#Text>
5. Про затвердження Загальних вимог до кіберзахисту об'єктів критичної інфраструктури: постанова Кабінету Міністрів України від 19.06.2019 № 518. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/518-2019-%D0%BF#Text>
6. Деякі питання об'єктів критичної інформаційної інфраструктури: постанова Кабінету Міністрів України від 09.10.2020 № 943. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/943-2020-%D0%BF#Text>
7. Якими є наслідки російського теракту на Каховській ГЕС для дикої природи? // Українська природоохоронна група. – 2023. – Режим доступу: <https://uncg.org.ua/iakymy-ie-naslidky-rosijskoho-teraktu-na-kakhovskij-hes-dlia-dykoi-pryrody>
8. Що таке об'єкти критичної інфраструктури // SmartTender.biz. – Режим доступу: <https://smarttender.biz/terminy/view/ob-yekti-kritichnoyi-infrastrukturi>
9. FEMA P-361 Safe Rooms for Tornadoes and Hurricanes and, ICC 500 ICC/NSSA Standard Design and Construction of Storm Shelters. Solatube International, 2018. 213 pp.
10. Safe Rooms for Tornadoes and Hurricanes. - FEMA P-361. Fourth Edition: Guidance for Community and Residential Safe Rooms. – 2021. 213 p.
11. UNHCR. Emergency shelter solutions and standards. – 2025.
12. The Sphere Handbook & Sphere in Practice. Sphere. – 2018. 406 p.
13. ASHRAE. Indoor carbon dioxide, ventilation and indoor air quality (Policy brief). – 2023.
14. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022: Ventilation and acceptable indoor air quality. ASHRAE. – 2022. 86 pp.

15. ASHRAE. Technical FAQ 4.3-35. CO₂ as indicator of ventilation. – 2018.
16. Persily A. Please Don't Blame Standard 62.1 for 1000 ppm CO₂. ASHRAE Journal. – 2021. – Режим доступу: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=931732
17. WHO Housing and health guidelines. WHO – 2018. – Режим доступу: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241550376>
18. Washington State DOH. Ventilation and Air Quality Guidance. – 2025. – Режим доступу: <https://doh.wa.gov/sites/default/files/2022-07/333-256.pdf>
19. Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Carbon dioxide. Occupational exposure limits. Washington. – 2024. – Режим доступу: <https://www.osha.gov/sites/default/files/methods/osha-1027.pdf>
20. Compiled Resources on Indoor Air Quality. – 2025. – Режим доступу: <https://www.isbe.net/Documents/IAQ-resources.pdf>
21. Jones E.R., et al. Indoor humidity levels and associations with symptoms. Building and Environment. Indoor Air. – 2025. № 32(1) –С. 1–15. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1111/ina.12961>
22. Guarnieri G., et al. Relative Humidity and Its Impact on the Immune System and Infections. International Journal of Molecular Sciences. – 2023. № 24(11), 9456, <https://doi.org/10.3390/ijms24119456>
23. Сергієнко М.І. Застосування системи кондиціонування повітря як спосіб підвищення ефективності ткацького виробництва, покращення умов праці та зменшення впливу на довкілля / М.І. Сергієнко, В.Г. Смоляр // Енергетика: економіка, технології, екологія. –2017, № 4. –С. 147–152
24. Белова О.М. Центральні системи кондиціонування повітря у будівлях / О.М. Белова. – ЗАТ “Євроклімат”, 2006. –640с.
25. Юзбашьян А.П. Кондиціонування повітря / А.П. Юзбашьян, В.А. Міланко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. –80 с.
26. Кондиціонування виробничих приміщень: проектування, монтаж. Приклади виробничих підприємств, де використовують кондиціонування. [Електронний ресурс] / Компанія “Світ вентиляційного обладнання”. – Режим доступу: <https://wvp.com.ua/conditioning/air-conditioning-of-production-facilities>
27. Фіалковська Л.В. Очищення повітря у закладах ресторанного господарства / Л.В. Фіалковська // Науковий вісник ТДАТУ. –2023, № 2. – С. 1–7.
28. Pinto S. Influence of Barn Climate, Body Postures and Milk Yield on the Respiration Rate of Dairy Cows / S. Pinto, G. Hoffmann, C. Ammon, B. Amon and others // Annals of Animal Science, Vol. 19, № 2, 2019, pp. 469–481. – Режим доступу: <https://doi.org/10.2478/aoas-2019-0006>

29. Garg A. HVAC (Air Conditioning) Works of the Hospital Building. pp 211–224. / In Book Chapter Garg A. Monitoring Tools for Setting up the Hospital Project. Springer, 2023. – Режим доступу: https://doi.org/10.1007/978-981-99-6203-7_8
30. Боженко М.Ф. Системи опалення, вентиляції і кондиціювання повітря будівель / М.Ф. Боженко. –К.: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 380 с.
31. Нимич Г.В. Современные системы вентиляции и кондиционирования воздуха / Г.В. Нимич, В.А. Михайлов, Е.С. Бондарь. –Киев: ООО “Издательский дом “Аванпост–Прим”, 2003. –626с.
32. Джеджула В.В. Вентиляція та кондиціювання громадських об’єктів / В.В. Джеджула. –Вінниця: ВНТУ, 2021. – 71 с.
33. Seyam Sh. Types of HVAC Systems / In Book Chapter 4 M.Sh. Kandelousi HVAC System. IntechOpen, 2018. – Режим доступу: <https://doi.org/10.5772/intechopen.78942>
34. Клімов Р.О. Опалення, вентиляція та кондиціювання повітря / Укл. Р.О. Клімов. –Кам’янське: ДДТУ, 2016. – 102 с.
35. Дубровська В.В. Розрахунок системи кондиціювання / В.В. Дубровська, В.І. Шкляр. –Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 56 с.
36. Хто й коли винайшов кондиціонер? [Електронний ресурс] / Компанія BNclimate. – Режим доступу: <https://bnclimate.com/hto-j-koly-vynajshov-kondytsioner>
37. Стефанов Ю.В. Інженерні системи будівель. Вентиляція та кондиціювання повітря / Ю.В. Стефанов. – АВОК «Северо–Запад», 2005. –399с.
38. Lešinskis A. Ventilation and air conditioning design approach based on ASHRAE psychrometric chart and Mollier diagram / A. Lešinskis, U. Strauts, M. Metāls and others. // Frontiers in Built Environment, Vol. 10, 2024, pp. 1–9. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1372288>
39. Бондарь Е.С. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха / Е.С. Бондарь, А.С. Гордиенко, В.А. Михайлов, Г.В. Нимич. – Киев: ООО “Издательский дом “Аванпост–Прим”, 2005. –560 с.
40. Краснов Ю.С. Системи вентиляції та кондиціювання / Ю.С. Краснов, О.П. Борисоглібська, О.В. Антипів. – “ТермоКул”, 2004. – 373 с.
41. American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Handbook. Fundamentals: SI ed Amer Society of Heating. –Atlanta: GA, 2009. –980 pp.
42. Environmental Control & Life Support System (ECLSS): Human-Centered Approach (OCHMO-TB-002). NASA Office of the Chief Health & Medical Officer, 2023. 24 pp.

43. Environmental Control and Life Support System (ECLSS) — Fact Sheet. NASA Marshall Space Flight Center, 2017. 2 pp.
44. Вишневецький Є.П. Порівняльний аналіз систем адіабатичного зволоження повітря / Є.П. Вишневецький // Сантехніка. Опалення. Кондиціювання. —2004. № 8, —С. 76–83.
45. Кривобок Е.М. Базова система безпаливної технології кондиціювання мікроклімату тваринницьких будівель/Е.М. Кривобок, О.Е. Ілляш // Проблеми енергозбереження. 1995. №4–6, —С. 54–63.
46. Zgurovsky M. System analysis: Theory and Applications / M. Zgurovsky, N. Pankratova. — Springer, 2007. 447 p. — Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-48880-4>
47. Гримітлін О.М. Опалення та вентиляція виробничих приміщень / О.М. Гримітлін. — “АВОК Северо-Запад”, 2007. —339 с.
48. Ладиженський, Р.М. Кондиціювання повітря / Р.М. Ладиженський. — “Пищепромиздат”, 1957. —443с.
49. Ловейкін В.С. Теорія технічних систем / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич. — К.: ЦП „КОМПРИНТ”, 2017. — 291 с.
50. Sugarman S.C. HVAC fundamentals. —Lilburn, GA: The Fairmont Press, Inc., CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. — 509 pp.
51. Шафові кондиціонери. [Електронний ресурс] / Компанія Ventall. — Режим доступу: <https://ventall.ua/stati/shkafnye-konditsionery>
52. Жуковський С.С. Визначення повітрообміну помешкань і окремих приміщень багатородинних житлових будинків / С.С. Жуковський, О.В. Кінаш // Вісник ДонНАБА. Сучасні будівельні конструкції і матеріали. № 5(61), 2006. С. 56–65.
53. Жуковський С.С. Особливості енергоощадного вентилявання помешкань зі щільними вікнами / С.С. Жуковський, О.В. Кінаш // Вісник НУ “Львівська політехніка” Теорія і практика будівництва № 52, 2004. —С. 68–77.
54. Каніш О.В. Повітрообмін у приміщеннях житлових будинків і його вплив на мікроклімат: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 05.23.03 – Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання / О.В. Каніш. —Макіївка, 2007. —20с.
55. Соловей І.М. Однофазний асинхронний електропривод вентиляторів систем мікроклімату тваринницьких приміщень: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 05.09.16 – Застосування електротехнологій в сільськогосподарському виробництві / І.М. Соловей. —Київ, 2001. —17с.

56. Стебловцев В.О. Регулювання припливних струменів в опалювально–вентиляційних системах / Стебловцев В.О. // 36. наук. пр. –Дн–ськ: ПДАБтаА, 1997. Ч.3. –С. 166–170.
57. Хлистун О.І. Моделювання аеродинамічних та теплообмінних процесів в герметичних кабінах транспортних літаків: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня док. тех. наук: спец. 05.07.01 – Аеродинаміка та газодинаміка літальних апаратів / О.І. Хлистун. –Київ, 2006. –29с.
58. Шайхлісламова І.А. Поліпшення мікроклімату шахт Донбасу способом перерозподілу тепловологісного потенціалу рудникового повітря: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 05.26.01 – Охорона праці / І.А. Шайхлісламова. –Дніпропетровськ, 2007. –16с.
59. Алексеєнко С.О. Нетрадиційний підхід до нової технології кондиціювання повітря в глибоких шахтах, що діють / С.О. Алексеєнко, І.О. Лісовицька, В.І. Мурашник та ін. // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк: ДонНТУ, 2002. -№3. –С. 47-51.
60. Горін О.М. Альтернативні холодильні системи та системи кондиціювання повітря / О.М. Горін, О.В. Дорошенко. – Донецьк: Норд–Пресс, ОГАХ, 2006. –341 с.
61. Горін О.М. Альтернативні системи охолодження і кондиціювання повітря з використанням випарного охолодження: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня док. тех. наук: спец. 05.05.14 –Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціювання / О.М. Горін. –Одеса, 2007. –26 с.
62. Ілляш Д.В. Безпаливні каскадно–рекуперативні системи забезпечення тепловологісного режиму тваринницьких будівель: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 05.23.03 –Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання / Д.В. Ілляш. –Київ, 1999. –16с.
63. Кривобок Е.М. Базова система безпаливної технології кондиціювання мікроклімату тваринницьких будівель / Е.М. Кривобок, О.Е. Ілляш // Проблеми енергозбереження. 1995. №4–6, –С. 54–63.
64. Ландик В.И. Научно–технические основы создания современных бытовых холодильных приборов / В.И. Ландик, В.П. Шевченко, А.А. Шубин и др. – Донецк: ДонНУ, 2002. – 200с.
65. Федоров О.Г. Альтернативні системи кондиціювання повітря з використанням випарного охолодження: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціювання / О.Г. Федоров –Одеса, 2009. –16с.

66. Філіпцов С.Н. Випарно–парокомпресійні охолоджувачі / С.Н. Філіпцов, О.Г. Федоров // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр. Вип.15. –Донецьк: ДонДУЕТ, 2006. –С. 18–23.
67. Вичужанін В.В. Науково–технічні основи експлуатації суднових центральних систем комфортного кондиціонування повітря: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня док. тех. наук: спец. 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту / В.В. Вичужанін – Одеса, 2009. –36 с.
68. Вычужанин В.В. Повышение эффективности эксплуатации судовой системы комфортного кондиционирования воздуха при переменных нагрузках / В.В. Вычужанин. – Одесса: ОНМУ, 2009. –206 с.
69. Гарасимчук І.Д. Енергоспоживання системами створення мікроклімату в пташниках–бройлерниках: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 05.09.16 – Застосування електротехнологій в сільськогосподарському виробництві / І.Д. Гарасимчук –Київ, 2002. –21 с
70. Гоголін А.А. Кондиціонування повітря у м'ясній промисловості / О.О. Гоголін. –К.: Харчова промисловість, 1966. –240 с.
71. Голиков В.А. Научные основы управления микроклиматом судна / В.А. Голиков. – Одесса: ОГМА, 1999. –321 с.
72. Джеджула В.В. Енергоаудит промислових підприємств / В.В. Джеджула, Н.М. Слободян // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011, № 1. с. 56–58.
73. Жуковський С.С. Визначення мінімальних одиничних витрат зовнішнього повітря для кондиціонування залів і аудиторій / С.С. Жуковський, О.В. Кінаш // Вісник ДонНАБА. №2006–6(62) – Макіївка, 2006. –С. 234–240.
74. Ілляш О.Е. Енергозбереження у системах мікроклімату будівель з внутрішніми джерелами теплоти та вологи / О.Е. Ілляш // Промислова теплотехніка. 1998. №3, С. 56–61.
75. ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal environmental conditions for human occupancy. ASHRAE, 2020. 76 pp.
76. ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment—Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. International Organization for Standardization, 2005. 52 pp.
77. The Sphere Handbook: Humanitarian Charter and Minimum Standards in Humanitarian Response. Sphere, 2018. 416 pp.
78. Pocket Guide to Chemical Hazards. NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health, Publication No. 2005-149, 3rd printing),

2007. 454 pp. – Режим доступу: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2005-149/pdfs/2005-149.pdf>
79. Guide for crew habitability on mobile offshore drilling units (MODUs). American Bureau of Shipping, 2014. 89 pp.
80. Співак О.Ю. Тепломасообмін / О.Ю. Співак, Н.В. Резидент. – Вінниця: ВНТУ, 2021. – 113 с.
81. Лабай В.Й. Тепломасообмінні процеси в системах ТГВ / В.Й. Лабай. – Львів: «Львівська політехніка», 2021. – 340 с.
82. Incropera F.P. Fundamentals of heat and mass transfer. / F.P. Incropera et al. – John Wiley & Sons. 7th edition, 2011. – 1050 p.
83. Holman J.P. Heat transfer / J.P. Holman // – McGraw-Hill. 7th edition, 2010. – 725 p.
84. Eckert E.R. Analysis of heat and mass transfer / E.R. Eckert and R.M. Drake. – McGraw-Hill, 1972. – 806 p.
85. Bejan A. Heattransfer handbook / A. Bejan, A.D. Kraus. – John Wiley & Sons, 1948. – 1480 p.
86. Bejan A. Convection Heat Transfer / A. Bejan. – Wiley. 4th edition, 2013. – 704 p.
87. Whitaker S. Fundamental Principles of Heat Transfer / S. Whitaker. – Pergamon, 2013. – 556 p.
88. Whitaker S. Elementary Heat Transfer Analysis/ S. Whitaker. – Pergamon, 2014. – 388p.
89. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка / О.Ф. Буляндра. – К.: «Техніка», 2006. – 320 с.
90. Чеботарьов В.О. Технічна термодинаміка / В.О. Чеботарьов, А.Д. Беркута. – К: «Вища школа», 1969. – 203 с.
91. Дев'ятов Б.М. Теорія перехідних процесів у технічних апаратах з погляду задач управління / Б.М. Дев'ятів. – Ред. – вид. АН СРСР, 1964. – 323 с.
92. Кафаров В.В. Аналіз та синтез хіміко-технологічних систем / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкін. – «Хімія», 1991. – 432с.
93. Федоров В.И. Метод элементарных балансов для расчета нестационарных процессов поверхностных теплообменных аппаратов / В.И. Федоров, З.А. Марценюк. – К.: “Наук. думка”, 1977. – 143с.
94. Остапенко Ю.О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування / Ю.О. Остапенко. – К.: “Задруга”, 1999. – 424с.
95. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС / В.А. Демченко. – Одесса: “Астропринт”, 2001, – 305с.

96. Жученко А.И. Динамика объектов с распределенными параметрами / А.И. Жученко, А.И. Кубрак, И.М. Голинко. –К.: «ЭКМО», 2005. –121 с.
97. Жученко А.И. Динамика объектов с сосредоточенными параметрами / А.И. Жученко, А.И. Кубрак, И.М. Голинко. –К.: НТУУ «КПИ», 2006. – 181с.
98. Жученко А.И. Динамічна оптимізація з використанням MATLAB та SIMULINK / А.І. Жученко, Л.Р. Ладієва, Р.М. Дубік // –К.: СПД Моляр, 2010. –210 с.
99. Риндюк Д.В. Математичне моделювання теплових процесів в енергетиці та промисловості / Д.В. Риндюк. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 69 с. – Режим доступу:
<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/e956016f-caa9-4515-a73c-c1da418185d9/content>
100. Sun H. Dynamic Modeling of Heat Exchangers Based on Mechanism and Reinforcement Learning Synergy / H. Sun, Z. Jia, M. Zhao, J. Tian, D. Liu, Y. Wang // MDPI. Buildings. – 2024, vol. 14(3):833. – Режим доступу:
<https://doi.org/10.3390/buildings14030833>
101. Bastida H. Dynamic modeling and control of a plate heat exchanger / H. Bastida, C.E. Ugalde-Loo, M. Abeysekera, M. Qadrdan // IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). 2017, pp. 1-6, – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/EI2.2017.8245736> .
102. Qiao H. A Low-Order Model for Nonlinear Dynamics of Heat Exchangers / H. Qiao, C.R. Laughman // 19th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue. – 2022, 2228. – Режим доступу:
https://www.merl.com/publications/docs/TR2022-123.pdf?utm_source=chatgpt.com
103. Diallo A. Modelling of a Two-Phase Thermosyphon Loop for Passive Air-Conditioning of a House in Hot and Dry Climate Countries / A. Diallo, X. Chesneau, I. Diaby, D. El-Maktoume // Energy and Power Engineering, – 2021, vol. 13(6), pp. 243-260. – Режим доступу:
<https://doi.org/10.4236/epe.2021.136017>
104. Pergantisa E.N. Humidity-Aware Model Predictive Control for Residential Air Conditioning: A Field Study / E.N. Pergantisa, P. Dhillona, L.D. Reyes Premera, A.H. Leea, D. Ziviania, K.J. Kircher // Electrical Engineering and Systems Science, – 2024, vol.2, 18 p. – Режим доступу:
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.01707>
105. Thwin K.M.M. Machine-Learning Microclimate Forecasting for Adaptive Equipment Control via Web Integration in Open-Ventilated Greenhouses / K.M.M. Thwin, T. Horanont, T. Phatrapornnant // AgriEngineering. – 2024,

vol.6, pp. 2845–2869. – Режим доступу:

<https://doi.org/10.3390/agriengineering6030165>

106. Xu J. Air conditioning reliability analysis based on dynamic Bayesian network and Markov model / J. Xu, Q. Wang, J. Zhou, L. Wu, J. Chen, H. Zhou // International Journal of Metrology and Quality Engineering. – 2024, vol.15(8). – Режим доступу: <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2024006>
107. Sun H. Dynamic Modeling of Heat Exchangers Based on Mechanism and Reinforcement Learning Synergy / H. Sun, Z. Jia, M. Zhao, J. Tian, D. Liu, Y. Wang // Buildings. – 2024, vol.1:833. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/buildings14030833>
108. Xun C. Decomposition of air conditioning electricity consumption based on effective duration / C. Xun, H. Zheng, Z. Han // PLoS ONE. – 2024, vol.19(8):e0308459. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0308459>
109. Yuan X. H. Control Strategy for Building Air Conditioning Cluster Loads Participating in Demand Response Based on Cyber-Physical System / X. Yuan, H. Cao, Z. Chen; J. Xu; H. Liu // Energies. – 2024, vol.17:1291. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/en17061291>
110. You Y. Ensemble learning based multi-fault diagnosis of air conditioning system / Y. You, J. Tang, M. Guo, Y. Zhao, Ch. Guo, K. Yan, B. Yang // Energy & Buildings. – 2024, vol.319:114548. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114548>
111. Jiang B. Decentralized control strategy of air-conditioning loads for primary frequency regulation based on environment information / B. Jiang, Z. Yang, W. Xiong, L. Chen, P. Wang, S. Liao // Frontiers in Energy Research. – 2024, vol.11:1347789. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1347789>
112. Рудакова Г.В. Моделі та методи керування організаційно-технічними системами в критичних режимах функціонування: Монографія / Г.В. Рудакова. –Херсон: Видавництво ПП Вишемирський В.С, 2014. –316с.
113. Тимчук С.А. Синтез оптимальной структуры распределительных электрических сетей при неопределенности исходной информации / С.А. Тимчук, Н.М. Черемисин. – Харьков: ООО “В деле”, 2016. –270с.
114. Luo G. An Energy-Saving Regulation Framework of Central Air Conditioning Based on Cloud–Edge–Device Architecture / G. Luo, T. Sun, H. Wang, H. Li, J. Wang, Z. Miao, H. Si, F. Che, G. Liu // Sustainability. – 2023, vol.15:2554. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/su15032554>
115. Hou Y. Two-Layer Control Framework and Aggregation Response Potential Evaluation of Air Conditioning Load Considering Multiple Factors / Y. Hou,

L. Zhao, H. Jiang, X. Ji, J. Zhao // IEEE Power & Energy Society Section.
– 2024, vol.12, pp. 34435–34451 – Режим доступу:
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3368927>

116. Ладанюк А.П. Основи системного аналізу / А.П. Ладанюк – Вінниця: Нова книга, 2004. –176с.
117. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации / В.М. Кунцевич. – К.: Наук. думка, 2006. –261с.
118. Бідюк П.І. Системи і методи підтримки прийняття рішень / П.І. Бідюк, О.Л. Тимошук, А.Є. Коваленко, Л. О. Коршевнік. -К: КПІ ім. І. Сікорського, 2022. – 610с.
119. Данилов В.Я. Синергетичні методи аналізу / В.Я. Данилов, А.Ю. Зінченко. – К.: НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2011. –340с.
120. Кафаров В.В. Методи кібернетики в хімії та хімічній технології / В.В. Кафарів. – «Хімія», 1971. – 496с.
121. Голінко І.М. Динамічна модель теплового режиму калорифера / І.М. Голінко, А.П. Ладанюк, Л.Д. Кошелева // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2009, № 3(16). –С. 59–63.
122. Голінко І.М. Моделювання та оптимізація систем керування [Текст]: монографія / І.М Голінко, А.І. Кубрак. –Кам'янець–Подільський: ПП Буйницький, 2012. –262 с.
123. Федоров В.И. Метод элементарных балансов для расчета нестационарных процессов поверхностных теплообменных аппаратов / В.И. Федоров, З.А. Марценюк. –Киев: “Наук. думка”, 1977. –143с.
124. Жихарева Н.В. Інноваційні технології кондиціонування повітря в нестационарних умовах [Текст] : монографія / Н.В. Жихарева. – Одеса: ТЕС, 2022. –262 с.
125. Липа О.І. Кондиціонування повітря. Основи теорії. Сучасні технології обробки повітря / О.І. Липа. – Одеса: «Видавництво ВМВ», 2010. – 607с.
126. Друкований, М.Ф. Кондиціонування та охолодження / М.Ф. Друкований, Л.В. Фіалковська, О.М. Друкований – Вінниця: ВНАУ, 2012 – 273 с.
127. Кравченко В.С. Розрахунок систем інженерного обладнання будівель / В.С. Кравченко, С.Б. Проценко, Н.В. Кравченко. – Рівне : НУВГП, 2016. – 495 с.
128. Carrier W.H. Modern Air Conditioning, Heating and Ventilating / W.H. Carrier, R.E. Cherne, W.A. Grant. – Pittman publishing corporation, 1940. 547 p.
129. Nuggenhalli S.N. HVACR Principles and Applications / S.N. Nuggenhalli. – Springer, 2024. 362 p.

130. Wang S.K. Handbook of Air Conditioning and Refrigeration / S.K. Wang. – McGraw-Hill, 2001. 1401 p.
131. Stoecker W.F. Refrigeration and Air Conditioning / W.F. Stoecker, J.W. Jones. – McGraw-Hill, 1982. 440 p.
132. McDowall R. Fundamentals of HVAC Systems / R. McDowall. – Elsevier, 2006. 224 p.
133. Нефелов С.В. Техніка автоматичного регулювання у системах вентиляції та кондиціонування повітря / С.В. Нефелов. – «Стройиздат», 1984. -328 с.
134. Римкевич А.А. Управління системами кондиціонування повітря/А.А. Римкевич, М.Б. Халамайзер. – «Машинобудування», 1977. -279с.
135. Сотніков А.Г. Автоматизація систем кондиціонування повітря та вентиляції / О.Г. Сотніков. – «Машинобудування», 1984. -240 с.
136. Auvil R.J. HVAC Control Systems / R.J. Auvil. 4th Edition. American Technical Publisher. 2017. – 576 p
137. Haines R.W. Control Systems for Heating, Ventilating, and Air Conditioning / R.W. Haines, D.C. Hittle. 6th Edition. New York. Springer Science & Business Media, 2006. – 377 p.
138. Shadpour F. The Fundamentals of HVAC Direct Digital Control / F. Shadpour. Hacienda Blue Publishing, 2012. – 337 p.
139. Халімовський О.М. Мікропроцесорна система автоматичного управління параметрами повітря робочого середовища людини / О.М. Халімовський, О.І. Киселичник, Н.Я. Островерхів та ін. // Електроніка та зв'язок. -2001. № 13, – С. 50-54.
140. Богословський, В.М. Кондиціонування повітря та холодопостачання / В.М. Богословський, О.Я. Кокорін, Л.В. Петров. – «Стройиздат», 1985. - 367 с.
141. Коханський О.І. Ідентифікація передавальних функцій охолоджувача наддувного повітря / О.І. Коханський, Е.М. Колпакчі // Наук.-тех. зб. Автоматизація суднових технічних засобів. 2007. Вип. 12, -С. 68–77.
142. Степанов А.В. Кондиционирование воздуха промышленных и общественных зданий / А.В. Степанов, И.В. Зингерман. –Ташкент: ГИПРОНИИполиграф, 1970. –326 с.
143. Вычужанин, В.В. Математические модели нестационарных режимов воздухообработки в центральной СКВ / В.В. Вичужанін // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ. 2007. Вип. 23, –С. 172–185.
144. Вичужанін В.В. Модель зволожувача повітря центрального кондиціонера / В.В. Вичужанін // Сантехніка. Опалення. Кондиціонування. 2007. № 1, -С. 54–55.

145. Зусманович Л.М. Анализ современных методов расчета оросительных воздухоохладителей / Л.М. Зусманович // Вопросы обработки воздуха в контактных аппаратах, ЦИНИС Госстроя СССР. 1970. –С. 38–40.
146. Зусманович Л.М. Рекомендації щодо розрахунку систем вентиляції та кондиціювання повітря у гарячих цехах підприємства громадського харчування / Л.М. Зусманович. – «Стройиздат», 1975. -110с.
147. Участкін П.В. Оцінка форсуночної камери як теплообмінного апарату / П.В. Участкін, Л.В. Павлухін // Збірн. Наукові роботи інститутів охорони праці ВЦРПС. 1965. №5, –С. 43–51.
148. Нестеренко О.В. Основи термодинамічних розрахунків вентиляції та кондиціювання повітря / О.В. Нестеренко. – «Вища школа», 1991. –460с.
149. Шиляєв М.І. Фізико-математична модель процесу тепломасообміну у форсункових зрошувальних камерах при високих вмістах вологи / М.І. Шиляєв, Є.М. Хромова, А.В. Тумаşова // Вісті вузів. Будівництво. 2008. №6, –С. 75–81.
150. Довгалюк В.Б. Ефективність організації повітрообміну в теплонапружених приміщеннях у стиснутих умовах / В.Б. Довгалюк, В.О. Мілейковський // Будівництво України. – 2007. – № 3. –С. 36–39.
151. Жуковський, С.С. Визначення повітрообміну помешкань і окремих приміщень багатородинних житлових будинків / С.С. Жуковський, О.В. Кінаш // Вісник ДонНАБА. Сучасні будівельні конструкції і матеріали. № 5(61), 2006. С. 56–65.
152. Клименко Г. М. Математична модель теплоповітряних процесів у приміщенні виробничого підприємства / Г. М. Клименко // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2013. – № 755 : Теорія і практика будівництва. –С. 162–168.
153. Вычужанин В.В. Математическая модель кондиционируемого помещения как объекта САУ по РТ / В.В. Вычужанин // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ. 2006. –Вип. 19, –С. 102–115.
154. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціювання / Державні будівельні норми України. – К.: «Укрархбудінформ», Дата набрання чинності 01.01.2014. – Режим доступу: https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3074971619479783152/2023-04-06/a17254e7-6897-442c-8ecd-8b1984e4ebee.pdf – 08.12.2024
155. Голіков В.А. Наукові засади управління мікрокліматом судна / В.А. Голіков. – Одеса: ОГМА, 1999. – 321 с.

156. Голінко І.М. Автоматичне керування системою штучного мікроклімату. Розробка та інсталяція програмного забезпечення / І.М. Голінко // Сантехніка. Опалення. Кондиціювання. –2004, № 3. –С. 25–28.
157. Голінко І.М. Аналіз системи керування для промислового кондиціонера із парозволожувачем / І.М. Голінко, В.Г. Трегуб // Східно–Європейський журнал передових технологій. – 2012, № 6/8(60). –С. 14–18.
158. 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 ІХ Міжнародної науково–практичної конференції, 17 – 18 квітня 2013 р., – Київ, 2013. С. 172–175.
159. Голінко І.М. Синтез системи керування штучним мікрокліматом із використанням відносної вологості та вологовмісту повітря в якості параметра стабілізації / І.М. Голінко, І.Є. Галицька // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2015. № 13, –С. 88–98.
160. Бондар Ю.С. Передові технології в керуванні кондиціонерами / Ю.С. Бондар // Холод, М+Т. – 2004, № 4. –С. 38–39.
161. Новіков П.В. Fuzzy-контролер підтримання мікроклімату в приміщенні за значеннями індексу дискомфорту [Текст] / П.В. Новіков, О.В. Степанець, Р.П. Саков // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. –2017. № 4/10. –С. 76–83.
162. Дранишников Л.В. Інтелектуальні методи в управлінні / Л.В. Дранишников. – Кам'янське: ДДТУ. 2018.– 416с.
163. Степанець О.В. Розробка нечіткого регулятора для задачі забезпечення температурної складової комфортного мікроклімату / О.В. Степанець, А.В. Каракой // Технологічний аудит та резерви виробництва. –2016. №1/2(27). –С. 50–55.
164. Atsushi C. A Study of Fuzzy Adaptive Control on Supercritical Coal-fired Thermal Power Plant / C. Atsushi, M. Hiroshi // Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. 2000. Vol. 66. № 643. –p. 765–770.
165. Lee K.Y. Inverse Dynamic Neuro-Controller for Superheater Steam Temperature Control of a Large-Scale Ultra-Supercritical Boiler Unit / Lee K.Y., Ma L., et al. // 6th IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control, Tampere Hall, Finland, 2009. –p. 126–131.
166. Shtifzon O. Development of adaptive fuzzylogic device for control under conditions of parametric nonstationarity / O. Shtifzon, P. Novikov, T. Bahan // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018, № 1/2 (91).

– р. 30 – 37. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121749>

167. Вичужанін В.В. Реалізація фазі-регулятора з нечіткою динамічною корекцією / В.В. Вичужанін // Електронний вісник НУК. 2011. № 1, –С. 103–112.
168. Кондратенко Ю.П. Синтез та аналіз властивостей нечітких регуляторів для стабілізації температури в суднових приміщеннях / Ю.П. Кондратенко, Г.В. Кондратенко, Т.Л. Мельник // Автоматизація суднових технічних засобів: науково-технічна збірка. –Одеса: ОНМУ. 2007. Вип. 12, –С. 53–67.
169. Ang, K.H. PID control system analysis, design, and technology / Ang K.H., Chong G., Li Y // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4. P. 559–576.
170. Åström, K.J. Advanced PID control / Åström K.J., Hägglund T. // –ISA, 2006. –460 p.
171. O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID controller tuning rules [Text]: 3rd Edition / Aidan O'Dwyer. –London: Imperial College Press, 2009. –608 pp.
172. Ладанюк А.П. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами. –К.: НУХТ, 2014. –274с.
173. Kotelnikov, V.G. System analysis of quality and reliability of complex anthropogenic complexes / V.G. Kotelnikov, G.V. Lepesh, L.A. Martyschenko // Technical and technological problems of service. №4(2), 2013, pp. 35–41.
174. Åström, K.J. Feedback Systems: An introduction for scientists and engineers / Åström K.J., Murray R.M. –USA: Princeton University Press, 2008. –285p.
175. Edward A. Lee. The Past, Present, and Future of Cyber-Physical Systems / E.A. Lee // A Focus on Models. Sensors. №15(3), 2015, pp. 4837–4869.
176. Golinko, I. Digital Control Systems Tuning with Using Continuous Synthesis Methods / I. Golinko, I. Galytska // 2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis and Intelligent Computing, –2020, pp. 120–125.
177. Слободюк, М.В. Огляд сучасних засобів програмування PC-based контролерів / М.В Слободюк, І.М. Голінко // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: тези доповідей IX Міжнародної науково-практичної конференції, 18 – 22 квітня 2011 р. – Київ, 2011. –С. 304.
178. Романенко В.Д. Методи автоматизації прогресивних технологій: Підручник. / В.Д. Романенко. –К.: Вища школа, 1995. –519с.

179. Александров О.Г. Стан та перспективи розвитку адаптивних ПД-регуляторів / О.Г. Александров, М.В. Паленов // Автоматика та телемеханіка.–2014, № 2. –С. 16–30.
180. Голінко, І.М. Контролер “Контрас–500”. Реалізація алгоритму керування промисловим кондиціонером в системі штучного мікроклімату / І.М. Голінко // Енергозберігаючі технології та автоматизація. –2003, № 3(39). –С. 15–17.
181. Кокорін, О.Я. Енергозберігаючі режими підготовки повітря в комфортних системах кондиціонування / О.Я. Кокоркін, В.В. Комісаров, А.В. Сафронов // Холодильна техніка. -2004, № 10. -С. 28–32.
182. Levenhagen, J. HVAC control system diagrams / John I. Levenhagen. –New York: McGraw–Hill, 1998. –437 p.
183. 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.
184. – Режим доступу: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-97529-5_2
185. Голінко, І.М. Принципи синтезу автоматичних систем керування промисловими кондиціонерами / І.М. Голінко // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2016. № 8, –С. 33–42.
186. Сабатіні Л. Системи ОВК для лікарняних приміщень із контрольованим забрудненням / Л. Сабатіні, Г. Кампі // АВОК. –2001. №1, –С. 22–25.
187. Whyte W. Cleanroom Technology: Fundamentals of Design, Testing and Operation / W. Whyte. –Wiley, 2010. –384 p.
188. Катренко А.В. Системний аналіз / А.В. Катренко. –Львів: “Новий Світ – 2000”, 2018 –396с. ISBN 978–966–418–102–7
189. Грицюк П.М. Основи теорії систем і управління / П.М. Грицюк, О.І. Джоші, О.М. Гладка. – Рівне: НУВГП, 2021. – 272 с.
190. Sanneman L., Shah J.A. A Situation Awareness-Based Framework for Design and Evaluation of Explainable AI. Lecture Notes in Computer Science. Springer, – 2020, vol 12175, pp 94–110. – Режим доступу: https://doi.org/10.1007/978-3-030-51924-7_6
191. Landau I.D. Digital Control Systems – Identification, Design and Implementation / I.D. Landau, G. Zito. – GIPSA–LAB, 2020. –484 p.
192. Професійно про погоду в Україні [Електронний ресурс] / Український гідрометеорологічний центр. – Режим доступу: <http://meteo.ua/archive/34/kyiv/2016-7-17>

193. ДСТУ ISO 14644-1:2009. Чисті приміщення та пов'язані з ними контрольовані середовища. Частина 1. Класифікація чистоти повітря. – К.: «Держспоживстандарт України», Дата набрання чинності 01.01.2012. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=26060
194. Hancock P.A., Szalma J.L. Stress and human performance: A systems approach. Human Factors, 2021. № 63(1), pp. 5–22.
195. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. 2019. 87 p. – Режим доступу: <https://fire-gas.com/storage/2024/06/ASHRAE-62.1-2019.pdf>
196. 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.
197. Pankratova, N. Electric heater mathematical model for cyber-physical systems / N. Pankratova, I. Golinko // System research and information technologies. – 2021, № 2. pp. 7–17.
198. Бідюк П.І. Інформаційна система підтримки прийняття рішень для прогнозування фінансово-економічних процесів на основі структурно-параметричної адаптації моделей / П.І. Бідюк, О.М. Трофимчук, А.В. Федоров // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2011, № 6. –С. 42–53.
199. Каталог. VENTUS – вентиляційні агрегати та центральні кондиціонери. – VTSGroup, 2003. –156с.
200. Лазарєв Ю.Ф. Довідник з MATLAB / Ю.Ф. Лазарєв. – К.: НТУУ "КПІ", 2013. – 132 с.
201. Xue D. MATLAB and Simulink in Action. Programming, Scientific Computing and Simulation / D. Xue, F. Pan. – Springer, 2024. – 468 p.
202. Голінко І.М. Динамічна модель теплообміну для водяного калорифера у просторі станів / І.М. Голінко, І. Є.Галицька // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2016. № 15, –С. 83–92.
203. Ніколаєва К.А. Динамічна модель калорифера в просторі станів / К.А. Ніколаєва, І.М. Голінко // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: тези доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції, 19 – 22 квітня 2016 р. – Київ, 2016. –С. 28.
204. 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.

205. 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.
206. Кравченко, А.С Динамічна модель кожухотрубного теплообмінника / А.С. Кравченко, І.М. Голінко // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: тези доповідей VII міжнародної науково–практичної конференції, 21 – 25 квітня 2009 р. –Київ, 2009. –С. 203.
207. Кошелєва Л.Д. Нелінійна модель динамічних режимів водяних калориферів / Л.Д. Кошелєва, І.М. Голінко // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: тези доповідей VII міжнародної науково–практичної конференції, 21 –25 квітня 2009 р. –Київ, 2009. –С. 215.
208. Кравчук А.А. Оптимальна система керування штучним мікрокліматом: магістерська дисертація / А.А. Кравчук – К.: НТУУ “КПІ”, 2013. –125с.
209. Голінко І.М. Динамічна модель тепломасообміну для водяного охолоджувача промислового кондиціонера / І.М. Голінко // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. –2014, № 6. –С. 27–34.
210. 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.
211. 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.
212. Голінко І.М. Динамічна модель камери форсуночного зволоження / І.М. Голінко, В.В. Древецький // Матеріали Міжнародної наукової конференції: Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2019), 21-22 травня 2019 р. – К.: НАУ, 2019. –С. 179–181.
213. 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
214. Системи кондиціонування повітря – «ВЕЗА». Каталог 2012. – «ВЕЗА», 2012. –166с
215. 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.
216. Голінко І.М. Математичне моделювання процесів тепло- та масообміну для камери парового зволоження / І.М. Голінко, І. Є.Галицька, В.Ю.

- Степаненко // Прикарпатський вісник НТШ. Число. –2014, № 1(25). – С. 54-62.
217. 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.
218. Golinko I. Time-variant model of heat-and-mass exchange for steam humidifier / I. Golinko, V. Drevetskiy // Informatics, Control, Measurement in Economy and Environmental Protection. –2020, № 2. pp. 24–27.
219. User manual, humiSteam Basic. Technology & Evolution. – CAREL, 2008. – 43 pp.
220. 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.
221. Голинко І.М. Промислове приміщення як динамічний елемент системи керування штучним мікрокліматом / І.М. Голинко, І.Є. Галицькая // Інформаційні системи, механіка та керування. –2018. № 18, –С. 104–114.
222. Solovchuk K. Mathematical models for typical continued computer-oriented process control / K. Solovchuk // Control systems and computers. – 2018, № 5, pp. 79–92. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15407/usim.2018.05.079>
223. 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. – Режим доступу: <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/28472/24863>
224. Grimvall G. Thermophysical Properties of Materials / G. Grimvall. – North Holland, 1999. – 424 p.
225. Подушко Л.О. Теплофізичні властивості води і водяної пари. Довідкові матеріали / Л.О. Подушко, Л.О. Синенко. – К.: «КЕФК», 2022. – 47 с.
226. Штангеев К.О. Довідник з теплофізичних властивостей робочих середовищ цукрового виробництва / К.О. Штангеев. – Київ: ПІДО НУХТ, – 2023. – 74 с.
227. Константинов С.М. Теоретичні основи теплотехніки / С.М. Константинов. – Київ: «Золоті ворота», 2012. – 592 с.
228. Дубровська В.В. Термодинаміка та теплообмін: Навч. посіб. / В.В. Дубровська, В.І. Шкляр – Київ: «Політехніка», 2016. – 152 с.

229. Корнієнко Я.М. Процеси та обладнання хімічної технології [Текст]: підруч. / Я.М. Корнієнко, Ю.Ю. Лукач, І.О. Мікульонок та ін. – К.: НТУУ "КПІ", – 2011. – 416 с.
230. Ткаченко С.Й. Нестационарний теплообмін – визначення коефіцієнта тепловіддачі стаціонарним методом та методом регулярного теплового режиму / С.Й. Ткаченко, О.В. Власенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2023, № 2. – С. 28 – 35. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-167-2-28-35>
231. De Benedictis A. Digital Twins for Anomaly Detection in the Industrial Internet of Things: Conceptual Architecture and Proof-of-Concept / A. De Benedictis, F. Flammini, N. Mazzocca, A. Somma, F. Vitale // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2023, Vol. 19, № 12. pp. 11553–11563. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/TII.2023.3246983>
232. Щеглов В.Р. Методи та технології розроблення цифрових двійників для гарантоздатних систем індустріального інтернету речей / В.Р. Щеглов, О.І. Морозова // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2022, № 4. – С. 127–137.
233. Fuller A. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research / A. Fuller, Z. Fan, C. Day, C. Barlow // IEEE Access. – 2020, Vol. 8. pp. 108952–108971. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
234. The Industrial Internet Reference Architecture / An Industry IoT Consortium Foundational Document. 2022, – 70 pp. – Режим доступу: <https://www.iiconsortium.org/wp-content/uploads/sites/2/2022/11/IIRA-v1.10.pdf>
235. Digital Twins for Industrial Applications. Definition, Business Values, Design Aspects, Standards and Use Cases / An Industrial Internet Consortium White Paper, Version 1.0. 2020, – 19 pp. – Режим доступу: https://www.iiconsortium.org/pdf/IIC_Digital_Twins_Industrial_Apps_White_Paper_2020-02-18.pdf
236. 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. pp. 212–223.
237. Кононюк О.Є. Основи теорії оптимізації. Безумовна оптимізація. / О.Є. Кононюк. – Київ: "Освіта України", 2011. – 544 с.
238. Jone D. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review / D. Jone, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, B. Hicks // CIRP Journal of

- Manufacturing Science and Technology. – 2020, Vol. 29. pp. 36-52. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
239. Rasheed A. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective / A. Rasheed, S. Omer, T. Kvamsdal // IEEE Access. – 2020, Vol. 8. pp. 21980–22012. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>
240. Guerra-Zubiaga D.A. Digital Twin in a Manufacturing Integrated System: Siemens TIA and PLM Case Study / D.A. Guerra-Zubiaga, A. Bondar, G. Escobedo, A. Schumacher // ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. – 2020, Vol. 28. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1115/IMECE2019-11023>
241. Ansys Twin Builder. Simulation-Based & Hybrid Analytics. ANSYS Inc, 2021. – Режим доступу: <https://www.ansys.com/content/dam/product/digital-twin/twin-builder/ansys-twin-builder-technical-datasheet.pdf>
242. Azure Digital Twins. Create comprehensive digital models of entire environments. Microsoft, 2023. – Режим доступу: <https://azure.microsoft.com/en-us/products/digital-twins>
243. Predix Platform. What is Predix Platform? Mechatronics Hunter, 2022. – Режим доступу: <https://mc-hunter.com/predix-platform>
244. Дубовой В.М. Ідентифікація і моделювання технологічних об'єктів і систем керування / В.М. Дубовой. – Вінниця: ВНТУ, 2012. 303 с.
245. N. Pankratova, I. Golinko, Approach to development of digital twin model for cyber-physical system in conditions of conceptual uncertainty. In Book Chapter M. Zgurovsky, & N. Pankratova (Eds.), System Analysis and Artificial Intelligence (Ser. Studies in Computational Intelligence, – 2023, Vol. 1107). Springer. – Режим доступу: https://doi.org/10.1007/978-3-031-37450-0_1
246. 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
247. 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
248. 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). pp. 299–320. – Режим доступу: <https://doi.org/10.56415/csjm.v31.15>

249. 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. 201-207.
250. Pankratova N.D. Multidimensional control system synthesis for a precision air-conditioner / N.D. Pankratova, I.M. Golinko, P.I. Bidyuk // System research and information technologies. –2020. № 1, –С. 7–20.
251. Голінко І.М. Динамічна модель 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.
252. 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.
253. 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. – Режим доступу: <https://doi.org/10.20535/2219-3804202019194413>
254. 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
255. Pankratova N.D. Creation of Physical Models for Cyber-Physical Systems / N. Pankratova // Cyber-Physical Systems and Control, 2020, pp. 55–63.
256. Broo D. Cyber-physical systems research and education in 2030: Scenarios and strategies / D. Broo, U. Boman, M. Törngren // Journal of Industrial Information Integration. – 2017. Vol. 21, 100192. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100192>
257. Cyber–physical system. From Wikipedia, the free encyclopedia. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Cyber%E2%80%93physical_system – 31.03.2025
258. Government Trends 2024. A report by Deloitte Center for Government Insights, Deloitte. – Режим доступу: https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/articles/us187225_gov-trends-24/DI_Gov-trends-24.pdf – 31.03.2025
259. Мельник А.О. Кіберфізичні системи: багаторівнева організація та проектування [Текст]: Монографія / А.О. Мельник, В.А. Мельник, В.С.

- Глухов, А.М. Сало. Львів: “Магнолія 2006”, 2024. – 238 с. ISBN 978-617-574-138-2
260. Жураковський Б.Ю. Технології інтернету речей / Б.Ю. Жураковський, І.О. Зенів. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 271 с.
261. A. De Benedictis Digital Twins for Anomaly Detection in the Industrial Internet of Things: Conceptual Architecture and Proof-of-Concept / A. De Benedictis; F. Flammini; N. Mazzocca; A. Somma, F. Vitale, // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2023, № 12. pp. 11553–11563. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/TII.2023.3246983>
262. Щеглов В.Р. Методи та технології розроблення цифрових двійників для гарантоздатних систем індустриального інтернету речей, / В. Р. Щеглов, О. І. Морозова // Системи управління, навігації та зв'язку. 2022. № 4, стр. 127–137.
263. Pankratova N. Digital Twins: Stages of Concept Development, Areas of Use, Prospects / N. Pankratova, K. Grishyn, V. Barilko // System Research & Information Technologies. – 2023, № 2. pp. 7–21. – Режим доступу: <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2023.2.01>
264. Згуровський М.З. Аналітичні методи калманівської фільтрації для систем з апіорною невизначеністю. / М.З. Згуровський, В.Н. Подладчиков. –К.: Наукова думка, 1995. – 298 с.
265. ДСТУ Б EN ISO 7730:2011. Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту. Київ: Мінрегіон України, 2012. 74 с. – Режим доступу: https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY_ALL/DSTY3/dsty_b_en_iso_7730-2011.pdf
266. Терещук М.О. Геометричне моделювання параметрів мікроклімату / М.О. Терещук, О.О. Голова, О.О. Лебедева та ін. // Прикладні питання математичного моделювання. – 2021, Том 4, № 2.1. С. 225 – 233. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32782/KNTU2618-0340/2021.4.2.1.24>
267. Determination of PMV and PPD and specification of the conditions for thermal comfort / Quadco Engineering. – Режим доступу: <https://www.quadco.engineering/en/know-how/cfd-calculate-pmv-and-ppd.htm>
268. Tartarini F. Tartarini CBE Thermal Comfort Tool: Online tool for thermal comfort calculations and visualizations / F. Tartarini, S. Schiavon, T. Cheung, T. Hoyt // SoftwareX. – 2020, vol. 12, 100563. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100563>

269. 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.
270. Швець В.Т. Вища математика: операційне числення. / В.Т. Швець. – Одеса: ВМВ, 2015. – 138 с.
271. Пшеничний, Б.М. Випуклий аналіз та екстремальні задачі [Текст] / Б.М. Пшеничний. – М.: Наука, 1980. – 320с.
272. Голінко І.М. Синтез оптимальних систем керування із мінімізацією керуючого впливу / І.М. Голінко // Комп’ютерні системи та інформаційні технології. – 2012. – № 2(54). – С. 79–88.
273. Сиротинський С.О. Налаштування систем керування за квадратичним критерієм якості / С.О. Сиротинський, І.М. Голінко // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: тези доповідей VIII міжнародної науково–практичної конференції, 19 –23 квітня 2010 р. – Київ, 2010. –С. 278.
274. 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.
275. Ладієва Л.Р. Оптимізація технологічних процесів / Л.Р. Ладієва. – Київ: ІВЦ Видавництво “Політехніка”, 2004. – 192с.
276. Жученко А.І. Базові алгоритми чисельного аналізу [Текст]: навч. посібник / А.І. Жученко, Н.А. Кубрак, І.М. Голінко. – Київ: НТУУ “КПІ”, 2006. – 236 с.
277. Кубрак А.І. Чисельний аналіз та програмування [Текст]: навч. посібник / А.І. Кубрак, І.М. Голінко, А.В. Ситніков. – Кам’янець-Подільський: Каліграф, 2008. – 256 с.
278. Голінко І.М. Аналіз гібридної системи керування за імпульсною характеристикою об’єкта / І.М. Голінко, Ю.М. Ковриго // Наукові вісті Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. – 2010, № 2. –С. 30–33.
279. Голінко І.М. Комп’ютерна оптимізація системи керування за інтегральними показниками якості / І.М. Голінко, А.І. Кубрак // Радіоелектронні і комп’ютерні системи. – 2011, № 2(50). –С. 55–59.
280. 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.
281. Голінко І.М. Синтез оптимальної системи керування із частковою компенсацією збурення / І.М. Голінко // Наукові праці Національного університету харчових технологій. –2013, № 48. –С. 23–28.
282. 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
283. 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.
284. 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.
285. 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.
286. Golinko I.M. Optimal Tuning of a Control System for a Second–Order Plant with Time Delay / I.M. Golinko // ISSN 0040–6015, Thermal Engineering, 2014, Vol. 61, No. 7, p. 524–532.
287. Ray W.H. Advanced Process Control / W.H. Ray. Butterworths, 1989. 376 p.
288. Isermann R. Digital Control Systems / R. Isermann. Springer, 1981. 557 p.
289. 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.
290. 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.
291. Голінко І.М. Динамічна оптимізація при управлінні тепловим процесом / І.М. Голінко // Нац. техн. ун–т України “Київ. політехн. ін.–т”. –Київ, 1996. –10с. –Деп. у ДНТД України 22.04.96, №1011–Ук. 96.
292. 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. –

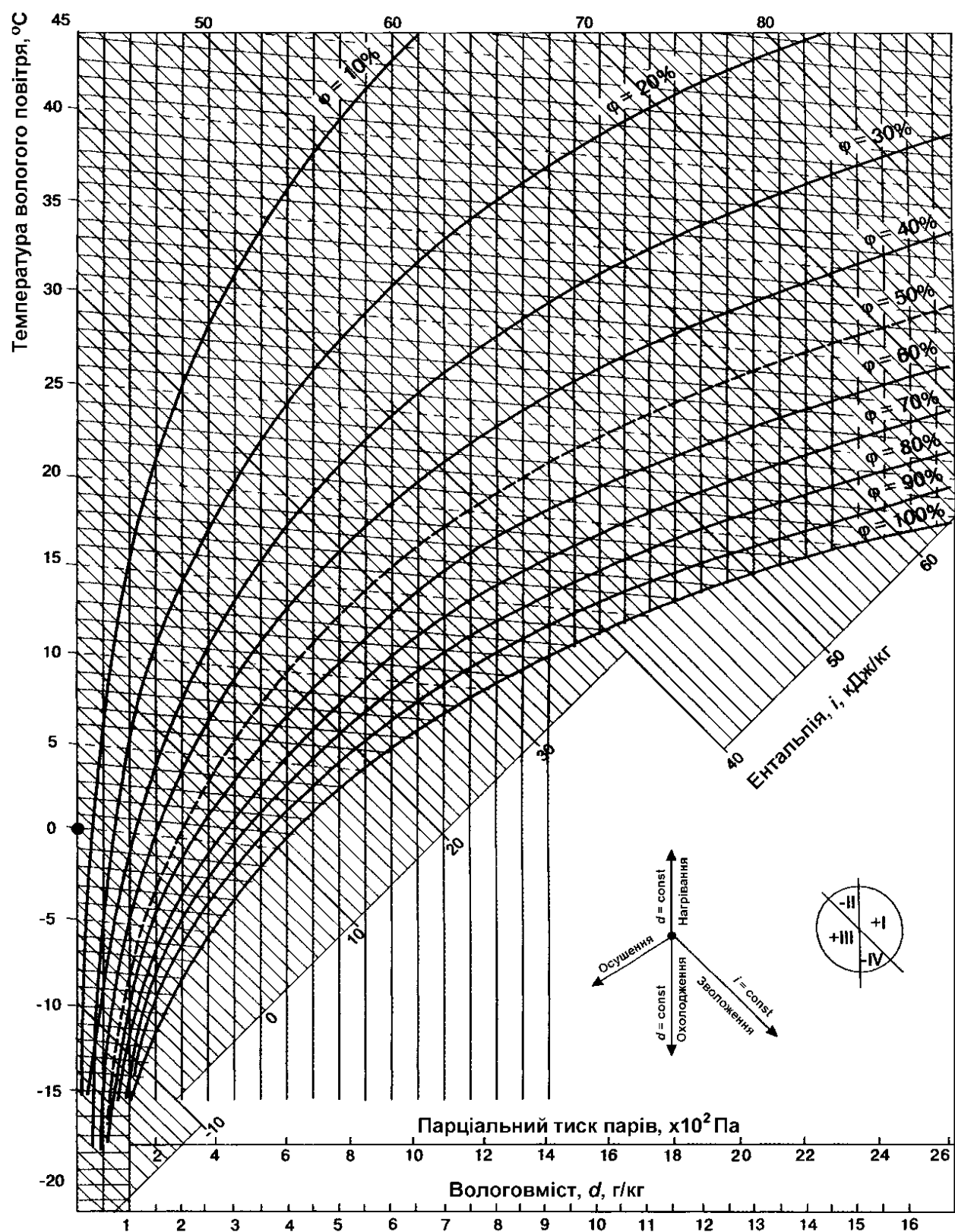
Режим доступу:

<https://pvntsh.nung.edu.ua/index.php/number/article/view/101/98>

293. 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. – Режим доступу: <https://doi.org/10.20535/0203-377128201439008>
294. Голінко І.М. Процедура синтезу багатовимірної регулятора для прецизійного кондиціонера із паровим зволожувачем / І.М. Голінко, І.Є. Галицька // *Механіка гіроскопічних систем*. – 2017. № 34, –С. 21–31.
295. Голінко І.М. Інженерний метод оптимізації ПІ-регулятора каналом збурення / І.М. Голінко, О.І. Кубрак, І.Є. Галицька // *Механіка гіроскопічних систем*. – 2013, № 26. –С. 21–31. – Режим доступу: <https://mgsys.kpi.ua/article/view/30960>
296. Голінко І.М. Методи розрахунку оптимальних налаштувань систем управління каналом збурення / І.М. Голінко, Г.Т. Кулаков, Ю.М. Ковриго // *Енергетика*. – 2014, № 5. –С. 61–72.
297. Романенко, В.Д. Адаптивне управління технологічними процесами з використанням мікроЕОМ / В.Д. Романенко, Б. В. Ігнатенко. –Київ: Вища школа, 1990. –334 с.
298. Golinko I. 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). pp. 74–77. – Режим доступу: <https://doi.org/10.35784/iapgos.240>
299. Голінко І.М. Синтез оптимального цифрового регулятора для стохастичного об'єкта керування / І.М. Голінко // *Інформаційні системи, механіка та керування*. – 2017. № 16, –С. 155–163. – Режим доступу: <https://doi.org/10.20535/2219-3804162017114587>
300. Oakland J. Statistical Process Control / J. Oakland and R. Oakland. – Routledge, 2019. – 430 p.
301. Greene W. Econometric Analysis / W.H. Greene. – Pearson, 2018. 1126 p.
302. Айзенберг Д.Є. Розробка комп'ютерних моделей технологічних систем / Д.Є. Айзенберг, В.М. Гемба, І.М. Голінко // *Енергозберігаючі технології та автоматизація*. – 2003, № 1 (37). –С. 42–44.
303. Jennings R. LabVIEW Graphical Programming / R. Jennings, F. De La Cueva. – McGraw Hill, 2019. – 640 pp.
304. Пат № 44799 Україна, Регулюючий мікропроцесорний контролер / Ковриго Ю.М., Коновалов М.А., Голінко І.М., Бунке С.А.; Заявник та

- власник Національний технічний університет України “КПІ”.
– № u200905450; заявл. 29.05.2009; опубл. 12.10.2009, Бюл. № 19. –8 с.
305. Пат. 54042 Україна, Універсальний мікропроцесорний контролер / Ковриго Ю.М., Коновалов М.А., Голінко І.М., Бунке О.С.; Заявник та власник Національний технічний університет України “КПІ”.
– № u201004874; заявл. 23.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20. –8 с.
306. Підвищення ефективності та надійності функціонування устаткування ТЕС та малої енергетики в змінних режимах експлуатації: звіт про НДР (заключний): (№ 2539–п) / Національний технічний університет України “КПІ”; кер. Кєсова Л.О. – Київ. 2013. –153с. № ДР 0112U001751
307. Розробка засобів із продовження надійної та економічної експлуатації енергогенеруючих об’єктів у маневрених режимах: звіт про НДР (заключний): (№ 2716–п) / Національний технічний університет України “КПІ”; кер. Черноусенко О.Ю. – Київ. 2015. –153с. № ДР 0114U000564
308. Управління енергоспоживанням об’єктів комунальної енергетики: звіт про НДР (заключний): (№ 2009–п) / Національний технічний університет України “КПІ”; кер. Дешко В.І. – Київ. 2018. № ДР 0117U000469
309. Побудова інформаційно-аналітичної платформи для супроводження функціонування кіберфізичних систем: звіт про НДР (заключний): (№ 2313-п) / Національний технічний університет України “КПІ”; кер. Панкратова Н.Д. – Київ. 2022. № ДР 0120U102298

Додаток А. Н – d діаграма для повітряної суміші із барометричним тиском 99 кПа



**Додаток Б. Розрахункові параметри для моделювання
кліматичного обладнання промислового кондиціонера**

Додаток Б.1. Розрахункові параметри для калорифера HE36/2

Таблиця Б.1. Параметри та теплофізичні величини електричного калорифера HE36/2 ПСЦК CV-P 2L N-63B/F-N виробництва фірми VTS CLIMA [198]

№ п.п.	Назва параметру	Позначення	Числове значення	Розмірність
1.	Габарити електрокалорифера	$H \times C \times L$	$0.38 \times 1 \times 0.4$	m
2.	Густина металу ТЕНів	ρ_E	7900	$кг/м^3$
3.	Теплоємність металу ТЕНів	c_E	460	$Дж/(кг \text{ } ^\circ C)$
4.	Маса металу ТЕНів	M_E	0.6	$кг$
5.	Витрата повітря через електрокалорифер	G_A	0.43	$кг/сек$
6.	Густина повітря	ρ_A	1.2	$кг/м^3$
7.	Теплоємність повітря	c_A	1010	$Дж/(кг \text{ } ^\circ C)$
8.	Маса повітря у калорифері	M_A	0.182	$кг$
9.	Площа теплообміну між ТЕНами та повітрям	F_0	0.306	$м^2$
10.	Коефіцієнт тепловіддачі між ТЕНами та повітрям	α_0	161	$Вт/(м^2 \text{ } ^\circ C)$
11.	Вхідна температура повітря	θ_{A0}	11	$^\circ C$
12.	Вихідна температура повітря	θ_A	15	$^\circ C$
13.	Вологовміст повітря на вході	d_{A0}	9	$г/кг$
14.	Вологовміст повітря на виході	d_A	9	$г/кг$
15.	Номінальна потужність калорифера	N_E	3300	$Вт$
16.	Максимальна потужність калорифера	N_{EMax}	36000	$Вт$

Розрахунок коефіцієнтів для (3.9) та (3.15) проводився у середовищі MatLAB [199, 200] із використанням програми coef_HE36.m :

```
H=0.38; C=1; L=0.4;
A0=161; F0=0.306; Ga=0.43; w=1.2;
Ma=0.182; ca=1010; Me=0.6; ce=460;
TetA0=11; TetA=15; dA0=9; dA=9;
Ke=A0*F0; Te=ce*Me/Ke; k0=1/Ke; k1=1;
Ka=ca*Ga+A0*F0; Ta=ca*Ma/Ka; k2=A0*F0/Ka; k3=1-k2;
k4=ca*(TetA0-TetA)/Ka; k=1-k1*k2;
Td=w*H*L*C/Ga; k5=1; k6=(dA0-dA)/Ga;
A=[-1/Ta, 0, k2/Ta, 0, -1/Td, 0; k1/Te, 0, -1/Te];
B=[k3/Ta, 0, k4/Ta, 0; 0, k5/Td, k6/Td, 0; 0, 0, 0, k0/Te];
a0=1; a1=(Te+Ta)/k; a2=Te-Ta/k;
b0=k3/k; b1=k3*Te/k; b2=k4/k; b3=k4*Te/k; b4=k0*k2/k;
```

Результати розрахунків:

>> A

A =				
-2.6306	0	0.2680		
0	-2.3575	0		
0.1785	0	-0.1785		

>> B

B =				
2.3626	0	-21.9780	0	
0	2.3575	0	0	
0	0	0	0.0036	

>> a0	>> a1	>> a2	>> Td	>> k5
a0 =	a1 =	a2 =	Td =	k5 =
1	6.6610	2.3712	0.4242	1

>> b0	>> b1	>> b2	>> b3	>> b4
b0 =	b1 =	b2 =	b3 =	b4 =
1	5.6022	-9.3023	-52.1139	0.0023

Додаток Б.2. Розрахункові параметри для калорифера CVР2-НW2

Таблиця Б.2. Параметри та теплофізичні величини водяного калорифера CVР2-НW2 ПСЦК CV-P 2L N-63B/F-N виробництва фірми VTS CLIMA [198]

№ п.п.	Назва параметру	Позначення	Числове значення	Розмірність
1	2	3	4	5
1.	Габарити водяного калорифера	$H \times C \times L$	$0.38 \times 1 \times 0.4$	m
2.	Витрата води	G_W	0.25	$кг/сек$
3.	Густина води	ρ_W	986	$кг/м^3$
4.	Теплоємність води	c_W	4185	$Дж/(кг \text{ } ^\circ C)$
5.	Площа внутрішньої поверхні теплообміну	F_0	0.84	$м^2$
6.	Коефіцієнт тепловіддачі для внутрішньої поверхні	α_0	1100	$Вт/(м^2 \text{ } ^\circ C)$
7.	Маса води у калорифері	M_W	1.58	$кг$
8.	Густина металу трубчатки (Al – 7%. Cu – 93%)	ρ_M	8500	$кг/м^3$
9.	Теплоємність металу (Al – 7%. Cu – 93%)	c_M	430	$Дж/(кг \text{ } ^\circ C)$
10.	Маса теплообмінної трубчатки	M_M	2.9	$кг$
11.	Площа зовнішньої поверхні теплообміну	F_1	6.4	$м^2$
12.	Коефіцієнт тепловіддачі для зовнішньої поверхні	α_1	180	$Вт/(м^2 \text{ } ^\circ C)$
13.	Витрата повітря через калорифер	G_A	0.43	$кг/сек$
14.	Густина повітря	ρ_A	1.2	$кг/м^3$
15.	Теплоємність повітря	c_A	1010	$Дж/(кг \text{ } ^\circ C)$
16.	Маса повітря у калорифері	M_A	0.18	$кг$
17.	Вхідна температура води	θ_{W0}	70	$^\circ C$
18.	Вихідна температура води	θ_W	50	$^\circ C$
19.	Вхідна температура повітря	θ_{A0}	14	$^\circ C$
20.	Вихідна температура повітря	θ_A	23	$^\circ C$
21.	Вологовміст повітря на вході	d_{A0}	9	$г/кг$
22.	Вологовміст повітря на виході	d_A	9	$г/кг$

Розрахунок коефіцієнтів для (3.24) та (3.31) проводився у середовищі MatLAB із використанням програми coef_CVP2HW2.m:

```
A0=1100; F0=0.84; cw=4185; Gw=0.25; Mw=1.58; TetW0=70; TetW=50;
A1=180; F1=6.4; cm=430; Mm=2.9;
ca=1010; Ga=0.43; Ma=0.18; TetA0=14; TetA=23; dA0=9; dA=9;
Kw=cw*Gw+A0*F0; Tw=cw*Mw/Kw; k0=cw*Gw/Kw; k1=1-k0; k2=cw*(TetW0-
TetW)/Kw;
Km=A0*F0+A1*F1; Tm=cm*Mm/Km; k3=A0*F0/Km; k4=1-k3;
Ka=ca*Ga+A1*F1; Ta=ca*Ma/Ka; k5=ca*Ga/Ka; k6=1-k5; k7=ca*(TetA0-
TetA)/Ka;
k=1-k1*k3-k4*k6;
Td=Ma/Ga; k8=1; k9=(dA0-dA)/Ga;
A=[-1/Ta,0,k6/Ta,0;0,-1/Td,0,0;k4/Tm,0,-1/Tm,k3/Tm;0,0,k1/Tw,-
1/Tw];
B=[k5/Ta,0,k7/Ta,0;0,k8/Td,k9/Td,0;0,0,0,0;0,0,0,k0/Tw,k2/
Tw];
a0=1; a1=(Tw+Tm+Ta-k1*k3*Ta-k4*k6*Tw)/k;
a2=(Tw*Tm+Tw*Ta+Tm*Ta)/k; a3=Tw*Tm*Ta/k;
b0=k5*(1-k1*k3)/k; b1=k5*(Tw+Tm)/k; b2=k5*Tw*Tm/k; b3=k7*(1-
k1*k3)/k;
b4=k7*(Tw+Tm)/k; b5=k7*Tw*Tm/k; b6=k0*k3*k6/k; b7=k2*k3*k6/k;
```

Результати розрахунків:

>> A

A =				
-8.7255	0	6.3366	0	
0	-2.3889	0	0	
0.9238	0	-1.6648	0.7410	
0	0	0.1397	-0.2980	

>> B

B =					
2.3889	0	-50.0000	0	0	
0	2.3889	0	0	0	
0	0	0	0	0	
0	0	0	0.1582	12.6582	

>> a0	>> a1	>> a2	>> a3	
a0 =	a1 =	a2 =	a3 =	
1	6.9409	6.3598	0.5950	

>> b0	>> b1	>> b2	>> b3	>> b4
b0 =	b1 =	b2 =	b3 =	b4 =
0.5579	2.7900	1.4215	-11.6777	-58.3949

>> b5	>> b6	>> b7	>> Td	>> k8
b5 =	b6 =	b7 =	Td =	k8 =
-29.7514	0.4421	35.3651	0.4186	1

Додаток Б.3. Розрахункові параметри охолоджувача CVP2-CW4

Таблиця Б.3. Параметри та теплофізичні величини водяного охолоджувача CVP2-CW4 ПСЦК CV-P 2L N-63B/F-N виробництва фірми VTS CLIMA [198]

№ п.п.	Назва параметру	Позначення	Числове значення	Розмірність
1	2	3	4	5
1.	Габарити водяного охолоджувача	$H \times C \times L$	$0.38 \times 1 \times 0.4$	m
2.	Витрата води	G_W	0.25	kg/sec
3.	Густина води	ρ_W	986	kg/m^3
4.	Теплоємність води	c_W	4185	$J/(kg \text{ } ^\circ C)$
5.	Маса води у калорифері	M_W	3.16	kg
6.	Площа внутрішньої поверхні теплообміну	F_0	1.68	m^2
7.	Коефіцієнт тепловіддачі для внутрішньої поверхні	α_0	780	$W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$
8.	Густина металу трубчатки (Al – 7%. Cu – 93%)	ρ_M	8500	kg/m^3
9.	Теплоємність металу (Al – 7%. Cu – 93%)	c_M	430	$J/(kg \text{ } ^\circ C)$
10.	Маса теплообмінної трубчатки	M_M	5.8	kg
11.	Площа зовнішньої поверхні теплообміну	F_1	12.4	m^2
12.	Коефіцієнт тепловіддачі для зовнішньої поверхні	α_1	70	$W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$
13.	Витрата повітря через калорифер	G_A	0.43	kg/sec
14.	Густина повітря	ω	1.2	kg/m^3
15.	Теплоємність повітря	c_A	1010	$J/(kg \text{ } ^\circ C)$
16.	Питома теплота пароутворення	r	2256000	J/kg
17.	Коефіцієнт перетворення	A	0.58	$g/(^\circ C \text{ } kg)$
18.	Коефіцієнт перетворення	B	2.2	g/kg
19.	Маса повітря у калорифері	M_A	0.18	kg
20.	Об'єм повітряного простору охолоджувача	V_A	0.152	m^3
21.	Вхідна температура води	θ_{W0}	8	$^\circ C$
22.	Вихідна температура води	θ_W	15	$^\circ C$
23.	Температура трубчатки	θ_M	11	$^\circ C$
24.	Вхідна температура повітря	θ_{A0}	20	$^\circ C$

Продовження таблиці Б.3

1	2	3	4	5
25.	Вихідна температура повітря	θ_A	15	$^{\circ}\text{C}$
26.	Вологовміст повітря на вході	d_{A0}	11	г/кг
27.	Вологовміст повітря на виході	d_A	9	г/кг

Розрахунок коефіцієнтів для (3.38) та (3.45) проводився у середовищі MatLAB із використанням програми coef_CVP2CW4.m:

```
A0=780; F0=1.68; cw=4185; Gw=0.25; Mw=3.16; TetW0=8; TetW=15;
A1=70; F1=12.4; cm=430; Mm=5.8; TetM=11; ca=1010; Ga=0.43;
Ma=0.18; w=1.2; Va=0.152; TetA0=20; TetA=15; A=0.58; B=2.2;
r=2256000; da0=11; da=9; Kw=cw*Gw+A0*F0; Tw=cw*Mw/Kw;
k0=cw*Gw/Kw; k1=1-k0; k2=cw*(TetW0-TetW)/Kw; Km=A0*F0+A1*F1;
Tm=cm*Mm/Km; k3=A0*F0/Km; k4=1-k3; Ka=ca*Ga+A1*F1; Ta=ca*Ma/Ka;
k5=ca*Ga/Ka; k6=(1+r*A/(1000*ca))*A1*F1/Ka;
k7=(ca*(TetA0-TetA)+r*(da0-da)/1000)/Ka; k8=r*Ga/(1000*Ka);
k9=-r*(Ga+A1*F1/ca)/(1000*Ka); Kd=Ga+A1*F1/ca; Td=w*Va/Kd;
k10=Ga/Kd; k11=(da0-da)/Kd; k12=A1*F1*A/(ca*Kd);
k=1-k1*k3-k4*k6-k4*k9*k12;
A=[-1/Ta, k9/Ta, k6/Ta, 0, 0, -1/Td, k12/Td, 0, 0, k4/Tm, 0, -
1/Tm, k3/Tm, 0, 0, k1/Tw, -1/Tw];
B=[k5/Ta, k8/Ta, k7/Ta, 0, 0, 0, k10/Td, k11/Td, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, k0/
Tw, k2/Tw];
a0=1; a1=(Tm+(1-k1*k3)*Ta+(1-k4*k6-k4*k9*k12)*Tw+(1-k1*k3-
k4*k6)*Td)/k;
a2=(Tm*Ta+Tw*Ta+Tw*Tm+Tm*Td+(1-k1*k3)*Ta*Td+(1-k4*k6)*Tw*Td)/k;
a3=(Tm*Ta*Td+Tw*Ta*Td+Tw*Tm*Td+Tm*Tw*Ta)/k; a4=Tw*Tm*Ta*Td/k;
b0=k5*(1-k1*k3)/k; b1=k5*(Tw+Tm+(1-k1*k3)*Td)/k;
b2=k5*(Tm*Td+Tw*Td+Tw*Tm)/k; b3=k5*Tw*Tm*Td/k;
b4=(1-k1*k3)*(k8+k9*k10)/k;
b5=(k8*(Tm+Tw+(1-k1*k3)*Td)+k9*k10*(Tm+Tw))/k;
b6=(k8*(Tm*Td+Tw*Td+Tw*Tm)+k9*k10*Tw*Tm)/k; b7=k8*Tw*Tm*Td/k;
b8=(1-k1*k3)*(k7+k9*k11)/k;
b9=(k7*(Tm+Tw+(1-k1*k3)*Td)+k9*k11*(Tm+Tw))/k;
b10=(k7*(Tm*Td+Tw*Td+Tw*Tm)+k9*k11*Tw*Tm)/k; b11=k7*Tw*Tm*Td/k;
b12=k0*k3*(k6+k9*k12)/k; b13=k0*k3*k6*Td/k;
b14=k2*k3*(k6+k9*k12)/k; b15=k2*k3*k6*Td/k;
c0=k4*k5*k12/k; c1=k4*k5*k12*Tw/k;
c2=(k10*(1-k1*k3-k4*k6)+k4*k8*k12)/k;
c3=(k10*(Tm+(1-k1*k3)*Ta+(1-k4*k6)*Tw)+k4*k8*k12*Tw)/k;
c4=k10*(Tm*Ta+Tw*Ta+Tw*Tm)/k; c5=k10*Tw*Tm*Ta/k;
c6=(k11*(1-k1*k3-k4*k6)+k4*k7*k12)/k;
c7=(k11*(Tm+(1-k1*k3)*Ta+(1-k4*k6)*Tw)+k4*k7*k12*Tw)/k;
c8=k11*(Tm*Ta+Tw*Ta+Tw*Tm)/k; c9=k11*Tw*Tm*Ta/k;
c10=k0*k3*k12/k; c11=k0*k3*k12*Ta/k;
c12=k2*k3*k12/k; c13=k2*k3*k12*Ta/k;
```

Результати розрахунків:

>> A

A =				
-7.1634	-16.0005	10.9599		0
0	-7.0691	2.7328		0
0.3480	0	-0.8735	0.5254	
0	0	0.0991	-0.1782	

>> B

B =				
2.3889	5.3360	52.5963	0	0
0	2.3575	10.9649	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0.0791	-2.2152

>> a0	>> a1	>> a2	>> a3	>> a4
a0 =	a1 =	a2 =	a3 =	a4 =
1	13.4195	19.6349	4.8485	0.3172

>> b0	>> b1	>> b2	>> b3	>> b4
b0 =	b1 =	b2 =	b3 =	b4 =
0.5549	5.7124	6.1541	0.7578	3.6949e-16

>> b5	>> b6	>> b7	>> b8	>> b9
b5 =	b6 =	b7 =	b8 =	b9 =
0.1753	1.7802	1.6927	6.4528	67.2384

>> b10	>> b11	>> b12	>> b13	>> b14
b10 =	b11 =	b12 =	b13 =	b14 =
79.8390	16.6850	0.4451	0.1445	-12.462

>> b15				
b15 =				
-4.0467				

>> c0	>> c1	>> c2	>> c3	>> c4
c0 =	c1 =	c2 =	c3 =	c4 =
0.1284	0.7208	0.3335	4.4686	6.1436

>> c5	>> c6	>> c7	>> c8	>> c9
c5 =	c6 =	c7 =	c8 =	c9 =
0.7478	3.0446	29.1653	28.5749	3.4784

>> c10	>> c11	>> c12	>> c13	
c10 =	c11 =	c12 =	c13 =	
0.2581	0.0360	-7.2278	-1.0090	

Додаток Б.4. Розрахункові параметри для форсуночного зволожувача промислового кондиціонера КЦКП-80

Таблиця Б.4. Параметри та теплофізичні величини для форсуночного зволожувача промислового кондиціонера КЦКП-80 [213]

№ п.п.	Назва параметру	Позначення	Числове значення	Розмірність
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
1.	Габарити камери зволоження	$H \times C \times L$	$2.6 \times 3.2 \times 2$	<i>м</i>
2.	Коефіцієнт адіабатної ефективності	E	0.85	
3.	Витрата повітря через калорифер	G_A	25	<i>кг/сек</i>
4.	Густина повітря	ω	1.2	<i>кг/м³</i>
5.	Теплоємність повітря	c_A	1010	<i>Дж/(кг °С)</i>
6.	Вхідна температура повітря	θ_{A0}	19	<i>°С</i>
7.	Вихідна температура повітря	θ_A	9.8	<i>°С</i>
8.	Вологовміст на вході зволожувача	d_{A0}	3.8	<i>г/кг</i>
9.	Вологовміст на виході зволожувача	d_A	7.5	<i>г/кг</i>
10.	Питома теплота пароутворення	r	2256000	<i>Дж/кг</i>
11.	Коефіцієнт перетворення	A	0.58	<i>г/(°С кг)</i>
12.	Коефіцієнт перетворення	B	2.2	<i>г/кг</i>
13.	Маса повітря у зволожувачі	M_A	19.2	<i>кг</i>
14.	Об'єм повітряного простору охолоджувача	V_A	16	<i>м³</i>
15.	Коефіцієнт перетворення	A	0.58	<i>г/(°С кг)</i>
16.	Коефіцієнт перетворення	B	2.2	<i>г/кг</i>
17.	Витрата води	G_W	37	<i>кг/сек</i>
18.	Витрата води	G_{W0}	1.1	<i>кг/сек</i>
19.	Густина води	ρ_W	986	<i>кг/м³</i>
20.	Теплоємність води	c_W	4185	<i>Дж/(кг °С)</i>
21.	Маса води у калорифері	M_W	1200	<i>кг</i>
22.	Вхідна температура води	θ_{W0}	6	<i>°С</i>
23.	Вихідна температура води	θ_W	9	<i>°С</i>

Розрахунок коефіцієнтів для (3.56) та (3.62) проводився у середовищі MatLAB із використанням програми coef_KCKP80.m:

```
Ga=25; ca=1010; cw=4185; Ma=19.2;
TetA0=19; TetA=9.8; r=2256000; da0=3.8; da=7.5; E=0.85;
A=0.58; B=2.2; w=1.2; Va=16; Gw0=1.1; Gw=37; Mw=1200; TetW0=6;
TetW=9;
Ka=Ga*ca+Gw*cw/E; Ta=ca*Ma/Ka; k0=(Ga*ca-(1-1/E)*Gw*cw)/Ka;
k1=(ca*(TetA0-TetA)+r*(da0-da)/1000)/Ka; k2=cw*Gw/Ka;
k3=r*Ga/(1000*Ka);
k4=-k3; Td=w*Va/Ga; k5=((1-1/E)*A*TetA0+A*TetA/E+B-da)/Ga;
k6=A*(1-1/E); k7=A/E; Kw=Gw0+Gw; Tw=Mw/Kw; k8=Gw0/Kw; k9=(TetW0-
TetW)/Kw;
k10=(1-1/E)*Gw/Kw; k11=Gw/(E*Kw); k=1-k2*k11-k4*k7;
A=[-1/Ta, k4/Ta, k2/Ta; k7/Td, -1/Td, 0; k11/Tw, 0, -1/Tw];
B=[k0/Ta, k3/Ta, k1/Ta, 0, 0; k6/Td, 0, k5/Td, 0, 0; k10/Tw, 0, 0, k8/Tw, k9/Tw];
a0=1; a1=(Ta+(1-k4*k7)*Tw+(1-k2*k11)*Td)/k;
a2=(Ta*Td+Tw*Ta+Tw*Td)/k;
a3=Ta*Td*Tw/k; b0=(k0+k2*k10+k4*k6)/k;
b1=((k0+k2*k10)*Td+(k0+k4*k6)*Tw)/k;
b2=k0*Td*Tw/k; b3=k3/k; b4=k3*(Tw+Td)/k; b5=k3*Td*Tw/k;
b6=(k1+k4*k5)/k;
b7=((k1+k4*k5)*Tw+k1*Td)/k; b8=k1*Td*Tw/k; b9=k2*k8/k;
b10=k2*k8*Td/k;
b11=k2*k9/k; b12=k2*k9*Td/k;
c0=(k6*(1-k2*k11)+k7*(k0+k2*k10))/k; c1=(k6*Ta+(k6+k0*k7)*Tw)/k;
c2=k6*Ta*Tw/k; c3=k3*k7/k; c4=k3*k7*Tw/k; c5=(k1*k7+k5*(k1-
k2*k4))/k;
c6=(k5*Ta+(k5+k1*k7)*Tw)/k; c7=k6*Ta*Tw/k; c8=k2*k7*k8/k;
c9=k2*k7*k9/k;
```

Результати розрахунків представлено нижче:

>> A

A =			
-10.6962	-2.9084	7.9850	
0.8885	-1.3021	0	
0.0363	0	-0.0318	

>> B

B =					
2.7112	2.9084	0.0487	0	0	
-0.1333	0	-0.0290	0	0	
-0.0054	0	0	0.0009	-0.0025	

>> a0	>> a1	>> a2	>> a3
a0 =	a1 =	a2 =	a3 =
1	112.8772	81.7888	6.7987

>> b0	>> b1	>> b2	>> b3	>> b4
b0 =	b1 =	b2 =	b3 =	b4 =
0.4611	26.9260	18.4327	0.8175	26.3746

>> b5 b5 = 19.7735	>> b6 b6 = 0.0319	>> b7 b7 = 1.0161	>> b8 b8 = 0.3312	>> b9 b9 = 0.0648

>> b10 b10 = 0.0498	>> b11 b11 = -0.1767	>> b12 b12 = -0.1357		

>> c0 c0 = 0.2123	>> c1 c1 = 6.6567	>> c2 c2 = -0.9061	>> c3 c3 = 0.5578	>> c4 c4 = 17.5684

>> c5 c5 = -0.0046	>> c6 c6 = -1.8241	>> c7 c7 = -0.9061	>> c8 c8 = 0.0442	>> c9 c9 = -0.1206

Додаток Б.5. Розрахункові параметри камери зволоження із паровим зволожувачем humiSteam UE005

Таблиця Б.5. Параметри та теплофізичні величини камери зволоження із паровим зволожувачем humiSteam UE005 [218]

№ п.п.	Назва параметру	Позначення	Числове значення	Розмірність
1	2	3	4	5
1.	Габарити камери зволоження	$H \times C \times L$	$0.38 \times 1 \times 0.7$	m
2.	Витрата повітря через калорифер	G_A	0.43	$кг/сек$
3.	Номінальна потужність парогенератора	N_E	3700	$Вт$
4.	Густина вологого повітря	ρ_A	1.2	$кг/м^3$
5.	Густина повітря	ω	1.2	$кг/м^3$
6.	Теплоємність повітря	c_A	1010	$Дж/(кг \text{ } ^\circ C)$
7.	Питома теплота пароутворення	r	2256000	$Дж/кг$
8.	Теплоємність води	c_W	4185	$Дж/(кг \text{ } ^\circ C)$
9.	Вхідна температура повітря	θ_{A0}	20	$^\circ C$
10.	Вихідна температура повітря	θ_A	20	$^\circ C$
11.	Вхідна температура води для парогенератора	θ_{W0}	20	$^\circ C$
12.	Вхідний вологовміст повітря	d_{A0}	2	$г/кг$
13.	Вихідний вологовміст повітря	d_A	6	$г/кг$

Розрахунок коефіцієнтів для (3.69) та (3.74) проводився у середовищі MatLAB із використанням програми coef_UE005.m:

```
H=0.38; C=1; L=0.7; Va=H*L*C;
pa=1.2; p_a=1.2; Ga=0.43; ca=1010; cw=4182; r=2256000;
TetA0=20; TetA=20; TetW0=20; da0=3; da=5.2;
Ta=pa*Va/Ga; Td=p_a*Va/Ga;
k0=1; k1=(TetA0-TetA+r*(da0-da)/(1000*ca*Ga))/Ga;
k2=r/(ca*Ga*(r-cw*TetW0)); k3=r/(1000*ca); k4=-k3; k5=1;
k6=(da0-da)/Ga; k7=1000/(Ga*(r-cw*TetW0));
A=[-1/Ta, k4/Ta; 0, -1/Td];
B=[k0/Ta, k3/Ta, k1/Ta, k2/Ta; 0, k5/Td, k6/Td, k7/Td];
a0=1; a1=Ta+Td; a2=Ta*Td; b0=1; b1=k0*Td; b2=k3+k4*k5; b3=k3*Td;
b4=k1+k4*k6; b5=k1*Td; b6=k2+k4*k7; b7=k2*Td;
```

Результати розрахунків параметрів моделі:

>> A

A =	
-1.3471	-3.0090
0	-1.3471

>> B

B =				
1.3471	3.0090	-35.8021	0.0032	
0	1.3471	-6.8922	0.0014	

>> a0	>> a1	>> a2	>> Td	>> b0
a0 =	a1 =	a2 =	Td =	b0 =
1	1.4847	0.5510	0.7423	1

>> b1	>> b2	>> b3	>> b4	>> b5
b1 =	b2 =	b3 =	b4 =	b5 =
0.7423	0	1.6581	-27.5433	-35.8703

>> b6	>> b7	>> k5	>> k6	>> k7
b6 =	b7 =	k5 =	k6 =	k7 =
-4.34e-19	0.0018	1	-5.1163	0.0011

Додаток Б.6. Розрахункові параметри для приміщення

Таблиця Б.6. Параметри та теплофізичні величини промислового приміщення площею 120 м^2

№ п.п.	Назва параметру	Позначення	Числове значення	Розмірність
1.	Габарити приміщення	$H \times C \times L$	$3 \times 10 \times 12$	м
2.	Густина повітря	ρ_A	1.2	кг/м^3
3.	Об'єм повітряного простору у приміщенні	V_A	360	м^3
4.	Витрата повітря у приміщенні	G_A	0.43	кг/сек
5.	Теплоємність повітря	c_A	1010	$\text{Дж}/(\text{кг } ^\circ\text{C})$
6.	Маса повітря у калорифері	M_A	430	кг
7.	Площа теплообміну внутрішньої поверхні стіни	F_0	132	м^2
8.	Коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні стіни	α_0	8.7	$\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$
9.	Густина цегляної стінки	ρ_S	1750	кг/м^3
10.	Теплоємність цегляної стінки	c_S	920	$\text{Дж}/(\text{кг } ^\circ\text{C})$
11.	Маса цегляної стінки	M_S	95760	кг
12.	Площа теплообміну зовнішньої поверхні стіни	F_1	141.6	м^2
13.	Коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні стіни	α_1	23	$\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$
14.	Вхідна температура повітря	θ_{A0}	19.7	$^\circ\text{C}$
15.	Вихідна температура повітря	θ_A	20	$^\circ\text{C}$
16.	Вхідний вологовміст повітря	d_{A0}	9.2	г/кг
17.	Вихідний вологовміст повітря	d_A	9	г/кг

Розрахунок коефіцієнтів для (3.78). (3.82) та (3.83) проводився у середовищі MatLAB із використанням програми coef_ROOM.m:

```
Va=360; w=1.2; Ga=0.43; ca=1010; Ma=430; A0=8.7; F0=132;
A1=23; F1=141.6; cs=920; Ms=95760; TetA0=19.7; TetA=20;
da0=9.2; da=9; Ka=ca*Ga+A0*F0; Ks=A0*F0+A1*F1;
Ta=ca*Ma/Ka; Ts=cs*Ms/Ks; Td=w*Va/Ga;
k0=ca*Ga/Ka; k1=(TetA0-TetA)/Ka; k2=A0*F0/Ka; k3=1/Ka;
k4=A0*F0/Ks; k5=1-k4; k6=1; k7=(da0-da)/Ga; k=1-k2*k4;
A=[-1/Ta,0,k2/Ta;0,-1/Td,0;k4/Ts,0,-1/Ts];
B=[k0/Ta,0,k1/Ta,k3/Ta,0;0,k6/Td,k7/Td,0,0;0,0,0,0,k5/Ts];
a0=1; a1=(Ta+Ts)/k; a2=Ta*Ts/k; b0=k0/k; b1=k0*Ts/k;
b2=k1/k; b3=k1*Ts/k; b4=k3/k; b5=k3*Ts; b6=k2*k5/k;
```

Результати розрахунків представлено нижче:

>> A

A =		
-0.0036	0	0.0026
0	-0.0010	0
0.0000	0	-0.0001

>> B

B =				
1.0000	0	-0.0007	0.0023	0
0	0.9954	0.4630	0	0
0	0	0	0	0.0370

>> a0	>> a1	>> a2		
a0 =	a1 =	a2 =		
1	2.5003e+04	6.7680e+06		

>> b0	>> b1	>> b2	>> b3	>> b4
b0 =	b1 =	b2 =	b3 =	b4 =
0.3384	6.7680e+03	-2.3377e-4	-4.6751	7.7923e-04

>> b5	>> b6	>> Td	>> k6	>> k7
b0 =	b1 =	Td =	k6 =	k7 =
12.6359	0.6616	1.0047e+03	1	0.4651

Додаток В. Адаптація АСК для кондиціонера CV-P 2L N-63B/F-N

Додаток В.1. Адаптація ЦР АСК для літнього режиму роботи кондиціонера

Визначимо передатні функції каналів регулювання та збурення АСК W_1 , W_5 , W_6 , W_7 , W_8 та W_{11} за залежностями п.5.2.5 та результатами аналітичного моделювання обладнання кондиціонера CV-P 2L N-63B/F-N із розділу 3. використовуючи програму `coef_cvp.m`:

```
B1=[2.3]; A1=[4.77 12.33 1];  
B25o=[-1.009 -7.23]; A25o=[0.317 4.85 19.63 13.42 1];  
B22z=[1]; A22z=[0.74 1];  
B5=conv(B25o,B22z); A5=conv(A25o,A22z);  
B11k1=[1.4215 2.7900 0.5579]; A11k1=[0.5950 6.3598 6.9409 1];  
B11o=[0.7578 6.1541 5.7124 0.5549]; A11o=[0.317 4.85 19.63 13.42 1];  
B11k=[11.2745 1]; A11k=[4.77 12.3 1];  
B=conv(B11k1,B11o); A=conv(A11k1,A11o);  
B6=conv(B,B11k); A6=conv(A,A11k);  
B22o=[0.7478 6.1436 4.4686 0.3335]; A22o=[0.317 4.85 19.63 13.42 1];  
B22z=[1]; A22z=[0.74 1];  
B7=conv(B22o,B22z); A7=conv(A22o,A22z);  
B11k1=[1.4215 2.7900 0.5579]; A11k1=[0.5950 6.3598 6.9409 1];  
B21o=[0.7208 1]; A21o=[0.317 4.85 19.63 13.42 1];  
B22z=[1]; A22z=[0.74 1];  
B=conv(B11k1,B21o); A=conv(A11k1,A21o);  
B8=conv(B,B22z); A8=conv(A,A22z);  
B15o=[-4.05 -12.46];  
A15o=[0.317 4.85 19.63 13.42 1];  
B11k=[11.27 1]; A11k=[4.77 12.3 1];  
B11=conv(B15o,B11k); A11=conv(A15o,A11k);
```

За результатами розрахунків отримано передатні функції:

$$W_1 = W_{14}^{K2} = \frac{2.3}{4.77p^2 + 12.33p + 1};$$

$$W_5 = W_{25}^O W_{22}^3 = \frac{-p - 7.23}{0.235p^5 + 3.91p^4 + 19.38p^3 + 29.56p^2 + 14.16p + 1};$$

$$W_6 = W_{11}^{K1} W_{11}^O W_{11}^{K2} = \frac{0.31}{1789.5p^3 + 374.3p^2 + 32.7p + 1};$$

$$W_7 = W_{22}^O W_{22}^3 = \frac{0.748p^3 + 6.14p^2 + 4.47p + 0.33}{0.23p^5 + 3.91p^4 + 19.38p^3 + 29.56p^2 + 14.16p + 1};$$

$$W_8 = W_{11}^{K1} W_{21}^O W_{22}^3 = \frac{1.02p^3 + 3.43p^2 + 3.19p + 0.56}{0.14p^8 + 3.8p^7 + 38p^6 + 168.16p^5 + 334.82p^4 + 315.2p^3 + 134.2p^2 + 21.1p + 1};$$

$$W_{11} = W_{15}^O W_{11}^{K2} = \frac{-45.64p^3 - 144.47p^2 - 12.46}{1.5p^6 + 27.03p^5 + 153.6p^4 + 310.31p^3 + 189.47p^2 + 25.72p + 1}.$$

Отримані передатні функції використано у АСК кондиціонера CV-P 2L N-63B/F-N рис. 5.27 та рис. 5.28 для імітаційного моделювання перехідних процесів. За каналами регулювання W_1 , W_5 ОК отримано перехідні процеси, криві зображено на рис. Г.1.

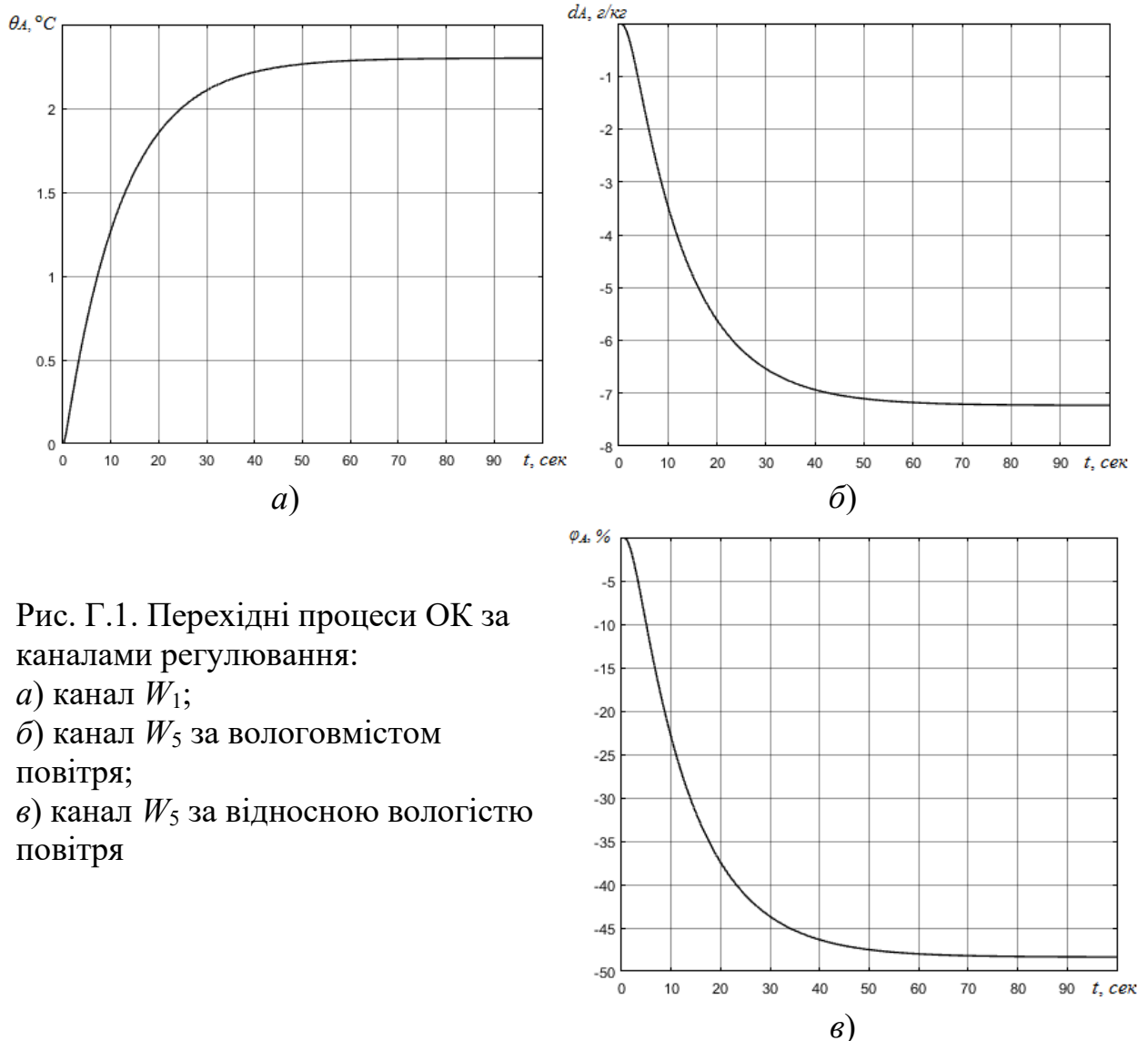


Рис. Г.1. Перехідні процеси ОК за каналами регулювання:
 а) канал W_1 ;
 б) канал W_5 за вологовмістом повітря;
 в) канал W_5 за відотною вологістю повітря

Часові характеристики ОК використано в якості вхідної інформації для параметричного синтезу ЦР Р1 та Р2. Налаштування регуляторів Р1 та Р2 оптимізувалися за критерієм (5.16) із параметрами $Nvr=1$, $q=1$. Використовуючи програмний пакет DemOptNd [122], чисельно розраховано налаштування ЦР Р1 та Р2 для АСК ПКШМ при регулюванні вологовмісту повітря: $K_{R1} = -0.515 \text{ кг}^2/(\text{сек} \cdot \text{г})$, $T_{I1} = 13.9 \text{ сек}$, $T_{KV1} = 1 \text{ сек}$; $K_{R2} = 3.84 \text{ кВт/}^{\circ}\text{C}$, $T_{I2} = 11.5 \text{ сек}$, $T_{KV2} = 1 \text{ сек}$. Аналогічно, чисельно розраховано налаштування ЦР Р1 та Р2 для АСК ПКШМ при регулюванні відносної вологості повітря: $K_{R1} = -0.085 \text{ кг}/(\text{сек} \cdot \%)$, $T_{I1} = 13.9 \text{ сек}$, $T_{KV1} = 1 \text{ сек}$; $K_{R2} = 3.84 \text{ кВт/}^{\circ}\text{C}$, $T_{I2} = 11.5 \text{ сек}$, $T_{KV2} = 1 \text{ сек}$.

Додаток В.2. Адаптація багатовимірнього цифрового регулятора

Використовуючи програму `coef_CVP2L.m` у середовищі MatLAB визначено числові значення матриць для моделей (5.33), (5.30), (5.24) та параметри матриці зворотного зв'язку K_d (5.26) для ЛКЦР (5.25). Нижче представлено лістинг програми `coef_CVP2L.m`.

```
%-----
% Параметри водяного калорифера CVP2-HW2
%-----
A0=1100; F0=0.84; cw=4185; Gw=0.25; Mw=1.58; TetW0=70; TetW=50;
A1=180; F1=6.4; cm=430; Mm=2.9;
ca=1010; Ga=0.43; Ma=0.18; TetA0=-10; TetA=20;
Kw=cw*Gw+A0*F0; Tw=cw*Mw/Kw; k0=cw*Gw/Kw; k1=1-k0;
k2=cw*(TetW0-TetW)/Kw;
Km=A0*F0+A1*F1; Tm=cm*Mm/Km; k3=A0*F0/Km; k4=1-k3;
Ka=ca*Ga+A1*F1; Ta=ca*Ma/Ka; k5=ca*Ga/Ka; k6=1-k5;
k7=ca*(TetA0-TetA)/Ka;
Ak1=[-1/Ta,0,k6/Ta,0;0,-1,0,0;k4/Tm,0,-1/Tm,k3/Tm;0,0,k1/Tw,-1/Tw];
Bk1=[k5/Ta,0,k7/Ta,0;0,1,0,0;0,0,0,0;0,0,0,k0/Tw,k2/Tw];
B1k1=[0;0;0;k0/Tw]; B2k1=[k5/Ta,0;0,1;0,0;0,0];
%-----
% Параметри водяного охолоджувача CVP2-CW4
%-----
A0=20; F0=1.68; cw=4185; Gw=0; Mw=3.16; TetW0=20; TetW=20;
A1=70; F1=12.4; cm=430; Mm=5.8; TetM=11;
ca=1010; Ga=0.43; Ma=0.18; w=1.2; Va=0.152; TetA0=20; TetA=20;
A=0; r=2256000; da0=1.5; da=1.5;
Kw=cw*Gw+A0*F0; Tw=cw*Mw/Kw; k0=cw*Gw/Kw; k1=1-k0;
k2=cw*(TetW0-TetW)/Kw;
Km=A0*F0+A1*F1; Tm=cm*Mm/Km; k3=A0*F0/Km; k4=1-k3;
Ka=ca*Ga+A1*F1; Ta=ca*Ma/Ka; k5=ca*Ga/Ka;
k6=(1+r*A/(1000*ca))*A1*F1/Ka;
k7=(ca*(TetA0-TetA)+r*(da0-da)/1000)/Ka; k8=r*Ga/(1000*Ka);
k9=-r*Ga/(1000*Ka); Kd=Ga; Td=w*Va/Kd; k10=Ga/Kd;
k11=(da0-da)/Kd; k12=A1*F1*A/(ca*Kd);
Ao=[-1/Ta,k9/Ta,k6/Ta,0;0,-1/Td,k12/Td,0;k4/Tm,0,-1/Tm,k3/Tm;0,0,k1/Tw,-1/Tw];
Bo=[k5/Ta,k8/Ta,k7/Ta,0;0,0,k10/Td,k11/Td,0;0,0,0,0;0,0,0,k0/Tw,k2/Tw];
B1o=[0;0;0;k2/Tw]; B2o=[k5/Ta,k8/Ta;0,k10/Td;0,0;0,0];
%-----
% Параметри електричного калорифера HE36/2
%-----
A0=80; F0=0.306; Ga=0.43;
Ma=0.182; ca=1010; TetA0=20; TetA=20; Me=0.6; ce=460;
Ke=A0*F0; Te=ce*Me/Ke; k0=1000/Ke;
k1=1; Ka=ca*Ga+A0*F0; Ta=ca*Ma/Ka; k2=A0*F0/Ka; k3=1-k2;
k4=ca*(TetA0-TetA)/Ka; k=1-k1*k2;
Ak2=[-1/Ta,0,k2/Ta;0,-1,0;k1/Te,0,-1/Te];
Bk2=[k3/Ta,0,k4/Ta,0;0,1,0,0;0,0,0,k0/Te];
B1k2=[0;0;k0/Te]; B2k2=[k3/Ta,0;0,1;0,0];
%-----
% Параметри парозволожувача UE005
%-----
H=0.38; C=1; L=0.7; Va=H*L*C;
pa=1.2; p_a=1.2; Ga=0.43; ca=1010; cw=4182; r=2256000;
TetA0=18; TetA=20; TetW0=20; da0=1.5; da=5.5;
Ta=pa*Va/Ga; Td=p_a*Va/Ga;
k0=1; k1=(TetA0-TetA+r*(da0-da)/(1000*ca*Ga))/Ga;
k2=1000*r/(ca*Ga*(r-cw*TetW0)); k3=r/(1000*ca); k4=-k3; k5=1;
k6=(da0-da)/Ga; k7=1000000/(Ga*(r-cw*TetW0));
Apz=[-1/Ta,k4/Ta;0,-1/Td];
```



```
>> A
```

```
A =
```

```
Columns 1 through 7
```

```
-8.7255    0    6.3366    0    0    0    0
    0   -1.0000    0    0    0    0    0
    0.9238    0   -1.6648    0.7410    0    0    0
    0    0    0.1397   -0.2980    0    0    0
    2.3889    5.3360    0    0   -7.1634   -5.3360    4.7745
    0    2.3575    0    0    0   -2.3575    0
    0    0    0    0    0.3480    0   -0.3615
    0    0    0    0    0    0    0.0025
    0    0    0    0    2.3626    0    0
    0    0    0    0    0    1.0000    0
    0    0    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0    0    0
```

```
Columns 8 through 13
```

```
    0    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0    0
    0.0135    0    0    0    0    0
   -0.0025    0    0    0    0    0
    0   -2.4958    0    0.1332    0    0
    0    0   -1.0000    0    0    0
    0    0.0887    0   -0.0887    0    0
    0    1.3471    3.0090    0   -1.3471   -3.0090
    0    0    1.3471    0    0   -1.3471
```

```
>> B
```

```
B =
```

```
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0.1582    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    0
    0    0    0    3.2525
    0    0    0    1.4561
```

Далі, розраховані розширені матриці $\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$ та $\begin{bmatrix} \mathbf{B}_I \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$ для неперервної моделі (5.30).

>> Ar

Ar =

Columns 1 through 7

-8.7255	0	6.3366	0	0	0	0
0	-1.0000	0	0	0	0	0
0.9238	0	-1.6648	0.7410	0	0	0
0	0	0.1397	-0.2980	0	0	0
2.3889	5.3360	0	0	-7.1634	-5.3360	4.7745
0	2.3575	0	0	0	-2.3575	0
0	0	0	0	0.3480	0	-0.3615
0	0	0	0	0	0	0.0025
0	0	0	0	2.3626	0	0
0	0	0	0	0	1.0000	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

Columns 8 through 14

0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0.0135	0	0	0	0	0	0
-0.0025	0	0	0	0	0	0
0	-2.4958	0	0.1332	0	0	0
0	0	-1.0000	0	0	0	0
0	0.0887	0	-0.0887	0	0	0
0	1.3471	3.0090	0	-1.3471	-3.0090	0
0	0	1.3471	0	0	-1.3471	0
0	0	0	0	1.0000	0	0
0	0	0	0	0	1.0000	0

Column 15

0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0


```
>> Br
```

```
Br =
```

0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0.1582	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	3.2525
0	0	0	1.4561
0	0	0	0
0	0	0	0

Використовуючи функції MatLAB $ss(a, b, c, d)$ та $c2d(sys, Ts)$, за розширеною моделлю (5.30) розраховано параметри матриць A_d , B_d для дискретної моделі (5.24) із періодом дискретизації $T_{kv}=1$

```
>> Ad
```

```
Ad =
```

```
Columns 1 through 7
```

0.0364	0	0.3103	0.2629	0	0	0
0	0.3679	0	0	0	0	0
0.0452	0	0.3879	0.3860	0	0	0
0.0072	0	0.0728	0.7721	0	0	0
0.0242	-0.0199	0.1385	0.0848	0.0292	-0.1574	0.5786
0	0.4745	0	0	0	0.0947	0
0.0153	0.0484	0.0388	0.0119	0.0422	-0.0853	0.8535
0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0001	-0.0001	0.0023
0.0342	0.0859	0.1261	0.0487	0.0644	-0.2197	0.4980
0	0.2893	0	0	0	0.2013	0
0.0033	0.0114	0.0062	0.0014	0.0107	-0.0167	0.0259
0.0297	0.2958	0.0654	0.0164	0.0858	0.0136	0.2652
0	0.1309	0	0	0	0.1461	0
0.0165	0.1312	0.0238	0.0041	0.0634	0.0376	0.1041
0	0.0443	0	0	0	0.0743	0

```
Columns 8 through 14
```

0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0.0071	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0.0123	0	0	0	0	0	0
0.9975	0	0	0	0	0	0
0.0041	0.0837	0	0.0462	0	0	0
0	0	0.3679	0	0	0	0
0.0001	0.0307	0	0.9179	0	0	0
0.0014	0.2088	0.3417	0.0273	0.2600	-0.7823	0
0	0	0.4187	0	0	0.2600	0
0.0004	0.2133	0.4406	0.0124	0.5493	-0.6463	1.0000
0	0	0.3213	0	0	0.5493	0

```

Column 15
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1.0000

```

```
>> Bd
```

```

Bd =
    0.0224         0         0         0
         0         0         0         0
    0.0375         0         0         0
    0.1386         0         0         0
    0.0060         0         0         0
         0         0         0         0
    0.0006         0         0         0
    0.0000         0         0         0
    0.0026         0         0         0
         0         0         0         0
    0.0001         0         0         0
    0.0007         0         0    0.8456
         0         0         0    0.7999
    0.0001         0         0    0.6986
         0         0         0    0.4871

```

Визначено ранги матриць керованості та спостережуваності для розширеної цифрової моделі ОК (5.24):

```

>> rank(ctrb(Ad,Bd))
ans =
    15

```

```

>> rank(observ(Ad,Cr))
ans =
    15

```

Результати розрахунків підтверджують, що система (5.24) керована та спостережувана.

Використовуючи функцію MatLAB `dlqr(A,B,Q,R,N)`, для дискретної моделі (5.24) визначено матрицю зворотного зв'язку $\mathbf{K_d}$ (5.26) на основі розв'язку рівнянь Рікатті $\mathbf{P}$ (5.27):

>> Kd

Kd =

Columns 1 through 7

0.6555	0.1972	3.0312	5.4251	1.2210	-2.7126	12.7552
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
-0.0069	0.1688	-0.0388	-0.0209	-0.0074	0.2286	-0.2107

Columns 8 through 14

0.7996	1.8477	-0.0323	1.3578	3.3301	-7.5680	4.4743
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0.0005	0.0145	0.5808	-0.0174	0.0460	0.4159	0.0574

Column 15

-0.2898
0
0
0.5049

>> P

P =

Columns 1 through 7

1.0634	0.0435	0.2299	0.1124	0.1450	-0.3181	1.3797
0.0435	1.7720	0.1271	0.0463	0.1136	-0.0862	0.6889
0.2299	0.1271	1.9285	0.4960	0.4812	-1.0684	4.7126
0.1124	0.0463	0.4960	1.4765	0.2169	-0.4834	2.1939
0.1450	0.1136	0.4812	0.2169	1.3533	-0.7667	3.2868
-0.3181	-0.0862	-1.0684	-0.4834	-0.7667	2.7499	-7.3040
1.3797	0.6889	4.7126	2.1939	3.2868	-7.3040	35.7093
0.0720	-0.0023	0.2557	0.1270	0.1663	-0.3780	3.7743
0.2397	0.2450	0.7731	0.3382	0.5972	-1.2641	4.9040
-0.0079	0.1316	-0.0231	-0.0081	-0.0198	0.1306	-0.1089
0.1511	0.0893	0.5076	0.2340	0.3644	-0.7977	3.5623
0.4309	0.4262	1.3831	0.6066	1.0808	-2.2665	8.7944
-1.0009	-1.1095	-3.1964	-1.3903	-2.5142	5.2531	-20.1354
0.5766	0.5322	1.8491	0.8130	1.4508	-3.0355	11.7887
-0.0844	-0.2587	-0.2245	-0.0755	-0.2374	0.4234	-1.0526

Columns 8 through 14

0.0720	0.2397	-0.0079	0.1511	0.4309	-1.0009	0.5766
-0.0023	0.2450	0.1316	0.0893	0.4262	-1.1095	0.5322
0.2557	0.7731	-0.0231	0.5076	1.3831	-3.1964	1.8491
0.1270	0.3382	-0.0081	0.2340	0.6066	-1.3903	0.8130
0.1663	0.5972	-0.0198	0.3644	1.0808	-2.5142	1.4508
-0.3780	-1.2641	0.1306	-0.7977	-2.2665	5.2531	-3.0355
3.7743	4.9040	-0.1089	3.5623	8.7944	-20.1354	11.7887
212.3161	-0.0527	-0.0000	-0.0572	-0.0943	0.2103	-0.1272
-0.0527	2.1153	-0.0406	0.5877	2.0459	-4.7882	2.7656
-0.0000	-0.0406	1.1934	-0.0101	-0.0466	0.2493	0.0035
-0.0572	0.5877	-0.0101	6.5697	0.7106	-1.6335	0.9521
-0.0943	2.0459	-0.0466	0.7106	4.8477	-8.8821	5.2959
0.2103	-4.7882	0.2493	-1.6335	-8.8821	22.1559	-11.9347
-0.1272	2.7656	0.0035	0.9521	5.2959	-11.9347	8.4899
-0.0004	-0.5912	0.1360	-0.1001	-1.1274	3.2571	-1.5071

```

Column 15
-0.0844
-0.2587
-0.2245
-0.0755
-0.2374
 0.4234
-1.0526
-0.0004
-0.5912
 0.1360
-0.1001
-1.1274
 3.2571
-1.5071
 2.8455

```

Для синтезу ЛКЦР використовувався квадратичний критерій якості (5.17) із ваговими матрицями **Q**, **R**.

```
>> Q
```

```
Q =
```

```
Columns 1 through 13
```

```

 1   0   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   1   0   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   1   0   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   1   0   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   1   0   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   1   0   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   1
 0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
 0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0

```

```
Columns 14 through 15
```

```

 0   0
 0   0
 0   0
 0   0
 0   0
 0   0
 0   0
 0   0
 0   0
 0   0
 0   0
 0   0
 0   0
 0   0
 0   0
 1   0
 0   1

```

>> R

R =

0.0001	0	0	0
0	0.0001	0	0
0	0	0.0001	0
0	0	0	0.0001

Додаток Г. Функціональна схема керування для промислового кондиціонера AERMEC NCT 22

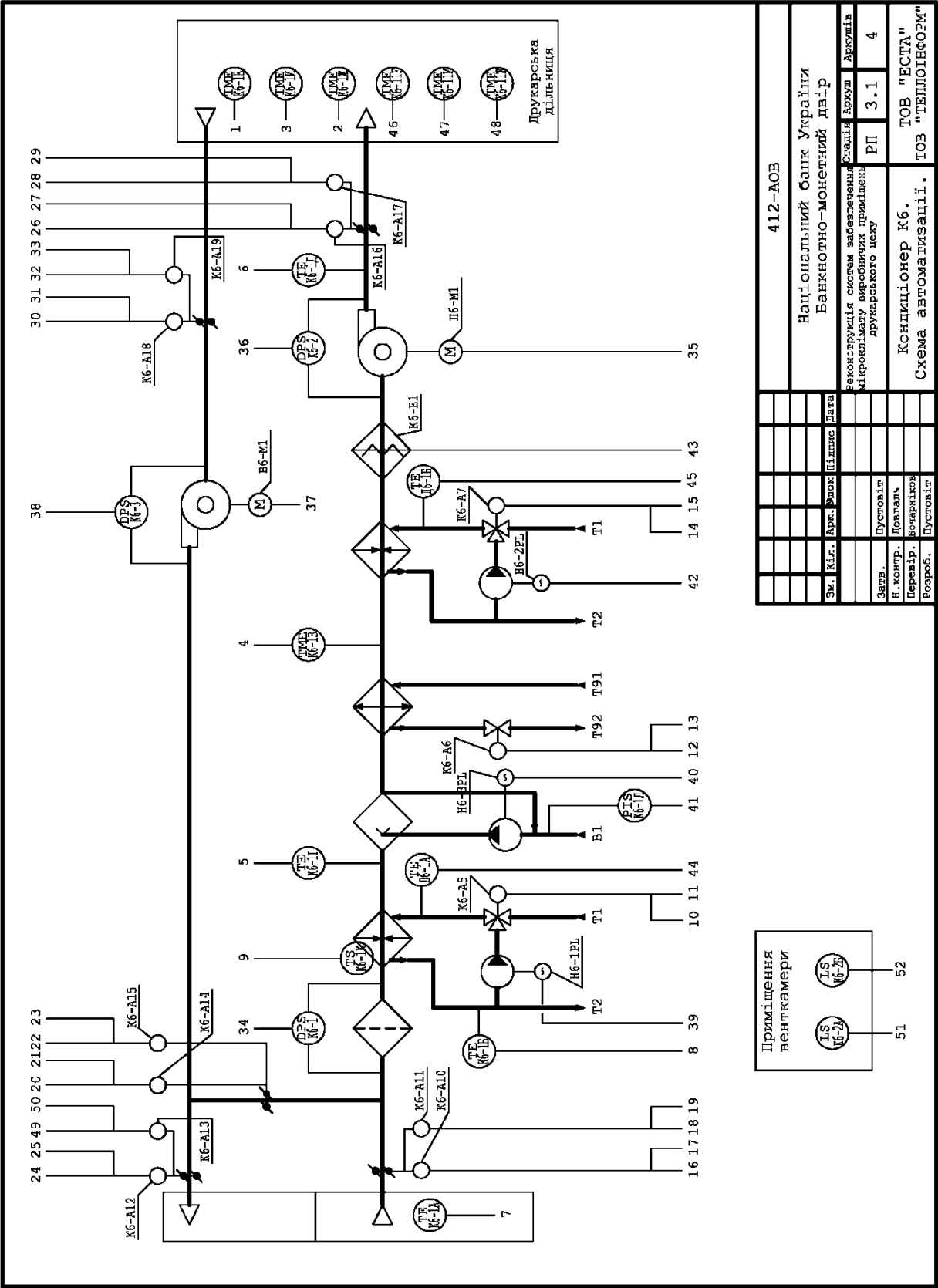


Рис. Ж.1. Схема керування кондиціонером AERMEC NCT 22 друкарського цеху БМД НБУ (початок)

Додаток Д. Акти впровадження

Результати дисертаційної роботи використані та впроваджені у:

- друкарському цеху Банкотно-монетного двору Національного банку України при розробці системи керування для промислового кондиціонера AERMEC NCT 22;
- цеху ремонту електрообладнання та технічного устаткування (ЦРЕтаТУ) Банкотно-монетного двору Національного банку України для засвоєння інженерно-технічними працівниками навичок функціонування промислових кондиціонерів за допомогою учбово-тренажерного комплексу системи штучного мікроклімату;
- науково-виробничому підприємстві “ІКМ” при розробці алгоритмічного забезпечення ПЛК “КонтрАС-500”;
- ТОВ “Інженерний центр “Ковчег” при розробці системи керування інженерним обладнанням будівлі,

що підтверджується відповідними актами, відгуками та довідками про впровадження.

«Затверджую»

Генеральний директор
ТОВ «ТЕПЛОІНФОРМ»



Єрохіна О.Н.

29 2025 р.

«Затверджую»

Головний інженер
Банкотно-монетного двору
Національного банку України



Талімонов Ю.В.

29 2025 р.

Акт

випробування алгоритму керування промисловим кондиціонером К6
друкарського цеху Банкотно-монетного двору Національного банку України
за результатами дисертації Голінка І.М.

Ми, що нижче підписалися

від «Замовника»:

головний енергетик Банкотно-монетного двору Національного банку України
Головатий В.Я.;

від «Виконавця»:

генеральний директор ТОВ «ТЕПЛОІНФОРМ» Єрохіна О.Н.;
керівник групи обслуговування Нікрашевич В.В.;
налагоджувальник КВПіА Івженко В.Н.

склали цей акт про наступне.

Проведено чергове випробування системи керування промисловим кондиціонером AERMES NTC 22, що використовується для підтримки мікроклімату виробничих приміщень друкарського цеху Банкотно-монетного двору Національного банку України (м. Київ, в ул. Пухівська, 7). За проектом "Система забезпечення мікроклімату виробничих приміщень друкарського цеху. Кондиціонер К6" реалізована на промисловому контролері I-8837 фірми ICP DAS. Програмне забезпечення промислового контролера I-8837 реалізує алгоритм оптимального керування температурою та вологовмістом повітря друкарського цеху, який розроблений Голінко І.М.

На протязі терміну експлуатації з 2008 року, система керування кондиціонером К6 проходила періодичні експлуатаційні випробування, що обумовлено високими вимогами до штучного мікроклімату приміщення друкарського цеху. Під час випробувань продуктивність промислового кондиціонера становила $50 \times 10^3 \dots 110 \times 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$. При цьому, система керування забезпечує стабілізацію температури $20 \pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ та вологості $52,5 \pm 2 \text{ \%}$ у виробничих приміщеннях друкарського цеху незалежно від пори року та температурних збурень друкарського обладнання.

Стабілізація параметрів мікроклімату друкарського цеху із заданою похибкою регулювання покращила умови протікання технологічних процесів, що звело до мінімуму браку на виробництві. На даний час система керування кондиціонером К6 знаходиться у промисловій експлуатації АСУ БМД НБУ. Розроблені Голінко І.М. методи оптимального налаштування системи керування, випробувані під час пусконаладжувальних та періодичних регламентних робіт кондиціонера К6.

Ухвалили рекомендувати розроблене алгоритмічне забезпечення для впровадження у промислові системи штучного мікроклімату.

Від «Замовника»

 Головатий В.Я.

Від «Виконавця»

 Нікрашевич В.В.

 Івженко В.Н.

«Затверджую»

Генеральний директор
ТОВ «ТЕПЛОІНФОРМ»



Єрохіна О.Н.
вересня 2025 р.

АКТ

про впровадження учбово-тренажерного
комплексу системи штучного мікроклімату

Комісія у складі:

голова комісії генеральний директор ТОВ «ТЕПЛОІНФОРМ» Єрохіна О.Н.;

члени комісії: керівник групи обслуговування Нікрашевич В.В.;

налагоджувальник КВПіА Івженко В.Н.

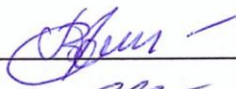
розглянула учбово-тренажерний комплекс (УТК) системи штучного мікроклімату (СШМ), який розроблено за результатами докторської дисертації Голінка І.М.. Тренажерний комплекс розроблено із використанням програмного пакету MASSM.

Комісія прийшла до висновку, що УТК СШМ у вигляді кіберфізичної системи адекватно відображає кількісні та якісні показники імітаційного моделювання процесу підготовки повітря на кліматичному обладнанні промислового кондиціонера. На УТК СШМ реалізовано модифікований метод керування промисловим кондиціонером за температурою “точки роси”. Тренажерний комплекс може проводити імітаційне моделювання процесу кондиціонування повітря у ручному та автоматичному режимах керування кондиціонером, що дозволяє вивчити:

- 1) роботу кліматичного обладнання кондиціонера;
- 2) процеси керування промисловим кондиціонером;
- 3) вплив параметрів налаштування регуляторів температури та вологості на динамічні властивості СШМ.

У рамках Договору № 20-81-180 від “10” червня 2020 року про технічне обслуговування енергетичного обладнання, ТОВ «ТЕПЛОІНФОРМ» передало УТК СШМ інженерно-технічним співробітникам ЦРЕтаТУ Банкотно-монетного двору Національного банку України для засвоєння практичних навичок функціонування промислових комплексів штучного мікроклімату. Комісія рекомендує широке використання УТК СШМ для вивчення процесів промислової підготовки повітря.

Члени комісії




Нікрашевич В.В.

Івженко В.Н.

“Затверджую”

Директор
науково-виробничого
підприємства “ІКМ”

Ляховецький О.В.

20 12 р.



Акт

впровадження в дію алгоритмічного
забезпечення контролера “КонтрАС-500”
за результатами докторської дисертації
Голінка Ігоря Михайловича

Комісія у складі:

голова комісії: директор НВП “ІКМ” Ляховецький О.В.;
члени комісії: головний інженер НВП “ІКМ” Дубровний А.В.;
провідний програміст НВП “ІКМ” Іванісов Л.Т.

Комісія розглянула роботу дослідно-промислової системи автоматичного керування, що реалізована за технічним завданням (Договір № 1 від 10 червня 2011 року) на програмно-логічному контролері (ПЛК) КонтрАС-500. Випробовування проводилися на промисловому об’єкті Замовника для керування інженерним обладнанням п’ятиповерхової будівлі (системи: опалення, гарячого водопостачання та вентиляції).

Основним алгоритмічним елементом розробленої системи керування є модифікація цифрового ПД-регулятора та алгоритм його оптимального налаштування, який запропонований доцентом Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” Голінко І.М.

Для всебічного дослідження роботи алгоритмічного забезпечення ПЛК КонтрАС-500, система керування інженерним обладнанням будівлі проходила випробування протягом поточного опалювального сезону. Під час випробовувань система керування забезпечила стабілізацію температури зворотного теплоносія за мережевим графіком із точністю $\pm 1,5$ °C (у нічний час та святкові дні температура мережевого графіку знижувалася, підтримуючи температуру у промислових приміщеннях на рівні 14 °C), подачу водорозбору гарячої води $55 \pm 1,2$ °C, подачу припливного повітря для приміщень будівлі в діапазоні 17...19 °C незалежно від зовнішніх температурних збурень. Відмічено, що перехідні процеси регульованих параметрів носять аперіодичний характер із мінімальною тривалістю. У порівнянні із опалювальним сезоном попереднього року теплоспоживання зменшилося на 47,2 Гкал., що складає 17,3 % теплоспоживання до модернізації.

Комісія прийшла до висновку, що розроблене алгоритмічне забезпечення є ефективним для керування інженерним обладнанням багатоповерхових будівель. За результатами випробовувань НВП “ІКМ” виготовило експериментальну серію ПЛК КонтрАС-500 у розмірі 10 одиниць для впровадження на об’єктах промислової та комунальної власності м. Києва.

Члени комісії:




/ Дубровний А.В. /

/ Іванісов Л.Т. /



Акт
впровадження в дію системи керування
інженерним обладнанням промислової будівлі

Комісія у складі:

голова комісії: директор ТОВ “Інженерний центр “КОВЧЕГ” Герасимчук В.В.;
члени комісії: головний інженер ТОВ “Інженерний центр “КОВЧЕГ” Басовський В.М.;
інженер КВПіА ТОВ “Інженерний центр “КОВЧЕГ” Мильштейн М.М.

Комісія розглянула роботу системи автоматичного керування інженерним обладнанням промислової будівлі, що реалізована за Договором № 10/07 від 17 травня 2012 року. Випробовування системи керування опаленням та гарячим водопостачанням промислової будівлі проводилися Замовником у присутності представників Виконавця. Система керування реалізована на програмно-комп'ютерному контролері (ПКК) S7386-50D ЛСІК “КОНІС Лаб”. Програмне забезпечення ПКК S7386-50D реалізує алгоритм оптимального керування системою опалення та гарячого водопостачання, який розроблений доцентом Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” Голінко І.М.

На протязі опалювального сезону 2012 – 2013 року система керування проходила експериментально-дослідні випробування за Договором № 10/07. ПКК S7386-50D забезпечив стабілізацію температури зворотного теплоносія за мережним графіком із точністю $\pm 1,4$ °C (у нічний час та святкові дні температура мережевого графіку знижувалася, підтримуючи температуру промислових приміщень 13 °C), подачу водорозбору гарячої води $60 \pm 1,3$ °C. Запропоновані Голінко І.М методи налаштування оптимальної системи керування випробувані під час пуско-налагоджувальних робіт. У порівнянні із опалювальним сезоном 2009 – 2010 року теплоспоживання зменшилося на 52,7 Гкал., що складає 15,7 % до модернізації. Економічний ефект від модернізації в середньому становить 35 тис. грн. на рік.

Комісія прийшла до висновку, що розроблене алгоритмічне забезпечення ПКК S7386-50D економічно доцільне та рекомендує його для використання в інженерних системах багатоповерхових будівель промислового та цивільного призначення.

Члени комісії:

 Басовський В.М.

 Мильштейн М.М.

Додаток Ж. Список публікацій здобувача 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. *(розділ колективної монографії, індексується SCOPUS)*
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. *(розділ колективної монографії, індексується SCOPUS)*

Статті у наукових фахових виданнях України

4. Голінко І.М. Динамічна модель теплового режиму калорифера / І.М. Голінко, А.П. Ладанюк, Л.Д. Кошелева // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. –2009, № 3(16). –С. 59–63. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
9. Голінко І.М. Синтез оптимальних систем керування із мінімізацією керуючого впливу / І.М. Голінко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. –2012. –№ 2(54). –С. 79–88. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*

11. Голинко И.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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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 *(фахове видання)*
15. Голінко І.М. Принципи синтезу автоматичних систем керування промисловими кондиціонерами / І.М. Голінко // *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. – 2016. № 8, –С. 33–42. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання)*
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. *(фахове видання категорії «А», індексується SCOPUS)*
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. *(фахове видання категорії «Б»)*

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. *(фахове видання категорії «Б»)*

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. *(закордонне видання, індексується SCOPUS)*
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. *(закордонне видання, індексується SCOPUS)*
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. *(закордонне видання, індексується SCOPUS)*
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 *(закордонне видання, індексується SCOPUS Q3)*
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. *(закордонне видання, індексується SCOPUS Q3)*
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. *(закордонне видання, індексується SCOPUS Q3)*

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. Настройка 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 (*індексується SCOPUS*)
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. (*індексується SCOPUS*)
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. (*індексується SCOPUS*)
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 (*індексується SCOPUS*)
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. (*індексується SCOPUS*)
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. (*індексується SCOPUS*)
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

Додаток 3. Відомості про апробацію 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” (ЦММІППІММ 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).