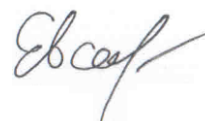


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ЄВСЕЄНКО ОЛЕГ МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 697.1:681.5](043.3)

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО КЕРУВАННЯ
РОЗПОДІЛЕНИМИ ТЕПЛОВИМИ ОБ'ЄКТАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ
СИСТЕМ З ПРОГНОЗУЮЧИМ ФІЛЬТРОМ**

Спеціальність 05.13.03 – системи та процеси керування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі автоматики та управління в технічних системах Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
Качанов Петро Олексійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри автоматики та управління в
технічних системах.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент
Мірошник Олександр Олександрович,
Харківський національний технічний
університет сільського господарства імені
Петра Василенка, завідувач кафедри
електропостачання та енергетичного
менеджменту;

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Суздаль Віктор Семенович,
Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН
України, м. Харків, завідувач лабораторії
систем управління.

Захист відбудеться «15» лютого 2018 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.14 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «11» січня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ліберг І. Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Будівлі є одними з найбільших споживачів енергії в усьому світі. Майже 40% від загального споживання енергії в США, 40% в ЄС і 40% в Україні припадає на експлуатацію житлових та комерційних будівель. Більше 66% поточної електроенергії споживають житлові, адміністративні й офісні будівлі.

Існуючі системи опалення житлових і офісних будівель працюють у неконтрольованому режимі. Датчики вимірювання температури встановлюються безпосередньо на нагрівальний елемент, а не в житлових приміщеннях, внаслідок чого нагрівальне обладнання протягом тривалого часу виробляє потужності більше, ніж необхідно, що призводить до перегрівання повітря, перевитрат теплового ресурсу і погіршення мікроклімату в приміщеннях.

Запропоновані рішення компаній з автоматизації технологічних процесів використовують терморегулятори, що працюють за двопозиційним або ПІД-законом керування. Робота в цих режимах не враховує властивостей об'єкта керування – розподіленості, лінійності, самовирівнювання, а також унікальності об'єкта керування.

Одним з факторів, що стримують реалізацію оптимального енергозберігаючого керування, є відсутність алгоритмів синтезу керуючих впливів у реальному масштабі часу для об'єктів з великою інерційністю та істотним транспортним запізненням, які могли б використовуватися простими та дешевими сучасними мікропроцесорними пристроями. Останнім часом набуло поширення керування тепловими об'єктами за допомогою нелінійного або робастного регулятора, керування з прогнозуванням, із застосуванням методів нечіткої логіки, штучних нейронних мереж, генетичних і еволюційних алгоритмів, адаптивних регуляторів.

Незважаючи на наявні різноманітні методи керування тепловими об'єктами, так і не вдалося створити еталонну єдину модель приміщення / будівлі з урахуванням усіх чинників, що впливають на тепловий об'єкт. Для побудови моделі і розробки контролера витрачаються значні кошти, ресурси і час. Немає впевненості, який серед розроблених методів буде оптимальним для конкретного будинку за витратами та зекономленими ресурсами. Важливо й те, що моделі з прогнозуванням побудовані без урахування кількості людей у приміщенні, розпорядку робочого дня, де також можна зекономити теплові ресурси.

Таким чином, актуальною науково-практичною задачею є розробка та вдосконалення методів енергозберігаючого керування тепловими об'єктами з розподіленими параметрами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувалися на кафедрі автоматики та управління в технічних системах НТУ «ХП» відповідно до завдань держбюджетної НДР МОН України «Розробка програмних та апаратних засобів моделювання та відображення динамічних об'єктів» (ДР №0113U000436), де здобувач був виконавцем

окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методів енергозберігаючого керування з прогнозуванням для теплових об'єктів з розподіленими параметрами для підвищення енергоефективності будівель зі збільшенням температурної комфортності приміщень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати розподілені теплові об'єкти і системи керування витратами теплової енергії на теплових об'єктах;

- розробити алгоритми з прогнозуванням для рішення задач керування тепловими об'єктами залежно від початкових умов, теплової інерції, часу перехідних процесів і запізнення;

- розробити комп'ютерні моделі розподілених теплових об'єктів для забезпечення дослідження теплових процесів у приміщеннях;

- провести порівняння отриманих результатів розроблених методів з відомими типовими методами керування тепловими об'єктами;

- здійснити натурні експерименти з керування температурним полем.

Об'єкт дослідження – процеси керування теплоефективними режимами адміністративних та офісних будівель.

Предмет дослідження – методи підвищення енергоефективності теплових об'єктів з розподіленими параметрами з використанням регуляторів з прогнозуванням.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використовувалися: перетворення Фур'є і Лапласа, методи теорії ймовірності та математичної статистики, теорема відліків, методи апроксимації поверхонь, метод найменших квадратів для визначення періоду дискретизації процесу керування тепловим об'єктом; теорія автоматичного керування для розробки методів керування розподіленими тепловими об'єктами з прогнозуванням; метод Лапласа для вирішення систем диференціальних рівнянь; системний аналіз для опису об'єкта дослідження та його складових. Теоретичні положення підтверджені результатами моделювання в середовищах MultiSIM_Blue, ANSYS, MatLab з використанням безкоштовних ліцензій.

В експериментальних дослідженнях застосовувалися розроблені здобувачем програмно-апаратний комплекс, алгоритм автоматичного керування на основі ШІМ-керування з прогнозуючим фільтром, вимірювальна апаратура для керування температурою на базі мікроконтролера AtMega 16 та датчиків температури DS18B20.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше розроблено алгоритм енергозберігаючого керування розподіленими тепловими об'єктами з прогнозуванням для керуючого впливу типу ШІМ-сигналу з підвищенням точності керування порівняно з існуючими системами з типовими регуляторами, що дозволило виконати вимоги, які висувуються до систем керування в різних режимах роботи;

- набув подальшого розвитку метод керування тепловими об'єктами з прогнозуючим фільтром для керуючого впливу у вигляді ступінчастої функції. Розроблено математичний апарат, що дозволяє перейти від керування

об'єктами із зосередженими параметрами до керування розподіленими тепловими об'єктами;

– вперше створено імітаційну модель приміщення із застосуванням регулятора температури, оснований на ШІМ-способі керування з прогнозуванням, для систем теплопостачання, що дозволило порівняти розроблений метод керування та поширені використовувані типові регулятори. Означена модель приміщення з регулятором є основою досліджень енергозберігаючих технологій;

– на основі натурних експериментів набула подальшого розвитку математична модель регулятора з прогнозуванням, яка дозволила експериментально встановити, що для зменшення помилки керування імпульс керуючого впливу необхідно виробляти на початку інтервалу програмного керування з урахуванням величини перерегулювання.

Практична значимість отриманих результатів для галузі теплопостачання:

– з метою побудови систем керування створено комп'ютерну модель приміщення, що дозволяє промодельовати і відпрацювати систему керування тепловим об'єктом у різних робочих режимах;

– розроблено апаратно-програмний комплекс для отримання перехідних характеристик теплових об'єктів, розрахунку коефіцієнтів теплових впливів та підтримання заданої температури в приміщенні;

– розроблено програми для мікропроцесорних пристроїв з алгоритмами керування тепловими об'єктами, наприклад, для сухожарової шафи та теплопостачання офісної будівлі. Застосування систем з розробленими алгоритмами керування зменшує час роботи опалювального обладнання до 56% з підвищенням точності керування від 2 до 5 разів порівняно з існуючими системами з типовими регуляторами;

– виконано експериментальні дослідження на фізичних об'єктах для підтвердження ефективності розроблених методів керування об'єктами з розподіленими параметрами;

– розроблено спосіб програмного управління з застосуванням широтно-імпульсної модуляції для керування тепловими об'єктами з розподіленими параметрами та використання в системах теплопостачання (патент України на корисну модель № 81276);

– отримані в дисертаційній роботі результати математичного і комп'ютерного моделювання впроваджені в систему керування у ТОВ «ВО ОВЕН» і активно використовуються в роботі організації. Крім того, отримані результати використовуються в навчальному процесі кафедри АУТС НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто, серед яких: методи енергозберігаючого керування тепловими об'єктами з розподіленими параметрами за допомогою регулятора з прогнозуванням з використанням управляючої дії у вигляді ШІМ-сигналу або ступінчастої функції; апаратно-програмний комплекс з використанням методу ШІМ-керування з прогнозуванням та здійснені за його

допомогою експериментальні дослідження; результати моделювання добового температурного режиму в приміщенні; програмне забезпечення для керування на мікроконтролері ATMEGA 16; udf файл для проведення моделювання в середовищі ANSYS; імітаційна модель приміщення.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на науково-практичних конференціях: «Погляд у майбутнє приладобудування» (Київ, 2012), «Актуальні проблеми автоматики та приладобудування» (Харків, 2012–2016), «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» (Чернівці, 2012, 2014), «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» MicroCAD (Харків, 2013–2017); університетських науково-практичних студентських конференціях магістрів (Харків, 2013, 2014); XIX міжнародній заочній науково-практичній конференції «Научная дискуссия: вопросы технических наук» (Москва, РФ, 2013); 5th International Youth Science Forum “Literus Et Artibus” (Львів, 2015); конференціях «Сучасні інформаційні та електронні технології» (Одеса, 2017) та «Сучасні інформаційні технології 2017» (Одеса, 2017).

Публікації. Основні наукові результати і висновки дисертаційного дослідження відображені у 28 публікаціях, серед них: 4 – у наукових фахових виданнях України (1 – у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus), 4 – у зарубіжних виданнях (1 – у виданні, що входить до міжнародних наукометричних баз), 1 – у патенті України на корисну модель, 19 – у матеріалах конференцій.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, змісту, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 170 сторінок, серед них 61 рисунок по тексту; 9 таблиць по тексту; список із 171 найменування використаних джерел на 16 сторінках, 6 додатків на 29 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження, його актуальність, сформульовано мету та задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, розкрито наукову новизну, практичне значення одержаних результатів, наведено дані про їхню апробацію та публікації автора.

У **першому розділі** проаналізовано сучасний стан методів синтезу систем керування розподіленими тепловими об'єктами. Для дослідження об'єктів і систем з розподіленими параметрами використано методи кінцевомірної апроксимації, теорії інтелектуальних систем керування (нейронні мережі, генетичні алгоритми, нечітка логіка), методи синтезу керування за допомогою робастних регуляторів, керування тепловими об'єктами з прогнозуванням.

Вирішенню питань ідентифікації, аналізу і синтезу систем керування тепловими об'єктами з розподіленими параметрами допомагають частотні методи та структурна теорія, що знаходять місце в методах параметричного синтезу регуляторів.

Встановлено, що існуючі регулятори температури з прогнозуванням

підтримують температуру в приміщенні в діапазоні від +19 °С до +22 °С з точністю ± 1 °С. Регулятори, основані на погодозалежному, ПД- та двопозиційному законах керування, скорочують витрати на енергоспоживання на 15%, а використання регуляторів з прогнозуванням зменшує енергоспоживання на 25–35%.

Обґрунтовано перспективність розробки енергозберігаючих методів керування розподіленими тепловими об'єктами з прогнозуванням. На основі здійсненого аналізу сформульовані мета та задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі розроблена та побудована комп'ютерна модель приміщення. На основі аналізу існуючих моделей приміщення запропонована найпоширеніша модель, яка містить: вхідний та вихідний вентиляційні отвори, віконний і дверний отвори, нагрівач.

Для побудови моделі приміщення здійснено виміри на реальному об'єкті (рис. 1, а) та у середовищі ANSYS створена повна тривимірна модель необхідної частини будівлі (рис. 1, б) з урахуванням зовнішніх обводів і точної внутрішньої геометрії приміщень, кімнат і перегородок.

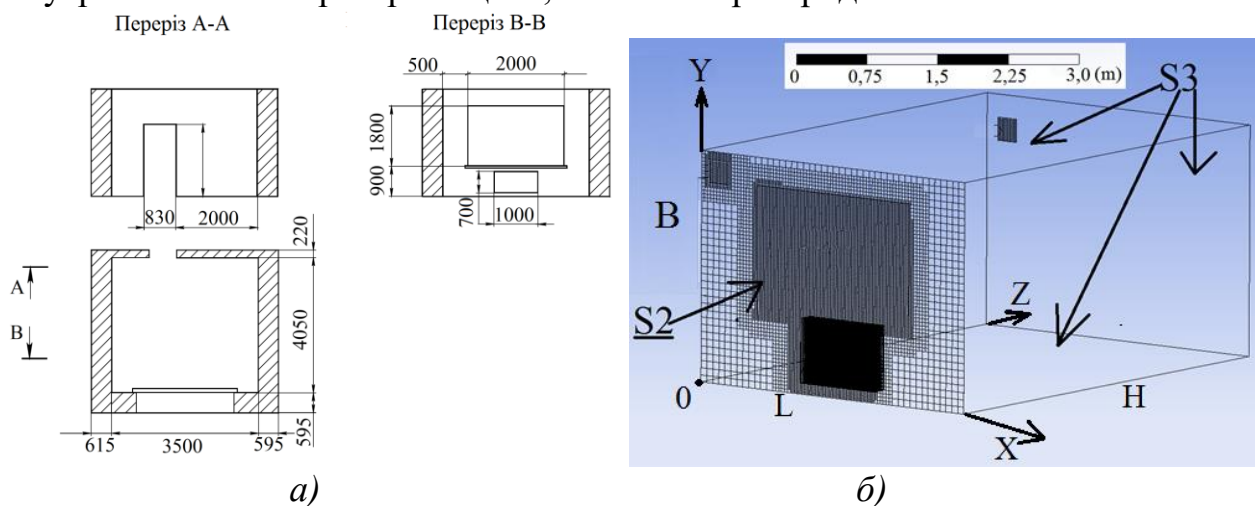


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд об'єкта керування:

а – виміри приміщення на реальному об'єкті, б – побудована модель приміщення

Загальне рівняння, яке описує тепловий об'єкт з розподіленими параметрами системою лінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних, є таким

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = L_i(T_i; \frac{\partial T_i}{\partial x}; \dots; \frac{\partial^n T_i}{\partial x^{n_1}}; \frac{\partial T_i}{\partial y}; \dots; \frac{\partial^{n_2} T_i}{\partial y^{n_2}}; \frac{\partial T_i}{\partial z}; \dots; \frac{\partial^{n_3} T_i}{\partial z^{n_3}}),$$

де $T_i(x, y, z, \tau)$ – фазові змінні, де $i = \overline{1, n}$; x, y, z – просторові координати; τ – час; n_1, n_2, n_3 – задані цілі числа; L_i – лінійні оператори.

Прийнято такі початкові та граничні умови:

1) визначено розподіл температури в усьому приміщенні в початковий момент часу t_0

$$T_i(x, y, z, t_0) = T_0 = const;$$

2) на зовнішніх граничних областях задано граничні умови 1-го типу, тобто розподіл температури як функція координат і часу

$$T_{S_i} = \varphi(x, y, z, t) = \text{const}; x, y, z, \in S_i;$$

3) на зовнішній граничній області S_2 задано граничні умови 3-го типу, тобто залежність щільності теплового потоку за допомогою теплопровідності тіла від температур поверхні тіла T_{S_2} і навколишнього середовища T_c

$$q_{S_2} = \alpha(T_{S_2} - T_c),$$

де α – коефіцієнт теплообміну (тепловіддачі), що характеризує інтенсивність теплової взаємодії навколишнього середовища заданої температури T_c з поверхнею тіла.

Щільність теплового потоку q , що підводиться за допомогою теплопровідності до області S_2 , визначається за законом Фур'є–Кірхгофа

$$q_{S_2} = -\lambda \left(\frac{\delta^2 T}{\delta n} \right)_{S_2},$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності;

4) на решті граничної області S_3 задані граничні умови 2-го типу, тобто розподіл щільності теплового потоку на області S_3 як функція координат і часу

$$q_{S_2} = \varphi(x, y, z, t) = 0; x, y, z \in S_3.$$

Таким чином, на області S_3 відсутній потік теплоти, що відповідає умові теплової ізоляції.

5) на поверхнях дотичних областей між шарами здійснюється ідеальний тепловий контакт (гранична умова 4-го типу), тобто дотримано умову рівності температур та щільностей теплового потоку q

$$T_i = T_j; q_i = q_j.$$

Для визначення динамічних характеристик об'єкта керування за перехідною характеристикою визначаються такі параметри: X_y , t_0 , t_u , K , t_{mn} , де: X_y – стале значення; t_0 – транспортне запізнення; t_u – постійна часу об'єкта; t_{mn} – час перехідних процесів; $K = X_y / Q$ – динамічний коефіцієнт посилення; Q – потужність джерела живлення. Відповідно до відношення t_0 / t_{mn} , рекомендується вибрати такі регулятори (рис. 2).

Визначено, що для об'єктів керування складної геометричної форми, які складаються з матеріалів з різними теплофізичними властивостями (об'єктів з розподіленими параметрами), формалізована математична форма запису неможлива. Внаслідок



Рисунок 2 – Вибір регулятора залежно від відношення часу транспортного запізнення до часу перехідних процесів

цього область досяжності визначається методами математичного або фізичного моделювання, у яких об'єкт з розподіленими параметрами ділиться на кінцеву кількість об'єктів із зосередженими параметрами, де для кожного кінцевого об'єкта будується область досяжності.

Третій розділ присвячений розробці енергозберігаючих методів керування тепловими об'єктами з розподіленими параметрами з використанням керуючого впливу типу ступінчастої функції і широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Для реалізації способів керування об'єктом спочатку необхідно визначити перехідні характеристики об'єкта керування (рис. 3). Далі за отриманими перехідними характеристиками вимірюється тривалість перехідних процесів об'єкта $t_{\text{шп}}$.

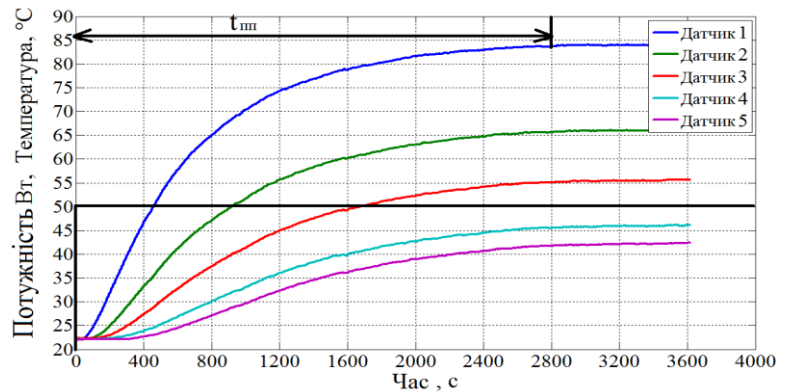


Рисунок 3 – Перехідні функції теплового об'єкта

Після цього необхідно вибрати період дискретизації τ і поділити час перехідних процесів імпульсу $t_{\text{шп}}$ на m рівних інтервалів τ .

Для ШІМ-керування необхідно зафіксувати реакції об'єкта керування на імпульси тривалістю $i \cdot \tau$, де $i \in [1; m]$ (рис. 4).

У точках t , де $t = 1\tau, 2\tau, \dots, m\tau$ вимірюються значення вихідного сигналу (температури) T_1, T_2, \dots, T_n і для ШІМ-керування за формулою (1), а для ступінчастої функції за формулою (2) обчислюються

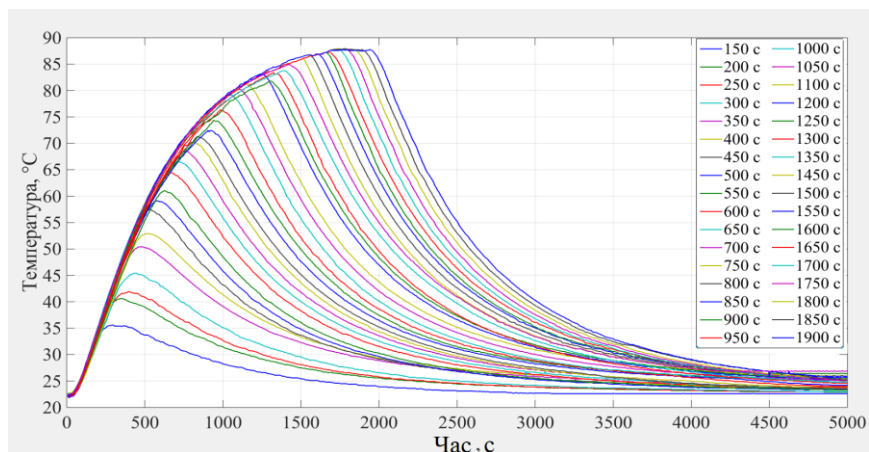


Рисунок 4 – Реакція теплового об'єкта на імпульси тривалістю $i \cdot \tau$

відповідні коефіцієнти передачі теплового впливу для керування тепловим полем у момент часу r :

$$\eta_{i,j,r} = \frac{\Delta T_i}{Q \cdot \tau_r} \Big|_{\tau_r = \tau \cdot r}, \quad (1)$$

$$K_{i,j,r} = \frac{T_i(t)}{Q} \Big|_{t = \tau \cdot r}, \quad (2)$$

де i – номер датчика температури ($1 < i < n$); j – номер нагрівача ($1 < j < p$); r – номер інтервалу часу ($1 < r < \infty$); ΔT_i – приріст температури в i -ій точці; Q –

потужність теплового потоку; τ_r – тривалість r -го імпульсу; $\eta_{i,j,r}$ – коефіцієнт передачі теплового впливу для ШІМ-керування; $K_{i,j,r}$ – коефіцієнт передачі теплового впливу для методу ступінчастої функції.

Після запуску системи програмного керування обчислюється прогнозована зміна температури об'єкта щодо початкової температури T_0 для кожної з n точок. Для визначення величини керуючого впливу, зокрема тривалості імпульсу, який за проміжок часу τ виведе об'єкт у точку, задану програмою, необхідно обчислити, у якій точці перебуватиме температура об'єкта до початку наступного інтервалу часу $t=\tau \cdot r$, за формулою (3) для ШІМ-керування або (4) для керування за допомогою ступінчастої функції:

$$\Delta T_{i,r}^p = \sum_{j=1}^p \sum_{r=k-m+1}^k Q \cdot \Delta \tau_{j,r} \cdot \eta_{i,j,r}, \quad (3)$$

$$\Delta T_{i,r}^p = \sum_{j=1}^p K_{i,j,m} \sum_{r=1}^{k-m} \Delta Q_{j,r} + \sum_{j=1}^p \sum_{r=k-m+1}^k \Delta Q_{j,r} \cdot K_{i,j,r}, \quad (4)$$

де $\Delta T_{i,r}^p$ – розрахункова прогнозована зміна температури об'єкта в i -ій точці в кінці r -го інтервалу часу під впливом сумарного теплового потоку від усіх нагрівачів, підведених до моменту часу $t=\tau \cdot r$; $Q \cdot \Delta \tau_{j,r}$, $\Delta Q_{j,r}$ – приріст теплового потоку до початку r -го інтервалу часу; $\sum_{j=1}^p K_{i,j,m} \sum_{r=1}^{k-m} \Delta Q_{j,r}$ – приріст температури датчика, зумовлений збільшенням теплових потоків усіх p нагрівачів, для яких час перехідних процесів минув і коефіцієнт $K_{i,j,r}$ не змінюється і дорівнює $K_{i,j,m}$; $\sum_{j=1}^p \sum_{r=k-m+1}^k \Delta Q_{j,r} \cdot \eta_{i,j,r}$, $\sum_{j=1}^p \sum_{r=k-m+1}^k \Delta Q_{j,r} \cdot K_{i,j,r}$ – приріст температури датчика, викликаний збільшенням теплових потоків від усіх p нагрівачів, для яких час перехідних процесів не минув; $K_{i,j,m}$ – коефіцієнт передачі теплового впливу для керування тепловим полем у момент часу r ; k, r – номери інтервалів часу.

Далі вектор розрахункової температури порівнюється з вектором температури, заданим програмно. Вектор різниці з відповідним знаком обчислюється за формулою:

$$\{\Delta_1\} = \{\Delta T_r^3\} - \{\Delta T_r^p\},$$

де $\{\Delta T_r^3\}$ – вектор збільшень заданих у програмі температур.

Різницевий код дорівнює:

$$\{\Delta_2\} = \{\Delta T_{r-1}^3\} - \{\Delta T_{r-1}^D\},$$

де $\{\Delta T_{r-1}^D\}$ – вектор виміряних температур.

Для того, щоб від початку $(r-1)$ інтервалу часу до його кінця температура в усіх n точках теплового поля стала рівною заданій програмно, необхідно підвести тепловий потік, який зумовить рівну за величиною помилки зміну температури в усіх відповідних точках.

Однак на кожному точку поля впливають усі p нагрівачів одночасно. Тому для i -ої точки простору ($1 < i < n$) ця зміна має відповідати рівнянню (5) для ШІМ-керування або (6) для керування за допомогою ступінчастої функції:

$$Q \cdot \tau_i \cdot \eta_{i,1,r} + Q \cdot \tau_i \cdot \eta_{i,2,r} + \dots + Q \cdot \tau_i \cdot \eta_{i,n,r} = -\Delta_i, \quad (5)$$

$$\Delta Q_1 \cdot K_{i,1,r} + \Delta Q_2 \cdot K_{i,2,r} + \dots + \Delta Q_n \cdot K_{i,n,r} = -\Delta_i. \quad (6)$$

Кількість таких рівнянь дорівнює n . Тому значення збільшень теплових потоків для кожного з p нагрівачів обчислюється за допомогою спільного рішення системи рівнянь (7) для ШІМ-керування або (8) для керування за допомогою ступінчастої функції:

$$\begin{cases} Q \cdot \tau_1 \cdot \eta_{1,1,r} + Q \cdot \tau_2 \cdot \eta_{1,2,r} + \dots + Q \cdot \tau_n \cdot \eta_{1,n,r} = -\Delta_1 \\ Q \cdot \tau_1 \cdot \eta_{2,1,r} + Q \cdot \tau_2 \cdot \eta_{2,2,r} + \dots + Q \cdot \tau_n \cdot \eta_{2,n,r} = -\Delta_2 \\ \dots \\ Q \cdot \tau_1 \cdot \eta_{n,1,r} + Q \cdot \tau_2 \cdot \eta_{n,2,r} + \dots + Q \cdot \tau_n \cdot \eta_{n,n,r} = -\Delta_n \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \Delta Q_1 \cdot K_{1,1,r} + \Delta Q_2 \cdot K_{1,2,r} + \dots + \Delta Q_n \cdot K_{1,n,r} = -\Delta_1 \\ \Delta Q_1 \cdot K_{2,1,r} + \Delta Q_2 \cdot K_{2,2,r} + \dots + \Delta Q_n \cdot K_{2,n,r} = -\Delta_2 \\ \dots \\ \Delta Q_1 \cdot K_{n,1,r} + \Delta Q_2 \cdot K_{n,2,r} + \dots + \Delta Q_n \cdot K_{n,n,r} = -\Delta_n \end{cases} \quad (8)$$

або в матричній формі (9) та (10):

$$[Q \cdot \eta] \cdot \{\Delta\tau\} = -\{\Delta\}, \quad (9)$$

$$[K_1] \cdot \{\Delta Q\} = -\{\Delta\}, \quad (10)$$

де $\{\Delta\}$ – матриця стовпець збільшень температур у кінці інтервалу часу τ , що містить n елементів; $\{\Delta\tau\}$, $\{\Delta Q\}$ – матриця рядок збільшень теплових потоків на початку інтервалу часу r , які компенсують за цей час відповідні збільшення температур, що містять n елементів.

Далі за формулою (11) для ШІМ-керування або (12) для керування за допомогою ступінчастої функції обчислюються значення збільшень теплових потоків для кожного з p нагрівачів:

$$\{\Delta\tau\} = \frac{-\{\Delta\}}{[Q \cdot \eta]}, \quad (11)$$

$$\{\Delta Q\} = \frac{-\{\Delta\}}{[K_1]}. \quad (12)$$

Після обчислення значень теплових потоків $\{\Delta Q\}$, або тривалостей імпульсу $\{\Delta\tau\}$ ці значення підставляються в систему рівнянь (7) для ШІМ-керування або (8) для керування за допомогою ступінчастої функції, рішення якої дає значення збільшень повного теплового потоку Q_j нагрівачів.

Під впливом підведеного до об'єкта тепла його температура змінюється на ΔT_r^3 . Після запису коду зміни температури система починає обчислювати значення керуючого впливу для інтервалу часу від $t=\tau \cdot (r-1)$ до $t=\tau \cdot r$. Процес обчислення поновлюється, як тільки завершиться r -ий інтервал часу.

Таким чином створюється прогнозуючий фільтр, який у моменти часу $t=\tau \cdot (r-1)$ обробляє вхідний сигнал і розраховує його майбутнє значення. Далі розраховуються значення теплових потоків, які необхідно підвести для зміни температури об'єкта на ΔT_r^3 .

Четвертий розділ присвячений комп'ютерному та експериментальному моделюванню розподілених теплових моделей для підтвердження достовірності розроблених методів енергозберігаючого керування.

Для побудованої теплової моделі приміщення (рис. 1) в розділі 2 було задано початкові й граничні умови з метою проведення моделювання:

- зовнішня температура (температура повітря за вікном) змінюється від мінус 7 °С до +5 °С, залежно від часу доби;
 - теплова потужність батарей 1.75 кВт (~ 1 кВт / 10 м² площі);
 - коефіцієнт чорноти для стін і дверей 0.8;
 - початкова температура повітря в приміщенні +18 °С;
 - підлога і стеля задані у вигляді адіабатної стіни, тобто не беруть участі в тепловому обміні;
 - швидкість приточної та витяжної вентиляції 0.018 кг / с (1 об'єм повітря в приміщенні за годину);
 - температура приточної вентиляції +20 °С;
 - добовий температурний режим у приміщенні: з 00:00 до 08:00 +10 °С, з 09:00 до 17:00 +18 °С, з 18:00 до 00:00 +15 °С;
 - точка в приміщенні для моделювання має координати (1.72; 0.9; 1.645) м.
- Результати моделювання наведені на рис. 5.

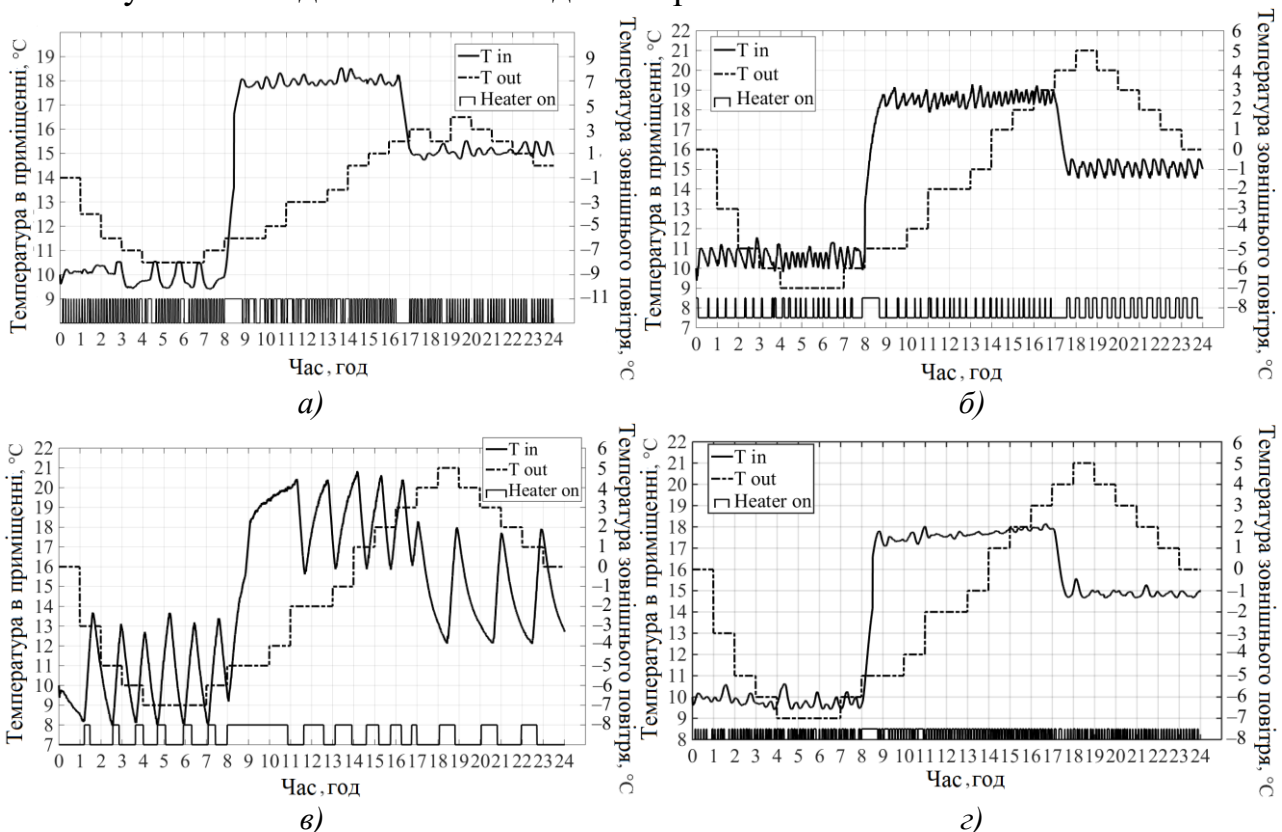


Рисунок 5 – Результати експерименту: а – із застосуванням методу ШІМ-керування з прогнозуванням, б – із застосуванням двопозиційного регулятора без гістерезису, в – із застосуванням двопозиційного регулятора з величиною гістерезису, що дорівнює 2 °С, г – із застосуванням ПІД-регулятора, де: T_{in} – температура в заданій точці всередині приміщення, $Heater\ On$ – час роботи нагрівача, T_{out} – температура зовнішнього повітря

У табл. 1 наведено результати похибок моделювання.

Таблиця 1 – Порівняння похибок моделювання

Метод керування	Максимальна абсолютна похибка результату, °C	Точність результату, %
Двопозиційне керування з $H=2$ °C	1.2	12
Двопозиційне керування з $H=0$ °C	1	10
ПД-керування	0.7	7
ШМ-керування з прогнозуванням	0.5	5

Згідно з табл. 1, найвищу точність засвідчив метод ШМ-керування з прогнозуванням. Найменш ефективним виявився метод двопозиційного керування з гістерезисом, що дорівнює 2 °C, який через наявність інерції теплового об'єкта перевищив задану температуру в приміщенні на 1.2 °C.

Отримані результати комп'ютерного моделювання засвідчили, що регулятор з прогнозуванням здатний ефективніше регулювати температуру об'єкта.

Відповідно до місячної вартості за 1 кВт електроенергії при споживанні понад 100 кВт, що становить 1.68 грн (постанова НКРЕКП України № 220 від 26.02.2015), або 0.0618 USD (за курсом гривні 27.2 грн за 1 USD у 2017 р.), загального часу роботи нагрівача, потужності нагрівача (1.75 кВт) обчислено витрати на опалення приміщення для добового та місячного режимів (табл. 2).

Таблиця 2 – Витрати на опалення приміщення

Метод керування	Час роботи нагрівача, с	Вартість добового опалення, грн (USD)	Вартість місячного опалення, грн. (USD)
Безперервна робота нагрівача	86400	70.61 (2.596)	2118.3 (77.88)
Двопозиційне керування з $H=2$ °C	35940	29.38 (1.08)	881.4 (32.4)
Двопозиційне керування з $H=0$ °C	41160	33.61 (1.236)	1008.3 (37.08)
ПД-керування	34460	28.15 (1.035)	844.5 (31.05)
ШМ-керування з прогнозуванням	33900	27.69 (1.018)	830.7 (30.54)

Результати розраховано для будівель і приміщень з однозмінним режимом роботи без вихідних. Таким чином, відмова від безперервної роботи нагрівача і застосування регулятора з прогнозуванням дозволяє зменшити час роботи опалювального обладнання на 56%: з 24-х до 10.5 год. з максимальною абсолютною похибкою результату не більше ± 0.5 °C.

Для експериментальних досліджень об'єктами керування обрано порожнистий сталевий стержень з розмірами: довжина 35.5 см, зовнішній діаметр 3.2 см, внутрішній діаметр 2.8 см, з намотаним на одному кінці нагрівачем довжиною 8.2 см від початку труби опором 19 Ом, і стерилізатор ГП-80 (рис. 6). Для здійснення натурального експерименту зібрано експериментальну установку на базі мікроконтролера ATmega16, використано датчики DS18B20, мікросхему пам'яті AT24C256B-PU.



а) б)
Рисунок 6 – Експериментальні моделі дослідження:
а – сталевий порожнистий стержень, б – стерилізатор ГП-80

Відповідно до розробленого методу, для кожного об'єкта керування отримано перехідні характеристики і визначено коефіцієнти передачі теплового впливу. Далі для кожного об'єкта задано температурні умови, які необхідно підтримати. Результати експериментів подані на рис. 7.

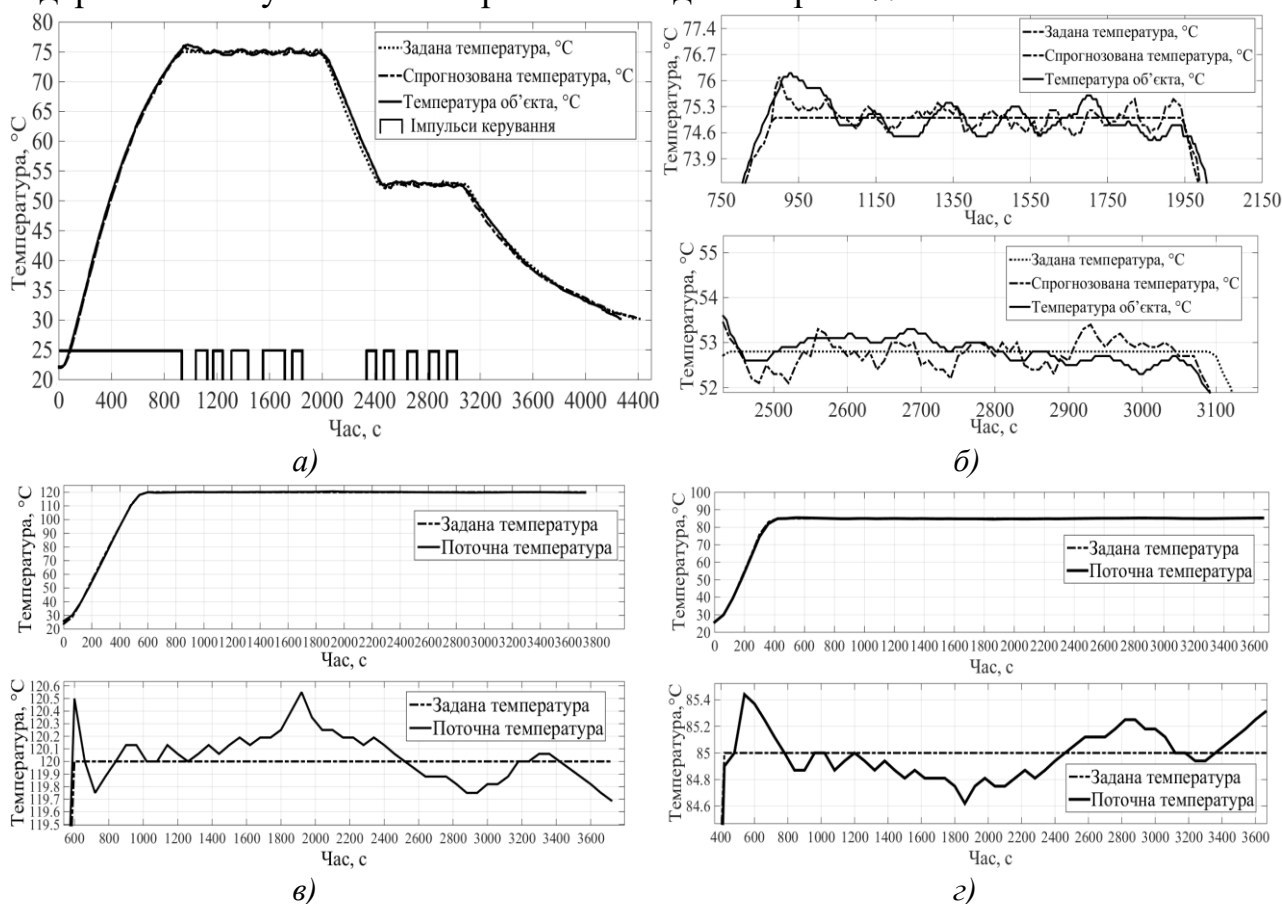


Рисунок 7 – Результати експериментів з підтримання заданої температури: а, б – експерименти зі сталевим стержнем; в, г – експерименти зі стерилізатором ГП-80

Результати експериментів з підтримання заданої температури наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати експериментів з підтримання заданої температури

Задана температура, °С	Макс. абсолютна похибка, °С	Макс. відносна похибка, %	Коефіцієнт перерегулювання, %
Стерилізатор			
85	0.4	0.47	0.4
120	0.5	0.42	0.42
Сталевий порожнистий стержень			
75	0.7	0.933	0.93
55	0.5	0.926	-

Далі була вирішена задача пошуку оптимального співвідношення параметрів потужності нагрівача й інтервалу прогнозування за допомогою методу найменших квадратів.

Величина отриманих похибок у табл. 3 викликана тим, що відповідно до розробленого методу ШІМ-регулювання з прогнозуванням імпульс для компенсації величини помилки неузгодженості виробляється до кінця інтервалу прогнозування. Однак при цьому не враховується величина перерегулювання від даного імпульсу. Таким чином, чим більший період прогнозування, тим більша помилка від імпульсу заданої тривалості. Для врахування величини перерегулювання імпульс керуючого впливу слід виробляти на початку інтервалу програмного регулювання.

Необхідно знайти таке співвідношення параметрів тривалості імпульсу і потужності нагрівача, щоб отримані похибки вимірювань були мінімальними.

Після серії проведених експериментів з отримання реакцій об'єкта на імпульси заданої тривалості було отримано набір з тривимірних масивів, елементи яких можна розглядати як точки поверхні. Необхідно обробити ці результати і визначити точки мінімуму / максимуму поверхні.

Для побудови поверхні було обрано 9 точок (табл. 4). Похибка регулювання дорівнює відношенню значення температури перерегулювання до максимальної приведеної похибки до заданого значення температури.

Таблиця 4 – Обрані вузлові точки

№ точки	Потужність нагрівача, Вт	Тривалість імпульсу, с	Похибка регулювання
1	11.25	200	1.4/1.25
2	25	170	3.6
3	5	80	0.4/0.15
4	15.87	150	1.9/1.2
5	5	200	3/4
6	5	100	5/3
7	11.25	170	1.2
8	11.25	100	1.1
9	25	150	1.3

Взяти за основу елемент, індекс якого має максимальне значення, недостатньо, оскільки дана точка може бути локальним мінімумом / максимумом, або «хибним» піком. Тому необхідно апроксимувати

обрані дані деякою поверхнею, потім отримати рівняння цієї поверхні та знайти екстремум.

Апроксимуючою поверхнею обертання була обрана поверхня, що задається рівнянням:

$$z = a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + f \cdot y + g. \quad (13)$$

Далі, відповідно до методу найменших квадратів, отримана функція, яка складається з суми квадратів відхилень відомих точок від відповідних точок на шуканій поверхні:

$$f = \sum ([a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + f \cdot y + g - z]^2).$$

Потім необхідно знайти такі значення коефіцієнтів a, b, c, d, f, g , при яких вихідна функція буде мінімізована, тобто знайти часткові похідні функції:

$$\begin{cases} \partial Q / \partial a = \sum (2[a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + f \cdot y + g - z] \cdot x^2) \\ \partial Q / \partial b = \sum (2[a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + f \cdot y + g - z] \cdot y^2) \\ \partial Q / \partial c = \sum (2[a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + f \cdot y + g - z] \cdot x \cdot y) \\ \partial Q / \partial d = \sum (2[a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + f \cdot y + g - z] \cdot x) \\ \partial Q / \partial f = \sum (2[a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + f \cdot y + g - z] \cdot y) \\ \partial Q / \partial g = \sum (2[a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + f \cdot y + g - z] \cdot 1) \end{cases}.$$

При розкритті дужок отримано вираз:

$$\begin{cases} \sum (x^2 \cdot z) = a \cdot \sum (x^4) + b \cdot \sum (x^2 \cdot y^2) + c \cdot \sum (x^3 \cdot y) + d \cdot \sum (x^3) + f \cdot \sum (x^2 \cdot y) + g \cdot \sum (x^2) \\ \sum (y^2 \cdot z) = a \cdot \sum (x^2 \cdot y^2) + b \cdot \sum (y^4) + c \cdot \sum (x \cdot y^3) + d \cdot \sum (x \cdot y^2) + f \cdot \sum (y^3) + g \cdot \sum (y^2) \\ \sum (x \cdot y \cdot z) = a \sum (x^3 \cdot y) + b \sum (x \cdot y^3) + c \sum (x^2 \cdot y^2) + d \sum (x^2 \cdot y) + f \sum (x \cdot y^2) + g \cdot \sum (x \cdot y) \\ \sum (x \cdot z) = a \cdot \sum (x^3) + b \cdot \sum (x \cdot y^2) + c \cdot \sum (x^2 \cdot y) + d \cdot \sum (x^2) + f \cdot \sum (x \cdot y) + g \cdot \sum (x) \\ \sum (y \cdot z) = a \cdot \sum (x^2 \cdot y) + b \cdot \sum (y^3) + c \cdot \sum (x \cdot y^2) + d \cdot \sum (x \cdot y) + f \cdot \sum (y^2) + g \cdot \sum (y) \\ \sum (z) = a \cdot \sum (x^2) + b \cdot \sum (y^2) + c \cdot \sum (x \cdot y) + d \cdot \sum (x) + f \cdot \sum (y) + g \cdot \sum (1) \end{cases} \quad (14)$$

Підставивши в рівняння (14) параметри з табл. 4, маємо вираз (15).

$$\begin{cases} 8.9672 \cdot 10^5 \cdot a + 4.9243 \cdot 10^7 \cdot b + 6.3298 \cdot 10^6 \cdot c + 39992 \cdot d + 3.0713 \cdot 10^5 \cdot f + 19607 \cdot g = 46831 \\ 4.9243 \cdot 10^7 \cdot a + 6.1069 \cdot 10^9 \cdot b + 4.64436250 \cdot c + 2.807125 \cdot d + 3.4919 \cdot 10^7 \cdot f + 2.07700 \cdot g = 3.5123 \cdot 10^5 \\ 6.3298 \cdot 10^6 \cdot a + 4.6443625 \cdot 10^8 \cdot b + 4.9243 \cdot 10^7 \cdot c + 3.0713 \cdot 10^5 \cdot d + 2.807125 \cdot f + 1.7538 \cdot g = 36834 \\ 39992 \cdot a + 2.807125 \cdot 10^6 \cdot b + 3.0713 \cdot 10^5 \cdot c + 1.9067 \cdot d + 1.7538 \cdot f + 1.1475 \cdot g = 239.425 \\ 3.0713 \cdot 10^5 \cdot a + 3.4919 \cdot 10^7 \cdot b + 2.807125 \cdot 10^6 \cdot c + 1.7538 \cdot d + 2.077 \cdot 10^5 \cdot f + 1.310 \cdot g = 22838 \\ 19607 \cdot a + 2.077 \cdot 10^5 \cdot b + 1.7538 \cdot c + 1.1475 \cdot d + 1.310 \cdot f + 9 \cdot g = 16.2267 \end{cases} \quad (15)$$

У матричному поданні вираз (15) перетвориться в (16):

$$\begin{pmatrix} 8.9672 \cdot 10^5 & 4.9243 \cdot 10^7 & 6.3298 \cdot 10^6 & 39992 & 3.0713 \cdot 10^5 & 19607 \\ 4.9243 \cdot 10^7 & 6.1069 \cdot 10^9 & 4.64436250 & 2.807125 & 3.4919 \cdot 10^7 & 2.07700 \\ 6.3298 \cdot 10^6 & 4.6443625 \cdot 10^8 & 4.9243 \cdot 10^7 & 3.0713 \cdot 10^5 & 2.807125 & 1.7538 \\ 39992 & 2.807125 \cdot 10^6 & 3.0713 \cdot 10^5 & 1.9067 & 1.7538 & 1.1475 \\ 3.0713 \cdot 10^5 & 3.4919 \cdot 10^7 & 2.807125 \cdot 10^6 & 1.7538 & 2.077 \cdot 10^5 & 1.310 \\ 19607 & 2.077 \cdot 10^5 & 1.7538 & 1.1475 & 1.310 & 9 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ f \\ g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 46831 \\ 3.5123 \cdot 10^5 \\ 36834 \\ 239.425 \\ 22838 \\ 16.2267 \end{pmatrix} \quad (16)$$

У результаті використання методу Крамера отримані значення коефіцієнтів:

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ f \\ g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30/6977 \\ 13/121906 \\ 61/22458 \\ -851/1860 \\ -285/4948 \\ 4112/561 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Попередньо обчислені значення коефіцієнтів (17) підставлені в рівняння (13). У результаті отримано рівняння апроксимуючої поверхні (18):

$$z = \frac{30}{6977} \cdot x^2 + \frac{13}{121906} \cdot y^2 + \frac{61}{22458} \cdot x \cdot y - \frac{851}{1860} \cdot x - \frac{285}{4948} \cdot y + \frac{4112}{561}. \quad (18)$$

Для перевірки наявності екстремумів на поверхні необхідно визначити часткові похідні першого порядку (19–20):

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{60}{6977}x + \frac{61}{22458}y - \frac{851}{1860} \\ \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{61}{22458}x + \frac{13}{60953}y - \frac{285}{4948} \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \frac{60}{6977}x + \frac{61}{22458}y - \frac{851}{1860} = 0 \\ \frac{61}{22458}x + \frac{13}{60953}y - \frac{285}{4948} = 0 \end{cases}. \quad (20)$$

У результаті рішення системи (20) отримана критична точка $M_1(10.619;134.822)$.

Для визначення типу екстремуму необхідно знайти часткові похідні другого порядку і обчислити значення часткових похідних у критичній точці $M_1(10.619;134.822)$:

$$A = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}_{(10.619;134.822)} = \frac{61}{22458}; \quad C = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}_{(10.619;134.822)} = \frac{60}{6977}; \quad B = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}_{(10.619;134.822)} = \frac{13}{60953}.$$

Вираз $A \cdot C - B^2 > 0$, тому точка $M_1(10.619;134.822)$ є точкою мінімуму.

Результат отриманої площини з заданими параметрами сітки в діапазоні від 60 с до 200 з кроком 0.1 с для значень потужності нагрівача і тривалості імпульсу представлений на рис. 8.

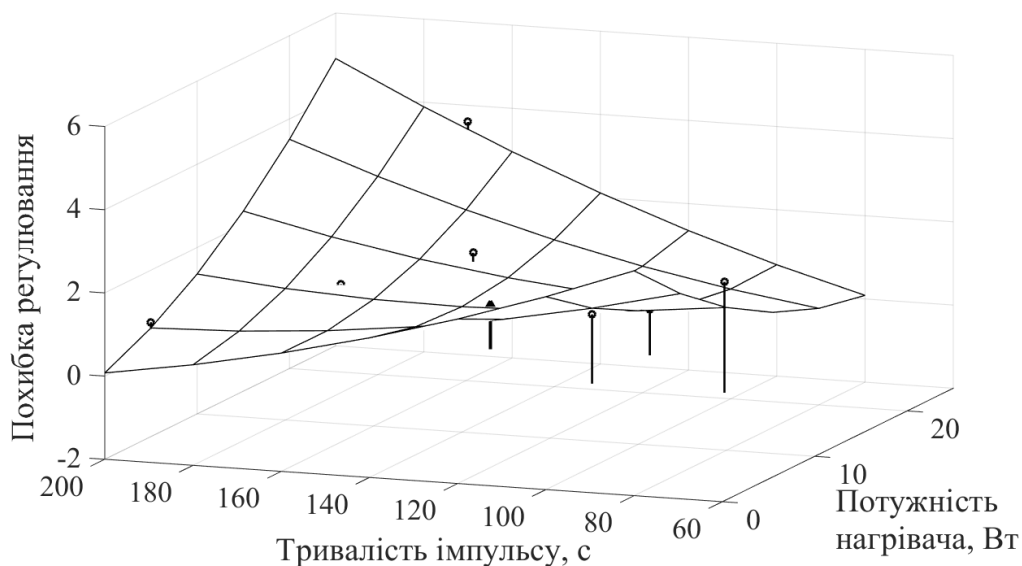


Рисунок 8 – Апроксимована поверхня за заданою сіткою

Використовуючи значення потужності нагрівача = 10.619 Вт та 134.822 с як періоду прогнозування, проведено експеримент з підтримання заданої температури об'єкта (рис. 9).

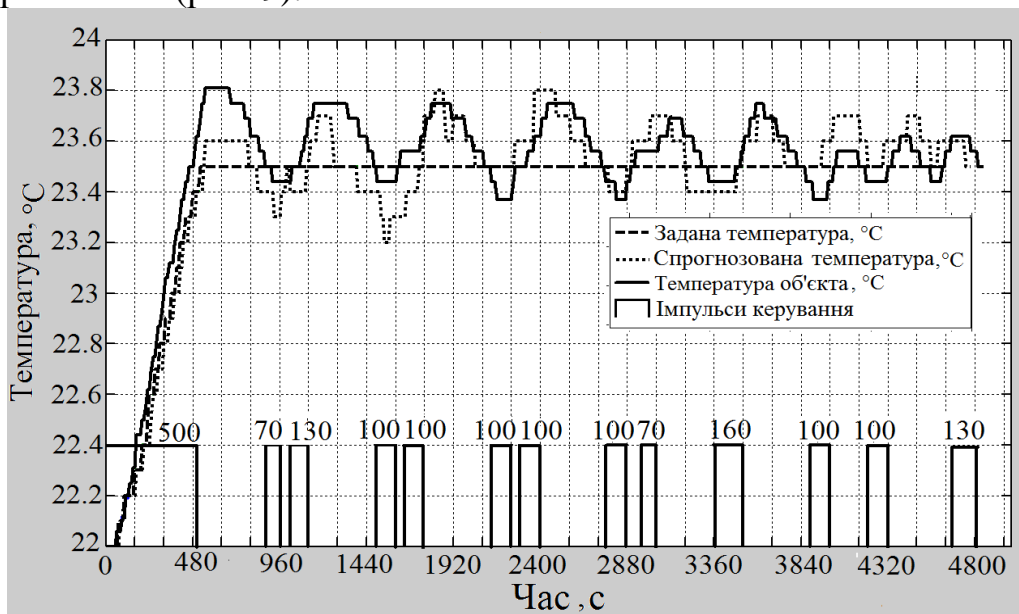


Рисунок 9 – Підтримання заданої температури об'єкта з використанням оптимальних параметрів регулювання

Результати експерименту демонструють зниження відхилення реальної температури від заданої до 0.3 °C, максимальної приведенної похибки до 1.3%.

У додатках наведені програми для керування розподіленими тепловими об'єктами для мікроконтролера AtMega16, udf файл для середовища ANSYS, акт використання результатів дисертаційної роботи в навчальному процесі кафедри автоматики та управління в технічних системах НТУ «ХП», акт використання результатів досліджень у роботі компанії ТОВ «ВО ОБЕН», список публікацій здобувача за темою дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу створення методів енергозберігаючого керування з прогнозуванням для теплових об'єктів з розподіленими параметрами для впровадження в системи теплопостачання адміністративних та офісних будівель. Основні кінцеві та отримані результати:

1. Аналіз існуючих методів керування тепловими об'єктами з розподіленими параметрами дозволив науково обґрунтувати можливість підвищення енергоефективності теплових об'єктів на основі синтезу керування з використанням регуляторів з прогнозуванням.

2. Розроблено метод керування тепловими об'єктами з розподіленими параметрами з прогнозуванням з використанням керуючого впливу типу ШІМ-функції, що дозволяє враховувати параметри розподілених теплових об'єктів керування: теплову інерцію, час перехідних процесів і запізнення. Вектор цільової функції розробленого методу формується з помилки керування в поточний момент часу і прогнозованої помилки неузгодженості, що визначається як різниця між заданою температурою і температурою моделі регулятора.

3. У середовищі ANSYS на основі вимірів на реальному об'єкті і методу кінцевих елементів побудована імітаційна модель приміщення. На цій моделі застосовано алгоритм керування температурним полем з використанням ШІМ-керування з прогнозуванням, що дозволяє враховувати у складі теплової моделі всі виникаючі фактори та обрати період прогнозування, який не перевищує часу перехідних процесів з періодом дискретизації, який дорівнює часу транспортного запізнення.

4. Виконано моделювання добового температурного режиму в приміщенні за допомогою двопозиційного керування, ПД-регулятора і ШІМ-керування з прогнозуванням. Експериментально доведено, що відмова від використання безперервної роботи нагрівача і застосування регулятора з прогнозуванням дозволяють зменшити час роботи опалювального обладнання на 56% з 24-х до 10.5 год. Порівняння розробленого регулятора з прогнозуванням з двопозиційним і ПД-керуванням показало точність результату на рівні 5%, проти 7% у ПД-регулятора і 10% у двопозиційного регулятора.

5. Здійснено натурні дослідження розробленого регулятора для теплових об'єктів для порожнистого сталевого стержня і сухожарової шафи, що дозволило підтвердити правильність теоретичних передумов, покладених в основу розробки апаратно-програмного комплексу, і перспективність цього напрямку. Підтримання заданих температурних умов виконано з точністю на рівні ± 0.5 ° С проти ± 1 ° С у типових регуляторах з прогнозуванням, які використовуються в теплопостачанні.

6. Результати наукових досліджень впроваджені в практику проектування систем автоматичного керування тепловими об'єктами, технологічними процесами підприємства ТОВ «ВО ОВЕН» (м. Харків). Матеріали дисертації використовуються в лекційних курсах «Теорія автоматичного керування» і «Програмні засоби систем керування» на кафедрі «АУТС» НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Евсеенко О. Н. Построение модели теплового объекта на РС-сетках / А. И. Гапон, О. Н. Евсеенко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування : зб. наук. пр. – Харків, 2014. – № 15 (1058). – С. 24–30.

Проведено моделювання теплового об'єкта з розподіленими параметрами за допомогою методу РС-ланок.

2. Евсеенко О. Н. Поддержание заданной температуры инерционного объекта с использованием ШИМ-регулирувания с предсказанием / П. А. Качанов, О. Н. Евсеенко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування : зб. наук. пр. – Харків, 2014. – № 67. – С. 18–28.

Здійснено механізм вибору оптимальних параметрів для проведення експерименту з використанням методу широтно-імпульсної модуляції з прогнозуючим фільтром.

3. Евсеенко О. Н. Обзор существующих типов регуляторов температуры тепловых объектов / О. Н. Евсеенко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування : зб. наук. пр. – Харків, 2016. – № 15. – С. 16–21.

4. Yevseienko O. N. Modeling of daily temperature mode in premises using a predictive controller / P. A. Kachanov, O. N. Yevseienko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4, Iss. 2. – P. 33–41.

Виконано моделювання добового температурного стану приміщення за допомогою ШИМ-керування з прогнозуванням.

5. Спосіб програмного управління тепловим об'єктом з застосуванням широтно-імпульсної модуляції : патент на корисну модель № 81276 Україна : МПК G05D 23/19 (2006.01) / Савицький С. М., Гапон А. І., Качанов П. О., Євсеєнко О. М., Вискребенцев В. О. ; заявник Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – № u201300059 ; заявл. 02.01.2013 ; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 4 с.

Запропоновано та досліджено метод керування тепловим полем за допомогою ШИМ-керування з прогнозуванням.

6. Евсеенко О. Н. Управление тепловым объектом с помощью широтно-импульсной модуляции и предсказывающего фильтра / С. М. Савицкий, А. И. Гапон, О. Н. Евсеенко // Научная дискуссия: вопросы технических наук : сб. ст. по материалам XVIII–XIX междунар. заоч. науч.-практ. конф. – М., 2014. – С. 50–55.

Здобувачем застосовано метод широтно-імпульсної модуляції з прогнозуючим фільтром до теплового об'єкта з розподіленими параметрами – сталевого порожнистого стержня.

7. Evseenko O. N. Control method of the thermal object by vitrue of using the PWM-modulation and prognostication filter / S. M. Savitskiy, A. I. Gapon, O. N. Evseenko // ҚазККА Хабаршысы. – 2014. – № 2 (87). – P. 228–232.

Застосовано метод широтно-імпульсної модуляції з прогнозуючим фільтром до теплового об'єкта з розподіленими параметрами.

8. Евсеенко О. Н. Обработка результатов эксперимента и поиск оптимальных параметров управления с помощью метода наименьших

квадратов / О. Н. Евсеенко // ПМУ Хабаршысы : Энергекалык сериясы = Вестн. ПГУ : Энергетическая серия. – 2016. – № 1. – С. 80–90.

9. Yevseienko O. Improving the accuracy of temperature control inside dry-air sterilizer oven by using prediction algorithm / Oleg Yevseienko // International Journal of Mathematics and Statistics Invention. – 2016. – Vol. 4, Iss. 7. – P. 14–19.

10. Евсеенко О. Н. Система терморегулирования на тиристорном ключе / О. Н. Евсеенко, А. И. Гапон, С. М. Савицкий, А. Т. Стеценко // Погляд у майбутнє приладобудування : зб. тез доп. V наук.-практ. конф. студентів та аспірантів, присвяч. 50-річчю заснування приладобудів. ф-ту. – Київ, 2012. – С. 96.

Запропоновано систему керування тепловим об'єктом з розподіленими параметрами за допомогою тиристорного ключа.

11. Евсеенко О. Н. К вопросу об управлении тепловыми объектами / С. М. Савицкий, О. Н. Евсеенко, В. О. Выскребенцев // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки : матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. – Чернівці, 2012. – С. 131–132.

Розроблено структурну схему та алгоритм функціонування системи керування з прогнозуючим фільтром.

12. Евсеенко О. Н. Экспериментальные исследования способов управления тепловыми объектами / С. М. Савицкий, О. Н. Евсеенко, В. О. Выскребенцев // Актуальные проблемы автоматизации и приборостроения Украины : материалы науч.-техн. конф. / НТУ «ХПИ». – Харьков, 2012. – С. 9–10.

Отримано формули, що описують програмне керування з прогнозуванням інерційним об'єктом для системи з багатьма датчиками і одним виконавчим пристроєм.

13. Евсеенко О. Н. Поиск оптимальных методов управления тепловыми объектами / О. Н. Евсеенко, С. М. Савицкий // VII Університетська науково-практична студентська конференція магістрантів : [тези доп.] / НТУ «ХПИ». – Харків, 2013. – С. 179–181.

Здійснено аналіз методів керування тепловими об'єктами.

14. Евсеенко О. Н. Обработка результатов эксперимента по ШИМ-регулированию инерционного теплового объекта / О. Н. Евсеенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD–2013) : у 4 ч. : матеріали Міжнар. наук. конф. / НТУ «ХПИ». – Харків, 2013. – Ч. 2. – С. 108.

15. Євсеєнко О. М. Теоретичне визначення частоти дискретизації на основі швидкого перетворення Фур'є для керування довільних теплових об'єктів / С. М. Савицький, О. М. Євсеєнко, В. О. Вискребенцев // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD–2013) : у 4 ч. : матеріали Міжнар. наук. конф. / НТУ «ХПИ». – Харків, 2013. – Ч. 2. – С. 130.

Запропоновано алгоритм розрахунку величини частоти дискретизації для здійснення експериментів.

16. Евсеенко О. Н. Описание метода управления тепловым объектом с распределёнными параметрами с помощью широтно-импульсной модуляции и

предсказывающего фильтра / О. Н. Евсеенко, С. М. Савицкий // Актуальные проблемы автоматизации и приборостроения Украины : материалы науч.-техн. конф. / НТУ «ХПИ». – Харьков, 2013. – С. 15–16.

Розроблено апаратно-програмний комплекс для дослідження законів керування тепловими об'єктами, що містить закон керування, програму керування, нагрівач, датчики температури, контролер, об'єкт керування.

17. Евсеенко О. Н. Применение метода ШИМ-регулирования с предсказанием к управлению температурным полем объекта / Евсеенко О. Н., Гапон А. И. // Студенческая конференция магистрантов : материалы конф. / НТУ «ХПИ». – Харьков, 2014. – С. 96.

Удосконалено алгоритм керування температурою об'єкта за допомогою збільшення кількості інтервалів прогнозування.

18. Евсеенко О. Н. Построение модели теплового объекта на РС-сетях / А. И. Гапон, О. Н. Евсеенко, С. М. Савицкий // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD–2014) : у 4 ч. : матеріали Міжнар. наук. конф. / НТУ «ХПИ». – Харків, 2014. – Ч. 2. – С. 110.

Здійснено моделювання розробленого методу ШИМ-керування з прогнозуванням на моделях з РС-ланками.

19. Евсеенко О. Н. Получение исходных данных для проведения эксперимента по управлению температурой объекта с помощью ШИМ-модуляции и предсказывающего фильтра / О. Н. Евсеенко, С. М. Савицкий, Д. В. Сальников // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. / Чернів. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича. – Чернівці, 2014. – С. 165–166.

Виконано експериментальні дослідження щодо зняття розгінних кривих для об'єкта досліджень – сталевого порожнистого стержня.

20. Евсеенко О. Н. Программное управление тепловым объектом / О. Н. Евсеенко // Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування : матеріали I Всеукр. наук.-техн. конф. / НТУ «ХПИ» [та ін.]. – Харків, 2014. – С. 61–62.

21. Евсеенко О. Н. Влияние величины транспортного запаздывания на выбор типа регулятора / О. Н. Евсеенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD–2015) : у 4 ч. : матеріали Міжнар. наук. конф. / НТУ «ХПИ». – Харків, 2015. – Ч. 2. – С. 54.

22. Yevseienko O. Searching for optimal control parameters of thermal object using pulse-width modulation (PWM) control with predictive filter [Электронный ресурс] / O. Yevseienko, A. Gapon, D. Salnikov // 5th International Youth Science Forum “Literus Et Artibus.” – 2015. – Lviv, 2015. – P. 154–155. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM).

Виконано експеримент з підтримання необхідної температури об'єкта.

23. Евсеенко О. Н. Построение аппроксимирующей плоскости по результатам экспериментов над тепловым объектом / О. Н. Евсеенко // Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування : матеріали II Всеукр. наук.-техн. конф. / НТУ «ХПИ». – Харків, 2015. – С. 9–10.

24. Евсеенко О. Н. Проверка линейных свойств инерционного теплового объекта / О. Н. Евсеенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD–2016) : у 4 ч. : матеріали Міжнар. наук. конф. / НТУ «ХПІ». – Харків, 2016. – Ч. 2. – С. 57.

25. Евсеенко О. Н. Построение и моделирование теплового состояния помещения в зависимости от внешней температуры / О. Н. Евсеенко // Актуальні проблеми автоматики і приладобудування : матеріали III Всеукр. наук.-техн. конф. / НТУ «ХПІ». – Харків, 2016.– С. 15–16.

26. Евсеенко О. Н. Моделирование работы ШИМ-регулятора с предсказанием для управления температурой в помещении [Электронный ресурс] / О. Н. Евсеенко // Сучасні інформаційні та електронні технології : матеріали XVIII Міжнар. наук.-техн. конф. / Одес. нац. політехн. ун-т. – Одеса, 2017. – С. 138–139. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM).

27. Евсеенко О. Н. Реализация управления суточным температурным режимом помещения с помощью ШИМ-регулятора с предсказанием / П. А. Качанов, О. Н. Евсеенко // Сучасні інформаційні технології 2017 : матеріали VII Міжнар. конф. студентів і молодих науковців. – Одеса, 2017. – С. 73–74.

Виконано моделювання теплового режиму приміщення із заданим режимом роботи в приміщенні.

28. Евсеенко О. Н. Получение исходных данных для моделирования теплового состояния помещения / О. Н. Евсеенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD–2017) : у 4 ч. : матеріали Міжнар. наук. конф. / НТУ «ХПІ». – Харків, 2017. – Ч. 2. – С. 129.

АНОТАЦІЇ

Євсеєнко О. М. Моделі та методи енергозберігаючого керування розподіленими тепловими об'єктами з використанням систем з прогнозуючим фільтром. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.03 – системи та процеси керування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2018.

Дисертація присвячена розробці й удосконаленню методів енергозберігаючого керування розподіленими тепловими об'єктами для застосування в існуючих і нових системах теплопостачання.

Запропоновано спосіб керування тепловими об'єктами з розподіленими параметрами з прогнозуванням, де як керуючий вплив використовується ШИМ-сигнал. Набув подальшого розвитку спосіб керування тепловими об'єктами з розподіленими параметрами з прогнозуванням, з керуючим впливом типу ступінчастої функції. Запропоновано формули, які дозволяють перейти від керування об'єктом із зосередженими параметрами до керування об'єктом з розподіленими параметрами в n точках простору, з використанням p нагрівачів.

У середовищі ANSYS на основі вимірів на реальному об'єкті з використанням методу скінченних елементів побудована імітаційна модель приміщення. На цій моделі застосовано алгоритми керування температурним

полем з використанням ШІМ-керування з прогнозуванням, ПІД-регулятора, двопозиційного керування та промодельована безперервна робота нагрівача.

За допомогою розробленого програмно-апаратного комплексу на базі мікроконтролера AtMega 16 для обраних об'єктів керування – сталевого порожнистого стержня і камери стерилізатора – здійснено експериментальні дослідження для підтримання заданої температури за допомогою ШІМ-керування з прогнозуванням. Результати досліджень засвідчили високу ефективність роботи методу з урахуванням зовнішніх збурень і підтриманням температури з точністю не більше $\pm 1\%$ від заданого значення температури.

Ключові слова: математичне моделювання, моделювання теплового поля, регулятор з прогнозуванням, теплопостачання офісної будівлі, ШІМ-керування, фізичне моделювання, енергозберігаюче керування.

Евсеенко О. Н. Модели и методы энергосберегающего управления распределенными тепловыми объектами с использованием систем с прогнозирующим фильтром. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.03 – системы и процессы управления. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2018.

Диссертация посвящена разработке и совершенствованию методов энергосберегающего управления распределенными тепловыми объектами для применения в системах теплоснабжения.

Предложен способ управления тепловыми объектами с распределенными параметрами с прогнозированием, где в качестве управляющего воздействия используется ШІМ-сигнал. Он основан на снятии переходных характеристик объекта управления с выбранным периодом дискретизации для длительностей импульсов от величины времени транспортного запаздывания до завершения времени переходных процессов. В моменты времени, кратные заданному периоду дискретизации, вычисляется ошибка управления как сумма двух векторов разниц заданной и текущей температуры и заданной и спрогнозированной температуры, по которым определяется длительность импульса, которая должна компенсировать ошибку рассогласования и вывести объект к заданному значению температуры.

Способ управления тепловыми объектами с распределенными параметрами с прогнозированием, с управляющим воздействием вида ступенчатой функции получил дальнейшее развитие. Предложены формулы, которые позволяют перейти от управления объектом с сосредоточенными параметрами к управлению объектом с распределенными параметрами в n точках с использованием p нагревателей.

В среде ANSYS на основании замеров на реальном объекте и метода конечных элементов построена имитационная модель помещения. На данной модели были применены алгоритмы управления температурным полем с использованием ШІМ-регулирования с прогнозированием, непрерывного управления, двухпозиционного и ПІД-регулирования.

Проведено моделирование работы регулятора с прогнозированием для поддержания заданного суточного температурного режима. Максимальная абсолютная погрешность управления составила $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты моделирования показали, что увеличения точности управления можно добиться посредством увеличения количества интервалов прогнозирования, уменьшения периода прогнозирования и шага моделирования; позволили сформулировать новые задачи по размещению датчика температуры и нахождению человека в помещении.

Проведено сравнение разработанного метода ШИМ-управления с прогнозированием с непрерывным, двухпозиционным и ПИД-управлением. Отказ от непрерывной работы нагревателя и применение регулятора с прогнозированием продемонстрировали снижение времени работы отопительного оборудования в 2.3 раза с 24-х до 10.5 часов. Метод двухпозиционного управления с гистерезисом, равным $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, является худшим среди рассмотренных регуляторов для поддержания заданной температуры с максимальной абсолютной погрешностью результата $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

С помощью разработанного программно-аппаратного комплекса на базе микроконтроллера AtMega 16 для выбранных объектов управления – стального полого стержня и камеры стерилизатора – проведены экспериментальные исследования с целью поддержания заданной температуры с применением метода ШИМ-регулирующего с прогнозированием. Результаты исследований показали высокую эффективность работы метода с учетом внешних возмущений и поддержанием температуры с точностью не более $\pm 1\%$ от заданного значения температуры.

Ключевые слова: математическое моделирование, моделирование теплового поля, регулятор с прогнозированием, теплоснабжение офисного здания, ШИМ-регулирование, физическое моделирование, энергосберегающее управление.

Yevseienko O. N. Models and methods of energy-efficient distributed thermal objects control using systems with a predictive filter. – Manuscript.

The thesis on Candidate Degree in Technical Sciences: Specialty 05.13.03 – management systems and processes. – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov, 2018.

The thesis is devoted to the development and improvement of energy-efficient control methods of distributed thermal objects for using in heat supply systems.

The thesis proposes a control method of thermal objects with distributed parameters with prediction filter, where the PWM signal is used as the control action. The method of controlling thermal objects with distributed parameters with prediction using the step function as control effect has been further developed.

The paper presents a formalized description of predictive control methods that allow to control temperature of an object with distributed parameters instead of object with lumped parameters temperature control at n points with p heaters.

A simulation room model based on measurements of the room and the finite element method in the ANSYS environment was constructed. Using developed

predictive controller, experiments of maintaining the assigned daily temperature mode were carried out. The developed method of PWM predictive control with continuous control, two-position, PID-control was compared.

Experiments of maintaining the set temperature of the steel hollow rod and the sterilizer chamber using the developed software and hardware complex, based on the microcontroller AtMega 16 and PWM with prediction control method, were carried out.

Keywords: mathematical modeling, thermal field modeling, predictive control, office building heating system, pulse-width modulation (PWM), PWM control, physical modeling, energy-saving control.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ebcap', located in the lower right quadrant of the page.

Підписано до друку 28.12.2017 р. Формат 60×90/24
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний
Друк – ризограф. Ум. друк. аркушів 0,9
Наклад 100 прим. Зам. № 000428

Надруковано в копі-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
Тел. 7-170-354

www.modelist.in.ua