

Здоренко С.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Черепанська І.Ю.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ПРОГНОЗНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ПОВІТРЯ В БУДІВЛЯХ З АВТОНОМНИМ ОПАЛЕННЯМ

В статті на основі аналізу проблеми енергоефективного керування температурою повітря в різних будівлях, що виникла на тлі стрімкого зростання цін на усі види енергоресурсів, які споживаються при їх опаленні, представлено структурну схему новоствореної системи енергоефективного керування температурою у будівлях з автономним опаленням (СЕКТ БАО) на основі адаптивного MPC-алгоритму та штучних нейронних мереж (ШНМ). Новостворена система розглядається як єдине ціле з одночасним виокремленням функціонально взаємодіючих підсистем та модулів, що вирішують окремі локальні завдання та у сукупності реалізують глобальну мету енергоефективного керування температурою повітря. Ця мета полягає у мінімізації енергоспоживання при одночасній максимізації комфортних температурних умов для людей, що перебувають у будівлі. Особливістю новоствореної СЕКТ БАО є математична модель, яка враховує усю множину збурюючих факторів, що можуть виникати та впливати на об'єкт керування (ОК). Крім того забезпечується можливість автоматичного коригування складових математичної моделі ОК в режимі реального часу без необхідності зупинки системи опалення. Для розрахунків параметрів математичної моделі та визначення їх поточних значень застосовано White-box та Data-driven методи відповідно. Збір поточних даних про стан ОК, збурюючі фактори, клерувальні впливи та ін. здійснюється на основі технології IoT. Ці дані зберігаються в хмарному середовищі і після аналізу ШНМ в подальшому використовуються для коригування параметрів математичної моделі в режимі реального часу. Передбачається, що застосування новоствореної СЕКТ БАО дозволить своєчасно реагувати на вплив множини різних за своєю фізичною природою та впливом чинників, що призводять до змін температури в будівлях, підвищити точність та швидкодію регулювання температури, забезпечити значне зниження енергоспоживання та одночасне забезпечення температурного комфорту людей.

Ключові слова: Model Predictive Control, MPC, прогнозна модель, штучні нейронні мережі, автоматичне регулювання температури повітря, енергоефективне керування, проектування системи автоматизації.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку енергетичних галузей, зокрема паливної промисловості, різних країн світу, у тому числі й України, визначається стрімким зростанням вартості усіх видів енергоресурсів, які споживаються при опаленні житлових і комерційних будівель, у тому числі, з автономними системами опалення. Так, за даними статистичної організації Європейської Комісії (Євростат), у період з 2019 по 2024 роки тариф на газ для домогосподарств країн Євросоюзу зріс на 53%, тариф на газ для інших споживачів – на 78%. Тариф на електроенергію для домогосподарств та інших споживачів зріс на 36% та 37% відповідно [1]. При-

чому очевидною є тенденція до систематичного подальшого зростання вартості енергоресурсів. Саме тому гостро стоїть проблема енергоефективного керування температурою повітря в будівлях з автономним опаленням для забезпечення комфортних температурних умов при одночасному зниженні енергоспоживання. Вказане може бути досяжним за рахунок розробки нових та вдосконалення існуючих методів, засобів і систем, а також новітніх алгоритмів та математичних моделей енергоефективного керування температурою повітря в будівлях з автономним опаленням, що може суттєво сприяти зниженню енергоспоживання. Рішення щодо енергоефек-

тивного керування температурою повітря в будівлях з автономним опаленням можуть бути отримані при розв'язанні низки задач пов'язаних із подальшим розвитком енергоефективного або так званого оптимального керування системами автономного опалення (CAO), що функціонують у несприятливих економічних умовах сучасного енергетичного ринку та нестаціонарних виробничих умовах. В цьому контексті розробка нової системи енергоефективного прогнозного керування температурою у будівлях з автономним опаленням на основі прогнозних моделей (Model Predictive Control (MPC)), здатної працювати із стохастичною та зашумленою інформацією є актуальною науково-технічною задачею. Розв'язання цієї задачі забезпечить у значній мірі вирішення поставленої проблеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз відомих досліджень та публікацій показує, що в останні роки замість традиційних методів, засобів, систем і алгоритмів керування температурою повітря спостерігається інтерес до так званого інтелектуального оптимального керування на основі прогнозних моделей та елементів штучного інтелекту.

Так у роботі [2, с. 38] автори прийшли до висновку, що MPC-регулятори демонструють значно кращу динамічну відповідь та стабільність у інерційних системах, до яких належать і системи автономного опалення. Це забезпечує зменшення перерегулювання та часу перехідного процесу до 28% порівняно з традиційними ПІ та ПД регуляторами. Крім того, застосування MPC-регуляторів дозволяє отримати додаткові цінні якості системи керування, як то підвищену точність, робастність до зовнішніх збурень та здатність адаптуватися до змінних умов навколишнього середовища.

Проте в даній роботі автори зосередились переважно на порівнянні традиційних регуляторів з MPC-регуляторами і не розглядався вплив конкретних збурюючих факторів на систему керування.

У роботі [3, с. 1] описано результати використання MPC-алгоритму для керування температурою повітря в житловій будівлі з автономним опаленням на основі теплового насоса та накопичувача теплової енергії. Зокрема MPC-алгоритм використовувався для реалізації нелінійної глобальної оптимізації при керуванні системою автономного опалення. В межах цієї оптимізації модель в просторі стану житлової будівлі відображає динаміку системи автономного опалення

в просторі стану при оптимальному керуванні режимами роботи теплового насоса зі збільшенням так званого коефіцієнта сезонної продуктивності. Результати роботи демонструють значне скорочення енергоспоживання, зокрема, електроенергії, на 11,6%.

Проте в даній роботі лишаються невирішеними питання, що пов'язані з врахуванням впливів на температуру повітря в приміщенні кількості мешканців та тривалість їх перебування, інтенсивності ультрафіолетового випромінювання, наявності інших додаткових джерел тепла, як то побутових приладів та / або комп'ютерної техніки, коливання температури зовнішнього середовища та зміни погодних умов. Це вказує на обмеженість прогнозного моделі та недостатню ефективність автоматичного керування з огляду на зменшення енергоспоживання.

В роботі [4, с. 12] наводяться результати використання MPC алгоритму при керуванні температурою повітря в експериментальній кімнаті. Джерелом тепла в цій кімнаті виступає гідравлічна підлогова опалювальна поверхня. Отримані результати демонструють скорочення енергоспоживання до 40% за опалювальний сезон з одночасним забезпеченням комфортних температурних умов мешканців. При чому найбільше скорочення енергоспоживання спостерігалось в міжсезоння. В даній роботі враховується прогнозний вплив на температуру повітря в приміщенні наявності людей, коливання температури зовнішнього середовища та інерційність опалювальної поверхні будівлі. Однак в роботі [4] залишилися неврахованими впливи на температуру повітря в приміщенні інтенсивності ультрафіолетового випромінювання та інших джерел тепла, наприклад, побутових приладів. Також не досліджена реакція системи керування на зміну температури теплоносія. Це призводить до формування неповної прогнозного моделі та обмежень у зменшенні енергоспоживання.

У роботі [5, с. 14] наводяться результати розробки MPC-регулятора для керування температурою повітря в будівлі з повітряно-водяним тепловим насосом. В якості джерела тепла використано низькотемпературну підлогову опалювальну поверхню. Отримані результати продемонстрували зменшення витрат енергоресурсів на 14,9% у порівнянні з використанням традиційного ПД-регулятора. Застосування MPC-алгоритму окрім зменшення енерговитрат забезпечило ще й достатньо високу точність підтримки температури повітря. Так, задане

значення температури $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$ підтримувалось MPC-алгоритмом на сталому незмінному рівні. При цьому застосування традиційного ПД-регулятора дозволяло підтримувати задане значення температури лише в інтервалі від $+21,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вказане безперечно підкреслює перспективність оптимального керування на основі MPC-алгоритму.

Однак в даній роботі залишилися невирішеними питання, що пов'язані з врахуванням впливу на температуру в приміщенні кількості мешканців та тривалість їх перебування там, а також наявності інших додаткових джерел тепла, як то побутових приладів та / або комп'ютерної техніки.

Вказані питання частково вирішуються в роботі [7]. Зокрема, в роботі [7, с. 19] використано адаптивний MPC-алгоритм для керування комбінованою системою автономного опалення, яка реалізована на основі поверхневого підлогового опалення та повітряного обігріву. Математична модель будівлі в роботі враховує як термічну динаміку будівлі, так і вплив на температуру повітря в приміщенні кількості людей та тривалість їх перебування там. Отримані результати показали, що впровадження адаптивного MPC-алгоритму дозволяє зменшити енергоспоживання на $22,2\%$. Крім того, в даній роботі було порівняно роботу звичайного та адаптивного MPC-алгоритму. Отримані результати показали, що застосування адаптивного MPC-алгоритму дозволяє отримати на $11,5\%$ кращі результати щодо зменшення енергоспоживання. Це пояснюється тим, що робота адаптивного MPC-алгоритму заснована на застосуванні більш повної (або точної) математичної моделі будівлі, яка враховує термічну динаміку будівлі, зміни в кількості людей, що перебувають в будівлі та тривалість їхнього перебування там. Це безперечно вказує, що адаптивні MPC-алгоритми є кращою альтернативою звичайним MPC-алгоритмам. Проте, у даній роботі не враховується контекстний вплив на точність роботи системи керування похибок та зашумленості вхідної інформації. Очевидно, вказане вимагає доопрацювання представленої в даній роботі системи керування шляхом застосування сучасних методів і засобів збирання і обробки первинної інформації, наприклад, на основі елементів штучного інтелекту.

В роботі [7, с. 13] наведено стратегію керування температурою повітря на основі MPC-алгоритму для зменшення енергоспо-

живання гідравлічними поверхневими системами автономного опалення в офісних будівлях. Ця стратегія передбачає використання data-driven підходу для побудови математичної моделі, яку використовує MPC-регулятор в системі автоматичного керування. Data-driven підхід дозволяє будувати математичну модель використовуючи так звані історичні дані, які накопичуються протягом тривалого часу роботи системи автономного опалення. Такі історичні дані враховують зміну погодних умов в певні періоди часу, рівень наповненості будівлі людьми та тривалість їх перебування там, наявність внутрішніх додаткових джерел тепла, наприклад, побутових приладів та / або комп'ютерної техніки. Отримані результати показали зменшення витрат енергії на 16% у порівнянні з традиційними алгоритмами регулювання. Проте можливість практичного застосування data-driven підходу обмежується довготривалістю та трудомісткістю збору і аналізу множини історичних даних для побудови повної математичної моделі, що використовується в MPC-регуляторі. Це виключає можливість роботи системи керування в штатному режимі одразу після її імплементації та є її суттєвим недоліком, адже вимагає тривалого часу на збір та обробку даних, що є необхідними для побудови математичної моделі будівлі і подальшого використання її для роботи MPC-алгоритму.

В роботі [8, с. 1] наведено результати роботи MPC-регулятора для автоматичного керування температурою в кімнаті житлової будівлі з джерелом тепла у вигляді поверхневого підлогового опалення. Наведена математична модель враховує зміни температури повітря зовнішнього середовища та присутність мешканців. Крім того MPC-алгоритм оптимізує роботу системи з урахуванням змін вартості електроенергії в різні години доби. Отримані результати продемонстрували щоденне зниження витрат на електричної енергії до 19% . Проте у даній роботі була використана математична модель з обмеженою кількістю можливих збурень, як то зміни температури повітря зовнішнього середовища та присутність мешканців, що зменшує можливості для енергоефективного керування та зниження енергоспоживання.

Таким чином, представлені у відомих роботах результати досліджень MPC-алгоритмів вказують на їх інноваційну перспективність в якості основи оптимального керування температурою повітря у будівлях з автономним опаленням, адже демонструють значне скорочення енер-

госпоживання. Проте, існуючі дослідження не пропонують комплексних рішень та прогнозних моделей, які б враховували усю множину чинників, що прямо або опосередковано впливають на температуру повітря у будівлях. Очевидно обґрунтованою є необхідність досліджень у напрямку вирішення проблеми енергоефективного керування температурою повітря в будівлях з автономним опаленням для забезпечення комфортних температурних умов при одночасному зниженні енергоспоживання.

Постановка завдання. Метою статті є розробка структурної схеми системи енергоефективного керування температурою у будівлях з автономним опаленням на основі адаптивного МРС-алгоритму, елементів штучного інтелекту та з урахуванням впливу всіх можливих зовнішніх та внутрішніх збурень. Це дасть можливість своєчасно реагувати на вплив множини різних за своєю фізичною природою та впливом чинників, що призводять до змін температури в будівлях, підвищити точність та швидкодію регулювання температури, забезпечити значне зниження енергоспоживання та економію енергетичних ресурсів при одночасному температурному комфорті людей.

Виклад основного матеріалу. Енергоефективне керування температурою повітря в будівлях з автономним опаленням є багатокритеріальним оптимізаційним процесом. У класичній постановці багатокритеріальна оптимізація являє собою процес пошуку деякого оптимального або компромісного, у даному розумінні рішення, при одночасній оптимізації декількох цільових функцій, які є взаємно суперечливими або взаємно конфліктними. У даному випадку для забезпечення енергоефективного керування температурою повітря в будівлях з автономним опаленням необхідно мінімізувати енергоспоживання $K_{ec} \rightarrow \min$ системою автономного опалення та одночасно забезпечити максимальні комфортні температурні умови $K_t \rightarrow \max$ для людей, що перебувають у будівлі.

Очевидно, що енергоефективне керування температурою повітря в будівлях – це досить складний процес. Зменшення енергоспоживання не повинно призводити до погіршення температурних умов у будівлі, адже незадовільний рівень температури у приміщенні та її перепади негативно відбивається на здоров'ї людей посилюючи ризик простудних захворювань, порушуючи кровообіг та роботу опорно-рухового апарату тощо. Очевидно, що енергоефективне керування

температурою повітря в будівлях з автономним опаленням вимагає розробки відповідної автоматизованої системи керування, наприклад, так званої системи енергоефективного прогнозного керування температурою у будівлях з автономним опаленням (СЕКТ БАО).

Концепція побудови СЕКТ БАО ґрунтується на системному та процесному підходах, за яких новостворена система розглядається як єдине ціле з одночасним виокремленням функціонально взаємодіючих підсистем та модулів, що вирішують окремі локальні завдання та у сукупності реалізують глобальну мету функціонування СЕКТ БАО. Із врахуванням вказаного СЕКТ БАО містить певну сукупність складових. Вони використовуються для розв'язання певних локальних задач із застосуванням певних новітніх моделей, методів та засобів автоматизованої обробки інформації та прийняття рішення в режимі реального часу з високою точністю та швидкодією. Зокрема, в математичній моделі об'єкта керування (ОК) пропонується врахувати усю множину збурюючих факторів, що можуть виникати та впливати на нього. Крім того необхідно забезпечити можливість автоматичного коригування математичної моделі ОК в режимі реального часу без необхідності зупинки системи опалення. Під ОК, в даному випадку, розуміється будівля з автономним опаленням. Спрощена структурна схема пропонованої СЕКТ БАО наведена на рис. 1.

Основними складовими пропонованої СЕКТ БАО є:

1) база даних (БД), що використовується для накопичення та зберігання інформації необхідної для вирішення локальних завдань щодо розв'язання оптимізаційної задачі енергоефективного керування температурою повітря в будівлях з автономним опаленням. Дана задача, у своїй загальній постановці, описується виразами (1) та (2). Крім того у БД накопичуються і зберігаються значення множини параметрів математичної моделі ОК, яка у загальному випадку описується виразом (3). Зокрема накопичується і зберігається інформація про:

- температуру повітря, підлоги та стін у будівлі;
- зовнішню температуру повітря;
- присутність мешканців в будівлі та їх кількість;
- інтенсивність ультрафіолетового випромінювання;
- температуру теплоносія від джерела тепла;
- роботу внутрішніх джерел тепла;

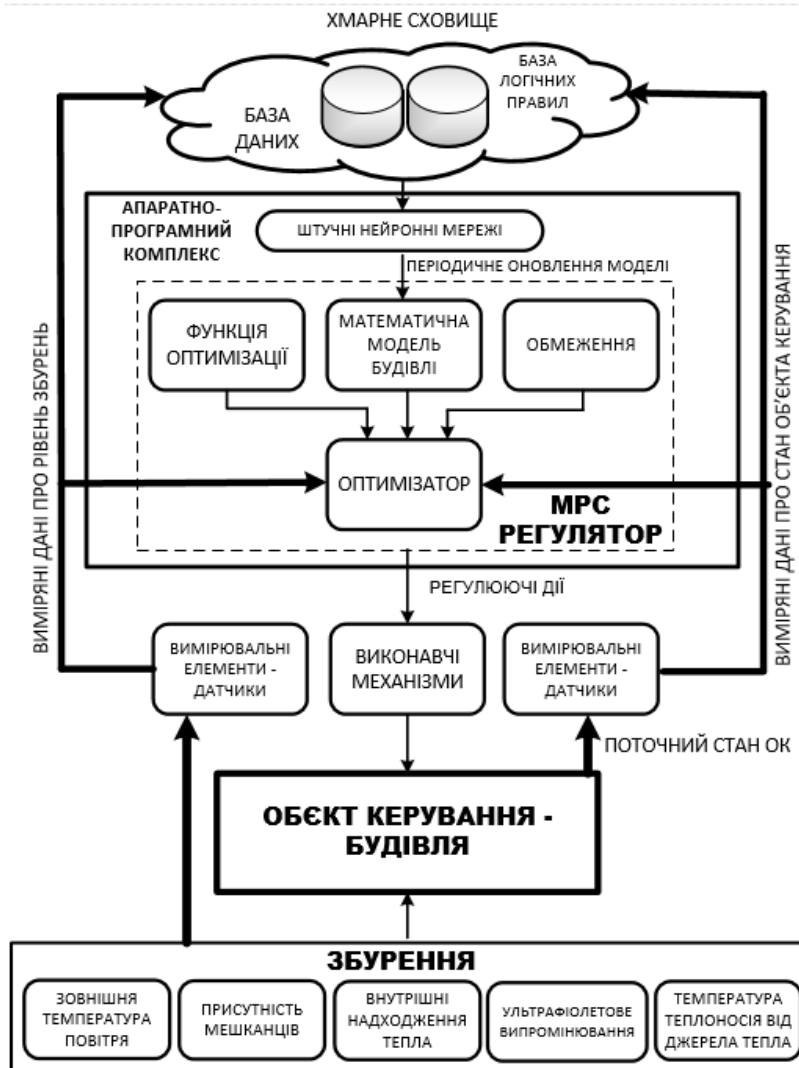


Рис. 1. Спрощена структурна схема пропонованої СЕКТ БАО

2) база логічних правил (БЛП), яка зберігає множину фактів та правил. Останні використовуються для керування фактами при визначенні необхідності коригування поточних параметрів математичної моделі ОК. Окрім декларативної частини БЛП утвореної логічними правилами і фактами вона містить процедурну частину. Процедурна частина БЛП утворена множиною функцій і процедур, що реалізують оптимізаційні алгоритми визначення необхідності коригування поточних параметрів математичної моделі ОК (див. вираз (3));

3) апаратно-програмний комплекс, що містить MPC-регулятор та штучну нейронну мережу (ШНМ). MPC-регулятор здійснює керування температурою повітря в будівлі з автономним опаленням на основі прогнозних моделей (рис. 2). У MPC-регуляторі для вирішення вказаного завдання застосовується оптимізатор, що враховує функцію оптимізації відповідно до виразу (1),

задані обмеження оптимізації відповідно до виразу (2) та математичну модель ОК відповідно до виразу (3). ШНМ в апаратно-програмному комплексі використовується для автоматичного аналізу в режимі реального часу множини даних, що безперервно надходять від датчиків і фактів, які містяться у БД та визначення необхідності коригування математичної моделі ОК у даний момент часу. На основі отриманого рішення від ШНМ у БЛП здійснюється автоматизоване маніпулювання інформацією з метою виявлення такого логічного правила, яке відповідає рішенням, що є оптимальним для даного моменту часу;

4) модуль автоматизованої ідентифікації збурюючих впливів, який реалізований множиною датчиків. Ці датчики призначені для безперервного вимірювання температури повітря зовнішнього середовища, інтенсивності ультрафіолетового випромінювання, температури теплоносія

в системі автономного опалення, визначення наявності мешканців в будівлі;

5) модуль автоматизованої ідентифікації параметрів стану ОК, який реалізований множиною датчиків, що призначені для вимірювання температури повітря, температури підлоги та температури стін в будівлі;

6) модуль виконавчих механізмів, які здійснюють безпосередній вплив на ОК шляхом припинення подачі теплоносія на будівлю чи окремі її приміщення, що в свою чергу спричиняє зниження температури повітря.

Основою функціонування СЕКТ БАО є MPC-регулятор. MPC-регулятор функціонує у складі СЕКТ БАО та реалізує відомий MPC-алгоритм керування, що наведений в роботі [9, с. 4]. Так відповідно до відомого алгоритму MPC-регулятор, використовуючи математичну модель ОК, вирішує оптимізаційну задачу енергоефективного керування температурою повітря, враховуючи такі обмеження, як мінімальне та максимальне значення вихідної величини та максимальну зміну керуючого впливу від одного кроку алгоритму до іншого за рис. 2.

Оптимізаційна задача розв'язується ітераційно шляхом моделювання поведінки ОК на певному проміжку часу (час досягнення певного значення прогнозованої вихідної величини $y(k)$), що в роботі [10, с. 2] називається горизонтом передбачення або горизонтом прогнозування.

Цей проміжок налічує N_p кроків k . На кожному кроці k часу, що дорівнює періоду дискретизації T_s . MPC-регулятор в режимі реального часу, на основі отриманих даних від множини датчиків, оцінює поточний стан ОК. На основі цих даних обчислюється послідовність керуючих дій $u(k)$ на часовому горизонті керування, що відповідає вирішенню задачі оптимізації і залежить від поточного стану ОК. Часовий горизонт керування налічує N_c кроків k , причому він завжди менший за горизонт прогнозування. Далі MPC-регулятор застосовує лише першу визначену керуючу дію, не враховуючи всі наступні. На наступному часовому проміжку процес повторюється.

Таким чином, оптимізація відбувається шляхом багатократного моделювання процесу керування з врахуванням збурень та вихідних керуючих дій з формуванням деякого найкращого рішення на даному етапі керування.

Оптимізаційну функцію J можна представити як зважену квадратичну суму прогнозованих похибок e та змін керуючих впливів Δu , що враховують обидва критерії оптимізації: мінімізацію енерговитрат (енергоспоживання) $K_{ec} \rightarrow \min$ та максимізацію комфортних температурних умов $K_t \rightarrow \max$ (мінімізацію відхилення температури повітря від заданого значення). Причому, з урахуванням суб'єктивності оцінки комфортних температурних умов мешканцями, за комфортні

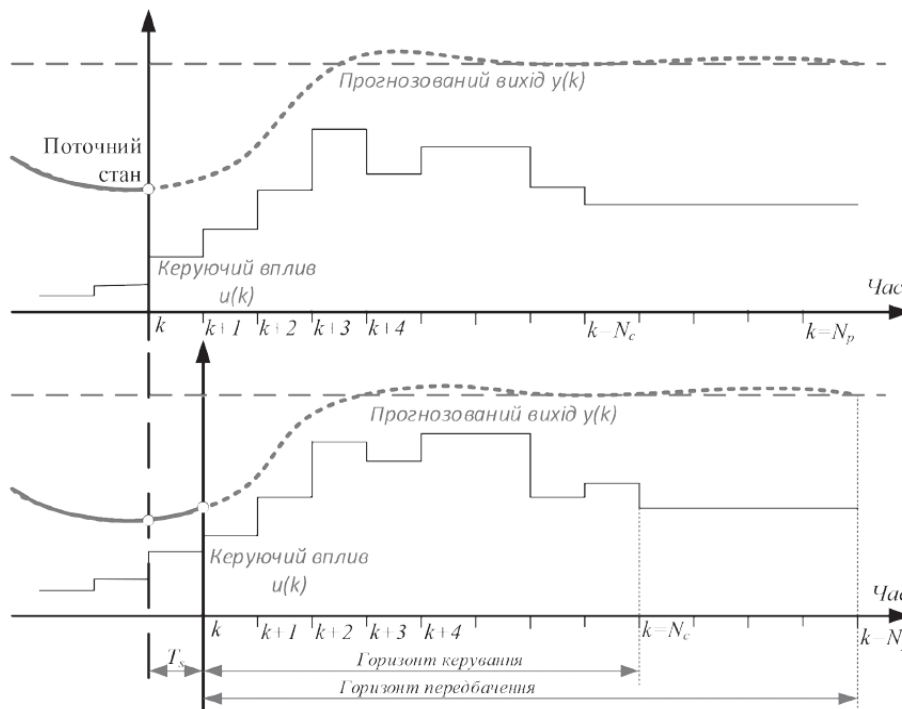


Рис. 2. Схематичне зображення узагальненого принципу роботи MPC-алгоритму

температурні умови можуть бути прийняті значення температури в інтервалі значень від 20 до 22°C включно при вологості повітря від 40% до 60% включно. Функція оптимізації розраховується за відомою формулою (1), наведеною в роботі [11, с. 3]:

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} w_e e_{k+i}^2 + \sum_{i=1}^{N_p-1} w_{\Delta u} \Delta u_{k+i}^2, \quad (1)$$

де J – функція оптимізації;

w_e – ваговий коефіцієнт прогнозованої похибки;

e – прогнозована похибка між значенням вихідної величини $y(k)$ та цільовим значенням вихідної величини $y_{uin}(k)$;

$w_{\Delta u}$ – ваговий коефіцієнт зміни керуючих впливів від кроку до кроку;

Δu – зміна керуючих впливів від одного кроку до іншого.

Розв’язання оптимізаційної задачі обмежене горизонтом прогнозування $k \times N_p$. Коефіцієнти w_e та $w_{\Delta u}$ – це вагові коефіцієнти, які виражають важливість кожної цілі оптимізації в загальному процесі оптимізації. При розв’язанні оптимізаційної задачі на кожному кроці k MPC-регулятор намагається зменшити прогнозовану похибку e між цільовим значенням вихідної величини $y_{uin}(k)$ та прогнозованим $y(k)$ на кожному кроці прогнозування, досягаючи таким чином задачі мінімізації похибки (критерій – максимізація комфорту користувачів), а також мінімізувати зміну керуючих впливів Δu від одного кроку до іншого, забезпечуючи дотримання критерію мінімізації витрати енергії. Також в оптимізаційну задачу включаються певні обмеження, яких має дотримуватись регулятор (наприклад, мінімальна і максимальна температура повітря в будівлі, мінімальна і максимальна потужність джерела енергії, обмеження на величину зміни керуючих впливів тощо. Величина обмежень визначається за наступним виразом:

$$\begin{cases} y_{min}(k) \leq y(k) \leq y_{max}(k), \\ 0 \leq \Delta u \leq \Delta u_{max} \end{cases}, \quad (2)$$

де $y_{min}(k)$ – мінімально можливе значення вихідної величини;

$y(k)$ – фактичне значення вихідної величини;

$y_{max}(k)$ – максимально можливе значення вихідної величини;

Δu – зміна керуючих впливів від одного кроку до іншого;

Δu_{max} – максимально можлива зміна керуючих впливів від одного кроку до іншого.

Отже, на довільному кроці k MPC-регулятор вирішує задачу оптимізації на горизонті прогнозування, враховуючи задані обмеження [11, с. 3].

Ключову роль в роботі MPC-регулятора відіграє оптимізатор, задачею якого є використовуючи наявну математичну модель ОК, враховуючи критерії оптимізації, задані обмеження та поточні і прогнозовані збуджуючі дії розрахувати наступний керуючий вплив на ОК. Він забезпечує, щоб прогнозоване значення вихідної величини $y(k)$ максимально відповідало заданому $y_{zao}(k)$, а керуючий вплив на наступному кроці був максимально оптимальним з точки зору витрат енергії та забезпечення комфорту користувачів. Прогнозована траєкторія зміни $y(k)$ з найменшим J дає оптимальне рішення, а отже, визначає оптимальну послідовність керуючих впливів, яка максимально наблизить значення вихідної величини $y(k)$ до заданого значення $y_{zao}(k)$ з мінімальними витратами енергії.

Таким чином, за допомогою MPC алгоритму досягаються високі показники енергоефективності.

Ключовою особливістю при енергоефективному керуванні температурою повітря в будівлях з автономним опаленням на основі MPC-алгоритму є максимально точне визначення математичної моделі ОК, яка є основою роботи алгоритму керування. Адже для прогнозування поведінки ОК (стан системи $x(k+1)$) MPC-регулятор використовує заздалегідь визначену динамічну модель ОК в просторі станів, що представлена виразом (3), яка враховує поточний стан ОК $x(k)$, можливу дію на нього різноманітних збуджень $d(k)$ (наприклад, зміну температуру повітря ззовні будівлі, вплив інтенсивності сонячного випромінювання, зміну температури теплоносія в системі опалення, присутність людей тощо) та вплив керуючих дій $u(k)$.

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ed(k), \\ y(k) = Cx(k) \end{cases}, \quad (3)$$

де $x(k+1)$ – вектор змінних стану на наступному кроці керування;

k – часовий крок;

A – перехідна матриця стану;

$x(k)$ – вектор змінних стану;

B – перехідна матриця керування;

$u(k)$ – вектор змінних керування;

E – перехідна матриця збудрення;

$d(k)$ – вектор змінних збурення;
 $y(k)$ – вектор вихідних змінних;
 C – перехідна матриця вихідних змінних.

ОК, що являє собою будівлю з автономним опаленням є багатоканальним нелінійним та нестаціонарним об'єктом. На рис. 3 наведено його параметричну схему.

На рис. 3 суцільними лініями із стрілками показано виходи $x(k)$ – змінні стану ОК, відповідний їм вхід $u(k)$, тобто керуючий вплив, та збурення $d(k)$. Крім того, прямими суцільними та пунктирними лініями на рис. 3 показано канали впливу, які відображають функціональну залежність виходів від відповідних входів ОК.

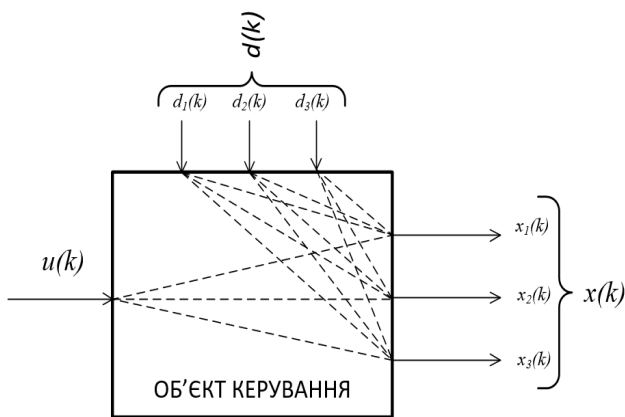


Рис. 3. Параметрична схема об'єкта керування

При подачі на вхід ОК регулюючого впливу $u(k)$ (наприклад, увімкнення нагріву, подача теплоносія від джерела тепла), що формується МРС-регулятором, при одночасній дії множини збурюючих факторів $d(k)$ (наприклад, непередбачувана різка зміна температури повітря на вулиці, вплив сонячної радіації, непередбачувана довготривала присутність людей, непередбачувана різка зміна температури теплоносія від джерела тепла, надходження тепла від внутрішніх джерел тощо) відбувається зміна значень складових вектора змінних стану ОК $x(k)$. Вектор змінних стану $x(k)$ являє собою значення температури повітря в будівлі, температури підлоги та температури стін у момент часу k . Одна зі змінних стану $x_1(k)$ – це поточне значення температури повітря в будівлі в момент часу k . Зміна вихідної величини $y(k)$ відбувається за сигналом регулювання від МРС-регулятора, причому відхилення e поточного значення вихідної величини $y(k)$ від заданого $y_{зад}(k)$ має бути якомога меншим $e \rightarrow 0$ з використанням якомога меншої кількості енергії $K_{ec} \rightarrow \min$.

Для побудови повної математичної моделі ОК передбачається застосування white-box та data-driven методів, які описані в літературі [12] та [7] відповідно. White-box метод пропонується використовувати на підготовчих етапах для розрахунків параметрів математичної моделі конкретної будівлі (теплоізолюючі та теплоакumuлюючі властивості стін та підлоги, її інерційність). Data-driven метод пропонується застосовувати до вже працюючої системи керування для визначення поточних параметрів математичної моделі ОК, зокрема при формуванні перехідних матриць стану A, B, C, E (див. вираз (3)). Важливим етапом data-driven методу є збір в режимі реального часу так званих історичних даних про ОК за допомогою технології IoT (Internet of Things). Зокрема, збираються наступні дані: поточні значення збурюючих факторів, що діють на ОК $d(k)$; значення температури повітря, яка підлягає регулюванню $y(k)$; значення інших параметрів стану ОК $x(k)$, наприклад, температури стін, підлоги тощо.

Ці дані використовуються для визначення поточних параметрів математичної моделі ОК при формуванні перехідних матриць стану A, B, C, E . На наступному етапі вони порівнюються із попередніми значеннями параметрів, так званими історичними значеннями, за допомогою штучної нейронної мережі. У разі необхідності в режимі реального часу здійснюється коригування параметрів математичної моделі за множиною відповідних логічних правил, що зберігаються у відповідній базі знань (БЗ) у хмарному середовищі. В іншому випадку параметри математичної моделі залишаються без змін. Процес коригування параметрів математичної моделі ОК здійснюється безперервно із заданими інтервалами часу.

Таким чином запропонована СЕКТ БАО є новітнім, оригінальним та сучасним засобом для енергоефективного керування температурою повітря в будівлях з автономним опаленням. Вона, на відміну від відомих рішень враховує усю множину чинників, що прямо або опосередковано впливають на температуру повітря у будівлях та забезпечує адаптацію математичної моделі ОК під зміну характеру чи інтенсивності впливу цих чинників. Це дозволить здійснювати енергоефективне керування температурою повітря в будівлях з автономним опаленням для забезпечення комфортних температурних умов при одночасному зниженні енергоспоживання.

Висновки. Розроблено структурну схему СЕКТ БАО, визначено методи та засоби автома-

тизованої обробки даних. Крім того визначено концепцію побудови СЕКТ БАО, яка забезпечує її цілісність з одночасним виокремленням функціонально взаємодіючих підсистем або модулів, що вирішують окремі локальні завдання та у сукупності реалізують глобальну мету функціонування СЕКТ БАО.

Передбачається, що запропонована СЕКТ БАО дозволить здійснювати енергоефективне керування температурою повітря в будівлях з автономним опаленням для забезпечення комфортних температурних умов, точності регулювання температури повітря при одночасному зниженні енергоспоживання.

Список літератури:

1. Eurostat. Database. European Commission. URL: <https://surl.lu/scacat> (дата звернення: 07.05.2025).
2. Здольник М., Степанець, О. Аналіз типових та перспективних структур законів автоматичного керування в основних контурах регулювання індивідуального пункту. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук. 2024. Вип. 2 (65). С. 32–40. <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2024.2.65.4>
3. Kuboth, S., Heberle, F., König-Haagen, A., & Brüggemann, D. Economic model predictive control of combined thermal and electric residential building energy systems. *Applied Energy*, 2019. № 240, P. 372–385.
4. Viot, H., Sempey, A., Mora, L., Batsale, J. C., & Malvestio, J. Model predictive control of a thermally activated building system to improve energy management of an experimental building: Part II-Potential of predictive strategy. *Energy and Buildings*, 2018. № 172, P. 385–396.
5. Chen, Q., Li, N., & Feng, W. Model predictive control optimization for rapid response and energy efficiency based on the state-space model of a radiant floor heating system. *Energy and Buildings*, 2021. № 238, 110832.
6. Lv, R., Yuan, Z., Lei, B., Zheng, J., & Luo, X. Model predictive control with adaptive building model for heating using the hybrid air-conditioning system in a railway station. *Energies*, 2021. № 14 (7), 1996.
7. Joe, J., & Karava, P. A model predictive control strategy to optimize the performance of radiant floor heating and cooling systems in office buildings. *Applied Energy*, 2019. № 245, P. 65–77.
8. Hu, M., Xiao, F., Jørgensen, J. B., & Li, R. Price-responsive model predictive control of floor heating systems for demand response using building thermal mass. *Applied Thermal Engineering*, 2019. № 153, P. 316–329.
9. Захарченко А.С., Степанець О.В. Особливості використання модельно-прогнозуючого керування в автоматизації будівель. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*, 2020. Том 31 (70) Ч. 1 № 6, С. 70–77.
10. Zhou, B., Chikkala, J., & Schmitt, R. A load-adaptive and predictive control of energy-efficient building automation in production environment. *Procedia CIRP*, 2019. № 79, P. 245–250.
11. Баган Т., Бунь В. Предиктивне керування в системах регулювання мікроклімату. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*, 2024. Том 35 (74) № 1, С. 91–96. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/14>
12. Jorissen, F., Picard, D., Boydens, W., & Helsen, L. White-box Model Predictive Control: Optimal Control and System Integration of Heat Pumps. *HPT Magazine*, 2022. № 40 (2), P. 28–31.

Zdorenko S.S., Cherepanka I.Yu. SYSTEM FOR ENERGY-EFFICIENT PREDICTIVE CONTROL OF INDOOR AIR TEMPERATURE IN BUILDINGS WITH AUTONOMOUS HEATING

The article presents a structural diagram of a newly developed System for Energy-Efficient Temperature Control in Buildings with Autonomous Heating (SEETC BAH), based on an adaptive Model Predictive Control (MPC) algorithm and artificial neural networks (ANNs). This system is proposed in the context of the growing global issue of increasing energy prices, which has significantly affected the energy consumption required for heating residential and commercial buildings.

The proposed SEETC BAH is treated as an integrated whole, with clearly defined and functionally interrelated subsystems and modules. Each of these subsystems is responsible for solving specific local tasks, which together contribute to achieving the global goal of energy-efficient air temperature control. This goal involves minimizing energy consumption while simultaneously maximizing indoor thermal comfort for building occupants.

A distinctive feature of the developed system is its mathematical model, which takes into account the full range of disturbing factors that may arise and influence the controlled object (CO). Moreover, the system is capable of automatically adjusting the parameters of this mathematical model in real time without interrupting the operation of the heating system.

The determination and adjustment of model parameters are implemented using both white-box and data-driven approaches. Real-time data collection regarding the state of the CO, disturbances, control actions, and

other relevant variables is enabled by IoT technology. These data are stored in a cloud environment, where they are analyzed by the ANN and subsequently used for real-time model refinement.

The application of the SEETC BAH is expected to provide timely responses to a wide range of disturbances differing in physical nature and impact, improve the accuracy and speed of temperature regulation, significantly reduce energy consumption, and maintain high levels of thermal comfort for building occupants

Key words: *Model Predictive Control, MPC, predictive model, artificial neural networks, automatic air temperature regulation, energy-efficient control, automation system design.*