

Захарченко А.С.

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

Степанець О.В.

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

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗУЮЧОГО КЕРУВАННЯ В АВТОМАТИЗАЦІЇ БУДІВЕЛЬ¹

У статті розглядається питання використання підходу модельно-прогнозного керування (*Model Predictive Control – MPC*) для оптимізації складних процесів, які відбуваються в будівлі. Було розглянуто принцип роботи автоматичної системи керування будівлею з використанням MPC та основні параметри, що використовує MPC, їх фізичний зміст і діапазон їх можливих значень. Також було описано, які види обмежень можуть входити в задачу оптимізації з метою забезпечення комфорту користувачів, фізичні обмеження компонентів і технологічні параметри обладнання чи приміщення.

Значну частину уваги було приділено будівлі як об'єкту управління, що включає огляд сучасного стану автоматизації інженерних систем. У роботі було визначено види цілей управління будівлею, що включають мінімізацію витрат, енергії, викидів парникових газів, забезпечення комфорту користувачів і максимізацію частки енергії з відновлюваних джерел; описано принцип їх включення до цільової функції задачі оптимізації MPC. Оскільки однією з основних функцій інженерних систем будівлі є забезпечення якості повітря та теплового комфорту користувачів, значну увагу було приділено використанню індексів «прогнозована середня оцінка якості повітряного середовища» (*PMV*) та «прогнозований відсоток незадоволених температурою середовища» (*PPD*) у задачах оптимізації, що можуть надати більш точну інформацію щодо теплових відчуттів людини порівняно з використанням температурних зон комфорту. Ми також розглянули особливості моделювання будівлі та її інженерних систем як центрального компоненту MPC-підходу та потенціал використання концепції *building information modelling (BIM)* для побудови моделей, спираючись на обробку всієї архітектурно-конструкторської, технологічної, економічної та іншої інформації про будівлю.

Ключові слова: система автоматизації будівлі, АСМУБ, модельно-прогнозне керування, МПК, моделювання, оптимальне керування, енергоефективність.

Постановка проблеми. Питання автоматизації інженерних систем як у житлових, так і в комерційних і виробничих будівлях постає дедалі частіше. Причиною цього є вищі вимоги до комфорту, безпеки людини та висока вартість обслуговування будівлі. Перегляд експлуатаційних витрат вказує на можливість економії за оптимізації та узгодження роботи обладнання, що відповідає принципам розумного споживання ресурсів і сприяє підвищенню енергоефективності.

Будівля є складним об'єктом із погляду обслуговування, оскільки має багато пов'язаних інженерних систем, зовнішніх і внутрішніх впливів, які складно передбачити (поведінку людей, погодні умови, зовнішні водо- та теплопостачання тощо).

Проте їх інтеграція має найбільший потенціал і привертає інтерес науковців і безпосередньо виробників обладнання. Узгодження поведінки структурних частин системи та їхніх спільних дій на кліматичні параметри у приміщеннях має забезпечуватися як у поточний момент часу, так і у прогнозі на певний період, що дозволяє оптимізувати енерговитрати.

Автоматизація будівель та інтеграція інтелектуальних функцій стає популярною у світі, тому існує велика кількість напрацювань у цій галузі, з якими можна ознайомитися в зарубіжних виданнях і наукових роботах. Основною метою більшості з них є розробка стратегій та інструментів керування для забезпечення максимального комфорту, енергоефективності, економічності й екологічності. Оскільки зазвичай ці критерії мають протилежну дію, потрібно знаходити між ними компроміс.

¹ Стаття підготовлена в рамках виконання проекту «Розроблення техніко-технологічних схем та систем керування теплозабезпечення населених пунктів на основі термодинамічних підходів» (номер державної реєстрації НДР 0120U102168).

Одним із підходів, які можуть вирішити таку задачу, є використання керування із прогнозуючими моделями (Model Predictive Control – MPC), що дозволить оптимізувати складні процеси, які відбуваються в будівлі. Використання модельного прогнозування поведінки системи дає можливість оптимізувати керуючі дії та передбачити динаміку поведінки системи, щоб досягти оптимальних показників не лише в поточний момент, а й на горизонті планування.

1 Модельно-прогнозне керування

1.1 Схеми роботи MPC

Керування із прогнозуючими моделями (Model Predictive Control) – сучасний підхід до керування динамічними системами, який дозволяє вирішувати завдання оптимізації, що задовольняють ряд обмежень. Оптимізація відбувається ітераційно на основі прогнозів поведінки об’єкта для певного проміжку часу, який називається горизонтом часу [1, с. 246]. Принцип MPC полягає в оптимізації стану системи за визначених критеріїв оптимальності за допомогою динамічної моделі процесу, прогнозі збурень, що можуть діяти на цей процес за умов заданих обмежень. За допомогою MPC досягаються високі показники ефективності роботи в широкому спектрі застосувань.

У разі будівлі підхід MPC дозволяє поєднувати прогнози майбутніх збурень системи (наприклад, зміни погоди, рівня сонячної радіації, присутності людей) і задані вимоги до управління (наприклад, межі комфорту користувачів), щоб передбачити потребу будівлі в енергії й оптимізувати теплову поведінку відповідно до обраних цілей керування [2, с. 20]. Оптимізація відбувається шляхом багатократного моделювання процесу, його збурень і вихідних керуючих дій, що підлягають оптимізації

[3, с. 8], і визначенні послідовності керуючих впливів для забезпечення максимального збігу прогнозованих значень виходу до оптимальної рекомендованої траєкторії.

На рис. 1 представлена типова схема керування будівлею з використанням MPC. Контур складається з будівлі, кліматичні параметри якої ми підтримуємо. На динамічну поведінку системи діють зовнішні та внутрішні неконтрольовані впливи $d(k)$, наприклад, зміна погодних умов, заповненість людьми, коливання температури в мережі теплопостачання тощо. Їх величина та динаміка може прогнозуватися за допомогою відповідних моделей або зовнішніх сервісів, як у випадку погоди, і використовуватися для вибору найкращої стратегії керування (послідовності керуючих впливів), отриманої шляхом вирішення задачі числової оптимізації.

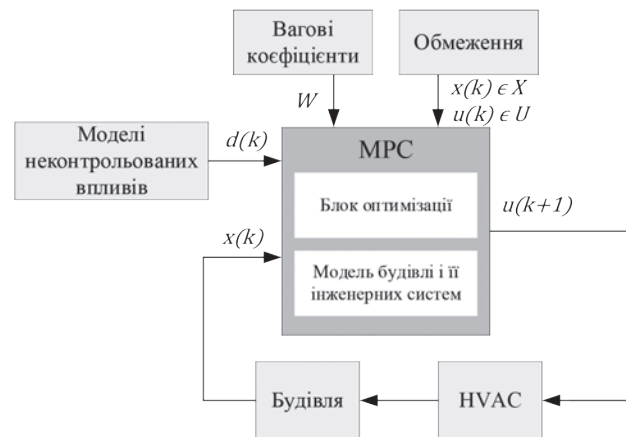


Рис. 1. Структура системи з MPC регулятором

Структура MPC і, зокрема, функції оптимізації залежить від глобальних цілей, поставлених

Таблиця 1

Перелік змінних, що використовуються в цільовій функції

Позначення	Значення	Фізична суть	Одиниці
x	Вектор стану системи	Температура структурних елементів	[K]
y	Вектор виходів	Температура у приміщенні	[K]
u	Вектор керуючих дій	Теплові потоки у приміщенні	[W]
k	Номер кроку	Дискретний індекс, що відображає рух вздовж горизонту передбачення	$k = 1, 2, 3, \dots$
d	Збурення	Температура навколишнього середовища, сонячна радіація тощо	[K, W]
ref	Завдання	Опорні траєкторії або задані точки	[–]
W	Вагові коефіцієнти (матриці)	Важливість кожної цілі	[–]
N_p	Горизонт прогнозування	Прогнозований майбутній проміжок часу	[–]
N_c	Горизонт керування	Оптимізований майбутній проміжок часу	[–]
$u(k)-u(k-1)$	Приріст входів вздовж горизонту	Показник підсилення керування	

перед системою. До основних цілей можуть входити комфорт користувачів, енергозбереження та інші, описані в наступному розділі цієї статті. Загалом вирішення задачі оптимізації відбувається за рахунок мінімізації вартісної функції в дискретній формі (1), яка використовується для перетворення багатоцільової задачі на скалярну, що відбувається шляхом введення вагових коефіцієнтів [4, с. 26112, с. 20].

$$\min \sum_{k=1}^{N_p} \left[W_x x(k) - x(k)_{ref_{n_x}} + W_y y(k) - y(k)_{ref_{n_y}} \right] + \sum_{k=0}^{N_p-1} \left[W_u u(k) - u(k)_{ref_{n_u}} + W_{u'} u(k) - u(k-1)_{n_u} \right] \quad (1)$$

Пояснення величин, що використовуються в (1), наведені в табл. 1 із представленням фізичної суті й одиниць виміру [5, с. 5; 6, с. 4].

На кожному кроці k спостерігається поведінка системи, інформація про яку збирається і використовується для оновлення динамічної моделі системи. Вирішення задачі мінімізації цільової функції за умов обмежень у межах горизонту прогнозування дає оптимальну послідовність керуючих дій u^* і відповідає траєкторії руху оптимального керування, що враховує вимоги задачі згідно з ваговими коефіцієнтами вартісної функції (1). Після подачі на об'єкт керуючої дії $u^*(k)$ відбувається переміщення на один крок вперед і зсув горизонту. Далі процедура оптимізації повторюється з новими даними, що реалізує принцип відступаючого горизонту (рис. 2) [4, с. 2610; 5, с. 5; 2, с. 21; 7, с. 55–56]. Варіації формулювання цільової функції зумовлені особливостями задачі, яка вирішується.

MPC має свої параметри налаштування, що впливають на загальну поведінку системи, представлені на рис. 2:

- Поточний крок k , який використовується алгоритмом.

- Період вибірки T_s – час, упродовж якого розрахована керуюча дія залишається сталою. Фактично це різниця часу між ітераціями.

- Горизонт прогнозування (N_p) – кількість кроків, для яких MPC моделює поведінку об'єкта.

- Горизонт керування (N_c) – кількість кроків, для яких MPC розраховує оптимальне управління.

T_s повинен бути підібраним таким чином, щоб бути достатньо великим для виконання обчислень, передачі та реалізації наступної керуючої дії. Будівлі є досить повільними динамічними системами, в яких T_s варіюється від 15 до 180 хвилин [5, с. 7]. Вибір довжини горизонтів має вагоме значення для практичної реалізації MPC. Горизонт

керування має бути меншим (до 20%) за горизонт прогнозування, який може тривати від до 48 годин [5, с. 7].

Некоректне налаштування MPC може призвести до коливальної поведінки, що виправляється налаштуванням вагових коефіцієнтів, переглядом або введенням обмежень на швидкість зміни виходів регулятора [2, с. 8].

2.3. Обмеження

Можливість включення фізичних обмежень у задачу оптимального керування відносно вхідних і вихідних змінних є однією з вагомих переваг використання MPC [2, с. 19]. Існують різні типи обмежень [1, с. 247], що можуть бути сформульовані у вигляді рівності чи нерівності. Виділяють жорсткі обмеження, виконання яких є обов'язковим, і м'які, які представляють гнучку границю і виконання яких не є строго обов'язковим. Останні формулюються за допомогою слабкої змінної (slack variable), що може переміщувати границю в межах певної величини відповідно до вагового коефіцієнта цільової функції (1): чим вища вартість елемента, куди входить слабка змінна, тим жорсткіше рахуються обмеження. М'які обмеження використовуються для забезпечення стабільності та збіжності управління. З погляду часу, обмеження можуть бути постійними або змінюватися в часі, наприклад, за графіком, як реакція на певні події тощо [2, с. 19; 5, с. 8].

Із практичного погляду, обмеження використовуються для підтримання параметрів у бажаному діапазоні, що може бути використано для забезпечення комфорту користувачів відповідно до технологічного призначення обладнання чи приміщення, фізичними обмеженнями компонентів системи керування тощо. Останні можуть означати обмеження потужності встановленого обладнання, положення клапанів, швидкості їх зміни, виходу на режим обладнання чи затримку між включеннями тощо і задаються у вигляді жорстких обмежень.

2. Модель будівлі для MPC

2.1. Сучасний стан проблеми

Експлуатація будівель і її інженерних систем тісно пов'язана із застосуванням систем автоматизації для забезпечення кліматичних умов, що відповідають комфортним значенням для людини чи відповідним технологічним параметрам виробництва. Оптимізація регулювання кліматичних параметрів у приміщеннях – проблема, яка не має єдиного рішення, оскільки кожен об'єкт має унікальні характеристики та вимоги до параметрів, як і цілі в керуванні, що закладаються у процесі проектування системи. Загалом будівлі та примі-

щення можна поділити за призначенням на виробничі, офісні та житлові. У кожному з варіантів є свої особливості до побудови системи автоматизації інженерних систем будівлі.

Сьогодні серед рішень у регулюванні кліматом широко розповсюджене ручне керування, використання релейних контролерів та управління на основі правил (Rule Based Control – RBC) [2, с. 4; 3, с. 2]. Використання плавного регулювання за допомогою ПД закону керування реалізуються в більш сучасних будівлях, де системи опалення й охолодження оснащені цифровим керуванням. Проте зазвичай керування інженерними системами відбувається незалежно, вони не мають зв'язку між собою. Таким чином відсутня оптимізація й узгодження роботи на рівні усїєї будівлі.

Інтеграція інженерних систем управління в єдину автоматичну систему моніторингу й управління будівлею (АСМУБ) надає значних переваг при побудові енергоефективної будівлі, управління якою може здійснюватися з допомогою технологій штучного інтелекту, нечіткої логіки, генетичних алгоритмів, MPC і їх поєднанням [2, с. 4].

Особливістю будівлі як об'єкта керування полягає в тому, що вона є комплексною соціотехнологічною системою, яка значною мірою впливає на поведінку об'єкта керування.

2.2. Цілі управління будівлею

Для вибору структури системи автоматизації, методів, алгоритмів і технологій, що застосовуються для управління будівлею, слід насамперед визначити, який ефект і цілі маються на увазі. Найчастіше розглядаються такі критерії, як комфорт, вартість обслуговування й енергоефективність, причому останні два часто ототожнюють.

Цілі, що їх потрібно досягти у процесі управління, закладаються при побудові функції оптимізації та становлять певний показник ефективності, який має бути мінімізованим. При постановці двох і більше цілей задача перетворюється на багатоцільову оптимізацію.

Мінімізація енергії

Розрахунок оптимального плану експлуатації систем опалення, охолодження та іншого енергоспоживаючого обладнання відбувається на основі прогнозів погоди, неконтрольованих збурень

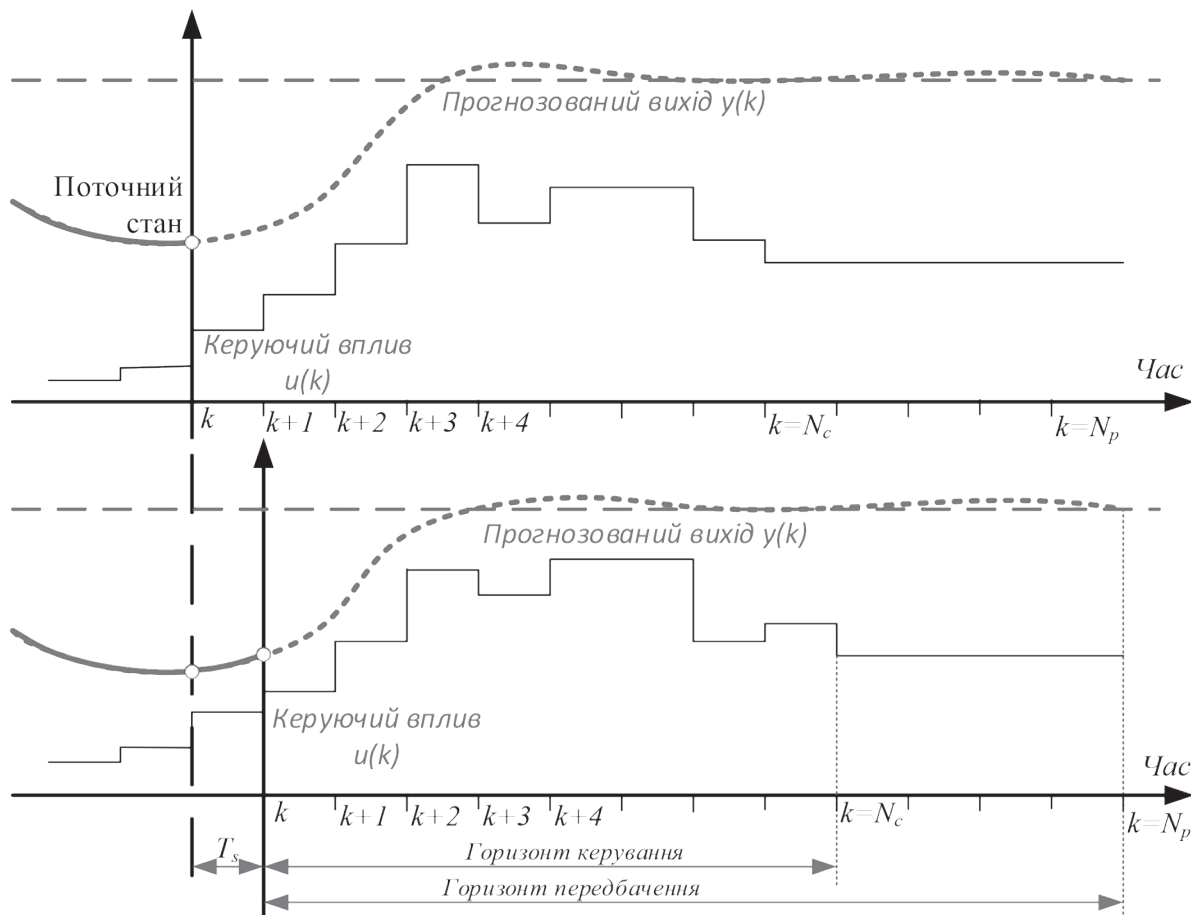


Рис. 2. Принцип роботи MPC

тощо з огляду на мінімізацію сумарної спожитої енергії з оцінкою потужності й ефективності структурних елементів і врахуванням обмежень, накладених на систему [8, с. 1192].

Задоволення комфорту користувачів

Однією з головних функцій систем ОВіК у будівлях є забезпечення якості повітря та теплового комфорту мешканців чи користувачів. Підтримання оптимальних показників може підвищити продуктивність роботи та знизити рівень захворюваності людей.

Одним із поширеніших варіантів забезпечення цього показника є підтримка температурного режиму будівлі в межах певного діапазону, яка називається зоною комфорту [4, с. 2611; 9, с. 2509]. Проте очевидно, що керування тільки температурою не забезпечить максимальний рівень комфорту. З цією метою були розроблені індекси «прогнозована середня оцінка якості повітряного середовища» (PMV), дозволяє оцінити теплові відчуття для організму та «прогнозований відсоток незадоволених температурою середовища» (PPD), що визначає відсоток людей, котрі відчують тепловий дискомфорт. PPD можуть бути отримані з PMV [10, с. 5].

Індекс PVM є складною нелінійною залежністю, що враховує велику кількість параметрів, таких як швидкість обміну речовин, опір теплопередачі одягу, швидкість і температура повітря, швидкість руху повітря та ін. Значення індексу є безрозмірним і становить шкалу значень від -3 до 3, де нульове значення відповідає найбільш комфортним умовам [10, с. 5].

Застосування PMV у MPC, хоч і надає більш детальне уявлення про теплові відчуття людини, має свої недоліки. Використання нелінійних залежностей у задачах оптимізації вимагає великої кількості обчислювальних ресурсів. Одне з рішень цієї проблеми – використання спрощеної ліанеризованої версії індекса PMV, що зменшує її точність. В іншому разі введення нелінійної залежності в цільову функцію потребує використання нелінійних методів оптимізації, які не можуть гарантувати, що процес досягне оптимального рішення [2, с. 21].

Методи обрахування індексів PMV і PPD детально описані у стандарті ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 [10, с. 6].

Мінімізація витрат

Мінімізація енерговитрат не обов'язково призводить до мінімізації вартості обслуговування. Вираження економічної цілі може бути сформульованим шляхом перетворення використаної

енергії в її грошову вартість [11, с. 12028; 12, с. 332]. За умов варіації тарифів на енергоресурси доцільно забезпечити акумуляцію енергії впродовж «дешевших» періодів із її подальшим використанням. Оскільки ціни на паливо мають більш-менш повільну динаміку, цей критерій стосується переважно електроприладів і практично може бути застосований при використанні двочи тризонних тарифів на електроенергію або для виробничих приміщень за умов вільного ринку електроенергії.

Одним із варіантів цієї цілі є зміщення використання енергії з періодів пікових навантажень електромережі із продовженням підтримання рівня теплового комфорту в будівлі. Ця стратегія керування є досить простою в реалізації, але не є оптимальною ні з погляду енергоефективності, ні з погляду економічності [13, с. 1284], проте це позитивно впливає на стабільність електромережі, тому, можливо, в майбутньому такі рішення будуть заохочуватися державою.

Мінімізація викидів парникових газів

Така ціль може обиратися для екологічної мотивації користувача до зменшення забруднюючих викидів. У такому разі ціль формулюється введенням коефіцієнту викидів залежно від виду і кількості енергії, яка використовується. Задача мінімізації викидів може відповідати задачі мінімізації енергії за наявності тільки викопних джерел енергії [5, с. 6–7].

Максимізація частки використання відновлювальних джерел енергії

Може використовуватися за наявності відновлювальних джерел енергії таким чином, щоб максимально пристосувати систему до їх використання, вводячи вагові коефіцієнти для різних доступних джерел енергії [5, с. 7].

2.3. Моделювання будівель

Функція моделювання зазвичай згадується як центральний компонент MPC підходу. Тому цей напрям дослідження є дуже актуальним і має велику кількість робіт, спрямованих на розробку більш точних і надійних цифрових моделей.

Загалом метою моделювання є вивчення поведінки та продуктивності фізичного пристрою чи системи та визначення характеристик або прогнозування реальної системи. Підготовка моделі для систем автоматичного керування є одним із найбільш складних і трудомістких процесів.

Моделювання будівлі може здійснюватися для нового об'єкта на етапах проектування і будівництва або для вже наявних будівель у межах реконструкції чи оновлення системи автоматизації.

Для будівель, що вже існують, розробити точну модель відразу дуже складно, тому вона має проходити процес калібрування протягом якось часу. Це пов'язано з відсутністю повної інформації про будівлю, особливості її геометричної форми, матеріалів, можливу зміну їх властивостей з часом, наявність тріщин в конструкції тощо.

При створенні моделей для нової будівлі значну частину інформації можна отримати, використовуючи концепцію *building information modelling* (BIM), під якою розуміється процес розробки інтелектуальної моделі, що поєднує роботу спеціалістів – архітекторів, інженерів і будівельників [14, с. 1–2]. Початково концепція BIM розглядалася для поліпшення співпраці між різними учасниками процесу під час проектування та будівництва, але швидко включилася до суміжних сфер, застосовуючись протягом усього життєвого циклу будівлі та забезпечуючи потужне міждисциплінарне співробітництво [14, с. 1–3]. BIM може впроваджуватися на різних етапах життєвого циклу як для нових, так і для існуючих будівель і передбачає збір і комплексну обробку всієї архітектурно-конструкторської, технологічної, економічної та іншої інформації про будівлю, починаючи від задуму і закінчуючи демонтажем будівлі, дозволяючи інтегрувати інформацію з різних дисциплін в одну модель [14, с. 3]. Результат роботи BIM – це статична інформаційна модель, що не підтримує динамічне моделювання, але містить велику частину інформації, потрібної MPC моделі. Тому, незважаючи на значні досягнення у сфері BIM, процес перенесення інформації більшою мірою є ручним [5, с. 10].

MPC використовує декілька моделей будівлі, її інженерних систем і зовнішніх збурень. Моделі будівлі включають термодинамічні властивості стін, підлоги, стелі, даху, вікон і дверей, враховуючи процеси теплопередачі, конвективного теплообміну між внутрішнім і навколишнім середовищем і сонячного випромінювання [15, с. 254–25; 16, с. 2–3]. Збурення та інженерні системи можуть мати нелінійні елементи, що ускладнює їх моделювання та використання в алгоритмах MPC [17, с. 5–6].

Значний вплив на поведінку системи має модель заповнення будівлі, де можна виділити два випадки. Розглядаючи виробничі й офісні будівлі, модель заповнення можна сформулювати відпо-

відно до робочого графіку, виду діяльності, технологічних обмежень, плану виробництва тощо. Для житлової будівлі її заповнення має більш хаотичний характер і може бути врахованим за умови свідомої взаємодії людини із системою автоматизації. Методи автоматичної оцінки сьогодні є актуальним питанням досліджень [18, с. 377–378].

Моделі можна поділити на три типи:

- «білий ящик», що ґрунтується на фізичному описі системи і потребує глибоких знань для побудови такої системи;

- «чорний ящик» або емпірична модель, ґрунтується на ідентифікації параметрів моделі шляхом аналізу історичних даних поведінки об'єкта;

- «сірий ящик» – модель, яка поєднує властивості білого та чорного ящика, що, зберігаючи фізичний опис системи, може використовувати методи ідентифікації для визначення її параметрів.

Всі три можуть використовуватися для моделювання в MPC відповідно до завдань, які виконує система керування.

Висновки. Стаття розглядає питання впровадження підходу MPC-управління до системи автоматизації будівлі, акцентуючи увагу на системах теплозабезпечення та підтримання мікроклімату у приміщеннях.

Перевагою використання MPC є можливість врахування ряду обмежень і використання моделювання для прогнозування майбутньої поведінки системи та неконтрольованих збурень у межах горизонту прогнозування у процесі вирішення задачі оптимізації вихідних сигналів керування для періоду горизонту керування. Така система має можливість передбачити певну динаміку в поведінці будівлі чи зовнішніх збурень і попередити їх вплив, на відміну від систем, що використовують ПД-регулювання, що можуть реагувати тільки на зростання похибки керування.

Також MPC має можливість формування цільової функції оптимізації, яка може враховувати декілька критеріїв і їх пріоритетність (ваговий коефіцієнт) у вирішенні задачі оптимізації для отримання бажаного ефекту від роботи системи автоматизації.

Водночас важливим недоліком використання MPC є саме потреба точних моделей, розробка яких потребує значних трудовитрат і більшої потужності в обчисленнях.

Список літератури:

1. Zhou B., Chikkala J., Schmitt R. A load-adaptive and predictive control of energy-efficient building automation in production environment. *Procedia CIRP*. 2019. Volume 79, P. 245–250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.058>.

2. Serale, G., Fiorentini, M., Capozzoli, A., Bernardini, D. Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities. *Energies*. 2018. № 11 (631). 35 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11030631>.
3. Mayer, B., Killian, M., Kozek, M. Hierarchical Model Predictive Control for Sustainable Building Automation. *Sustainability*. 2017. 20 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9020264>.
4. Carli R., Cavone G., Dotoli M., Epicoco N., Scarabaggio P. Model predictive control for thermal comfort optimization in building energy management systems. *IEEE International Conference on Systems*. 2019. P. 2608–2613. DOI: <https://doi.org/10.1109/SMC.2019.8914489>.
5. Bolt, P., Füchslin, R., Jaeger, C., Maier, O., Ritzmann, R., Zierbart, V. Model predictive control for building automation. *EuroSun 2018 Conference Proceedings*. 2018. P. 1330–1341. DOI: <https://doi.org/10.18086/eurosun2018.11.05>.
6. Bolt, P., Füchslin, R., Jaeger, C., Maier, O., Ritzmann, R., Zierbart, V. Model predictive control for building automation. *EuroSun 2018 Conference Proceedings*. 2018. P. 1330–1341. DOI: <https://doi.org/10.18086/eurosun2018.11.05>.
7. Надеждин И.С., Горюнов А.Г. Системы управления нестационарным объектом на основе MPC-регулятора и ПИД-регулятора с нечеткой логикой. *Управление большими системами*. Вып. 75. Ст. 50–75.
8. Zucker G., Ferhatbegovic T., Bruckner D. Building automation for increased energy efficiency in buildings. 2012 *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 2012. P. 1191–1196. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISIE.2012.6237258>.
9. Tang R., Wang S., Xu L. An MPC-Based Optimal Control Strategy of Active Thermal Storage in Commercial Buildings during Fast Demand Response Events in Smart Grids. *Energy Procedia*. 2019. Vol. 158, P. 2506–2511. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.395>.
10. ДСТУ Б EN ISO 7730:2011. Ергономіка теплого середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту (EN ISO 7730:2005, IDT). [Чинний від 2013-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2012. 74 с.
11. Abreu A., Bourdais R., Guéguen H. Inter-Layer Interactions in Hierarchical MPC for Building Energy Management Systems. *IFAC-PapersOnLine*. 2017. Vol. 50, Issue 1. P. 12027–12032. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2136>.
12. Hilliard T., Swan L., Qin Z. Experimental implementation of whole building MPC with zone based thermal comfort adjustments. *Building and Environment*. 2017. Vol. 125. P. 326–338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.003>.
13. Ma J.,S. Qin J., Salsbury T. Application of economic MPC to the energy and demand minimization of a commercial building. *Journal of Process Control*. 2014. Vol. 24. Issue 8. P. 1282–1291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2014.06.011>.
14. Christiana P., Angeliki K., Paris A. F. Building information modelling applications in smart buildings: From design to commissioning and beyond A critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 265. 13 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121766>.
15. Lehmann B., Gyalistras D., Gwerder M., Wirth K. Intermediate complexity model for Model Predictive Control of Integrated Room Automation. *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 58. P. 250–262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.007>.
16. Martincevic A., Filip R., Vinko L., Mario V. Comfort control in buildings with adherence to the required thermal energy input in zones. 2017 *IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics*. 2017. P. 1477–1482. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001464>.
17. Rastegarpour S., Gros S., Ferrarini L. MPC approaches for modulating air-to-water heat pumps in radiant-floor buildings. *Control Engineering Practice*. 2020. Vol. 95. 10 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2014.06.011>.
18. Killian M., Kozek M. Short-term occupancy prediction and occupancy based constraints for MPC of smart homes. *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. 52. Issue 4. P. 377–382. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.239>.

Zakharchenko A.S., Stepanets O.V. FEATURES OF THE USE OF MODEL-PREDICTIVE CONTROL IN BUILDING AUTOMATION

This article discusses the use of the Model Predictive Control (MPC) approach to optimise the complex processes that take place in a building. The principle of the automatic building management system using MPC was discussed and the main parameters used by MPC, their physical meaning and the range of possible values were considered. The types of constraints may also be part of the objective of optimisation to ensure user comfort, physical constraints on components and process parameters of the equipment or room.

A great deal of the time was focused on the building as a control object, including an overview of the current status of automation of engineering systems. The paper identified the types of building management objectives that include minimising costs, energy, greenhouse gas emissions, user comfort and maximising the share of energy from renewable sources, and questioned the principle of their integration into the target function of the MPC optimization task. Since one of the main functions of the building's engineering systems is to provide air quality and thermal comfort to users, a strong weight has been given to the use of the "predicted mean vote" indexes. (PMV) and "predicted percentage of dissatisfied" (PPD) in optimisation tasks, which can provide more accurate information about a person's thermal senses than using temperature comfort zones. At the end, we reviewed the features of building and its engineering systems as a central component of the MPC approach and the potential for building information modelling (BIM) to build models based on the processing of all architectural, technological, economic and other building information. Modelling of already existing buildings may have its unique features due to possible variations in geometric form, materials and their characteristics with aging etc. and additional calibration concerning the real object is required to ensure the temporal accuracy of the resulting model.

Key words: building automation system, BACS, Model Predictive Control, MPC, modelling, optimal control, energy efficiency.