

С. М. КОЛЕСНИК, В. А. КІОСАК
Одеська державна академія будівництва та архітектури

МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕНЬ

Проблема забезпечення належної якості повітря в приміщеннях як вагомий чинник, що впливає на когнітивні функції, стан здоров'я та комфорт людини, широко висвітлена в наукових дослідженнях з використанням різних наукових підходів і методів. Підвищення інтенсивності вентиляції сприяє покращенню якості повітря та продуктивності, проте супроводжується зростанням енергоспоживання, що зумовлює необхідність пошуку компромісу між енергоефективністю та якістю внутрішнього середовища. Дослідження підтверджують, що для розрахунку енергетичних витрат і умов експлуатації будівель треба враховувати вплив на системи фільтрації та вентиляції кліматичних та конструктивних факторів.

В роботі показано, що традиційні централізовані підходи до оптимального управління є недостатньо ефективними в умовах динамічної зміни параметрів внутрішнього середовища та поведінки користувачів. Обґрунтовано доцільність застосування розподілених методів управління, що базуються на сучасних сенсорних мережах та інтелектуальних системах автоматизації будівель.

Запропоновано мультиагентний розподілений підхід до оптимального управління багатозональними системами вентиляції, який передбачає декомпозицію складної задачі оптимізації на низку локальних підзадач. Для їх розв'язання використано систему взаємодіючих агентів, що відповідають окремим приміщенням та припливно-витяжній установці, а також центрального координуючого агента. У межах підходу враховано показники якості повітря та енергоспоживання шляхом формування інтегрованої цільової функції для оптимізації об'ємів вентиляційного повітря.

На основі агент-орієнтованого моделювання проведено дослідження ефективності запропонованого підходу за різних зовнішніх умов із порівнянням із базовим та централізованим управлінням. Результати моделювання підтвердили підвищення ефективності управління, зниження енергетичних витрат при збереженні належного рівня ІАQ, а також високу масштабованість і гнучкість системи.

Отримані результати свідчать про перспективність використання мультиагентних підходів для оптимізації функціонування сучасних інженерних систем будівель.

Ключові слова: *якість повітря, вентиляція, енергоефективність, мультиагентні системи, розподілене управління, комфорт будівлі, агентно-орієнтоване моделювання, системи управління.*

S. M. KOLESNYK, V. A. KIOSAK
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

MODELLING OF INDOOR AIR QUALITY

The issue of ensuring adequate indoor air quality, as a significant factor influencing human cognitive functions, health and comfort, has been extensively covered in scientific research using various scientific approaches and methods. Increasing ventilation rates improves air quality and productivity, but is accompanied by higher energy consumption, necessitating a balance between energy efficiency and indoor environmental quality. Research confirms that, when calculating energy consumption and operating conditions for buildings, the impact of climatic and structural factors on filtration and ventilation systems must be taken into account.

The paper demonstrates that traditional centralised approaches to optimal control are insufficiently effective under conditions of dynamic changes in indoor environment parameters and user behaviour. The feasibility of applying distributed control methods based on modern sensor networks and intelligent building automation systems is substantiated.

A multi-agent distributed approach to the optimal control of multi-zone ventilation systems is proposed, which involves decomposing a complex optimisation problem into a series of local sub-problems. To solve these, a system of interacting agents corresponding to individual rooms and the supply and exhaust unit, as well as a central coordinating agent, is used. The approach takes into account air quality and energy consumption indicators by forming an integrated objective function for optimising ventilation air volumes.

Based on agent-oriented modelling, the effectiveness of the proposed approach was investigated under various external conditions, with a comparison to baseline and centralised control. The modelling results confirmed improved control efficiency, reduced energy consumption whilst maintaining an adequate level of IAQ, as well as the system's high scalability and flexibility.

The results obtained indicate the prospects for using multi-agent approaches to optimize the functioning of modern engineering construction systems.

Keywords: *air quality, ventilation, energy efficiency, multi-agent systems, distributed control, building comfort, agent-based modelling, control systems.*

Постановка проблеми

У системах вентиляції існує проблема компромісу між забезпеченням прийнятної якості повітря в приміщенні (IAQ) та мінімізацією енергоспоживання. Сьогодні її часто вирішують за допомогою централізованого оптимізаційного підходу. Однак динамічні умови експлуатації систем вентиляції та мінливі очікування користувачів роблять централізоване оптимальне управління недостатньо гнучким та ефективним у реагуванні на цю динаміку та зміни. Тим часом розподілені схеми встановлення мереж датчиків і управління створюють відповідні платформи для застосування розподіленого оптимального управління. Для вирішення поставленої проблеми запропонований мультиагентний розподілений підхід для оптимального управління багатозональними системами вентиляції з урахуванням IAQ та енергоспоживання шляхом оптимізації об'ємів вентиляційного повітря в окремих приміщеннях та припливно-витяжній установці (ПВУ). Цей розподілений підхід розкладає складну оптимізаційну задачу на ряд простих оптимізаційних задач. Розподілені агенти, що відповідають окремим приміщенням та ПВУ, призначаються для вирішення цих декомпонованих задач. Центральний координуючий агент координує цих агентів для пошуку оптимальних рішень. Два тестових випадки управління за різних зовнішніх погодних умов були проведені за допомогою агентно-орієнтованого моделювання для перевірки запропонованого мультиагентного розподіленого підходу до оптимального управління у порівнянні з базовим підходом до управління і підходом до централізованого оптимального управління.

Досвід впровадження запропонованого розподіленого підходу показує його ефективність при вирішенні складних оптимізаційних задач та оптимізації багатозональних систем вентиляції, а також хорошу масштабованість та реконфігурованість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Якість повітря в приміщеннях розглядається як один із визначальних чинників, що впливають на когнітивні функції, стан здоров'я та загальне благополуччя людини. Результати сучасних досліджень у галузі наук про людину свідчать, що підвищення інтенсивності вентиляції сприяє покращенню когнітивних показників і зменшенню негативного впливу на здоров'я. Водночас збільшення кратності повітрообміну, як правило, супроводжується зростанням енергоспоживання вентиляційних систем, зокрема через підвищення потужності роботи вентиляторів. Це обумовлює необхідність пошуку раціонального компромісу між забезпеченням належної якості повітря та мінімізацією енергетичних витрат.

Емпіричні дослідження показують, що економічні вигоди від покращення вентиляції, зокрема підвищення продуктивності, можуть компенсувати додаткові витрати енергії [1]. Водночас адекватний вибір систем фільтрації повітря може зменшити споживання енергії, пов'язане з вентиляцією. Ефективність та економічні вигоди від фільтрації повітря залежать від таких факторів, як кліматичні умови конкретного міста, типу будівлі (житлова чи комерційна) та припущень щодо витрат, пов'язаних зі здоров'ям, отриманих на основі епідеміологічних моделей [2]. Крім того, деякі фільтри можуть збільшити споживання енергії на опалення, вентиляцію та кондиціонування повітря через додатковий опір потоку повітря, що підкреслює необхідність ретельного проєктування системи [3; 4]. Таким чином, проблема забезпечення економічно доцільного рівня IAQ залишається актуальною та потребує застосування сучасних методів аналізу і оптимізації.

У зв'язку з цим дедалі більшого поширення набувають підходи, що базуються на агент-орієнтованому моделюванні (АОМ), яке дозволяє досліджувати складні динамічні системи з урахуванням взаємодії між технічними, екологічними та поведінковими чинниками. У цивільному будівництві АОМ застосовується для аналізу енергоспоживання, моделювання поведінки користувачів та оцінювання ефективності інженерних систем [5]. Цей підхід є цінним, оскільки проєкти цивільного будівництва часто включають складні, рухливі системи, де окремі дії та рішення можуть впливати на загальну продуктивність системи.

АОМ застосовуються для моделювання поведінки споживачів енергії в енергосистемі. Моделюючи, як окремі особи (агенти) приймають рішення про використання енергії (наприклад, вимикають світло, регулюють термостати, вентилятори) і як на це реагує мережа, інженери можуть оптимізувати проектування та експлуатацію «розумних» електромереж [6].

В сфері контролю та управлінні забрудненням АОМ може моделювати, як забруднювачі рухаються через повітряні або водні системи і як індивідуальна поведінка (наприклад, промислові викиди, використання автомобілів та розвиток громадського транспорту) сприяє загальному забрудненню. Враховуючи поведінку агентів, інженери можуть прогнозувати вплив різних заходів на рівень забруднення [7]. В. Лі та ін. [8] розробили дві логіки управління на основі подій для видалення надмірних забруднювачів і запобігання конденсації роси. Певні події визначаються заздалегідь шляхом встановлення порогових значень для температури та CO_2 в приміщенні. Якщо такі події ідентифікуються, автоматично виконуються певні дії, такі як збільшення об'єму вентиляційного повітря та осушення. Це дослідження зосереджувалося лише на локальному контролі в одній кімнаті, не заглиблюючись у скоординований контроль між кількома кімнатами. Таким чином, з огляду на розподілену схему встановлення майбутніх інтелектуальних сенсорних мереж або традиційних програмних продуктів, необхідний розподілений підхід до управління, який повністю враховує автономність окремих контурів управління і взаємодію між декількома контурами управління.

Переваги АОМ у цивільному будівництві включають перш за все гнучкість, адже АОМ дозволяє гнучко моделювати складні взаємодії, які важко змоделювати традиційними методами. Оскільки АОМ фокусується на окремих агентах, він може моделювати гетерогенну поведінку, що дуже важливо в цивільному будівництві, де індивідуальні дії можуть суттєво відрізнятись. АОМ фіксує емерджентну поведінку систем, яка виникає внаслідок взаємодії між агентами, надаючи уявлення про те, як невеликі зміни на мікрорівні можуть мати масштабний вплив на систему. АОМ дозволяє тестувати різні сценарії «що було б, якби», допомагаючи зрозуміти наслідки різних рішень до того, як впроваджувати їх у реальному житті [9]. У роботах [10; 11] автори дослідили взаємозв'язок між факторами IEQ (якість навколишнього середовища) та поведінкою мешканців, а також режимами вентиляції, проаналізувавши реальні набори даних, виміряних в експериментах.

Агентно-орієнтоване моделювання (АОМ) може бути ефективним інструментом для моделювання та аналізу комфортності житлових приміщень шляхом моделювання того, як окремі мешканці взаємодіють з навколишнім середовищем і приймають рішення на основі факторів комфорту [12]. На комфортність житлового простору впливають різні фактори, зокрема тепловий комфорт, освітлення, шум, якість повітря, просторове планування та особисті уподобання. Враховуючи поведінку та вподобання окремих агентів (мешканців), АОМ може надати цінну інформацію про те, як різні елементи дизайну, умови навколишнього середовища та взаємодія користувачів впливають на загальний комфорт житлового простору.

Ч. Ван та ін. [13] розробили мультиагентну систему управління для максимізації комфорту в приміщенні з мінімальним використанням енергії. Параметрами оптимізації є задані значення (температури в приміщенні, освітленості та CO_2) і ваги різних доданків в інтегрованому індексі комфорту (цільова функція). Р. Ян і Л. Ван [14] розробили мультиагентну систему управління, орієнтовану на користувача, для оптимізації енергоефективності та комфорту в приміщенні. Персональні агенти були розроблені для ідентифікації користувачів, вивчення вподобань мешканців та надання зворотного зв'язку, таким чином полегшуючи взаємодію між мешканцями та навколишнім середовищем.

П. Дас та ін. [15] застосували багатоцільовий оптимізаційний підхід для дослідження оптимальної швидкості вентиляції, беручи до уваги IEQ (тобто вуглекислий газ, радон, температуру, рівень цвілі) та економію енергії. У цих дослідженнях застосовувалися централізовані підходи до оптимізації, які в принципі можливі, але не є зручними та ефективними для

практичного застосування в реальних будівлях. Існує дві основні проблеми. По-перше, важко або незручно збирати та інтегрувати інформацію про всі системи та обладнання в одному пристрої (наприклад, центральному комп'ютері) [11]. По-друге, моделі систем або обладнання змінюються разом із внутрішніми та зовнішніми умовами, і незручно оновлювати моделі та відповідну загальну оцінку ефективності за допомогою цільових функцій [15].

Це зумовлює актуальність розроблення розподілених підходів до управління, що забезпечують підвищену адаптивність, надійність і масштабованість систем вентиляції. Агентно-орієнтоване моделювання в цивільному будівництві дозволяє оптимізувати системи, розуміючи, як поведуться окремі особи і групи, що призводить до створення більш ефективної, безпечної і економічної інфраструктури на основі гнучкого багатофакторного підходу.

Мета дослідження

Метою дослідження є моделювання мультиагентного розподіленого підходу для оптимального управління багатозональними системами вентиляції з урахуванням як IAQ, так і енергозбереження шляхом оптимізації об'єму вентиляційного повітря для окремих зон. Для досягнення мети розроблено новий мультиагентний підхід для вирішення проблеми оптимізації багатозональних систем вентиляції розподіленим способом, а IAQ окремих приміщень і використання енергії первинної припливно-витяжної установки (ПВУ) інтегровані в цільову функцію для оптимізації об'ємів вентиляційного повітря в окремих приміщеннях і ПВУ.

Виклад основного матеріалу дослідження

Запропонований розподілений підхід на основі мультиагентів відповідає архітектурі координатор-користувач [8]. Він складається з кімнатних агентів, агента ПВУ (Primary Air Unit), кожен з яких пов'язаний з відповідною кімнатою та ПВУ, а також центрального координуючого агента. Агенти організовані на двох рівнях на основі їх функцій та цілей. Агенти в приміщеннях і агент ПВУ представляють користувачів на місцевому рівні, в той час як центральний координуючий агент виступає в ролі координатора на глобальному рівні. Загальні цілі контролю, які включають обмеження рівнів забруднюючих речовин у приміщенні та мінімізацію використання енергії, розбиті на декілька підцілей. Ці підцілі розподіляються між агентами для оптимізації. Зокрема, кімнатні агенти мають завдання оптимізувати об'єм вентиляційного повітря для кожної кімнати ($Q_i, i = 1, \dots, n$), щоб обмежити рівень концентрації радону у приміщенні, тоді як агент ПВУ відповідає за мінімізацію енергоспоживання шляхом оптимізації загального об'єму вентиляційного повітря (Q). Центральний координуючий агент на глобальному рівні полегшує комунікацію між іншими агентами для забезпечення досягнення загальних цілей контролю.

Іншими словами, загальні цілі контролю – обмеження рівня концентрації радону в приміщенні та мінімізація споживання енергії – досягаються шляхом взаємодії між розподіленими агентами. Такий агентно-орієнтований підхід може бути реалізований за допомогою декількох алгоритмів розподіленої оптимізації. У цьому дослідженні використовується метод множників змінного напрямку (ADMM) [10].

Фізична природа кожного агента може значно відрізнитися. Це може бути безпосередній користувач приміщення (людина), або ж інтелектуальний датчик IAQ, який безперервно контролює якість повітря в приміщенні (наприклад, концентрацію радону) в кожній кімнаті через регулярні проміжки часу. Датчик використовує модель для прогнозування стаціонарної концентрації радону, яка включається в цільову функцію окремих кімнатних агентів для оптимізації об'єму вентиляційного повітря ($Q_i, i = 1, \dots, n$). Агенти спілкуються з центральним координуючим агентом, зокрема, передають оптимізований локально об'єм вентиляційного повітря. Інформація, що надсилається центральному агенту, складається з двох частин: перша частина включає локально оптимізовані об'єми вентиляційного повітря інших агентів, включаючи кімнатних агентів та агента ПВУ, а друга частина містить оновлений параметр (тобто, λ).

Центральний координуючий агент відповідає за комунікацію та координацію дій інших агентів. Як зазначалося раніше, об'єми вентиляційного повітря в приміщеннях ($Q_i, i = 1, \dots, n$) оптимізуються відповідними агентами приміщень лише для обмеження рівнів забруднюючих речовин. У той же час, загальний об'єм вентиляційного повітря ПВУ (Q) оптимізується агентом ПВУ для мінімізації споживання енергії. Отже, обмеження балансу маси – де сума $Q_i, (i = 1, \dots, n)$ повинна дорівнювати Q – може не виконуватися, якщо кімнатні агенти та агент ПВУ працюють ізольовано без ефективного зв'язку. Центральний координуючий агент отримує інформацію, передану від кімнатних агентів та агента ПВУ. Використовуючи цю інформацію, він обробляє дані, щоб забезпечити виконання обмеження балансу маси, виконуючи необхідні операції (наприклад, оновлення параметрів). Крім того, центральний координуючий агент слугує комунікаційним мостом, що дозволяє кожному агенту отримати доступ до інформації, яку він потребує від інших агентів.

Цільова функція сформульована для оцінки ефективності багатозональних систем вентиляції з урахуванням як рівнів забруднювачів у приміщенні, так і споживання енергії [12], як показано в рівнянні (1). Вона складається з двох підцілей: одна (позначена як $\sum_{i=1}^n A_i$), що стосується рівня забруднювачів у приміщенні, а інша (позначена як E), що фокусується на використанні енергії. Ваговий коефіцієнт β вводиться для об'єднання цих двох підцілей в одну загальну мету. Метою процесу оптимізації управління є мінімізація цієї загальної мети для того, щоб зменшити рівень концентрації радону в приміщенні та споживання енергії [7, 10]. Змінні управління, що підлягають оптимізації, – це оптимальний об'єм вентиляційного повітря для окремих приміщень (Q_i) та загальний об'єм вентиляційного повітря для ПВУ (Q). Обмеження балансу маси виражається в рівнянні (2).

$$\min_{Q, Q} O_{\sigma} = \sum_{i=1}^n A_i + \beta E, \quad (1)$$

з урахуванням обмеження:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = Q. \quad (2)$$

Оскільки вуглекислий газ є небезпечним забруднювачем повітря в приміщенні, надмірний рівень його в приміщенні (A_i) вимірюється на основі стаціонарної концентрації вуглекислого газу (C_i), яка перевищує рекомендовану межу, як описано в рівнянні (3). Тут C_2 являє собою граничну концентрацію CO_2 (наприклад, 800 ppm).

$$A_i = \max \{0, C_i - C_2\}^2. \quad (3)$$

Стаціонарна модель вуглекислого газу, отримана з рівняння балансу маси для вуглекислого газу в просторі, наведена в рівнянні (4). У цьому рівнянні C_n (400 ppm) означає концентрацію CO_2 в навколишньому повітрі, V – швидкість надходження вуглекислого газу в приміщення [11], а N_i – кількість мешканців у приміщенні.

$$C_i = C_n + \frac{VN_i}{Q_i}. \quad (4)$$

Як згадувалося раніше, споживання енергії в ПВУ (E) визначається шляхом підсумовування еквівалентної енергії чілера, необхідної для охолодження (EChiller) [12], та енергії, що використовується вентилятором (E_v), як показано в рівнянні (5).

$$E = E_q + E_v, \quad (5)$$

E_q розраховується за формулою (6), де Q – загальний об'єм вентиляційного повітря, h_3 – питома зовнішня ентальпія, а h_6 – питома внутрішня ентальпія. Внутрішня ентальпія (h_3) встановлюється

як постійне значення 57,07 кДж/кг, що відповідає температурі в приміщенні 25,5 °С і відносній вологості 60 %. k_e позначає загальний коефіцієнт ефективності, який у цьому дослідженні дорівнює 2,5.

$$E_q = \frac{Q(h_3 - h_6)}{k_e}, \quad (6)$$

E_e розраховується за допомогою рівняння (7) на основі законів спорідненості [8]. Хоча теоретично показник степеня в рівнянні (7) дорівнює 3, але в даному випадку він встановлюється на значенні 2, щоб врахувати варіації в ефективності вентилятора і налаштуваннях отворів заслінки [8]. У цьому рівнянні E_p представляє розрахункову потужність вентилятора, а Q_p позначає розрахунковий об'єм вентиляційного повітря.

$$E_e = E_p \left(\frac{Q}{Q_p} \right)^2. \quad (7)$$

Централізований підхід широко використовувався в попередніх дослідженнях для оптимального управління вентиляційними системами. У цьому методі центральна система управління збирає всю необхідну інформацію з приміщень, припливно-витяжної установки та зовнішнього середовища, включаючи зайнятість приміщень, параметри припливно-витяжної установки, погодні умови на вулиці та концентрацію вуглекислого газу зовні. Інструмент онлайн-оптимізації, такий як генетичний алгоритм (ГА), використовується для вирішення проблем оптимізації на основі цільової функції (3–4), яка централізовано розгортається на станції управління. За допомогою цього централізованого підходу можна досягти глобального оптимуму, оскільки центральна система управління вирішує проблему оптимізації з комплексної, всеосяжної перспективи. Результати цього підходу вважаються «найкращими» і слугують еталоном для оцінки ефективності інших стратегій управління, зокрема агентно-орієнтованого, з розділеною оптимізацією.

На відміну від централізованого підходу, де завдання оптимізації виконуються в одному місці (наприклад, на одній станції управління), запропонований розподілений метод на основі агентно-орієнтованого підходу призначає кожному агенту власну цільову функцію та завдання оптимізації. Цільова функція кожного агента може бути отримана з вихідної цільової функції централізованого підходу (тобто рівняння (1)) за допомогою теорії декомпозиції. Теорія декомпозиції забезпечує математичну основу для розбиття вихідної проблеми на менші підпроблеми [7]. У цьому дослідженні використовується метод множників зі змінним напрямком (ADMM), який широко застосовується в таких областях, як відновлення зображень та розподіл мережевих ресурсів [12]. За допомогою цього методу вихідна цільова функція в централізованому підході (рівняння (1)) переформульована в рівняння (8a), що включає такі члени, як порушення обмежень $\left(\sum_{i=1}^N Q_i' - Q' \right)$, лагранжіан (λ) і штрафний коефіцієнт (μ). Рівняння (8a) потім співвідносять з окремим агентам. Кінцева цільова функція для агента в номері показана в рівнянні (8b), а цільова функція для агента ПВУ представлена в рівнянні (8c). Центральний координуючий агент оновлює параметр λ , використовуючи рівняння (8d), щоб забезпечити виконання обмеження балансу маси, де l – крок ітерації.

$$\min_{Q, Q'} \left[\sum_{i=1}^n (A_i + E) + \lambda \left(\sum_{i=1}^n Q_i - Q \right) + \frac{\mu}{2} \left(\sum_{i=1}^n Q_i - Q \right)^2 \right]; \quad (8a)$$

$$\min_{Q_i} \left[A_i + \lambda \left(\sum_{m=1, m \neq i}^n Q_m + Q_i - Q \right) + \frac{\mu}{2} \left(\sum_{m=1, m \neq i}^n Q_m + Q_i - Q \right)^2 \right]; \quad (8b)$$

$$\min_{Q_i} \left[E + \lambda \left(\sum_{i=1}^n Q_i - Q \right) + \frac{\mu}{2} \left(\sum_{i=1}^n Q_i - Q \right)^2 \right]; \quad (8c)$$

$$\lambda^{l+1} = \lambda^l + \mu \left(\sum_{i=1}^N Q_i^l - Q^l \right). \quad (8d)$$

Після декомпозиції та переформулювання задачі оптимізації цільові функції агентів приміщення включають не тільки їхні початкові цілі управління, такі як обмеження рівня забруднювачів у приміщенні, але й додаткові умови, пов'язані з порушенням обмежень. Аналогічно, цільова функція агента ПВУ включає його початкову мету управління – мінімізацію використання енергії, а також умови, пов'язані з порушенням обмежень. Алгоритм ADMM виконує ітераційні кроки для поступового обмеження рівнів забруднювачів, мінімізації споживання енергії та зменшення порушень обмежень. Ітераційний процес триває до досягнення збіжності, яка визначається первинним і подвійним залишковим критеріями [11]. У цьому дослідженні первісний залишок розраховується за допомогою рівняння (9a), яке відображає вищезгадане порушення обмежень. Подвійні залишки, які представляють собою різницю між поточним і попереднім значенням кожної оптимізованої змінної, наведені в рівнянні (9b) для кімнатних агентів і в рівнянні (9c) для агента ПВУ. Тут ε_1 і ε_2 – задані пороги зупинки, в цьому дослідженні $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,001$.

$$\left(\sum_{i=1}^N Q_i^l - Q^l \right)^2 \leq \varepsilon_1; \quad (9a)$$

$$\left[\mu(Q_i^l - Q_i^{l-1}) \right] \leq \varepsilon_2; \quad (9b)$$

$$\left[\mu(Q^l - Q^{l-1}) \right]^2 \leq \varepsilon_2. \quad (9c)$$

Існує дві основні схеми отримання інформації від інших агентів протягом однієї ітерації: ADMM Гаусса-Зейделя з послідовною схемою та ADMM Якобі з паралельною схемою. Перший використовує метод Гаусса-Зейделя для ітерацій, де агенти оптимізують послідовно, і кожен агент оновлює свою інформацію на основі результатів попереднього агента в межах однієї ітерації. На противагу цьому, у яacobіані ADMM використовується метод Якобі, що дозволяє агентам оптимізувати паралельно. У цьому методі агенти виконують локальні оптимізації одночасно, використовуючи інформацію з попередньої ітерації, а не чекаючи на оновлену інформацію в рамках поточної ітерації. Тому Яcobіан ADMM з паралельною схемою є більш придатним для реальних застосувань і обраний для цього дослідження [11].

На рис. 1 представлено блок-схему визначення оптимальних об'ємів вентиляційного повітря для окремих приміщень (Q_i) та загального об'єму вентиляційного повітря ПВУ (Q) за допомогою яacobіану ADMM. На кожній ітерації кожен кімнатний агент оптимізує свій об'єм вентиляційного повітря з метою обмеження рівня забруднюючих речовин в приміщенні.

Агент ПВУ оптимізує загальний об'єм вентиляційного повітря ПВУ, щоб мінімізувати використання енергії. Ці локальні оптимізації проводяться паралельно. Кожна задача локальної оптимізації передбачає оптимізацію однієї змінної і є досить простою для виконання на локальних пристроях управління з обмеженою потужністю. Для розв'язання цих оптимізаційних задач використовується вичерпний метод. Центральний координуючий агент оновлює параметр λ , щоб зменшити порушення обмежень і забезпечити виконання обмеження балансу маси. Ітераційний процес продовжується доти, доки не буде виконано первинний та подвійний залишковий критерії або не буде досягнуто максимальної кількості ітерацій (позначено l). У цьому дослідженні максимальна кількість ітерацій дорівнює 100.

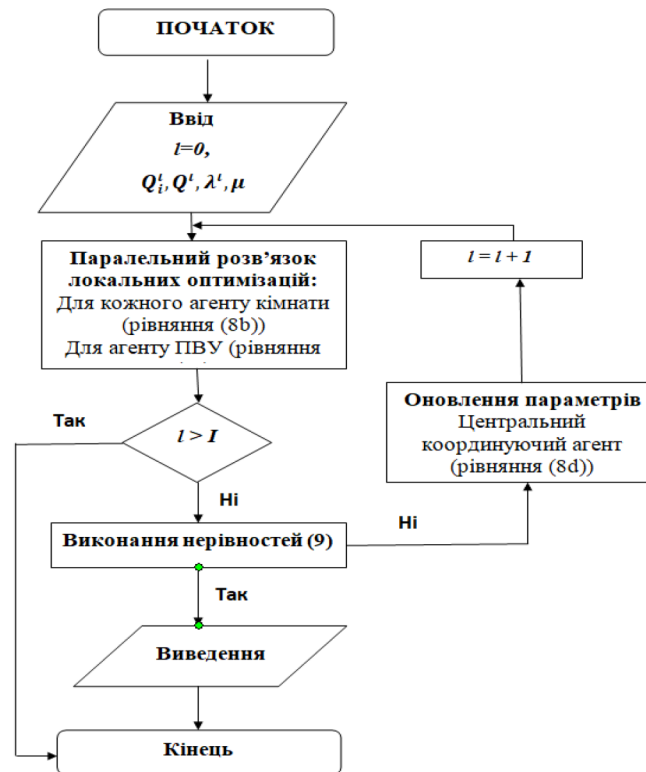


Рис. 1. Блок-схема запропонованого багатозонального розподіленого підходу для систем вентиляції з кількома зонами

Для перевірки запропонованого агентно-орієнтованого розподіленого підходу до оптимального управління багатозональними системами вентиляції створено модель Нетлого. У моделі імітується шість кімнат, кожна об'ємом 108 м³ (9 м × 4 м × 3 м), для моделювання в реальному часі зміни рівня вуглекислого газу в приміщенні за різних погодних умов, структури зайнятості та налаштувань управління ПВУ. Ці приміщення обслуговуються однією вентиляційною установкою з розрахунковою потужністю вентилятора 2,20 кВт і розрахунковим об'ємом вентиляційного повітря 336л/с. Діапазон регульованого об'єму вентиляційного повітря для кожного приміщення становить від 11 до 56 л/с, тоді як загальний об'єм вентиляційного повітря ПВУ можна регулювати в діапазоні від 0 до 336 л/с.

У середовищі Нетлого розроблено моделі для стаціонарних викидів вуглекислого газу та інших забруднюючих речовин, енергоспоживання ПВУ та оптимальних регуляторів

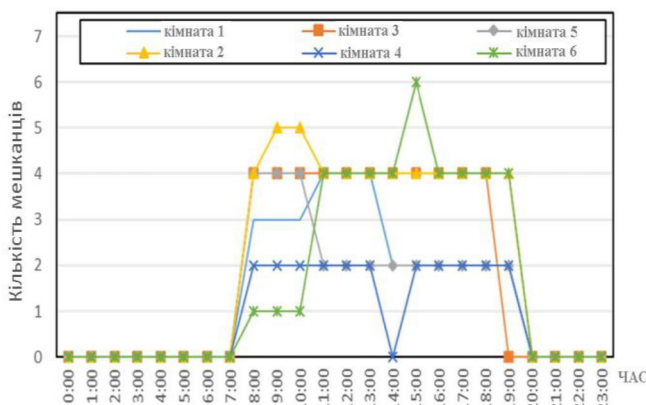


Рис. 2. Наповненість мешканцями окремих кімнат з часом

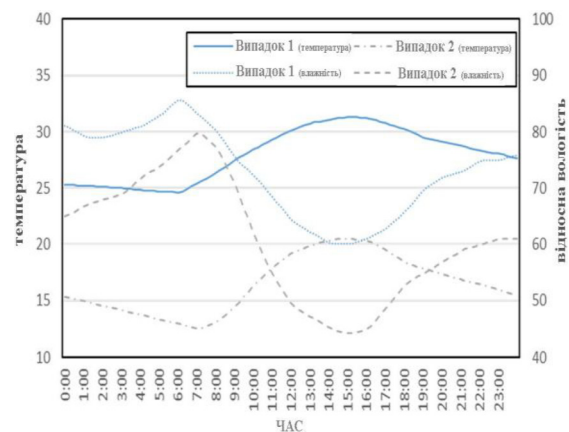


Рис. 3. Зовнішня температура та відносна вологість для двох тестових випадків

у реальному часі. Вихідні дані регуляторів включають об'єм вентиляційного повітря для кожного приміщення та загальний об'єм вентиляційного повітря для ПВУ. Крок моделювання та інтервал оптимального регулювання встановлені на рівні 1 хвилини.

Профілі заповнюваності приміщень людьми та дані про погоду слугують екзогенними вхідними даними для контролерів (рис. 2). Хоча проектна заповнюваність встановлена на рівні 4, фактична заповнюваність коливається з часом. Заповнюваність для типового робочого дня у шести приміщеннях, які використовуються у двох випадках для оцінки ефективності різних підходів до управління може значно відрізнятись від проєктованої [7]. Оскільки споживання енергії чілера змінюється залежно від погодних умов на вулиці, моделювання проводилося у двох тестових випадках, що представляють типову погоду на вулиці. Випадок 1 імітує спекотний і вологий день, а випадок 2 – прохолодний і сухий день (рис. 3).

Щоб наочно проілюструвати процес ітерації, на рис. 4 показано еволюцію об'ємів вентиляційного повітря для окремих приміщень і ПВУ у випадку 1 у певний час (наприклад, о 10:00). За допомогою агентно-орієнтованого розподіленого підходу до оптимального управління об'єми вентиляційного повітря для приміщень і ПВУ поступово наближалися до глобального оптимуму, який забезпечується централізованим підходом до оптимального управління. Порушення обмежень зменшилося нижче 0,01 протягом 20 ітерацій, що свідчить про ефективну міжагентну координацію.

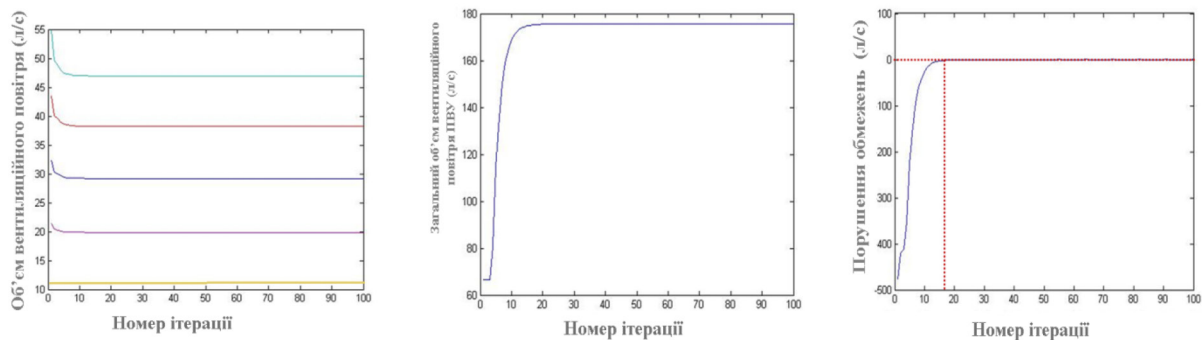


Рис. 4. Еволюція результатів для розподіленого оптимального управління за допомогою підходу на основі багатofакторних агентів (випадок 1, 10.00 час)

Нарис. 5 показано щоденний оптимізований об'єм вентиляційного повітря в окремих кімнатах у двох тестових випадках з використанням розподіленого підходу на основі агентно-орієнтованого

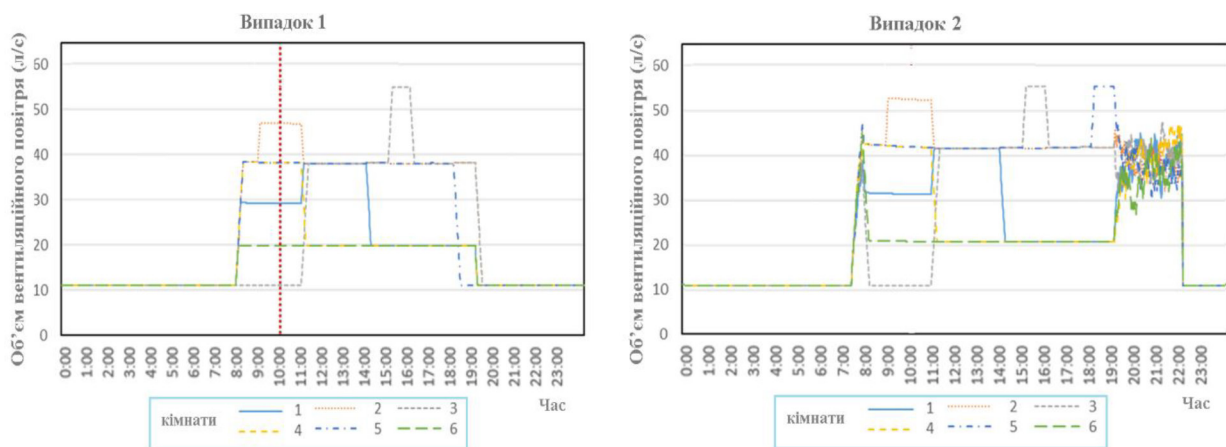


Рис. 5. Щоденний оптимізований об'єм вентиляційного повітря окремих приміщень у двох тестових випадках з використанням розподіленого підходу на основі багатьох агентів для оптимального управління

управління для оптимального управління. Як згадувалося раніше, поріг зупинки та максимальна кількість ітерацій були встановлені на рівні 0,001 та 100 відповідно. Оптимізований об'єм вентиляційного повітря, отриманий за допомогою розподіленого агентно-орієнтованого підходу, був майже таким самим, як і при централізованому оптимальному управлінні.

Максимальні концентрації забруднюючих речовин у шести приміщеннях у двох тестових випадках показані на рис. 6. Максимальні концентрації забруднюючих речовин у випадку 1 становили 838, 839, 852, 827, 839 та 820 ppm у шести кімнатах відповідно. Максимальні значення забруднюючих речовин у випадку 2 становили 801, 801, 842, 800, 801 і 799 ppm у шести кімнатах відповідно. В обох тестових випадках частина, що перевищувала 800 ppm, була невеликою і прийнятною.

У цьому дослідженні введений індекс надмірного забруднення (*EPI*). Він визначається як рівняння (10), тобто як добуток множення реального часу CO_2 ($C_{i,real}$), що перевищує 800 ppm, на відповідну тривалість ($t > 800$).

$$EPI_i = \max \{0, C_{i,real} - 800\} \cdot t_{>800} \quad (10)$$

EPI відображає якість внутрішнього повітря з обох аспектів: миттєвої величини CO_2 та тривалості часу. Тому це більш комплексне значення для оцінки IAQ.

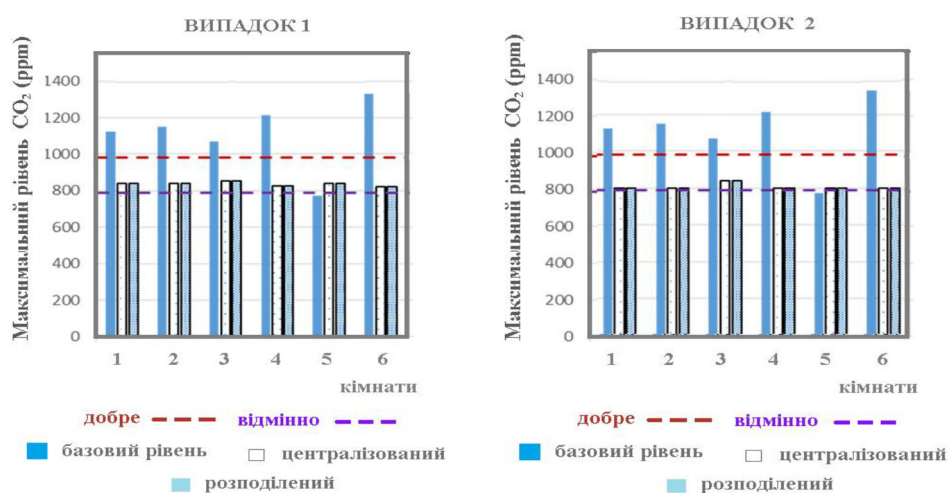


Рис. 6. Максимальний вміст CO_2 у шести кімнатах двох тестових випадків за використання різних підходів до управління

Вищий *EPI* означає нижчу IAQ, враховуючи вплив надмірного CO_2 . Як показано на рис. 7, показники *EPI* у випадку 1 становили 13260, 20585, 15020, 11723, 16874 і 6285 ppm · хв у шести кімнатах відповідно. У випадку 2 *EPI* у шести приміщеннях становили 45, 51, 3,1 54, 0, 44 і 0 ppm · хв відповідно. У порівнянні з базовим підходом до контролю, максимальні значення забруднюючих речовин та *EPI* у приміщенні 5 у двох випадках використання розподіленого підходу з декількома агентами були дещо збільшені, але все ще залишалися в межах прийнятних діапазонів. Для інших приміщень максимальні значення радону були значно знижені, а *EPI* були знижені в діапазоні від 58,99 % до 96,44 % у випадку 1 і в діапазоні від 91,39 % до 100,00 % у випадку 2, порівняно з базовим підходом до контролю. Можна помітити, що IAQ покращився, враховуючи зменшення максимальних викидів радону та *EPI*, і таке покращення було набагато значнішим у випадку 2.

Варто зазначити, що хоча в кімнаті 6 був найвищий максимальний рівень CO_2 серед шести кімнат, її якість внутрішнього повітря була трохи кращою, ніж у кімнаті 4, яка мала найвищий індекс *EPI*. Використання енергії ПВУ змінюється в залежності від погодних умов. Як показано на рис. 8, воно становило 22,40 кВт · год у випадку 1 за жаркої та вологої погоди, і -16,87 кВт · год у випадку 2 за прохолодної та сухої погоди. Тут негативне значення вказує

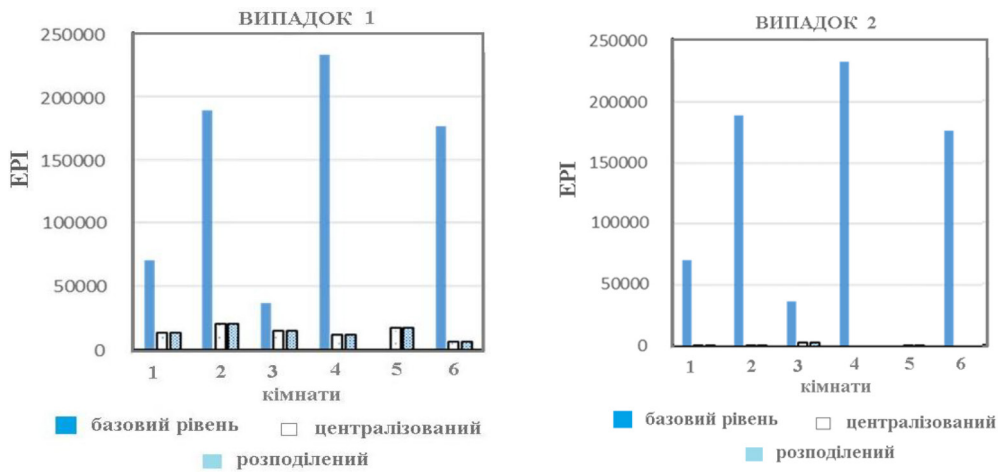


Рис. 7. EPI у шести кімнатах двох тестових випадків із використанням різних підходів управління

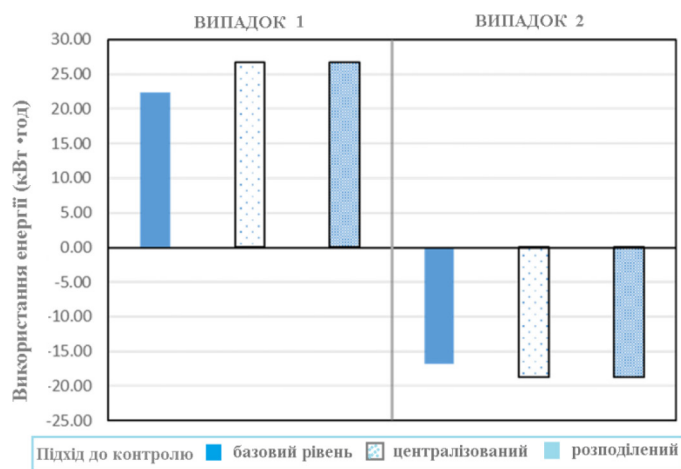


Рис. 8. Використання енергії ПВУ у двох тестових випадках з використанням різних підходів до управління

на те, що активується режим безкоштовного охолодження ПВУ, і зниження енергоспоживання чілера більше, ніж енергоспоживання вентилятора самої ПВУ.

Порівняно з базовим підходом до управління, енергоспоживання ПВУ було дещо збільшено (тобто з 22,40 до 26,65 кВт-год або на 18,99 %) у випадку 1. У випадку 2 енергозбереження при використанні розподіленого підходу на основі агентно-орієнтованого управління було збільшено з 16,87 до 18,78 кВт-год (тобто на 11,34 %). Таким чином, продуктивність системи, включаючи максимальні викиди вуглекислого газу, EPI та споживання енергії, при використанні розподіленого підходу на основі агентно-орієнтованого підходу була майже такою ж, як і при використанні підходу централізованого оптимального управління.

Ключовою перевагою розподіленого підходу на основі мультиагентів є його висока здатність до реконфігурації, що робить його дуже пристосованим для перезавантаження оптимальних стратегій управління в багатозональних системах вентиляції. Така реконфігурація також підвищує надійність стратегії в умовах постійних змін внутрішніх і зовнішніх умов. При зміні зовнішніх погодних умов цільова функція задачі оптимізації повинна оновлюватися. При централізованому підході до оптимального управління, член використання енергії в цільовій функції управляється на центральній станції. Будь-які оновлення або реконфігурації цього члена повинні здійснюватися на центральній станції, що створює ризик виходу системи з ладу. Аналогічно, член рівня забруднення в приміщенні також обробляється централізовано, що збільшує ризик збою для всієї системи управління.

На противагу цьому, розподілений підхід на основі агентно-орієнтованих систем забезпечує більшу гнучкість. Параметр використання енергії в цільовій функції потрібно обнуляти лише в межах агента ПВУ, а це означає, що потрібно переналаштувати лише агент управління для цього конкретного компонента. Це усуває необхідність модифікувати всю систему управління, коли змінюється динаміка компонента, і гарантує, що будь-яка локальна несправність не вплине на всю систему. В результаті значно підвищується стійкість і надійність системи управління.

Аналогічно, коли змінюється кількість мешканців (тобто умови в приміщенні), цільова функція також повинна бути скоригована. При централізованому підході будь-яке оновлення параметра рівня забруднення в приміщенні, що обробляється в центральній системі управління, вимагатиме переконфігурації на центральній станції, що знову ж таки створює ризик збою в роботі всієї системи. Однак, завдяки розподіленому підходу на основі мультиагентів, цей параметр потрібно скидати лише у відповідних кімнатних агентах, якщо змінюється динаміка компонентів. Така локальна реконфігурація підвищує стійкість і надійність системи.

Ще однією значною перевагою розподіленого підходу на основі мультиагентів є його масштабованість, особливо в контексті гнучкого формулювання цільової функції. Цей підхід дозволяє легко адаптуватися до різноманітних потреб багатозональних систем вентиляції. Наприклад, додавання більшої кількості приміщень до системи управління вимагає додавання більшої кількості агентів, в той час як вибір забруднювачів, на які повинні реагувати агенти управління приміщеннями, на основі уподобань користувача, вводить додаткові члени в цільові функції агентів. Можливість збільшувати або зменшувати масштаби, додавати або видаляти умови в задачі оптимізації є основною перевагою. При централізованому підході такі зміни вимагали б повної реконфігурації оптимізаційної задачі. На противагу цьому, при розподіленому підході на основі мультиагентів, лише відповідні окремі агенти повинні бути скинуті або додані/вилучені, що забезпечує більшу гнучкість і масштабованість.

Висновки

За допомогою агентно-орієнтованого моделювання доведено, що застосування розподіленого мультиагентного підходу забезпечує ефективність управління, співставну з централізованим оптимальним підходом, зокрема за показниками енергоспоживання, рівня CO₂ та енергетичної ефективності. У різних сценаріях експлуатації спостерігається варіативний вплив на енергоспоживання: у першому випадку воно дещо зростає, тоді як у другому – досягається додаткове енергозбереження, що підтверджує залежність результатів від зовнішніх умов.

Розподілений підхід характеризується високою здатністю до реконфігурації, що дозволяє оперативно адаптувати систему до змін зовнішніх умов та внутрішніх параметрів без перебудови всієї системи управління. Використання мультиагентної структури забезпечує підвищену надійність і стійкість системи, оскільки локальні зміни або збої не призводять до відмови всієї системи. Запропонований підхід має високу масштабованість, що дозволяє легко розширювати систему (додавати нові приміщення або параметри) без значних змін загальної архітектури управління. Порівняно з централізованими методами, розподілений підхід забезпечує більшу гнучкість у формуванні та модифікації цільових функцій, що є важливим для практичного застосування в реальних умовах.

Отже, агент-орієнтоване моделювання (АОМ) є потужним інструментом для моделювання впливу змісту повітря на комфорт приміщення. Моделюючи динамічну взаємодію між людьми та навколишнім середовищем, АОМ може допомогти оцінити, як різні рівні забруднюючих речовин впливають на благополуччя мешканців. Цей підхід дозволяє тестувати стратегії проектування, оптимізувати фактори комфорту та покращувати умови житлового простору у більш персоналізований та гнучкий спосіб.

Список використаної літератури

1. Chen J., Augenbroe G., Zeng Z., Song X. Regional difference and related cooling electricity savings of air pollutant affected natural ventilation in commercial buildings across the US. *Building and Environment*. 2020. Vol. 172. 106700. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106700>
2. Ben-David T., Waring M. S. Impact of natural versus mechanical ventilation on simulated indoor air quality and energy consumption in offices in fourteen U.S. cities. *Building and Environment*. 2016. Vol. 104. P. 320–336. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.007>
3. Azimi P., Zhao D., Stephens B. Estimates of HVAC filtration efficiency for fine and ultrafine particles of outdoor origin. *Atmospheric Environment*. 2014. Vol. 98. P. 337–346. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.09.007>
4. Liu G., Xiao M., Zhang X., Gal C., Chen X., Liu L., Pan S., Wu J., Tang L., Clements-Croome D. A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation. *Sustainable Cities and Society*. 2017. Vol. 32. P. 375–396. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.04.011>
5. Metz T. Agent-Based Modeling (ABM). *Neue Trends in Den Sozialwissenschaften: Innovative Techniken Für Qualitative Und Quantitative Forschung*, edited by Sebastian Jäckle. 2017. P. 11–50. https://doi.org/10.1007/978-3-658-17189-6_2
6. Chen I-C., Cheng K-L. 2024. Agent-Based Modeling Framework for Predicting Regional Electricity Consumption Considering Occupant Behavior Shift and Exogenous Policy Impact. *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 324. 114897. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114897>
7. Jule T., Müller B., Groeneveld J., Grimm V. Agent-Based Modelling of Social-Ecological Systems: Achievements, Challenges, and a Way Forward. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2017. Vol. 20. <https://doi.org/10.18564/jasss.3423>
8. Li W., Koo C., Cha SH., Hong T., Oh J. A novel real-time method for HVAC system operation to improve indoor environmental quality in meeting rooms. *Build Environ*. 2018. Vol. 144. P. 365–85. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.046>
9. Mazzetto, Silvia. Interdisciplinary Perspectives on Agent-Based Modeling in the Architecture, Engineering, and Construction Industry: A Comprehensive Review. *Buildings*. 2024. Vol. 14. № 11. <https://doi.org/10.3390/buildings14113480>
10. Kim J, Hong T, Lee M, Jeong K. Analyzing the real-time indoor environmental quality factors considering the influence of the building occupants' behaviours and the ventilation. *Build Environ*. 2019. Vol. 156. P. 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.003>
11. Li W., Wang S. A multi-agent based distributed approach for optimal control of multi-zone ventilation systems considering indoor air quality and energy use. *Applied Energy*. 2020. Vol. 275. 115371. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115371>
12. Stieler D., Schwinn T., Leder S., Maierhofer M., Kannenberg F., Menges A. Agent-Based Modeling and Simulation in Architecture. *Automation in Construction*. 2022. Vol. 141. 104426. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104426>
13. Wang Z, Wang L, Dounis AI, Yang R. Multi-agent control system with information fusion based comfort model for smart buildings. *Appl Energy*. 2012. Vol. 99. P. 247–54. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.020>
14. Yang R, Wang L. Development of multi-agent system for building energy and comfort management based on occupant behaviors. *Energy Build*. 2013. Vol. 56. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.025>
15. Das P., Chalabi Z., Jones B., Milner J., Shrubsole C., Davies M., et al. Multi-objective methods for determining optimal ventilation rates in dwellings. *Build Environ*. 2013. Vol. 66. P. 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.021>

References

1. Chen, J., Augenbroe, G., Zeng, Z., Song, X. (2020). Regional difference and related cooling electricity savings of air pollutant affected natural ventilation in commercial buildings across the US. *Building and Environment*, 172, 106700. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106700><https://journal-buildingscities.org/articles/10.5334/bc.153-main-text-B14> [in English].
2. Ben-David, T., Waring, M. S. (2016). Impact of natural versus mechanical ventilation on simulated indoor air quality and energy consumption in offices in fourteen U.S. cities. *Building and Environment*, 104, 320–336. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.007> [in English].
3. Azimi, P., Zhao, D., Stephens, B. (2014). Estimates of HVAC filtration efficiency for fine and ultrafine particles of outdoor origin. *Atmospheric Environment*, 98, 337–346. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.09.007><https://journal-buildingscities.org/articles/10.5334/bc.153-main-text-B4> [in English].
4. Liu, G., Xiao, M., Zhang, X., Gal, C., Chen, X., Liu, L., Pan, S., Wu, J., Tang, L., Clements-Croome, D. (2017). A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation. *Sustainable Cities and Society*, 32, 375–396. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.04.011><https://journal-buildingscities.org/articles/10.5334/bc.153-main-text-B40> [in English].
5. Metz, T. (2017). Agent-Based Modeling (ABM). *Neue Trends in Den Sozialwissenschaften: Innovative Techniken Für Qualitative Und Quantitative Forschung*, edited by Sebastian Jäckle, 11–50. https://doi.org/10.1007/978-3-658-17189-6_2 [in English].
6. Chen, I-C, Cheng K-L. (2024). Agent-Based Modeling Framework for Predicting Regional Electricity Consumption Considering Occupant Behavior Shift and Exogenous Policy Impact. *Energy and Buildings*, 324, 114897. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114897> [in English].
7. Jule, T., Müller, B., Groeneveld, J., Grimm, V. (2017). Agent-Based Modelling of Social-Ecological Systems: Achievements, Challenges, and a Way Forward. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 20. <https://doi.org/10.18564/jasss.3423> [in English].
8. Li, W., Koo, C., Cha, S.H., Hong, T., Oh, J. (2018) A novel real-time method for HVAC system operation to improve indoor environmental quality in meeting rooms. *Build Environ*, 144, 365–85. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.046> [in English].
9. Mazzetto, S. (2024). Interdisciplinary Perspectives on Agent-Based Modeling in the Architecture, Engineering, and Construction Industry: A Comprehensive Review. *Buildings*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/buildings14113480> [in English].
10. Kim, J., Hong, T., Lee, M., Jeong, K. (2019). Analyzing the real-time indoor environmental quality factors considering the influence of the building occupants' behaviors and the ventilation. *Build Environ*, 156. 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.003> [in English].
11. Li, W., Wang, S. (2020). A multi-agent based distributed approach for optimal control of multi-zone ventilation systems considering indoor air quality and energy use. *Applied Energy*, 275. 115371. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115371> [in English].
12. Stieler, D., Schwinn, T., Leder, S., Maierhofer, M., Kannenberg, F., Menges, A. (2022). Agent-Based Modeling and Simulation in Architecture. *Automation in Construction*, 141, 104426. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104426> [in English].
13. Wang, Z., Wang, L., Dounis, A.I., Yang, R. (2012). Multi-agent control system with information fusion based comfort model for smart buildings. *Appl Energy*, 99, 247–54. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.020> [in English].
14. Yang, R., Wang, L. (2013). Development of multi-agent system for building energy and comfort management based on occupant behaviors. *Energy Build*, 56, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.025> [in English].

15. Das, P., Chalabi, Z., Jones, B., Milner, J., Shrubsole, C., Davies, M., et al. (2013). Multi-objective methods for determining optimal ventilation rates in dwellings. *Build Environ*, 66, 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.021> [in English].

Колесник Сергій Миколайович – аспірант кафедри вищої математики Одеської державної академії архітектури та будівництва. E-mail: serhiicool@gmail.com, ORCID: 0009-0009-5669-3620.

Кіосак Володимир Анатолійович – д.ф.-м.н., професор кафедри вищої математики Одеської державної академії архітектури та будівництва. E-mail: kiosakv@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7433-6709.

Kolesnyk Serhii Mykolaiovych – Postgraduate Student at the Department of Higher Mathematics of the Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture. E-mail: serhiicool@gmail.com, ORCID: 0009-0009-5669-3620.

Kiosak Volodymyr Anatoliiovych – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Department of Higher Mathematics of the Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture. E-mail: kiosakv@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7433-6709.

Дата першого надходження статті до видання: 10.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)