

Побудова моделі торговельного центру як об'єкта з розподіленими параметрами

Торговельний центр є енергосмним об'єктом із розподіленими параметрами. Кількість людей у приміщенні, високі ціни на енергоносії, норми на експлуатацію будівель і призначення приміщень формують вимоги до створення та підтримання мікроклімату. Дослідження показують, що на компенсацію тепловтрат адміністративних будівель витрачається від 30 до 40 відсотків від загальної кількості енергоресурсів. Для забезпечення комфортних температурно-вологісних умов торговельного центру витрачається ще майже 20 відсотків енергії. При цьому можлива перевитрата енергоресурсів і, як наслідок, незабезпечення належних комфортних умов. Проаналізовані джерела інформації дають підстави для твердження, що економія ресурсів об'єктів із розподіленими параметрами неможлива без упровадження енергоефективних рішень.

Статтю присвячено побудові та дослідженню математичної моделі торговельного центру. Для її побудови використовуються параметри однієї з будівель у місті Харків. Через складність об'єкта управління запропоновано поділити його на задану кількість об'єктів із зосередженими параметрами. Як об'єкти із зосередженими параметрами обрано окремі приміщення, які виконують функцію продуктового супермаркету. Створено модель окремого приміщення, яка враховує вплив нагрівачів, кількість людей у приміщенні, перетоки тепла через стіни та стелю. Для побудови передаточної функції об'єкта керування використано рівняння теплового балансу, що дозволило врахувати тепловтрати та всі джерела теплонадходжень.

Об'єктом дослідження є нестационарні температурні поля розподіленого об'єкта. Отримано перехідні характеристики розробленої моделі. Створена модель не дозволяє задавати та одержувати параметри різних температурних зон усередині приміщення. Тому в подальших дослідженнях необхідно розширити цю модель за рахунок використання рівнянь теплопровідності та граничних умов.

Ключові слова: *торговельний центр; математична модель; об'єкт із розподіленими параметрами; об'єкт із зосередженими параметрами.*

Актуальність теми. Теорія побудови і моделювання розподілених теплових об'єктів відома ще з 60-х років ХХ століття. Для побудови моделей таких об'єктів використовується опис за допомогою простору станів, передаточних функцій та диференціальних рівнянь у часткових похідних. Також застосовуються методи фізичного моделювання, наприклад, метод РС-сіток, де параметри об'єкта, що досліджується, ставляться у співвідношення з напругою на вузлах РС-ланок.

Створення адекватної моделі з розподіленими параметрами потребує опису та рішення рівняння для кожної просторової координати із заданими початковими та граничними умовами. Такий опис потребує значного часу та вимагає великих обчислювальних потужностей. Однак через відсутність можливості провести обчислення від побудови таких моделей здебільшого відмовляються та використовують моделі із зосередженими параметрами.

Загальні цілі побудови моделей із зосередженими та з розподіленими параметрами однакові: адекватно описати природу системи. Характеристики розподілених об'єктів показують, що вони є лінійними, протяжними в просторі та мають реакцію в часі, яка є запізненою при дії на них джерелом впливу. Саме запізнення є причиною того, що фізичні параметри розподіляються в просторі нерівномірно. Це призводить до перевитрати ресурсів та виходу контрольованих параметрів за допустимі межі. Тому виникає необхідність використання моделей розподілених об'єктів замість зосереджених.

Великі розподілені об'єкти є енергоємними. Таким об'єктом є і торговельний центр. Для його функціонування потрібно витрачати енергію на тепло (компенсація тепловтрат та підігрів приміщень до заданої температури), освітлення, вентиляцію.

Конструктивно торговельний центр може складатися з декількох поверхів, на яких розміщуються приміщення. Мікроклімат кожного окремого приміщення, залежно від його призначення, може вимагати спеціальних умов [1]. Тому загальні підходи до управління параметрами повітря та режимами вентиляції не підходять [2]. Також існують державні стандарти і норми для гарантування безпечного перебування людей у приміщеннях. Ці норми стосуються процесів побудови будівель і забезпечення чистоти повітря.

Як показують дослідження, витрати на підігрів, кондиціонування та вентиляцію повітря займають близько 60–70 % від усіх потреб енергоресурсів, що витрачаються на функціонування торговельного центру.

Також активізація попиту відвідувачів торговельних центрів може допомогти стимулювати енергозбереження в містах. Наприклад, у Японії, щоб стимулювати мешканців відвідувати та перебувати у торговельних центрах замість того, щоб знаходитися вдома, їм нараховують спеціальні бали, які можна витратити в тому ж торговельному центрі на їжу або товари [3].

Тому розробка моделей торговельного центру як об'єкта з розподіленими параметрами, яка дозволить синтезувати рішення для зменшення витрат енергоресурсів та встановити комфортний мікроклімат у приміщеннях, є актуальним завданням.

Аналіз попередніх досліджень. У моделюванні більшості систем керування процесами вентиляції та кондиціонування повітря не враховують просторові координати, а отже і розподіленість об'єкта [4]. Однак характер поведінки об'єкта неоднорідний у межах приміщення, що призводить до виникнення помилок керування при використанні значень моделі. У [5] стверджується, що завданням будь-якої стратегії керування є створення системи, яка враховує протяжність об'єкта з мінімізацією споживання електроенергії та забезпеченням заданого комфорту.

Проте використання моделей розподілених об'єктів має недоліки, пов'язані з необхідністю використання засобів високої обчислювальної потужності [6]. Тому для забезпечення властивостей спостережливості і керованості об'єкта керування необхідне збільшення кількості датчиків та нагрівачів. У [7, 8] автори також відмовляються від побудови моделей розподілених об'єктів, замінюючи їх на зосереджені через зниження гнучкості систем автоматичного керування, вимоги наявності значних обчислювальних потужностей контролерів.

Для подолання цих недоліків у [9] пропонується використовувати метод розщеплення. Він полягає у розділенні структури тривимірного об'єкта на задану кількість одновимірних. При цьому говориться, що цей метод дозволяє достатньо економно отримувати числові значення температур у твердих тілах, якщо їх початкова температура постійна, а з поверхні відбувається теплообмін із середовищем з постійною температурою [9]. Як альтернатива використанню методу розщеплення пропонується заміна складного об'єкта з розподіленими параметрами послідовним або паралельним поєднанням ділянок із зосередженими параметрами. Ці ділянки відзначаються єдністю фізичних та технологічних процесів, а також характеризуються простотою математичного опису [10].

У [11] вказується, що значна кількість об'єктів енергоспоживання передбачає наявність теплових та масообмінних процесів, що обумовлює значну інерційність та транспортне запізнення. Зазначається, що побудова розподілених моделей таких об'єктів є обґрунтованою. Це дозволить робити адекватне прогнозування поведінки цих об'єктів при збуреннях та забезпечити керування параметрами із застосуванням простих, практично використовуваних контролерів параметричного керування [11].

Модернізація систем керування мікрокліматом торговельних центрів вимагає наявності великої кількості холодильного обладнання, яке потребує створення технологічних заходів щодо його енергоефективності. Навіть незначна економія енергії (до 5 %) при зниженні втрат на холодильне або нагрівальне обладнання дозволить значно знизити навантаження на енергетичний сектор країн [12]. У [13] описується побудова моделі овочесховища як об'єкта із зосередженими параметрами за допомогою використання рівняння теплового балансу. За допомогою цієї моделі був розроблений метод керування температурно-вологісними процесами, який знизив час роботи виконавчих пристроїв на 13 %.

Таким чином, проблема енергоефективності продукції не може бути вирішена без розробки нових або вдосконалення існуючих методів керування параметрами мікроклімату торговельних центрів.

Метою статті є побудова моделі торговельного центру як об'єкта з розподіленими параметрами за рахунок розділення його на задану кількість об'єктів із зосередженими параметрами. Це дозволить синтезувати енергозберігаючі алгоритми керування та підвищити точність управління температурними режимами.

Викладення основного матеріалу. Для розробки нових алгоритмів потрібна інформація про об'єкт дослідження, тобто його ідентифікація. На практиці проведення реальних експериментів є недешевим, тому віддають перевагу побудові математичних або комп'ютерних моделей об'єктів, які мають ті самі властивості, що й реальний об'єкт.

Процес побудови математичної моделі теплового режиму торговельного центру може складатися з таких етапів:

1. Вибір торговельного центру;
2. З'ясування складу елементів, внутрішньої структури та видів зв'язків між ними;
3. Декомпозиція торговельного центру на більш елементарні об'єкти, наприклад, приміщення;
4. Розробка взаємопов'язаних математичних моделей окремих приміщень та, як наслідок, теплового режиму торговельного центру.

Будівля торговельного центру, що розглядається, має площу 30 тис. м². Перший поверх складається зі 130 приміщень та має площу 10 тис. м². План поверху торговельного центру наведено на рисунку 1.

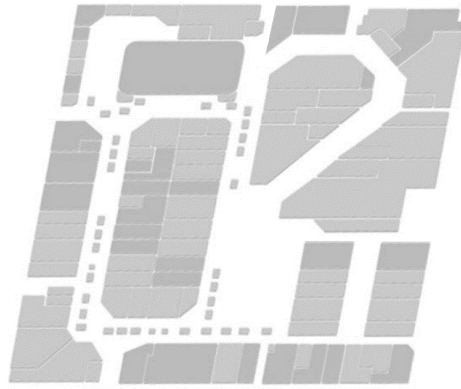


Рис. 1. План першого поверху торговельного центру

Як правило, тепло в приміщення подається через припливно-витяжну систему вентиляції повітря [14]. Розглянемо окреме приміщення торговельного центру. У межах приміщення вентиляція розташовується, як наведено на рисунку 2.

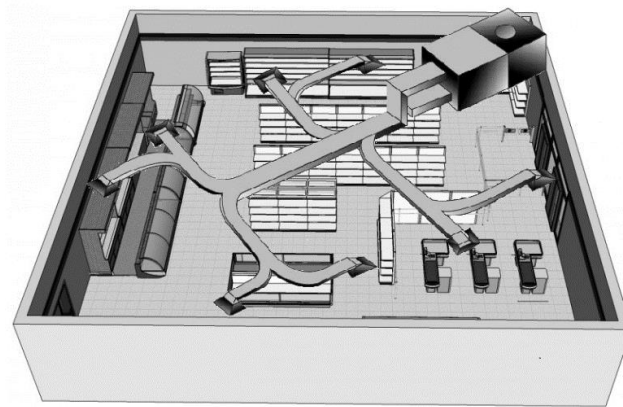


Рис. 2. Окреме приміщення торговельного центру

Приміщення, що наведено на рисунку 2, виконує функцію супермаркету. Основним джерелом тепла є припливно-витяжна система повітря. Приміщення розбите на вісім зон. Вони позначені цифрами 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11 на рисунку 3. У кожній зоні можлива підтримка заданих температурних умов. Приплив повітря в цих зонах можна регулювати заслінками. Супутніми джерелами тепла є відвідувачі супермаркету та його працівники. Поява людей у приміщенні та тривалість їх знаходження в різних зонах визначаються ймовірнісними процесами. Втрата тепла відбувається через стіни (1, 4, 7, 13) і дверний отвір (12).

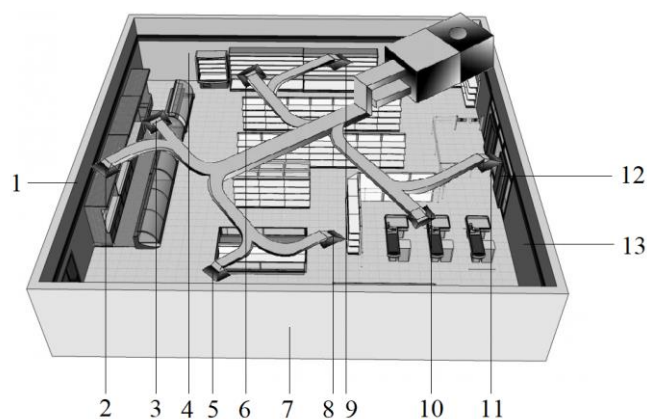


Рис. 3. Схема надходжень та втрат тепла в приміщенні торговельного центру

Математична модель використовується на заміну реальній моделі у випадках, коли є обмеження за часом та кількістю використаних ресурсів, або необхідно досягнути високої точності для побудови більш якісного керування процесами.

Математична модель торговельного центру є унікальною з точки зору споруди через географічне розташування об'єкта, конструктивні особливості (форма будівлі, кількість поверхів). Однак приміщення в торговельному центрі можна узагальнити та розділити за характером їх призначення. Вони мають спільні риси: у кожному з них потрібно підтримувати заданий мікроклімат за допомогою виконавчих пристроїв залежно від зовнішніх умов. Тому модель торговельного центру можна представити як набір компонентів, які взаємодіють між собою.

Загальні тепловтрати приміщення $\sum Q_{emp}$ торговельного центру можна описати за допомогою формули:

$$\sum Q_{emp} = \sum Q_0 + \sum Q_{inf} + \sum Q_e, \quad (1)$$

де $\sum Q_0$ – втрати теплоти через зовнішні огорожувальні конструкції, Вт; $\sum Q_{inf}$ – втрати теплоти на інфільтрацію холодного повітря, Вт; $\sum Q_e$ – втрати теплоти на витяжну вентиляцію, Вт.

Тепловтрати Q_0 через огорожувальні конструкції визначаються за формулою:

$$Q_0 = \frac{S_{OK}(t_e - t_3)}{R_{OK}}, \quad (2)$$

де S_{OK} – площа поверхні огорожувальних конструкцій, м²; R_{OK} – опір теплопередачі конструкції огорожі, м²·°C/Вт; t_e – температура повітря в приміщенні, °C; t_3 – температура зовнішнього повітря, °C.

Термічний опір однорідної огорожі або шару R , що входить до складу багат шарового огороження, обчислюється за формулою:

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (3)$$

де δ – товщина шару, м; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, м²·год °C/ккал.

Втрати теплоти на інфільтрацію Q_{sum}^{inf} складаються з втрат теплоти через світлові прорізи Q_w^{inf} , відкриті двері Q_d^{inf} , нещільність дверей Q_{dl}^{inf} (4).

$$\sum Q_{sum}^{inf} = \sum Q_w^{inf} + \sum Q_d^{inf} + \sum Q_{dl}^{inf}. \quad (4)$$

Формули для їх розрахунку можна знайти у [15].

Внутрішні тепловиділення в приміщенні можна обчислити за формулою:

$$Q_{inH} = Q_l + Q_{EL} + Q_{rad} + Q_{ocv}, \quad (5)$$

де Q_l – тепло від людей, що працюють у приміщенні, Вт; Q_{EL} – тепловиділення електричного обладнання, Вт. Залежить від потужності обладнання, коефіцієнта його використання; Q_{rad} – теплонадходження від сонячної радіації, Вт; Q_{ocv} – теплонадходження від джерел освітлення, Вт.

Кількість тепла Q_{VENT} , яку необхідно подати в приміщення для підтримання заданого теплового режиму, можна отримати, описавши рівняння теплового балансу

$$Q_{VENT} = \sum Q_{emp} + \sum Q_{sum}^{inf} - Q_{inH}. \quad (6)$$

Ця кількість також визначається за формулою

$$Q_{VENT} = C_n G_n (t_k - t_3), \quad (7)$$

де C_n – питома теплоємність повітря, Дж / (кг·°C); G_n – масові витрати повітря, кг/с; t_k – необхідна температура нагріву, °C; t_3 – температура зовнішнього повітря, °C.

Масова витрата повітря G_n , що нагрівається, визначається за формулою:

$$G_n = L_n \cdot \rho_n, \quad (8)$$

де L_n – об'ємна кількість повітря, що нагрівається, м³/год; ρ_n – щільність повітря, кг/м³.

Продуктивність вентилятора обчислюється за формулою:

$$L_n = S \cdot h \cdot k, \quad (9)$$

де S – площа приміщення, м²; h – висота приміщення, м; k – кратність повітрообміну.

Виходячи з (6), можна отримати необхідну температуру припливного повітря:

$$t_k = \frac{Q_{VENT}}{C_n G_n} + t_3. \quad (10)$$

Теплова енергія, що підводиться в приміщення торговельного центру за допомогою припливної вентиляції Q_{VENT} , витрачається на нагрівання повітря в приміщенні Q_{np} і на покриття витрат теплоенергії

через огорожувальні конструкції $Q_{ок}$ та інфільтрацію $Q_{інф}$ й компенсується внутрішнім тепловиділенням:

$$Q_{VENT} + Q_{внутр} = Q_{np} + Q_{ок} + Q_{інф}. \quad (11)$$

За нескінченно малий відрізок часу енергія, підведена в приміщення торговельного центру $Q_{VENT} \cdot dt$, витрачається на нагрівання приміщення на dt градусів $G_{np} \cdot C_{np} \cdot dt$. Підведена енергія $Q_{VENT} \cdot dt$ також іде на покриття витрат енергії через огорожувальні конструкції $k_{ок} \cdot S_{ок} \cdot \Delta t_e \cdot dt$. Тобто диференціальне рівняння теплового балансу набуває вигляду

$$(Q_{VENT} - Q_{інф} + Q_{внутр}) d\tau = G_{np} C_{np} dt + k_{ок} S_{ок} \Delta t_e d\tau. \quad (12)$$

У рівнянні (12) $\Delta t_e = t_e - t_3$.

Перетворимо отримане рівняння (12) у (13), розділивши на $k_{ок} S_{ок} d\tau$.

$$\frac{(Q_{VENT} - Q_{інф} + Q_{внутр})}{k_{ок} \cdot S_{ок}} = \frac{G_{np} \cdot C_{np}}{k_{ок} \cdot S_{ок}} \cdot \frac{dt}{d\tau} + \Delta t_e. \quad (13)$$

Позначимо $\frac{G_{np} \cdot C_{np}}{k_{ок} \cdot S_{ок}}$ як постійну часу приміщення T_{np} . Тоді отримаємо вираз (14).

$$\frac{(Q_{VENT} - Q_{інф} + Q_{внутр})}{k_{ок} \cdot S_{ок}} = T_{np} \cdot \frac{dt}{d\tau} + t_e - t_3. \quad (14)$$

З цього рівняння отримаємо передавальну функцію приміщення

$$W_{об}(p) = \frac{\frac{(Q_{VENT} - Q_{інф} + Q_{внутр})}{k_{ок} \cdot S_{ок}} + \Delta t_1}{T_{np} \cdot p + 1}, \quad (15)$$

де $\Delta t_1 = t_3 - t_e + 1$.

Постійна часу T_{np} приміщення тим більша, чим більша теплоємність приміщення і чим менша теплопровідність її внутрішніх і зовнішніх огорожувальних конструкцій. В отриманій моделі враховуються тепла енергія, підведена в приміщення, площа перекриттів, кількість людей.

Отримана модель (15) описує поведінку об'єкта із зосередженими параметрами. Проте торговельний центр є більш складною конструкцією, вимоги до точності керування потребують більш точної моделі для забезпечення різних температурних умов усередині приміщення. Для цього створюють моделі з розподіленими параметрами. Подібний метод побудови моделі теплового об'єкта із зосередженими параметрами запропоновано у [13].

Вихідні дані для торговельного центру, що моделюється, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Вихідні дані для побудови передавальних функцій приміщення торговельного центру

Параметр	Значення	Формула для розрахунків
Загальний обсяг приміщення V_{np} , м ³	900	$V_{np} = a \cdot b \cdot c$
Щільність повітря ρ_n , кг/м ³	1,27	-
Масове число повітря, кг	487,68	$G_{np} = V_{np} \cdot \rho_{np}$
Площа огорожувальної конструкції для чотирьох стін $S_{ст}$ і даху S_d , м ²	510	$S_{ок} = 4 \cdot S_{ст} + S_d$
Опір теплопередачі огорожувальних конструкцій, м ² ·год·°C /ккал	2,99	формула (3)
Опір теплопередачі даху, м ² ·год·°C /ккал	3,51	формула (3)
Середній коефіцієнт теплопередачі огорожі $k_{ок}$, м ² год °C /ккал	0,6193	$k_{ок} = \frac{1}{R_{ок}} = \frac{1}{2,99} + \frac{1}{3,51}$
Середній коефіцієнт теплопередачі огорожі $k_{ок}$, кДж/(м ² ·год·°C)	2,595	$k_{ок} \cdot 4,19$
Питома теплоємність повітря C_n , кДж/(кг·°C)	1,005	-
Постійна часу приміщення $T_{(np)}$, год	1,5	$\frac{G_{np} \cdot C_{np}}{k_{ок} \cdot S_{ок}}$
Температура повітря ззовні приміщення t_3 , °C	+ 18	-
Тепловіддача Q , кДж	48,246	формула (7)
Потужність вентилятора $P_{ен}$, кВт	2	-
Продуктивність вентилятора A , м ³ /год	18900	формула (9)

Використовуючи дані з таблиці 1 (17), отримано передавальні функції приміщення без людей за температури зовнішнього повітря $t_3 = + 18 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$W_{об}(p) = \frac{54,45}{1,5 \cdot p + 1} \quad (18)$$

За допомогою отриманих у таблиці 1 розрахунків та передавальної функції (18) побудована математична модель приміщення торговельного центру за постійної температури зовнішнього повітря, що становить $+ 18 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 4).

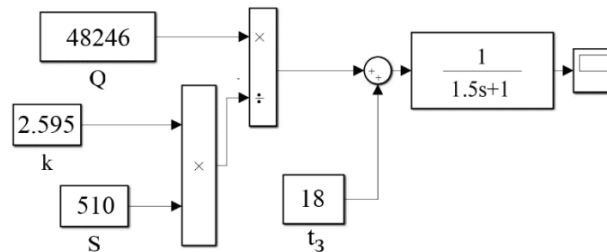


Рис. 4. Схема математичної моделі приміщення торговельного центру

Перехідна характеристика при нагріванні повітря припливно-витяжною системою вентиляції та кондиціонування представлена на рисунку 5.

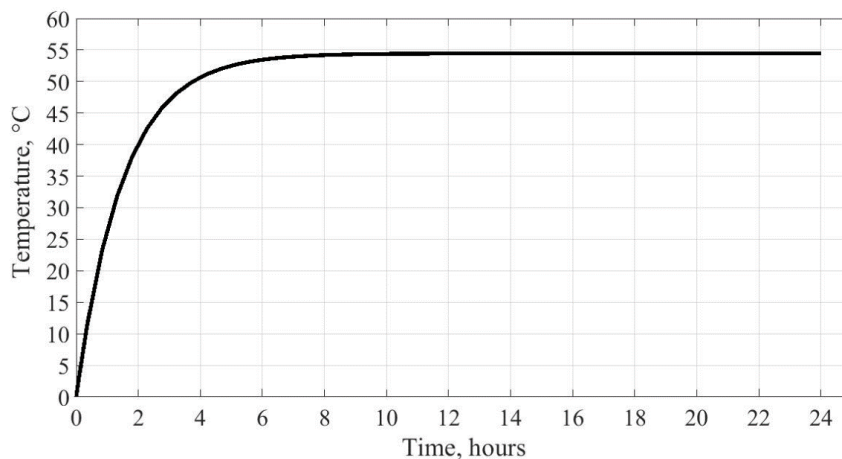


Рис. 5. Перехідна характеристика приміщення торговельного центру, яке досліджується

З рисунка 5 видно, що стале значення температури повітря в приміщенні становить $54,45 \text{ }^\circ\text{C}$, що значно перевищує необхідну комфортну температуру для перебування людини та збереження продукції. За допомогою контуру регулювання нагрівання припливного повітря та заслінок температура повітря в приміщенні підтримується на заданому рівні.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проаналізовані літературні джерела показують, що для складних енергоємних об'єктів необхідно будувати та розглядати просторові моделі, які дають більш точний опис об'єкта, на відміну від зосереджених моделей.

Використовуючи рівняння теплового балансу, побудовано математичну модель приміщення торговельного центру. Аргументами цього рівняння є теплота, що витрачається на нагрівання повітря приміщення, втрати теплоенергії через огорожувальні конструкції та на інфільтрацію. Також ураховується тепло, яке залежить від кількості людей у приміщенні.

Запропоновано об'єкт з розподіленими параметрами розділити на n об'єктів із зосередженими параметрами, які виконують функцію продуктового супермаркету. Показано, що розроблена модель із зосередженими параметрами має недолік у неможливості задання параметрів для окремих точок приміщення, що може вплинути на точність регулювання.

У подальших дослідженнях пропонується розглядати окреме приміщення як об'єкт із розподіленими параметрами та керувати температурою в секціях з повітропроводами.

Отримано перехідні характеристики побудованих моделей, що дозволило підтвердити лінійні властивості об'єкта та є вихідною інформацією для побудови регуляторів.

Список використаної літератури:

1. Євсеєнко О.М. Синтез системи виміру параметрів повітря у приміщеннях торговельного центру / О.М. Євсеєнко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Системний аналіз, управління та інформаційні технології : зб. наук. пр. – Харків. – 2022. – № 1. – С. 28–34. DOI: 10.20998/2079-0023.2022.01.05.
2. Качанов П.О. Огляд потреби побудови енергоефективної системи керування вентиляцією та кондиціонуванням у торговельних центрах / П.О. Качанов, О.М. Євсеєнко // Технічна інженерія. – 2022. – № 1. – С. 69–76. DOI: 10.26642/ten-2022-1(89)-69-76.
3. Цікаві факти у сфері енергоефективності [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.netishynrada.gov.ua/комунальні-підприємства/енерго/цікаві-факти-у-сфері-енергоефективності>.
4. Liu S. A distributed-parameter-model approach to optimal comfort control in air conditioning systems / S.Liu, X.He // Proceedings of the American Control Conference, Baltimore, MD, USA, June 29–July 1. – Baltimore, 1994. – P. 3454–3458.
5. Naidu D.S. Advanced control strategies for heating, ventilation, air-conditioning, and refrigeration systems – An overview. Part I : Hard control / D.S. Naidu, C.G. Rieger // HVAC&R Research. – 2011. – Vol. 17, № 1. – P. 2–21. DOI: 10.1080/10789669.2011.540942.
6. Control, estimation and optimization of energy efficient buildings / J.Borggaard and other // Proceedings of the American Control Conference (ACC'09), June 10–12. – St. Louis, Missouri, 2009. – P. 837–841. DOI: 10.1109/ACC.2009.5160552.
7. Modeling of distributed parameter system / E.Nikolov and other // International Conference Automatics and informatics. – Sofia, Bulgaria, 2010. – P. 69–74.
8. Котов Б.І. Моделювання перехідних режимів обладнання холодильної камери та структури системи автоматичного керування (САК) температурно-вологісним режимом / Б.І. Котов, В.О. Грищенко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. – Кіровоград, 2009. – Вип. 39. – С. 62–67.
9. Верлань А.А. Спрощення математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами на основі методу розщеплення / А.А. Верлань, В.А. Іванюк // Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2017. – Т. 7, № 4. – С. 285–290.
10. Шавранський М.В. Моделювання та ідентифікація основних блоків теплової електричної станції (ТЕС) як об'єктів автоматизації / М.В. Шавранський // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2018. – № 2 (67). – С. 62–69. DOI: 10.31471/1993-9973-2018-2(67)-62-69.
11. Грищенко В.О. До питання математичного опису динаміки типових сільськогосподарських об'єктів із розподіленими параметрами / В.О. Грищенко // Науковий вісник НУБіП України. Сер. : Техніка та енергетика АПК. – 2018. – Вип. 283. – С. 199–207.
12. Malanchuk Y. Problems of automation of fresh fruits and vegetables storage processes / Y.Malanchuk, A.Khrystyuk, V.Sych // Modeling, Control and Information Technologies : Proc. of Intern. Sci. and Practical Conf. 4. – 2020. – P. 92–95 [Electronic resource]. – Access mode : <https://itconfdoc.nuwm.edu.ua/index.php/ITConf/article/view/147/97>.
13. Kachanov P. Devising a Method To Improve the Accuracy of Maintaining the Pre-Set Temperature and Humidity Conditions at a Vegetable Storage Facility Under a Food Storing Mode / P.Kachanov, O.Yevseienko, N.Yevsina // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 110, № 2. – P. 89–98. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.229844.
14. Євсеєнко О.М. Побудова SCADA-системи керування мікрокліматом приміщень торговельного центру / О.М. Євсеєнко, П.О. Качанов // Вісник Хмельницького національного університету. Сер. : Технічні науки. – 2022. – № 3. – С. 168–176. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-309-3-168-176.
15. Дубровська В.В. Визначення теплового навантаження будівель та вибір системи тепlopостачання / В.В. Дубровська, В.І. Шкляр. – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 116 с.

References:

1. Yevseienko, O.M. (2022), «Syntez systemy vymiru parametriv povitria u prymishchenniakh torhovelnogo tsentru», *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Ser. *Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnologii*, zb. nauk. pr., Kharkiv, No. 1, pp. 28–34, doi: 10.20998/2079-0023.2022.01.05.
2. Kachanov, P.O. and Yevseienko, O.M. (2022), «Ohliad potreby pobudovy enerhoefektyvnoi systemy keruvannia ventyliatsiieiu ta kondytsionuvanniam u torhovelnikh tsentrakh», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1, pp. 69–76, doi: 10.26642/ten-2022-1(89)-69-76.
3. Tsikavi fakty u sferi enerhoefektyvnosti, [Online], available at: <https://www.netishynrada.gov.ua/комунальні-підприємства/енерго/цікаві-факти-у-сфері-енергоефективності>
4. Liu, S. and He, X. (1994), «A distributed-parameter-model approach to optimal comfort control in air conditioning systems», *Proceedings of the American Control Conference, Baltimore, MD, USA, June 29–July 1*, Baltimore, pp. 3454–3458.
5. Naidu, D.S. and Rieger, C.G. (2011), «Advanced control strategies for heating, ventilation, air-conditioning, and refrigeration systems – An overview. Part I : Hard control», *HVAC&R Research*, Vol. 17, No. 1, pp. 2–21, doi: 10.1080/10789669.2011.540942.

6. Borggaard, J. et al. (2009), «Control, estimation and optimization of energy efficient buildings», *Proceedings of the American Control Conference (ACC'09), June 10–12, St. Louis, Missouri*, pp. 837–841, doi: 10.1109/ACC.2009.5160552.
7. Nikolov, E. et al. (2010), «Modeling of distributed parameter system», *International Conference Automatics and informatics*, Sofia, Bulgaria, pp. 69–74.
8. Kotov, B.I. and Hryshchenko, V.O. (2009), «Modeliuvannia perekhidnykh rezhymiv obladnannia kholodynoi kamery ta struktury systemy avtomatichnoho keruvannia (SAK) temperaturno-volohisnym rezhymom», *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn, zahalnoderzh. mizhvid. nauk.-tekh. zb.*, Kirovohrad, Issue 39, pp. 62–67.
9. Verlan, A.A. and Ivaniuk, V.A. (2017), «Sproshchennia matematychnykh modelei ob'ektiv z rozpodilenyimi parametramy na osnovi metodu rozshchepлення», *Informatyka ta matematychni metody v modeliuvanni*, Vol. 7, No. 4, pp. 285–290.
10. Shavranskyi, M.V. (2018), «Modeliuvannia ta identyfikatsiia osnovnykh blokiv teplovoi elektrychnoi stantsii (TES) yak ob'ektiv avtomatyzatsiï», *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, No. 2 (67), pp. 62–69, doi: 10.31471/1993-9973-2018-2(67)-62-69.
11. Hryshchenko, V.O. (2018), «Do pytannia matematychnoho opysu dynamiky typovykh silskohospodarskykh ob'ektiv iz rozpodilenyimi parametramy», *Naukovi visnyk NUBiP Ukrainy. Ser. Tekhnika ta enerhetyka APK*, Issue 283, pp. 199–207.
12. Malanchuk, Y., Khrystyuk, A. and Sych, V. (2020), «Problems of automation of fresh fruits and vegetables storage processes», *Modeling, Control and Information Technologies*, Proc. of Intern. Sci. and Practical Conf. 4, pp. 92–95, [Online], available at: <https://itconfdoc.nuwm.edu.ua/index.php/ITConf/article/view/147/97>
13. Kachanov, P., Yevseienko, O. and Yevsina, N. (2021), «Devising a Method To Improve the Accuracy of Maintaining the Pre-Set Temperature and Humidity Conditions at a Vegetable Storage Facility Under a Food Storing Mode», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 110, No. 2, pp. 89–98, doi: 10.15587/1729-4061.2021.229844.
14. Yevseienko, O.M. and Kachanov, P.O. (2022), «Pobudova SCADA-systemy keruvannia mikroklimatom prymishchen torhovelnoho tsentru», *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Ser. Tekhnichni nauky*, No. 3, pp. 168–176, doi: 10.31891/2307-5732-2022-309-3-168-176.
15. Dubrovska, V.V. and Shkliar, V.I. (2011), *Vyznachennia teploвого navantazhennia budivel ta vybir systemy teplopostachannia*, NTUU «KPI», Kyiv, 116 p.

Євсєєнко Олег Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

<https://orcid.org/0000-0001-5432-1211>.

Наукові інтереси:

– розробка автоматизованих систем керування технологічними процесами.

E-mail: olegyevseienko@gmail.com.

Yevseienko O.M.

Shopping mall mathematical modelling as an object with distributed parameters

Shopping mall is an energy-intensive object with distributed parameters. The number of people in building, high energy prices, buildings operation standards, premises types set the requirements for the microclimate creation and maintenance. Studies show that from 30 to 40 percent of the energy resources total amount is spent for administrative buildings heat losses compensation. And an additional 20 percent energy is used to ensure comfortable temperature and humidity conditions of the shopping mall. At the same time, it is possible to overspend energy resources and, as a result, not to provide desired comfortable conditions. Literature review showed that energy resources economy of objects with distributed parameters is impossible without energy-efficient solutions implementation.

The article is devoted to the construction and research of the shopping mall mathematical model. For its creation, the parameters one of the Kharkiv city building have been established. Due to the complexity of the control object, to divide it into a given number of objects with lumped parameters is suggested. Premises, the purpose of which are supermarkets with products, were selected as objects with lumped parameters. A model of a separate premise, that considers the influence of heaters, the number of people, heat flows through the walls and ceiling was created. To obtain the transfer function of the control object, the heat balance equation was used. It made possible to consider heat output and all heat input sources.

The object of research is non-stationary temperature fields of a distributed object. Transient characteristics of the developed model were obtained. The resulting model does not allow setting and maintaining the parameters of different temperature zones inside the premises. Therefore, in further studies, it is necessary to expand the obtained model by considering thermal conductivity level and boundary conditions.

Keywords: shopping mall; mathematical model; object with distributed parameters; object with lumped parameters.

Стаття надійшла до редакції 13.02.2023.