

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА КОНТУРУ ТЕМПЕРАТУРИ ВЕНТИЛЯТОРНОЇ УСТАНОВКИ ВАРІАЦІЙНИМ МЕТОДОМ

Анотація. У статті досліджується оптимізація систем керування вентиляцією, яка має важливе значення для підвищення енергоефективності, зниження витрат на енергію та покращення якості повітря в приміщенні за рахунок використання оптимального регулятора та введення обмеження за вихідною координатою (температурою в приміщенні) перерегулювання відсутнє, а час установаження заданого значення зменшується на 10%.

Ключові слова: вентиляторна установка, енергозбереження, оптимальне керування.

Вступ. Розробка енергоефективної системи вентиляції для офісної будівлі має вирішальне значення для зменшення споживання енергії та витрат, одночасно зберігаючи комфортне та здорове середовище в приміщенні. При проектуванні енергоефективної вентиляційної системи слід враховувати кілька факторів, включаючи планування будівлі, кількість людей і місцеві кліматичні умови.

Мета. Метою даної роботи є синтез регулятора температури вентиляторної установки офісної будівлі варіаційним методом.

Матеріал та результати дослідження.

Погана якість повітря в приміщенні може мати значний вплив на здоров'я працівників будівлі, включаючи ризики передачі інфекційних захворювань повітряним шляхом і впливу твердих частинок або хімічних забруднювачів [1]. Тому правильна вентиляція має вирішальне значення для підтримки здорового середовища в приміщенні. Розуміння конкретних вимог до вентиляції офісної будівлі та її працівників має важливе значення для ефективного проектування системи [2].

Існує два основні методи вентиляції в будівлях: природна вентиляція та системи механічного/примусового розподілу повітря [3]. Природна вентиляція використовує дію вітру, плавучість (вентиляцію труби), вентиляційні колодязі, конструкції фасадів і вентиляційні отвори для забезпечення свіжим повітрям. З іншого боку, системи механічної вентиляції використовують механічні пристрої для розподілу та циркуляції повітря по всій будівлі. Обидва підходи мають свої переваги та міркування, і вибір залежить від таких факторів, як дизайн будівлі, місцевий клімат і цілі енергоефективності.

Проектування вентиляції в офісних будівлях передбачає розрахунок навантажень на опалення та охолодження приміщень, визначення потреб у об'ємі повітря та вибір відповідного обладнання [4]. Методи розрахунку враховують такі фактори, як кількість працівників, їх діяльність і необхідний приплив свіжого повітря. Контроль температури, втрати тепла в повітроводах і визначення розмірів обладнання та повітроводів також є важливими міркуваннями в процесі проектування [5].

Оптимізація систем керування вентиляцією має важливе значення для підвищення рівня енергоефективності, зниження витрат на енергію та покращення якості повітря в приміщенні. Існують різні методи оптимізації систем керування вентиляцією, включаючи алгоритми керування, оптимізаційні моделі та методи машинного навчання.

Досягнення енергоефективності у вентиляційних системах передбачає покращення кількох факторів, таких як відновлення та розподіл теплової енергії, використання енергоефективних двигунів вентиляторів та оптимізація форм лопатей вентилятора.

Однак найбільш істотної економії електроенергії можна досягти за рахунок оптимізації перехідних процесів при перепадах температур і зниження споживання електроенергії на роботу вентилятора. Нелінійність коефіцієнта підсилення процесу нагрівання робить вкрай важливим розгляд надмірного регулювання як фактор для оптимізації системи. Енергоефективність системи опалення можна оцінити за допомогою функції якості, яка відображає цей критерій:

$$J = \min \int_0^{\infty} (X^T A X + U^T B U) dt \quad (1)$$

де J - мінімальне значення похибки, X – матриця змінних стану системи, U – матриця керуючих впливів, A - матриця динаміки, B – матриця обмежень на керування.

Задача оптимізації може бути розв'язана за допомогою методу Ейлера та варіаційного числення шляхом дискретизації функції вартості та наближення рішення на дискретних кроках у часі [6]. Тоді задачу оптимізації можна сформулювати як задачу оптимізації з дискретним часом, яку можна вирішити за допомогою стандартних методів оптимізації.

Нехай заданий керований об'єкт, що представляє собою вентиляторну установку, із передаточною функцією:

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p + 2\xi T p + 1} = \frac{x(p)}{u(p)}$$

$$\dot{x}_1 = x_2,$$

чи $\dot{x}_2 = -a_1 x_1 - a_2 x_2 + bu,$

$$a_1 = \frac{1}{T^2}; a_2 = \frac{2\xi}{T}; b = \frac{K}{T}.$$

Мінімізований функціонал має вигляд:

$$\min_u J = \int_0^\infty (\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + cu^2) dt \quad (2)$$

Потрібно знайти $u = \gamma(x)$, що забезпечує екстремум функціонала при переході з початкового стану $x(0) = x_0$ в кінцевий стан $x(\infty) = 0$.

Додаткові рівняння обмеження в цьому випадку запишуться:

$$\varphi_1 = \dot{x}_1 - x_2 = 0$$

$$\varphi_2 = \dot{x}_2 + a_1 x_1 + a_2 x_2 - bu = 0$$

Відповідно до викладеного вище, складемо рівняння допоміжного функціонала:

$$J(x_1, x_2, u) = \int_0^\infty [\alpha_1 x_1^2 + \alpha_2 x_2^2 + cu^2 + \lambda_1 (\dot{x}_1 - x_2) + \lambda_2 (\dot{x}_2 + a_1 x_1 + a_2 x_2 - bu)] dt \quad (3)$$

Тут α_1, α_2, c – вагові константи.

Рівняння Ейлера-Лагранжа для нового функціоналу має вид:

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^2 \lambda_j \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_i} - \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_i} + \sum_{j=1}^2 \lambda_j \frac{\partial \varphi_j}{\partial \dot{x}_i} \right] = 0$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^n \lambda_j \frac{\partial g'_i}{\partial x_i} - \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial F_1}{\partial \dot{x}_i} + \lambda_i(t) \right] = 0 \quad (i = 1, \dots, n)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial \lambda_i} + \dot{x}_i - g_i(x, \dot{x}, t) = 0 \quad (i = 1, \dots, n)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial u} + \sum_{j=1}^n \lambda_j \frac{\partial g_j}{\partial u} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F_1}{\partial \dot{u}} \right) = 0. \quad (4)$$

У підсумку одержуємо наступні рівняння:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2,$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -a_1 x_1 - a_2 x_2 + bu,$$

$$\frac{d\lambda_1}{dt} = 2\alpha_1 x_1 + a_1 \lambda_2,$$

$$\frac{d\lambda_2}{dt} = 2\alpha_2 x_2 - \lambda_1 + a_2 \lambda_2,$$

$$2cu - b\lambda_2 = 0. \quad (5)$$

З останнього рівняння визначимо оптимальне керування $u = \frac{b}{2c} \lambda_2$.

Підставимо це рівняння у вихідну систему рівнянь Ейлера-Лагранжа

$$\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= -a_1 x_1 - a_2 x_2 + \frac{b^2}{2c} \lambda_2 \\ \frac{d\lambda_1}{dt} &= 2\alpha_1 x_1 + a_1 \lambda_2 \\ \frac{d\lambda_2}{dt} &= 2\alpha_2 x_2 - \lambda_1 + a_2 \lambda_2\end{aligned}\quad (6)$$

Складемо характеристичне рівняння даної системи

$$\Delta(p) = \begin{vmatrix} -p & 1 & 0 & 0 \\ -a_1 & -a_2 - p & 0 & \frac{b^2}{2c} \\ 2\alpha_1 & 0 & -p & a_1 \\ 0 & 2\alpha_2 & -1 & a_2 - p \end{vmatrix} = p^4 + 2(a_1 - 2a_2^2 - \frac{\alpha_2 b^2}{2c})p^2 + \frac{\alpha_1 b^2}{c} + a_1^2 = 0.$$

Введемо позначення: $B = a_1 - 2a_2^2 - \frac{\alpha_2 b^2}{2c}$; $C = \frac{\alpha_1 b^2}{c} + a_1^2 > 0$

Відповідно до співвідношення В та С будуть мати місце наступні варіанти наявності рішення:

Випадок 1. $B^2 \geq C$, тоді при $B > 0$ всі корені рівняння будуть уявними і оптимальний регулятор не існує, отже необхідно забезпечити вибір вагових коефіцієнтів таких, що $\frac{\alpha_2}{2c} < \frac{a_1 - 2a_2^2}{b^2}$.

При значеннях $B < 0$, корені визначаються за виразами: $\mu_{1,2} = \pm \gamma_1$, $\mu_{3,4} = \pm \gamma_2$, де

$$\gamma_1 = \sqrt{-B + \sqrt{B^2 - C}}, \gamma_2 = \sqrt{-B - \sqrt{B^2 - C}}.$$

Загальне рішення характеристичного рівняння запишеться у вигляді:

$$x_1(t) = c_1 e^{\gamma_1 t} + c_2 e^{-\gamma_1 t} + c_3 e^{\gamma_2 t} + c_4 e^{-\gamma_2 t}.$$

Згідно нульових граничних умов отримаємо сталі $c_1 = c_3 = 0$.

Похідну $\dot{x}_2$ визначимо через змінні стану $\dot{x}_2 = -\gamma_1 \gamma_2 x_1 - (\gamma_1 + \gamma_2) x_2$.

Із врахуванням другого рівняння системи, що описує обмеження, алгоритм оптимального управління: $U = -(\gamma_1 \gamma_2 - a_1) x_1 - (\gamma_1 + \gamma_2 - 2a_2) x_2$

Структурна схема замкненої системи має вигляд:

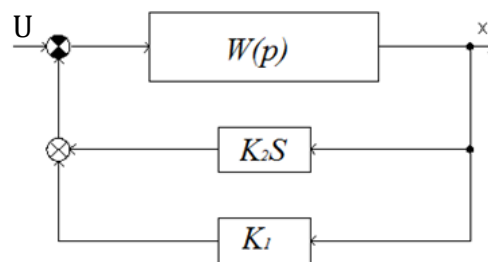


Рисунок 4.1 - Структурна схема оптимальної системи автоматичного керування

На структурній схемі прийняті наступні позначення: $K_1 = \gamma_1 \gamma_2 - a_1$; $K_2 = \gamma_1 + \gamma_2 - 2a_2$.

Випадок 2. Коли $B^2 < C$ корені характеристичного рівняння корені характеристичного рівняння будуть комплексними: $\mu_{1,2} = \nu \pm j\beta$, $\mu_{3,4} = -\nu \pm j\beta$,

$$\text{де } \nu = \sqrt{\frac{\sqrt{C} - B}{2}}, \beta = \sqrt{\frac{\sqrt{C} + B}{2}}.$$

Для цього випадку: $K_1 = \nu^2 + \beta^2 - a_1$ і $K_2 = 2(\nu - 2a_2)$.

Для контуру стабілізації температури припливного повітря передатна функція об'єкта, включаючи клапан, має такий вигляд:

$$W_o(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1} = \frac{0,273}{500 p^2 + 105 p + 1} = \frac{0,273}{(22,36)^2 p^2 + 2 \cdot 2,35 \cdot 22,36 p + 1}$$

$$a_1 = 0,02; a_2 = 0,21; b = 0,0574.$$

Вибираємо вагові коефіцієнти таким чином, щоб $\frac{\alpha_2}{c} < \frac{a_1 - 2a_2^2}{b^2} = \frac{0,04 - 0,1764}{0,23056} < 0$ за будь-яких значень вагових коефіцієнтів.

Рішення характеристичного рівняння визначаються за формулами:

$$\gamma_1 = \sqrt{-B + \sqrt{B^2 - C}}, \gamma_2 = \sqrt{-B - \sqrt{B^2 - C}}.$$

Параметри оптимального регулятора є функцією вагових коефіцієнтів, що вибираються відповідно до вимог до перехідного процесу. Відповідно до цього правильний вибір коефіцієнтів визначає співвідношення ваги квадратичної похибки за кожною складовою у функціоналі якості.

Найбільш простим та зрозумілим є підхід, при якому вагові коефіцієнти визначаються як ваги максимального значення змінної стану згідно методу Меррієма:

$$\alpha_i = \frac{1}{\Delta x_i^2}, \text{ де } \Delta x_i - \text{відносне максимальне відхилення } i\text{-ї координати.}$$

Оскільки перерегулювання за вихідної координатою призводить до суттєвого погіршення енергетичних характеристик в цілому, максимальне відхилення не повинно перевищувати номінального значення, а отже $\alpha_1 = \frac{1}{1^2} = 1$. На величину похідної від температури, тобто швидкості нарощування температури накладаються теж суттєві штрафи, тобто значення повинно бути більшим за одиницю, приймаємо $\alpha_2 = 60$. На керуючий вплив при цьому обмеження несуттєві, приймаємо допустиме перевищення керуючого впливу, відповідно $c = 0,2$. При вибраних коефіцієнтах ваги при функціоналі якості, що відповідає динамічній точності та енергетичним обмеженням на витрати отримуємо алгоритм оптимального керування за методом Ейлера-Лагранжа: $U = -0,5161x_1 - 3,4529x_2$.

Слід відзначити, що використання зворотних зв'язків призводить до падіння коефіцієнту підсилення в цілому, відповідно сигнал завдання повинен бути промасштабований для отримання необхідного значення температури. При використанні отриманого регулятора та необхідного коефіцієнту підсилення при подачі ступінчастого сигналу на вхід системи, отримуємо перехідні процеси, представлені на рисунку 4.2.

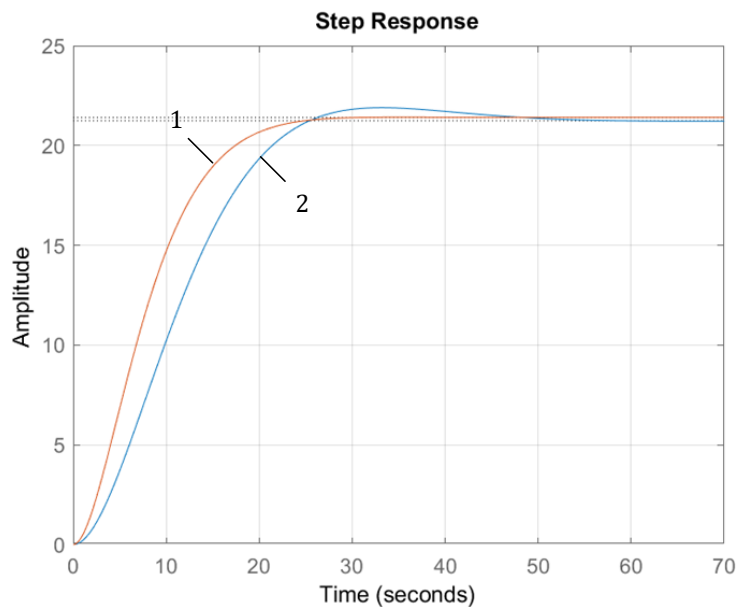


Рисунок 4.2 -Перехідні процеси контуру регулювання температури:
1 – з оптимальним регулятором, 2 – без оптимального регулятора

Висновки. Таким чином, при використанні оптимального регулятора за рахунок введення обмеження за вихідною координатою (температурою в приміщенні) перерегулювання відсутнє, а час установлення заданого значення зменшується на 10%.

Перелік посилань.

1. SPENGLER, John D.; CHEN, Qingyan. Indoor air quality factors in designing a healthy building. Annual Review of Energy and the Environment, 2000, 25.1: 567-600.
2. SEKHAR, S. C.; THAM, K. W.; CHEONG, David. Ventilation characteristics of an air-conditioned office building in Singapore. Building and Environment, 2002, 37.3: 241-255.
3. Nag, P.K. (2019). Ventilation in Office Buildings. In: Office Buildings. Design Science and Innovation. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2577-9_12
4. <https://www.linquip.com/blog/ventilation-design/>
5. ДСТУ Б EN 13779:2011 Вентиляція громадських будівель. Вимоги до виконання систем вентиляції та кондиціонування повітря; чинний від 2019-01-01. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2019. 20 с.
6. Ibraheem, Kais I., and Hisham M. Khudhur. "Optimization Algorithm Based on the Euler Method For Solving Fuzzy Nonlinear Equations". Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 1.4 (2022): 115.

Науковий керівник: доц. к.т.н. Босак А.В.

Р. Koshil¹, student

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Abstract. *The article investigates the optimization of ventilation control systems, which is important for increasing energy efficiency, reducing energy costs, and improving indoor air quality by using an optimal controller and introducing a limit based on the output coordinate (indoor temperature), there is no over-regulation, and the set-point time decreases by 10%.*

Keywords: fan installation, energy saving, optimal control.