

ОПТИМІЗАЦІЯ БАГАТОВИМІРНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДЛЯ КОМПЛЕКСІВ ШТУЧНОГО МІКРОКЛІМАТУ

І. М. Голінко, І. Є. Галицька

*Національний технічний університет України «КПІ»;
м. Київ, пр. Перемоги, 37; e-mail: gal@pti.kpi.ua*

Для промислових комплексів штучного мікроклімату запропонована методика розробки комплексної динамічної математичної моделі у просторі стану як єдиного багатовимірного об'єкта керування. Розглянута задача синтезу оптимального багатовимірного лінійно-квадратичного цифрового регулятора і синтезована матриця зворотного зв'язку, яка за параметрами стану об'єкта керування визначає траєкторію вектора оптимального впливу, що мінімізує квадратичний критерій. Запропонований алгоритм відрізняється наявністю логічного вибору обладнання для здійснення оптимального керування, що дозволяє переосмислити синтез автоматичної системи керування кондиціонера на основі розмежування взаємного впливу регулюючих параметрів.

Ключові слова: *системи штучного мікроклімату, промисловий кондиціонер, автоматична система керування, лінійно-квадратичний цифровий регулятор, оптимізація.*

Вступ

Промислові комплекси штучного мікроклімату (ПКШМ) відображують складний технологічний процес, який має чималий діапазон зміни вихідних даних. В залежності від використаного обладнання, промисловий кондиціонер (ПК) як об'єкт керування (ОК) є складним та нелінійним, що передбачає аналіз структури автоматичної системи керування (АСК) та розробки відповідних алгоритмів керування. Ряд керуючих впливів обмежений, а деякі елементи системи залишаються некерованими. З цих причин застосовують нетрадиційні рішення з автоматизації. Автоматичну систему керування кондиціонера необхідно розглядати в рамках єдиного комп'ютерно-інтегрованого комплексу із технологічними взаємозв'язками між обладнанням кондиціонера [1].

Кліматичне обладнання ПКШМ для реалізації енергозберігаючих алгоритмів керування складається із теплообмінних апаратів (калорифери підігріву, охолоджувачі) та зволожувачів. Оскільки динамічні властивості цих апаратів в загальному випадку різні – відповідні математичні моделі повинні залежати від апарату, який включено в систему регулювання, та дозволяти синтезувати комплексну динамічну модель для розробки АСК кондиціонера. Математичні моделі калориферів, охолоджувачів та зволожувачів розглянуто у [2-4].

Постановка задачі

Аналіз аналітичних моделей обладнання кондиціонера дозволяє зробити висновок, що типовий динамічний елемент кліматичного обладнання можна розглядати як багатовимірний ОК із п'ятьма входами $\mathbf{Z}^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]$ та двома виходами $\mathbf{Y}^T = [y_1 \ y_2]$. Враховуючи наявність математичних моделей обладнання кондиціонера у просторі стану [2-4], для стабілізації параметрів штучного мікроклімату, необхідно розробити комплексну динамічну математичну модель промислового кондиціонера як єдиного багатовимірного об'єкта керування та розглянути задачу синтезу оптимального багатовимірного лінійно-квадратичного цифрового регулятора у просторі стану, що є предметом дослідження.

Математична модель промислового кондиціонера у просторі стану

Технологічні схеми промислової обробки повітря залежать від кліматичного обладнання припливної системи центрального кондиціонера (ПСЦК). Серед розглянутих технологій, враховуючи конструктивні особливості та методи керування обладнанням, найбільше розповсюдження отримали ПСЦК, які для стабілізації параметрів мікроклімату використовують алгоритми керування: за методом "точки роси"; за методом "оптимального режиму". Використовуючи узагальнену структурну схему технологічного обладнання кондиціонера можна отримати параметричну схему промислового кондиціонера у просторі стану, за якою необхідно синтезувати багатовимірний регулятор.

Представлення багатовимірних ОК в просторі стану має ряд переваг порівняно із записом у вигляді передатних функцій. Наприклад, дозволяє описати довільні внутрішні структури, некеровані та неспостережені параметри ОК за допомогою мінімального числа параметрів. Якщо математичний опис ОК складено із врахуванням присутності спільних змінних стану, то така модель містить мінімальне число змінних стану, а форма опису відповідає мінімальній реалізації ОК. Математичні моделі для кліматичного обладнання ПКШМ у просторі станів розроблено із врахуванням спільних змінних стану, що вказує наявність недіагональних елементів матриці стану \mathbf{A} .

Додатковим аргументом на користь векторних моделей є велика кількість математичних пакетів для комп'ютерного аналізу технічних систем у просторі стану, які дозволяють із незначними часовими витратами проводити складні математичні дослідження.

Методика розробки комплексної динамічної моделі кондиціонера у просторі стану

Розробнику АСК в багатьох випадках знадобиться самостійно отримати комплексну модель кондиціонера у просторі стану, для якого параметрична схема відмінна від розглянутих нижче. Для розробки

комплексної динамічної моделі кондиціонера в просторі стану необхідно дотримуватися такої послідовності дій.

1. Визначити кількісний склад кліматичного обладнання N для конкретного кондиціонера, де N – кількість одиниць обладнання.

2. Для наявного обладнання вибрати необхідні моделі кліматичного обладнання у просторі стану.

3. Визначити збудуючі та регулюючі канали впливу для технологічної системи кондиціонера U_1^i, F_2^i, F_3^i , де $i = 1 \dots N$

4. Для комплексної моделі сформувати вектор керування U та збурення F із наявних впливів U_1^i та F_2^i на кліматичне обладнання.

5. Сформувати матрицю стану A комплексної моделі кондиціонера, діагональними елементами якої є матриці стану A^i кліматичного обладнання.

6. Сформувати матриці C^i із відповідних матриць B_2^i , які забезпечують передачу вектору вихідних змінних стану попередньої моделі X^{i-1} на відповідні змінні стану поточної моделі X^i обладнання кондиціонера.

7. Сформувати матриці B та D із відповідних матриць B_1^i та B_2^i .

При розробці комплексної моделі необхідно враховувати порядок динамічних моделей кліматичного обладнання.

Математична модель промислового кондиціонера із форсуночним зволожувачем

Як приклад, далі розглянуто комплексну модель для промислового кондиціонера із форсуночним зволожувачем. Для спрощення інтерпретації математичних моделей у подальшому верхній індекс матриць i у просторі стану буде замінено на абрєвіатуру обладнання кондиціонера. Для кондиціонера із форсуночним зволожувачем використовується таке кліматичне обладнання: камера змішування КЗ, водяний калорифер першого підігріву К1; водяний охолоджувач О; форсуночний (сотовий) зволожувач ФЗ (СЗ); водяний калорифер 2-го підігріву К2.

Керування обладнанням промислового кондиціонера із форсуночним зволожувачем проводиться використовуючи метод “точки роси”. Розглянемо технологічну схему ПСЦК.

На рис. 1. представлена параметрична схема ПСЦК, яку отримано із технологічної схеми підготовки повітря на промисловому кондиціонері із форсуночним зволожувачем. Зліва схеми показано збудуючі чинники, із низу – керуючі, витрата припливного повітря ΔG_A є збудуючим чинником, проте для більшості ПКШМ цей параметр є незмінним, тобто не впливає на роботу ПСЦК. Пунктирними стрілками на схемі показано канали впливу параметри яких не змінюється для керування за методом “точки роси”.

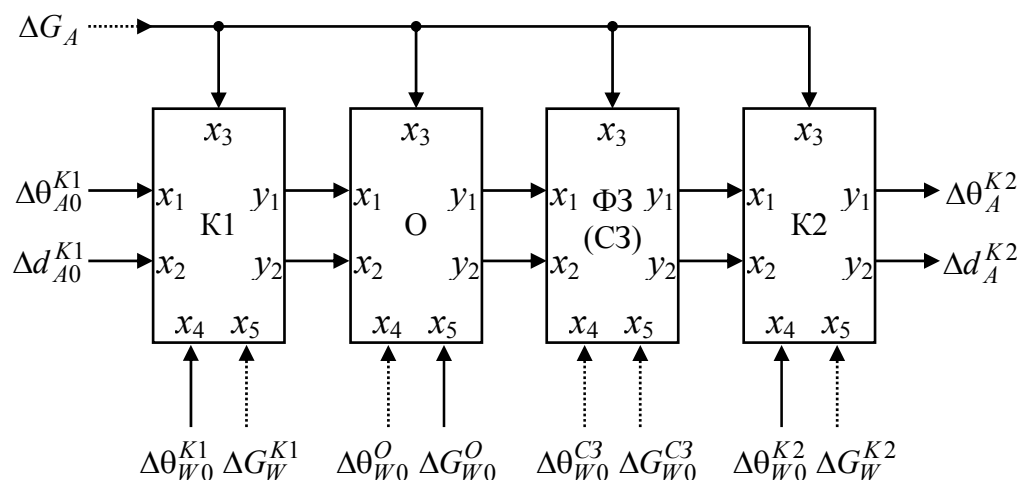


Рис. 1. Параметрична схема промислового кондиціонера, що реалізує керування за методом “точки роси”

На зображеній схемі промисловий кондиціонер не має технологічного обладнання для утилізації тепла витяжного повітря, ПСЦК представляє собою багатовимірний ОК для якого необхідно синтезувати регулятор стану. Таким чином, для параметричної схеми рис. 1 необхідно отримати математичну модель промислового кондиціонера у просторі стану за якою необхідно синтезувати багатовимірний регулятор. За параметричною схемою рис. 1. промисловий кондиціонер має 2 збуджуючих параметра: $\Delta\theta_{A0}^{K1}$, Δd_{A0}^{K1} та 3 параметра для керуючого впливу: $\Delta\theta_{W0}^{K1}$, ΔG_{W0}^O , $\Delta\theta_{W0}^{K2}$. Регулятор стану повинен забезпечити на виході ПСЦК стабільні значення параметрів: $\Delta\theta_A^{K2}$, Δd_A^{K2} .

За методикою описаною вище розроблено комплексну модель промислового кондиціонера, яка відповідає параметричній схемі рис. 1:

$$\begin{cases} \mathbf{X}' = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{D}\mathbf{F}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X}; \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{тут } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{K1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{A}^O & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_2 & \mathbf{A}^{\Phi 3} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_3 & \mathbf{A}^{K2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{K1} \\ \mathbf{X}^O \\ \mathbf{X}^{C3} \\ \mathbf{X}^{K2} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1^{K1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^O & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{K2} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1^{K1} \\ \mathbf{U}_1^O \\ \mathbf{U}_1^{K2} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_2^{K1} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \mathbf{F}_2^{K1}; \quad \mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2^O & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2^{\Phi 3} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B}_2^{K2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Комплексна модель промислового кондиціонера (1) містить динамічні моделі кліматичного обладнання:

- водяних калориферів K1, K2 та охолоджувача O четвертого порядку;
- форсуночного зволожувача ФЗ третього порядку, що відображено у матрицях $C_1 - C_3$.

Отже, розмірність матриць: $\mathbf{A} - [15 \times 15]$, $\mathbf{B} - [3 \times 15]$. Якщо у ПКШМ використовується електричний калорифер другого підігріву K2, математична модель якого має третій порядок, загальна розмірність моделі (1) зменшиться на 1.

Аналіз критеріїв оптимізації

У [5] для оптимізації одновимірних систем керування запропоновано інтегральний критерій. Використання цього критерію для оптимізації багатовимірних систем керування у просторі стану приводить до ряду математичних ускладнень. По-перше, у цьому критерії враховуються коефіцієнти передачі ОК за каналами регулювання та збурення. Для математичних моделей ОК у просторі стану коефіцієнти передачі за каналами впливу визначаються матрицею \mathbf{B} та входять до неї неявно (коефіцієнт передачі ділиться на інерційність динамічного елементу каналу впливу ОК). Враховуючи велику розмірність комплексної моделі (1), визначення коефіцієнтів передачі за каналами впливу ОК є нетривіальною задачею. По-друге, інтегральний критерій [5] є складовий, який складається із модульного ($Nvr=1$) та квадратичного ($Nvr=2$) критерію якості. Якщо пошук оптимуму для динамічних систем за квадратичними критеріями може вестися аналітичними та числовими методами, то оптимізація складних динамічних систем за модульними критеріями, як правило, ведеться чисельно. Матричний (багатовимірний) аналог інтегральному критерію передбачає застосування чисельних методів оптимізації, що виключає використання існуючих аналітичних методів оптимізації для динамічних систем у просторі стану за цим критерієм та його модифікаціями.

Враховуючи розглянуті міркування, для оптимізації багатовимірної системи керування із моделями ОК типу (1) пропонується використати дискретний аналог критерію [5]:

$$I = \mathbf{X}_N^T \mathbf{S} \mathbf{X}_N + \sum_{s=0}^{N-1} [\mathbf{X}_s^T \mathbf{Q} \mathbf{X}_s + \mathbf{U}_s^T \mathbf{R} \mathbf{U}_s]; \quad (2)$$

де, \mathbf{S} , \mathbf{Q} – вагові додатні напіввизначені матриці; \mathbf{R} – вагова симетрична додатна матриця; \mathbf{X}_s , \mathbf{U}_s – відповідно вектор стану та вектор керування

об'єкта на s -му кроці дискретизації із періодом T_{KV} , N – кількість кроків спостереження.

Розглянемо зміст критерію якості (2). Зрозуміло, що квадратичне зважування кінцевого стану дозволяє досягти бажаної якості керування, але квадратичне зважування сигналу керування не досить обґрунтовано, особливо якщо вартість ресурсів керування не велика. У деяких випадках квадратичне зважування замінює собою явні обмеження на величину сигналів керування і дозволяє одержати оптимальний закон зворотного зв'язку у аналітичному вигляді. Проте, для такого випадку не зовсім зрозумілий фізичний зміст оптимальності для критерію (2), оскільки у одне значення інтегруються параметри стану та сигнали управління. Крім того, завдання занадто великих вагових матриць \mathbf{R} викликає відхилення фактичного кінцевого стану від заданого (призводить до статичної похибки керування), а занадто малих – викликає значні форсуючі значення \mathbf{U} (призводить до коливних перехідних процесів). Основними обмеженнями (2) є вимога позитивної визначеності матриці \mathbf{R} та неможливість завдання явних обмежень на \mathbf{X} , \mathbf{U} . Позитивною стороною критерію (2) є можливість аналітичного синтезу оптимального регулятора стану за даним критерієм.

Синтез оптимального лінійно-квадратичного цифрового регулятора для технологічних комплексів штучного мікроклімату

Теорія оптимізації динамічних систем представляє багато прикладів синтезу оптимальних регуляторів для систем керування, які мають розв'язок у вигляді пропорційних матриць зворотного зв'язку [5, 6]. Як відомо із класичної теорії керування, пропорційні регулятори не забезпечують точного відслідковування завдання та не повністю компенсують зовнішні збурення у системі керування. З цих причин необхідно переформулювати постановку завдання синтезу регулятора стану таким чином, щоб у керуванні з'явилася інтегральна складова, яка компенсує статичний небаланс регулювання. Це можна зробити декількома способами. Один з них [6, 7] – розширення простору стану шляхом доповнення n -мірного вектору \mathbf{X} стану p -мірним вектором за яким необхідно мати інтегруючий вплив на ОК

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{C} \mathbf{X}. \quad (3)$$

В результаті зростає розмірність вектору стану на p (на кількість нових змінних), простір стану опишеться $(p + m)$ -мірним вектором, а розширена модель ОК без детермінованої складової збурення \mathbf{DF} в просторі стану прийме вигляд

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}' \\ \mathbf{Z}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{U}. \quad (4)$$

Для розширеного простору стану у неперервній формі лінійно-квадратичний регулятор формує ПІ-закон керування

$$\mathbf{U} = -\mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} = -\mathbf{K}_P \mathbf{X} - \mathbf{K}_I \mathbf{Z} = -\mathbf{K}_P \mathbf{X} - \mathbf{K}_I \mathbf{C} \int_0^{t_f} \mathbf{X} dt, \quad (5)$$

тут \mathbf{K} – матриця багатовимірного регулятора, що складається із пропорційної \mathbf{K}_P та інтегральної \mathbf{K}_I частин. Необхідною умовою існування такого регулятора є виконання нерівності $p < m$, тобто число змінних стану для яких вводиться інтегральний вплив не може бути більшим числа змінних керування.

Задачу синтезу оптимального лінійно-квадратичного цифрового регулятора (ЛКЦР) для СШМ можна сформулювати наступним чином. Нехай, відповідно до технології кондиціонування, модель ОК задано рівнянням (1). Потрібно синтезувати матрицю зворотного зв'язку \mathbf{K}_d ЛКЦР, яка за параметрами стану ОК визначить траєкторію вектора оптимального впливу \mathbf{U}_s^o для $s = 1, 2, \dots, N-1$, що мінімізує квадратичний критерій якості (2).

Перед усім, неперервну модель ОК (1) необхідно розширити змінними (3) за якими необхідно мати інтегральну складову у законі керування та отримати розширену модель ОК у просторі стану (4). Далі, розширену неперервну модель ОК потрібно привести до дискретного виду

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{s+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{X}_s + \mathbf{B}_d \mathbf{U}_s \\ \mathbf{Y}_s = \mathbf{C}_d \mathbf{X}_s \end{cases}, \quad (6)$$

де $\mathbf{A}_d = e^{\mathbf{A}T_{kv}}$, $\mathbf{B}_d = \int_0^{T_{kv}} e^{\mathbf{A}(T_{kv}-\tau)} \mathbf{B} d\tau$.

Структурна схема дискретної моделі ОК (6) зображена на рис. 2. В загальному випадку оптимальний ЛКЦР представляється залежністю [8]

$$\mathbf{U}_s = -\mathbf{K}_d \mathbf{X}_s. \quad (7)$$

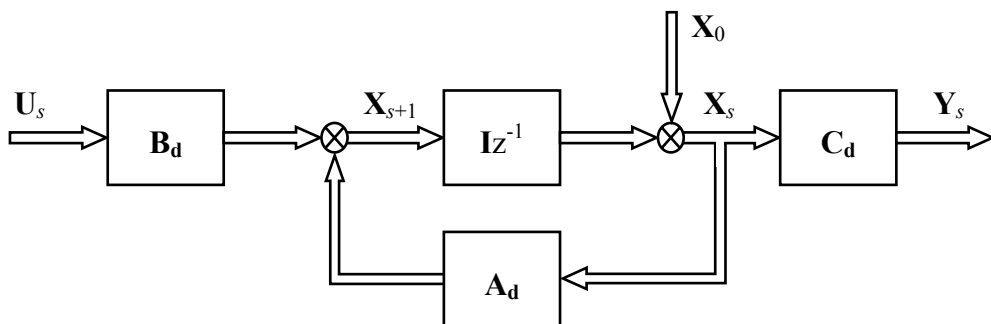


Рис. 2. Структурна схема дискретної моделі ОК

Регулятор формує зворотний зв'язок за станом параметрів ОК, використовуючи матрицю коефіцієнтів передачі \mathbf{K} . Матриця зворотного зв'язку визначається залежністю

$$\mathbf{K}_d = \left(\mathbf{R} + \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d \right)^{-1} \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{A}_d. \quad (8)$$

Параметри такого регулятора визначаються в результаті рішення рівняння Ріккати. При $\mathbf{P} = \mathbf{P}_0$ проводиться розв'язок стаціонарного матричного рівняння Ріккати

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q} + \mathbf{A}_d^T \mathbf{P} \left[\mathbf{I} - \mathbf{B}_d \left(\mathbf{R} + \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d \right)^{-1} \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \right] \mathbf{A}_d. \quad (9)$$

Процедура синтезу ЛКЦР зводиться до наступної послідовності дій:

- 1) задаються параметри критерію (2) відповідно до технологічних вимог виробництва;
- 2) формується розширена неперервна модель ОК (4);
- 3) на основі (4) визначається дискретна модель ОК (6);
- 4) шукається розв'язок рівняння Ріккати (9);
- 5) за залежністю (8) визначаються ЛКЦР.

Структурна схема АСК із оптимальним ЛКЦР представлена на рис. 3.

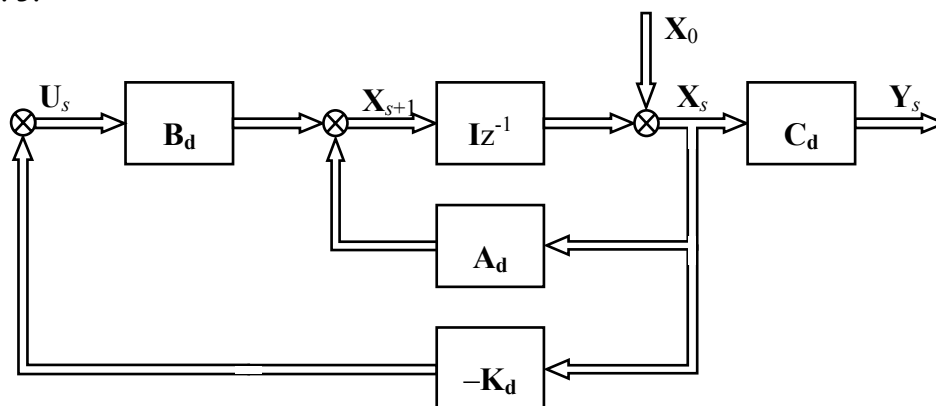


Рис. 3. Структурна схема цифрової АСК

Для стабілізації температури та вологості на виході промислового кондиціонера (або у приміщенні) використовується від 3-ох до 5-ти одиниць кліматичного обладнання (в залежності від технології кондиціонування). При цьому, у керуванні приймає участь не більше 2-х апаратів, так як регулюється два параметри – температура та вологість повітря. Із теорії керування відомо, що кількість параметрів регулювання повинна дорівнювати кількості керуючих впливів на ОК. У даному випадку кількість регулюючих каналів більша за кількість параметрів стабілізації. З цих причин виникає задача коректного логічного вибору обладнання для здійснення керуючих впливів. Дана особливість накладає обмеження на використання класичної процедури синтезу оптимального ЛКЦР. Враховуючи наявність логічних перемикань між обладнанням кондиціонера задачу синтезу необхідно поділити на окремі під-

задачі, що дозволить врахувати наявність логічного керування. Синтез ЛКЦР для промислових кондиціонерів із елементами логічного керування розглянуто далі.

Синтез оптимального цифрового регулятора для промислового кондиціонера із форсуночним зволожувачем

Промисловий кондиціонер із форсуночним зволожувачем орієнтований на застосування алгоритму керування за методом “точки роси”. Характерним для даного методу керування є: стабілізація температури “точки роси”, шляхом зміни температури теплоносія калорифера К1 у зимову пору року, або зміни витрати холодоносія охолоджувача О у літню пору року; стабілізація температури повітря на виході ПСЦК, шляхом зміни температури теплоносія калорифера К2; форсуночний (або сотовий) зволожувач ФЗ (СЗ) адіабатно зволожує припливне повітря, у піддоні постійно підтримується необхідний рівень води на зрошення, але безпосередньої участі у процесі керування зволожувач не приймає.

На рис. 4 представлено $h-d$ діаграму процесу кондиціювання повітря за методом “точки роси” в координатах математичної моделі (1) де на осях абсцис та ординат відкладено змінні простору стану. Вертикальну вісь відкладено у температурних параметрах, а горизонтальну – у параметрах вологовмісту. Для моделі (1) температура повітря на вході кондиціонера може змінюватися в діапазоні $\theta_{A0}^{\min} \dots \theta_{A0}^{\max}$, а вологовміст – $d_0^{\min} \dots d_0^{\max}$. На діаграмі зображено 5 областей.

Область IV має форму паралелограма, що задовольняє необхідні параметри мікроклімату на виході припливної установки кондиціонера.

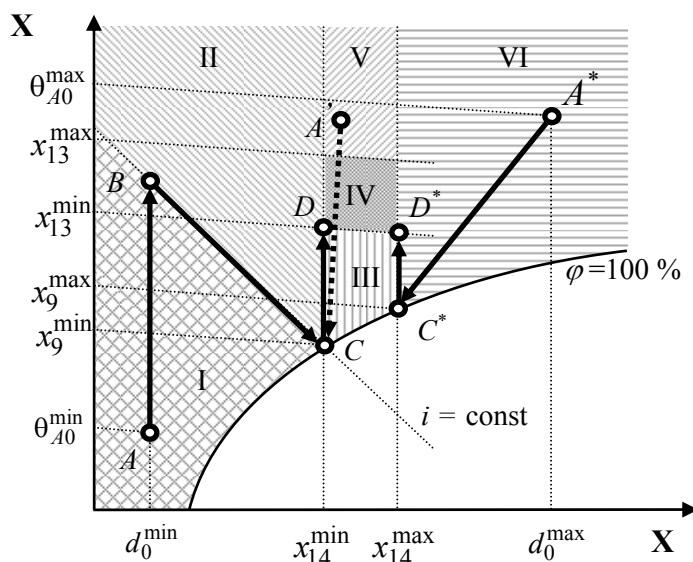


Рис. 4. $h-d$ діаграма в координатах математичної моделі (1)

Відповідно до $h-d$ діаграми, АСК повинна забезпечити стабілізацію мікроклімату на виході ПСЦК в діапазоні допустимої зони розбалансу для температури ($x_{13}^{\min} \dots x_{13}^{\max}$) та вологовмісту ($x_{14}^{\min} \dots x_{14}^{\max}$) повітря. Щоб підтримувати необхідний вологовміст повітря за методом “точки роси”, АСК кондиціонера забезпечує стабілізацію температури “точки роси” за зволожувачем в діапазоні $x_9^{\min} \dots x_9^{\max}$.

У кондиціонерах де реалізується алгоритм керування за методом “точки роси” система керування завжди підтримує після зволожувача температуру повітря рівною “точці роси”. При цьому, якщо параметри мікроклімату знаходяться у зонах III, IV або V то спочатку повітря охолоджується до температури “точки роси”, а далі, повторно нагрівається калорифером $K2$ до температури завдання. На рис. 4 представлено приклад процесу кондиціонування прямими AC та CD . При цьому проходить невиправдане переохолодження повітря із подальшим його нагрівом. Для даного випадку достатньо тільки охолодити повітря, щоб перейти із області V в область IV. Для зменшення енерговитрат на процес кондиціонування за методом “точки роси” можна запропонувати оптимально-логічно-неперервне керування кліматичним обладнанням, що збільшує енергетичну ефективність кондиціонера.

Аналіз областей $h-d$ діаграми (рис. 4) дозволяє дати рекомендації щодо логічної роботи кліматичного обладнання для модифікованого алгоритму керування АСК кондиціонера за методом “точки роси”.

Область I. АСК стабілізує:

- температуру “точки роси” впливом на калорифер $K1$;
- температуру повітря на виході ПСЦК впливом на калорифер $K2$.

Область II. АСК стабілізує:

- температуру “точки роси” впливом на охолоджувач O ;
- температуру повітря на виході ПСЦК впливом на калорифер $K2$.

Область III. АСК стабілізує:

- температуру повітря на виході ПСЦК впливом на калорифер $K2$, інше кліматичне обладнання участі у регулюванні не приймає, вологовміст повітря знаходиться у допустимих межах.

Область IV. Параметри мікроклімату знаходяться у допустимих межах, регулюючі клапани обладнання у закритому положенні.

Область V. АСК стабілізує:

- температуру повітря на виході ПСЦК впливом на охолоджувач O , інше кліматичне обладнання участі у регулюванні не приймає, вологовміст повітря знаходиться у допустимих межах.

Область VI. АСК стабілізує:

- температуру “точки роси” впливом на охолоджувач O ;
- температуру повітря на виході ПСЦК впливом на калорифер $K2$.

Для синтезу оптимального ЛКЦР, що реалізує ПІ-закон регулювання розширимо математичну модель (1) параметрами стану за якими необхідно мати інтегральний закон керування без врахування детермінованої складової збурення \mathbf{DF} . У даному випадку стабілізується температура “точки роси” за зволожувачем та температура на виході ПСЦК, вибір яких здійснюється матрицею \mathbf{C} моделі (1). Із урахуванням вказаних міркувань, розширена неперервна модель ОК для промислового кондиціонера прийме вигляд

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{X}' \\ \mathbf{Z}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{I...VI} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{U}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C} \mathbf{X}; \end{cases} \quad (10)$$

де $\mathbf{B}_I = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_I^{K1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_I^{K2} \end{bmatrix}$; $\mathbf{B}_{II} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_I^O & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_I^{K2} \end{bmatrix}$; $\mathbf{B}_{III} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_I^{K2} \end{bmatrix}$;

$\mathbf{B}_{IV} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$; $\mathbf{B}_V = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_I^O & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$; $\mathbf{B}_{VI} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_I^O & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_I^{K2} \end{bmatrix}$.

Наповнення матриці керування $\mathbf{B}_{I...VI}$ для шести областей $h-d$ діаграми різне, що дозволяє організувати логіку перемикавання кліматичного обладнання в залежності від параметрів мікроклімату навколишнього середовища для промислового кондиціонера із форсуночним зволожувачем за модифікованим методом “точки роси”.

Таким чином, враховуючи що матриця керування $\mathbf{B}_{I...VI}$ для кожної із шести областей $h-d$ діаграми індивідуальна, необхідно синтезувати матрицю зворотного зв'язку $\mathbf{K}_{dI...VI}$ за залежністю (8) для усіх областей. Для синтезу ЛКЦР слід використовувати стандартну процедуру синтезу, яку розглянуто вище. У алгоритмі керування системою кондиціонування за модифікованим методом “точки роси” необхідно передбачити контроль параметрів мікроклімату навколишнього середовища і перемикання між матрицями зворотного зв'язку $\mathbf{K}_{dI...VI}$ за вимірними параметрами мікроклімату навколишнього середовища.

Висновки

Для ПКШМ запропонована методика розробки комплексної математичної моделі промислового кондиціонера у просторі стану. Методика дозволяє отримати комплексну модель промислового кондиціонера як єдиного багатовимірного об'єкта керування. Для запропонованої

методики використовуються динамічні моделі кліматичного обладнання у просторі стану, які розроблено у [2–4]. Як приклад, для моделі ПКШМ представлено матриці, які визначають комплексну модель промислового кондиціонера із форсуночним зволожувачем.

Для комплексних моделей промислових кондиціонерів запропоновано методику синтезу лінійно-квадратичного цифрового регулятора, яка враховує логічні перемикання у роботі кліматичного обладнання для модифікованих алгоритмів керування за методами “точки роси”. Від класичної процедури синтезу ЛКЦР запропонований алгоритм відрізняється наявністю логічного вибору обладнання для здійснення оптимального керування.

На відміну від існуючих АСК, які стабілізують температуру та відносну вологість повітря, запропоновано регулювати температуру та вологовміст повітря, що дозволяє зменшити, а в деяких режимах виключити взаємозв’язок між параметрами температури та вологості. Математичне моделювання динамічних процесів для АСК промислового кондиціонера у середовищі Simulink MatLAB підтвердила ефективність запропонованої методики.

Запропонований підхід до розробки комплексних багатовимірних моделей ПКШМ дозволяє переосмислити синтез АСК кондиціонера на основі розмежування взаємного впливу регулюючих параметрів. Це дозволяє перевести систему керування кондиціонером на якісно новий рівень і забезпечить ефективне використання енергоресурсів.

Література

1. Аналіз та забезпечення ефективного керування системами штучного мікроклімату / І.М.Голінко, С.Г.Степаненко, І.Є.Галицька, В.Ю.Степаненко // Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки: матер. ІХ Міжн. наук.-практ. конф., 17-18 квітня 2013 р. – К., 2013. – С. 172-175.
2. Голінко І.М. Моделювання температурного режиму теплообмінника / І.М.Голінко, А.І.Кубрак, А.С.Кравченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – №2/7(44). – С. 24-27.
3. Голінко, І.М. Нестационарна модель тепло- та масообміну для водяного охолоджувача / І.М.Голінко // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: тези доповідей XII міжнародної науково-практичної конференції, 22-25 квітня 2014 р. – К., 2014. – С. 137.
4. Голінко І.М. Динамічна модель тепломасообмінних процесів у камері форсуночного зволоження / І.М.Голінко, А.І.Кубрак, І.Є.Галицька // Інформ. системи, механіка та керування. – 2014. – №11. – С. 61-71.
5. Голінко І.М. Оптимізація системи керування за модульним критерієм якості / І.М.Голінко, І.Є.Галицька // Інформаційні системи, механіка та керування. –2013. – №9. – С. 105-113.

6. Рей У. Методы управления технологическими процессами / У.Рей. – М.: Мир, 1983. – 368 с.
7. Голінко І.М. Динамічна оптимізація при управлінні тепловим процесом / І.М.Голінко // Нац. техн. ун-т України “Київ. політехн. ін-т”. – К., 1996. – 10 с. –Деп. у ДНТД України 22.04.96, №1011–Ук. 96.
8. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления: пер. с англ. / Б.Куо. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 23.12.2015 р.

*Рекомендовано до друку д.т.н., професором **Векериком В.І.**
д.т.н., професором **Телеником С.Ф.** (м. Київ)*

OPTIMIZATION OF MULTIDIMENSIONAL CONTROL SYSTEMS FOR COMPLEXES OF ARTIFICIAL MICROCLIMATE

I. M. Golinko, I. Y. Galitska

*National technical university of Ukraine of «KPI»;
Kiev, pr. Peremogy, 37; e-mail: gal@pti.kpi.ua*

For the industrial complexes of artificial microclimate the offered method of development of complex dynamic mathematical model in space of being as an unique multidimensional object of management. Considered task of synthesis of optimum multidimensional linear-quadratic digital regulator and synthesized matrix of feed-back which after the parameters of being of object of management determines the trajectory of vector of the optimum influencing that will minimize a quadratic criterion. The offered algorithm differs by the presence of logical choice of equipment for realization of optimum management allows remind the synthesis of the automatic control system of conditioner on the basis of differentiation of the mutual influencing of regulative parameters.

Key words: *systems of artificial microclimate, industrial conditioner, automatic control system, linear-quadratic digital regulator, optimization.*