

УДК 681.5.015.8:519

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-3771>

Голінко І. М.<sup>1</sup>, доцент, к.т.н., Галицька І. Є.<sup>2</sup>, доцент, к.т.н.

## ПРОЦЕДУРА СИНТЕЗУ БАГАТОВИМІРНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО КОНДИЦІОНЕРА ІЗ ПАРОВИМ ЗВОЛОЖУВАЧЕМ

**En**

The automatic control system (ACS) of air conditioning is considered in the framework of the unified computer-integrated complex with technological links of the air conditioner equipment. Taking into account the availability of dynamic models of HVAC equipment in the state space (developed by the authors in the previous works) precision air conditioner complex mathematical model with steam humidifier for the stabilization of microclimate parameters in the premises is obtained considering the technological relations between the climatic equipments.

The dynamic model differs from the existing one by technological linkages due to sequential treatment of the supply air for the HVAC equipment and the use of moisture content parameter (instead of relative humidity) for mass transfer modeling in the process of air preparation. The procedure of optimal multivariate linear-quadratic digital controller (LQDC) in the state space, which takes into account the logical switching in HVAC equipment operation for the modified control algorithm by the “optimum mode” method, is offered. Simulation of transient processes for the ACS of precision air conditioning has confirmed the effectiveness of the proposed procedure of multidimensional control synthesis. Additional condition is the usability of the obtained model in the MatLAB environment.

The ACS use with LQDC improves the integral quality indicators by 1.2 – 2.3 times in comparison with the ACS which uses one-dimensional digital controllers, and also decreases the colunt and duration of the transient processes. This approach allows us to rethink the synthesis of ACS air conditioning on the basis of

---

<sup>1</sup> НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів

<sup>2</sup> НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», кафедра інформаційної безпеки

differentiation of the mutual influence of governing parameters and it enables the transferring of the air conditioning control system to the qualitatively new level and provides the effective use of energy for artificial microclimate systems.

**Ru** Система автоматического управления (САУ) кондиционера рассматривается в рамках единого компьютерно-интегрированного комплекса с технологическими взаимосвязями между оборудованием кондиционера. Учитывая наличие динамических моделей климатического оборудования в пространстве состояний (разработанные авторами в предыдущих работах), для стабилизации параметров микроклимата в помещении получена комплексная математическая модель прецизионного кондиционера с паровым увлажнителем с учетом технологических связей между климатическим оборудованием. От существующих динамическая модель отличается учетом технологических взаимосвязей при последовательной обработке приточного воздуха на климатическом оборудовании и использованием параметра влагосодержания (вместо относительной влажности) для моделирования массообмена в процессе подготовки воздуха. Предложена процедура синтеза оптимального многомерного линейно-квадратичного цифрового регулятора в пространстве состояний, которая учитывает логические переключения в работе климатического оборудования для модифицированного алгоритма управления по методу “оптимального режима”.

Имитационное моделирование переходных процессов для САУ прецизионного кондиционера подтвердила эффективность предложенной процедуры синтеза многомерного регулятора. Дополнительное условие - удобство использования полученной модели в среде MatLAB.

## Вступ

Системи штучного мікроклімату (СШМ) відображують складний технологічний процес, який має чималий діапазон зміни вихідних параметрів. В залежності від використаного обладнання, промисловий кондиціонер як об'єкт керування (ОК) є складним та багатовимірним. Ряд керуючих впливів обмежений, а деякі елементи системи залишаються некерованими. За останні десятиліття у промислових кондиціонерах почали використовуватися парогенератори, ультразвукові, плівкові, капілярно-пористі та інші типи зволожувачів. Така технологія зволоження дозволяє уникнути додаткового охолодження повітря із повторним нагріванням. У такому разі для керування кондиціонером використовується метод “оптимального режиму”. У таких системах керування необхідно враховувати взаємний вплив контурів регулювання температури та вологості. Наявні на сьогодні підходи до розв'язання задач автоматизації СШМ за методом “оптимального режиму” не відповідають сучасним вимогам. За цих причин застосовують нетрадиційні рішення з автоматизації. Систему автоматичного керування (САК) кондиціонера необхідно розглядати у рамках єдиного комп'ютерно-інтегрованого комплексу із технологічними взаємозв'язками між обладнанням кондиціонера [1, 2]. У [2] авторами

розглянуто методику розробки комплексних моделей промислових кондиціонерів як багатомірного ОК у просторі станів.

### **Постановка задачі**

Враховуючи наявність динамічних моделей кліматичного обладнання у просторі станів [3°–°6], для стабілізації параметрів мікроклімату у приміщенні необхідно отримати комплексну математичну модель прецизійного кондиціонера із врахуванням технологічних зв'язків між кліматичним обладнанням та запропонувати процедуру синтезу оптимального багатовимірного лінійно-квадратичного цифрового регулятора (ЛКЦР) у просторі станів. Додаткова умова – зручність використання отриманої моделі у середовищі *MatLAB*.

### **Комплексна модель прецизійного кондиціонера у просторі станів**

Представлення багатовимірних ОК у просторі станів 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 [3°–°6] для кліматичного обладнання СШМ у просторі станів розроблено із врахуванням спільних змінних станів, що вказує наявність недиагональних елементів матриці станів  $\mathbf{A}$ . Додатковим аргументом на користь векторних моделей є велика кількість математичних пакетів для комп'ютерного аналізу технічних систем у просторі станів, які дозволяють із незначними часовими витратами проводити складні математичні дослідження.

Технологічні схеми промислової обробки повітря залежать від кліматичного обладнання промислового кондиціонера. Кліматичне обладнання кондиціонера для реалізації енергозберігаючих алгоритмів керування складається із тепломасообмінних апаратів: калорифери підігріву, охолоджувач та паровий зволожувач. Оскільки динамічні властивості цих апаратів у загальному випадку різні – відповідні математичні моделі повинні залежати від апарату, який включено у систему регулювання, та дозволяти синтезувати комплексну динамічну модель для розробки САК кондиціонера. Аналіз аналітичних моделей обладнання кондиціонера [3°–°6] дозволяє зробити висновок, що типовий динамічний елемент кліматичного обладнання можна розглядати як багатовимірний ОК із п'ятьма входами  $v_1^{\circ}-v_5$  та двома виходами  $y_1, y_2$ .

Розглянемо параметричну схему припливної системи центрального кондиціонера (ПСЦК), яку отримано із технологічної схеми підготовки

повітря на кондиціонері із паровим зволожувачем та представлено на рис. 1. У кондиціонері використовується наступне обладнання: К1, К2 – калорифери першого та другого підігріву; О – охолоджувач; ПЗ – паровий зволожувач. Пунктирними стрілками на схемі показано канали впливу для змінних, які не приймають участі у керуванні за методом “оптимального режиму”.

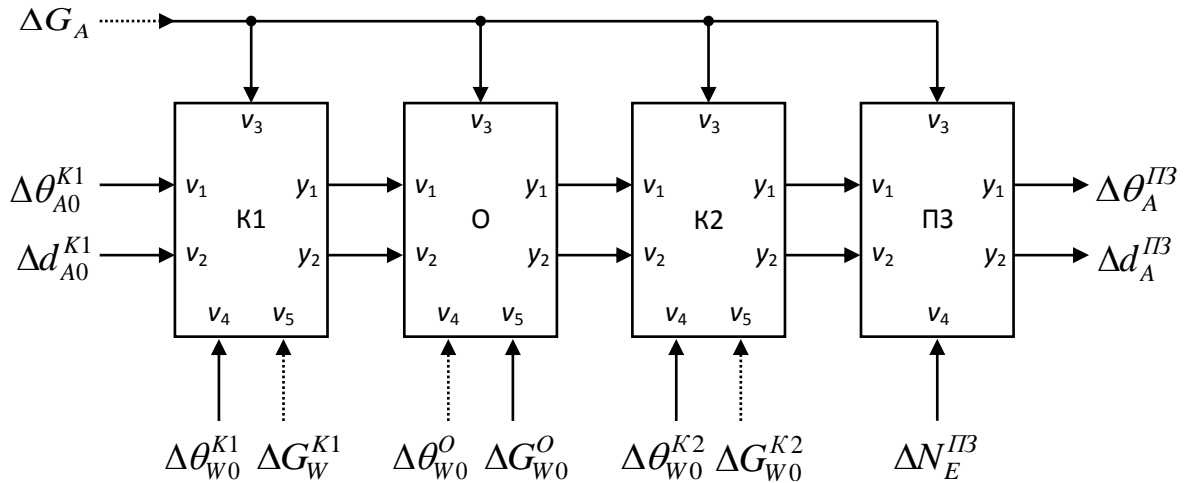


Рис. 1. Параметрична схема ПСЦК із паровим зволожувачем

Виходячи із рис. 1 промисловий кондиціонер має 2 змінні збурення: температура повітря на вході ПСЦК –  $\Delta\theta_{A0}^{K1}$ ; вологовміст повітря на вході ПСЦК –  $\Delta d_{A0}^{K1}$  та 4 змінні керуючого впливу: температура теплоносія калорифера К1 –  $\Delta\theta_{W0}^{K1}$ ; витрата холодоносія охолоджувача –  $\Delta G_{W0}^O$ ; температура теплоносія калорифера К2 –  $\Delta\theta_{W0}^{K2}$ ; потужність парозволожувача –  $\Delta N_E^{PZ}$ .

У випадку прецизійної СШМ із рециркуляцією повітря необхідно враховувати динамічні процеси приміщення і камери змішування. Параметрична схема такої СШМ із паровим зволожувачем представлена на рис. 2, де у якості структурного блоку ПСЦК використовується параметрична схема ПСЦК, яку розглянуто на рис. 1. Параметрична схема прецизійної СШМ додатково доповнена динамічними елементами: КЗ – камера змішування; П – приміщення.

За параметричною схемою рис. 2 ОК має 3 змінні збурення: температура навколишнього середовища –  $\Delta\theta_{A0}$ ; вологовміст навколишнього середовища –  $\Delta d_{A0}$ ; потужність електричного обладнання у приміщенні –  $\Delta N_E^P$  та 5 змінних керуючого впливу: коефіцієнт рециркуляції камери змішування –  $\Delta K^{K3}$ ;  $\Delta\theta_{W0}^{K1}$ ;  $\Delta G_{W0}^O$ ;  $\Delta\theta_{W0}^{K2}$ ;  $\Delta N_E^{PZ}$ .

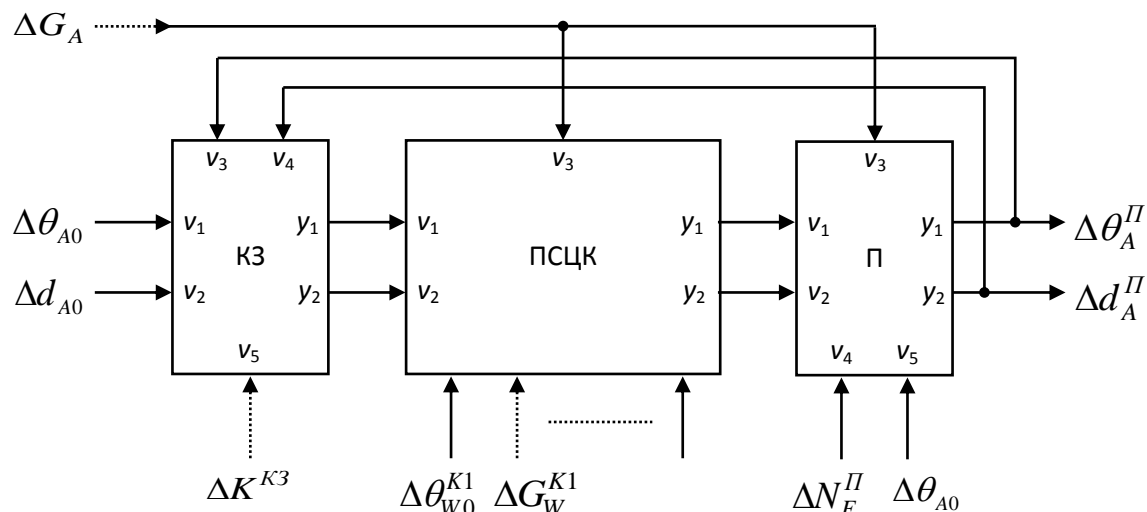


Рис. 2. Параметрична схема прецизійної СШМ

За методикою розглянутою у [2] отримано комплексну модель прецизійного кондиціонера, яка відповідає параметричній схемі на рис. 2:

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

$$\text{де } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{K3} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_6 \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{A}^{K1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_2 & \mathbf{A}^O & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_3 & \mathbf{A}^{K2} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_4 & \mathbf{A}^{П3} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_5 & \mathbf{A}^{П} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{K3} \\ \mathbf{X}^{K1} \\ \mathbf{X}^O \\ \mathbf{X}^{K2} \\ \mathbf{X}^{П3} \\ \mathbf{X}^{П} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_1^{K1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^O & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{K2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{П3} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1^{K1} \\ \mathbf{U}_1^O \\ \mathbf{U}_1^{K2} \\ \mathbf{U}_1^{П3} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_2^{K3} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_2^{K3}; \quad \mathbf{C}_1 = \mathbf{B}_2^{K1}, \quad \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2^O & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2^{K2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

$$C_4 = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_2^{\text{ПЗ}} & 0 & 0 \\ & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_5 = \mathbf{B}_2^{\text{П}}, \quad C_6 = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_3^{\text{КЗ}} & 0 \\ & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Комплексна модель прецизійного кондиціонера (1) містить динамічні моделі кліматичного обладнання: камери змішування КЗ другого порядку; водяних калориферів К1, К2 та охолоджувача О четвертого порядку; парового зволожувача ПЗ другого порядку; приміщення П третього порядку. Математична модель прецизійного кондиціонера (1) має дев'ятнадцятий порядок, розмірність матриць:  $\mathbf{A}$  –  $[19 \times 19]$ ,  $\mathbf{B}$  –  $[19 \times 4]$ .

### Процедура синтезу ЛКЦР для прецизійного кондиціонера із паровим зволожувачем

Прецизійний кондиціонер із паровим зволожувачем орієнтований на застосування алгоритму керування за методом “оптимального режиму”. На рис. 3 представлено  $h-d$  діаграму процесу кондиціонування повітря за методом “оптимального режиму” у координатах математичної моделі (1). На прецизійний кондиціонер надходить зовнішнє повітря, температура якого може змінюватися в діапазоні  $\theta_{A0}^{\min} \dots \theta_{A0}^{\max}$ , а вологовміст –  $d_0^{\min} \dots d_0^{\max}$ . Припливне повітря змішується із рециркуляційним у камері змішування КЗ (температура рециркуляційного повітря –  $x_{17}$ , вологовміст –  $x_{18}$ ). Після змішування припливного та рециркуляційного повітря повітряна суміш із параметрами температури –  $x_1$  та вологовмісту –  $x_2$  надходить на калорифер К1. Під дією збурень параметри навколишнього та рециркуляційного повітря можуть змінюватися. За цих міркувань узагальненими параметрами збурення для прецизійного кондиціонера виступають температура та вологовміст повітря за камерою змішування КЗ, які можуть змінюватися для температури в діапазоні  $x_1^{\min} \dots x_1^{\max}$  та вологовмісту –  $x_2^{\min} \dots x_2^{\max}$ . На діаграмі 7 областей, де зображено процес обробки повітря із врахуванням тепломасообмінних процесів. Область V задовольняє необхідне значення мікроклімату у приміщенні у діапазоні температур  $x_{17}^{\min} \dots x_{17}^{\max}$  та вологовмісту –  $x_{18}^{\min} \dots x_{18}^{\max}$ . Для ідентифікації областей перемикання обладнання пропонується використовувати параметри мікроклімату після камери змішування КЗ  $[x_1, x_2]$ , які характеризують узагальнене збурення як зі сторони навколишнього середовища, так і зі сторони приміщення П.

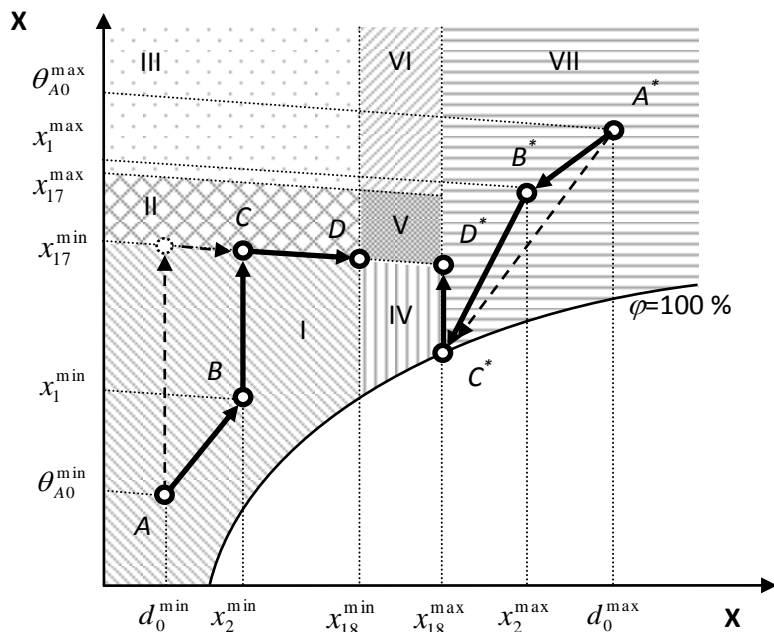


Рис. 3.  $h-d$  діаграма у координатах математичної моделі (1)

Аналіз областей  $h-d$  діаграми на рис. 3 дозволяє запропонувати алгоритм логічного перемикання між кліматичним обладнанням кондиціонера за модифікованим методом “оптимального режиму”.

**Область I.** САК стабілізує:

- температуру повітря у приміщенні впливом на калорифер K1; вологовміст повітря у приміщенні впливом на паровий зволожувач кондиціонера.

**Область III.** САК стабілізує:

- температуру повітря у приміщенні впливом на охолоджувач O;
- вологовміст повітря у приміщенні впливом на паровий зволожувач кондиціонера.

**Область IV.** САК стабілізує:

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

**Область V.** Параметри мікроклімату знаходяться у допустимих межах, регулюючі клапани кліматичного обладнання у закритому положенні.

**Область VI.** САК стабілізує:

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

**Область VII.** САК стабілізує:

- температуру повітря у приміщенні впливом на калорифер K2;
- вологовміст повітря у приміщенні впливом на охолоджувач O.

Уразі конденсації надмірної вологи, зменшується температура повітря за охолоджувачем до  $x_5$ , після чого необхідно додатково нагріти повітря на калорифері К2 (пряма  $C^*D^*$ ).

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

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

Тут  $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{Q}$  – 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.

Для синтезу оптимального ЛКЦР розширимо математичну модель (1) змінними стану, за якими необхідно мати інтегральний закон керування  $\mathbf{Z}' = \mathbf{C} \mathbf{X}$  [7]. Розширена неперервна модель ОК для прецизійного кондиціонера має вигляд:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{X}' \\ \mathbf{Z}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{I..VII} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{U}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C} \mathbf{X}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{де } \mathbf{B}_I = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_1^{K1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{ПЗ} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_{II} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{ПЗ} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_{III} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^O & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{ПЗ} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_{IV} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{K2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_V = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_{VI} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^O & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix};$$



$$\mathbf{V}_{\text{VII}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{V}_1^0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{V}_1^{\text{K2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Наповнення матриці керування  $\mathbf{V}_{\text{I...VII}}$  дозволяє організувати логіку перемикання кліматичного обладнання в залежності від параметрів мікроклімату навколишнього середовища для прецизійного кондиціонера за модифікованим методом “оптимального режиму”. Матриця керування  $\mathbf{V}_{\text{I...VII}}$  для кожної із семи областей  $h-d$  діаграми індивідуальна, що викликає необхідність синтезу матриці зворотного зв'язку  $\mathbf{K}_{\text{dI...VII}}$  для кожної області.

Розширену модель (3) необхідно привести до дискретного виду

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{s+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{X}_s + \mathbf{B}_d \mathbf{U}_s; \\ \mathbf{Y}_s = \mathbf{C}_d \mathbf{X}_s, \end{cases} \quad (4)$$

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

У загальному випадку ЛКЦР представляється залежністю

$$\mathbf{U}_s = -\mathbf{K}_d \mathbf{X}_s. \quad (5)$$

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

$$\mathbf{K}_d = (\mathbf{R} + \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d)^{-1} \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{A}_d. \quad (6)$$

Параметри такого регулятора визначаються в результаті рішення рівняння Ріккати [7]. За  $\mathbf{P} = \mathbf{P}_0$  проводиться розв'язок стаціонарного матричного рівняння Ріккати

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q} + \mathbf{A}_d^T \mathbf{P} \left[ \mathbf{I} - \mathbf{B}_d (\mathbf{R} + \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d)^{-1} \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \right] \mathbf{A}_d. \quad (7)$$

Процедура синтезу ЛКЦР зводиться до наступної послідовності дій:

1. задаються параметри критерію (2) відповідно до технологічних вимог виробництва;
2. формується розширена неперервна модель ОК (3);
3. на основі (3) визначається дискретна модель ОК (4);
4. шукається розв'язок рівняння Ріккати (7);
5. за залежністю (6) визначаються ЛКЦР.

**Висновки**

Отримано комплексну математичну модель прецизійного кондиціонера із паровим зволожувачем у просторі станів, використовуючи динамічні моделі кліматичного обладнання [3°–°6]. Від існуючих динамічна модель відрізняється врахуванням технологічних взаємозв'язків у разі послідовної обробки припливного повітря на кліматичному обладнанні та використанням параметру вологовмісту (замість відносної вологості) для моделювання масообміну у процесі підготовки повітря.

Запропоновано процедуру синтезу ЛКЦР, яка враховує логічні перемикання у роботі кліматичного обладнання для модифікованого алгоритму керування за методом “оптимального режиму”. Імітаційне моделювання перехідних процесів для САК прецизійного кондиціонера підтвердило ефективність запропонованої процедури синтезу багатовимірних регуляторів. Використання САК із ЛКЦР покращує інтегральні показники якості у 1,2 – 2,3 рази у порівнянні із САК де використовуються одновимірні цифрові регулятори, також зменшується коливність та тривалість перехідних процесів. Такий підхід дозволяє переосмислити синтез САК кондиціонера на основі розмежування взаємного впливу регулюючих параметрів, що дозволяє перевести систему керування кондиціонером на якісно новий рівень та забезпечить ефективне використання енергоресурсів для систем штучного мікроклімату.

**Список використаної літератури**

1. Голінко І. М. Принципи синтезу автоматичних систем керування промисловими кондиціонерами / І. М. Голінко // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2016, № 8. – С. 33–42.
2. Голінко І. М. Оптимізація багатовимірних систем керування для комплексів штучного мікроклімату / І. М. Голінко, І. Є. Галицька // Прикарпатський вісник НТШ. Серія Число. – 2016, № 1(33). – С. 61–73.
3. Голінко І. М. Динамічна модель теплообміну для водяного калорифера у просторі станів / І. М. Голінко, І. Є. Галицька // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2016, № 15. – С. 83–92. DOI: <https://doi.org/10.20535/2219-380415201686207>.
4. Голінко І. М. Динамічна модель тепломасообміну для водяного охолоджувача промислового кондиціонера / І. М. Голінко // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2014, № 6. – С. 27–34.
5. Голінко І. М. Математичне моделювання процесів тепло- та масообміну для камери парового зволоження / І. М. Голінко, І. Є. Галицька, В. Ю. Степаненко // Прикарпатський вісник НТШ. Серія Число. – 2014, № 1(25). – С. 54–62.
6. Голінко І. М. Моделювання та оптимізація систем керування [Текст]: монографія / І. М. Голінко, А. І. Кубрак. – Кам'янець–Подільський: ПП Буйницький, 2012. – 262 с.

7. Рей У. Методы управления технологическими процессами / У. Рей. – М.: Мир, 1983. – 368 с.