

СИНТЕЗ МНОГОМЕРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО КОМПЛЕКСА ИСКУССТВЕННОГО МИКРОКЛИМАТА

Н.Д. ПАНКРАТОВА, П.И. БИДЮК, И.М. ГОЛИНКО

Аннотация. Рассмотрена процедура синтеза многомерного цифрового регулятора для промышленных систем искусственного микроклимата. Для промышленных кондиционеров предложена методика разработки комплексной динамической математической модели в пространстве состояний как единого многомерного объекта управления. Выполнен анализ критериев для оптимизации системы управления кондиционером. Рассмотрена процедура синтеза оптимального многомерного линейно-квадратичного цифрового регулятора и синтезирована матрица обратной связи, которая по параметрам состояния объекта управления определяет траекторию движения вектора оптимального воздействия и минимизирует квадратичный критерий качества. Такой многомерный линейно-квадратичный цифровой регулятор отличается наличием логического выбора оборудования для осуществления оптимального управления климатическим оборудованием кондиционера. Такой подход позволяет переосмыслить процедуру синтеза автоматической системы управления для промышленных кондиционеров на основе разграничения взаимного влияния регулирующих параметров.

Ключевые слова: система искусственного микроклимата, промышленный кондиционер, автоматическая система управления, линейно-квадратичный цифровой регулятор, оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

Современные производственные процессы предъявляют высокие требования к системам промышленного кондиционирования воздуха. От качества микроклимата производственных помещений в значительной степени зависят качество продукции и уменьшение ее себестоимости. Промышленные кондиционеры являются реальным рычагом прибыли для технологий в таких отраслях: легкой, пищевой, аграрной, фармацевтической, полиграфической, машиностроительной, радиоэлектронной и др. [1].

Промышленные комплексы искусственного микроклимата (ПКИМ) отражают сложный технологический процесс (ТП), который имеет большой диапазон входных возмущений и управляющих воздействий. Промышленный кондиционер как объект управления (ОУ) является сложным и нелинейным, что предполагает выполнение анализа структуры автоматической

системы управления (АСУ) и разработку соответствующих алгоритмов управления. Для ПККИМ ряд управляющих воздействий ограничен, а некоторые элементы системы остаются неуправляемыми. По этим причинам проектировщики применяют нестандартные решения по автоматизации промышленных кондиционеров [2].

В процессе автоматизации кондиционеров инженеры-интеграторы стараются обеспечить автоматическую стабилизацию переменных обособленных аппаратов, которые связаны в единый ТП. При этом в задачах синтеза и анализа систем управления ПККИМ не рассматриваются задачи построения комплексных математических моделей кондиционирования воздуха как единого многомерного ОУ, а разработка эффективной АСУ, в первую очередь, зависит от всестороннего анализа технологической системы, особенностей ее функционирования, что позволяет синтезировать корректные управляющие воздействия. Только в некоторых работах авторы в постановке задачи синтеза системы управления ПККИМ рассматривают системный подход с определенными ограничениями [3], что ограничивает область применения полученных результатов.

На сегодняшний день вопрос синтеза АСУ для ПККИМ с взаимосвязанными контурами регулирования исследован недостаточно. Системы управления температурой и влажностью рассматриваются без учета их взаимодействия. Максимальный эффект от климатического оборудования кондиционера можно достичь благодаря комплексному анализу ТП и синтезу многомерной системы управления. АСУ ПККИМ необходимо рассматривать в рамках единого компьютерно-интегрированного комплекса с технологическими взаимосвязями между оборудованием кондиционера [4].

Промышленный кондиционер состоит из разнообразного климатического оборудования: теплообменных аппаратов (калориферов подогрева, охладителей) и увлажнителей. В зависимости от технологии обработки воздуха можно выделить более двух десятков технологических схем для промышленного кондиционирования воздуха [5], и каждая технологическая схема подразумевает собственную математическую модель для синтеза АСУ ПККИМ. Поскольку динамические свойства климатического оборудования в общем случае разные, соответствующие математические модели оборудования должны адекватно отражать процесс обработки воздуха и позволять синтезировать комплексную динамическую модель для разработки АСУ кондиционера.

Литературный обзор подтверждает, что созданы все предпосылки для синтеза многомерных систем управления промышленными кондиционерами, где учитывается взаимодействие оборудования. В публикациях [6–10] авторы предложили математическое описание для оборудования промышленных кондиционеров, которые удовлетворяют рассмотренным выше требованиям.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ аналитических моделей оборудования кондиционера позволяет сделать вывод, что типовой динамический элемент климатического оборудования можно рассматривать как многомерный ОУ с пятью входами $\mathbf{V}^T = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4 \ v_5]$ и двумя выходами $\mathbf{Y}^T = [y_1 \ y_2]$. Учитывая наличие математических моделей оборудования кондиционера в пространстве со-

стояния [6–10], для стабилизации параметров искусственного микроклимата необходимо разработать комплексную динамическую математическую модель промышленного кондиционера как единого многомерного ОУ и рассмотреть задачу синтеза оптимального многомерного линейно-квадратичного цифрового регулятора в пространстве состояний, что является предметом исследования.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПКИМ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ

Технологические схемы промышленной обработки воздуха зависят от климатического оборудования приточной системы центрального кондиционера (ПСЦК). Среди рассмотренных технологий, учитывая конструктивные особенности и методы управления оборудованием, наибольшее распространение получили ПСЦК, которые для стабилизации параметров микроклимата используют алгоритмы управления по методу «точки росы», а также по методу «оптимального режима». Используя обобщенную технологическую схему кондиционирования воздуха, можно получить параметрическую схему промышленного кондиционера и далее синтезировать комплексную модель промышленного кондиционера в пространстве состояний.

Представление многомерных ОУ в пространстве состояний имеет ряд преимуществ по сравнению с записью в виде передаточных функций. Например, позволяет описать произвольные внутренние структуры, неуправляемые и ненаблюдаемые переменные ОУ с помощью минимального числа параметров. Если математическая модель ОУ составлена с учетом наличия совместных переменных состояния, то такая модель содержит минимальное число переменных состояния и полученная форма описания соответствует минимальной математической реализации ОУ. Математические модели для климатического оборудования ПКИМ в пространстве состояний разработаны с учетом общих переменных состояния, на что указывает наличие недиагональных элементов матриц состояния в моделях [6–10].

Дополнительным аргументом в пользу векторных моделей является большое количество математических пакетов для компьютерного анализа систем управления в пространстве состояний, что позволяет с незначительными временными затратами выполнять сложные математические исследования.

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ ПКИМ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ

Во многих случаях разработчику АСУ ПКИМ понадобится самостоятельно получить комплексную модель промышленного кондиционера, поскольку параметрическая схема обработки воздуха, рассмотренная в приведенном ниже примере, будет отличаться. Из этих соображений для разработки комплексной динамической модели кондиционера в пространстве состояний рассмотрим методику ее синтеза.

1. Определить количественный состав климатического оборудования N для конкретного кондиционера, где N — количество единиц оборудования.
2. Из моделей [6–10] выбрать соответствие климатическому оборудованию имеющегося промышленного кондиционера.

3. Определить возмущающие и регулирующие каналы влияния для технологической системы кондиционера U_1^i, F_2^i, F_3^i где $i = 1, \dots, N$.

4. Для комплексной модели сформировать вектор управлений U и возмущений F из имеющихся воздействий U_1^i и F_2^i .

5. Сформировать матрицу динамики состояний A комплексной модели кондиционера, диагональными элементами которой являются матрицы состояния A^i климатического оборудования.

6. Сформировать матрицы C^i из соответствующих матриц B_2^i , которые обеспечивают передачу вектора выходных переменных состояния предыдущей модели X^{i-1} на соответствующие переменные состояния текущей модели X^i оборудования кондиционера.

7. Сформировать матрицы B и D из соответствующих матриц B_1^i и B_2^i .

При разработке комплексной модели необходимо учитывать порядок динамических моделей климатического оборудования.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПКИМ С ФОРСУНОЧНЫМ УВЛАЖНИТЕЛЕМ

Рассмотрим пример синтеза комплексной модели прецизионного кондиционера с форсуночным увлажнителем. Для упрощения интерпретации математических выкладок в дальнейшем верхний индекс i матриц моделей оборудования в пространстве состояний заменим на аббревиатуру климатического оборудования. Для промышленного кондиционера с форсуночным увлажнителем используется следующее климатическое оборудование: водяной калорифер первого подогрева $K1$; водяной охладитель O ; форсуночный увлажнитель $FУ$; водяной калорифер 2-го подогрева $K2$. На рис. 1 представлена параметрическая схема ПСЦК, которая соответствует технологической схеме подготовки воздуха на промышленном кондиционере с форсуночным увлажнителем. В левой части схемы показаны возмущающие факторы, а в нижней — управляющие. Расход приточного воздуха является возмущающим фактором, однако для большинства ПКИМ этот параметр является неизменным и не влияет на работу системы кондиционирования. Пунктирными стрелками на схеме показаны каналы влияния, переменные которых не меняются в процессе управления для этой технологической схемы подготовки воздуха.

Согласно представленной параметрической схеме, ПСЦК имеет два возмущающих фактора $\Delta\theta_{A0}^{K1}, \Delta d_{A0}^{K1}$ и три переменные управляющих воздействий: $\Delta\theta_{W0}^{K1}, \Delta G_{W0}^O, \Delta\theta_{W0}^{K2}$. При проектировании прецизионной системы искусственного микроклимата необходимо учитывать динамические процессы в помещении и в камере утилизации тепла. Параметрическая схема такой технической системы показана на рис. 2. Здесь в качестве параметрического элемента ПСЦК используется схема, рассмотренная ранее. Параметрическая схема (рис. 2) дополнена динамическими элементами: $КС$ — камера смешения; $П$ — производственное помещение.

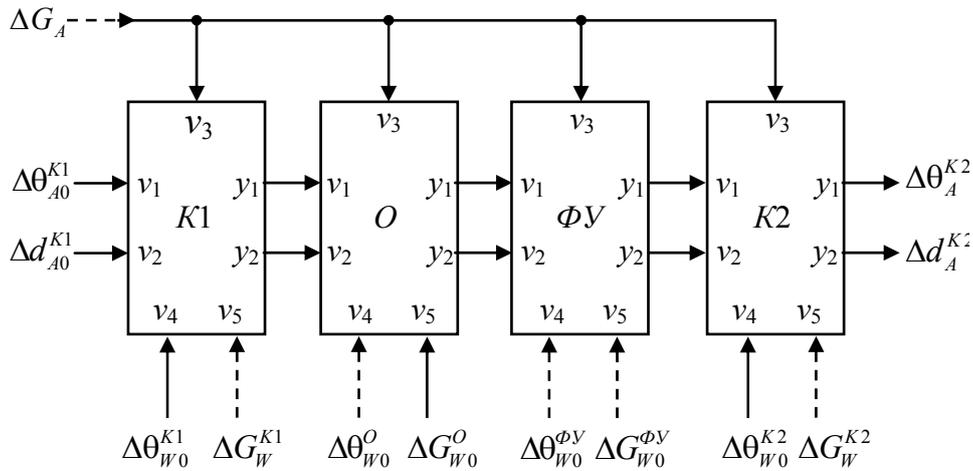


Рис. 1. Параметрическая схема ПСЦК с форсуночным увлажнителем

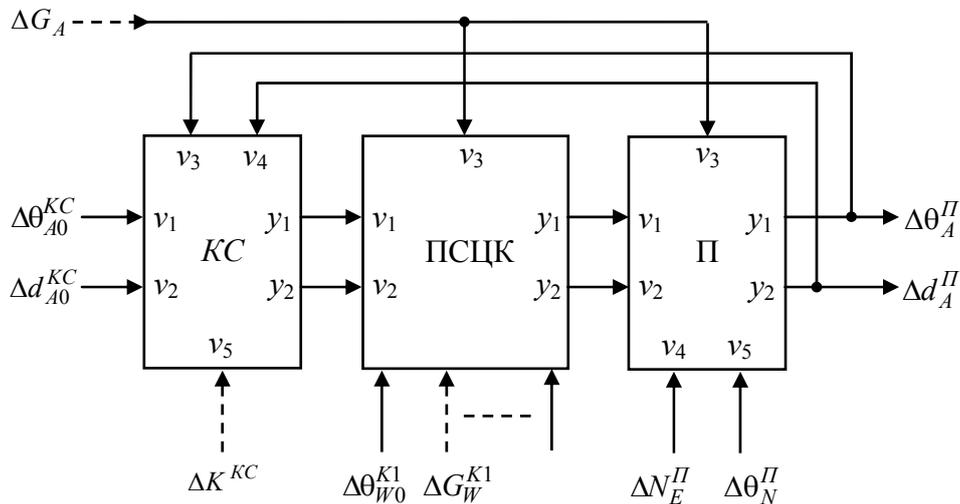


Рис. 2. Параметрическая схема прецизионного кондиционера с форсуночным увлажнителем

Таким образом, для рассматриваемой параметрической схемы ОУ имеет переменные возмущения $\Delta\theta_{A0}^{KC}$, Δd_{A0}^{KC} , $\Delta N_E^П$, $\Delta\theta_N^П$ и переменные управляющего воздействия: ΔK^{KC} , $\Delta\theta_{W0}^{K1}$, ΔG_{W0}^O , $\Delta\theta_{W0}^{K2}$. При этом многомерный регулятор должен обеспечить в производственном помещении стабильные значения переменных температуры $\Delta\theta_A^П$ и влажности $\Delta d_A^П$.

По методике, описанной выше, разработана комплексная модель промышленного кондиционера, которая соответствует параметрической схеме (рис. 2):

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

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{KC} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_6 \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{A}^{K1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_2 & \mathbf{A}^O & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_3 & \mathbf{A}^{\Phi Y} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_4 & \mathbf{A}^{K2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_5 & \mathbf{A}^{\Pi} \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{KC} \\ \mathbf{X}^{K1} \\ \mathbf{X}^O \\ \mathbf{X}^{\Phi Y} \\ \mathbf{X}^{K2} \\ \mathbf{X}^{\Pi} \end{bmatrix};$$

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

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_2^{KC};$$

$$\mathbf{C}_1 = \mathbf{B}_2^{K1}, \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2^O & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2^{\Phi Y} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_4 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2^{K2} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_5 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2^{\Pi} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_6 = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_3^{KC} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix};$$

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

Комплексная модель прецизионного кондиционера (1) содержит следующие динамические модели климатического оборудования:

- водяных калориферов $K1$, $K2$ и охладителя O четвертого порядка;
- форсуночный увлажнитель ΦY и промышленное помещение Π

третьего порядка, что отражено в матрицах \mathbf{C}_1 — \mathbf{C}_6 . Таким образом, размерность матриц такая: \mathbf{A} — $[20 \times 20]$; \mathbf{B} — $[20 \times 3]$.

АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ

В работе [11] для оптимизации технических систем управления предложен интегральный критерий, который учитывает технологические особенности

управляющего воздействия на ОУ. Использование этого критерия для оптимизации многомерных систем управления в пространстве состояний приводит к ряду математических сложностей. Во-первых, в этом критерии учитываются коэффициенты передачи ОУ по каналам регулирования и возмущения. Для математических моделей ОУ в пространстве состояний коэффициенты передачи по каналам воздействия определяются матрицей \mathbf{V} и входят в нее неявно (коэффициент передачи делится на инерционность динамического элемента канала влияния ОУ). Поскольку размерность комплексной модели (1) большая, определение коэффициентов передачи по каналам влияния ОУ является нетривиальной задачей. Во-вторых, в работе [11] используется модульный интегральный критерий качества, что предусматривает использование численных методов оптимизации. Поэтому, применение критерия оптимизации из работы [11] для многомерной системы превращается в нетривиальную задачу с использованием численных методов.

С учетом рассмотренных выше соображений для оптимизации многомерной системы управления с моделью ОУ (1) предлагается использовать дискретный вариант классического критерия качества [12]:

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

где \mathbf{S} , \mathbf{Q} , \mathbf{R} — весовые матрицы переменных состояния и управления; \mathbf{X}_s , \mathbf{U}_s — соответственно вектор состояния и вектор управления объекта на s -м шаге дискретизации с периодом T_{RV} ; k — количество шагов наблюдения.

Рассмотрим составляющие критерия качества (2). Понятно, что квадратичное взвешивание конечного состояния позволяет достичь желаемого качества управления, но квадратичное взвешивание сигнала управления недостаточно обоснованно, особенно если стоимость ресурсов управления невелика. Для критерия (2) не совсем понятен физический смысл оптимальности, поскольку в одно значение интегрируются переменные состояния и управления [12]. Кроме того, задание большого веса матрицы \mathbf{R} вызывает отклонение фактического конечного состояния от заданного (приводит к статической погрешности управления), а слишком малых — вызывает значительные форсирующие воздействия управления \mathbf{U} (приводит к колебательной составляющей в переходных процессах). Основными ограничениями критерия (2) являются требование положительной определенности матрицы \mathbf{R} и невозможность задавать явные ограничения на \mathbf{X} , \mathbf{U} . Положительным в критерии (2) является возможность аналитического синтеза оптимального регулятора состояния по данному критерию.

ПРОЦЕДУРА СИНТЕЗА МНОГОМЕРНОГО РЕГУЛЯТОРА

Теория оптимизации динамических систем представляет достаточное число примеров синтеза оптимальных регуляторов для технических систем управления, которые имеют решение в виде пропорциональных матриц обратной связи [12, 13]. Как известно из классической теории управления пропорцио-

нальные регуляторы не обеспечивают точного отслеживания задания и не компенсируют полностью возмущающие факторы в системе управления. По этим причинам необходимо модифицировать постановку задачи синтеза регулятора состояния таким образом, чтобы в векторе управления появилась интегральная составляющая, которая компенсирует статический небаланс регулирования. Это можно сделать несколькими способами. Один из них [12] — расширение пространства состояния путем дополнения n -мерного вектора \mathbf{X} состояния p -мерным вектором с переменными, по которым необходимо иметь интегрирующее влияние на ОУ

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{C} \mathbf{X} . \tag{3}$$

В результате размерность вектора состояния возрастает на p (пространство состояний опишется $(p + n)$ -мерным вектором), а расширенная модель ОУ в пространстве состояний примет вид:

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

Для расширенного пространства состояний в непрерывной форме линейно-квадратичный регулятор формирует ПИ-закон управления:

$$\mathbf{U} = -\mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} = -\mathbf{K}_p \mathbf{X} - \mathbf{K}_I \mathbf{Z} = -\mathbf{K}_p \mathbf{X} - \mathbf{K}_I \mathbf{C} \int_0^{t_f} \mathbf{X} dt ,$$

здесь \mathbf{K} — матрица обратной связи многомерного регулятора, состоящая из пропорциональной \mathbf{K}_p и интегральной \mathbf{K}_I частей регулятора. Необходимым условием существования такого регулятора является выполнение неравенства $p < n$, т.е., число переменных состояния для которых вводится интегральное влияние, не может быть больше числа переменных управления.

Задачу синтеза оптимального линейно-квадратичного цифрового регулятора (ЛКЦР) для ПККИМ можно сформулировать следующим образом. Пусть, согласно технологии кондиционирования, модель ОУ задана уравнением (1). Нужно синтезировать матрицу обратной связи \mathbf{K}_d ЛКЦР, которая по параметрам состояния ОУ определит траекторию вектора оптимального воздействия \mathbf{U}_s^o (для $s = 1, 2, \dots, k - 1$) и минимизирует квадратичный критерий качества (2).

Прежде всего, непрерывную модель ОУ (1) нужно расширить переменными (3), по которым необходимо иметь интегральную составляющую в законе управления и получить расширенную модель ОУ в пространстве состояний (4). Расширенную непрерывную модель ОУ необходимо привести к дискретному виду:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{s+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{X}_s + \mathbf{B}_d \mathbf{U}_s ; \\ \mathbf{Y}_s = \mathbf{C}_d \mathbf{X}_s , \end{cases} \tag{5}$$

где $\mathbf{A}_d = e^{\mathbf{A}T_{KV}}$, $\mathbf{B}_d = \int_0^{T_{KV}} e^{\mathbf{A}(T_{KV}-\tau)} \mathbf{B} dt$.

Структурная схема дискретной модели ОУ (6) изображена на рис. 3.

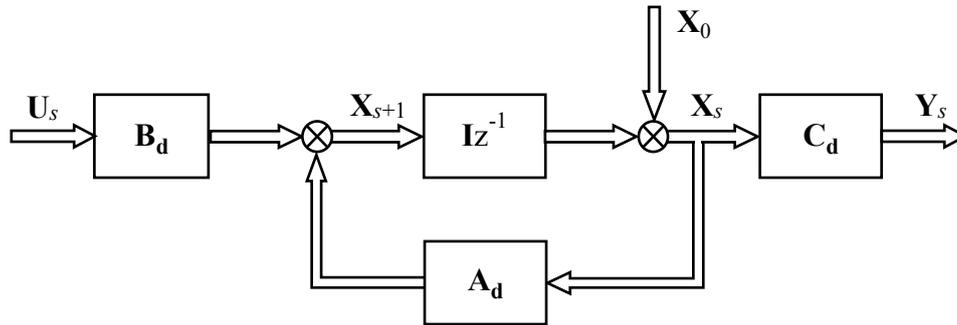


Рис. 3. Структурная схема дискретной модели ОУ

В общем случае оптимальный ЛКЦР представляется зависимостью [13]:

$$U_s = -K_d X_s.$$

Регулятор формирует обратную связь по состоянию параметров ОУ, используя матрицу коэффициентов передачи K_d . Матрица обратной связи определяется зависимостью

$$K_d = (R + B_d^T P B_d)^{-1} B_d^T P A_d. \quad (6)$$

Параметры такого регулятора определяются с использованием решения уравнения Риккати, (при $P = P_0$ проводится решение стационарного матричного уравнения Риккати):

$$P = Q + A_d^T P [I - B_d (R + B_d^T P B_d)^{-1} B_d^T P] A_d. \quad (7)$$

Процедура синтеза ЛКЦР сводится к следующей последовательности действий:

- 1) задаются параметры критерия (2) в соответствии с технологическими требованиями производства;
- 2) формируется расширенная непрерывная модель ОУ (4);
- 3) с использованием (4), определяется дискретная модель ОУ (5);
- 4) ищется решение уравнения Риккати (7);
- 5) по зависимости (6) определяется ЛКЦР.

Структурная схема АСУ с оптимальным ЛКЦР показана на рис. 4. Для стабилизации температуры и влажности на выходе промышленного кондиционера (или в помещении) используется от трех до пяти и более единиц климатического оборудования (в рассматриваемом случае шесть: $KC, K1, O, \Phi Y, K2, П$). При этом в управлении принимает участие не более двух аппаратов, так как регулируется два параметра — температура и влажность воздуха. Из теории управления известно, что количество переменных регулирования должно равняться количеству управляющих воздействий на ОУ, иначе задача не имеет решения или имеет бесконечное множество решений, из которых только одно решение оптимально по выбранному критерию.

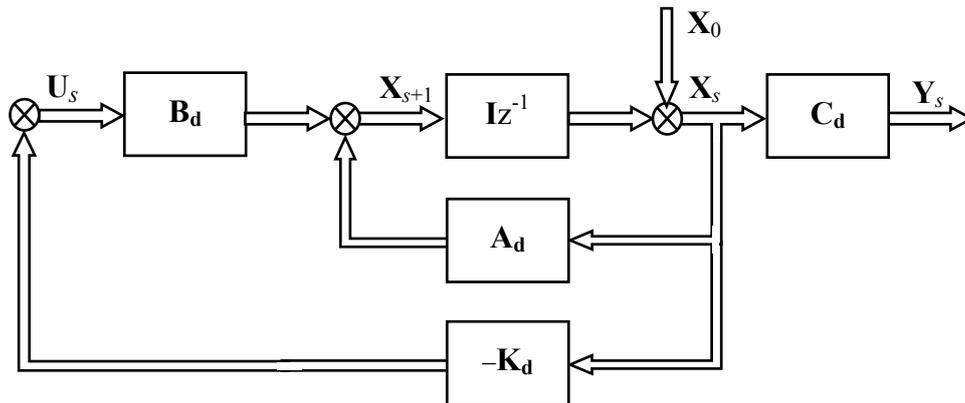


Рис. 4. Структурная схема цифровой АСУ с оптимальным ЛКЦР

В данном случае количество регулирующих каналов превышает количество переменных стабилизации, и задача имеет бесконечное множество решений. Поэтому возникает задача корректного выбора оборудования для осуществления управляющих воздействий. Эта особенность накладывает ограничения на использование классической процедуры синтеза оптимального ЛКЦР. Учитывая наличие логических переключений между оборудованием кондиционера, задачу синтеза необходимо разделить на отдельные подзадачи, что позволит учесть наличие логического управления. Синтез ЛКЦР для ПКЦИМ с элементами логического управления рассмотрим ниже.

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ЛКЦР ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО КОНДИЦИОНЕРА С ФОРСУНОЧНЫМ УВЛАЖНИТЕЛЕМ

Прецизионный кондиционер с форсуночным увлажнителем ориентирован на применение алгоритма управления по методу «точки росы». Характерными чертами для этого метода управления являются следующие:

- 1) стабилизация температуры «точки росы» путем изменения температуры теплоносителя на калорифере $K1$ в зимнее время года, или изменения расхода хладоносителя на охладителе O в летнее время года;
- 2) стабилизация температуры воздуха на выходе ПСЦК путем изменения температуры теплоносителя на калорифере $K2$;
- 3) форсуночный увлажнитель $\PhiУ$ адиабатно увлажняет приточный воздух, в поддоне постоянно поддерживается необходимый уровень воды на орошение, но непосредственного участия в процессе управления увлажнитель не принимает.

На рис. 5 изображена $h - d$ диаграмма процесса кондиционирования воздуха по методу «точки росы» в координатах математической модели (1), где по осям абсцисс и ординат отложены переменные пространства состояний. На вертикальной оси откладываются температурные переменные, а на горизонтальной — переменные влагосодержания. Для модели (1) температура воздуха на входе кондиционера может меняться в диапазоне $x_1^{\min} \dots x_1^{\max}$, а влагосодержание — $x_2^{\min} \dots x_2^{\max}$. На диаграмме показано 6 областей.

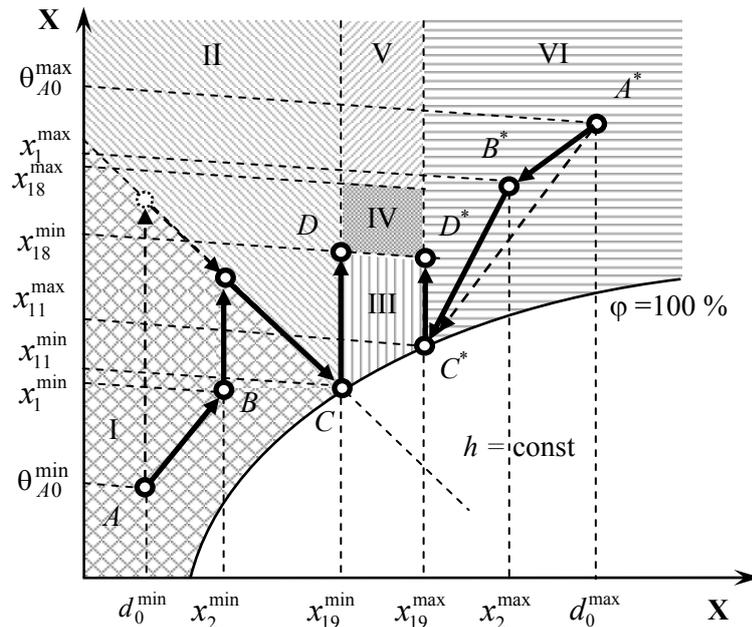


Рис. 5. $h-d$ диаграмма кондиционирования воздуха в координатах математической модели (1)

Область IV имеет форму параллелограмма; эта область характеризует необходимые параметры микроклимата в помещении в диапазоне температур $x_{18}^{\min} \dots x_{18}^{\max}$ и влагосодержания $x_{19}^{\min} \dots x_{19}^{\max}$.

Согласно $h-d$ диаграмме АСК ПККИМ должна обеспечить стабилизацию микроклимата в промышленном помещении в диапазоне допустимой зоны разбаланса для температуры ($x_{18}^{\min} \dots x_{18}^{\max}$) и влагосодержания ($x_{19}^{\min} \dots x_{19}^{\max}$) воздуха. Чтобы поддерживать необходимое влагосодержание воздуха по методу «точки росы», АСК кондиционера обеспечивает стабилизацию температуры «точки росы» за увлажнителем в диапазоне температур $x_{11}^{\min} \dots x_{11}^{\max}$.

Анализ областей $h-d$ диаграммы позволяет дать рекомендации по логическому управлению работой климатического оборудования для модифицированного алгоритма управления АСК ПККИМ по методу «точки росы».

Область I. АСК стабилизирует:

- температуру «точки росы», управляя калорифером $K1$;
- температуру воздуха в помещении, управляя калорифером $K2$.

Область II. АСК стабилизирует:

- температуру «точки росы», воздействуя на охладитель O ;
- температуру воздуха в помещении, воздействуя на калорифер $K2$.

Область III. АСК стабилизирует:

- температуру воздуха в помещении, управляя калорифером $K2$, другое климатическое оборудование участия в регулировании не принимает, влагосодержание воздуха находится в допустимых пределах.

Область IV. Параметры микроклимата находятся в допустимых пределах, регулирующие клапаны оборудования в закрытом положении.

Область V. АСК стабилизирует:

- температуру воздуха в помещении, управляя охладителем O , другое климатическое оборудование участка в регулировании не принимает, влаго-содержание воздуха находится в допустимых пределах.

Область VI. АСК стабилизирует:

- температуру «точки росы», воздействуя на охладитель O ;
- температуру воздуха в помещении, воздействуя на калорифер $K2$.

Для синтеза оптимального ЛКЦР, который реализует ПИ-закон регулирования, расширим математическую модель (1) переменными состояниями, по которым необходимо иметь интегральный закон управления. В данном случае стабилизируются температура «точки росы» за увлажнителем (переменная состояния x_{11}) и температура в помещении (переменная состояния x_{18}), выбор которых осуществляется матрицей C модели (1). С учетом указанных соображений расширенная непрерывная модель ОУ для прецизионного кондиционера примет вид

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

где

$$\mathbf{B}_I = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_1^{K1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{K2} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}; \mathbf{B}_{II} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^O & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{K2} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}; \mathbf{B}_{III} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_1^{K2} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix};$$

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

Наполнение матрицы управления для шести областей $h - d$ диаграммы различное. Наполнение матриц $\mathbf{B}_{I..VI}$ позволяет организовать логику управления климатическим оборудованием в зависимости от параметров

микроклимата окружающей среды для промышленного кондиционера с форсуночной увлажнителем по модифицированному методу «точки росы». Таким образом, учитывая, что матрица управления $\mathbf{V}_{I...IV}$ для каждой из шести областей $h - d$ диаграммы индивидуальная, необходимо синтезировать матрицу обратной связи $\mathbf{K}_{dI...VI}$ согласно зависимости (6) для всех областей. Для синтеза ЛКЦР следует использовать стандартную процедуру синтеза, рассмотренную выше. В алгоритме управления системой искусственного микроклимата по модифицированному методу «точки росы» необходимо предусмотреть контроль параметров микроклимата окружающей среды и переключение между матрицами обратной связи по измеренным параметрам микроклимата окружающей среды.

ВЫВОДЫ

Для ПКИМ предложена методика разработки комплексной математической модели промышленного кондиционера в пространстве состояний. Методика позволяет получить комплексную модель промышленного кондиционера как единого многомерного объекта управления. Для предложенной методики используются динамические модели климатического оборудования в пространстве состояний, которые рассмотрены в работах [6–10]. Рассмотрен пример разработки комплексной динамической модели прецизионного кондиционера с форсуночным увлажнителем.

Для комплексных моделей промышленных кондиционеров предложена методика синтеза линейно-квадратичного цифрового регулятора, которая учитывает логические переключения в работе климатического оборудования. От классической процедуры синтеза ЛКЦР предложенная процедура отличается наличием логического выбора оборудования для оптимального управления ПКИМ. В отличие от существующих АСУ, которые стабилизируют температуру и относительную влажность воздуха, предложено регулировать температуру и влагосодержание воздуха, что позволяет уменьшить, а в некоторых режимах исключить взаимосвязь между переменными температуры и влажности. Имитационное моделирование динамических процессов для АСК ПКИМ в среде Simulink MatLab подтвердила эффективность предложенной методики.

Предложенный подход к разработке комплексных многомерных моделей ПКИМ и процедура синтеза ЛКЦР позволяют переосмыслить синтез АСК ПКИМ на основе разграничения взаимного влияния регулирующих переменных. Это дает возможность перевести систему управления ПКИМ на качественно новый уровень управления и обеспечит эффективное использование энергоресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белова Е.М. Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях / Е.М. Белова. — М.: Евроклимат, 2006. — 640 с.
2. Бондарь Е.С. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха / Е.С. Бондарь, А.С. Гордиенко, В.А. Михайлов, Г.В. Нимич. — К.: ООО «Издательский дом “Аванпост–Прим”», 2005. — 560 с.

3. *Вычужанин В.В.* Повышение эффективности эксплуатации судовой системы комфортного кондиционирования воздуха при переменных нагрузках / В.В. Вычужанин. — Одесса: ОНМУ, 2009. — 206 с.
4. *Голинко И.М.* Принципи синтезу автоматичних систем керування промисловими кондиціонерами / И.М. Голинко // Автоматизация технологических и бизнес-процесів. — 2016. — № 8. — С. 33–42.
5. *Рымкевич А.А.* Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха / А.А. Рымкевич. — М.: Стройиздат, 2003. — 272 с.
6. *Голинко И.М.* Динамічна модель тепломасообміну для водяного охолоджувача промислового кондиціонера / И.М. Голинко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2014. — № 6. — С. 27–34.
7. *Golinko I.* Mathematical model of heat exchange for non-stationary mode of water heater / I. Golinko, I. Galytska // ICCSSEEA, 2019. — P. 58–67.
8. *Голинко И.М.* Математичне моделювання процесів тепло- та масообміну для камери парового зволоження / И.М. Голинко, І.Є. Галицька, В.Ю. Степаненко // Прикарпатський вісник НТШ. Серія Число. — 2014. — № 1(25). — С. 54–62.
9. *Голинко И.М.* Динамічна модель тепломасообмінних процесів у камері форсуночного зволоження / И.М. Голинко, А.І. Кубрак, І.Є. Галицька // Інформаційні системи, механіка та керування. — 2014. — № 11. — С. 61–71.
10. *Голинко И.М.* Промислове приміщення як динамічний елемент системи керування штучним мікрокліматом / И.М. Голинко, І.Є. Галицька // Інформаційні системи, механіка та керування. — 2018. — № 18. — С. 104–114.
11. *Голинко И.М.* Оптимізація системи керування за модульним критерієм якості / И.М. Голинко, І.Є. Галицька // Інформаційні системи, механіка та керування. 2013. — № 9. — С. 105–113.
12. *Рей У.* Методы управления технологическими процессами / У. Рей. — М.: Мир, 1983. — 368 с.
13. *Куо Б.* Теория и проектирование цифровых систем управления / Б. Куо, пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1986. — 448 с.

Надійшла до редакції 17.02.2020