

Логические алгоритмы управления процессом вентиляции загазованных помещений

Д. Х. Имаев, Н. И. Султанов

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

damir.imaev@mail.ru, sultanown@yandex.ru

Аннотация. Задача поддержания качества воздуха в помещениях рассматривается как управляемый технологический процесс, что позволяет применять методы теории управления для разработки систем автоматической стабилизации уровня загазованности. Дефицит текущей информации и минимальное разнообразие воздействий на объект заставляют обращаться к логическим алгоритмам принятия решений. Взаимосвязь дифференциальных уравнений объекта и конечного автомата образуют гибридные модели систем управления. Описание механизма четкого логического вывода в виде кусочно-постоянной статической характеристики дает однородную модель, которая позволяет анализировать процессы загазованности помещений методами нелинейной теории управления.

Ключевые слова: качество воздуха; загазованность; автоматическое управление; гибридная модель; конечный автомат; механизм логического вывода; статическая характеристика

I. ВВЕДЕНИЕ

Велико разнообразие задач контроля и управления качеством воздуха (англоязычный термин – Indoor Air Quality) в бытовых и производственных помещениях.

Контролю загазованности особое внимание уделяется в нефтегазовой отрасли промышленности, помещениях которой могут иметь высокую концентрацию горючих веществ. Одним из примеров является мониторинг уровня загазованности компрессорных цехов магистральных газопроводов. Значительный вклад в теорию и практику контроля и поддержания уровня загазованности закрытых автостоянок внесли А.М. Гримитлин, А.В. Свердлов, А.П. Волков, С.П. Калмыков, В.М. Есин [1] – [8] и многие другие отечественные и зарубежные исследователи (например, J. Vissnik, C. Voget [9]). Некоторые технологии электронной промышленности требуют специального формирования среды [10], в климатотерапии создается искусственная атмосфера с заданной концентрацией газов [11].

Краткий обзор состояния проблемы мониторинга состояния воздуха в помещениях приведен в [12]. Большинство публикаций по тематике контроля загазованности описывает сигнализаторы и анализаторы газов, устройства оповещения и системы мониторинга, рекламирует производителей оборудования. Относительно мало публикаций, посвященных математическим моделям объектов (например, [2], [5], [8]), методам анализа систем контроля загазованности, методикам расчета [3], [4], [6]. Практически отсутствуют работы по синтезу алгоритмов управления и системному подходу к проблеме.

Несмотря на исключительное разнообразие приложений, задачи управления качеством воздуха в

помещениях имеют много общего. Объекты поддержания качества воздуха целесообразно рассматривать как особый управляемый технологический процесс. Это создает предпосылки развития теоретических основ управления качеством воздуха на базе методологии теории автоматического управления, применения методов математического моделирования и идентификации объектов, компьютерной имитации процессов, инструментов анализа и синтеза алгоритмов управления для разработки систем автоматического поддержания уровня загазованности помещений.

Информационная, вычислительная и исполнительная части системы автоматического поддержания уровня загазованности подбираются с учетом противоречивых требований к качеству процессов достижения цели, стоимости проектов, простоты реализации и обслуживания, а также затрат энергии на вентиляцию. Компромисс иногда удается достичь, если отдать предпочтение сигнализаторам пороговых значений загазованности вместо дорогих анализаторов воздуха, выбрать исполнительные механизмы с фиксированными уровнями воздействий (например, вентилятор с постоянной частотой вращения вместо регулируемой).

Если информация об уровне загазованности помещения доставляется небольшим числом сигнализаторов уровней загазованности, то управляющее устройство вместо фактического значения управляемой переменной имеет информацию о принадлежности состояния объекта некоторой ситуации – одному из конечного числа подмножеств состояний. Минимум информации (один бит) доставляется единственным пороговым датчиком. Минимальное разнообразие уровней управляющего воздействия равно двум (включение/выключение вентилятора постоянной производительности). В этих условиях вход и выход устройства управления оказываются символами, кодирующими конечное множество ситуаций небольшой мощности. Дефицит текущей информации и минимальное разнообразие управляющих воздействий заставляют обращаться к логическим алгоритмам принятия решений.

Практика показывает, что системы с обратной связью позволяют получить приемлемое качество процессов даже при минимальной текущей информации и крайне ограниченном разнообразии воздействий на объект. Условие – надлежащий выбор алгоритма обработки данных. Далее рассматривается один из аспектов проблемы поддержания качества воздуха – математическое описание алгоритмов управления в условиях дефицита текущей информации о состоянии объекта и минимального разнообразия воздействий.

II. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИИ

Систему автоматического управления уровнем загазованности помещения путем принудительной смены воздуха иллюстрирует рис. 1. Система с обратной связью уменьшает следствия неопределенных возмущений путем изменения притока воздуха $v(t)$ от вентилятора.

Датчики сигнализируют о достижении уровня загазованности $c(t)$ значений $c_{\min}$ и $c_{\max}$. Выходы датчиков – булевская переменная $\tilde{c}(t)$ выделяет три ситуации: $c < c_{\min}$ («LOW»); $c_{\min} \leq c \leq c_{\max}$ («NORM»); $c > c_{\max}$ («HIGH»), которые кодируются бинарными векторами: (0 0); (1 0); (1 1)'. Состояние управляемого объекта определяется с точностью до принадлежности строго одной ситуации.

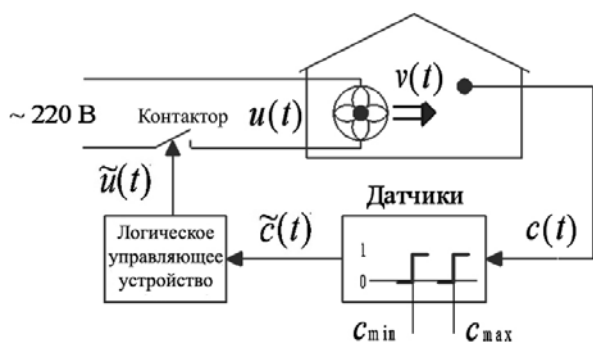


Рис. 1. Принципиальная схема системы управления

Управляющее устройство принимает решения о командах на устройство коммутации напряжения (Контактор). Его выход – булевская переменная $\tilde{u}(t)$ принимает значения 0 или 1. Напряжение $u(t)$, подаваемое контактором на привод вентилятора постоянной производительности, принимает два значения: $u_1 = 0$ В («Выключен») и $u_2 = 220$ В («Включен»).

Концептуальная модель системы автоматического управления качеством воздуха (САУ КВ) изображена на рис. 2. В состав расширенного управляемого объекта включены: Контактор (устройство коммутации), Вентилятор, Контролируемое помещение и Датчики.



Рис. 2. Концептуальная модель САУ КВ

Допустимое значение загазованности задается в виде уставок пороговых значений Датчика $c_{\min}$ и $c_{\max}$.

Аналитический подход к автоматизации управления использует методы теории управления, основанные на математическом описании управляемого объекта, воздействий среды его функционирования и требований к процессам достижения цели. Допущение о сосредоточенности параметров позволяет описать контролируемое помещение обыкновенными дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dv(t)}{dt} = \Phi(v(t), u(t)); \quad (1)$$

$$c(t) = \Psi(v(t)),$$

где: $v(t)$ – вектор переменных состояния; Φ – вектор-функция.

Модели систем управления качеством воздуха оказываются разнородными, как говорят, гибридными – в виде взаимосвязи дифференциальных уравнений (1), описывающих динамику непрерывного объекта (помещения), и управляющего устройства, описывающего логику принятия решений. В системе присутствуют как непрерывные по времени и уровню сигналы $c(t)$ и $u(t)$, так и символьные последовательности $\tilde{u}(t)$ и $\tilde{c}(t)$.

Наиболее подходящая для рассматриваемого примера гибридная модель в форме Нероде–Кона (А. Nerode, W. Kohn) [13], [14] состоит из непрерывной части (Контролируемое помещение) и дискретной части (Логическое управляющее устройство). Взаимодействие разнородных моделей обеспечивает интерфейс в виде преобразователей «аналог-символ» (Датчики) и «символ-аналог» (Контактор).

Концептуальная модель (рис. 2) задает причинно-следственную топологию системы; по терминологии А.А. Вавилова [15] – это модель первого ранга неопределенности. Задание типа, класса и структуры операторов отображения переменных компонентами системы раскрывает неопределенность модели до второго ранга. Наконец, конкретизация значений параметров структурированных операторов дает полностью определенную модель третьего ранга.

III. ЛОГИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ВЕНТИЛЯЦИИ ПОМЕЩЕНИЙ

Особенность САУ КВ заключается в малой информации о состоянии объекта и малом разнообразии управляющих воздействий. Это обстоятельство обуславливает логический характер алгоритмов, реализуемых управляющим устройством. Логические алгоритмы принятия решений описываются по-разному.

Продукционные правила. Пример представления знаний эксперта:

$$\begin{aligned} &\text{ЕСЛИ } (c > c_{\max}) \text{ ТО } (u = 220) \text{ И } (u_0 = 220); \\ &\text{ЕСЛИ } (c < c_{\min}) \text{ ТО } (u = 0) \text{ И } (u_0 = 0); \\ &\text{ЕСЛИ } (c_{\min} < c < c_{\max}) \text{ И } (u_0 = 220) \text{ ТО } (u = 220); \\ &\text{ЕСЛИ } (c_{\min} < c < c_{\max}) \text{ И } (u_0 = 0) \text{ ТО } (u = 0). \end{aligned} \quad (2)$$

Правила (2) включают значение выхода управляющего устройства u_0 , которое предшествует ситуации «Норма» – входу уровня загазованности в зону $c_{\min} < c < c_{\max}$. Это отражает наличие памяти у устройства принятия решений. Алгоритм (2) консервативен – на интервале между пороговыми значениями загазованности сохраняется предыдущее значение управления. Вентилятор включается только с наступлением верхнего порогового значения уровня загазованности, а выключается – со снижением уровня загазованности ниже нижнего порога.

«Прогрессивный» алгоритм принимает решения с учетом направления изменения управляемой переменной. Если в (2) изменены последние два правила:

$$\begin{aligned}
& \text{ЕСЛИ } (c > c_{\max}) \text{ ТО } (u = 220) \text{ И } (u_0 = 220); \\
& \text{ЕСЛИ } (c < c_{\min}) \text{ ТО } (u = 0) \text{ И } (u_0 = 0); \\
& \text{ЕСЛИ } (c_{\min} < c < c_{\max}) \text{ И } (u_0 = 220) \text{ ТО } (u = 0); \\
& \text{ЕСЛИ } (c_{\min} < c < c_{\max}) \text{ И } (u_0 = 0) \text{ ТО } (u = 220),
\end{aligned}
\quad (3)$$

то управляющее устройство действует с предварением: команду на выключение вентилятора дает при снижении загазованности до верхнего порога, а на включение – при ее повышении до нижнего порога.

Конечные автоматы. Математической моделью устройства, вход и выход которого принимают значения из конечных множеств, является конечный автомат (КА).

Автомат задается «пятеркой»

$$\langle S, \mathcal{U}, C, \delta, \lambda \rangle,$$

где: $S, \mathcal{U}, C$ – конечные множества состояний, выходов и входов автомата; δ – функция переходов; λ – функция выходов [16].

Функционирование автомата Мура (Е.Ф. Мур) описывается так:

$$\begin{aligned}
s' &= \delta(s, \tilde{c}); s_0, \\
\tilde{u} &= \lambda(s).
\end{aligned}
\quad (4)$$

Здесь s' – последующее состояние, зависящее от предыдущего состояния s и от входа $\tilde{c}$; s_0 – начальное состояние автомата. При изменении символа на входе автомат переходит в новое состояние, зависящее от исходного, а выходы принимают соответствующие значения.

Выход автомата типа Мили (G.H. Mealy) зависит как от состояния, так и от выхода

$$\begin{aligned}
s' &= \delta(s, \tilde{c}); s_0, \\
\tilde{u} &= \lambda(s, \tilde{c}).
\end{aligned}
\quad (5)$$

Функции переходов и выходов КА задаются в форме таблиц или графов.

Пусть символы входного алфавита КА $C = \{\text{«LOW»}, \text{«NORM»}, \text{«HIGH»}\}$ кодируются бинарными векторами: (0 0); (1 0); (1 1)'. Выходной алфавит КА $\mathcal{U} = \{1 (\text{«ON»}); 0 (\text{«OFF»})\}$. Пусть КА имеет два состояния $S = \{0; 1\}$.

На рис. 3а изображен граф автомата Мура, реализующего правила (2). В вершинах графа указаны коды состояния, а на дугах проставлены коды входных символов. Граф автомата Мили, реализующего правила (3), изображен на рис. 3б.

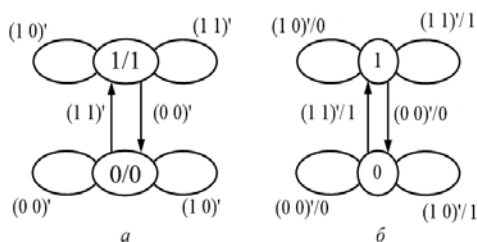


Рис. 3. Примеры графов КА: а – Мура; б – Мили

Заметим, что КА является элементом без временного запаздывания. Новое состояние появляется немедленно

при изменении символа входа, а выход изменяется сразу после изменения состояния (и входа). В асинхронном автомате переходы из одного состояния в другое могут совершаться в любые моменты непрерывного времени.

IV. МЕХАНИЗМ ВЫВОДА В ЧЕТКОЙ ЛОГИКЕ

Конечный автомат в окружении интерфейса (рис. 4) в [17] назван механизмом вывода в четкой (классической, булевой) логике (*Crisp-Logic Inference System*). Термин заимствован из работ по теории систем с нечеткой логикой, в которых системы вывода (инференции) используют логику на нечетких множествах (англоязычный термин *Fuzzy-Logic Inference System*) [18].

Модели систем управления качеством воздуха в помещении используют механизм вывода в четкой логике. Это частный случай механизма вывода на нечетких множествах.

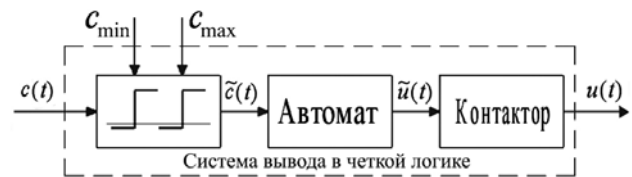


Рис. 4. Принципиальная схема САУ КВ с раскрытой структурой алгоритма управления

Механизм вывода в четкой логике с учетом состояний КА в его составе можно назвать описанием в терминах «вход-состояние-выход».

Описание в терминах «вход-выход» – статическую характеристику (СХ) механизма вывода дает исключение символьных последовательностей $\tilde{c}(t), \tilde{u}(t)$. На рис. 5а приведен пример СХ механизма вывода в случае двух пороговых элементов, двух уровней выхода и логики КА в виде правил (2). Это известная релейная характеристика типа «реле с гистерезисом». Правила (3) в окружении того же интерфейса дают СХ «реле с опережением» (рис. 5б).

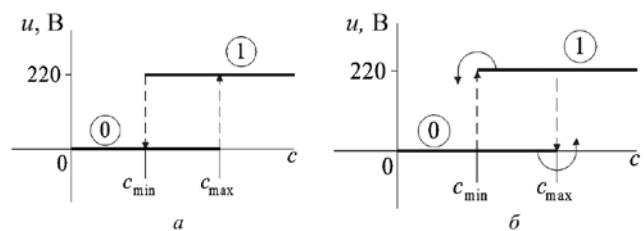


Рис. 5. СХ реле с гистерезисом (а) и реле с опережением (б)

Механизм четкого вывода позволяет описывать кусочно-постоянные СХ с конечным числом разрывов первого рода, так как пороговые датчики доставляют информацию только о наступлении тех или иных событий, а исполнительная часть реализует конечное число уровней.

Однозначные кусочно-постоянные СХ полностью отражают действия по выработке управляющих решений. В случае многозначных СХ графическое задание алгоритма приходится дополнять описанием логики переключений между ветвями.

V. ЗАДАЧА РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ В ФОРМЕ СХ

Переход от описания алгоритмов управления в форме СХ (в терминах «вход-выход») к описанию в терминах «вход-состояние-выход» назовем задачей реализации.

Необходимость представления кусочно-непрерывных СХ в виде механизма четкого вывода объясняется тем, что эмпирические, а также экспертные релейные (позиционные) алгоритмы в инженерной практике описываются в виде графиков. Однако графики СХ изображают алгоритмы с точностью до логики переходов между ветвями многозначных преобразований. Даже в случае не очень сложной логики «реле с опережением» (рис. 5б) график СХ приходится дополнять линиями со стрелками, поясняющими логику переключений.

Увеличение числа сигнализаторов пороговых значений загазованности, а также числа уровней воздействия (вентиляторов) создает потенциальные условия для улучшения качества процессов (уменьшения смещения, амплитуды и частоты колебаний). Вместе с тем, комбинаторно растет число алгоритмов, усложняется их анализ и перебор. Пример более сложной СХ изображена на рис. 6а, где без дополнительных комментариев невозможно понять логику переключения между ветвями в точках разрыва [17].

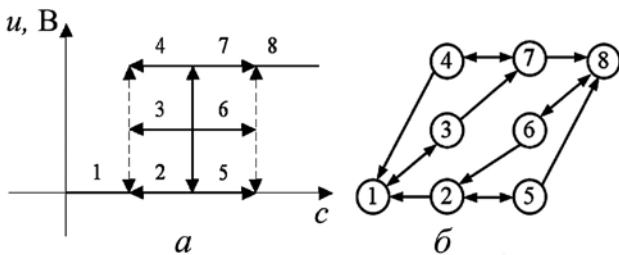


Рис. 6. Пример многозначной СХ (а) и граф переходов между ветвями (б)

Описание логических алгоритмов в виде механизма вывода в четкой логике, т.е. в терминах «вход-состояние-выход» устраняет неоднозначность описания, формализует реализацию известных алгоритмов и открывает путь к автоматизации генерирования новых.

Реализация сводится к описанию детектора событий, автомата и декодера (рис. 4). Детектор событий и декодер определяют входной и выходной алфавиты автомата, т.е. множества C и U . Для описания автомата необходимо выбрать множество его состояний S , а также задать функции перехода δ и выхода λ .

Дополнительную информацию о логике переключений между ветвями многозначной кусочно-постоянной СХ представляет ориентированный граф переходов между ветвями [17]. На рис. 6б показан пример орграфа переходов с восемью вершинами, отвечающими ветвям СХ (рис. 6а), и 14-ю дугами переходов между ветвями.

Графы переходов становятся графами автомата Мура, если в вершинах графа указать символы состояния/выхода, а на дугах проставить входные символы, приводящие к смене состояний. Полученный автомат может иметь избыточные состояния, что ставит задачу минимальной реализации [17], решение которой

может потребовать описание логики в виде автомата Мили.

Пример компьютерной модели механизма вывода в четкой логике на языке графического редактора Simulink показан на рис. 7.

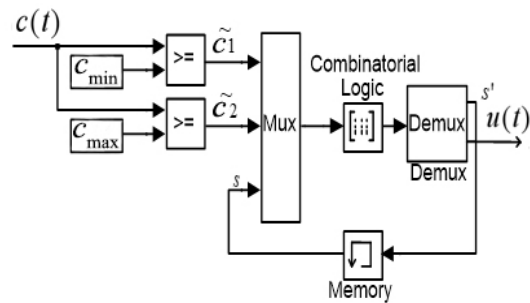


Рис. 7. Пример Simulink-реализации механизма четкого логического вывода

Датчик загазованности реализуют два блока Relational Operator и блоки констант, в которые вписаны пороговые значения $C_{\min}$ и $C_{\max}$. Выходы блоков сравнения принимают значения нуля или единица.

Конечный автомат реализуется блоками: Mux, Combinatorial Logic и Demux. Блок Memory запоминает состояние автомата на последнем шаге вычисления. Блок Mux объединяет выходы элементов сравнения и блока Memory в трехмерный бинарный вектор $(\tilde{c}_1 \tilde{c}_2 s)'$, поступающий на блок Combinatorial Logic. Двумерный вектор $(s' \tilde{u})'$ на выходе этого блока, составленный из нового состояния и выхода КА $(s' \tilde{u})'$, подается на блок Demux, который разделяет его на составляющие s' и $\tilde{u}$.

Блок Combinatorial Logic, описывающий алгоритмы (2) или (3), реализует так называемую таблицу истинности – преобразованную таблицу переходов-выходов КА.

Row index	$\tilde{c}_1$	$\tilde{c}_2$	s	s'	u, B
1	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0
5	1	0	0	0	0
6	1	0	1	1	220
7	1	1	0	1	220
8	1	1	1	1	220

Каждой строке таблицы приписан индекс строки (Row index), который кодирует бинарный вектор десятичными числами (индексами строк) по формуле

$$\text{Row index} = 1 + i(3)2^0 + i(2)2^1 + i(1)2^2.$$

Поле редактирования блока Combinatorial Logic заполняется элементами матрицы, составленной из 8 строк и двух столбцов, соответствующих выходу u и нового состояния s' . Строки матрицы упорядочены в соответствии с индексами строк: [0 – 2; 0 – 2; 0 0; 0 0; 1 2; 1 2; 1 2; 1 2]. Элементы отсутствующих строк с индексами 3 и 4 заменены нулями.

Компьютерная модель механизма четкого вывода, дополненная моделью контролируемого помещения (1),

дает компьютерную модель САУ КВ, позволяющую имитировать процессы управления качеством воздуха.

VI. АНАЛИЗ УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ЗАГАЗОВАННОСТИ ПО ГИБРИДНЫМ МОДЕЛЯМ

Анализ процессов по гибридным моделям систем управления не выполним на основе аналитических процедур, т.е. символьных вычислений. Методы и инструменты анализа систем управления по однородным линейным стационарным моделям не применимы к гибридным моделям.

Универсальный способ анализа – численное решение систем дифференциальных и/или разностных уравнений для конкретных начальных условий и воздействий. Он всегда применяется на завершающих этапах исследований и разработок для уточнения свойств систем, когда их неопределенность сводится к небольшому числу параметров, принадлежащих узким интервалам. Условием выполнения численного анализа систем управления является наличие полностью определенной модели непрерывной части – описание контролируемого помещения обыкновенными дифференциальными уравнениями (1).

Хотя инструменты компьютерной имитации ускоряют решение, такой способ дает результат констатирующего характера и плохо приспособлен для их объяснения и получения выводов качественного характера (например, об устойчивости установившихся режимов).

Системы управления с логическими алгоритмами принятия решений предлагается анализировать по моделям, полученным замещением механизма вывода (рис. 8) безынерционным элементом с кусочно-постоянной (релейной) СХ.

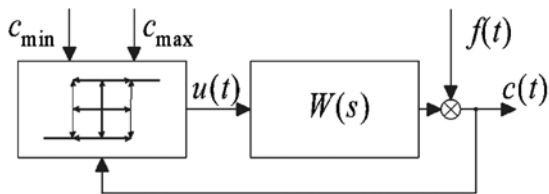


Рис. 8. Расчетная структура релейной системы

Исключение символьных последовательностей $\tilde{c}(t)$, $\tilde{y}(t)$ дает СХ механизма вывода в четкой логике – описание в терминах «вход-выход».

Эквивалентное преобразование гибридной модели в однородную позволяет применить классические методы анализа релейных систем автоматического регулирования [19]. Методики их применения ориентированы на модели в традиционной расчетной форме; их структуры представляют контур, образованный динамическим объектом и СХ безынерционного регулятора (рис. 8). Линейная стационарная модель непрерывной части системы представлена в форме передаточной функции.

Логическое управляющее устройство получает информацию о состоянии объекта только в моменты, когда значение управляемой переменной в точности равно уставкам пороговых датчиков. Вследствие дефицита текущей информации в замкнутых системах устанавливаются так называемые автоколебания.

Периодические переключения реле, во-первых, способствуют циркуляции в контуре управления минимально необходимой текущей информации о состоянии управляемого объекта [17]. Во-вторых, периодические переключения увеличивают разнообразие управляющих воздействий, так как фактически реализуют широтно-импульсную модуляцию сигнала выхода управляющего устройства.

Исчерпывающий анализ процессов в системах с непрерывной частью второго порядка дает метод фазовой плоскости. Для приближенного анализа автоколебаний в системах высокого порядка применяется метод гармонического баланса [20]–[22].

VII. О СИНТЕЗЕ ЛОГИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ

Гибридные системы управления описываются существенно нелинейными моделями, к которым не применимы символьные процедуры анализа. Синтез систем с логическими алгоритмами управления нельзя полностью формализовать. Каждая задача требует индивидуального подхода.

Описание топологии управляющего устройства в виде механизма вывода в четкой логике в виде последовательного соединения компонентов направленного действия, выполняющих информационную, вычислительную и исполнительную функции (рис. 4), допускает декомпозицию процедур синтеза.

Структурный синтез информационной и исполнительных частей управляющего устройства сводится к выбору числа пороговых датчиков и числа допустимых уровней воздействия на объект. Вообще говоря, увеличение числа сигнализаторов и числа уровней воздействия создает потенциальные условия для улучшения качества процессов, но ухудшает другие показатели.

Принципиально иной оказывается задача синтеза КА типа Мура (4) или типа Мили (5). Входной и выходной алфавиты автоматов задают модели информационной и исполнительных частей механизма логического вывода. Множество состояний, а также функции перехода и выхода КА $\delta(\tilde{s}, \tilde{x})$; $\lambda(\tilde{s}, \tilde{x})$ подбирает разработчик. Используется интуиция, приобретенная в процессе длительной эксплуатации аналогичных систем управления. Синтез представляется как «эволюция», как последовательное усложнение вариантов.

Параметрический синтез – выбор действительных значений уставок сигнализаторов и уровней управляющего воздействия – выполняется численными методами поиска. Используется перебор вариантов путем численного анализа полностью определенных моделей, в том числе и контролируемого помещения. Этот этап синтеза выполняется в последнюю очередь.

Искусство синтеза – уменьшение трудоемкости этапа численного анализа. Например, метод гармонического баланса позволяет выбирать параметры релейной СХ из условия отсутствия периодических режимов гармонической формы или минимизации смещения, амплитуды и частоты установившихся колебаний.

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поддержание заданного качества воздуха в помещениях следует рассматривать как управляемый

технологический процесс. Это позволяет применять методологию и методы теории автоматического управления для исследования и разработки систем автоматического управления загазованностью.

Использование минимальной текущей информации о состоянии управляемого объекта и ограниченное разнообразие воздействий на объект приводят к тому, что управляющие устройства оказываются механизмами вывода в четкой логике, а модели систем – гибридными.

Первоочередная задача конкретных проектов – это построение математических моделей помещения, рассматриваемых как объект управления качеством воздуха. В задаче поддержания уровня загазованности помещений важна формализация требований к процессам достижений цели. Здесь нет необходимости точного обеспечения мгновенных значений задания, достаточно обеспечивать средние уровни. Отпадает необходимость в дорогих компонентах систем управления (сверхточных и сверхбыстрых датчиках, вычислителях, исполнительных механизмах). Это обстоятельство повышает интерес к моделям и методам разработки автоматических систем низкой стоимости реализации. Актуальны дальнейшие усилия по разработке методов анализа систем управления по гибридным моделям, методов синтеза логических алгоритмов управления с целью поддержания допустимого уровня загазованности помещений.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы признательны М.Ю. Шестопалову и Ю.А. Кораблеву за постоянное внимание и поддержку исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Свердлов А.В., Волков А.П. Анализ европейских и российских правил проектирования традиционных канальных систем противодымной вентиляции автостоянок закрытого типа // АВОК Вентиляция. Отопление. Кондиционирование. 2017, № 6. С. 34–37.
- [2] Свердлов А.В., Волков А.П., Рыков С.В., Гордеева Э.А., Волков М.А. Проектирование систем противодымной вентиляции современных автостоянок закрытого типа с использованием математических моделей на основе числа Фруда // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2018 № 1 С. 47–56.
- [3] Волков А.П., Свердлов А.В., Рыков С.В., Волков М.А. Фактор энергоэффективности при выборе параметров системы вентиляции автостоянки закрытого типа // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2015 № 3 С. 27–36.
- [4] Волков А.П., Гримитлин А.М., Рыков С.В. Методика расчета вентиляционной системы парковки закрытого типа // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2014 № 2 (15). С. 45–57.
- [5] Гримитлин А.М., Дацюк Т.А., Денисихина Д.М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования. СПб: АВОК Северо-Запад, 2013. 192 с.
- [6] Есин В.М., Калмыков С.П. Обоснование основных параметров, обеспечивающих эффективную работу системы дымоудаления и вентиляции автостоянки закрытого типа при помощи струйных вентиляторов // Пожаровзрывобезопасность. 2007 Т. 16, № 3 С. 54–62.
- [7] Есин В.М., Калмыков С.П. Эффективность применения струйных вентиляторов для целей противодымной вентиляции автостоянок закрытого типа // Промышленное и гражданское строительство. 2008, № 5 С. 56 – 57.
- [8] Калмыков С.П. Численное моделирование работы системы струйной вентиляции закрытой автостоянки // Пожаровзрывобезопасность. 2007 Т. 16, № 1 С. 58 – 63.
- [9] Vissnik J, Voget C. Ventilation in underground garages. Experience of Germany // World of construction and real estate. 2012, No. 43. P. 58.
- [10] Барченко В.Т., Беспалов А.В., Пошехонов Л.Б., Шестопалов М.Ю. Инновационный подход к проектированию системы отказоустойчивого управления технологическим процессом вакуумного нанесения композиционных покрытий // Инновации №10 (180), 2013. С. 123-127.
- [11] Климатотерапия // Большая российская энциклопедия. Том 14. Москва, 2009. 287 с.
- [12] Султанов Н.И. О мониторинге состояния воздуха в помещении // Материалы Школы-семинара им. А.А. Вавилова. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. С. 34-37.
- [13] Nerode A., Kohn W. Models for hybrid systems: Automata, topologies, stability// Hybrid Systems/ Editors R. L. Grossman et al. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 736. – Berlin: Springer-Verlag, 1993. P. 317-356.
- [14] Branicky V. S., Borkar V. S., Mitter S. K. A Unified Framework for Hybrid Control: Model and Optimal Control Theory// IEEE Trans. AC-43. 1998. No. 1. P. 31- 45.
- [15] Вавилов А.А., Имаев Д.Х. Машинные методы расчета систем управления. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. 232 с.
- [16] Карпов Ю.Г. Теория автоматов. СПб.: Питер, 2003. 208 с.
- [17] Имаев Д.Х. Дискретные системы управления. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. 148 с.
- [18] Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control// IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1985. Vol. 15, no. 1. P. 116-132.
- [19] Цыпкин Я.З. Релейные автоматические системы. М.: Наука, 1974. 576 с.
- [20] Попов Е.П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах. М.: Наука, 1973. 584 с.
- [21] Вавилов А.А. Частотные методы расчета нелинейных систем. Л.: Энергия, 1970. 324 с.
- [22] Петров Б.Н., Старикова М.В. Приближенное исследование колебательных процессов в автоматических системах с конечными автоматами// Автоматика и телемеханика. 1969. №8. С. 140-145.