

*Запропоновано модель припливно-витяжної вентиляції багатозонних протяжних об'єктів, яку засновано на принципі подоби з електричними ланцюгами з каскадним з'єднанням RL-елементів. Аналіз диференціальних рівнянь високого порядку, що описують перехідні процеси в повітряній магістралі, показав, що раціональніше використовувати дрібно-диференціальні рівняння, параметри яких визначаються за допомогою генетичних алгоритмів*

*Ключові слова: припливно-витяжна вентиляція, модель, дрібно-диференційні регулятори, генетичні алгоритми, ідентифікація параметрів*

*Предложена модель приточно-вытяжной вентиляции многозонных протяженных объектов, основанная на принципе подобия с электрическими цепями с каскадным соединением RL-элементов. Анализ дифференциальных уравнений высокого порядка, описывающих переходные процессы в воздушной магистрали, показал, что рациональнее использовать дробно-дифференциальные уравнения, параметры которых определяются с помощью генетических алгоритмов*

*Ключевые слова: приточно-вытяжная вентиляция, модель, дробно-дифференциальные регуляторы, генетические алгоритмы, идентификация параметров*

УДК 644.1+004.9:517.9

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59444

# РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРИТОЧНО- ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

**В. В. Бушер**

Доктор технических наук, доцент  
Кафедра электромеханических систем с  
компьютерным управлением\*  
E-mail: victor.v.bousher@gmail.com

**В. Я. Ярмолович**

Старший преподаватель  
Кафедра теоретических основ и  
общей электротехники\*  
E-mail: vuy0147@gmail.com

\*Одесский национальный  
политехнический университет

пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044

## 1. Введение

Системы приточно-вытяжной вентиляции и кондиционирования воздуха предназначены для обеспечения комфортных условий работы и отдыха в различных по назначению и конфигурации производственных и жилых помещениях. Принято объекты управления и, соответственно, регуляторы в них описывать дифференциальными уравнениями с целочисленным порядком, хотя известно, что процесс передачи тепла, потоки воздуха, конвекционные и диффузионные процессы описываются более сложными системами дифференциальных уравнений. Результатом такого упрощения является ошибка в идентификации динамических и даже статических параметров, независимо от используемого метода (анализ реакции на скачок либо получение частотных характеристик за счет подачи синусоидального сигнала задания). Ошибка увеличивается, если датчики находятся в «комфортной» зоне, вне прямых потоков воздуха. Основанные на этих данных настройки или применение усредненных настроек приводит в процессе эксплуатации к неоправданно затянутым переходным процессам либо существенному (в несколько градусов) перерегулированию. А так как процессы длительные, то возникает ощущение дискомфорта.

Кроме того, в помещениях с недостаточной вентиляцией образуется особый микроклимат, характеризующийся повышенной влажностью и температурой, вредными примесями. Кондиционеры и вентиляторы

не всегда успешно справляются со своей задачей, зачастую усугубляя проблему. Специалисты рекомендуют для решения проблем обеспечивать приток свежего воздуха извне с помощью приточной вентиляции. Поэтому вместо кондиционеров для обеспечения комфортных условий и чистого воздуха необходима установка систем вентиляции, на работу которых в значительно большей степени влияют перепады температуры и влажности наружного воздуха. Для таких систем одним из важнейших показателей является энергетическая эффективность.

Согласно данным Европейского Парламента, Совета Европейского Союза, Европейской экономической комиссии ООН, Энергетического Департамента США глобальный вклад коммерческих (commercial) и жилых (residential) зданий в общий объем потребления энергии постоянно увеличивается и составляет сегодня 41 %, значительно опережая потребление энергии в промышленности (31 %). Причем рост требований к уровню комфорта, совместно с увеличением времени нахождения людей внутри помещений, обеспечивает рост потребления энергии на отопление и охлаждение, которое составляет 85 % от суммарных затрат энергии. Новый европейский стандарт EN15232 [1] является одним из ряда стандартов CEN (Comité Européen de Normalisation, Европейский комитет по стандартизации), созданным в рамках спонсированного Европейским Союзом проекта стандартизации. Цель данного проекта – поддержка исполнения Директивы [2] по энергоэффективности и повышению энергосбережения

в странах-членах ЕС. Стандарт EN15232 задает методику оценки влияния функций систем автоматизации зданий и средств управления техническими системами (УТС) на энергоэффективность, а также методику определения минимальных требований к таким системам для зданий различной сложности. Сложные интегрированные процессы и функции экономии энергии настраиваются в зависимости от конкретных условий эксплуатации и потребностей пользователя, что позволяет не допустить излишнего расхода энергии и выбросов  $\text{CO}_2$ . УТС предоставляет информацию о тенденциях энергопотребления, подаче сигналов тревоги и выявлении бесполезных трат энергии.

Современные высокотехнологичные транспортные средства предоставляют высокий уровень обслуживания, комфорта, что невозможно без обеспечения должных климатических условий в вагонах скоростных поездов, отдельных купе, салонах самолетов. Системы кондиционирования в них представляют собой сложные электротехнические комплексы, включающие в себя различные исполнительные устройства: вентиляторы с регулируемой скоростью, источники тепла/холода с регулируемой производительностью, воздушные заслонки с изменяемым сечением, причем регулируемые координаты связаны между собой и влияют как на уровень комфорта, так и на затраты энергии. Основной особенностью этих систем является каскадное соединение обслуживаемых климатических зон между собой при наличии централизованной системы подготовки воздуха.

Современный уровень микропроцессорной техники позволяет реализовывать сложные алгоритмы управления разнообразными технологическими объектами без существенного удорожания систем управления. Это открывает пути для использования более сложных моделей и регуляторов без упрощений, без которых реализация систем в массовом производстве ранее была невозможна.

Поэтому актуальной является задача повышения энергетической эффективности и обеспечения комфортных условий в пассажирских поездах и самолетах за счет совершенствования систем вентиляции и кондиционирования.

Решение может быть обеспечено двумя путями. Первый, применяемый уже в некоторых современных кондиционерах (Mitsubishi Electric, LG), – построение систем управления на основе нечеткой логики – хорошо зарекомендовал себя как в простейших, так и в сложных мультizonных кондиционерах, в том числе с функцией вентиляции. Второй – синтез систем управления на основе более точного математического описания объектов, на основании которого могут быть улучшены статические и динамические показатели, что, в свою очередь, способствует улучшению энергетических показателей систем и повышению уровня комфорта. Именно этот вариант систем управления является предметом исследования настоящей работы.

## **2. Анализ литературных данных и постановка проблемы**

При разработке системы вентиляции и кондиционирования необходимо определить параметры источников тепла/холода,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  и т. п., расчи-

тать необходимую кратность воздухообмена, выбрать оборудование для вентиляции и подготовки воздуха (подогрева, охлаждения, осушения, очистки), описать взаимодействие объектов и определить законы управления. Особенностью вагонов и салонов самолетов является относительно большая протяженность воздушных каналов и многосекционная зона обслуживания, в которой отдельные зоны (купе) соединены последовательно [3].

Вентилятор по воздушному каналу приточной вентиляции подает воздух в купе через регулируемые воздушные заслонки, расположенные вдоль вагона на равных расстояниях друг от друга. Области между заслонками, собственно заслонки, и отдельные купе являются для потока воздуха аэродинамическими сопротивлениями, в которых происходит падение воздушного давления, создаваемого вентилятором. В ряде работ созданы модели таких систем и даже в некоторых случаях при одинаковом сечении каналов найдены аналитические решения для расчета изменения температуры и других параметров потока вдоль канала [4]. Однако в реальных условиях воздушные заслонки для обеспечения равномерного распределения потока воздуха намеренно устанавливаются в различных положениях. Это делает задачу аналитического расчета крайне сложной.

Каскадное соединение отдельных купе делает систему вентиляции вагона похожей на фрактальные структуры, описанные в теории хаоса [5], объединяющей математическое описание фрактальных пространственных структур и взаимодействие подвижных частиц. В современной теории теплообмена также показана эффективность применения дробных обобщений уравнений, как и для физики фрактальных сред, по сравнению с методами целочисленного интегрирования [6–8]. В работе [7] показано, что зависимость температуры от времени в тепловой системе в переходном режиме может быть аппроксимирована и смоделирована с помощью дифференциального уравнения дробного порядка. Аналитические решения получены с помощью функций Миттаг-Лефлера и предложено использование ПИД-регуляторов нецелого порядка для управления процессами [9]. Однако применение дробного исчисления в автоматическом управлении пока вызывает определенные сложности и условно может быть разделено на две области. Первую образуют методы математического и компьютерного моделирования систем с дробной динамикой. Ко второй относятся методы использования аппарата дробного исчисления для синтеза систем управления объектами как целого, так и дробного порядка, и в частности, синтеза контроллеров нецелого порядка [10, 11], предлагаются некоторые приближенные аналоговые модели таких контроллеров на базе последовательных RC-цепей, свойства которых похожи на фрактальные объекты [12]. Получаемые передаточные функции из-за трансцендентности существенно осложняют решение классических проблем теории автоматического управления – устойчивость, наблюдаемость, робастность, но с учетом увеличения производительности при одновременном снижении стоимости микроконтроллеров рассматриваются способы вычислительной реализации решений дробно-интегральных уравнений и синтезируемых контроллеров для локальных объектов [13–15].

Учитывая современные тенденции, предлагается провести анализ рассматриваемой многозонной системы вентиляции как фрактального объекта для обеспечения возможности синтеза соответствующих дробных ПИД- или ПИ-регуляторов.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью работы является создание модели приточно-вытяжной вентиляции многозонных протяженных объектов (таких, как пассажирские купейные вагоны) на основании принципа подобия с электрическими цепями с каскадным соединением для обеспечения возможности анализа и последующего синтеза систем автоматического регулирования компонентами климатической установки с применением элементов теории дробно-интегрального счисления.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать модель воздушных потоков в каскадно-соединенных купе с централизованной системой подготовки воздуха;
- осуществить редуцирование порядка дифференциальных уравнений, описывающих динамические процессы распределения воздушных потоков;
- определить рациональную структурную схему регуляторов и определить целесообразные пути последующего синтеза системы управления вентиляционной установкой купейного вагона.

### 4. Модель приточно-вытяжной вентиляции многозонных протяженных объектов

Вентилятор, создающий давление  $H$  с размерностью  $[kgm^{-1}s^{-2}]$ , направляет в воздушный канал поток воздуха с подачей  $Q[m^3s^{-1}]$ . Полезная мощность, затрачиваемая вентилятором  $P=HQ$ , может быть сопоставлена с мощностью в электрических цепях  $P=UI$ . Тогда подача  $Q$  может быть сопоставлена с током  $I$ , а давление  $H$  – с напряжением  $U$  [16, 17]. Аэродинамическое сопротивление воздушной магистрали в целом, участков приточного канала между заслонками, купе и участков вытяжного канала могут быть описаны как отношение падения давления к подаче:

$$R_{\Sigma} = \frac{H}{Q}, R_i = \frac{\Delta H_i}{Q_i} \tag{1}$$

Кинетическая энергия воздушного потока определяется его массой и скоростью:

$$W = \frac{mV^2}{2} = \frac{1}{2}\rho l s \left(\frac{Q}{s}\right)^2 = \frac{1}{2}\rho l Q^2, \tag{2}$$

где  $l, s$  – эквивалентная длина и площадь сечения воздушной магистрали или ее участка,  $\rho$  – плотность воздуха. Сопоставив кинетическую энергию с электромагнитной, накапливаемой катушкой индуктивности  $W = \frac{LI^2}{2}$ , получим параметр участка воздушной магистрали

$$L_{\Sigma} = \frac{\rho l_{\Sigma}}{s_{\Sigma}}, L_i = \frac{\rho l_i}{s_i}, \tag{3}$$

который может быть охарактеризован как аэродинамическая индуктивность. Легко убедиться, что  $L_i \frac{dQ_i}{dt} = \Delta H_{Li}$  – падение давления, необходимое для изменения  $Q_i$  в воздушном канале с «индуктивностью»  $L_i$ .

Тогда каждый участок приточного воздушного канала между заслонками, купе и участки вытяжного канала могут быть представлены как активно-индуктивные элементы  $R_F - L_F$ ,  $R_C - L_C$  и  $R_R - L_R$  соответственно. Заслонка для потока воздуха представляет собой сопротивление с параметром  $R_V$ .

Если продолжить ассоциации электрических цепей и воздушных магистралей, то можно показать, что объемная упругость воздуха проявляется аналогично емкости конденсатора. Пренебрегая нагревом из-за малых величин избыточного давления, потенциальная энергия, накопленная в сжатом напором  $H$  объеме воздуха  $V = ls$ , может быть выражена в виде:

$$W = \frac{\Upsilon}{2} \Delta V^2 = \frac{\rho c^2}{2V} (\tau V H)^2 = \frac{CH^2}{2}, \tag{4}$$

где  $\Upsilon$  – коэффициент упругого сжатия некоторого объема воздуха,  $\tau \approx -0,7...1 \times 10^{-5} Pa^{-1}$  – удельный коэффициент сжатия воздуха при нормальных условиях,  $c$  – скорость звука [18]. В результате получаем некоторую величину, которую можно сопоставить с емкостью конденсатора:

$$C = \tau^2 \rho c^2 V = \tau^2 \rho c^2 ls. \tag{5}$$

В MATLAB/SimPowerSystem вагон, состоящий из десяти купе (9 пассажирских и купе проводника), представлен моделью, приведенной на рис. 1. Воздушная магистраль, начиная с приточного вентилятора, представлена как последовательно соединенные секции, причем давление на  $i$ -ых заслонке и купе  $R_{Vi}$  и  $R_{Ci} - L_{Ci}$  создают давление для следующей секции вагона.

Определим параметры модели в относительных единицах. Пусть в номинальном режиме работы напряжение и ток источника равны  $U=1, I=1$ . Тогда при правильном расчете системы вентиляции, считая примерно одинаковыми параметры теплопритоков в купе (одинаковое количество пассажиров и условия теплообмена с окружающей средой), этот воздушный поток будет равномерно распределен между всеми купе независимо от их удаления от приточного вентилятора.

Зададим количество купе  $N_C$ . Тогда ток в отдельном купе в установившемся режиме должен быть равен

$$I_{Ci} = \frac{1}{N_C}, i \in [1, N_C].$$

Падение напряжения на последних участках приточного и вытяжного каналов  $\Delta U_{Nc} = I_{Ci} (R_f + R_r), i = N_C$ . Падение напряжения на участке купе составит:

$$U_{Ci} = I_{Ci} (R_{Vi} + R_C). \tag{6}$$

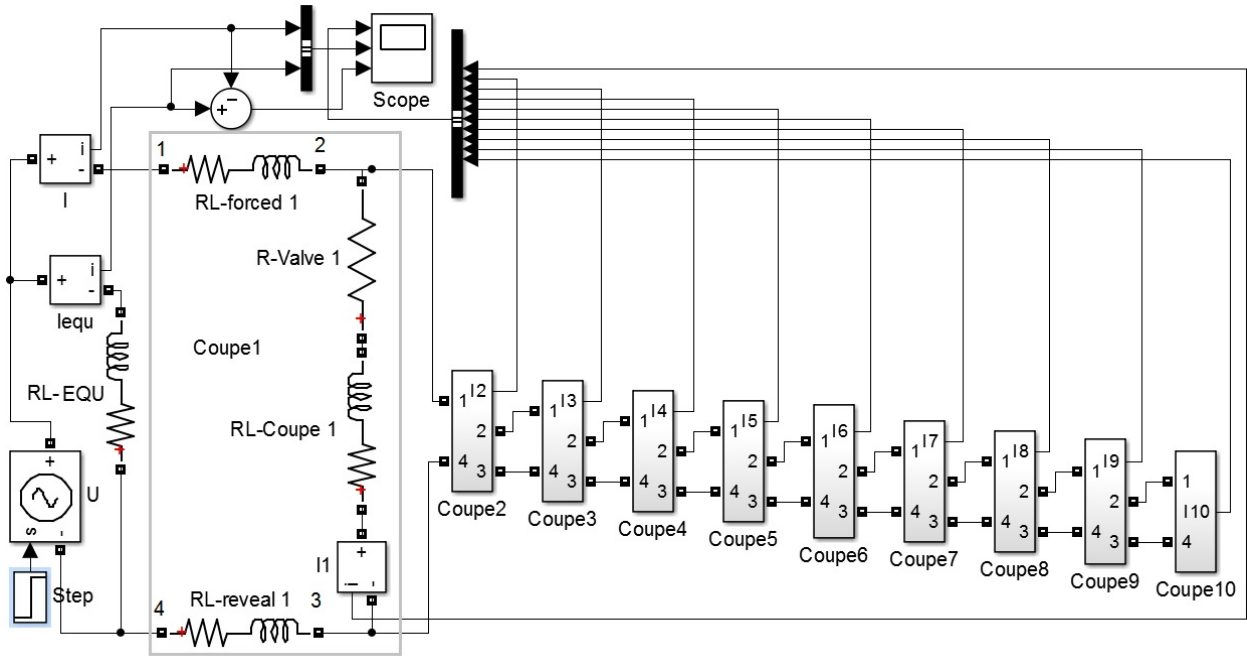


Рис. 1. Модель системы приточно-вытяжной вентиляции купейного вагона

Для следующих купе ток в каналах равен  $iI_{Ci}$ . Поэтому падения напряжения в секциях воздушных каналов составят:

$$\Delta U_{Ci} = (N_c + 1 - i)I_{Ci}(R_F + R_R). \quad (7)$$

Суммарное падение напряжения в участках каналов вентиляции по отношению к источнику будет равно:

$$\Delta U_i = \sum_{j=1}^i \Delta U_{Cj} \Rightarrow \Delta U_i = \left( iN_c - \frac{i(i-1)}{2} \right) I_{Ci}(R_F + R_R). \quad (8)$$

Тогда из равенства  $U_{Ci} = U - \Delta U_i$  относительное аэродинамическое сопротивление  $i$ -ой заслонки определяется по формуле:

$$R_{Vi} = \frac{U - \Delta U_i}{I_{Ci}} - R_{Ci}, \quad (9)$$

откуда получаем

$$R_{Vi} = N_c - \left( iN_c - \frac{i(i-1)}{2} \right) (R_F + R_R) - R_{Ci}. \quad (10)$$

По формуле (10) могут быть вычислены настройки воздушных заслонок, при которых воздушные потоки в каждом купе будут одинаковыми.

Из формулы (10) также может быть определено предельно допустимое относительное аэродинамическое сопротивление воздушных каналов в зависимости от количества купе:

$$(R_F + R_R)_{\max} = \frac{N_c - (R_{V_{\min}} + R_{Ci})}{\left( N_c^2 - \frac{N_c(N_c - 1)}{2} \right)}. \quad (11)$$

Эквивалентное абсолютное значение сопротивления системы вентиляции может быть получено, исходя из максимальной кратности воздухообмена  $k=3$ , объема вагона и приблизительной величины избыточного давления, создаваемого вентилятором  $R_\Sigma \approx 0,5...1 \cdot 10^2 \text{ kgm}^{-4}\text{s}^{-1}$ .

Индуктивности могут быть рассчитаны, исходя из геометрических размеров воздушных каналов и купе:  $L_F = L_R \approx 0,3 \text{ kgm}^{-4}$ ,  $L_C \approx 1 \text{ kgm}^{-4}$ .

Для каждого участка приточной и вытяжной магистралей и купе значения  $C_F, C_R, C_C$  также могут быть определены достаточно точно:  $C_F = C_R \approx 0,7...1,3 \cdot 10^{-5}$ ,  $C_C \approx 1...2 \cdot 10^{-4}$ . Очевидно, что постоянные времени  $RC$  существенно меньше величин  $L/R$  для этих же участков магистралей и емкостями можно пренебречь.

Используя полученные выше зависимости (10) и (11), можно перейти от относительных значений  $R$  к абсолютным. Либо, исходя из эквивалентности постоянных времени  $T_L = L/R$ , можно выполнить переход к относительным значениям индуктивностей  $L^* = L/R_\Sigma$ .

Для получения качественных показателей объекта управления в модель (рис. 1) были внесены относительные параметры сопротивлений и относительные индуктивности, определяющие аэродинамическую инерционность каналов и купе. Очевидно, что из-за различных значений  $R_{Vi}$  каждое купе характеризуется своей постоянной времени.

## 5. Результаты моделирования многозонной системы вентиляции

В результате расчетов получены графики переходных процессов воздушных потоков в отдельных купе  $I_{Ci}(t)$  и суммарного потока  $I(t)$  (рис. 2). Такое решение может быть также получено аналитически. Однако для этого необходимо составить систему из линейных дифференциальных уравнений, найти корни характеристических уравнений, порядок кото-

рых составляет  $2(N_c - 1)$ , а затем – соответствующие постоянные интегрирования. Предложенная модель позволяет получить результаты значительно быстрее, в том числе при произвольной форме управляющего воздействия  $U(t)$ .

На рис. 2 ток  $I(t)$  сопоставлен с моделью инерционного звена первого порядка  $R_{EQU} - L_{EQU} (R_{EQU} = 1)$ , переходный процесс в котором наиболее близок к  $I(t)$ . Разность  $\Delta(t) = I(t) - I_{EQU}(t)$  характеризуется тем, что в начале переходного процесса  $I(t)$  опережает  $I_{EQU}(t)$ , а затем отстает от него. Это характерный признак поведения дробно-аперiodического звена [19].

Это позволяет предложить метод идентификации динамических параметров воздушной магистрали дробно-аперiodическими звеньями с передаточной функцией следующего вида:

$$H_i(p) = \frac{k_i}{a_{ii}p^{1+\mu} + a_{0i}p^\mu + 1}, \quad (12)$$

где  $k_i$  соответствует установившемуся значению потока в  $i$ -м купе в относительных единицах,  $a_{0i}, a_{ii}, \mu$  – коэффициенты и порядок дробно-дифференциального уравнения, причем  $0 < \mu < 2, a_{0i} > a_{ii}$ . Такое звено является частным случаем гипернейрона [20], его параметры наилучшим образом определяются с помощью генетических алгоритмов.

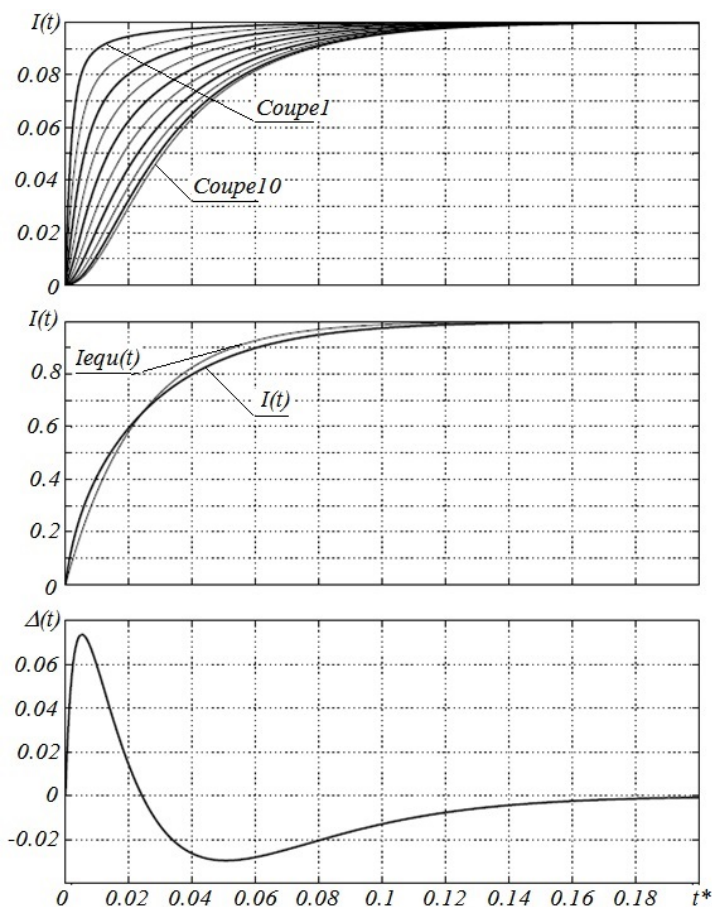


Рис. 2. Графики переходных процессов в RL-модели системы вентиляции

В табл. 1 приведены полученные для каждого купе и магистрали в целом параметры  $\mu, a_0, a_1$ , при которых от-

носительная среднеквадратичная погрешность  $\epsilon$  между приведенными на рис. 2 данными и решениями дробно-дифференциальных уравнений составляет не более 0,14...1,23 %. Порядок эквивалентных передаточных функций составляет 1,8...1,99 для отдельных купе и 0,95 для магистрали в целом. Соответственно, при синтезе системы управления достаточно будет использовать дробные ПИД- и ПИ-регуляторы.

Таблица 1

Параметры передаточных функций отдельных купе и вагона

Объект	$a_0$	$a_1$	$\mu$	$\epsilon, \%$
Купе 1	0,01393/0,0072	0,000012/0,0	0,832/1	0,60/2,58
Купе 2	0,02416	0,000018	0,840	1,03
Купе 3	0,03339/0,024	0,000022/0,0	0,875/1	1,23/2,40
Купе 4	0,04196	0,000026	0,916	1,15
Купе 5	0,04990/0,00453	0,000060/0,0	0,953/1	0,84/1,56
Купе 6	0,05743	0,000166	0,981	0,44
Купе 7	0,06474	0,000393	0,995	0,15
Купе 8	0,07147/0,0710	0,000776/0,00074	0,996/1	0,14/0,15
Купе 9	0,07638	0,001134	0,995	0,30
Купе 10	0,07955/0,078	0,001416/0,00125	0,989/1	0,47/0,51
Вагон	0,05294/0,0479	0,0/0,0	0,947/1	1,23/2,05

Курсивом в табл. 1 для некоторых купе и магистрали приведены параметры идентификации при целочисленных  $\mu$ . При полученных значениях  $\mu, a_0, a_1$  погрешность в пять раз меньше для первых купе, вдвое меньше для средних и незначительно меньше для последних купе по сравнению с моделями при  $\mu = 1$ .

Следует также отметить, что при  $N_c = 20...60$  (например, при моделировании салонов самолетов) погрешности при  $\mu = 1$  увеличиваются в несколько раз. Это влечет за собой ухудшение как динамических, так и энергетических показателей системы. Следовательно, применение дробно-аперiodических функций для идентификации объектов управления и последующего синтеза регуляторов оправдано.

### 6. Обсуждение результатов исследования модели воздушной магистрали многозонной системы вентиляции вагонов

Таким образом, на основании принципа подобия с электрическими цепями получена модель многозонной каскадной системы вентиляции (купейного вагона или салона самолета), показаны правила определения ее параметров и настроек для получения идентичных воздушных потоков в отдельных купе независимо от их удаленности от центральной системы подготовки воздуха.

Модель характеризуется легкостью в использовании, позволяет быстро рассчитывать переходные и установившиеся процессы в магистрали и в отдельных купе, в том числе при произвольной форме задающего сигнала (скорости приточного вентилятора). Последнее позволяет допол-

нить систему необходимыми регуляторами (температуры, влажности, концентрации  $\text{CO}_2$ ).

Важно, что полученные в результате идентификации передаточные функции для описания воздушных потоков в магистрали вагона и в отдельных купе характеризуются дробным порядком, что в сочетании с  $\mu = 0,5$ , присущим модели теплообмена в результате конвекции, свидетельствует о целесообразности синтеза дробных ПИ- или ПИД-регуляторов, что является целью дальнейших исследований.

## 7. Выводы

1. Разработана модель системы вентиляции купейных вагонов или салонов самолетов, построенная по принципу подобия с электрическими цепями с каскадным соединением. Несмотря на формирование модели исключительно из объектов, описываемых дифференциальными уравнениями первого порядка, эквивалентные модели вагона и отдельных купе из-за их каскадного соединения описываются дифференциальными уравнениями высокого порядка. Созданная модель позволяет упростить поиск решений этих урав-

нений, в том числе при изменении воздушного потока в магистрали или положения воздушных заслонок в отдельных купе.

2. Показано, что решения уравнений близки к решениям дробно-дифференциальных уравнений, что согласуется с фрактальной структурой объекта. Для получения высокой точности идентификации объектов достаточно использовать передаточные функции дробно-аперриодических звеньев с порядком не более 2 для отдельных купе и не более 1 для центральной магистрали.

3. Если в моделях отдельных купе учесть процессы конвекции, характеризующиеся порядком 0,5, то порядок эквивалентной модели будет существенно отличаться от 1. Это свидетельствует о целесообразности построения системы управления с применением теории дробных интегрально-дифференциальных регуляторов. Учитывая, что воздушные потоки с учетом их параметров (температура, влажность, концентрация примесей) являются управляемыми источниками, а люди, теплообмен через окна и стенки рассматриваются в качестве возмущающих воздействий, можно получить полную модель системы вентиляции и кондиционирования воздуха вагона и осуществить синтез системы управления. Это будет выполнено в последующих работах.

## Литература

1. European Standard EN 15232. Energy performance of buildings. Impact of Building Automation, Controls and Building Management [Electronic resource]. – 2007. – Available at: [http://www.cres.gr/greenbuilding/PDF/prend/set4/WI\\_22\\_TC-approval\\_version\\_prEN\\_15232\\_Integrated\\_Building\\_Automation\\_Systems.pdf](http://www.cres.gr/greenbuilding/PDF/prend/set4/WI_22_TC-approval_version_prEN_15232_Integrated_Building_Automation_Systems.pdf)
2. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council. On the energy performance of buildings, recast [Electronic resource]. – 2010. – Available at: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF>
3. Бушер, В. В. Модель електротехнічних елементів припливної вентиляції як об'єктів з розподіленими параметрами [Текст] / В. В. Бушер, П. Є. Христо // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – 2008. – № 30. – С. 505–506.
4. Бондарь, Е. С. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха [Текст]: учеб. пос. / Е. С. Бондарь, А. С. Гордиенко, В. А. Михайлов, Г. В. Нимич. – К: «Аванпост–Прим», 2005. – 560 с.
5. Мандельброт, Б. Б. Фракталы и хаос. Множество Мандельброта и другие чудеса [Текст] / Б. Б. Мандельброт. – М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. – 392 с.
6. Tarasov, V. E. Fractional Liouville and BVJKI Equations [Text] / V. E. Tarasov // Journal of Physics: Conference series. – 2005. – Vol. 7. – P. 17–33. doi: 10.1088/1742-6596/7/1/002
7. Гебхарт, Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен [Текст] / Б. Гебхарт, Й. Джалурия, Р. Махаджан, Б. Саммакия; в 2-х книгах, кн. 1; пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 678 с.
8. Гебхарт, Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. [Текст] / Б. Гебхарт, Й. Джалурия, Р. Махаджан, Б. Саммакия; в 2-х книгах; кн. 2; пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 528 с.
9. Aoki, Y. Approximation of transient temperatures in complex geometries using fractional derivatives [Text] / Y. Aoki, M. Sen, S. Paolucci. – Technical Note of department of aerospace of Notre Dam, 2005. – 21 p.
10. Petras, I. The fractional-order controllers: Methods for their synthesis and applications [Electronic resource]. – 2000. – Available at: <http://arxiv.org/pdf/math/0004064.pdf>
11. Petras, I. Control quality enhancement by fractional order controllers [Text] / I. Petras, L. Dorsak, I. Kostial // Acta Montanistica Slovaca // Rochnik 3. – 1998. – Vol. 2. – P. 143–148.
12. Petras, I. Analogue realization of Fractional Order Controllers [Text] / I. Petras, I. Podlubny, P. O'Leary. – FBERG, Tech. University of Kosice, 2002. – 84 p.
13. Pipes, L. Computation of the Impedance of Nonuniform Lines by a direct method [Text] / L. Pipes // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics. – 1956. – Vol. 75, Issue 5. – P. 551–554. doi: 10.1109/tce.1956.6372426
14. Busher, V. Modeling and Identification of Systems with Fractional Order Integral and Differential [Text] / V. Busher, V. Yarmolovich // Electrotechnical and Computer Systems. – 2014. – Vol. 15, Issue 91. – P. 52–56. – Режим доступа: <http://etks.opu.ua/?fetch=articles&with=info&id=379>
15. Бушер, В. В. Синтез регуляторов для систем управления климатическими установками [Текст] / В. В. Бушер // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – № 05(81). – С. 125–130. – Режим доступа: [http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/etks\\_2012\\_5\\_20.pdf](http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/etks_2012_5_20.pdf)

16. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики [Электронный ресурс] / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – Режим доступа: <http://pskgu.ru/ebooks/tihonov.html>
17. Коган, И. Ш. Физические аналогии – не аналогии, а закон природы [Электронный ресурс] / И. Ш. Коган. – Технион – Израильский технологический институт, Хайфа. – Режим доступа: <http://www.sciteclibrary.ru/texts/rus/stat/1362.pdf>
18. Богданов, С. Н. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справ. [Текст] / С. Н. Богданов, С. И. Бурцев, О. П. Иванов, А. В. Куприянова; под ред. С. Н. Богданова; 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГАХИТ, 1999. – 320 с.
19. Бушер, В. В. Идентификация элементов климатических систем дифференциальными уравнениями дробного порядка [Текст] / В. В. Бушер // Электромашинобуд. та електрообладн. – 2010. – № 75. – С. 68–70. – Режим доступа: [http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/etks\\_2010\\_75\\_14.pdf](http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/etks_2010_75_14.pdf)
20. Busher, V. Modeling and Identification of Systems with Fractional Order Integral and Differential [Text] / V. Busher, V. Yarmolovich // Electrotechnical and Computer Systems. – 2014. – Vol. 15, Issue 91. – P. 52–56. – Режим доступа: <http://etks.opu.ua/?fetch=articles&with=book&id=15>

*Досліджено можливість застосування теоретико-множинного підходу для формалізації процедур багаторівневого організаційно-технологічного управління системами комунальної теплоенергетики (КТЕ), розглянуто алгоритми координування міжрівневої взаємодії їх підсистем та використання логико-математичних функцій для комплексного урахування організаційних і техніко-технологічних та екологічних складових управління такого роду системами. Приведено результати моделювання, що підтверджують можливість підвищення на 20–40 % ефективності функціонування систем КТЕ за рахунок оптимізації управління*

*Ключові слова: комунальна теплоенергетика, організаційно-технологічне управління, багаторівневі системи управління, координування взаємодії, енергоекономічна ефективність*

*Исследованы возможности применения теоретико-множественного подхода для формализации процедур многоуровневого организационно-технологического управления системами коммунальной теплоэнергетики (КТЭ), рассмотрены алгоритмы координирования межуровневого взаимодействия их подсистем и использования логико-математических функций для комплексного учета организационных и технико-технологических составляющих управления такого рода системами. Приведены результаты моделирования, подтверждающие возможности повышения на 20–40 % эффективности функционирования систем КТЭ за счет оптимизации управления*

*Ключевые слова: коммунальная теплоэнергетика, организационно-технологическое управление, многоуровневые системы управления, координация взаимодействия, энергоэкономическая эффективность*

УДК 621.311:697.34

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59416

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОРГАНІЗАЦІЙНО- ТЕХНОЛОГІЧНОГО УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ КОМУНАЛЬНОЇ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ

Б. І. Басок

Доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, завідувач відділом

Відділ теплофізичних основ енергозберігаючих технологій  
Інститут технічної теплофізикиНаціональної академії наук України  
вул. Желябова, 2а, м. Київ, Україна, 03680

E-mail: basok\_nat@rambler.ru

Т. О. Євтухова

Молодший науковий співробітник  
Відділ ефективності енерговикористання таоптимізації енергоспоживання  
Інститут загальної енергетикиНаціональної академії наук України  
вул. Антоновича, 172, м. Київ, Україна, 03150

E-mail: tatyana.eutukhova@yandex.ua

### 1. Вступ

Комунальна теплоенергетика (КТЕ) є однією з визначальних складових паливно-енергетичного комплексу країни, що поєднує в собі підприємства теплоста-

чання, об'єднані в регіональні (обласні, міські, районні тощо) системи, діяльність яких регулюється державними та місцевими органами влади на національному та регіональному рівнях. Основним призначенням КТЕ є забезпечення кінцевих споживачів, головним чином