

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 681.51:519.6

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-7-20

Непараметрическая идентификация элементов системы терморегулирования*

В.А. БОЕВА^{1,a}, Ю.Е. ВОСКОБОЙНИКОВ^{1,2,b}, Р.Ш. МАНСУРОВ^{1,c}

¹ 630008, РФ, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

^a v.boyeva@sibstrin.ru ^b voscob@mail.ru ^c rmansurov@inbox.ru

Система терморегулирования «воздухонагреватель–вентилятор–помещение» представляет собой соединение трех различных подсистем с разными законами функционирования. Из-за сложности физических процессов, протекающих в них, в настоящей работе для математического описания функционирования этих систем принята модель «черного ящика», «внутренности» которого не детализируются. Для стационарных линейных систем в качестве соотношения, устанавливающего связь между входом и выходом «черного ящика», принимается интегральное уравнение Вольтерра первого рода с неизвестным разностным ядром, которое в теории автоматического регулирования называется импульсной переходной функцией системы (ИПФ). Поэтому при использовании модели «черного ящика» как для описания каждой подсистемы в отдельности, так и для всей системы в целом необходимо оценить ИПФ системы в целом и ИПФ каждой из трех подсистем. Это условие существенно усложняет процедуру непараметрической идентификации из-за того, что выходной сигнал одной подсистемы может являться входным сигналом другой подсистемы, и эта специфика исключает использование схем активной идентификации. Формально оценивание ИПФ можно рассматривать как решение интегрального уравнения первого рода относительно его ядра по зарегистрированным (с погрешностями) дискретным значениям входного и выходного сигналов. Такая задача является некорректно поставленной, поскольку решение (в нашем случае это оценка ИПФ) может обладать неустойчивостью относительно погрешностей регистрации (шумов измерения) входных и выходных сигналов идентифицируемой системы. Для получения единственного и устойчивого решения используют регуляризирующие алгоритмы, но указанная специфика эксперимента по идентификации ИПФ системы «воздухонагреватель–вентилятор–помещение» не позволяет использовать их вычислительные методы (СЛАУ, или дискретное преобразование Фурье). Поэтому в настоящей работе для решения задач идентификации ИПФ рассматриваемых системы и подсистем используются

* Статья получена 12 октября 2020 г.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90041. Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90041.

два алгоритма идентификации, которые в полной мере учитывают специфику решаемой задачи. В этих алгоритмах оценки ИПФ строятся с использованием первых производных от сигналов идентифицируемой системы, для устойчивого вычисления которых применяется сглаживающий кубический сплайн с оригинальным выбором параметра сглаживания. Приводимые в работе результаты идентификации реальной системы «воздухонагреватель–вентилятор–помещение» и результаты ее моделирования показывают эффективность предлагаемого подхода к непараметрической идентификации сложных теплофизических систем.

Ключевые слова: система терморегулирования, модель «черного ящика», задача непараметрической идентификации, некорректно поставленные задачи, интегральное уравнение Вольтера I рода, устойчивые алгоритмы идентификации, переходный процесс, климатическая система, относительная избыточная теплота

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Встречающиеся на практике системы терморегулирования, основной задачей которых является стабилизация параметров микроклимата на заданном объекте, можно рассматривать как соединение нескольких разнотипных, но более простых подсистем с различными физическими процессами, протекающими в них. В настоящей работе рассматриваемая система терморегулирования представляется последовательной структурой «воздухонагреватель–вентилятор–помещение». Очевидно, что нестабильность работы такой системы вызвана воздействием изменяющих тепловых возмущений. Реакция на возникающие возмущения – переходный процесс системы – будет определять качество параметров микроклимата и устойчивость системы в целом [1]. В связи с этим возникает необходимость экспериментального изучения переходных характеристик теплообмена климатических систем, наиболее информативной из которых является импульсная переходная функция (ИПФ) системы. Знание такой характеристики позволит:

- выполнить моделирование работы системы в различных режимах, включая «критические» режимы, которые опасны для реальной системы;
- вычислить оптимальные законы управления системой для перевода системы из одного состояния в другое.

Поэтому целью настоящей работы является идентификация ИПФ системы терморегулирования в целом и ее подсистем, и для этого решаются следующие задачи:

- разработка математической модели системы терморегулирования;
- исследования специфических особенностей входных и выходных сигналов идентифицируемых подсистем;
- устойчивая идентификация ИПФ при ступенчатом входном сигнале;
- устойчивая идентификация ИПФ при произвольном входном сигнале.

При решении двух последних задач используются результаты публикации [2].

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

Для успешного выполнения структурной идентификации системы терморегулирования (т. е. представления системы в виде отдельных подсистем) изложим основы физических процессов, происходящих в системе терморегулирования. Также рассмотрим особенности входных и выходных сигналов идентифицируемых подсистем.

На рис. 1 показана схема движения потока теплоты, выделяемой / поглощаемой влажным воздухом при прохождении через элементы исследуемой системы терморегулирования. Массовый расход воздуха при обработке экспериментальных данных определялся соотношением $G = \rho(T_3)uF$, где F – площадь сечения воздуховода, m^2 , в месте установки датчиков скорости u и температуры T_3 ; $\rho(T_3)$ – плотность сухого воздуха, kg/m^3 , определяемая по температуре T_3 . Количество теплоты (КТ), поглощаемое потоком от воздухонагревателя (ВН): $Q_h = c_a G \Delta T_h$, от вентилятора (ВЕНТ): $Q_f = c_a G \Delta T_f$, от установки: $Q_s = c_a G \Delta T_s$, где c_a – теплоемкость воздуха; $\Delta T_h = T_2 - T_1$, $\Delta T_f = T_3 - T_2$ и $\Delta T_s = T_3 - T_1$. Количество теплоты, ассимилируемое и аккумулируемое в воздушном объеме помещения (ПОМ) при прохождении потока через него, рассчитывалось по формуле: $Q_r = c_a G \Delta T_r$, где $\Delta T_r = T_4 - T_3$. Количество теплоты, удаляемое потоком из помещения во внешнюю среду: $Q_e = c_a G \Delta T_e$, где $\Delta T_e = T_4 - T_1$. В качестве параметра подобия, описывающего рассматриваемые переходные процессы, как и в работе [3], было предложено использовать относительную избыточную теплоту (ОИТ) Q_i^r , что позволило выявить качественные закономерности в развитии переходных процессов в потоке влажного воздуха при прохождении через элементы системы терморегулирования и ПОМ. Тогда для определения ОИТ

$$Q_i^r = \frac{Q_i(\tau) - Q(0)}{|Q_i(\tau_*) - Q_i(0)|}, \quad i = 1 \dots 4, \quad (1)$$

где Q_i^r при $i = 1$ – ОИТ Q_h^r , выделяемая / поглощаемая потоком при прохождении через ВН; при $i = 2$ – ОИТ Q_f^r , выделяемая / поглощаемая потоком при прохождении через ВЕНТ; при $i = 3$ – ОИТ Q_r^r , ассимилируемая потоком при прохождении через ПОМ; при $i = 4$ – ОИТ Q_s^r , выделяемая / поглощаемая потоком при прохождении через установку; $Q_i(\tau)$, $Q_i(0)$, $Q_i(\tau_*)$ – теплота, выделяемая элементом в текущий момент времени τ , в начальный момент времени $\tau = 0$ и в конечный момент времени $\tau_* = 500$ с.

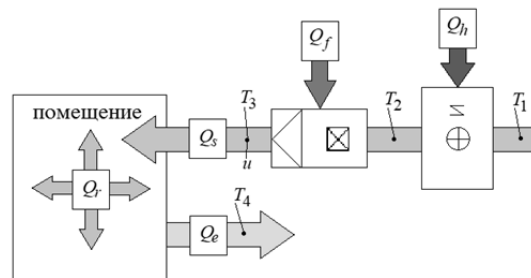


Рис. 1. Схема потоков теплоты в системе «воздухонагреватель–вентилятор–помещение»

Fig. 1. A scheme of heat fluxes in the “heater–fan–room” system

В результате обработки экспериментальных данных по зависимостям (1) были получены изменения значений переходных процессов ОИТ Q_h^r , Q_f^r , Q_r^r и Q_s^r от времени в потоке (рис. 2), проходящем через систему «воздухонагреватель–вентилятор–помещение» (режим работы вентилятора 0,4, режим работы воздухонагревателя 0,01 → 0,1).

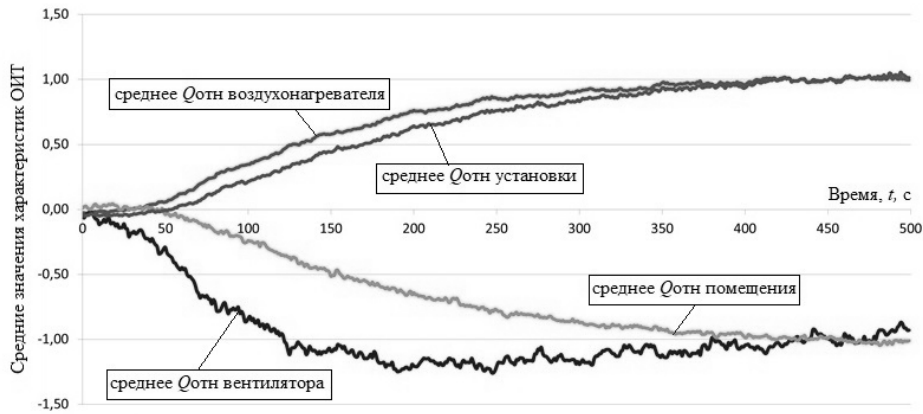


Рис. 2. Экспериментальные зависимости изменения значений ОИТ (1) от времени при разогреве потока

Fig. 2. Relative heat-time observational characteristics in the flux heating mode

На рис. 3 представлена структурная схема теплофизической системы «воздухонагреватель–вентилятор–помещение». Подсистема терморегулирования «воздухонагреватель–вентилятор», называемая выше установкой, является линейной стационарной (это было доказано в ходе проведения экспериментальных исследований) и может быть представлена как последовательное соединение двух более простых, также линейных стационарных подсистем – ВН и ВЕНТ. Процессы, протекающие в контролируемой подсистеме ПОМ, непредсказуемы и носят стохастический характер, поэтому подсистема ПОМ не участвует в общей схеме идентификации. Известная для ПОМ характеристика Q_r^r должна компенсировать влияние установки Q_s^r .

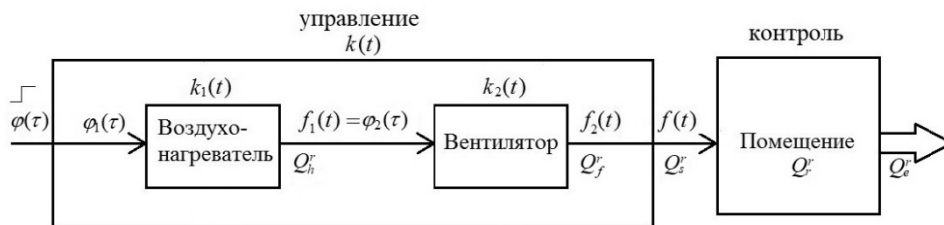


Рис. 3. Схема системы «воздухонагреватель–вентилятор–помещение»

Fig. 3. A scheme of the “heater–fan–room” system

Физические процессы, протекающие в подсистеме терморегулирования и ее подсистемах, сложны для адекватного математического описания. В этом случае можно использовать модель «черного ящика», характеризующегося входным и выходным сигналами, без детализации «внутренностей», а в качестве математической модели в терминах «вход–выход» взять интегральное уравнение Вольтерра первого рода с разностным ядром в виде [4, 5]

$$\int_0^t \varphi_j(t-\tau)k_j(\tau)d\tau = f_j(t), \quad t \in [0, T], \quad (2)$$

где j – номер подсистемы; $k_j(\tau)$ – ИПФ подсистемы (ядро интегрального уравнения); $\varphi_j(\tau)$ – входной сигнал подсистемы; $f_j(t)$ – выходной сигнал подсистемы. На рис. 3 $f_j(t)$ – входной сигнал установки, также являющийся входным сигналом ВН $\varphi_1(\tau)$, представляющий собой скачок производительности на 0.1; $f_1(t) = Q_h^r$ – выходной сигнал ВН, также являющийся входным сигналом ВЕНТ $\varphi_2(\tau)$, работающего в режиме 0.4; $f_2(t) = Q_f^r$ – выходной сигнал ВЕНТ; $f(t) = Q_s^r$ – выходной сигнал установки, поступающий на вход подсистемы ПОМ. Сигналы $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$ – известные, экспериментально полученные при работе с лабораторной установкой [1] «зашумленные» данные, содержащие погрешности измерений. Сигналы системы строились по $N = 500$ отсчетам эквидистантно с шагом $\Delta t = 1$ с. По результатам экспериментальных исследований было установлено, что время разгона для элементов рассматриваемой установки составляло более 20 с. Такое запаздывание на входное воздействие характерно для инерционных динамических звеньев, то есть реакция такого звена на воздействие происходит не сразу, а через некоторый промежуток времени [6]. Учитывая это обстоятельство, на выходных сигналах регистрировались задержки: на 29 с для $f_1(t)$, на 33 с для $f_2(t)$, на 55 с для $f_3(t)$, которые при моделировании отсекались для нахождения ИПФ линейной части и компенсировались введением в систему звена задержки.

Для моделирования и управления системами с математическими моделями вида (3) необходимо решить задачу непараметрической идентификации – оценить ИПФ как установки $k(\tau)$, так и каждой подсистемы: $k_1(\tau)$ для ВН, $k_2(\tau)$ для ВЕНТ – при скачкообразном изменении производительности на ВН, по измеренным значениям соответствующих входных и выходных параметров потока влажного воздуха. Для построения устойчивого решения поставленной задачи предлагается использовать разработанный в цикле работ [2, 7] алгоритм непараметрической идентификации технических систем, в котором вычисление оценок ИПФ выполняется на основе сглаживающих кубических сплайнов (СКС).

2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ФУНКЦИЙ СИСТЕМЫ

Непараметрическую идентификацию системы терморегулирования и ее составляющих представим в виде следующих этапов.

Этап 1. Вычисление оценки импульсной переходной функции воздушонагревателя. Поскольку на вход ВН в момент времени $t = 0$ подается ступенчатый сигнал $\varphi_1(\tau)$, амплитуда которого постоянна и равна 0.1, то оценить искомую ИПФ $k_1(\tau)$ можно, дифференцируя выходной сигнал $f_1(t)$ при подаче на вход ВН функции Хэвисайда с учетом ее амплитуды 0.1 (коэффициент $K = 0.1$):

$$k_1(t) = \frac{1}{K} \frac{d}{dt} f_1(t), \quad t \in [0, T]. \quad (3)$$

Напомним, что, несмотря на хорошо разработанные алгоритмы численного дифференцирования, на практике снова возникает проблема неустойчивости решения, так как операция дифференцирования является некорректно поставленной задачей [8] и даже небольшой уровень шума регистрации выходного сигнала вызывает очень большие ошибки оценки ИПФ. Для получения устойчивой оценки ИПФ зарегистрированный (с ошибками измерения) сигнал $f_1(t)$ необходимо первоначально сгладить (отфильтровать), а затем применить операцию дифференцирования. Для этих целей будем использовать аппарат СКС с естественными краевыми условиями в силу относительной простоты их построения и наличия соответствующего программного обеспечения в ряде математических пакетов [9, 10].

В отличие от интерполяционного сплайна (ИС), СКС не проходит через заданные точки сигнала, поэтому его используют для фильтрации зашумленных значений. Гладкость СКС, а следовательно, и ошибка фильтрации шума измерения зависят от выбора параметра сглаживания α . Выбор параметра сглаживания α проводился на основе критерия оптимальности [11]. Этот критерий позволяет вычислить оценку α_W для оптимального параметра сглаживания α_{opt} , минимизирующую СКО сглаживания [12], и в дальнейшем предполагается, что СКС строится при $\alpha = \alpha_W$. Вычисление коэффициентов СКС a_i, b_i, c_i, d_i при заданном α подробно изложено в [9].

На рис. 4 представлены оценки ИПФ ВН $\hat{k}_1(t)$, вычисленные по ИС (точечная ломаная) и по СКС (сплошная кривая). На рис. 4 показана эффективность применения СКС с соответствующим выбором параметра сглаживания для устойчивого дифференцирования зашумленных сигналов, поскольку, как можно заметить, дифференцирование по ИС дает неудовлетворительные результаты.

Причинами, по которым ИПФ на рис. 4 (как и на рис. 5 и 6) начинается не с нуля, являются условия проведения этапа натурных исследований рассматриваемой экспериментальной серии. Режим поддержания заданной производительности ВН осуществлялся симисторным регулятором мощности ТТС-25, синусоидальным сигналом с периодом ≈ 60 с (заводская уставка). Экспериментальные исследования проводились сериями из восемнадцати непрерывно следующих друг за другом единичных экспериментов продол-

жительностью 500 с, которые включали последовательное увеличение (нечетные эксперименты) и уменьшение (четные эксперименты) теплопроизводительности ВН исследуемой системы. Затем полученные экспериментальные данные усреднялись по девяти нечетным (нагрев) и девяти четным (охлаждение) экспериментам.

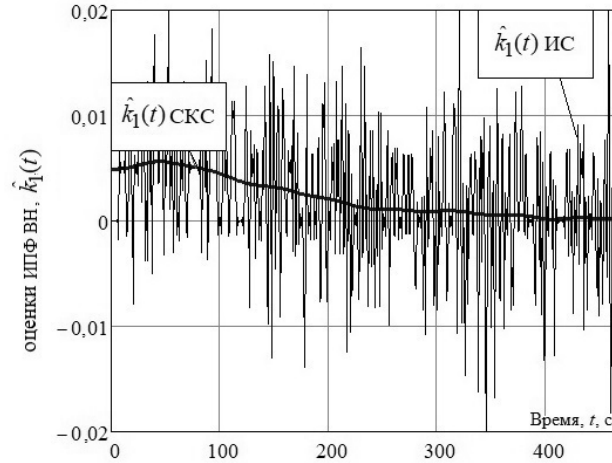


Рис. 4. Оценки ИПФ ВН $\hat{k}_1(t)$

Fig. 4. Impulse response evaluations in the “Heater” object

Найденная оценка $\hat{k}_1(t)$ объекта дает возможность решить прямую задачу – спрогнозировать реакцию потока влажного воздуха $f_1(t)$, проходящего через ВН, на возмущение $\varphi_1(\tau)$ по вычисленной оценке ИПФ $\hat{k}_1(t)$. Для вычисления прогнозных значений $\hat{f}_1(t_j)$, $j=1 \dots N$, $N=500$, выходного сигнала $f_1(t)$ ВН используем уравнение

$$\hat{f}_1(t_j) = \int_0^{t_j} \hat{k}_1(t_j - \tau) \varphi_1(\tau) d\tau. \quad (4)$$

Величина отличия между прогнозными значениями и зарегистрированными значениями $\tilde{f}_1(t_j) = f_1(t_j) + \eta_1(t_j)$, где $\eta_1(t_j)$ – шум измерения, вычислялась по формуле

$$\delta f_1 = \frac{\sum_j |\tilde{f}_1(t_j) - \hat{f}_1(t_j)|}{\sum_j |\hat{f}_1(t_j)|} 100 \%. \quad (5)$$

Величина δf_1 , вычисленная по формуле (5), составила 1,9 %, что говорит о хорошем согласовании вычисленной оценки ИПФ с экспериментальными данными.

Этап 2. Вычисление оценки импульсной переходной функции вентиллятора. При нахождении оценки ИПФ $k_2(\tau)$ входной сигнал уже будет представлен не скачком, а некоторой функцией. Дифференцируя уравнение (2) по переменной t и выполняя несложные преобразования, приходим к интегральному уравнению Вольтерра второго рода:

$$k_2(t) + \frac{1}{\varphi_2(0)} \int_0^t \varphi_2'(t-\tau) k_2(\tau) d\tau = \frac{f_2'(t)}{\varphi_2(0)}, \quad t \in [0, T], \quad (6)$$

решение которого уже является корректно поставленной задачей. Однако и в этом случае также необходимо решить проблемы, во-первых, устойчивого дифференцирования зашумленных входного и выходного сигналов идентифицируемой системы и, во-вторых, вычисления интеграла свертки с наименьшими ошибками интегрирования для уменьшения общей систематической ошибки алгоритма идентификации. Преодолеть эти трудности возможно с применением аппарата СКС, описанного выше.

Для построения оценки ИПФ в этом случае сначала необходимо по значениям соответствующих входного и выходного сигналов объекта построить СКС и вычислить их первые производные [2, 7]. Затем формируется матрица Φ размером $(N-1) \times (N-1)$, элементы которой определяются согласно правилам, изложенным в [7]:

$$\Phi_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{при } i < j, \\ \int_{t_{i-j+1}}^{t_{i-j+2}} S'_{\varphi,\alpha}(\tau) d\tau & \text{при } i \geq j, \end{cases} \quad (7)$$

где $i=1 \dots N$, $j=1 \dots N-1$, $S'_{\varphi,\alpha}(\tau)$ – производная по СКС входного сигнала объекта при заданном параметре сглаживания α_W . Точное и эффективное вычисление значений интеграла свертки в (6) достигается благодаря квадратурной формуле, включающей коэффициенты СКС [7], что уменьшает методическую ошибку алгоритма. Сформированная матрица Φ позволяет аппроксимировать уравнение Вольтерра II рода (6) системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида [7]:

$$\left(\mathbf{I} + \frac{1}{S_{\varphi,\alpha}(t_1)} \Phi \right) \hat{\mathbf{k}} = \frac{1}{S_{\varphi,\alpha}(t_1)} \hat{\mathbf{f}}', \quad (8)$$

где $\mathbf{I}$ – единичная матрица, а вектор $\hat{\mathbf{f}}'$ составлен из значений первой производной по СКС выходного сигнала подсистемы в узлах сетки. Решением системы (8) будет вектор $\hat{\mathbf{k}}$, проекции которого являются оценками для значений $k_2(t_i)$ ИПФ идентифицируемой подсистемы.

На рис. 5 представлены оценки ИПФ ВЕНТ $\hat{k}_2(t)$, вычисленные описанным способом по ИС (тонкая ломаная) и по СКС (жирная кривая). Решение прямой задачи для ВЕНТ заключалось в прогнозировании реакций теплового потока $f_2(t)$ на возмущение $\varphi_2(\tau)$ по вычисленной оценке ИПФ $\hat{k}_2(t)$. Погрешность решения прямой задачи δf_2 (см. формулу (5)) с оценкой $\hat{k}_2(t)$ составила 5 %.

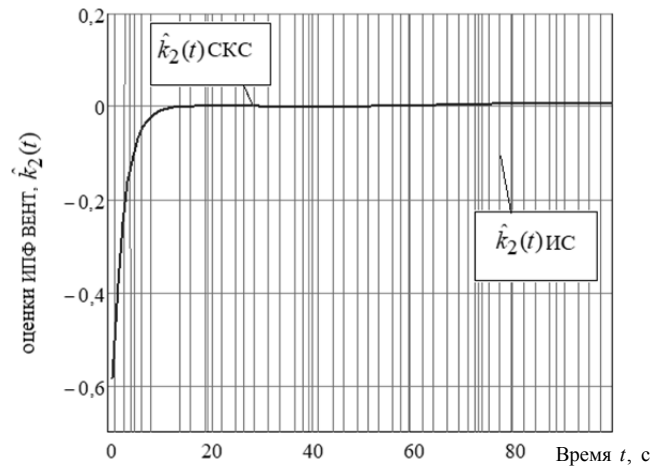

Рис. 5. Оценки ИПФ ВЕНТ $\hat{k}_2(t)$

Fig. 5. Impulse response evaluations in the “Fan” object

Этап 3. Вычисление оценки импульсной переходной функции подсистемы управления. На вход установки в момент времени $t=0$ подается ступенчатый сигнал $\varphi(\tau)$ (тот же самый, что подавался на изменение теплопроизводительности ВН), амплитуда которого постоянна и равна 0.1. Оценить точность ИПФ установки $k(t)$ можно по тому же самому алгоритму, по которому вычислялась ИПФ $k_1(t)$ на этапе 1. На рис. 6 представлены оценки ИПФ установки $k(t)$, вычисленные по ИС (точечная ломаная) и по СКС (сплошная кривая). Решение прямой задачи относительно установки заключалось в прогнозировании реакции теплового потока подсистемы $f(t)$ на возмущение $\varphi(\tau)$ по вычисленной оценке ИПФ $\hat{k}(t)$. Погрешность решения прямой задачи δf (см. формулу (5)) с оценкой $\hat{k}(t)$ составила 1.6 %.

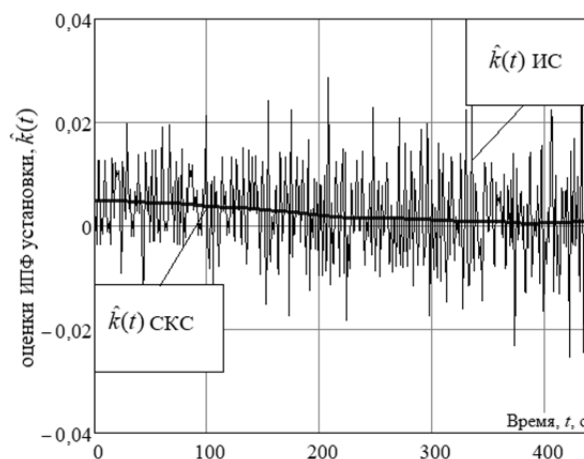

Рис. 6. Оценки ИПФ установки $\hat{k}(t)$

Fig. 6. Impulse response evaluations in the control subsystem

В результате обработки результатов решения прямых задач (уравнение (4)) с соответствующими оценками ИПФ были получены эволюции (рис. 7) значений переходных процессов ОИТ Q_h^r , Q_f^r , Q_r^r и Q_s^r от времени в потоке, проходящем через систему «воздухонагреватель–вентилятор–помещение» (режим работы вентилятора 0,4, режим работы воздухонагревателя $0,01 \rightarrow 0,1$).

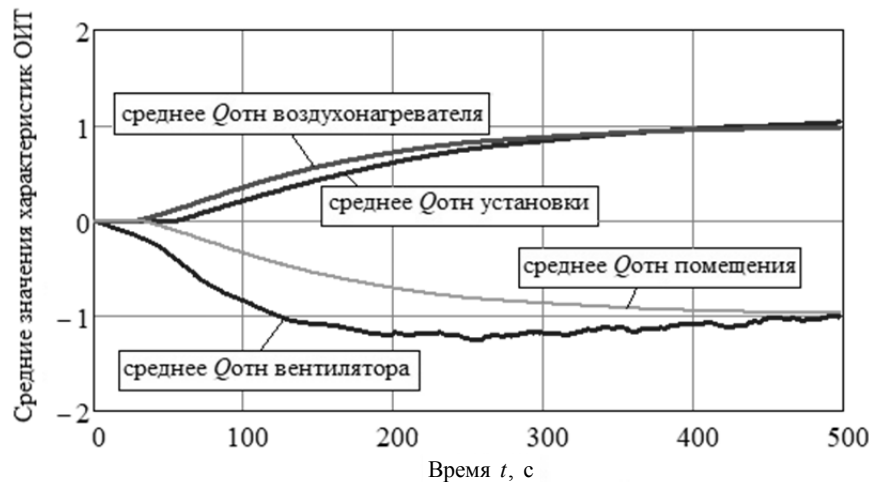


Рис. 7. Теоретические зависимости изменения значений ОИТ от времени при разогреве потока

Fig. 7. Relative heat-time observational characteristics in the flux heating mode

Сравнивая экспериментальные зависимости (см. рис. 2) с расчетными зависимостями (рис. 7), видим их хорошее совпадение, что позволяет сделать вывод об эффективности представленных алгоритмов идентификации при решении задач непараметрической идентификации теплофизических систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Непараметрическая идентификация сложных динамических систем является весьма непростой и трудоемкой для практики задач. С одной стороны, это обусловлено некорректностью задачи решения интегрального уравнения первого рода, с другой стороны, разными типами входных и выходных сигналов идентифицируемых систем. Предлагаемый в работе способ решения позволяет в полной мере учитывать специфику поставленной задачи и осуществлять устойчивую непараметрическую идентификацию как всей системы в целом, так и отдельных ее подсистем.

Заметим, что при наличии аномальных измерений входного и выходного сигналов для устойчивой непараметрической идентификации можно использовать робастный алгоритм, предложенный в работе [7].

Успешное решение практической инженерной задачи непараметрической идентификации сложной теплофизической системы «воздухонагреватель–вентилятор–помещение» с использованием зашумленных исходных

экспериментальных данных доказывает эффективность применения предлагаемого подхода для непараметрической идентификации других сложных динамических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мансуров Р.Ш., Рудяк В.Я. Переходные процессы в системе нагреватель–вентилятор при изменении режима работы вентилятора // Известия вузов. Строительство. – 2019. – № 3. – С. 50–63. – DOI: 10.32683/0536-1052-2019-723-3-50-63.
2. Воскобойников Ю.Е., Боева В.А. Алгоритмы непараметрической идентификации сложных технических систем // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 4 (80). – С. 47–64. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-47-64.
3. Мансуров Р.Ш., Кувишинов Ю.Я. Интеллектуализация управления системами формирования микроклимата помещений // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2012. – № 2. – С. 85–93.
4. Сидоров Д.Н. Методы анализа интегральных динамических моделей: теория и приложения. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. – 293 с.
5. Greblicki W., Pawiak M. Nonparametric system identification. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – 400 p.
6. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем: учебное пособие для вузов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 640 с.
7. Воскобойников Ю.Е., Боева В.А. Устойчивый алгоритм непараметрической идентификации при наличии аномальных измерений // Вычислительные технологии. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 46–53. – DOI: 10.25743/ICT.2020.25.3.006.
8. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 285 с.
9. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. – М.: Наука, 1980. – 345 с.
10. Wang Y. Smoothing spline: methods and applications. – Chapman and Hall book, 2011. – 370 p. – (Monographs on Statistics and Applied Probability; vol. 121).
11. Lee T.C.M. Smoothing parameter selection for smoothing splines: a simulation study // Computational Statistics and Data Analysis. – 2006. – Vol. 42 (1–2). – P. 139–148. – DOI: 10.1016/S0167-9473(06)00159-7.
12. Балк П.И., Долгаль А.С. Сплайн-сглаживание экспериментальных данных при нулевом медианном значении помех // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 6. – С. 138–156. – DOI: 10.1134/S000511791706008X.

Боева Василиса Андреевна, выпускница кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета (НЭТИ), аспирант Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) по профилю «Системный анализ, управление и обработка информации», ассистент кафедры прикладной математики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета. Основное направление научных исследований – методы и алгоритмы непараметрической идентификации реальных технических систем. Является автором более 20 научных статей. E-mail: v.bojeva@sibstrin.ru.

Воскобойников Юрий Евгеньевич, выпускник кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета (НЭТИ), доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой прикладной математики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), профессор кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Заслуженный работник Высшей школы РФ. Основное направление научных исследований – методы и алгорит-

мы решения некорректных задач интерпретации экспериментальных данных; методы и алгоритмы фильтрации сигналов и изображений. Является автором более 320 научных работ, в том числе шести научных монографий по решению некорректно поставленных задач. E-mail: voscob@mail.ru.

Мансуров Рустам Шамильевич, выпускник кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), кандидат технических наук, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), почетный работник высшего профессионального образования РФ, советник РААСН. Основное направление научных исследований – разработка научно-технических основ интеллектуального управления оптимизацией энергопотребления системами обеспечения микроклимата. Является автором более 80 научных работ. E-mail: rmansurov@inbox.ru.

Boeva Vasilisa A., postgraduate student specializing in system analysis, control and data interpretation and teaching assistant, Department of Applied Mathematics, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin). Her research interests are currently focused on non-parametric identification methods and algorithms for real engineering systems. She has 18 scientific articles. E-mail: v.bojeva@sibstrin.ru.

Voskoboinikov Yuri E., graduate of the Department of Automation of NSTU (NETI), Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Department of Applied Mathematics of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Professor at the Department of Automation of the Novosibirsk State Technical University, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation. The main field of his scientific research is methods and algorithms for solving ill-posed problems of interpreting experimental data; methods and algorithms for filtering signals and images. He is the author of over 280 scientific papers, including 5 scientific monographs on solving ill-posed problems. E-mail: voscob@mail.ru.

Mansurov Rustam S., graduate of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation of Novosibirsk State University of Architecture (Sibstrin), PhD (Eng.), Head of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin). Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation. He is an advisor to the RAASN. The main field of his scientific research is the development of scientific and technical foundations for intelligent control of energy consumption optimization by microclimate systems. He is the author of over 80 scientific papers. E-mail: rmansurov@inbox.ru.

DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-7-20

Non-parametric identification of thermal control system elements*

V. BOEVA^{1,a}, YU. VOSKOBONIKOV^{1,2,b}, R. MANSUROV^{1,c}

¹ Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), 113 Lenin-gradskaja Street, Novosibirsk, 630008, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a v.bojeva@sibstrin.ru ^b voscob@mail.ru ^c rmansurov@inbox.ru

Abstract

The thermal control system “Heater-Fan-Room” is represented by three different-type interconnected simpler subsystems. In this paper, a “black-box” whose structure is not specified is used as a mathematical model of the system and subsystems due to complexity of physical

* Received 12 October 2020.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90041.

processes proceeding in these subsystems. For stationary linear systems, the connection between an input and an output of the “black-box” is defined by the Volterra integral equation of the first kind with an undetermined difference kernel also known as impulse response in the automatic control theory. In such a case, it is necessary to evaluate an unknown impulse response to use the “black-box” model and formulate all subsystems and the system as a whole. This condition complicates significantly the solution search of non-parametric identification problems in the system because an output of one subsystem is an input of another subsystem, so active identification schemes are unappropriated. Formally, an impulse response evaluation is a solution of the integral equation of the first kind for its kernel by registered noise-contaminated discrete input and output values. This problem is ill-posed because of the possible solution instability (impulse response evaluation in this case) relative to measurement noises in initial data. To find a unique stable solution regularizing algorithms are used, but the specificity of the impulse response identification experiment in the “Heater-Fan-Room” system do not allow applying computational methods of these algorithms (a system of linear equations or discrete Fourier transformation). In this paper, the authors propose two specific identification algorithms for complex technical systems. In these algorithms, impulse responses are evaluated using first derivatives of identified system signals that are stably calculated by smoothing cubic splines with an original smoothing parameter algorithm. The results of the complex “Heater-Fan-Room” system modeling and identification prove the efficiency of the algorithms proposed.

Keywords: thermal control system, “black box” model, nonparametric identification problem, ill-posed problems, Voltaire integral equation of the first kind, stable identification algorithms, transient process, climatic system, relative excess heat

REFERENCES

1. Mansurov R.Sh., Rudyak V.Ya. Perekhodnye protsessy v sisteme nagrevatel'-ventilyator pri izmenenii rezhima raboty ventilyatora [Transients processes in the system the heater-fan when changing the operating mode of the fan]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo* = *News of higher educational institutions. Construction*, 2019, no. 3, pp. 50–63. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-723-3-50-63. (In Russian).
2. Voskoboinikov Yu.E., Boeva V.A. Algoritmy neparametricheskoi identifikatsii slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Non-parametric identification algorithms for complex technical systems]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 4 (80), pp. 47–64. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-47-64.
3. Mansurov R.Sh., Kuvshinov Yu.Ja. *Intellektualizatsiya upravleniya sistemami formirovaniya mikroklimata pomeshchenij* [The intellectual system development of room microclimate formation]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* = *News of the Kabardin-Balkar scientific center of RAS*, 2012, no. 2, pp. 85–93.
4. Sidorov D.N. *Metody analiza integral'nykh dinamicheskikh modelei: teoriya i prilozheniya* [Analysis methods of integral dynamic models: theory and application]. Irkutsk, ISU Publ., 2013. 293 p.
5. Greblicki W., Pawlak M. *Nonparametric system identification*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 400 p.
6. Nikulin E.A. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Chastotnye metody analiza i sinteza sistem* [Bases of automation control theory. Frequency methods of system analysis and synthesis]. St. Petersburg, BVH-Peterburg Publ., 2004. 640 p.
7. Voskoboinikov Yu.E., Boeva V.A. Ustoichivyi algoritm neparametricheskoi identifikatsii pri nalichii anomal'nykh izmerenii [Stable algorithm of nonparametric identification in case of anomalous measurements]. *Vychislitel'nye tekhnologii* = *Computational Technologies*, 2020, vol. 25, no. 3, pp. 46–53. DOI: 10.25743/ICT.2020.25.3.006.
8. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods of ill-posed problems solution]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 285 p.
9. Zav'yalov Yu.S., Kvasov B.I., Miroshnichenko V.L. *Metody splain-funktsii* [Methods of splines]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 345 p.

10. Wang Y. *Smoothing splines: methods and applications*. Chapman and Hall book, 2011. 370 p.
11. Lee T.C.M. Smoothing parameter selection for smoothing splines : a simulation study / *Computational Statistics and Data Analysis*, 2006, no. 42 (1–2), pp. 139–148. DOI: 10.1016/S0167-9473(06)00159-7.
12. Balk P.I., Dolgal' A.S. Spline smoothing for experimental data under zero median of the noise. *Automation and Remote Control*, 2017, vol. 78, no. 6, pp. 1072–1086. DOI: 10.1134/S000511791706008X. Translated from *Avtomatika i telemekhanika*, 2017, no. 6, pp. 138–156.

Для цитирования:

Боева В.А., Воскобойников Ю.Е., Мансуров Р.Ш. Непараметрическая идентификация элементов системы терморегулирования // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 1 (81). – С. 7–20. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-7-20.

For citation:

Boeva V.A., Voskoboynikov Yu.E., Mansurov R.Sh. Neparametricheskaya identifikatsiya elementov sistemy termoregulirovaniya [Non-parametric identification of thermal control system elements]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and data processing systems*, 2021, no. 1 (81), pp. 7–20. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-7-20.