11. Ponomarev B.B., Nguyen Sy Hien. Finish milling dynamics simulation considering changing tool angles. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2017, 327/022083.
12. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain rates, Temperatures and Pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, Vol. 21, No. 1, pp. 31–48.
13. Elektronnyi resurs: http://abaqus.software.polimi.it/v2016/
14. Duan C.Z., Dou T., Cai Y.J., Li Y.Y. Finite element simulation & experiment of chip formation process during high speed machining of AISI 1045 hardened steel. *Int. J. Recent Trend Eng*., 2009, 1(5), 46–50.
15. Khod'ko A.A. Osobennosti vybora modeli plastichnosti metalla deformiruemoi zagotovki pri chislennom is-sledovanii protsessa gidrodinamicheskoi shtampovki [Features of the choice of the model of plasticity of the metal of a deformable workpiece in the numerical study of the process of hydrodynamic stamping]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [*Aerospace Engineering and Technology*], 2014, No. 5, pp. 11–24.
16. Kuz'kin V.A., Mikhalyuk D.S. Primenenie chislennogo modelirovaniya dlya identifikatsii parametrov modeli Dzhonsona-Kuka pri vysokoskorostnom deformirovanii alyuminiya [The use of numerical modeling to identify the parameters of the Johnson-Cook model for high-speed deformation of aluminum]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [*Computational continuum mechanics*], 2010, Vol. 3, No. 1, pp. 32–43.
17. Reznikov N.I. Uchenie o rezanii metallov [The doctrine of metal cutting]. Moscow: Mashgiz Publ., 1947, 588 p.
18. Vul'f A.M. Rezanie metallov [Metal cutting]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1973, 496 p.
19. Altintas Y., Lee P. Mechanics and Dynamics of Ball End Milling. *ASME J. Manufact. Science and Eng*., 1998, Vol. 120, pp. 684–691.

Информация об авторах

Пономарев Борис Борисович – д. т. н., профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: pusw@istu.edu

Нгуен Ши Хьен – аспирант кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: syhiendk35@gmail.com

Authors

Ponomaryov Boris Borisovich – Doctor of Engineering Science, Professor of the Subdepartment of Technology and Equipment of Machinery Production, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: pusw@istu.edu

Nguyen Sy Hien – Ph.D. student of the Subdepartment of Technology and Equipment of Machinery Production, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: syhiendk35@gmail.com

Для цитирования

Пономарев Б. Б. Моделирование и анализ влияния условий обработки на силы резания при концевом фрезеровании / Б. Б. Пономарев, Ш. Х. Нгуен // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2018. - Т. 59, № 3. - С. 8–16. - DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).8-16.

For citation

Ponomaryov B. B., Nguyen S. H. Modeling and analysis of influence of process conditions on cutting forces during end milling. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2018, Vol. 59, No. 3, pp. 8–16. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).8-16.

УДК *62-506.1* ***DOI:*** *10.26731/1813-9108.2018.3(59).16-23*

М. Е. Корнет [1]***, А. В. Шишкина*** [2]

[1] *Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Российская Федерация*
[2] *Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий, г. Красноярск, Российская Федерация*
Дата поступления: *3 августа 2018*

О НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ БЕЗЫНЕРЦИОННЫХ СИСТЕМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Аннотация. *Исследуется задача непараметрической идентификации линейных динамических объектов. В отличие от параметрической идентификации, рассматривается ситуация, когда порядок уравнения, описывающий динамический объект, не задан с точностью до параметров. Более того, задача идентификации рассматривается в условиях нормального функционирования объекта, в отличие от ранее известного подхода к непараметрической идентификации, основанного на подаче на вход объекта функции Хевисайда и дальнейшем применении интеграла Дюамеля. В условиях нормального функционирования на вход объекта подают сигнал произвольного вида. При этом на выходе объекта наблюдается соответствующий отклик. Следует заметить, что измерения входной и выходной переменных осуществляются со случайными помехами. В итоге имеем реализацию (выборку) входных-выходных переменных. Поскольку линейная динамическая система описывается интегралом Дюамеля, то при известных входных и выходных переменных объекта могут быть найдены соответствующие значения весовой функции. Подобная реализация в дальнейшем использует непараметрическую оценку весовой функции в виде непараметрической оценки Надарая – Ватсона. Подставляя ее в интеграл Дюамеля, получаем непараметрическую модель линейной динамической системы неизвестного порядка.*

В статье приведен также любопытный случай построения непараметрической модели при подаче на вход дельтаобразной функции. Было важно выяснить, насколько дельтаобразная функция может отличаться от дельта-функции. Оценка

 © М. Е. Корнет, А. В. Шишкина, 2018

весовой функции и в этом случае определялась в классе непараметрических оценок Надарая – Ватсона. Предложенные непараметрические модели достаточно подробно были исследованы средствами статистического моделирования. В основном непараметрические модели показали достаточно высокую эффективность, с точки зрения точности прогноза непараметрической модели по отношению к реально измеренному выходу объекта. Естественно, точность непараметрических моделей несколько уменьшается из-за роста влияния помех измерения входных-выходных переменных или дискретности их измерения.

Ключевые слова: *интеграл Дюамеля, переходная функция, весовая функция, дельтаобразное входное воздействие, оценка Надарая – Ватсона, непараметрическая модель.*

M. E. Kornet [1], ***A. V. Shishkina*** [2]

[1] *Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, the Russian Federation*
[2] *Siberian Federal University, Institute of Space and Information Technologies, Krasnoyarsk, the Russian Federation*
***Received**: August 3, 2018*

ABOUT NON-PARAMETRIC IDENTIFICATION OF INFINITELY FAST SYSTEMS WITH DELAY

Abstract. *The article investigates a problem of nonparametric identification of linear dynamic objects. Unlike parametric identification, the authors consider the situation when the order of the equation describing the dynamic object is not determined by the parameters. Moreover, the identification problem is considered under normal conditions of operation of the object, in contrast to the previously known approach to nonparametric identification, based on the representation of the Heaviside function at the input of the object and the further application of the Duhamel integral. In normal operation, an arbitrary signal is input to the object input. In this case, the corresponding response is observed at the output of the object. It should be noted that measurements of input and output variables are performed with random interference. As a result, we have an implementation (sample) of input and output variables. Since a linear dynamical system is described by the Duhamel integral, the corresponding values of the weight function can be found with known input and output variables of the object. This is achieved by discrete recording of the latter. Having such an implementation, we use a nonparametric estimation of the weight function in the form of a nonparametric Nadaraya-Watson estimate. Substituting this into the Duhamel integral, we thus obtain a nonparametric model of a linear dynamical system of unknown order.*

The paper also presents an interesting case of constructing a nonparametric model, when delta-shaped functions are introduced into the input. It was important to find out how the delta-shaped function can differ from the delta function. The estimation of the weight function, and in this case, was determined in the class of nonparametric Nadaraya-Watson estimates. The proposed nonparametric models were investigated in sufficient detail using statistical modeling. In general, nonparametric models have shown quite high efficiency in terms of the accuracy of the forecast of the nonparametric model with respect to the actually measured output of the object. Naturally, the accuracy of nonparametric models is somewhat reduced due to the growing influence of interference from measuring input / output variables or the discreteness of their measurement.

Keywords: *Duhamel integral, transition function, weight function, delta input, Nadaraya-Watson estimate, nonparametric model.*

Введение

Центральной задачей теории идентификации является построение модели по результатам наблюдений над входными и выходными переменными процесса в условиях неполной информации об объекте [1–3]. В настоящей статье речь пойдет о задаче идентификации динамических объектов в условиях непараметрической неопределенности [4, 5], особенностью которой являются способы получения оценки весовой функции. В основе данной работы лежит использование интеграла Дюамеля, что эквивалентно соблюдению принципа суперпозиции [6, 7]. Приведены алгоритмы идентификации в условиях нормального функционирования объекта. Рассмотрены три способа получения оценки весовой функции: с использованием функции Хевисайда [8, 9], дельтаобразного входного воздействия и при произвольном входном воздействии.

Постановка задачи

Пусть объект представляет собой динамическую систему и описывается уравнением

$$x_t = f(x_{t-1}, x_{t-2}, u_t),$$

где $f(\cdot)$ – неизвестный функционал; u_t – управляющее воздействие; x_t – выходная переменная процесса.

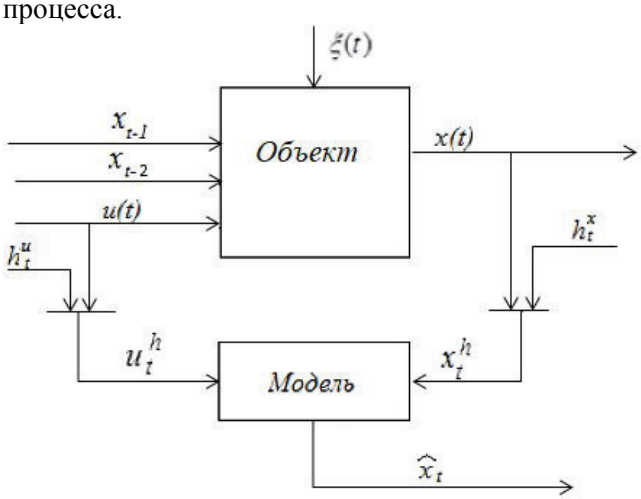

Рис. 1. Блок-схема системы идентификации

Блок-схема рассматриваемого динамического процесса представлена на рис. 1 [1, 17], где приняты следующие обозначения: $\hat{x}_t$ – выход модели объекта; u_t – управляющее воздействие;

(t) – непрерывное время; t – дискретное время; ξ_t, h_t – случайные помехи, действующие на объект и в канале измерения выходной переменной объекта с нулевым математическим ожиданием и ограниченной дисперсией.

Контроль переменных осуществляется через интервал времени Δt. Таким образом, можно получить исходную выборку входных-выходных переменных $\{x_i, u_i, i = \overline{1,s}\}$, где s – объем выборки.

Алгоритмы идентификации дискретно-непрерывных процессов

Пусть объект описывается линейным дифференциальным уравнением неизвестного порядка. В этом случае при нулевых начальных условиях $x(t)$ находится как

$$x(t) = \int_0^t h(t-\tau)u(\tau)d\tau, \qquad (1)$$

где $h(t-\tau)$ – весовая функция, является производной переходной функции $h(t) = k'(t)$.

Данная задача сводится к построению оценки весовой функции, поэтому первое, что необходимо сделать, – снять переходную функцию.

Как было сказано ранее, весовую функцию можно получить разными способами.

Первый случай. Пусть объект описывается линейным дифференциальным уравнением неизвестного порядка. При нулевых начальных условиях $x(t)$ находится по формуле (1).

Переходная функция есть реакция объекта на входное воздействие, в данном случае в виде функции Хевисайда $u(t) = 1(t)$.

$$1(t) = \begin{cases} 0, u(t) < 0, \\ 1, u(t) \ge 0. \end{cases} \qquad (2)$$

После того как получили переходную функцию, необходимо найти ее непараметрическую оценку [10, 11]:

$$\bar{k}(t) = \frac{T}{sc_s}\sum_{i=0}^{s} k_i H\left(\frac{t-t_i}{c_s}\right), \qquad (3)$$

где k_i – переходная функция; t_i – дискретность времени измерения; s – объем выборки; c_s – параметр размытости; H – колоколообразная функция; T – период наблюдения [2].

Отметим, что колоколообразная функция удовлетворяет ряду условий [10, 11]:

$$\frac{1}{c_s}\int_{-\infty}^{\infty} H\left(\frac{t-t_i}{c_s}\right)dt = 1,$$

$$H\left(\frac{t-t_i}{c_s}\right) \ge 0, \qquad (4)$$

$$\lim_{s\to 0}\frac{1}{c_s}\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t)H\left(\frac{t-t_i}{c_s}\right)dt = \phi(t_i),$$

где $\phi(t_i)$ – некоторая произвольная функция.

В частности, колоколообразную функцию возьмем в виде функции Соболева (5) и ее производную $H'\left(\frac{t-t_i}{c_s}\right)$:

$$H = \begin{cases} 0, |t-t_i| > c_s \\ \frac{0.827}{c_s} e^{\left(\frac{-(t-t_i)^2}{(t-t_i)^2 - c_s^2}\right)}, |t-t_i| \le c_s. \end{cases} \qquad (5)$$

Поскольку весовая функция $h(t)$ является производной переходной $k(t)$, то

$$\bar{h}(t) = \frac{T}{sc_s}\sum_{i=0}^{s} \bar{k}_i H'\left(\frac{t-t_i}{c_s}\right), \qquad (6)$$

где k_i – переходная функция; t_i – дискретность времени измерения; s – объем выборки; c_s – параметр размытости; H – колоколообразная функция; T – период наблюдения.

Второй случай. Весовую функцию можно получить, подавая на вход дельтаобразную функцию (рис. 2), представляющую собой ступеньку вида (7), Δt – интервал дискретизации:

$$\delta^{\Delta}(t) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta t}, t \in \Delta t, \end{cases} \qquad (7)$$

где Δt, например, равна $\Delta t = t' - 0$, либо $\Delta t = t' - t''$.

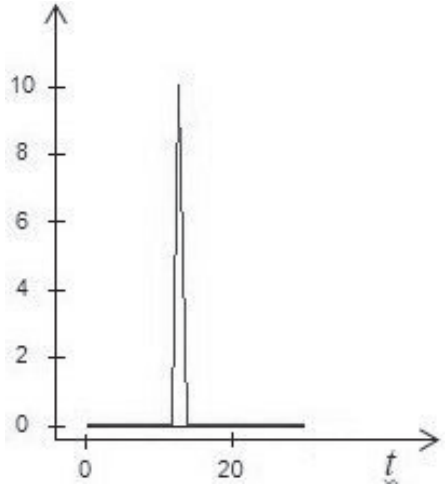

Рис. 2. Пример дельтаобразной функции

Третий случай. Для того чтобы построить адаптивную модель, часто необходимо проводить эксперименты в режиме нормального функционирования объекта [2, 12]. Это значит, что подаваемые на вход переменные могут быть достаточно малы.

Поэтому третий случай имеет существенное значение при решении задачи непараметрической идентификации, в отличие от предыдущих [4, 6]. Ниже исследуется алгоритм идентификации, когда входное воздействие $u(t)$ принято (в качестве примера) синусоидальным.

Зная управляющее воздействие и выход объекта, весовую функцию можно выразить из (1). Представим в дискретном виде:

$$h_i = x_t - (\sum_{i=1}^{s} u_i \Delta\tau + \sum_{i=1}^{s} h_0), i = \overline{1,s}, \qquad (8)$$

где s – объем выборки; $\Delta\tau$ – интервал времени, через который осуществляется контроль переменных; u_i – управляющее воздействие; x_t – выход объекта; h_0 – значения весовой функции на предыдущих итерациях.

Таким образом, непараметрическая модель процесса имеет следующий вид:

$$x_s(t) = \frac{T}{sc_s} \int_0^t \sum_{i=1}^{s} k_i H'\left(\frac{t - t_i}{c_s}\right) u(\tau) d\tau,$$

или (9)

$$x_s(t) = \frac{T}{sc_s} \int_0^t \sum_{i=1}^{s} h_i u(\tau) d\tau,$$

где k_i – переходная функция; h_i – весовая функция; c_s – параметр размытости; s – объем выборки; T – период наблюдения.

Вычислительный эксперимент

Для эксперимента был взят объект второго порядка. Опишем его уравнением вида:

$$x_t = 0{,}33u_t + 0{,}25x_{t-1} - 0{,}33x_{t-2}. \qquad (10)$$

Стоит отметить, что уравнение (10) взято для получения точек выборки. Непараметрический алгоритм (1) не предполагает известным вид дифференциального уравнения, известна лишь информация о линейности объекта, в отличие от [13, 14].

Первый способ получения весовой функции – взятие производной от переходной функции (рис. 3), если на вход объекта действует функция Хевисайда, тогда выход объекта есть переходная характеристика: $x(t) = k(t)$, далее находим оценку переходной функции и весовую функцию по формулам (3) и (6).

На рис. 3 введены следующие обозначения: $k(t)$ – переходная функция, $h(t)$ – весовая функция.

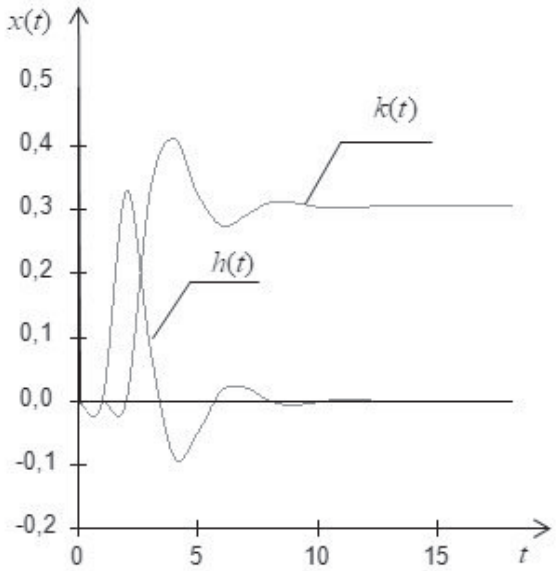

Рис. 3. Весовая и переходная характеристика процесса при $u(t) = 1(t)$

Рассмотрим случай получения весовой функции, когда входное воздействие $u(t)$ имеет вид дельтаобразной функции: $u(t) = 1/\Delta t$ [15, 16].

Зная переходную и весовую функции, подставим данные значения в интеграл Дюамеля (1) и получим модель объекта (рис. 4).

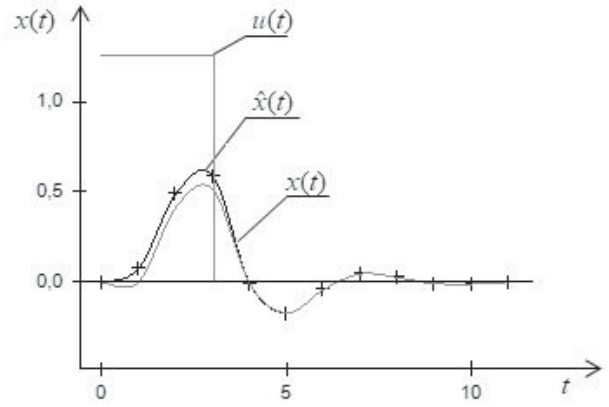

Рис. 4. Результаты выхода объекта при дельтаобразном входном воздействии

На рис. 4 приняты следующие обозначения: $u(t)$ – дельтаобразное входное воздействие; $x(t)$ – выход объекта; $\hat{x}(t)$ – выход модели объекта.

Анализируя рис. 4, можно оценить, насколько выход модели объекта близок к истинному выходу объекта.

Рассмотрим случай, когда интеграл от дельтаобразной функции отличен от 1.

На рис. 5 приводятся результаты эксперимента при условии, что интеграл от дельтаобраз-

ной функции $\delta^{\Delta}(t)$ равен 1; $u(t)=\dfrac{1}{\Delta t}$ – дельтаобразное входное воздействие; $x(t)$ – выход объекта; Δt – шаг дискретизации; $\hat{x}(t)$ – выход модели объекта.

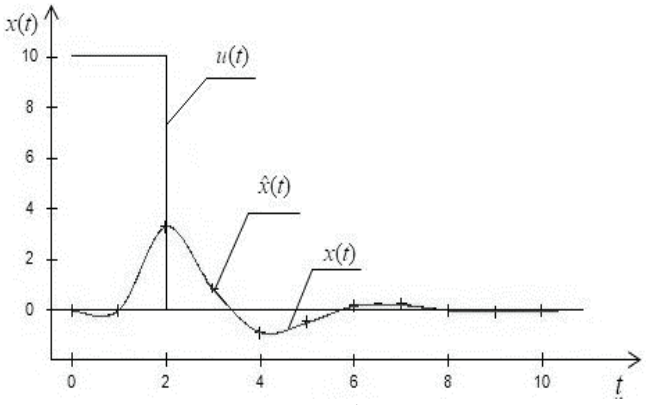

Рис. 5. Результат работы алгоритма при дельтаобразном входном воздействии

Отметим, что при $\Delta t \in [0{,}1;\,1]$ входное воздействие $u(t)$ принимает значения в диапазоне от 1 до 10, что вполне соответствует допустимым нормам.

Рассмотрим случай, когда интеграл от дельтаобразной функции $\delta^{\Delta}(t)$ отличен от 1. Это значит, что дельтаобразная функция становится «псевдо-дельтаобразной», т. е. интеграл от дельта-функции не равен 1 (рис. 6).

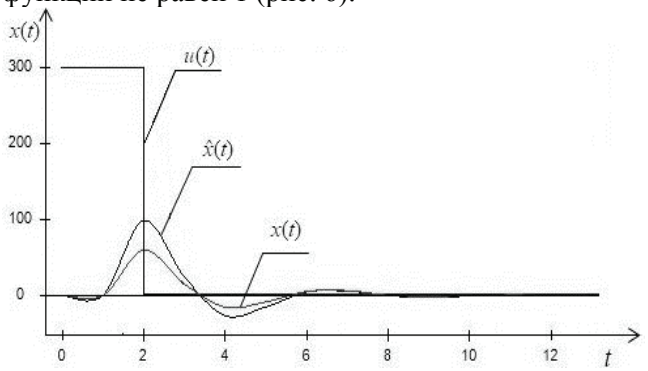

Рис. 6. Результат работы алгоритма при «псевдодельтаобразном» входном воздействии

На рис. 5 шаг дискретизации Δt = 0,1, интеграл от дельтаобразной функции $\delta^{\Delta}(t)$ равен 1, ошибка восстановления w = 4,2 %.

А на рис. 6 шаг дискретизации Δt = 0,1, интеграл от дельтаобразной функции $\delta^{\Delta}(t)$ > 1, ошибка восстановления w = 40 %.

Таким образом, чтобы построить хорошую модель, необходимо соблюдать следующее условие: интеграл от дельтаобразной функции $\delta^{\Delta}(t)$ должен быть равен 1.

В качестве произвольного входного сигнала в условиях нормальной эксплуатации объекта подадим косинусоидальную функцию вида $u_t = \cos(0{,}2t)$.

Добавим случайную помеху h, возникающую в каналах измерения выходного сигнала объекта $x(t)$:

$$h_t = l x_t \xi_t, \qquad (11)$$

где $\xi_t \in [-1;\,1]$; уровень помех $l = 5\,\%, 10\,\%$.

Рассчитаем ошибку восстановления w по формуле (12), где $\bar{x} = \dfrac{1}{s}\sum_{i=1}^{s} x_t$ – среднее арифметическое; $\hat{x}(t)$ – выход модели объекта:

$$w = \frac{\sum_{i=1}^{s} |x_t - \hat{x}_t|}{\sum_{i=1}^{s} |x_t - \bar{x}|}. \qquad (12)$$

На рис. 7 введены следующие обозначения: $u(t)$ – косинусоидальное входное воздействие; $x(t)$ – выход модели; $\hat{x}(t)$ – выход модели объекта. Уровень помех l = 5 %, ошибка восстановления w – 0,159; судя по графику и ошибке восстановления, данную модель также можно назвать удовлетворительной.

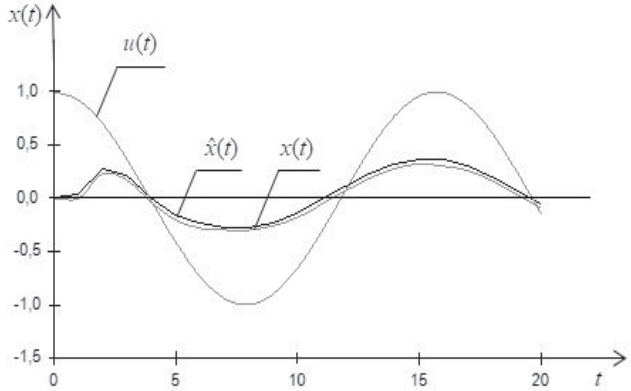

Рис. 7. Результаты выхода объекта при косинусоидальном входном воздействии

В качестве произвольного входного сигнала в условиях нормальной эксплуатации объекта подадим функцию следующего вида:

$$u_t = \sin(0{,}1t) + \sin(2t). \qquad (13)$$

На рис. 8 введены следующие обозначения: $u(t)$ – произвольное входное воздействие; $x(t)$ – выход модели; $\hat{x}(t)$ – выход модели объекта. Уровень помех l = 0 %, ошибка восстановления w – 0,031.

Снова изменим входное воздействие $u(t)$ следующим образом (см. рис. 8):

$$u_t = \sin(0{,}3t) + \cos(4t). \qquad (14)$$

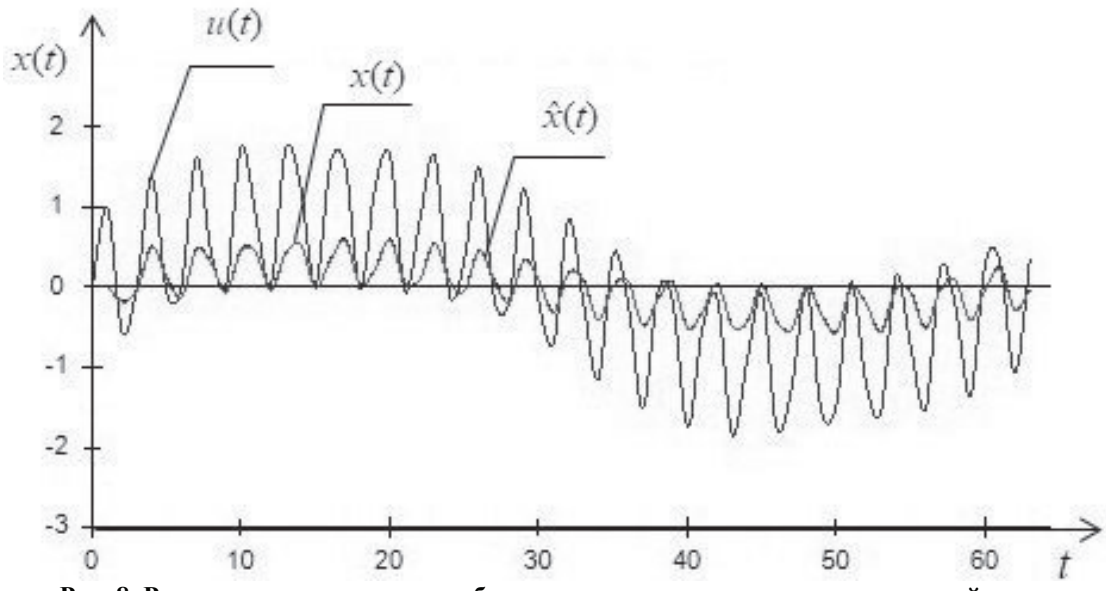

Рис. 8. Результат выхода модели объекта при произвольном входном воздействии

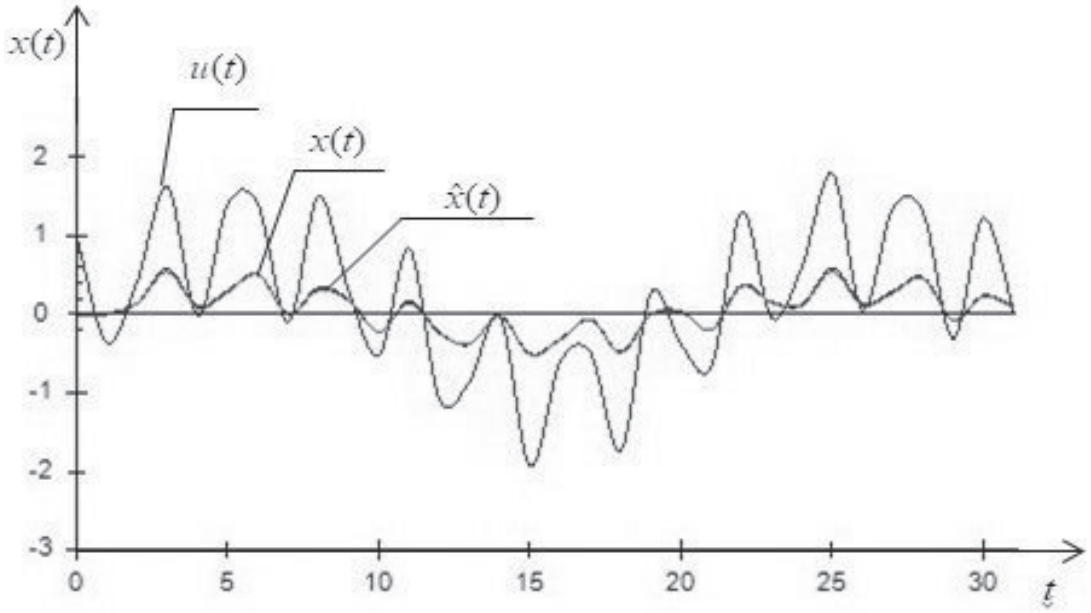

Рис. 9. Результат выхода модели объекта при произвольном входном воздействии

На рис. 9 введены следующие обозначения: $u(t)$ – произвольное входное воздействие; $x(t)$ – выход модели; $\hat{x}(t)$ – выход модели объекта. Уровень помех l = 5 %, ошибка восстановления w – 0,059.

Таким образом, рассмотренные выше эксперименты наглядно показывают, что алгоритму не принципиально, каким будет входное воздействие, главное условие – соблюдение принципа суперпозиции.

Заключение

Рассмотрена задача непараметрической идентификации линейных динамических объектов в условиях неполной информации. Решена задача идентификации при нормальном функционировании объекта. Приведены непараметрические модели линейных динамических систем, основанные на оценивании интеграла Дюамеля с помощью статистик Надарая – Ватсона.

Для случая известного запаздывания приведенные модели остаются в силе с учетом сдвига на величину запаздывания соответствующих выборок.

Основные выводы, которые можно сделать на основании объемного численного исследования непараметрических моделей, сводятся к следующему. Хотя на практике нельзя подать дельта-функцию на вход объекта, но можно подать, в некоторых случаях, дельтаобразную функцию и при этом построить вполне удовлетворительную, с практической точки зрения, модель. Конечно же,

увеличение помех при измерении входных-выходных переменных, а также увеличение дискретности их контроля в какой-то степени ухудшает точность непараметрических моделей, что вполне естественно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цыпкин Я.З. Информационная теория идентификации / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука. Физматлит, 1995. – 336 с.
2. Райбман Н.С. Что такое идентификация / Н.С. Райбман. – М.: Наука, 1970. – 119 с.
3. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления / П. Эйкхофф. – М. : Мир, 1975. – 681 с.
4. Медведев А.В. Непараметрические системы адаптации. – Новосибирск, Наука, 1983. – 174 с.
5. Медведев А.В. Адаптация в условиях непараметрической неопределенности // Адаптивные системы и их приложения. – Новосибирск: Наука. СО АНСССР, 1978. – С. 4–34.
6. Медведев А.В. Теория непараметрических систем. Моделирование // Вестник СибГАУ. 2010. № 4 (30).
7. Медведев А.В. Элементы теории непараметрических систем управления. Актуальные проблемы информатики, прикладной математики и механики. В 3 ч. Ч. III Информатика. – Новосибирск; Красноярск: Изд-во Сиб. отд-ния Рос. акад. наук, 1996. – С. 87–112.
8. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т1: Математические модели, динамические ха-рактеристики и анализ систем управления / под редакцией К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – Москва: МГТУ им.Н.Э. Баумана, 2004. – 656 с.
9. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / под редакцией К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 640 с.
10. Надарая Э.А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии. Тбилиси: Изд-во Тбил. ун-та, 1983.
11. Катковник В.Я. Непараметрическая идентификация и сглаживание данных / В.Я. Катковник. – М.: Наука, 1985. – 336 с.
12. Гроп Д. Методы идентификации систем. Пер. с англ. / Д. Гроп ; ред. Е.И. Кринецкий ; пер.: В.А. Васильев, В.И. Лопатин. – М. : Мир, 1979. – 304 с.
13.Tse, E., Bar-Shalom, Y. An actively adaptive control for linear systems with random parameters via the dual control approach Automatic Control, IEEE Transactions on (Volume: 18. Issue: 2). 2003, pp. 109–117.
14. Wenk, C. J., Bar-Shalom, Y. A multiple model adaptive dual control algorithm for stochastic systems with unknown parameters Automatic Control, IEEE Transactions on (Volume: 25. Issue: 4). 2003, pp. 703–710.
15. Льюнг Л. Идентификация систем / Л. Льюнг. – М.: Наука, 1991. – 423 с.
16. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / под редакцией К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 656 с.
17. Шишкина А.В. О непараметрическом управлении динамической системой / Е.Д. Агафонов, А.В. Шишкина // Сибирский журнал науки и технологий (Вестник) Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнёва. – Вып. 4. – 2018. – С. 711–718.

REFERENCES

1. Tsypkin Y.Z. Informatsionnaya teoriya identifikatsii [Adaptation and training in automatic systems]. Moscow: Nauka Publ., 1968, 400 p.
2. Raibman N.S. Chto takoe identifikatsiya [What is identification]. Moscow: Nauka Publ., 1970, 119 p.
3. Eykkhoff P. Osnovy identifikatsii sistem upravleniya [Fundamentals of identification of control systems]. Moscow: Mir Publ., 1975, 681 p.
4. Medvedev A.V. Neparametricheskie sistemy adaptatsii [Nonparametric adaptation systems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1983, 174 p.
5. Medvedev A.V. Adaptatsiya v usloviyakh neparametricheskoi neopredelennosti [Adaptation under conditions of nonparametric uncertainty]. *Adaptivnye sistemy i ikh prilozheniya* [*Adaptive systems and their applications*]. Novosibirsk: Nauka Publ., SO ANSSR, 1978, p. 4–34.
6. Medvedev A.V. [Theory of nonparametric systems: Modeling]. *Vestnik SibGAU*, 2010, No. 4(30).
7. Medvedev A.V. Elementy teorii neparametricheskikh sistem upravleniya. Aktual'nye problemy informatiki, prikladnoi matematiki i mekhaniki. V 3 ch. Ch. III Informatika [Elements of the theory of nonparametric control systems. Topical problems of computer science, applied mathematics and mechanics. In 3 parts. P.3. Informatics]. Novosibirsk; Krasnoyarsk: Publishing house Sib. of the deposit of Ros. acad. Sci., 1996, p. 87–112.
8. Pupkov K.A., Egupov N.D. (eds.). Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya. T1: Matematicheskie modeli, dinamicheskie kha-rakteristiki i analiz sistem upravleniya [Methods of classical and modern theory of automatic control. Vol.1: Mathematical models, dynamic characteristics and analysis of control systems]. Moscow: Bauman MSTU Publ., 2004, 656 p.
9. Pupkov K.A., Egupov N.D. (eds.). Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya. T2: Statisticheskaya dinamika i identifikatsiya sistem avtomaticheskogo upravleniya [Methods of classical and modern theory of automatic control. Vol.2: Statistical dynamics and identification of automatic control systems]. Moscow: Bauman MSTU Publ., 2004, 640 p.
10. Nadaraya E.A. Neparametricheskoe otsenivanie plotnosti veroyatnostei i krivoi regressii [Nonparametric estimation of the probability density and the regression curve]. Tbilisi: Tbil. un-ty Publ., 1983.

11. Kotkinik V.Y. Neparametricheskaya identifikatsiya i sglazhivanie dannykh [Nonparametric identification and data smoothing]. Moscow: Nauka Publ., 1985, 336 p.
12. Grop D. Metody identifikatsii system [Methods of identification of systems]. In E.I. Krinetskiy (ed.); Transl. from English by: V.A. Vasilyev, V.I. Lopatin. Moscow: Mir Publ., 1979, 304 p.
13. Tse, E. Bar-Shalom, Y. An actively adaptive control for linear systems with random parameters via the dual control. *Automatic Control, IEEE Transactions on* (Volume: 18. Issue: 2). 2003, pp. 109–117.
14. Wenk, C. J. Bar-Shalom, Y. A multiple model of an adaptive dual control algorithm for stochastic systems with unknown parameters. *Automatic Control, IEEE Transactions on* (Volume: 25. Issue: 4). 2003, pp. 703–710.
15. L'yung L. Identifikatsiya sistem [Identification of systems]. Moscow: Nauka Publ., 1991, 423 p.
16. Pupkov K.A., Egupov N.D. (eds.). Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya. T3: Sintez regulyatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya [Methods of classical and modern theory of automatic control. Vol. 3: Synthesis of regulators of automatic control systems]. Moscow: Bauman MSTU Publ., 2004, 656 p.
17. Shishkina A.V., Agafonov E.D. O neparametricheskom upravlenii dinamicheskoi sistemoi [Nonparametric control of a dynamical system]. *Sibirskii zhurnal nauki i tekhnologii (Vestnik) Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva* [*Siberian Journal of Science and Technology (Bulletin) of the Reshetnev Siberian State Aerospace University*]. Issue 4 - 2018, pp. 711–718.

Информация об авторах

Корнет Мария Евгеньевна – соискатель кафедры «Системный анализ и исследование операций», Институт информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, г. Красноярск, e-mail: marya.kornet@gmail.com

Шишкина Анастасия Васильевна – соискатель, Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий, кафедра «Интеллектуальные системы и управление», г. Красноярск, e-mail: nastya.shishkina95@mail.ru

Authors

Kornet Maria Evgenievna – external Ph.D. student of the Subdepartment of System Analysis and Operations Research, Institute of Informatics and Telecommunications, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, e-mail: marya.kornet@gmail.com

Shishkina Anastasia Vasilyevna – external Ph.D. student of the Siberian Federal University of the Institute of Space and Information Technologies, the Subdepartment of Intellectual Systems and Management, Krasnoyarsk, e-mail: nastya.shishkina95@mail.ru

Для цитирования

Корнет М. Е. О непараметрической идентификации безынерционных систем с запаздыванием / М. Е. Корнет, А. В. Шишкина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. - Т. 59, № 3. - С. 16–23. - DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).16-23.

For citation

Kornet M. E., Shishkina A. V. About non-parametric identification of infinitely fast systems with delay. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2018, Vol. 59, No. 3, pp. 16–23. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).16-23.

УДК *621.98.042* ***DOI:*** *10.26731/1813-9108.2018.3(59).23-29*

А. А. Макарук, А. А. Пашков, О. В. Самойленко

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация
Дата поступления: *13 августа 2018*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ ФОРМЫ ДЕТАЛЕЙ СИЛОВОГО КАРКАСА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ДРОБЕМЕТНОМ УПРОЧНЕНИИ МЕТОДОМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. *В процессе поверхностного упрочнения деталей силового каркаса летательных аппаратов, изготавливаемых из алюминиевых сплавов, нередко возникает нежелательная деформация (поводки), выражающаяся в отклонении от плоскостности и саблевидности. Величину поводок, возникающих на детали в процессе упрочнения ударными методами, возможно определить двумя способами: с использованием имеющегося производственного опыта при упрочнении деталей аналогичной конструкции или путем обработки конструктивно-подобных образцов, содержащих основные закономерности расположения конструктивных элементов и изготавливаемых из материала детали, или при помощи моделирования процесса упрочнения в современных CAE-системах. Первый метод с использованием конструктивно-подобных образцов является весьма трудоемким и дорогостоящим. Поэтому перспективным направлением является применение методов компьютерного моделирования процесса упрочнения для определения величины поводок контура. Данная статья содержит описание методики конечно-элементного моделирования с использованием среды нелинейного конечно-элементного анализа для определения общей изгибной деформации детали, возникающей при поверхностном упрочнении дробью малых фракций. Использование метода конечно-элементного моделирования процесса дробеметного упрочнения позволяет существенно сократить затраты, связанные с изготовлением конструктивно-подобных образцов при определении прогнозируемых деформаций упрочняемых деталей.*

Ключевые слова: *упрочнение ударными методами, моделирование, CAE-система, отклонения контура, внутренние силовые факторы, обработка дробью.*

© А. А. Макарук, А. А. Пашков, О. В. Самойленко, 2018