

УДК 517.977.1

05.00.00 Технические науки

**О НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ
ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО
ЦИКЛА**

Раскина Анастасия Владимировна
Аспирант
SPIN-код=8542-3153
AuthorID: 844964
e-mail: stasy144@yandex.ru

Корнеева Анна Анатолиевна
Канд. техн. наук
AuthorID: 849252
e-mail: korneeva_ikit@mail.ru

Пупков Александр Николаевич
Канд. техн. наук, доцент
AuthorID: 129383
e-mail: alex007p@yandex.ru

Елизарьева Мария Сергеевна
Бакалавр
e-mail: elizaryeva_masha@mail.ru

Верещагина Елена Вадимовна
Бакалавр
e-mail: vereschgina@yandex.ru
*ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный
университет», г. Красноярск, Россия*

Рассматривается задача идентификации последовательности объектов с дискретно - непрерывным характером процесса в условиях непараметрической неопределённости, то есть в условиях, когда априорной информации недостаточно для обоснованного выбора структуры модели с точностью до параметров. Среди последовательно соединенных объектов могут быть объекты как динамические, так и безынерционные с запаздыванием. Подобного рода технологические цепочки часто имеют место в различных отраслях промышленности, в частности в металлургии, энергетике, нефтепереработке и т.д. При решении данной проблемы использовались методы непараметрической теории идентификации, математической статистики и статистического моделирования. В основе теории непараметрических систем положены методы локальной аппроксимации, в частности алгоритмы непараметрического оценивания различного рода зависимостей по результатам наблюдения входных-выходных переменных объекта. В статье приведены непараметрические модели для группы безынерционных объектов с

UDC 517.977.1

Technical sciences

**TO THE NONPARAMETRIC
IDENTIFICATION OF TECHNOLOGICAL
PROCESS OF SEQUENCE OBJECTS**

Raskina Anastasia Vladimirovna
postgraduate student
SPIN-code=8542-3153
AuthorID: 844964
e-mail: stasy144@yandex.ru

Korneeva Anna Anatolyevna
Candidate of Technical Science
AuthorID: 849252
e-mail: korneeva_ikit@mail.ru

Pupkov Alexandr Nikolaevich
Candidate of Technical Science, assistant professor
AuthorID: 129383
e-mail: alex007p@yandex.ru

Elizarieva Maria Sergeevna
Bachelor
e-mail: elizaryeva_masha@mail.ru

Verichagina Elena Vadimovna
Bachelor
e-mail: vereschgina@yandex.ru
*FGAOI VPO "Siberian Federal University",
Krasnoyarsk, Russia*

The task of nonparametric identification of sequence objects with discrete-continuous nature of the process under nonparametric uncertainty, i.e. in conditions where a priori information is not sufficient for an informed choice of a model structure up to parameters is considered. Among series-connected objects, there can be objects both dynamic and instantaneous ones with a lag. This kind of technological chains is common in various industries, particularly in metal, power, oil refining, etc. in solving this problem were used methods of nonparametric identification theory, mathematical statistics and statistical modeling. The theory of nonparametric systems is based on local approximation methods, in particular algorithms for nonparametric estimation of different kind of dependency from observation of input-output variables of the object. The article presents a nonparametric model for the group of spinning objects with delay. In the work we show in detail the results of numerical studies showing that the use of nonparametric algorithms allows predicting process performance with sufficient accuracy

запаздыванием. Подробно приведены результаты численного исследования, которые показывают, использование непараметрических алгоритмов позволяет с достаточной точностью прогнозировать показатели технологического процесса

Ключевые слова: ИДЕНТИФИКАЦИЯ, НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ, ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНЫЙ ПРОЦЕСС, АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ, НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОБЪЕКТОВ, БЕЗЫНЕРЦИОННЫЕ ОБЪЕКТЫ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Keywords: IDENTIFICATION, NONPARAMETRIC FORECASTING, DISCRETE AND CONTINUOUS PROCESSES, ADAPTIVE ALGORITHMS, NONPARAMETRIC MODEL, SEQUENCE OBJECTS, INSTANTANEOUS OBJECTS WITH DELAYS

Введение

В последние годы значительно возросла роль моделирования в различных областях науки и техники. Особенно велика роль математического моделирования при решении задачи управления сложными многомерными технологическими процессами во многих отраслях промышленности. Типичными схемами производства для большинства отраслей являются последовательная, параллельная или последовательно-параллельная схема производства. Таким образом, речь идет не о каком-то локально объекте, а о группе объектов. Система групповой идентификации естественно соответствует более высокому уровню иерархии, чем система идентификации локальным объектом. Следует отметить, что важным вопросом при постановке задачи идентификации является объем априорной информации о различных каналах объектов. В настоящей статье, задача идентификации решается в условиях непараметрической неопределенности, то есть в условиях, когда априорной информации недостаточно для выбора параметрической структуры модели. Ранее, в работе [1] была дана алгоритмическая основа для моделирования и управления группой производственных объектов в рамках технологического регламента. В данной статье сделан акцент на рассмотрение задачи идентификации последовательности технологических процессов в условиях недостатка априорной информации о последних, а

также на случай практического применения непараметрических алгоритмов идентификации в задаче прогнозирования технологических характеристик процесса.

1. Постановка задачи

Рассматривается производственный цикл, представляющий собой цепочку технологических объектов, соединённых последовательно. На рисунке 1 представлена блок-схема рассматриваемого технологического процесса:

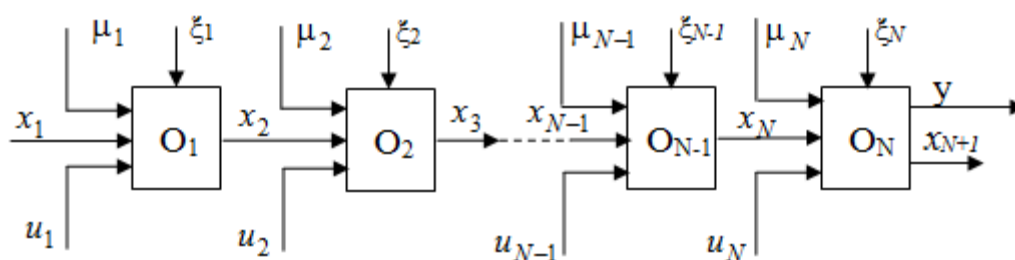


Рисунок 1 – Общая схема технологического процесса

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: $O_i, i = \overline{1, N}$ – технологические объекты; $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – это характеристики, определяющие состав исходного продукта x_1 и полуфабрикатов x_2, \dots, x_n , поступающих на вход технологических объектов; $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ – всевозможные добавки, поступающие на входы объектов; $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_N)$ – управляющие воздействия, $\boldsymbol{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$ – внешние помехи, действующие на объекты технологической цепочки. Как видно из рисунка, технологический процесс представляет собой последовательность локальных объектов.

В общем случае все описанные переменные представляют собой векторы. Для простоты рассмотрим скалярный случай. Характеристики выходных переменных x могут быть представлены в виде следующей зависимости:

$$x_{i+1}(t) = f(x_i(t - \tau), u_i(t - \tau), \mu_i(t - \tau), \xi_i(t - \tau)), i = \overline{0, N-1},$$

(1)

где $f(\cdot)$ неизвестный функционал, τ – запаздывание, которое по разным каналам связи может отличаться, но из соображений простоты в тексте мы приняли единое обозначение запаздывания τ .

Рассматриваемый процесс относится к классу дискретно-непрерывных, то есть по своей природе процесс является непрерывным, однако «входные-выходные» переменные процесса контролируются через дискретные моменты времени. Контроль переменных осуществляется через интервал времени Δt . Таким образом, можно получить исходную выборку наблюдений «входных-выходных» переменных $\{x_i, u_i, \mu_i, i = \overline{1, S}\}$, где S – объем выборки.

2. Идентификация объектов технологической цепочки

Современная теория идентификации, в значительной степени, относится к разряду параметрических. Это означает, что на этапе формулировки задачи предполагается каким-то образом выбранная параметрическая структура модели, описывающая процесс, или некоторое уравнение, известное с точностью до параметров [2]. Данный подход получил значительное развитие в рамках теории адаптивных систем [3], которая предполагает предварительную параметризацию объекта. Но часто априорной информации бывает недостаточно для обоснованного выбора

параметрического класса моделей, так как исследователю часто приходится сталкиваться с малоизученными процессами и объектами, структура моделей которых неизвестна. Влияние случайных помех с неизвестными законами распределения, неопределенность, неполнота данных еще более усложняют решение поставленных задач. В случае, когда априорной информации недостаточно, чтобы выбрать параметрическую структуру модели исследуемого процесса, естественно использовать теорию непараметрических систем идентификации [4, 5]. Непараметрическая теория, в отличие от предыдущей, предполагает, что известны только качественные характеристики системы. Это означает, что использование данной теории позволяет полностью уйти от вопроса определения параметрической структуры модели объекта.

В условиях непараметрической неопределенности описание объекта с точностью до параметров оказывается неизвестным. В этом случае, в качестве оценки модели объекта может быть принято условное математическое ожидание вида:

$$\bar{x}(t) = M\{x(t) / u(t)\} \quad (2)$$

В качестве модели локального объекта O_2 может быть принята следующая непараметрическая оценка функции регрессии (Надарая-Ватсона [6]) по наблюдениям $\{x_i, u_i, \mu_i, i = \overline{1, s}\}$ в дискретном виде:

$$\bar{x}_2 = \frac{\sum_{i=1}^s x_2 \Phi\left(\frac{x_1 - x_1^i}{c_s^{x_1}}\right) \Phi\left(\frac{\mu_1 - \mu_1^i}{c_s^{\mu_1}}\right) \Phi\left(\frac{u_1 - u_1^i}{c_s^{u_1}}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{x_1 - x_1^i}{c_s^{x_1}}\right) \Phi\left(\frac{\mu_1 - \mu_1^i}{c_s^{\mu_1}}\right) \Phi\left(\frac{u_1 - u_1^i}{c_s^{u_1}}\right)}, \quad (3)$$

где $\Phi(\cdot)$ – ядерная колоколообразная функция, c_s – коэффициент размытости ядра, соответствующий каждой переменной объекта, s – объем выборки наблюдений. Ядерная функция и коэффициент размытости ядра удовлетворяют некоторым условиям сходимости [7].

В общем виде модель (3) можно переписать в виде:

$$\bar{x}_{j+1} = \frac{\sum_{i=1}^s x_j \Phi\left(\frac{x_j - x_j^i}{c_s^{x_j}}\right) \Phi\left(\frac{\mu_j - \mu_j^i}{c_s^{\mu_j}}\right) \Phi\left(\frac{u_j - u_j^i}{c_s^{u_j}}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{x_j - x_j^i}{c_s^{x_j}}\right) \Phi\left(\frac{\mu_j - \mu_j^i}{c_s^{\mu_j}}\right) \Phi\left(\frac{u_j - u_j^i}{c_s^{u_j}}\right)}, j = \overline{N-1}$$

(4)

Параметр размытости c_s определяется путем решения задачи минимизации квадратичного показателя соответствия выхода объекта и выхода модели, основанного на «методе скользящего экзамена»

$$R(c_s) = \sum_{k=1}^s (x_k - x_s(u_k, c_s))^2 = \min_{c_s}, k \neq i,$$

(5)

когда в модели (4) исключается i -я переменная из формулы (4), предъявляемая для экзамена:

3. Численное исследование

Для исследования предлагаемого непараметрического алгоритма идентификации проводились вычислительные эксперименты на основании ряда модельных задач.

Рассмотрим следующую схему цепочки объектов, представленную на рисунке 2.

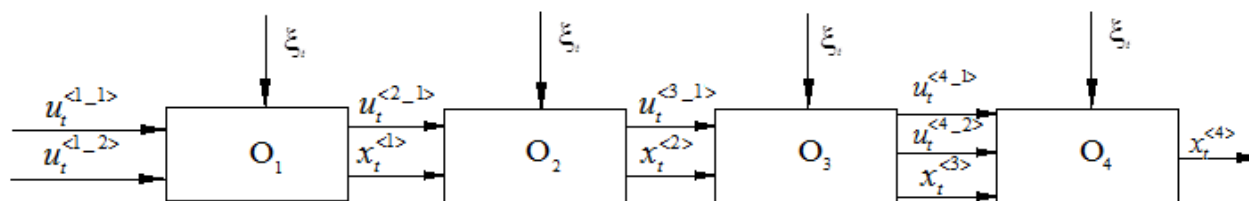


Рисунок 2 – Последовательность технологических объектов

Пусть на вход объектов исследования O_1, O_2, O_3, O_4 подается управляющие воздействия $u_t^{<1-1>}, u_t^{<1-2>}, u_t^{<2-1>}, u_t^{<3-1>}, u_t^{<4-1>}, u_t^{<4-2>}$, согласно рисунку 2. На выходе объектов O_1, O_2, O_3, O_4 измеряются переменные $x_t^{<1>}, x_t^{<2>}, x_t^{<3>}, x_t^{<4>}$ соответственно.

В качестве зависимостей, описывающих в рамках вычислительного эксперимента поведение исследуемых объектов, были выбраны следующие уравнения:

$$x_t^{<1>} = 0.5 - \sin(u_t^{<1-1>}) + 0.05\sqrt{u_t^{<1-2>}} + \xi_t$$

$$x_t^{<2>} = 0.33 + 0.1 \cdot (u_t^{<2-1>})^2 + \sin(u_t^{<2-2>}) + \xi_t, \text{ где } u_t^{<2-1>} \quad u_t^{<2-2>} = x_t^{<1>}$$

$$x_t^{<3>} = 1.5 \cdot 2^{u_t^{<3-1>}} + 0.5 \cdot \sqrt{u_t^{<3-2>}} + \xi_t, \text{ где } u_t^{<3-2>} = x_t^{<2>}$$

$$x_t^{<4>} = 0.3 \cdot \sin(u_t^{<4-1>}) + 0.2 \cdot 2^{u_t^{<4-2>}} + 0.1 \cdot \sin(u_t^{<4-3>}) + \xi_t, \text{ где } u_t^{<4-3>} = x_t^{<3>}$$

где ξ_t – помеха, приложенная к выходным переменным. Данные зависимости необходимы для генерации исходных выборок. В дальнейшем вид вышеуказанных зависимостей предполагается неизвестным.

Помеха приложена к выходной переменной объекта и имеет нулевое математическое ожидание и ограниченную дисперсию, для каждого такта измерений i генерируется по следующей формуле:

$$\xi_i = x_i^{<j>} \cdot k \cdot \zeta$$

где $x_i^{<j>}$ – значение выходной переменной $x_i^{<j>}$ j -того объекта в i -ый такт измерений, k – коэффициент помехи измерения (к примеру, для 5-ти % помехи $k=0.05$), ζ – случайное число из интервала $[-1; 1]$.

Входные переменные генерировались по формулам:

$$\begin{aligned} u_t^{<1-1>} &= 0.01t, u_t^{<1-2>} = 0.02t, \\ u_t^{<2-1>} &= 0.05t, u_t^{<3-1>} = 0.01t, \\ u_t^{<4-1>} &= 0.02t, u_t^{<4-2>} = 0.1t. \end{aligned}$$

Полученные модели оценивались с использованием относительной ошибки моделирования:

$$E = \sqrt{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (x_i - x_i^s)^2 / \sum_{i=1}^s \frac{1}{s-1} (m_x - x_i)^2}$$

Модели строились с использованием непараметрической оценки функции регрессии (4). На рисунке 3 приложены результаты моделирования выходной переменной $x_i^{<1>}$ объекта O_1 при помехе в 7% ($k=0.05$).

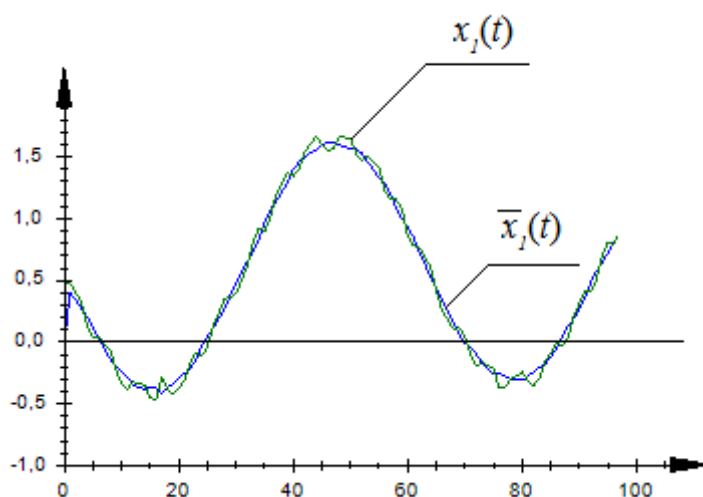


Рисунок 4 - Результаты моделирования выходной переменной $x_i^{<1>}$ объекта O_1

Как можно заметить из рисунка 4 непараметрическая модель (4) успешно справляется с задачей идентификации. Результат эксперимента по

моделированию выходной переменной $x_t^{<2>}$ объекта O_2 при отсутствии помех показан на рисунке 5:

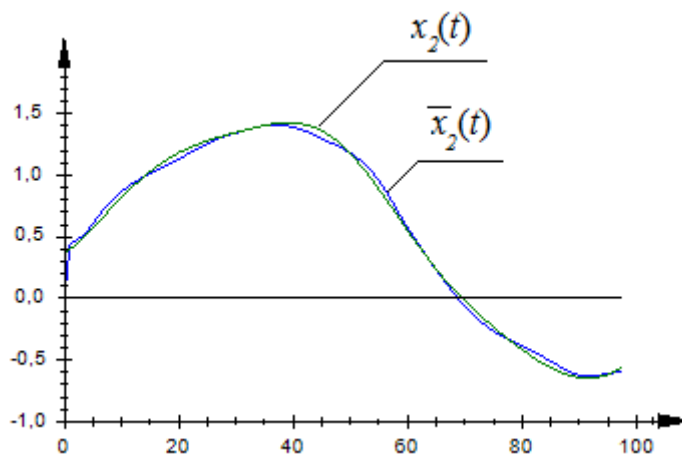


Рисунок 5 - Результаты моделирования выходной переменной $x_t^{<2>}$ объекта O_2

Относительная ошибка моделирования для эксперимента, представленного на рисунке 4 равна 0,027, на рисунке 5 – 0.015. Результат эксперимента по моделированию выходной переменной $x_t^{<3>}$ при помехе в 3% ($k=0.05$) представлен на рисунке 6:

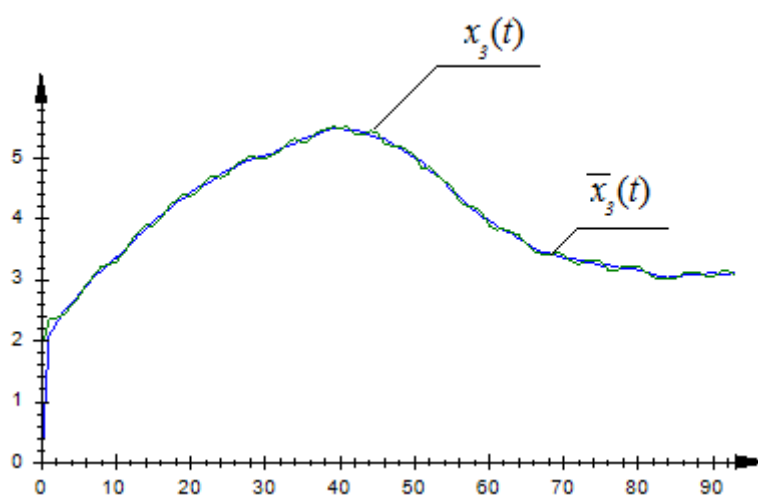


Рисунок 6 - Результаты моделирования выходной переменной $x_t^{<3>}$ объекта O_3

Результат эксперимента по моделированию выходной переменной $x_t^{<4>}$, при помехе в 5% ($k=0.05$) представлен на рисунке 7:

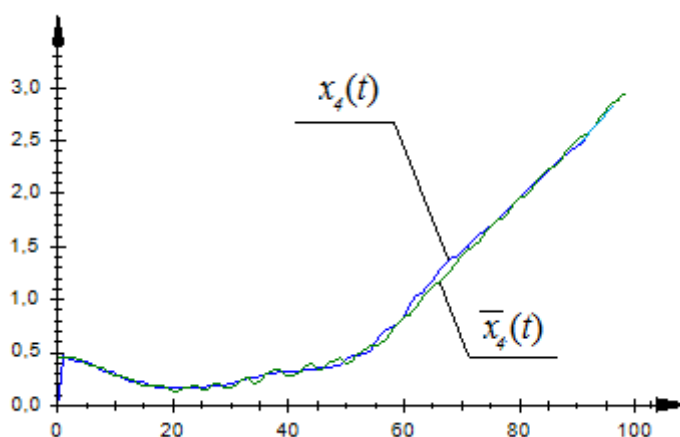


Рисунок 7 - Результаты моделирования выходной переменной $x_t^{<4>}$ объекта O_1

Относительная ошибка моделирования для эксперимента, представленного на рисунке 6 равна 0,021, на рисунке 7 – 0.034. Как можно заметить из представленных выше экспериментов, помеха влияет на точность оценивания, но тенденция при этом сохраняется – непараметрическая модель (4) успешно справляется с задачей идентификации. Использование подобных моделей может оказаться полезным для управления динамическим процессом.

Заключение

Выше приведены непараметрические модели дискретно-непрерывных процессов, ориентированные на случай непараметрической неопределенности, т.е. на случай, когда априорные сведения об исследуемом объекте достаточно малы и не позволяют сколько-нибудь обоснованно выбрать параметрическую модель объекта. При этом рассматриваемый технологический процесс представляет собой цепочку локальных объектов. Подобный характер процессов имеет место в

металлургии, энергетике, нефтепереработке и т.д. Приведенные методы сопровождаются подробной иллюстрацией практической апробации применяемого алгоритма идентификации на различных наборах сгенерированных начальных данных, в различных условиях помех. Таким образом, можно сделать вывод, что приведенные непараметрические алгоритмы идентификации достаточно эффективно могут быть использованы для моделирования группы безынерционных объектов с запаздыванием.

Список литературы

1. А. А. Корнеева, М.Е. Корнет, Н.А. Сергеева, Е. А. Чжан. Об адаптивном управлении последовательностью технологических объектов // Вестник СибГАУ. – Красноярск: изд. СибГАУ, 2015. Т. 16, № 1. С. 72–78
2. E Asarin, A Donzé, O Maler, D Nickovic, Parametric identification of temporal properties // Lecture Notes in Computer Science. - Springer - Runtime Verification. 2012. pp 147-160
3. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968. 400с.
4. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Моделирование // Вестник СибГАУ.- Красноярск: изд. СибГАУ, 2013.- №2(48). С.57-63.
5. Медведев А. В. Основы теории адаптивных систем. Красноярск. Изд. СибГАУ. 2015. С.525
6. Надарая Э.А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии. Издательство Тбилисского университета, 1983. 194 с.
7. Кошкин Г.М., Пивен И.Г. Непараметрическая идентификация стохастических объектов. Хабаровск: РАН Дальневосточное отделение, 2009. 336с.

References

1. A. A. Korneeva, M.E. Kornet, N. A. Sergeeva, E. A. Chzhan. Ob adaptivnom upravlenii posledovatel'nost'ju tehnologicheskikh obektov (On the sequence of adaptive management of technological objects) // Vestnik SibGAU. – Krasnorsk: izd. SibGAU, 2015. T. 16, № 1. pp. 72–78
2. E Asarin, A Donzé, O Maler, D Nickovic, Parametric identification of temporal properties // Lecture Notes in Computer Science. - Springer - Runtime Verification. 2012. pp 147-160
3. Tsyppkin Ja.Z. Adaptatsiya i obuchenie v avtomaticheskikh sistemah [Adaptation and learning in automatic systems]. Moscow: Nauka, 1968. 400 p.
4. Medvedev A. V. Teorija neparametricheskikh sistem. Modelirovanie // Vestnik SibGAU.- Krasnorsk: izd. SibGAU, 2013.- №2(48). S.57-63.

5. Medvedev A. V. *Osnovy teorii adaptivnyh sistem*. Krasnojarsk. Izd. SibGAU. 2015. S.525

6. Nadaraya E. A. *Neparametricheskie ocenki plotnosti veroyatnosti i krivoj regressii* [Non-parametric estimation of the probability density and the regression curve]. *Tbilisi, izd. Tbil. un-ta*, 1983, 194 p.

7. Koshkin G.M, Piven I.G. *Neparametricheskaya identifikatsiya stohasticheskikh obektov*. [Non-parametric identification of stochastic objects]. Khabarovsk: Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 2009. 336p.