

**ОБ АДАПТИВНОМ УПРАВЛЕНИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

А. А. Корнеева*, М. Е. Корнет, Н. А. Сергеева, Е. А. Чжан

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79/10
*E-mail: anna.korneeva.90@mail.ru

Рассматривается задача идентификации и управления последовательными объектами в условиях неполной информации. Среди последовательно соединенных объектов могут быть объекты как динамические, так и безынерционные с запаздыванием. Подобного рода технологические цепочки часто имеют место в аэрокосмической отрасли. Они возникают при изготовлении ракетной техники, изделий электронной техники и др. Проблема комплексного управления группой технологических объектов, безусловно, относится к разряду актуальных. Отсюда возникает целый комплекс задач идентификации и управления, обусловленных тем, что априорная информация о них может быть различной. Ниже рассматриваются случаи, когда априорная информация об объектах имеет как параметрический, так и непараметрический характер.

Исследуется задача идентификации в условиях непараметрической или частично непараметрической неопределенности. В случае, если априорной информации недостаточно для исходной постановки задач, то естественно использовать теорию адаптивных обучающихся систем. Основная цель работы состоит в том, чтобы дать алгоритмическую основу для моделирования и управления производственным процессом в рамках технологического регламента. Сначала рассматривается задача идентификации и управления для локального объекта, а уже затем задача управления группой подобных объектов. В зависимости от конкретной задачи и уровня априорной информации конструируются соответствующие алгоритмы моделирования и управления, основанные как на достаточно хорошо разработанной параметрической теории адаптивных систем, так и непараметрической. В основе теории непараметрических систем лежат методы локальной аппроксимации, в частности алгоритмы непараметрического оценивания различного рода зависимостей по результатам наблюдения входных-выходных переменных объекта. Приведены конкретные непараметрические модели безынерционных объектов с запаздыванием и соответствующие непараметрические алгоритмы управления. Управляющие устройства в данном случае являются устройствами с памятью, что позволяет считать непараметрические алгоритмы управления с активным накоплением информации алгоритмами дуального управления.

Ключевые слова: идентификация, управление, дискретно-непрерывный процесс, адаптивные алгоритмы, непараметрические модели, непараметрическое дуальное управление.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 72–78**ABOUT ADAPTIVE CONTROL OF SEQUENCE OF TECHNOLOGICAL OBJECTS**

A. A. Korneeva*, M. E. Kornet, N. A. Sergeeva, E. A. Chzhan

Siberian Federal University
79/10, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
*E-mail: anna.korneeva.90@mail.ru

We consider the problem of identification and control of a sequence of objects in conditions of incomplete information. Among the series-connected objects there may be objects both dynamic and inertialess with delay. This kind of process chains often takes place in the aerospace industry. They arise in the manufacture of rocket technology, electronic products, etc. The problem of integrated management of technological process group certainly belongs to the category of topical. This raises a whole range of problems of identification and control due to the fact that a priori information about them can be different. Below we consider the cases when the a priori information about the object has both parametric and non-parametric nature.

We study the problem of identification in non-parametric or part non-parametric uncertainty. If a priori information is not sufficient for the initial statement of objectives, it is natural to use the theory of adaptive learning systems. The main purpose of the following paper is to give an algorithmic framework for modeling and process control within the production schedules. First, we consider the problem of identification and control for a local object, and then the task of managing a group of similar objects. Depending on the particular problem and a priori information level the

corresponding modeling and control algorithms are designed. These algorithms are based on enough developed parametric and nonparametric theory of adaptive system. The theory of non-parametric systems is based on local approximation method, in particular nonparametric estimation algorithms of various kinds of dependencies on the results of the input-output variables of the object. The paper presents the specific nonparametric model of inertialess objects with delay and corresponding nonparametric control algorithms with memory. Control devices in this case are devices with memory, which makes nonparametric control algorithms with active accumulation of information the dual control algorithms.

Keywords: identification, control, discrete-continuous process, adaptive algorithms, nonparametric models, nonparametric dual control.

Введение. Для различных отраслей промышленности типичными являются последовательная, параллельная или последовательно-параллельная схема производства. В некоторых случаях производственный процесс охвачен перекрестными связями, что часто приводит к нелинейным системам. Таким образом, речь идет не о каком-то локальном объекте (плавильная печь, энергоблок, обжиговая печь, измельчительный агрегат и т. д.), а о группе объектов. Подобные схема встречаются и в аэрокосмической области. Система группового управления объектом, естественно, соответствует более высокому уровню иерархии, чем система управления локальным объектом. Конечно же, важным, как и вообще в теории идентификации и управления, является объем априорной информации о различных каналах объектов. Не менее важными являются также и средства контроля соответствующих объектов. В зависимости от этого даются и соответствующие математические постановки задач идентификации и управления, которые для различных разрезов технологического процесса могут оказаться существенно отличающимися. В дальнейшем делается акцент на формулировке вышеназванных задач в условиях как параметрической, так и непараметрической неопределенности. В первом случае, как известно [1], необходимо представление модели объекта с точностью до вектора параметров с дальнейшей их оценкой по мере поступления текущей информации. Во втором случае можно ограничиться лишь качественными свойствами исследуемого процесса с последующей оценкой оператора объекта (чаще всего интегральных) по результатам выборки наблюдений [2].

Постановка задачи. Рассмотрим схему технологического процесса (рис. 1), которая достаточно часто встречается на практике, где приняты следующие обозначения: $O_i, i = \overline{1, N}$, – технологические объекты;

$x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ – это характеристики, определяющие состав исходного продукта x_1 и полуфабрикатов x_2, \dots, x_N , поступающих на вход технологических объектов; $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)$ – всевозможные добавки, поступающие на входы объектов; $u = (u_1, u_2, \dots, u_N)$ – управляющие воздействия, $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$ – внешние помехи, действующие на объекты технологической цепочки. Как видно из рис. 1, технологический процесс представляет собой последовательность локальных объектов.

Последний объект технологической цепочки O_N имеет две выходные переменные. Первая из них y – это параметр, характеризующий качество готового продукта (изделия). Особенностью здесь является то, что параметр y измеряется через значительные промежутки времени и поэтому не может быть использован при управлении процессом. Выходная переменная x_{N+1} – это переменная, косвенно характеризующая готовый продукт, но контролируемая через значительно меньший промежуток времени по сравнению с переменной y . В этом случае управление процессом осуществляется исходя из результатов измерений переменной x_{N+1} .

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:

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

где τ – запаздывание, которое по разным каналам связи может отличаться, но из соображений простоты в тексте мы приняли единое обозначение запаздывания τ .

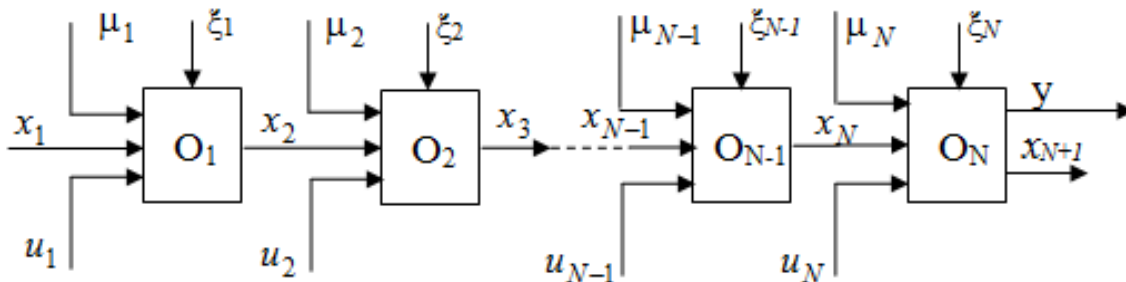


Рис. 1. Общая схема технологического процесса

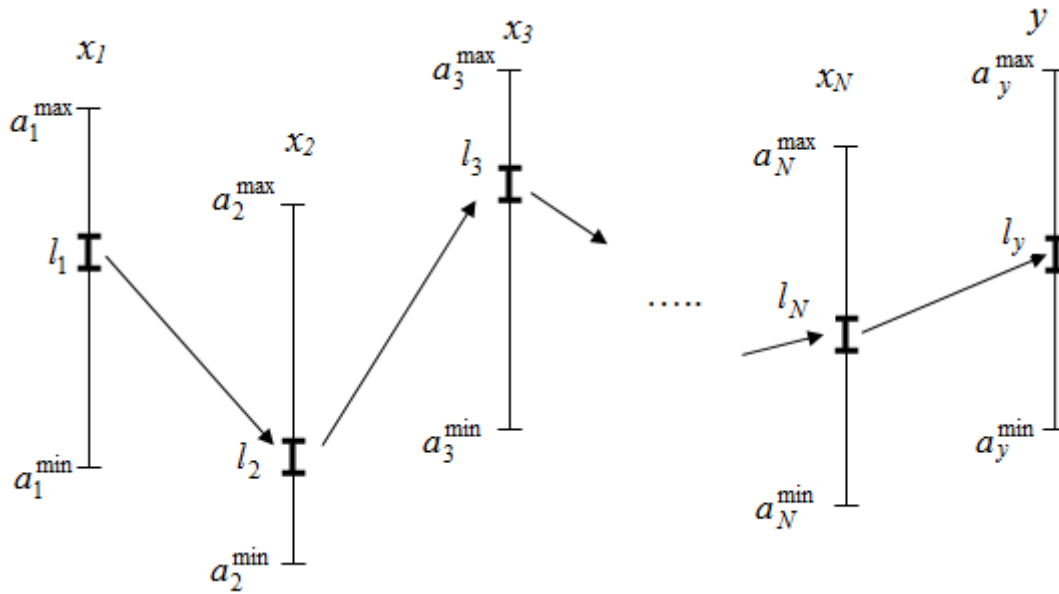


Рис. 2. Диапазоны значений переменных процесса, определяемые технологическим регламентом

Для всякого технологического процесса на производстве установлен технологический регламент, который определяет, в каком диапазоне значений должна находиться величина той или иной переменной процесса. Если значение данного параметра оказывается за пределами этого диапазона, то такое положение классифицируется как брак.

Для многих производств характерен довольно широкий диапазон изменения значений технологических переменных [3]. Как следствие этого, часто имеет место факт получения брака при соблюдении технологического регламента.

Рассмотрим следующую схему (рис. 2). На рис. 2 приняты обозначения: $x_i, i = \overline{1, N}$, – входные и промежуточные переменные процесса; $a_i^{\min}, a_i^{\max}, i = \overline{1, N}$, – минимальная и максимальная границы диапазона допустимых значений переменных, определяемые технологическим регламентом; $l_i, i = \overline{1, N}$, – желаемая область значения переменных; y – выходная переменная всего технологического процесса, определяющая качество готового продукта; a_y^{\min}, a_y^{\max} – границы допустимых значений переменной y , определяемые технологическим регламентом; l_y – требуемая область значения y .

Пусть параметр x_1 (например, температура) принял определенное значение из области $l_1 \in [a_1^{\min}; a_1^{\max}]$. Это значение может задаваться исходя, например, из качества продукта, поступившего на обработку. Заметим, что область l_1 много меньше всего интервала $[a_1^{\min}; a_1^{\max}]$. При этом параметр x_2 (к примеру, давление), статистически зависимый от показателя x_1 , также принимает определенное значение из области $l_2 \in [a_2^{\min}; a_2^{\max}]$. Подобная ситуация происходит и для

всех остальных переменных $x_i, i = \overline{1, N}$, соответствующих своему локальному объекту, а также для переменной процесса y .

На основании этого можно заключить, что для рационального ведения процесса необходимо для каждого показателя x_i определить область $l_i \in [a_i^{\min}; a_i^{\max}]$ исходя из значений x_{i-1} , где $i = \overline{2, N}$. Область значения показателей x определяется границами технологического регламента. Представляется целесообразным осуществлять технологический процесс в соответствии со следующей схемой: если на i -м переделе получены значения переменных, принадлежащих интервалу l_i , то на $(i + 1)$ -м переделе наиболее целесообразно, чтобы соответствующие технологические переменные принадлежали не всему интервалу $[a_{i+1}^{\min}; a_{i+1}^{\max}]$, а его подобласти $l_{i+1} \in [a_{i+1}^{\min}; a_{i+1}^{\max}]$.

Для различных современных производств характерно, что диапазон значений технологических переменных достаточно широк во всех сечениях технологического процесса, хотя и соответствует технологическому регламенту. Поэтому возникает очень непростая задача, связанная с оптимизацией технологического процесса в рамках технологического регламента. Такой характер работы компьютерной системы управления технологическим процессом приведет к уменьшению диапазонов значений параметров на каждом переделе, что, конечно же, повысит качество выпускаемой продукции и позволит избежать ситуаций, связанных с браком.

Изложенная ситуация типична для многих, если не сказать для большинства, наших производств. Здесь возможны два пути, описанные в [3]: «Первый из них состоит в том, чтобы разработать на основе исследований, проведенных для каждого конкретного предприятия, более жесткий технологический регламент

и, естественно, ему следовать... Второй путь состоит в том, чтобы следовать имеющемуся технологическому регламенту, но оптимизировать режим ведения процесса в данном технологическом объекте с учетом фактически проведенной технологической операции на предыдущем объекте».

На промышленных предприятиях во многих случаях имеет место значительная «пестрота» ведения технологического процесса, поэтому первый путь представляется менее эффективным. Реализовать жесткий технологический регламент возможно только на предприятиях с достаточно высоким уровнем культуры производства, а это, прежде всего, определяется качеством технологического оборудования, средством локальной автоматизации, квалификацией работающих и их отношением к делу.

Второй путь значительно более реалистичен, поскольку не требует капитальных затрат на реконструкцию, с одной стороны, а с другой – позволяет существенно повысить качество выпускаемой продукции и уменьшить потери при производстве тех или иных изделий. Для этого необходима разработка и внедрение интеллектуальных компьютерных систем оптимизации технологических режимов внутри технологического регламента. Подобные компьютерные системы оказываются, как правило, экономически эффективными.

Идентификация и управление объектами технологической цепочки. В зависимости от уровня априорной информации об объекте исследования выделяют методы идентификации в «узком» и «широком» смысле [4], иначе говоря, методы параметрической [1] и непараметрической [5] идентификации. Более подробно мы говорили об этом в [6–8].

Методы параметрической идентификации предполагают значительный объем априорных сведений об исследуемом объекте, позволяющий обоснованно выбрать структуру параметрической модели и, соответственно, построить ее. Например, для технологического объекта O_2 параметрическую модель можно записать следующим образом:

$$\hat{x}_2^\alpha = A_1^\alpha(x_1, u_1, \mu_1, \alpha_1), \quad (2)$$

где A_1^α – параметрическая структура для локального объекта O_2 ; α_1 – вектор параметров. Структура A определяется для каждого локального объекта индивидуально. Модель (2) в общем случае можно переписать для произвольного объекта $O_{(i+1)}$ в виде

$$\hat{x}_{i+1}^\alpha = A_i^\alpha(x_i, u_i, \mu_i, \alpha), \quad i = \overline{1, N-1}. \quad (3)$$

В условиях недостатка априорной информации целесообразно использовать методы непараметрической идентификации. В этом случае непараметрическая модель локального объекта O_2 будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{x}_2^s = \frac{\sum_{i=1}^s x_2 \Phi\left(\frac{x_1 - x_1^i}{c_s^{x_1}}\right) \Phi\left(\frac{\mu_1 - \mu_1^i}{c_s^{\mu_1}}\right) \Phi\left(\frac{u_1 - u_1^i}{c_s^{u_1}}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{x_1 - x_1^i}{c_s^{x_1}}\right) \Phi\left(\frac{\mu_1 - \mu_1^i}{c_s^{\mu_1}}\right) \Phi\left(\frac{u_1 - u_1^i}{c_s^{u_1}}\right)}, \quad (4)$$

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 [9].

В общем виде модель (4) можно переписать в виде

$$\hat{x}_{j+1}^s = \frac{\sum_{i=1}^s x_j \Phi\left(\frac{x_j - x_j^i}{c_s^{x_j}}\right) \Phi\left(\frac{\mu_j - \mu_j^i}{c_s^{\mu_j}}\right) \Phi\left(\frac{u_j - u_j^i}{c_s^{u_j}}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{x_j - x_j^i}{c_s^{x_j}}\right) \Phi\left(\frac{\mu_j - \mu_j^i}{c_s^{\mu_j}}\right) \Phi\left(\frac{u_j - u_j^i}{c_s^{u_j}}\right)}, \quad (5)$$

$$j = \overline{N-1}.$$

Как было сказано ранее, мы можем обладать различными объемами априорной информации о каждом локальном объекте технологической цепочки. В одних случаях этого объема будет достаточно для построения параметрической модели типа (3). В других случаях необходимо применять методы идентификации в «широком» смысле (5). Таким образом, система моделей, описывающая поведение всего технологического процесса, будет представлять собой синтез параметрических и непараметрических алгоритмов.

Для управления последовательным технологическим процессом на практике достаточно часто применяют схему управления, представленную на рис. 3, где O – локальные технологические объекты; P – регуляторы; $x_i^*, i = \overline{1, N+1}$, – задающие воздействия, определяемые оператором. Следует заметить, что некоторые компоненты вектора y , в сущности, являются настолько важными, что определяют стоимость полученного продукта при его реализации. Как видно из приведенной схемы, управление не ведется по выходной переменной y , что связано с длительным временем ее измерения.

Недостатком подобной схемы является трудность определения задающих воздействий. На практике чаще всего они достаточно редко меняются, и это изменение находится в полном ведении оператора, который осуществляет эту операцию исходя из имеющегося опыта, конечно же, соблюдая технологический регламент.

Постановка задачи управления во многом зависит от уровня имеющейся априорной информации [10]. Большой интерес представляет развивающаяся на сегодняшний день теория адаптивных и обучающихся систем. Такие системы позволяют осуществлять оптимальное управление сложными объектами в условиях малой априорной информации за счет использования текущей информации, получаемой в результате функционирования объекта управления. Существенный интерес представляет развитие теории дуального управления в условиях малой априорной информации, при которой управляющие воздействия используются не только для приведения объекта к желаемому состоянию, но и для его изучения.

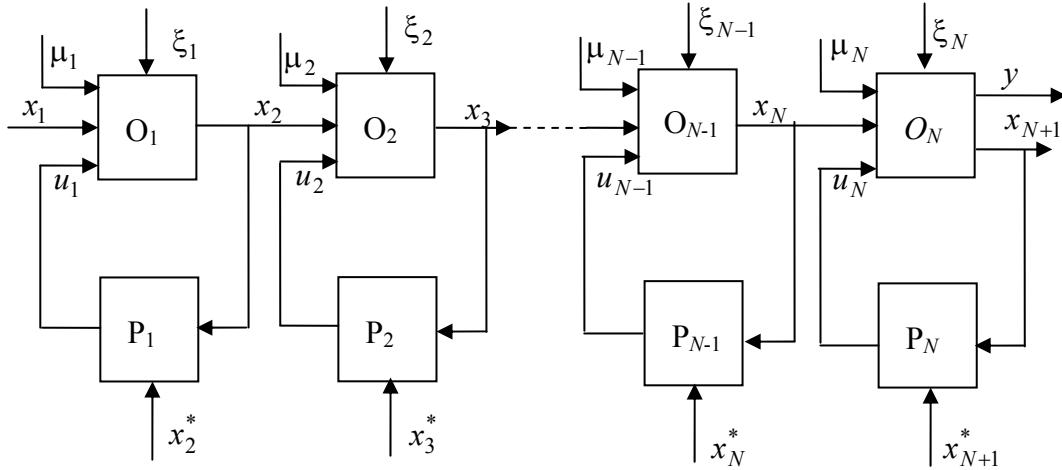


Рис. 3. Существующая схема управления последовательным технологическим процессом

Свое начало теория дуального управления берет от работ А. А. Фельдбаума [11]. В этих работах рассматривался случай байесового уровня априорной информации об объекте исследования, когда параметрическая модель объекта исследования известна с точностью до параметров, также известны плотности распределения внешних воздействий и параметров управляемого объекта. Такой уровень априорной информации на практике не встречается.

В дальнейшем эта теория была развита Я. З. Цыпкиным для условий параметрической неопределенности [1]. Здесь априорные требования к плотности вероятности случайных факторов ослабевают, но требуются знания о параметрической структуре объекта исследования. Параметризация структуры исследуемого объекта требует, тем не менее, значительного объема априорной информации, которого зачастую недостаточно. Неточность при выборе параметрической модели объекта может привести к тому, что адаптивная система утрачивает свои свойства и перестает быть в достаточной степени обучающейся.

В условиях малой априорной информации целесообразно использовать методы непараметрической теории адаптивных систем [12; 13]. Ее отличие от существующей параметрической теории адаптивных систем состоит в отсутствии этапа выбора параметрической структуры модели на основании имеющейся априорной информации. В этом случае требования к априорной информации ослабевают. Здесь требуется информация на качественном уровне (статический или динамический объект, линейный или нелинейный и др.).

Рассмотрим непараметрический алгоритм дуального управления для отдельно взятого локального объекта описанной технологической цепочки, например, для объекта O_2 . Управляющее воздействие в этом случае формируется по следующему закону:

$$u_{s+1}^2 = u_{s+1}^{2*} + \Delta u_{s+1}^2, \quad (6)$$

где u_{s+1}^{2*} представляет собой компоненту, отвечающую за обучение алгоритма; Δu_{s+1}^2 – «поисковый»

шаг. Дуализм данного алгоритма состоит в том, что компонента u_{s+1}^{2*} содержит в себе «знания» об объекте, а компонента Δu_{s+1}^2 – изучающие «поисковые» шаги [14]. В общем случае формулу (6) можно записать как [15]

$$u_{s+1}^i = u_s^{i*} + \Delta u_{s+1}^i, \quad i = \overline{1, N}. \quad (7)$$

Компонента u_s^{2*} находится с использованием непараметрической оценки функции регрессии по наблюдениям и имеет следующий вид (для объекта O_2):

$$u_s^{(2)*} = \frac{\sum_{i=1}^s u_1^i \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(3)*} - x_i^{(3)}}{c_s^{x_3}}\right) \Phi\left(\frac{\mu_{s+1}^{(2)} - \mu_i^{(2)}}{c_s^{\mu_2}}\right) \times \sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(3)*} - x_i^{(3)}}{c_s^{x_3}}\right) \Phi\left(\frac{\mu_{s+1}^{(2)} - \mu_i^{(2)}}{c_s^{\mu_2}}\right) \times \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(2)} - x_i^{(2)}}{c_s^{x_2}}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(2)} - x_i^{(2)}}{c_s^{x_2}}\right) \times \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(2)} - x_i^{(2)}}{c_s^{x_2}}\right)}, \quad (8)$$

где $\Phi(\cdot)$ – ядерная колоколообразная функция; c_s – соответствующие коэффициенты размытости ядра. И ядерная функция, и коэффициенты размытости ядра удовлетворяют некоторым условиям [9]. В общем случае формула (8) имеет вид

$$u_s^{(i)*} = \frac{\sum_{i=1}^s u_1^i \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(j+1)*} - x_i^{(j+1)}}{c_s^{x_{j+1}}}\right) \Phi\left(\frac{\mu_{s+1}^{(j)} - \mu_i^{(j)}}{c_s^{\mu_j}}\right) \times \sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(j+1)*} - x_i^{(j+1)}}{c_s^{x_{j+1}}}\right) \Phi\left(\frac{\mu_{s+1}^{(j)} - \mu_i^{(j)}}{c_s^{\mu_j}}\right) \times \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(j)} - x_i^{(j)}}{c_s^{x_j}}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(j)} - x_i^{(j)}}{c_s^{x_j}}\right) \times \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(j)} - x_i^{(j)}}{c_s^{x_j}}\right)}, \quad j = \overline{1, N}. \quad (9)$$

Второе слагаемое в формуле (6) Δu_{s+1}^2 – «поисковый» шаг, который рассчитывается следующим образом:

$$\Delta u_{s+1}^2 = \gamma(x_{s+1}^{(3)*} - x_s^3), \quad (10)$$

где γ – некоторый коэффициент.

В более общем виде формулу (10) можно записать следующим образом:

$$\Delta u_{s+1}^i = \gamma(x_{s+1}^{(i+1)*} - x_s^{i+1}), i = \overline{1, N}. \quad (11)$$

Результаты исследования данного непараметрического алгоритма дуального управления были приведены в [12–14].

Заключение. Подводя итог вышесказанному, следует отметить, что в статье рассматриваются задачи идентификации и управления технологическим процессом, который представляет собой цепочку локальных объектов. Подобный характер технологических процессов является типичным не только для аэрокосмической отрасли, но и также имеет место в металлургии, энергетике, нефтепереработке и т. д.

Поставлена задача управления внутри технологического регламента. Приведена некоторая алгоритмическая основа построения моделей и алгоритмов управления локальными объектами в условиях как параметрической, так и непараметрической неопределенности. Последнее приближает основные результаты статьи к практической разработке реальных компьютерных систем управления технологическими процессами.

Благодарности. Выражаем искреннюю благодарность научному руководителю профессору А. В. Медведеву за помощь в проведении исследований.

Acknowledgement. We express our sincere gratitude to our scientific supervisor, Prof. A. V. Medvedev, for research assistance.

Библиографические ссылки

1. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М. : Наука, 1968. 400 с.
2. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука, 1983. 173 с.
3. Медведев А. В. Информатизация управления : учеб. пособие / Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 1995. 80 с.
4. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М. : Мир, 1975. 681 с.
5. Кошкин Г. М., Пивен И. Г. Непараметрическая идентификация стохастических объектов. Хабаровск : РАН. Дальневосточное отделение, 2009. 336 с.
6. Корнеева А. А., Чжан Е. А. О непараметрическом моделировании стохастических объектов // Вестник СибГАУ. Вып. 2 (48). 2013. С. 37–42.
7. Корнеева А. А., Сергеева Н. А., Чжан Е. А. О непараметрическом анализе данных в задаче идентификации // Управление, вычислительная техника и информатика : Вестник Томского государственного университета. 2013. Вып. 1 (22). С. 86–96.

8. Korneeva A. A., Sergeeva N. A., Chzhan E. A. About data analysis in nonparametric identification problem // Computer data analysis and modeling. Theoretical and applied stochastics : Proceedings of the tenth Intern. Conf. 2013. Vol. 2. P. 56–60.

9. Надарая Э. А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии. Тбилиси : Изд-во Тбилис. ун-та, 1983. 194 с.

10. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1. Математические модели, динамические характеристики и анализ систем управления / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 656 с.

11. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М. : Физматгиз, 1963. 552 с.

12. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Управление – I // Вестник СибГАУ. 2013. № 2(48). С. 57–63.

13. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Управление – II // Вестник СибГАУ. 2013. № 3(49). С. 85–90.

14. Корнеева А. А., Медведев А. В. Непараметрическое дуальное управление безынерционными системами // Кибернетика и высокие технологии XXI века : Тр. XIII Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2013. С. 250–261.

15. Корнеева А. А. Непараметрическое моделирование конвертерной плавки // Известия вузов. Черная металлургия. Вып. 10. 2013. С. 24–28.

References

1. Tsypkin Ja. Z. *Adaptatsiya i obuchenie v avtomaticheskikh sistemakh* [Adaptation and learning in automatic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 400 p.
2. Medvedev A. V. *Neparametricheskie sistemy adaptatsii* [Nonparametric adaptation systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, 174 p.
3. Medvedev A. V. *Informatizatsiya upravleniya: uchebnoe posobie* [Informatization management: a tutorial]. Krasnoyarsk, SAA Publ., 1995, 80 p.
4. Eykhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniya* [Identity-based control systems]. Moscow, Mir Publ., 1975, 681 p.
5. Koshkin G. M., Piven I. G. *Neparametricheskaya identifikatsiya stokhasticheskikh ob'ektov*. [Nonparametric identification of stochastic objects]. Khabarovsk, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 2009, 336 p.
6. Korneeva A. A., Chzhan E. A. [About nonparametric modeling of stochastic objects]. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 2 (48), p. 37–42 (In Russ.).
7. Korneeva A. A., Sergeeva N. A., Chzhan E. A. [About nonparametric data analysis in the identification problem]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*. 2013, vol. 22, no. 1, p. 86–96 (In Russ.).
8. Korneeva A. A., Sergeeva N. A., Chzhan E. A. About data analysis in nonparametric identification problem. *Proceedings of the tenth international conference "Computer data analysis and modeling. Theoretical and applied stochastics"*. 2013, vol. 2, p. 56–60.

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

10. Pupkova K. A., Yegupov N. D. *Methods of classical and modern control theory. T1: Mathematical models of dynamic characteristics and analysis of control systems* [Metody klassicheskoy and sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. T1: Matematicheskie modeli, dinamicheskie kharakteristiki and analiz sistem upravleniya]. Moscow, MGTY im. N. E. Baumana Publ., 2004, 656 p.

11. Fel'dbaum A. A. *Osnovi teorii optimal'nikh avtomaticheskikh sistem* [Fundamentals of the theory of optimal automatic systems]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963, 552 p.

12. Medvedev A. V. [The theory of non-parametric systems. Control-I]. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 2(48), p. 57–63 (In Russ.).

13. Medvedev A. V. [The theory of non-parametric systems. Control-II]. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 3(49), p. 85–90 (In Russ.).

14. Korneeva A. A., Medvedev A. V. [Nonparametric dual control of inertialess systems]. *Kibernetika i vysokie tekhnologii XXI veka: trudy XIII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Cybernetics and High Technologies of XXI Century: Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference]. Voronezh, 2013, p. 250–261 (In Russ.).

15. Korneeva A. A. [Nonparametric modeling of converter melting]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2013, vol. 10, p. 24–28.